

Derleyen: AYDIN BODUR



ePUB



e-kitap

ELEKTRİK MOTORLARI (1) AC MOTORLAR ve SÜRÜCÜLERİ

TEMEL İLKELER

AC MOTOR TEORİSİ

MOTOR KORUMA RÖLELERİ

GÜÇ ELEKTRONİĞİ KONVERTÖRLERİ

DEĞİŞKEN HIZLI AC SÜRÜCÜLER

YENİ GELİŞMELER



1954

TMMOB

Elektrik Mühendisleri Odası

EMO YAYIN NO: EK/2010/2

Solda kalacak boş sayfa

ELEKTRİK MOTORLARI (1)

AC MOTORLAR ve SÜRÜCÜLERİ

Derleyenler:
Aydın Bodur
Emre Metin

Yayına Hazırlayan:
Aydın Bodur
Hakkı Ünlü



Elektrik Motorları: AC Motorlar ve Sürücüler

Ankara-Kasım 2010
EMO YAYIN NO: EK/2010/2
ISBN : 978-605-01-0043-3

TMMOB ELEKTRİK MÜHENDİSLERİ ODASI
İhlamur Sokak No: 10 • 06420, Kızılay-Ankara
Tel: (0.312) 425 32 72-73 • Faks: (0.312) 417 38 18

621.38132 ELE 2010
Elektrik Mühendisleri Odası
Elektrik Motorları: AC Motorlar ve Sürücüler
EMO --1.bs.--Ankara: EMO Yayınları, 2010, 370 s.;
(EK/2010/2)
ISBN 978-605-01-0043-3
Elektrik Motorları, Sürücüler

Dizgi ve Tasarım
Elektrik Mühendisleri Odası

© Bu eserin yayın hakkı ELEKTRİK MÜHENDİSLERİ ODASI'na aittir. Kitaptaki bilgiler kaynak gösterilerek kullanılabilir

İçindekiler

1	TEMEL İLKELER	9
1.1	Giriş.....	9
1.1.1	Elektrikle ilgili temel kavramlar	9
1.1.2	Transformatör	11
1.1.3	İdeal transformatör	13
1.1.4	Transformatör tipleri	13
1.1.5	Tek-fazlı transformatörün bağlantıları	15
1.1.6	3-fazlı transformatörler	16
1.1.7	Transformatörlerin deneyden geçirilmesi	20
1.2	Elektrikli makinaların temel ilkeleri.....	21
1.2.1	Elektromekanik enerji dönüşümü	21
1.2.2	Elektromanyetizmanın temel ilkeleri	23
1.2.3	Motorun temel çalışma ilkesi	24
1.2.4	Jeneratörün temel çalışma ilkesi	25
1.2.5	İdeal makinalar	26
1.2.6	Elektrikli makinaların temel çalışma ilkeleri	27
1.2.7	Elektrikli makina tipleri	28
1.2.8	Elektrikli makinaların temel karakteristikleri.....	31
1.3	AC güç sistemleri.....	31
1.3.1	Tek-fazlı güç sistemi.....	31
1.3.2	3-fazlı güç sistemleri.....	32
1.3.3	3-fazlı bir sistemdeki gücün ölçülmesi.....	34
1.4	Arıza aramada kullanılan sayaçlar	36

2	AC MOTOR TEORİSİ AC MOTORUN YAPISI VE BAKIMI	37
----------	---	-----------

2.1	Giriş.....	37
2.2	Üç-faz AC motorlarla ilgili temel bilgiler	37
2.2.1	3-fazlı endüksiyon motorunun çalışma ilkesi.....	38
2.2.2	Endüksiyon motorunun hız-tork karakteristikleri	39
2.2.3	Endüksiyon motorunun çalıştırılması	41
2.2.4	Endüksiyon motor kayıpları ve verim	41
	Rotor bakır kaybı	42
	Rotor çıkışı	42
	Motor verimi	42
2.2.5	3-fazlı senkron motorun çalışma ilkesi	42
2.2.6	“V” eğrileri	44
2.2.7	Senkron motora ilişkin kayıplar ve verim	46
2.2.8	Senkron motorların bir nokta çevresinde dalgalanması	47
2.2.9	3-fazlı sargılı rotorlu motorun çalışma ilkesi	48
2.2.10	Sargılı rotorlu motorun çalıştırılması	49
2.3	Tek-fazlı AC motorlara ilişkin temel bilgiler.....	50



2.3.1	Tek-fazlı AC motor tipleri	50
2.3.2	Tek-fazlı endüksiyon motoru tipleri	51
2.4	Motor mahfazaları	54
2.4.1	Motor mahfazaları	54
2.4.2	Motor isim plâkası	55
2.5	Motor terminal tanımı ve bağlantı diyagramı	56
2.6	Motor beyan değerleri ve yalıtım tipleri	57
2.6.1	Motor beyan değerleri	57
2.6.2	Motor yalıtımı	57
2.6.3	AC motor bağlantıları	59
2.7	Motorun ileri ve geri yönde çalıştırılması	60
2.7.1	Endüksiyon motoru	60
2.8	Motor frenleme metotları	62
2.8.1	Elektrik motorlarına ilişkin frenleme metotları	63
2.8.2	Endüksiyon motoru frenleme metotları	65
2.8.3	Senkron motor frenleme metotları	70
2.9	Bir motora ilişkin ölçümler	71
2.10	Motor arızaları ve motor ömrünün uzatılması için kullanılan metotlar	71
2.11	Motor kontrol sorunu – çözüm çizelgesi	72
2.12	Motor starter kontrol çizelgesi	75

3 ÜÇ-FAZLI AC ENDÜKSİYON MOTORLARI

78

3.1	Giriş	79
3.2	Temel yapı	80
3.2.1	Stator	80
3.2.2	Rotor	81
3.2.3	Diğer kısımlar	81
3.3	Çalışma ilkeleri	82
3.4	Eş değer devre	86
3.5	Elektriksel ve mekanik performans	89
3.6	Motorun ivmelenmesi	93
3.7	AC endüksiyon jeneratörünün performansı	96
3.8	Elektrik motorlarının verimi	97
3.9	AC endüksiyon motorlarının beyan değerleri	98
3.10	Elektrik motorunun görev çevrimi	101
3.11	Elektrik motorlarının soğutulması ve havalandırılması (IC)	107
3.12	Motor mahfazalarının koruma derecesi (IP)	110
3.13	AC endüksiyon motorlarının yapılışı ve montajı	110
3.14	Yoğuşma-önleyici ısıtıcılar [<i>Anti-condensation heaters</i>]	113
3.15	AC endüksiyon motorların start edilmesine ilişkin metotlar	113
3.16	Motor seçimi	114

4 MOTOR KORUMA RÖLELERİ

117

4.1	Giriş	117
4.2	Eski motor koruma röleleri	120
4.3	Kararlı durum sıcaklık artışı	122
4.4	Termal zaman sabiti	123

4.5	Başlatma ve durdurma şartlarındaki motor akımı.....	124
4.6	Motorların durdurulması.....	124
4.7	Dengeli olmayan besleme gerilimleri.....	128
4.8	Dizili akımların belirlenmesi.....	129
4.9	Dengeli olmayan akımlardan dolayı makinanın beyan değerlerinin düşürülmesi.....	129
4.10	Stator sargılarındaki elektriksel arızalar, topraklama hataları, faz-faz arızaları.....	130
4.11	Genel.....	132

5 GÜÇ ELEKTRONİĞİ KONVERTÖRLERİ

133

5.1	Giriş.....	133
5.2	Tanımlar.....	134
5.3	Güç diyotları.....	136
5.4	Güç tristörleri.....	140
5.5	Komütasyon.....	143
5.6	Güç elektroniği doğrultucuları (AC/DC konvertörleri).....	144
5.6.1	Hat anahtarlamalı diyotlu doğrultucu köprüsü.....	149
5.6.2	Hat anahtarlamalı tristörlü doğrultucu köprüsü.....	154
5.6.3	Hat anahtarlamalı konvertörlere ilişkin sınırlamalar.....	161
5.3.7	Hat anahtarlamalı doğrultuculara ilişkin uygulamalar.....	162
5.7	Kapı anahtarlamalı invertör (DC/AC konvertör).....	166
5.7.1	Tek-fazlı kare dalgalı invertör.....	166
5.7.2	Tek-fazlı Darbe Genlik Modülasyon (PWM) invertörü.....	170
5.7.3	Üç-fazlı invertör.....	174
5.8	Kapı kontrollü güç elektroniği cihazları.....	178
5.8.1	Kapı-sinyalli Tristör (GTO).....	178
5.8.2	Alan Kontrollü Tristörler (FCT).....	179
5.8.3	Bipolar Jonksiyonlu Güç Transistörleri (BJT).....	180
5.8.4	Alan Etkili Transistör (FET).....	183
5.8.5	Yalıtımlı Kapılı Bipolar Transistör (IGBT).....	186
5.9	Diğer güç konvertörü devre bileşenleri.....	189

6 AC KONVERTÖR VE MOTORUN KORUNMASI

191

6.1	Giriş.....	191
6.2	AC frekans konvertör koruma devreleri.....	191
6.2.1	AC ve DC Düşük-Gerilim koruması.....	192
6.2.2	AC ve DC Bara Aşırı-Gerilim koruması.....	194
6.2.3	Çıkış aşırı-akım koruması.....	196
6.2.4	Çıkış topraklama-hatasına karşı koruma.....	198
6.2.5	Isı alıcının aşırı sıcaklığa karşı korunması.....	200
6.2.6	Motorun aşırı termal yükten korunması.....	200
6.2.7	Genel koruma ve teşhis.....	201
6.3	Operatör bilgisi ve arıza teşhisi.....	202
6.4	Elektrik motorunun korunması.....	205



6.5	Termal aşırı yük koruması – akım algılayıcıları	207
6.6	Termal aşırı-yük koruması - doğrudan sıcaklık algılama	208

7 DEĞİŞKEN HIZLI AC SÜRÜCÜLERE İLİŞKİN KONTROL SİSTEMLERİ 211

7.1	Genel kontrol sistemi	211
7.2	Kontrol sistemi için kullanılan güç kaynağı	213
7.3	DC bara şarj kontrol sistemi	215
7.4	AC konvertörler için PWM doğrultucu	218
7.5	Değişken hızlı sürücü kontrol döngüleri	220
7.5.1	Açık-döngülü kontrol	221
7.5.2	Kapalı döngülü kontrol	221
7.5.3	Ardışık kapalı-döngülü kontrol	224
7.6	AC sürücüler için vektör kontrolü	226
7.6.1	Temel sabit V/f sürücüler	230
7.6.2	Algılayıcısız V/f akı-vektör sürücüleri (Açık-döngülü Vektör)	232
7.6.3	Alana dayalı kapalı-döngülü vektör sürücüleri	233
7.7	Değişken hızlı AC sürücülere ilişkin akım geri beslemesi	236
7.7.1	Değişken hızlı sürücülerde akımın ölçülmesine ilişkin metotlar	236
7.7.2	Genel amaçlı VVVF sürücülerde akım geri beslemesi	237
7.7.3	Yüksek performanslı vektör sürücülerde akım geri beslemesi	238
7.7.4	DC bara akım geri beslemesi	238
7.8	Motordan gelen hız geri beslemesi	239

8 DEĞİŞKEN HIZLI SÜRÜCÜ UYGULAMALARI İÇİN AC KONVERTÖRLERİN SEÇİLMESİ 240

8.1	Giriş	240
8.2	Temel seçim prosedürü	242
8.3	Konvertörle beslenen sincap kafesli motorların yüklenme özelliği	243
8.4	Sabit güç bölgesinde çalışma	246
8.5	Makina yükünün yapısı	247
8.5.1	Yük torku	248
8.5.2	Değişken torklu makina yükleri	251
8.5.3	Sabit torklu makina yükleri	252
8.5.4	Hız aralığı	254
8.5.5	Makina yükünün inerşiası	256
8.6	Motorun çalışmaya başlatılmasına ilişkin şartlar	260
8.7	Motorun durdurulmasına ilişkin şartlar	261
8.7.1	DC injeksiyonlu frenleme	263
8.7.2	Motor aşırı-akı frenlemesi	264
8.7.3	Dinamik frenleme	265
8.7.4	Rejeneratif frenleme	268
8.8	Hızın, torkun ve doğruluğun kontrol edilmesi	270
8.9	Motor ve konvertör için doğru büyüklüğün seçilmesi	271
8.10	Seçim prosedürlerinin özeti	273

9 DEĞİŞKEN HIZLI AC SÜRÜCÜLERİN KURULMASI VE İŞLETMEYE ALINMASI

278

9.1 Genel kurulum ve çevre şartları.....	278
9.1.1 Genel güvenlik tavsiyeleri.....	278
9.1.2 Tehlikeli bölgeler.....	279
9.1.3 Kurulumla ilişkin çevre şartları.....	279
9.1.4 Yüksek sıcaklık için beyan değerlerin düşürülmesi	279
9.1.4 Denizden yüksek yerlerde çalışma durumu için beyan değerlerin düşürülmesi	280
9.2 Güç kaynağı bağlantıları ve topraklama şartları	281
9.2.1 Güç kaynağı kabloları	282
9.2.2 Konvertör ile motor arasındaki kablolar	283
9.2.3 Kontrol kabloları	284
9.2.4 Topraklama şartları.....	284
9.2.5 Yaygın kablolama hataları	284
9.3 AC sürücülerin başlatma/durdurma kontrolü	285
9.4 AC konvertörlerin metal mahfazalara yerleştirilmesi	288
9.4.1 Mahfazanın boyutlarının hesaplanması	289
9.4.2 Mahfazaların havalandırılması	291
9.4.3 Alternatif montaj düzenlemeleri	293
9.5 Değişken hızlı sürücüler için kontrol kabloları	294
9.5.1 PLC kontrol sistemlerine ilişkin doğrudan bağlanan bağlantılar	296
9.5.2 PLC kontrol sistemleriyle seri haberleşme	297
9.5.3 Ara yüz konvertörleri.....	298
9.5.4 Yerel alan ağları	299
9.6 Değişken hızlı sürücülerin işletmeye alınması	300
9.6.1 İşletmeye almanın nedenleri.....	300
9.6.2 Doğru uygulama ayarlarının seçilmesi	301
9.6.3 Doğru parametre ayarlarının seçilmesi	301

10 ÖZEL BAŞLIKLAR VE YENİ GELİŞMELER

303

10.1 Yumuşak anahtarlama.....	303
10.2 Matris konvertör	306

11 EKLER

308

EK A MOTOR KORUMASI – DOĞRUDAN SICAKLIK ALGILAMA

308

A.1 Giriş.....	308
A.2 Mikroterm (Termostat)	308
A.3 Termistör algılayıcıları ve termistör koruma röleleri	309



A.4 Isıl çift (termokuplür)	313
A.5 Direnç Sıcaklık Detektörü (RTD)	315

EK B AKIM ÖLÇME TRANSDÜSERLERİ

318

B.1 Akım şöntü	318
B.2 Hall-etkili algılayıcının çalışma ilkesi.....	318
B.2.1 Açık-döngülü hall-etkili algılayıcı	319
B.2.2 Kapalı-döngülü hall-etkili algılayıcı	320

EK C HIZ ÖLÇME TRANSDÜSERLERİ 320

C.1 Analog hız transdüserleri	320
C.2 Sayısal dönme hızı ve konum transdüserleri.....	322
C.2.1 Artımlı döner enkoder	323
C.2.2 Mutlak döner enkoder	326
C.2.3 Çıkış Ara Yüz Bağlantıları.....	330

EK D ULUSLARARASI STANDARTLAR 332

D.1 Giriş.....	332
D.2 Uluslararası Standartlar	332
D.3 Avrupa Standartları	333
D.4 Amerikan Standartları	334
D.5 Diğer Ulusal Standartlar.....	334
D.6 Güney Afrika Standartları	334

EK E AC KAFESLİ MOTORLARIN VERİMİNİN VE KAYIPLARININ BELİRLENMESİ

336

E.1 Giriş.....	336
E.2 Kayıplar ve verim	337
E.3 Dinamometreler	347
E.4 Daha Büyük Motorların Veriminin Belirlenmesi	359
E.2 Özet.....	359

EK F DEĞİŞKEN HIZLI AC SÜRÜCÜLERLE İLGİLİ ORTAK TERİMLER SÖZLÜĞÜ

361

1 Temel İlkeler

Amaçlar

- Elektrikle ilgili temel kavramları açıklamak
- Transformatörün temel kavramlarını tanımlamak
- Tek faz güce ilişkin kavramları açıklamak
- 3-faz güce ilişkin kavramları açıklamak
- Dönen elektrikli makinalara ilişkin kavramları açıklamak

1.1 Giriş

Endüstriyel elektriğin önemli bir kısmı, tek-fazlı ve üç-fazlı transformatörlerle, AC ve DC makinalarla ilgilidir. Bu bağlamda, elektriksel devreleri ve bu devrelerin yapısını, tasarımını, test edilmesini, çalıştırılmasını ve bakımının yapılmasını inceleyeceğiz. Elektrikli cihazlardaki ve kontrol devrelerindeki arızaların aranması için, elektrikli cihazın temel çalışma ilkelerinin anlaşılması önemlidir. Aşağıdaki kısımlarda elektrikle ilgili temel kavramlar açıklanacaktır.

1.1.1 Elektrikle ilgili temel kavramlar

Tesislerde, farklı cihazların mekanik hareketi elektrik motorları tarafından sağlanır. Elektrik gücü, dahili jeneratörlerden ya da başka kaynaklardan elde edilir ve kullanılabilir gerilim seviyeleri elde etmek için transformatörler vasıtasıyla dağıtılır.

Elektrik iki biçimde olabilir:

- AC (Alternatif Akım)
- DC (Doğru Akım)

Elektrikli cihazlar, AC/DC güçle çalıştırılabilir. Cihaza ait enerji kaynağının seçilmesi, uygulama şartlarına bağlıdır. Her enerji kaynağı, artılara ve eksilere sahiptir.

Endüstriyel AC gerilim seviyeleri, kabaca 50 Hz ilâ 60 Hz'de L.V. (Alçak Gerilim) ve H.V. (Yüksek Gerilim) olarak tanımlanır.

Bir elektrik devresi, kullanmakta olduğu enerji biçiminden bağımsız olarak üç temel bileşene sahiptir:

- Gerilim (volt)
- Amper (Amp)
- Direnç (Ohm)

Gerilim, elektron akışına neden olan elektriksel potansiyel farkı olarak tanımlanır.

Akım, elektron akışı olarak tanımlanır ve Amper cinsinden ölçülür.

Direnç, elektron akışına karşı koyma ölçüsüdür ve Ohm cinsinden ölçülür.

Bu bileşenler, Ohm Kanunu'na göre ilişkilendirilir, buna göre bu bileşenler, aşağıdaki gibi bir ilişkiye sahiptir:

$$V = I \times R$$

Burada

V Gerilim

I Akım

R Direnç

Güç

DC devrelerde, güç (watt) gerilim ile akımın çarpımına eşittir.

$$P = V \times I$$

AC devreler için, bu formül, tamamen rezistif devreler için geçerlidir, ancak, aşağıdaki AC devre tipleri için, güç, sadece gerilim ile akımın çarpımı değildir.

Görünen güç (VA ya da kVA), gerilim ile amperin çarpımıdır. Görünen güç, gerçek ve reaktif güç dahil bir devreye sağlanan toplam güçtür.

Gerçek güç, işe çevrilebilen güçtür ve watt cinsinden ölçülür.

Reaktif güç: Devre, indüktif ya da kapasitif tipteyse, reaktif bileşen, enerji harcar ve bu enerji, işe çevrilemez. Bu güç, reaktif güç olarak adlandırılır ve VAR birimiyle gösterilir.

Güçler arasındaki ilişki

Görünen Güç (VA) = $V \times A$

$$\text{Gerçek Güç (Watt)} = VA \times \cos \phi$$

$$\text{Reaktif Güç (VAR)} = VA \times \sin \phi$$

Güç faktörü

Güç faktörü, gerçek gücün görünen güce oranı olarak tanımlanır. Alabileceği maksimum değer, % 1 ya da % 100'dür, tamamen rezistif bir devrede bu değer elde edilebilir.

$$\text{Güç faktörü} = \frac{\text{Gerçek güç (Watt)}}{\text{Görünen güç (VA)}} = \frac{\text{kW}}{\text{kVA}}$$

Gerilim regülasyon yüzdesi

$$\% \text{ Reg} = \frac{(\text{Yüksüz durum gerilimi} - \text{Tam yük gerilimi})}{\text{Tam yük gerilimi}}$$

Elektrik enerjisi

Bu, bir saatte kullanılan elektrik enerjisi olarak hesaplanır ve aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\text{Kilowatt-saat} = \text{kW} \times h$$

Burada

kW kilowatt

h saat

Devre tipleri

Sadece iki elektrik devre tipi mevcuttur, Seri devre ve Paralel devre.

- *Seri devre*, bir serideki elemanların aynı akımı taşıdığı bir devre olarak tanımlanır, her bir eleman üzerindeki gerilim düşüşü farklı olabilir.
- *Paralel devre*, paralel bağlanan elemanların aynı gerilime sahip olduğu bir devre olarak tanımlanır, ancak her bir eleman üzerindeki akımlar farklı olabilir.

1.1.2 Transformatör

Transformatör, gerilimi bir seviyeden diğerine dönüştüren bir cihazdır. Transformatörler, güç sistemlerinde geniş çaplı olarak kullanılmaktadır. Transformatörlerin yardımıyla, ekonomik bir iletim geriliminde gücü iletmek ve ekonomik etkin bir gerilimde gücü kullanmak mümkündür.

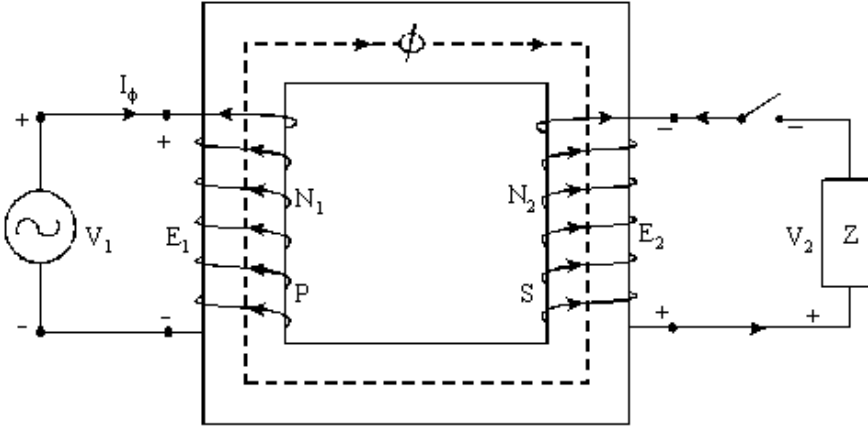
Transformatörün temel çalışma ilkesi

Transformatörün çalışması, manyetik olarak eşleşmiş bobinler arasındaki ortak EMK endüksiyonuna bağlıdır.

AC akım, bir bobinden geçer, böylece akımın geçtiği bobin, primer bobin olur ve manyetik alan üretir. Manyetik alan çizgileri, sekonder bobin olarak adlandırılan ikinci bobinden geçirilir, böylece bir AC potansiyeli indüklenir. Çelik levhalar, düşük manyetik dirençli sürekli bir yol sağlar.

Tipik olarak, kaynağa bağlanan bobin, primer bobin olarak ve yüke bağlanan bobin, sekonder bobin olarak adlandırılır.

Tek-fazlı bir transformatörün şematik diyagramı, Şekil 1.1'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1 – Tek-fazlı bir transformatörün şematik diyagramı

Tek-fazlı bir transformatör, temelde iki sargının – primer ve sekonder sargıların üzerine sarıldığı manyetik bir çekirdekten oluşur. Primer sargı, besleme gerilimi V1 olan bir AC kaynağı ile beslenir. Primer sargıda akan I_Σ akımı, zamana göre değişen bir akı üretir. Bu akı, her iki sargıyla da birleşir ve indüklenen EMK'ları oluşturur. Primer sargıda oluşan EMK, uygulanan gerilime eşittir ve ters yöndedir (kayıplar ihmal edilince). Bu ortak akıdan dolayı, sekonder sargıda da EMK oluşur. Oluşan EMK'nın büyüklüğü, transformatörün primer ve sekonder sargılarındaki tur sayılarının oranına bağlıdır.

İndüklenen potansiyel

Primer bobindeki potansiyelle sekonder bobinde endüklenen potansiyel arasında çok düz ve basit bir ilişki vardır.

Primer potansiyelin sekonder potansiyele oranı, her birindeki tur sayısının oranına eşittir ve aşağıdaki şekilde gösterilir:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

Yükseltici [step-up] ve indirici [step-down] transformatör kavramları, benzer bir ilişkiye sahiptir.

Yükseltici transformatörde $N_2 > N_1$ olup çıkış gerilimi artırılır ve indirici bir transformatörde $N_2 < N_1$ olup çıkış gerilimi azaltılır.

İndüklenen akım

Transformatör yüklendiğinde, akım, gerilimlerle ters orantılıdır ve aşağıdaki şekilde gösterilir:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

Bir transformatörün EMK denklemi:

Primer sargıda indüklenen EMK'nın R.M.S. değeri aşağıdaki şekildedir:

$$E_1 = 4,44 \times f \times N_1 \times \Phi_m$$

Sekonder sargıda indüklenen EMK'nın R.M.S. değeri aşağıdaki şekildedir:

$$E_2 = 4,44 \times f \times N_2 \times \Phi_m$$

Burada

- N_1 Primer sargıdaki tur sayısı
- N_2 Sekonder sargıdaki tur sayısı
- Φ_m Çekirdekdeki maksimum akı
- f AC girişin Hz cinsinden frekansı

1.1.3 İdeal transformatör

İdeal bir transformatör söz konusu olduğunda, aşağıdaki varsayımlar geçerlidir:

- Enerji kaybı ya da kazancı yoktur.
- Sargının ohm direnci yoktur.
- Üretilen akı, transformatörün çekirdeğinde kalır, her iki sargıyı da tamamen birleştirir, başka bir deyişle, akı kaçağı yoktur.
- Bu nedenle, I^2R kaybı ve çekirdek kaybı yoktur.
- Çekirdeğin geçirgenliği yüksek seviyededir, böylece akıyı oluşturmak için gerekli olan mıknatıslanma akımı ihmal edilebilir seviyededir.
- Burgaç akımı [*eddy current*] ve histeriz kayıpları ihmal edilebilir seviyededir.

1.1.4 Transformatör tipleri

- Yapısına göre:

- *Çekirdek tipi:* Çekirdeğin büyük bir kısmı sargılar tarafından sarılmıştır.
- *Kabuk tipi:* Sargıların büyük bir kısmı çekirdek tarafından sarılmıştır.
- Soğutma tipine göre:
 - *Yağlı kendinden-soğutmalı:* Küçük ve orta büyüklükteki dağıtım transformatörleri
 - *Yağlı su-soğutmalı:* Yüksek gerilimli iletim hatlı bina-dışı transformatörleri
 - *Hava üfleli tip:* Alçak gerilim transformatörleri
- Uygulamaya göre:
 - *Güç transformatörü:* Bunlar, şartlara göre gerilim ve akım seviyeleri değiştirilebilen büyük transformatörlerdir. Güç transformatörleri, genelde dağıtım ya da iletim hatlarında kullanılır.
 - *Potansiyel transformatörü:* Bu transformatörler, yüksek gerilimleri ölçmek için düşük kademeli voltmetrelerle birlikte kullanılan duyarlı gerilimli indirici transformatörlerdir.
 - *Akım transformatörü:* Bu transformatörler, akım taşıyan iletkenin primer transformatör olarak işlem gördüğü, akımı ölçmek için kullanılan transformatörlerdir. Bu transformatör, cihazı yüksek gerilim hattından ayırır ve akımı, belirli bir oranda düşürür.
 - *Yalıtma transformatörü [Isolation transformer]* Bu transformatörler, gerilim seviyesini ya da akım seviyesini değiştirmeksizin iki farklı devreyi yalıtmaq için kullanılır.

Transformatörler hakkında unutulmaması gereken birkaç önemli nokta aşağıdadır:

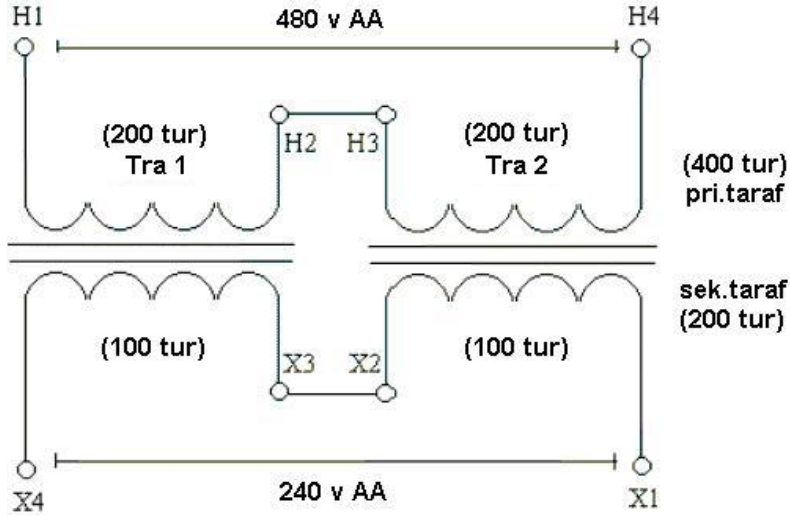
- Bir AC devreden diğer AC devreye enerji iletmek için kullanılırlar.
- Her iki devrede de frekans aynı kalır.
- Hiçbir transformatör ideal değildir.
- Ölçme uygulamalarında da kullanılırlar (akım transformatörü (CT), potansiyel transformatörü (PT)).
- İki farklı devrenin yalıtılması için kullanılırlar (yalıtma transformatörleri)
- Transformatör gücü, VA cinsinden ifade edilir (volt amper).
- Transformatör polaritesi, noktalarla gösterilir. Primer ve sekonder sargılar, diyagramdaki üst ve alt kısımlarda

noktalara sahipse, bu, fazlar arasında ters bir ilişki olduğunu gösterir.

1.1.5 Tek-fazlı transformatörün bağlantıları

Uygulama şartlarına bağlı olarak, iki ya da daha fazla transformatörün, seri ya da paralel devrelerde bağlanması gerekebilir. Bu gibi bağlantılar, aşağıdaki diyagram örneklerinde gösterildiği gibi gerçekleştirilebilir:

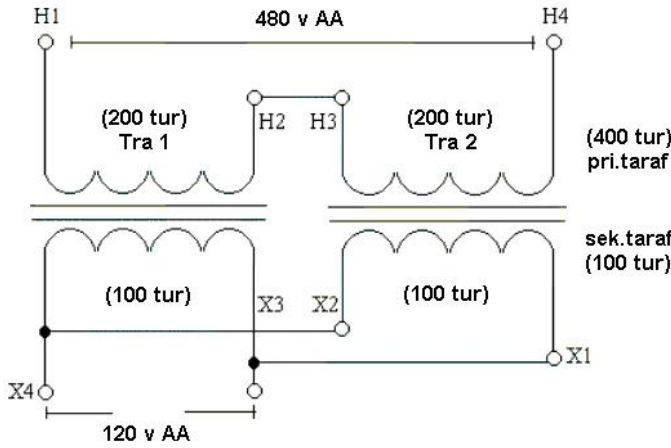
Tek-fazlı iki transformatörün seri olarak bağlanması



Şekil 1.2 – Tek-fazlı iki transformatörlerin seri bağlantısı

Yukarıda Şekil 1.2’de gösterildiği gibi, iki transformatör seri olarak bağlanabilir. Her ikisi de yukarıdaki gibi bağlanırsa, her bir transformatörün gerilim beyan değerinin ikisi uygulanabilir. Akım beyan değerleri eşit olmalı ve yük akımını taşıyacak kadar yüksek seviyede olmalıdır. Polarite akılda tutularak transformatör sargılarını bağlamak için gerekli önlemler alınmalıdır. Yukarıdaki örnekte, toplam primer tur sayısının toplam sekonder tur sayısına oranı 2:1’dir; bu da yarım gerilime neden olur.

Tek-fazlı iki transformatörün paralel bağlantısı



Şekil 1.3 – Tek-fazlı iki transformatörün paralel bağlantısı

Yukarıda Şekil 1.3'te gösterildiği gibi, primer taraftaki iki transformatör seri olarak bağlanırken, sekonder taraftakiler paralel olarak bağlanır.

Primer tarafta, tur sayısı eklenirken, sekonder tarafta, paralel olarak bağlandıkları için tur sayısı aynı kalır.

Bu konfigürasyon tipi, özellikle, yedek çalışan tek bir transformatöre ihtiyaç duyulan uygulamalar için faydalıdır. İlâve olarak, bu konfigürasyon tipi, tek bir transformatöre ilâve yükün eklenebildiği uygulamalar için faydalıdır. Bu gibi durumlarda, eski transformatörü yerinden çıkarmak yerine, mevcut transformatöre paralel olarak bir transformatörün daha eklenmesi, KVA beyan değerlerinin artırılmasını sağlar.

L.V.D.T. (Lineer Gerilim Diferansiyel Transformatörü) temel transformatörün ve seri bağlantısının uygulamadaki en iyi örneğidir.

1.1.6 3-fazlı transformatörler

Büyük-ölçekli elektrik gücü üretimi, genelde üç fazlıdır (gerilimler 11 ya da 32 kvolttur). Bu gibi yüksek 3-fazlı gerilim iletimi ve dağıtımı için, 3-fazlı yükseltici ve indirici transformatörlerin kullanılması gereklidir.

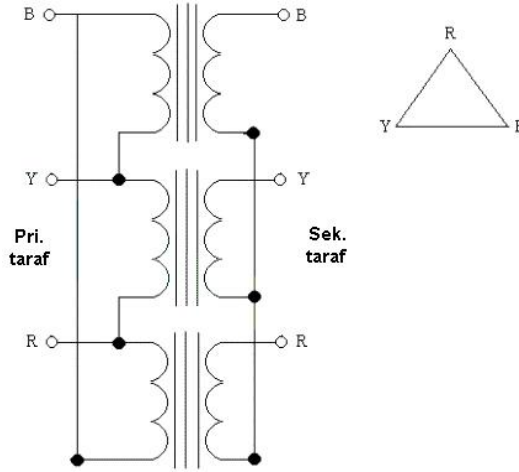
Eskiden tek bir 3-fazlı transformatörün yerine üç tane tek-fazlı transformatörün kullanılması yaygın bir uygulamaydı. Ancak, 3-fazlı transformatörün geliştirilmesiyle birlikte, mekandan ve paradan tasarruf sağlanmıştır.

Halen, yapısal açıdan bakıldığında, 3-fazlı bir transformatör, üç tane bacağa sahip bir çekirdeğe monte edilen üç primer ve üç sekonder sargıya sahip üç tane tek-fazlı transformatörün bir kombinasyonudur. Yaygın olarak kullanılan 3-faz şunlardır:

- 3-fazlı üç telli (Üçgen - Delta)
- 3-fazlı dört telli (Yıldız)

Üçgen bağlantı

Üçgen bağlantı, uç-uca bağlanan ve elektriksel olarak aralarında 120 derece fark olan 3-fazlı sargılardan oluşur. Genel olarak, 3-telli üçgen sistem, dengeli olmayan bir yük sistemi için kullanılır. 3-fazlı gerilimler, yük dengesizliğinden bağımsız olarak sabit kalır.



Şekil 1.4 – Primer taraftaki 3-fazlı transformatör üçgen bağlantısı

Hat ve faz gerilimleri arasındaki ilişki:

$$V_L = V_{ph}$$

Burada

V_L Hat gerilimi

V_{ph} Faz gerilimi

Hat akımları ile faz akımları arasındaki ilişki:

$$I_L = \sqrt{3} I_{ph}$$

Burada

I_L Hat akımı

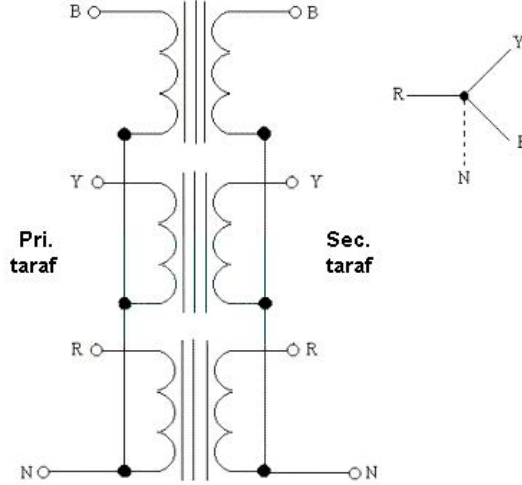
I_{ph} Faz akımı

3-Fazlı 4-telli yıldız bağlantılar

Yıldız bağlantı tipi, faz başına minimum tur sayısı sağlar (faz gerilimi, hat geriliminin $1/\sqrt{3}$ 'ü kadar olduğu için), bu nedenle en ekonomik

bağlantı tipidir. Bir uçtaki her bir sargı, nötr noktası gibi ortak bir uca bağlanır, bu nedenle, toplam dört tel mevcuttur.

Bu bağlantı, sadece yükün dengeli olduğu durumda yeterli şekilde çalışır. Nötre dengeli olmayan bir yük bağlandığında, nötr noktası kayacak ve dengeli olmayan faz gerilimlerine neden olacaktır.



Şekil 1.5 – 3-Fazlı 4-telli transformatör yıldız bağlantısı

Hat gerilimleri ile faz gerilimleri arasındaki ilişki:

$$V_L = \sqrt{3} V_{ph}$$

Burada

V_L Hat gerilimi

V_{ph} Faz gerilimi

Hat akımları ile faz akımları arasındaki ilişki:

$$I_L = I_{ph}$$

Burada

I_L Hat akımı

I_{ph} Faz akımı

Bir transformatörün kW cinsinden çıkış gücü aşağıdaki şekildedir:

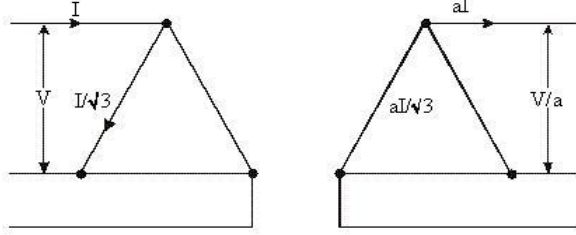
$$P = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \cos\phi [W]$$

Burada

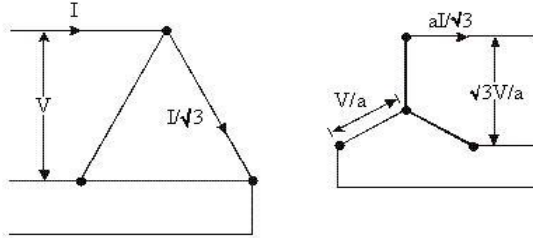
V_L Hat gerilimi

I_L Hat akımı

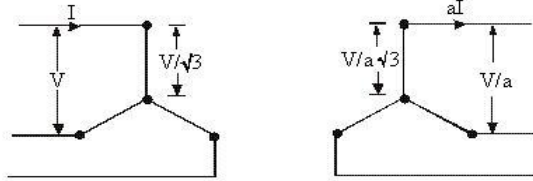
Cos ϕ Güç faktörü



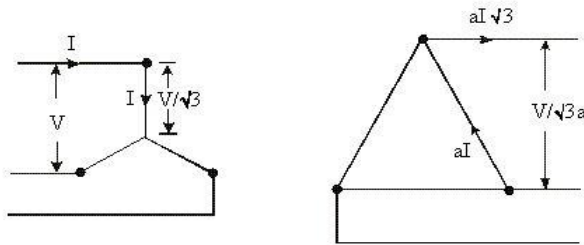
(A) Delta-Delta Bağlantısı



(B) Delta-Yıldız Bağlantısı



(C) Yıldız-Yıldız Bağlantısı



(D) Yıldız-Delta Bağlantısı

Şekil 1.6 – 3-fazlı transformatörlere ilişkin bağlantı tipleri

Mümkün olan yıldız ve üçgen kombinasyonları

Üç tane tek-fazlı transformatörün ya da 3-fazlı bir transformatörün primer ve sekonder sargıları aşağıdaki şekillerde bağlanabilir:

- Primer üçgen – sekonder üçgen
- Primer üçgen – sekonder yıldız

- Primer yıldız – sekonder yıldız
- Primer yıldız – sekonder üçgen

Şekil 1.6'da, 3-fazlı transformatörlerin çeşitli bağlantı tipleri gösterilmektedir. Primer tarafta, V hat gerilimi ve I hat akımıdır. Sekonder kenar hattı gerilimleri ve akımları, faz başına tur sayısının oranları ($a = N_1/N_2$) ve bağlantı tipi değerlendirilerek belirlenir.

Aşağıda yer alan Çizelge 1.1'de, primer hat gerilimleri, hat akımları, sekonder faz gerilimleri ve faz akımları gösterilmektedir.

Bağlantı	Hat Gerilimi	Hat Akımı	Faz Gerilimi	Faz Akımı
(a) Üçgen-Üçgen				
Primer Üçgen	V	I	V	$I / 1,732$
Sekonder Üçgen	V/a	I_a	V/a	$I_a / 1,732$
(b) Üçgen-Yıldız				
Primer Üçgen	V	I	V	$I / 1,732$
Sekonder Yıldız	$1,732V/a$	$I_a / 1,732$	V/a	$I_a / 1,732$
(c) Yıldız-Yıldız				
Primer Yıldız	V	I	$V / 1,732$	I
Sekonder Yıldız	V/a	I_a	$V / 1,732 a$	I_a
(d) Yıldız-Üçgen				
Primer Yıldız	V	I	$V / 1,732$	I
Sekonder Üçgen	$V/1,732 a$	$1,732 I_a$	$V / 1,732 a$	I_a

Çizelge 1.1 – Primer hat gerilimleri ve hat akımları ve sekonder faz gerilimleri ve faz akımları

Bağlantı tipinden bağımsız olarak ideal durumda transformatör tarafından iletilen güç = $\sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L$ 'dir. ($\cos\phi = 1$ olarak kabul edilir)

1.1.7 Transformatörlerin deneyden geçirilmesi

Transformatörler üzerinde aşağıdaki deneyler gerçekleştirilir:

- Sargı direncinin ölçülmesi
- Gerilim oranının ölçülmesi

- Test fazor gerilim ilişkisi
- Empedans geriliminin, kısa devre empedansının ve yük kaybının ölçülmesi
- Yüksüz durum kaybının ve yüksüz durum akımının ölçülmesi
- Yalıtım direncinin ölçülmesi
- Dielektrik deneyi
- Sıcaklık artışı

Transformatör beyan değerleri niçin KVA cinsinden belirtilir?

Transformatördeki toplam kayıp, Bakır ve Demir kaybından kaynaklanır, bu da, sırasıyla akıma ve gerilime bağlıdır. Bu, kaybın VA'ya bağlı olduğu ve akım ile gerilim arasındaki açığa bağlı olmadığı anlamına gelir. Bu nedenle, beyan değer her zaman KVA cinsinden tanımlanır, kilowatt cinsinden tanımlanmaz.

Güç niçin daha yüksek gerilimlerde iletilir?

Bir güç istasyonu, yüksek seviyede akımla ve düşük seviyede gerilimle ya da yüksek seviyede gerilimle ve düşük seviyede akımla belli seviyede güç ($P=VI$) sağlayabilir. Bu nedenle iletim hatlarında kaybolan güç $P_{kayıp} = I^2R$ 'dir, R, iletim hatlarındaki dirençtir.

Bu kaybın mümkün olduğunca düşük seviyede olmasının sağlanması için, akım düşük seviyede olmalıdır, bu da, gerilimin yüksek seviyede olacağı anlamına gelir.

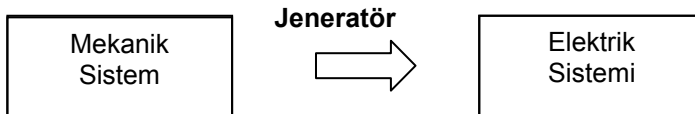
Bir güç üretim istasyonunda, gerilim, yükseltici tiptedir ve dağıtım ucunda, gerilim, gerekli değere indirilir.

1.2 Elektrikli makinaların temel ilkeleri

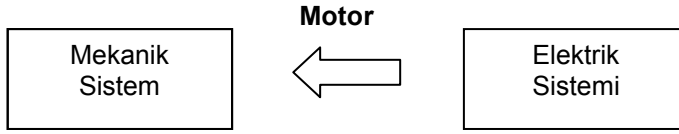
1.2.1 Elektromekanik enerji dönüşümü

Elektromekanik enerji dönüşüm cihazı, elektrik sistemleri ile mekanik sistemler arasındaki bir linktir.

Mekanik sistem, cihazdan elektrik sistemine enerji aktardığında, cihaz, jeneratör olarak adlandırılır.



Elektrik sistemi, cihazdan mekanik sisteme enerji aktardığında, cihaz, motor olarak adlandırılır.



Süreç, tersine çevrilebilir bir süreçtir, ancak, bir miktar enerji ısıya dönüşür ve boşa gider ve geri elde edilemez. Cihaz, jeneratör ya da motor olarak çalıştırılabilir.

Elektromekanik enerji dönüşümü, aşağıdaki birimler arasındaki ilişkiye bağlıdır:

- Elektrik ve manyetik alanlar
- Mekanik kuvvetler ve hareket

Dönen makinalarda, bobinlerin nispi hareketi ile güç üretimi gerçekleştirilir.

Jeneratör söz konusu olduğunda, sargı, manyetik alanda mekanik olarak döndürülür. Bu da, sargılardaki akı bağlarının değişmesine ve gerilimin indüklenmesine neden olur.

Motor söz konusu olduğunda, akım taşıyan bir iletken, manyetik alana yerleştirilir. Manyetik alanda akım taşıyan iletken üzerine mekanik kuvvet uygulanır. Böylece, rotor üzerinde bir tork oluşur.

Motorda olduğu gibi jeneratörde de, akım taşıyan iletken manyetik alanda yer alır. İletkenler ve akı, birbirine göre belirli bir hızda hareket eder. Dönen makinalarda, hem gerilim hem tork üretilir. Makinanın jeneratör olarak mı motor olarak mı çalışacağı, güç akış yönü tarafından belirlenir. Bir jeneratör için, e ve i aynı yöndedir.

$$T_m = T_e + T_f$$

Burada

T_m Mekanik Tork

T_e Elektriksel Tork

T_f Sürtünmeden dolayı kaybolan tork

Bir motor için, e ve i zıt yöndedir.

$$T_m = T_e + T_f$$

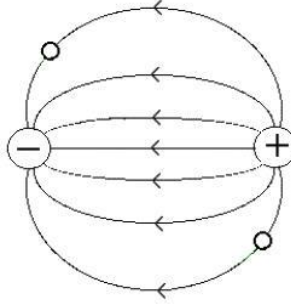
Bir jeneratörde, hareket ettirici cihaz tarafından güç sağlanır. Elektrik gücü, jeneratörün çalışması ile sağlanır ve sürtünmeden dolayı oluşan güç, boşa gider. Ancak, motor söz konusu olduğunda, güç,

güç kaynağı tarafından verilir ve sürtünmeden dolayı kaybolan mekanik güç düşük seviyededir.

1.2.2 Elektromanyetizmanın temel ilkeleri

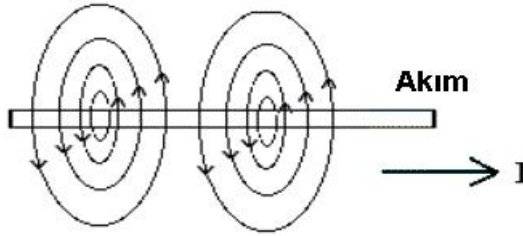
Manyetik ve elektrik alanlar

Her bir elektrik yükü, kendi elektrik alanına (başka bir deyişle, kuvvet çizgilerine) sahiptir. Elektrik alan çizgileri pozitif yüklerden negatif yüklere gider. Her bir yük, diğer yük üzerinde kuvvet uygular; bu kuvvet, diğer yük tarafından oluşturulan kuvvet çizgilerine her zaman teğettir.



Şekil 1.7 – Bir yükün elektriksel kuvvet çizgisi

Benzer şekilde, manyetik alan çizgileri, N-kutbundan S-kutbuna doğru “akar”. Manyetik alan, elektrik yükleri akım tarafından hareket ettirilerek oluşturulur. Yörüngede dönen her elektron, kendi manyetik alanını üreten bir akım döngüsü oluşturur. Manyetik alan çizgileri, her zaman, kendini oluşturan akımın etrafında çemberler oluşturur.



Şekil 1.8 – Akım taşıyan bir iletkenin etrafındaki manyetik alan çizgileri

Akım taşıyan bir iletkenin etrafında oluşan manyetik alan

Bir iletken, akım taşıyorsa, o iletken etrafını saran bir manyetik alan üretir. Oluşan akımın ve alanın yönü, belirli bir ilişkiye sahiptir, bu ilişki aşağıdaki kurallar tarafından belirlenir:

Sağ-el kuralı

Parmaklarınız iletkenin etrafını saracak ve baş parmağınız akımın yönünü gösterecek şekilde; iletkeni, sağ elinizde tutunuz. Parmaklar, iletken etrafında oluşan akının manyetik çizgilerinin yönünü gösterecektir.

Akım taşıyan bobin tarafından üretilen akı

Bir iletken yerine bobinden akım akışı sağlanarak da akı üretilir. Bobinin sarıldığı çekirdek olarak manyetik maddenin kullanılması, akının artırılmasını sağlar. Bobindeki manyetik akının yönü, sağ-el kuralı ile elde edilir.

Motor söz konusu olduğunda, indüklenen EMK'nın yönü, akımın akışına karşı koyacak şekildedir. Bir jeneratörde indüklenen EMK, bir akım üretecek yöndedir.

Fleming sol-el kuralı

Fleming sol-el kuralı, akımın yönü, alanın yönü ve hareketin yönü arasındaki ilişkiyi verir. Sol elin işaret parmağı, alanın yönünü gösterir, orta parmak akımın yönünü gösterir, başparmak, hareketin yönünü gösterir.

1.2.3 Motorun temel çalışma ilkesi

Motorun temel çalışma ilkesi, “akım taşıyan bir iletken manyetik alana konulursa, iletken üzerinde bir kuvvet uygulanır” ilkesine dayanmaktadır.

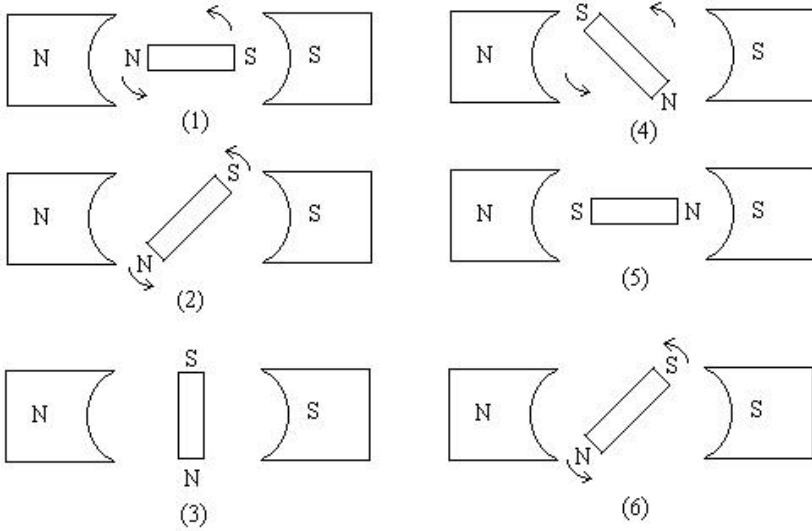
Basit bir DC motoru ele alırsak, iki sabit mıknatıs arasında (zıt kutupların karşı karşıya geldiği) desteklenen akım taşıyan bir bobine sahiptir, böylece bobin içeride rahatlıkla dönebilir. Bobin uçları DC kaynağa bağlandığında, içinden akım akacak ve şekilde gösterildiği gibi bir mıknatıs çubuk gibi davranacaktır. Akım akmaya başladığında, bobinin manyetik akı çizgileri, sabit mıknatısın akı çizgileriyle etkileşecektir. Bu, iki alan arasındaki itme ve çekme kuvvetinin etkisiyle bobinin hareket etmesini (Şekil 1.9 –1,2,3,4) sağlayacaktır. Bobin, 180 derece konumuna ulaşana kadar dönmeye devam edecektir çünkü şimdi karşıt kutuplar birbirinin önünde olacak (Şekil 1.9-5) ve itme ya da çekme kuvveti var olmayacaktır.

Komütatörün görevi: Komütatör fırçaları, bobine bağlanan DC kaynağın polaritesini tersine çevirir. Bu, manyetik alanın akımının yönünün değişmesine neden olacak ve bobinin, 180 derece daha dönmesini sağlayacaktır (Şekil 1.9-6)

Fırçalar, bu şekilde devam ederek motorun sürekli bobin dönüşünün gerçekleşmesini sağlar.

Benzer şekilde, AC motor da yukarıdaki ilkeye göre çalışır; tek fark, komütatör kontaklarının durağan olmasıdır, çünkü AC akımının yönü,

her bir yarım çevrim boyunca sürekli olarak değişir (her 180 derecede).



Şekil 1.9 – Motorun çalışması

1.2.4 Jeneratörün temel çalışma ilkesi

Bir motorun temel çalışma ilkesini açıkladık ve diyagramlar vasıtasıyla, bir jeneratörün temel çalışma ilkesini de gördük.

İlke olarak, AC jeneratörün yapısı, motorun yapısına benzerdir. AC jeneratör, akımı almak yerine, alternatördeki bobinden dışarı iletir.

Mekanik bir hareket ettirici cihaz, bobini, sabit mıknatısın kutupları arasında döndürür ve bobinde bir AC potansiyeli indüklenir. Ayrıca şu kural geçerlidir: AC akım, bir bobini döndürebiliyorsa, o zaman, bobinin döndürülmesi de bir AC akım oluşturacaktır.

Faraday Kanunu'na göre, bir tel, manyetik alan çizgilerini kesecek şekilde hareket ettirildiğinde, teldeki yük (elektronlar) üzerinde bir kuvvet uygulanır ve bu kuvvet, elektronları tel üzerinde hareket etmeye zorlar. Bu, tam bir devre sağlanırsa, akımın nasıl akmaya başlayacağını gösterir. Manyetik alan, mıknatıslar tarafından değil, alan bobinleri tarafından sağlanır.

İçinde gerilimin indüklendiği bobin, armatür sargısı olarak adlandırılır, manyetik alan sağlayan bobin ise, alan sargısı olarak adlandırılır.

Uygulamada, yüksek gerilim jeneratörlerinde, yüksek beyan değerlerine sahip akım toplayan fırçaların kullanılması gerekli olduğu için, armatürün dönmesi yaygın bir uygulama değildir. Bu nedenle, armatür durağandır ve alan, devamlı olarak döner durumdadır.

Düşük kapasiteli alternatörler, alan için sabit bir mıknatıs kullanır, yüksek kapasiteli alternatörlerde ise, alan sargı kaynağı, aynı şafta bağlanan küçük bir alternatör olan uyarma cihazından sağlanır.

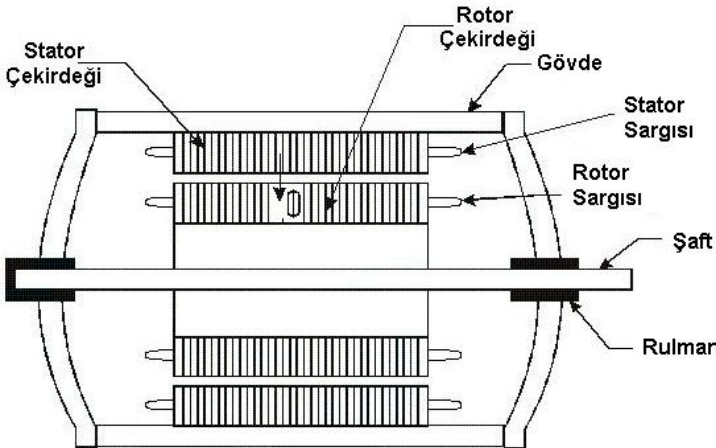
1.2.5 İdeal makinalar

Stator olarak adlandırılan durağan bir birim ve rotor olarak adlandırılan dönen bir birim mevcuttur. Dönen birim, durağan birime sabitlenen rulmanlara monte edilir. Stator ve rotor, hava boşluğu ile ayrılan silindirik demir çekirdeklere sahiptir. Sargılar, stator ve rotor çekirdeğine sarılır. Ortak bir manyetik akı, birleşik bir manyetik devre oluşturarak bir çekirdekten diğerine hava boşluğundan geçer. Aralarında hava boşluğu olan iki silindirik demir yüzey, birbirine göre nispi olarak hareket eder. Silindirik yüzey, aralarında boşluk olan çift sayıda çıkık *[salient]* kutup ile bölünebilir ya da çember etrafında tek biçimli olarak yerleştirilmiş sürekli yuva boşluklarına sahip olabilir. Stator da rotor da bu gibi bir yapıya sahip olabilir.

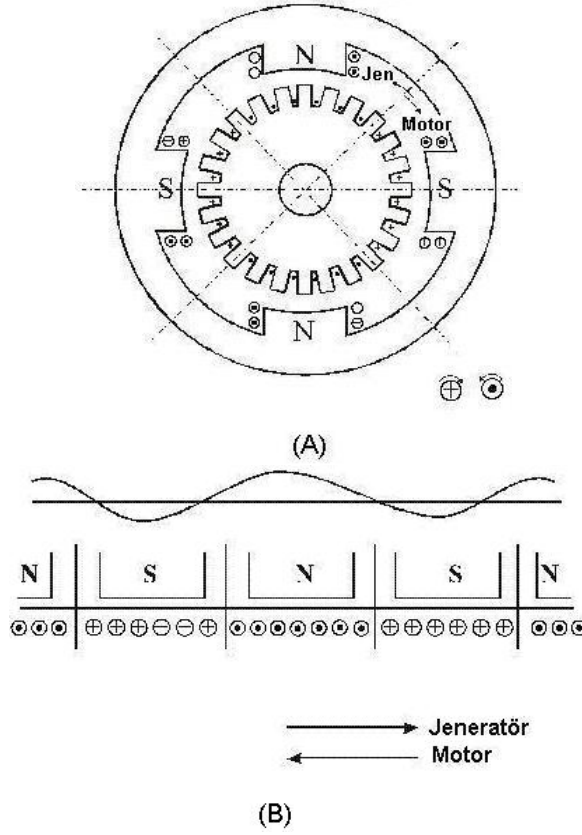
İdeal bir elektrikli makinanın genel özellikleri, Şekil 1.10'da gösterilmektedir. Sargılar için, iletkenler, yüzeye yakın silindirlerin eksenine paralel geçer. İletkenler, çekirdeğin dışındaki uç bağlantılar ile bobinlere bağlanır ve bobinler, makinanın sargılarını oluşturacak şekilde bağlanır.

Makinanın çalışması, çekirdek yüzeylerindeki akımların dağılımına ve sargılara uygulanan gerilimlere bağlıdır.

Çeşitli elektrikli makina tiplerinde, düzenleme şekli, sürekli ya da çıkık kutuplu tipli olup olmamasına bağlı olarak çekirdek yapısına göre ve iletkenlerin ve sargıların dağılımına göre değişir. Manyetik akı, demir çekirdeklerden karmaşık bir şekilde geçer. Ancak, demir yüksek geçirgenliğe sahip olduğu için, makinanın doğru çalışması, hava boşluğundaki akı dağılımı değerlendirilerek belirlenebilir. İletkenler, aslında çekirdeğin levhalarındaki yuvalarda yer almaktadır.



Şekil 1.10 – İdeal bir elektrikli makinanın genel özellikleri



Şekil 1.11 – Elektrikli bir makinanın tipik kesit alanı ve gelişimi

Çekirdeklerin eksenine dik dört kutuplu elektrikli bir makinanın tipik kesit alanı ve ilgili gelişme diyagramı, Şekil 1.11'de gösterilmektedir. Diyagramda gösterildiği gibi, akı ve akım dağılımı, her kutup çiftinde kendini tekrar etmektedir. Kutuplarda, sargılar, akım ters yönde akacak ve kuzey ve güney polaritelerine karşılık gelen bir alan oluşacak şekilde sarılır. Kutbun merkezinde maksimum akı vardır ve kutuplar-arasındaki boşluklarda, akı, sıfıra düşer.

1.2.6 Elektrikli makinaların temel çalışma ilkeleri

Elektrikli bir makinada, tüm sargılardaki akımlar, toplam akıyı oluşturacak şekilde birleşir. Alan sistemi akı üretir. Sargılarda, armatürdeki gibi gerilimler indüklenir. Armatür akım taşıdığı anda, akı ile akım arasındaki etkileşim sonucunda tork oluşur.

Elektrikli makina sargı tipleri

Bobin sargısı

Sargı, makinanın tüm kutuplarına sarılan ve uygun bir seri ya da paralel devre oluşturmak için birbirine bağlanan bobinlerden oluşur. Kutuplardan birindeki akımın yönü, diğer kutuptaki akımın yönüne terstir, bu nedenle bir kutup kuzey kutbuysa, diğer kutup güney kutbudur. Böylece istenen yönde akı oluşur, statorun ve rotorun demir çekirdekleri üzerinden kuzey kutbundan güney kutbuna manyetik bir devre oluşur.

Bobin, stator ya da rotor üzerine sarılabilir, böylece makinanın çıkık ya da çıkık-olmayan kutupları oluşur. Bu sargılara DC beslenir ve sargılar, üzerlerinden geçen akımın büyüklüğüyle doğru orantılı olan bir alan üretir. Kutuplar, stator üzerinde yer alıyorsa, hava boşluğunda durağan bir alan oluşur.

Komütatör sargısı

Komütatör sargısı, rotor üzerinde yer almaktadır. Armatür, açık yuvalara sahiptir ve iletkenler, bu yuvalarda yer alır ve sürekli bir sırada komütatör segmanlarına bağlanır.

Çok-fazlı sargı

Çok-fazlı sargı, dağıtılmış bir sargıdır. Münferit iletkenler, uygun bir şekilde yuvalara dağıtılır ve her bir faz için belli sayıda ayrı devreyle birleştirilir. Faz bantlarını oluşturan iletken grubu, ardışık kutup aralıklarında düzenli bir sırada dağıtılır, böylece faz başına eşit gerilim üreten dengeli bir sargı mevcuttur. Bu sargı tipi, temelde stator için kullanılmaktadır. 3-fazlı akımla beslendiğinde, bu sargı, hava boşluğunda dönen bir alan oluşturur. Sabit büyüklüktedir ve sabit senkron bir hızda döner.

1.2.7 Elektrikli makina tipleri

Stator ve rotor üzerinde kullanılan kombinasyon tiplerine bağlı olarak, elektrikli makinalar, aşağıdaki gibi farklı tiplerde sınıflandırılır:

DC makinalar

Motor hızının kontrolü söz konusu olduğunda, DC makinalar, AC makinalara göre daha üstündür.

Şönt motor

Bu makinada, armatür sargısı, rotora monte edilmiştir. Şönt motor, hız düzenlemesinin önemli olduğu durumlarda kullanılır.

Kendinden-uyarımli motor

Alan sargısı, aynı kaynaktan armatür sargısıyla paralel (şönt) olarak bağlanır. Alan akımının değiştirilmesi, hızı değiştirebilir.

Tork, armatür akımıyla doğru orantılıdır.

Bu makina[**:self-excited**], jeneratör olarak da çalıştırılabilir. Motorun yüksek seviyedeki start akımını sınırlamak için, sürücü, gerilimin aşamalı olarak artırılmasını sağlar. Bu motor için, akı değerini ve hızı az miktarda değiştirmek için, değişken bir direnç, alan devresine seri olarak bağlanır.

Ayrı-uyarımli motor

Alan sargısı, ayrı uyarımli bir armatür sargısıyla paralel olarak (şönt) bağlanır.

Tork, armatür akımıyla doğru orantılıdır. Ayrı-uyarımli bir şönt motorda, hız, armatür gerilimi değiştirilerek belli bir sınır değere ayarlanabilir. Bundan sonra, alan zayıflatma kullanılarak (alan akımı azaltılarak), motor hızının taban hızın üstüne çıkarılması mümkündür. Diğer özellikler, kendinden-uyarımli motorda olduğu gibidir.

Seri motor

Adından da anlaşıldığı gibi bu tip motorlarda, alan sargısı, armatür sargısıyla seri olarak bağlanır. Doğal olarak, üzerinden şiddetli bir akım geçecektir, bu nedenle, alan sargısı daha kalındır. Seri motor, hız düzenlemesinin önemli olmadığı durumlarda kullanılır.

Bu motorun ana avantajı, yüksek seviyede torkun elde edilebilmesidir; bu yüzden, bu tip motorlar, dizel lokomotif, vinç, vb. gibi uygulamalarda daha faydalıdır.

Torkla akım arasındaki ilişki aşağıdaki şekildedir:

$$T \propto I_a^2$$

Bu motorun, yüklenmiş bir durumda start edilmesi önemlidir, aksi takdirde, motor zarar görebilir.

Bileşik motor

Seri motorla şönt motor birleştirilirse, bileşik motor elde edilir. Böylece her iki motorun da özellikleri birleştirilmiş olur, örneğin, seri motorun yüksek seviyedeki tork karakteristikleri ve şönt motorun hız düzenleme özelliği gibi.

AC makinalar

Sincap kafesli endüksiyon motoru

AC makinalar basit ve sağlamdır. AC endüksiyon motoru, kısaca, dönen bir transformatör olarak tanımlanabilir. Bu tip en yaygın makina, sincap kafesli endüksiyon motorudur (bu isim, yapılış tipinden dolayı verilmiştir).

Bu tip motorların temel yapısı sonraki bölümde incelenecektir. Bu tip motorların hızı, aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilir:

$$N \text{ (RPM)} = 120 f / p$$

Burada

f frekans

p kutup sayısı

Örneğin, motorun iki kutbu varsa, o zaman 50 Hz frekansında, motor rpm'i 3000 rpm olacaktır.

Ancak, motor isim plâkasında 3000 rpm ya da 1500 rpm yazdığını göremezsiniz çünkü tam yükte motor rpm'i 3000 rpm olmayacaktır. Bunun nedeni, endüksiyon motorundaki kayma *[slip]* değeridir.

Motorun RPM'i, frekans (f) kontrol edilerek kontrol edilir; frekans arttıkça, motor hızı da artacaktır. Yüksek seviyedeki başlangıç akımı, yıldız üçgen starteri ya da indirgenmiş gerilim starterleri kullanılarak sınırlandırılır.

Sargılı rotorlu motor

Bu motor tipi, yapı olarak sincap kafesli endüksiyon motoruna benzerdir, farkı, kayan-bileziklere sahip olmasıdır. Kayan-bilezikli motorun temel özelliği, başlangıç akımının, rotor devresiyle seri olarak bağlanan dirençler tarafından sınırlandırılmış olmasıdır.

Motor çalışmaya başladığında, dirençlerin tümü faal haldedir, ancak motorun hızı arttıkça, dirençler birer birer kısa devre yapılır. Motor tam hıza ulaştığında, tüm dirençler kısa devre yapılır ve motor, normal bir endüksiyon motoru gibi çalışmaya başlar.

Senkron motorlar

Senkron motor, hızı sabit olan bir motordur, 3-fazlı bir sistemin güç faktörünü düzeltmek için kullanılabilir. Stator açısından bakıldığında endüksiyon motoruna benzer olan senkron motor, sabit mıknatıslı ya da elektromıknatıslı (akım, kayan-bilezikler vasıtasıyla sağlanır) bir rotora sahiptir. Kabaca bakıldığında, rotor, statordaki dönen manyetik alana kilitlenmeye devam edecektir. Bu nedenle, 2-kutuplu bir makina, tam olarak 3000 RPM'de çalışacaktır. Birçok senkron makinada, başlangıç aşaması için rotora, sincap kafesli bir endüksiyon motoru takılır. Bu nedenle, başlangıçta, makina bir

endüksiyon motoru gibi davranır ve senkron hıza ulaştıkça, senkron hıza aniden ‘kilitlenecektir’.

1.2.8 Elektrikli makinaların temel karakteristikleri

Elektrikli makinaların temel karakteristikleri şunlardır:

- Sargılarda indüklenen gerilimler, yük akımları ve terminal gerilimleri, aşağıdaki farklı yük şartlarına bağlıdır.
- Farklı yük şartları altında ve farklı frekansta makina çalışma hızı
- Makinanın güç girişi ya da güç çıkışı
- Farklı yük şartları altında üretilen tork

1.3 AC güç sistemleri

1.3.1 Tek-fazlı güç sistemi

Tek-fazlı bir sistemdeki güç, Şekil 1.12’de gösterilmektedir. Şekilde akım (I) gerilimin (V) ϕ açısı kadar arkasında kalır. Akım, iki bileşene sahiptir – enerji bileşeni ve reaktif bileşen.

Sadece enerji bileşeni, bir güç değerine sahiptir. Bu nedenle, tek-fazlı bir devredeki güç değeri, aşağıdaki denklemle verilir:

$$P = V \times I \times \cos \phi$$

Burada

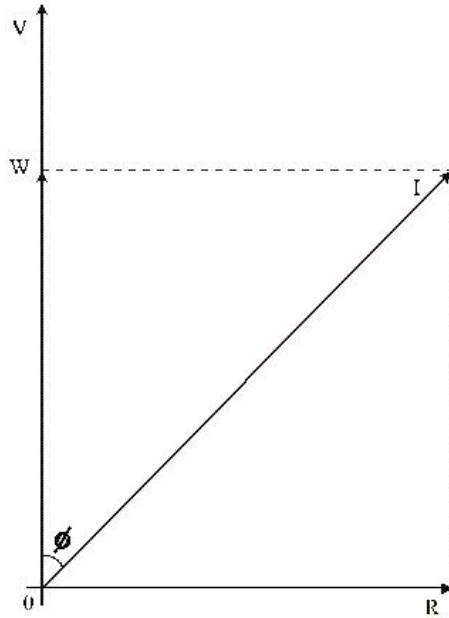
P güç (watt)

V gerilim (rms)

I akım (rms)

Cos ϕ = güç faktörü

$$\frac{P}{V \times I}$$



Şekil 1.12 – Tek-fazlı güç sistemi

1.3.2 3-fazlı güç sistemleri

3-fazlı bir transformatörün ya da alternatörün üç sargısı, iki şekilden birinde – Üçgen ya da Yıldız (Şekil 1.13'te gösterilmektedir) bağlanabilir.

Faz gerilimleri ile faz akımları arasındaki ve hat gerilimleri ile hat akımları arasındaki ilişki aşağıdaki şekildedir:

Üçgen-bağlı sistem için

Hat Gerilimi = Faz Gerilimi

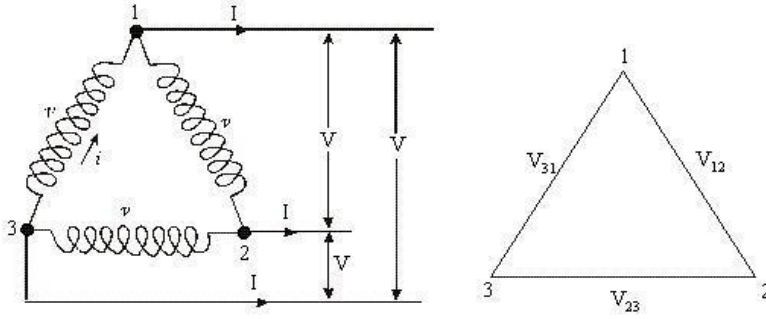
Hat Akımı = $\sqrt{3}$ x Faz Akımı

Yıldız-bağlı sistem için

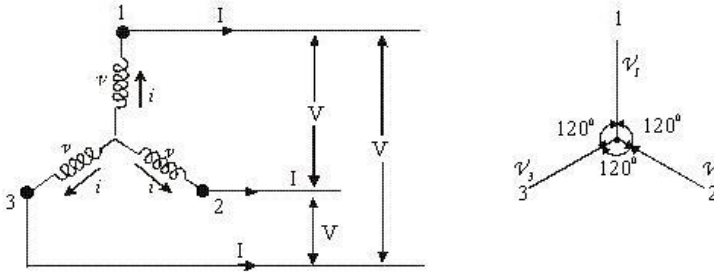
Hat Gerilimi = $\sqrt{3}$ x Faz Gerilimi

Hat Akımı = Faz Akımı

Yıldız bağlantısında, bir nötr noktası mevcuttur. Jeneratörler genelde yıldız sargılıdır ve nötr noktası, topraklama için kullanılır. 3-fazlı motorlar, üçgen ya da yıldız bağlı olabilir. Genelde, üçgen bağlantılar, sargıları küçültmek için alçak gerilimli, küçük motorlarda kullanılır.



(A) 3-fazlı Üçgen Bağlantı



(B) 3-fazlı Yıldız Bağlantı

Şekil 1.13 – Üç fazlı devre bağlantıları

3-fazlı akımlar, her bir faz ayrı ayrı değerlendirilerek ve faz gerilimlerinden ve empedanslardan faz akımları hesaplanarak belirlenir. Uygulamada, hesaplamalar basit ve doğrudandır, çünkü 3-fazlı sistemler genelde simetriktir, yükler dengelidir. 3-fazlı motorların çoğu, dengeli yük olarak kabul edilebilir. Akımlara, güce, vb.'ye ilişkin hesaplamalar, aşağıdaki ifade kullanılarak gerçekleştirilebilir. Ancak, simetrik olmayan ya da dengeli olmayan sistemler için, aşağıdaki hesaplamalar ve ifadeler geçerli değildir ve karmaşık hesaplamaların gerçekleştirilmesi gereklidir.

3-fazlı bir sistemdeki güç, üç fazdaki gücün toplamıdır. Dengeli üçgen bağlı ya da yıldız bağlı bir sistemi değerlendirin. 3-fazlı sisteme ilişkin toplam güç şu şekildedir:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi \text{ (Watt)}$$

Burada

V hat gerilimi
I hat akımı
Cos ϕ güç faktörü

1.3.3 3-fazlı bir sistemdeki gücün ölçülmesi

Elektrik gücü, bir wattmetre kullanılarak ölçülür. Wattmetre, yüke seri olarak bağlanan bir akım bobininden oluşurken, diğer potansiyel bobini, yüke paralel olarak bağlanır. Her bir manyetik alan hareketinin şiddetine bağlı olarak, işaretçi hareket eder.

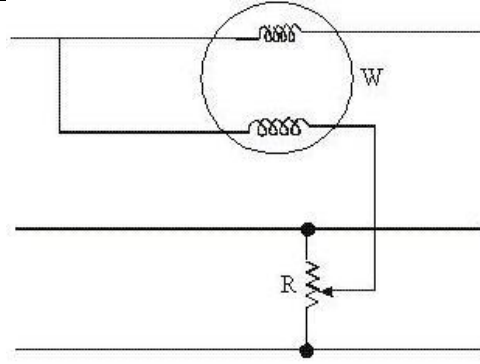
Gerçek güç, bir wattmetrede doğrudan gösterilir.

3-fazlı sistemlerde, güç, çeşitli metotlar kullanılarak ölçülebilir. Geçici ölçümler için, tek bir wattmetre kullanılabilir. Ancak, kalıcı ölçümler için, hem dengeli hem de dengeli olmayan yükleri gösteren iki elemana sahip 3-fazlı bir wattmetre kullanılır. Dengeli olmayan bir yük için, Şekil 1.14'te gösterildiği gibi, iki tane wattmetre kullanılmalıdır. İki wattmetre ile elde edilen ölçüm sonuçları eklenerek toplam güç hesaplanır. Bu metot kullanılarak, güç faktörü de elde edilebilir.

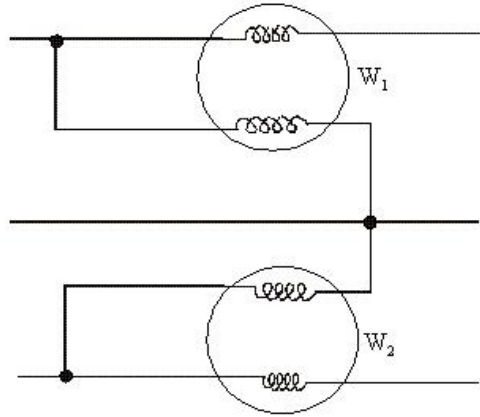
İki wattmetreli metot kullanıldığında, sistemin güç faktörü 0,5'ten küçük olduğunda, wattmetreden okunan değer tersine çevrilmelidir. Bu gibi bir durumda, pozitif bir değer elde etmek için, wattmetrenin kablolarının yerlerinin değiştirilmesi gerekebilir. Güç faktörünün 0,5'ten küçük olması durumunda, okunan değerler toplanmamalı, çıkarılmalıdır. İki wattmetreli metodu (W1 ve W2) kullanan 3-fazlı sistemin güç faktörü, aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\tan \phi = \frac{\sqrt{3} (W1 - W2)}{(W1 + W2)}$$

3-fazlı bir sistemin toplam gerçek gücünü hesaplamak için, okunan değerler toplandığından ve çıkarıldığından, gösterilen metotlar, endüstriyel uygulamalarda kullanılmamaktadır. Daha çok, kullanıcı açısından kullanılması kolay olan 3-fazlı güç analiz cihazları kullanılmaktadır.



(A) Dengeli Yüke İlişkin
Tek Watmetreli Metot



(B) Dengeli/Dengeli-olmayan Yüklere
İlişkin İki Watmetreli Metot

Şekil 1.14 – Üç-fazlı sistemlerdeki gücü ölçmek için kullanılan metotlar

Güç faktör ölçer

Bu cihaz, ilkesel olarak bir wattmetreye benzer; sadece, tek bir şaftta iki armatür bobini monte edilmiştir. Bobinler arasında 90 derece fark vardır. Her iki armatür bobini de, manyetik güçlerine bağlı olarak dönmektedir. Bir bobin, gücün rezistif bileşeniyle orantılı olarak hareket ederken, diğer bobin, gücün indüktif bileşeniyle orantılı olarak hareket eder.

Enerji ölçer

Bu, belli bir periyotta kullanılan güç miktarını (elektrik enerjisini) göstermektedir. Watt-saat sayacında, iki tane sargı grubu vardır. Biri gerilim sargısıyken, diğeri akım sargısıdır. Gerilim sargılarında

oluşan alan, alüminyum bir diskte akım oluşmasına neden olur. Oluşan tork, sistemdeki gerilimle ve akımla doğru orantılıdır. Disk, kullanılan elektrik enerjisini (kilowatt-saat cinsinden) gösteren sayısal yazmaçlara bağlanır.

1.4 Arıza aramada kullanılan sayaçlar

Elektrik devrelerinde ve sistemlerinde arıza aramak için, ölçülecek ya da tespit edilecek parametrelere ilişkin şartlara bağlı olarak aşağıdaki sayaçlar kullanılır:

- Çok-kademeli voltmetreler [*Multi-range Voltmeter*]
- Kırpma özelliği olan ya da kenetlemeli ampermetreler
- Elektrostatik Voltmetreler (yüksek gerilimli ölçümler)
- Multimetre ya da Volt-Ohm-Mili-Ampermetre (gerilim, direnç, akım, vb. ölçümü için)
- Isıl çift ölçerler (doğrudan olmayan akım ölçümü)
- Gerçek Wattmetreler (watt cinsinden doğrudan güç ölçümü)
- Sözde Wattmetreler
- Sayısal Voltmetreler
- Heterodin Dalga Ölçerler (analog frekans ölçümü)
- Sayısal Frekans Ölçerler
- Süreklilik Test Cihazları
- Analog Ohmmetreler (Direnç Ölçerler)
- Sayısal Ohmmetreler
- Yalıtım Test Cihazları
- Sayısal Kapasitans Ölçerler
- Q Ölçerler (indüktans ve kapasitans ölçümü için)
- Osiloskop (dalga biçimleri, büyüklük, frekans, faz vb. ölçümü için)
- Çukur Ölçerler (radyo frekansları)
- Lojik Seviyesi Prop Test Cihazları
- Lojik Analiz Cihazları (lojik sisteminin sorunlarını tespit eder)
- Spektrum Analiz Cihazları

Yukarıdaki listede yer alan önemli bazı ölçme cihazları, sonraki bölümlerde gerekli olduğunda ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

2 AC Motor Teorisi

AC Motorun Yapısı ve Bakımı

Amaçlar

- Tek-fazlı ve 3-fazlı AC motorlarla ilgili temel bilgiler
- DC motorlarla ilgili temel bilgiler
- Bağlantıya ilişkin ayrıntılar, motorlara ilişkin frenleme metotları
- Motorların deneyden geçirilmesi için kullanılan metotlar

2.1 Giriş

AC motorlar, kaldırma, kaydırma, pompa, sürme ve delme işlemleri için gerekli olan itici gücü sağlar, endüstriyel ve ticari uygulamalardaki diğer işlemleri gerçekleştirir. AC motorların içinde özellikle endüksiyon motoru, endüstride, makine araçlarına enerji verilmesinde, pompalarda, fanlarda, kompresörlerde ve birçok endüstriyel cihazda kullanılmaktadır.

Bu bölümde, AC motorlarla ilgili temel bilgiler verilecektir ve bu, endüstrideki endüksiyon motoru uygulamalarının anlaşılabilmesi için gereklidir. Bu bölümün amacı, AC motorlardaki arızaların aranması, arıza süresinin kısaltılması, motor performansının optimize edilmesi ve çalışma ömrünün uzatılması için gerekli bilgilerin sağlanmasıdır.

Aşağıdaki kısımlarda ilk önce 3-fazlı AC motorlar, tek-fazlı AC motorlar ve daha sonra DC motorlar açıklanacaktır.

2.2 Üç-faz AC motorlarla ilgili temel bilgiler

3-fazlı AC motorlar, “endüstrinin yarış atlarıdır” çünkü bu motorlar, geniş çapta kullanılmaktadır. Bu motorlar popülerdir çünkü ucuz ve küçüktürler ve daha az bakım gerektirirler, zorlu endüstriyel ortamlarda daha dayanıklıdır.

3-fazlı AC motorlar, giriş terminallerindeki 3-fazlı elektrik gücünü, statordaki dağıtılmış sargı tarafından üretilen dönen manyetik akı işlemi ile dönen şafttaki mekanik güce dönüştüren motorlardır.

3-fazlı AC motorlar, aşağıdaki şekilde sınıflara ayrılabilir:

- Endüksiyon motoru
- Senkron motor
- Sargılı rotorlu endüksiyon motoru

Her bir motor kısaca açıklanacaktır.

Endüksiyon motoru

Adından da anlaşıldığı gibi, rotora gerilim uygulanmaz. Gerilim, stator sargısına uygulanır ve stator sargısından akım geçtiğinde, transformatör işlevi ile rotorda bir akım indüklenir. Rotor manyetik alanı, rotor üzerine tork uygulanmasını sağlayan stator manyetik alanıyla etkileşecektir.

Senkron motor

Adından da anlaşılacağı gibi, rotor hızı, statorun manyetik alanıyla senkronudur. Motor, aynı hızda çalışır.

Endüksiyon motorundan farklı olarak, senkron motorlar kendiliğinden çalışmaya başlamaz, senkron motorların senkron hıza getirilmeleri gereklidir. Bir kere kilitledikten sonra, rotor, sürekli olarak dönecektir.

Sargılı rotorlu endüksiyon motoru

Bu motor, üç kablo ucu kayan bileziklere bağlanmış ‘tel sargılı bir rotora’ sahiptir. Rotor devresine farklı dirençler eklenerek rotor direncinin değiştirilmesi mümkündür. Böylece hız ve başlangıç torku değişecektir.

2.2.1 3-fazlı endüksiyon motorunun çalışma ilkesi

3-fazlı endüksiyon motoru, birbirinden 120 derece uzakta yer alan ve stator sargısını oluşturan üç bobine sahiptir.

Rotorun sincap kafesli tipte olduğu durumda, rotor, dairesel bir bağlantı plâkası tarafından bir uçta kısa devre yaptırılan bakır iletkenlere sahiptir. Şekil 2.1’de, sincap kafesli endüksiyon motoru gösterilmektedir.

Stator sargısına gerilim uygulandığında, stator sargısından akım akar ve stator sargısında dönen bir manyetik alan oluşur. Bu dönen manyetik alanın hızı, statordaki kutup sayısına ve statora verilen gücün frekansına (senkron hız olarak adlandırılır) bağlıdır ve aşağıdaki şekilde verilir:

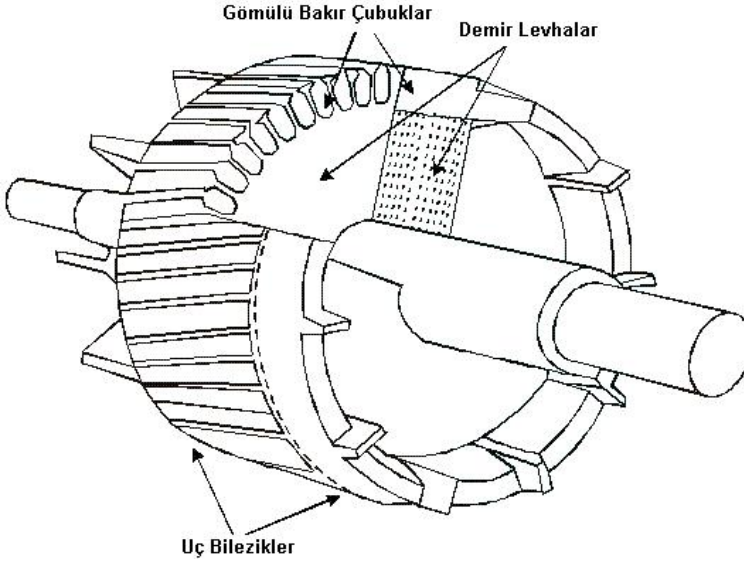
$$S = 120 f / p$$

Burada

S RPM cinsinden senkron hız

f Hz cinsinden kaynağın frekansı

p stator sargısındaki kutup sayısı



Şekil 2.1 – Sincap kafesli endüksiyon motoru

Dönen manyetik alan, transformatörün çalışması ile rotorda EMK oluşturur. Rotor, kapalı bir iletken grubu olduğu için, rotorda akım akar. Stator akımlarından kaynaklanan dönen alan, rotor akımlarıyla etkileşir ve rotor iletkenleri üzerinde bir kuvvet oluşturur.

Motor, endüksiyon motoru olarak adlandırılır çünkü transformatör çalışması ya da endüksiyon ilkesine göre çalışmaktadır.

3-fazlı endüksiyon motorunun karakteristikleri şunlardır:

- Bu motor için harici bir başlatma mekanizması gerekli değildir.
- Bu motorlar farklı beygir gücü beyan değerlerine sahiptir.
- Hız yapısal olarak sabittir.
- Motorun herhangi iki güç hattı tersine çevrilerek dönme yönü kolayca değiştirilebilir.
- Motor, senkron hıza göre “kayma” değeri kadar daha düşük bir hızda çalışır.
- İndirgenmiş yükler için, güç faktörü zayıflar.
- Farklı hızlarda çalışan sincap kafesli motorlar, harici bağlantılar değiştirilerek stator kutuplarının sayısının değiştirilebilmesi özelliğine sahiptir.

2.2.2 Endüksiyon motorunun hız-tork karakteristikleri

Bir endüksiyon motorunun hız-tork karakteristikleri ve tork-kayma değeri karakteristikleri, motorun performansının belirlenmesinde kullanılan önemli parametrelerdir. 3-fazlı bir endüksiyon motorunun

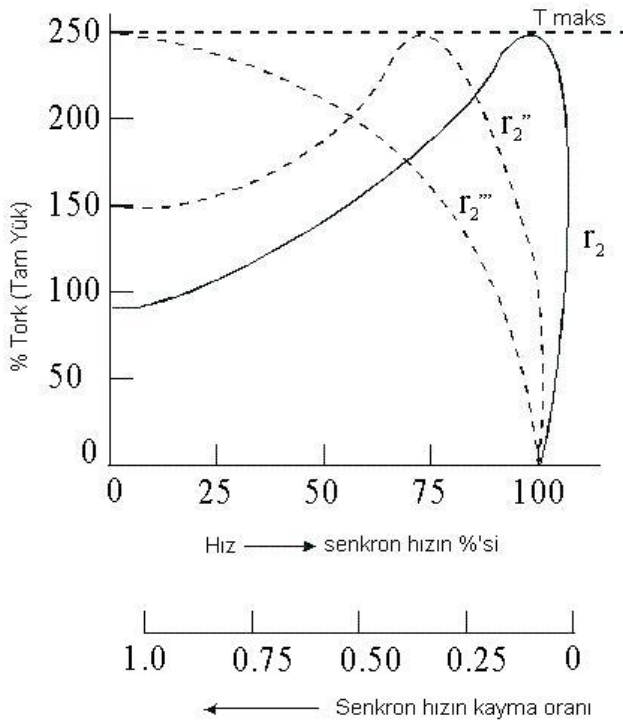
tipik hız-tork karakteristiği ve tork-kayma karakteristiği, Şekil 2.2’de gösterilmektedir.

Motor, sıfır hızda çalışmaya başladığında, başlangıç torku, tam yük torkundan daha düşük seviyededir ve motor, hafif yüklü durum ile yüksüz durum arasındaki bir durumda çalışmaya başlayabilir.

Normal tam yük torku, rotor hızının senkron hızdan sadece % 5 düşük olduğu durumda elde edilir. Bu noktadan sonra, tork sıfıra düşer çünkü stator ile rotor arasında nispi bir hareket ya da kayma yoktur.

Yüksek başlatma torku elde etmek için, rotor, yüksek dirençli iletkenlerden yapılır ya da rotor devresine dış direnç eklenir.

Kayan-bilezikli tip endüksiyon motoru söz konusu olduğunda, karakteristik eğrinin yapısı, rotor devresine harici bir direnç eklenerek değiştirilebilir. Rotor direnci, r_1 ’den r_2 ’ye, r_3 ’e, r_4 ’e ($r_1 < r_2 < r_3 < r_4$) çıkarılırsa, maksimum tork aynı kalır, ancak maksimum torkun meydana geldiği kayma değeri, Şekil 2.2’de gösterildiği gibi kayar. Rotor devresine dış direncin eklenmesi ile, başlatma torku, motorun üretebildiği maksimum tork sınır değerine kadar çıkarılabilir. Başlatma torkunun artırılması metodu, sadece kayan bilezikli motor ya da sargılı rotorlu endüksiyon motoru için kullanılabilir.



Şekil 2.2 – Bir endüksiyon motorunun hız-tork ve tork-kayma değeri karakteristikleri

2.2.3 Endüksiyon motorunun çalıştırılması

Bir endüksiyon motorunun start edilmesine ilişkin temel amaçlar şunlardır:

- Yüksek seviyedeki başlangıç akımının kontrol edilmesi
- Yüksek seviyede başlatma torkunun elde edilmesi

Daha önce açıklanmış olduğu gibi, başlangıç torkunu rotor direnci belirler. Genelde, bu rotor direnci küçüktür, küçük bir başlangıç tork değeri ancak iyi çalışma şartları sunar. Bu nedenle, sincap kafesli motor sadece düşük seviyedeki başlangıç yükleriyle çalışabilir. Rotor direnci bir şekilde artırılırsa, maksimum torkun olduğu kayma değeri ve hız değeri kaydırılabilir. Bu nedenle, kayan bilezikli ya da sargılı rotorlu tip motorda olduğu gibi rotor devresine dış direnç eklenebilir.

Rotor durağan olduğunda ve güç uygulandığında, aşırı akım akmaya başlayacaktır. Bu, stator sargısı ile rotor sargısı ve rotor iletkenleri arasındaki transformatör işlevinin kısa devre yapılmasından dolayı meydana gelir ve rotordan ağır bir akımın geçmesine neden olur.

Bu ağır başlangıç akımını azaltmak için, uygulanan başlangıç gerilimi azaltılırsa, başlangıç torku da bu durumdan etkilenir.

Genelde aşağıdaki başlatma metotları kullanılır:

- Doğrudan-hattan start [*Direct-on-line starting*]
- Otomatik transformatörlü start
- Yıldız-üçgen start [*Star-delta starting*]

2.2.4 Endüksiyon motor kayıpları ve verim

Bir endüksiyon motorundaki kayıplar aşağıdakileri içerir:

- Statordaki ve rotordaki çekirdek kaybı
- Stator ve rotor bakır kayıpları
- Sürtünme ve rüzgar kaybı

Çekirdek kaybı, ana akıdan ve kaçak akıdan kaynaklanır. Gerilim sabit olarak kabul edildiği için, çekirdek kaybı yaklaşık olarak sabit kabul edilebilir. Stator direnci DC ile ölçülebilir. İletkenlerdeki histerez ve burgaç akım kaybı direnci artırır ve etkin direnç, DC direncin 1,2 katı olarak kabul edilir. Rotor bakır kaybı, ölçülen toplam kayıptan ya da rotor I^2R kaybından stator bakır kaybı çıkarılarak hesaplanır. Sürtünme ve rüzgar kaybı, yükten bağımsız olarak sabit kabul edilebilir.

Verim = Rotor Çıkışı / Stator Girişi

Çıkış = Giriş – Kayıplar

Örnek 2.1

3-Fazlı 440 V, 50 Hz, 6-Kutuplu bir endüksiyon motorunu ele alın. Motor, belirli bir yük için 960 RPM'de 50 kW çeker. Stator kayıplarının 1 kW, sürtünme ve rüzgar kayıplarının 1,5 kW olduğunu varsayın. Yüzde kayma değerini, rotor bakır kaybını, rotor çıkışını ve motorun verimini belirlemek için, aşağıdaki işlemleri yapın.

Yüzde kayma değeri

Motorun senkron hızı = $(50 * 120) / 6 = 6000 / 6 = 1000$ RPM

Kayma değeri = $(\text{Senkron hız} - \text{Gerçek hız}) = 1000 - 960 = 40$ RPM

Yüzde kayma değeri = $[(40 / 1000) * 100] = \% 4 = 0,04$

Rotor bakır kaybı

Rotor girişi = $50 - 1 = 49$ kW

Rotor bakır kaybı = Rotor girişi * Kayma değeri
= $49 * 0,04 = 1,96$ kW

Rotor çıkışı

Rotor çıkışı = Rotor girişi – Rotor bakır kaybı – Sürtünme ve Rüzgar kaybı

= $49 - 1,96 - 1,5$

= $49 - 3,46$

= $45,54$ kW

Motor verimi

Motor verimi = Rotor çıkışı / Motor girişi

= $45,54 / 50 = 0,9108$

= $\% 91,08$

2.2.5 3-fazlı senkron motorun çalışma ilkesi

3-fazlı senkron motorlar, yüksek beyan değerlerine sahip sabit hızlı motorlar olarak kabul edilir. Adından da anlaşıldığı gibi, aynı hızda yüksüz durumdan tam yük durumuna çıkabilir. Endüksiyon motorunda görmüş olduğumuz gibi, kayma vardır. Ancak, burada motor, dönen manyetik alanla aynı hızda çalışır.

Senkron motorun yapısı, alternatörün yapısına benzerdir. Stator sargısı, üç-fazlı bir kaynağa bağlanır ve rotorda, DC alan sargısı vardır.

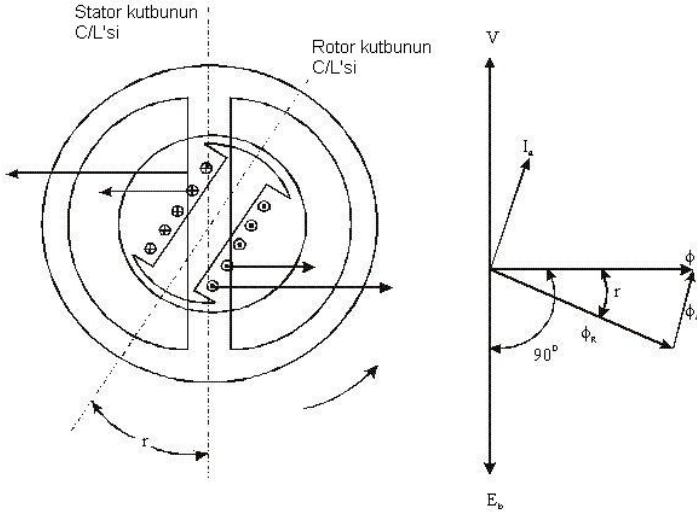
Stator sargısına 3-fazlı gerilim uygulandığında, bu, dönen manyetik alanı üretir. Başlangıçta rotor durağansa, her bir rotor kutbu, statorun

dönen manyetik alanına göre bir itme ve çekme kuvvetine tâbi olacaktır. Rotor inerşiasından dolayı, rotor herhangi bir yönde hareket etmeyecektir. Senkron motorların kendiliğinden çalışmaya başlayamamasının nedeni budur.

Şimdi, belli bir hızda çalıştırılırsa, zıt polaritedeki stator ve rotor kutupları birbirine kilitlenecektir, bu da, rotorun, statorun dönen manyetik alanıyla senkron olarak çalışmasını sağlar. Bu nedenle, rotor, senkron hızda çalışacaktır.

Bunun olması için, senkron bir motor, ilk önce normal endüksiyon motoru gibi ve daha sonra senkron bir motor gibi çalışacaktır.

Bu amaçla, rotor, iki sargıya sahiptir, ilki, sincap kafesli sargı ya da sargılı rotor tipi AC sargıdır ve ikincisi, DC sargıdır. Stator sargısı, endüksiyon motoruna benzerdir.



Şekil 2.3 – Senkron motorun işlevi

3-fazlı senkron motor, endüksiyon motorundan farklıdır, bu farklar, rotorun sargılı olması ve kayan bilezikler vasıtasıyla bir DC kaynağa bağlanmasıdır.

Motor, normal endüksiyon motoru gibi çalışmaya başlar (sincap kafesli/rotor sargılı), rotorun hızı, senkron hızın % 90-95'ine ulaşır, daha sonra rotorun DC sargısına DC kaynağı uygulanır. Bu da, rotordaki kuzey ve güney kutuplarını oluşturur ve daha sonra, rotor mıknatısı, statorun dönen manyetik alanına kiltilenir ve aşağıdaki senkron hızda çalışır:

$$S = 120 f / (P/3)$$

Burada

S rpm cinsinden senkron hız

f ac kaynağın Hz cinsinden frekansı

P Faz başına stator kutbu sayısı

Ancak, Şekil 2.3'te gösterildiği gibi, stator kutbunun merkez çizgisi ile rotor kutbunun ya da alanının merkez çizgisi arasında bir açının olması gereklidir. Senkron motorun çalışması sırasında uyarım sabit tutulursa ve yük artırılırsa, motorun güç faktöründe ve akımda bir değişiklik meydana gelir.

Üç-fazlı senkron motorun karakteristikleri aşağıda verilmektedir:

- Sabit hızlı bir motordur.
- 3-fazlı bir sistemin güç faktörünü düzeltmek için kullanılabilir.
- Kendiliğinden çalışmaya başlayamaz.

Bu, genelde motorun sık sık çalıştırılıp durdurulmadığı sabit hızlı yük uygulamalarında kullanılır.

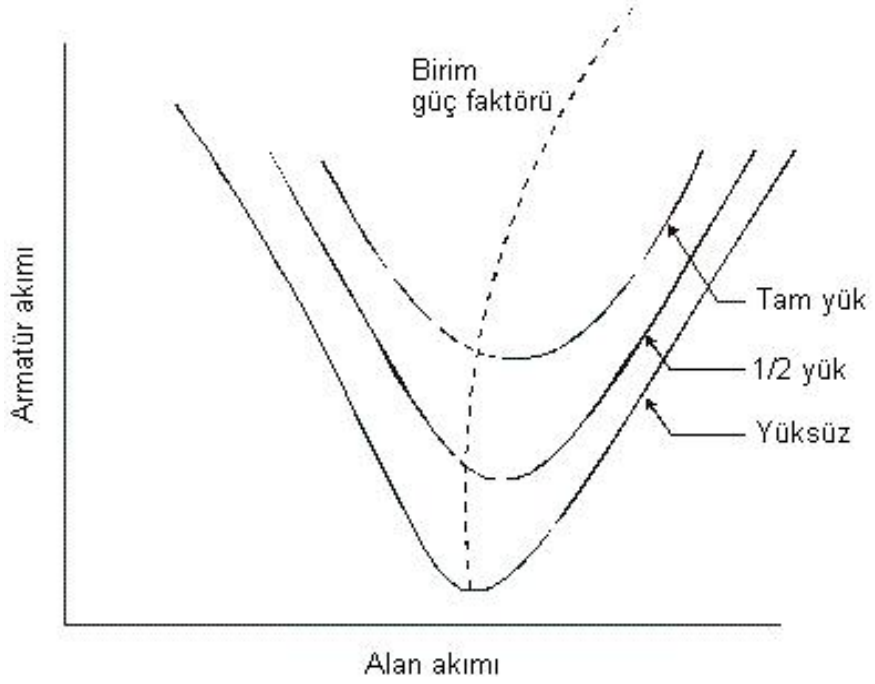
2.2.6 “V” eğrileri

Senkron motorun armatür akımı, sabit mekanik çıkış için motorun alan akımına göre çizilirse, eğri, V eğrisi olarak bilinir.

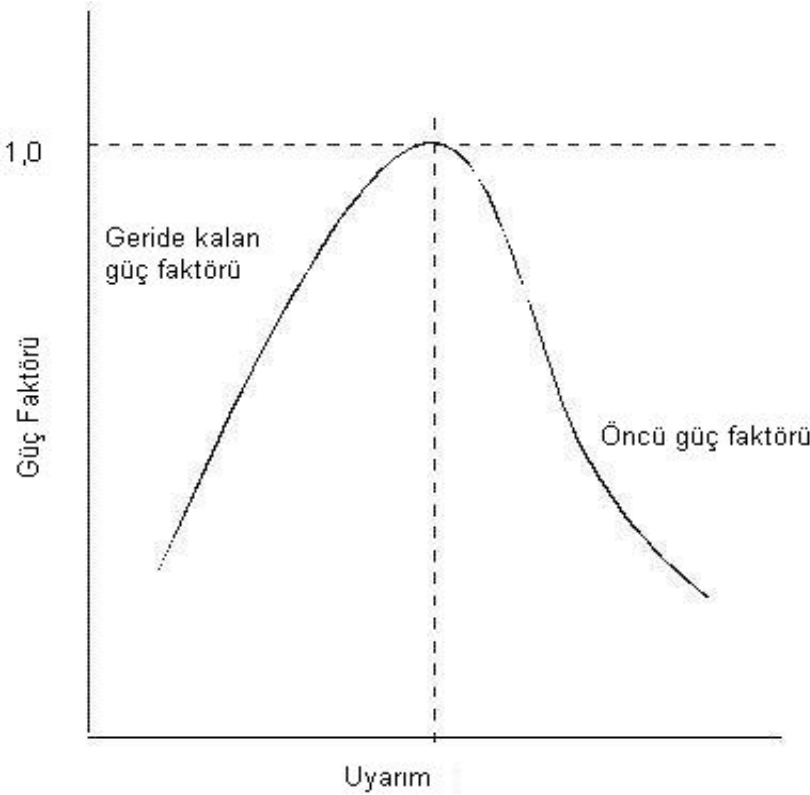
V eğrileri, testler sırasında sabit tutulan yüklerin çeşitli değerlerine ilişkin testler ile elde edilebilir ya da çizilebilir. Yüksüz durumdaki senkron motora, tam yükün % 50'sine ve tam yüke sahip senkron motora ilişkin tipik V eğrileri, Şekil 2.4(a)'da gösterilmektedir.

Sabit güç verilirse, armatür akımı azalır ve alan akımı arttıkça, güç faktörü geride kalır. Birim güç faktöründe minimum hale gelir. Öncü güç faktöründe artar ve V eğri karakteristiğini oluşturur.

Sabit çıkışa ilişkin güç faktörü, alan akımına göre çizilirse, şekil, Şekil 2.4(b)'de gösterildiği gibi V eğrilerinin tersi şeklindedir.



Şekil 2.4 (a) – Senkron bir motora ilişkin tipik V eğrileri



Şekil 2.4 (b) – Güç faktörü-uyarım

2.2.7 Senkron motora ilişkin kayıplar ve verim

Senkron motordaki kayıplar aşağıdaki şekildedir:

- Sabit kayıplar, çekirdek kaybını, sürtünme ve rüzgar kaybını ve fırça sürtünme kaybını kapsar. Bu kayıplar, yüksüz durum testiyle elde edilebilir.
- Armatür sargılarındaki I^2R kaybı ve iletkenlerdeki kaçak kayıpları [stray losses].
- Uyarma devresi kayıpları, bunlar, alan bakır kaybını, reosta kaybını, fırça kontak kayıplarını kapsar.

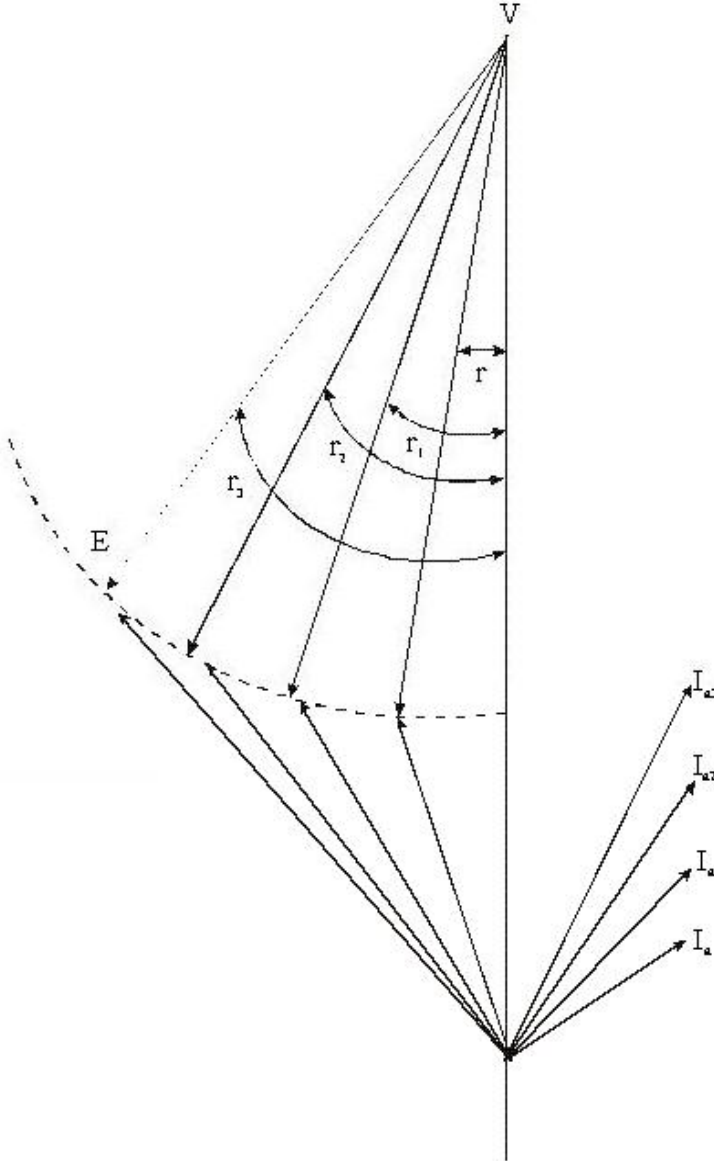
Senkron motorun verimi, aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$\text{Verim } (\eta) = \frac{\text{Giriş Gücü} - \text{Kayıplar (Sabit \& } I^2R \text{ \& Uyarım)}}{\text{Giriş Gücü}}$$

2.2.8 Senkron motorların bir nokta çevresinde dalgalanması

Dalgalanma [*hunting*] sorunu, senkron motorla ilgili bir sorundur. Motor üzerindeki yük arttıkça, stator kutbuyla kilitli rotor kutbu arasındaki açı yavaş yavaş artar.

Motor rotoru, gerekli torku üretmek için ileri yönde dönen alanın kutuplarının belirli bir açı kadar arkasında kalır. Stator akımı da artacaktır. Motor hızı düşecek ancak yük, senkronizasyonun ya da kilitlemenin bozulmasına neden olmadığı sürece, motor senkron halde kalacaktır.



Şekil 2.5 – Senkron motordaki sabit uyarımlı farklı yüklerle ilişkin akım tepkisi

Faz farkındaki bir artış, motorun, elektrik şebekesinden daha fazla akım çekmesine ve armatürde daha fazla güç akışına neden olur. Dönen kısımların kinetik enerjisinin bir kısmı, hızın azaltılması sırasında yüke iletilir.

Motor, artırılmış yükün gerekli tork açısında tam olarak yavaşlayamaz. Bu noktayı aşar, daha fazla tork üretir ve hızı artırır. Bunu takiben hız düşer ve çevrim tekrarlanır. Yük aniden atılırsa, rotor kutupları, ileri yöndeki alanın kutuplarının neredeyse karşısına çekilir ancak rotor inerşiasından dolayı, rotor kutupları fazla ileri gider ve yeniden geri çekilir. Bu, motordaki yük şartlarına karşılık gelen denge konumu civarında salınımlara neden olur. Bu periyodik değişiklik, dalgalanma olarak bilinir.

Senkron motorun yükündeki ani artışa ilişkin fazor diyagramı, Şekil 2.5'te gösterilmektedir.

Armatür akımı, I_a 'dan I_{a1} , I_{a2} , I_{a3} 'e kadar çıkar ve tork açısı, γ 'dan γ_1 , γ_2 , γ_3 'e çıkar. Uyarma gerilimi (E) sabit olarak kabul edilir. Yükteki değişimler periyodikse ve rotor salınımlarının doğal frekansıyla senkron ise, bu salınımların büyüklüğü gitgide artar ve motorun çalışmasını bozacak seviyeye gelebilir.

Bu sorunu çözmek için, salınımların sönümlenmesi gereklidir ve dalgalanmanın büyüklüğünde bir artış olmasına izin verilmemelidir.

Bu, senkron motorun kutup ayağında sönümleyici bir sargı kullanılarak gerçekleştirilir. Dalgalanma meydana geldiğinde, alan akısındaki armatür etkisinden dolayı, kutup ayağının yüzlerinde bir akı kayması oluşur. Kayan akı, sönümleyici sargıda dolaşan akımlar oluşturur. Salınımların kinetik enerjisi, ısı enerjisine dönüştürülerek sönümlenir. İndüklenen akım, armatür akısının ve alan akısının nispi konumlarındaki değişikliğe karşı koyar ve bu nedenle, etkin bir sönümleyici gibi çalışır.

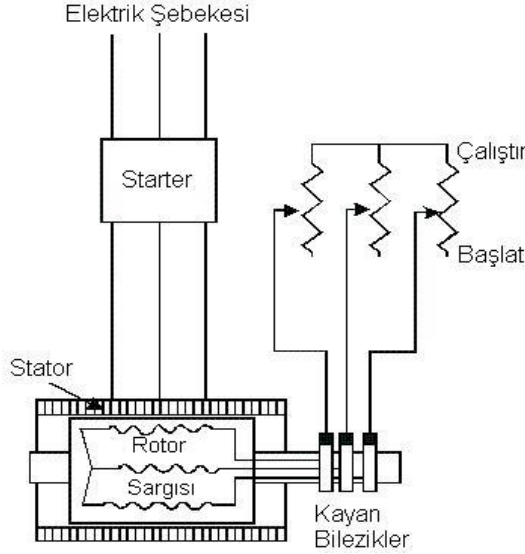
Böylece, senkron motorlardaki dalgalanma sorunu önlenabilir.

2.2.9 3-fazlı sargılı rotorlu motorun çalışma ilkesi

Sincap kafesli endüksiyon motoruna ilâve olarak, sargılı-rotorlu endüksiyon motoru, rotora yerleştirilen ve kayan bilezikler vasıtasıyla harici değişken dirençlere bağlanan bir bobin serisine sahiptir.

3-fazlı rotor bağlantıları, kayan-bileziklere bağlanır. Kayar bilezikler vasıtasıyla rotor devresindeki direnç değiştirilerek rotor direncinin değiştirilmesi mümkündür. Hız ve başlangıç torku değişecektir. Stator sargısı, 120 derece elektriksel açı farkı olan 3-fazlı münferit bir sargıya sahip endüksiyon motoruna benzerdir.

Şekil 2.6'da, sargılı rotorlu endüksiyon motoru gösterilmektedir. Stator sargılarına 3-faz beslenerek normal bir endüksiyon motoru gibi çalışır; tek fark, hızın, rotor direncine bağlı olarak değişmesidir.



Şekil 2.6 – Sargılı rotorlu endüksiyon motoru

Yüksek seviyedeki başlangıç torku, düşük seviyedeki başlangıç akımı ile elde edilir. Hiçbir direnç yoksa, motor, tam hızda çalışacaktır, rotor devresindeki direnç arttıkça, hız azalacaktır. Normal çalışma için, kayan bilezikler kısa-devre yaptırılır.

2.2.10 Sargılı rotorlu motorun çalıştırılması

Yüksek seviyede bir başlangıç torku elde etmek için, motor, devredeki rotor devresi starter direnci kullanılarak çalıştırılır.

Motor hız kazandıkça, rotor direnci yavaş yavaş azaltılır. Bu, senkron hızın kaymasına neden olacak ve tork eğrisini, sargılı rotorlu motordan endüksiyon motor eğrisine maksimize edecektir. Son olarak, rotor ya da kayar bilezikler kısa devre yapılacaktır.

Bazı motorlar için, rotor direnci adım adım eklenecektir.

Bu motorun yönü, iki besleme gerilim kablusunun ucu birbiriyle değiştirilerek kolayca tersine çevrilebilir.

3-fazlı sargılı rotorlu bir motorun karakteristikleri şunlardır:

- Düşük seviyedeki başlangıç akımıyla yüksek seviyede başlangıç torku sağlar.
- Genelde çalıştırmaya yüklü durumda başlanılan uygulamalarda kullanılır.
- Kendiliğinden çalışmaya başlar.

- Belirli bir dereceye kadar hız ayarlamasının yapılması mümkündür.
- Rotor direnci kullanılarak hız büyük ölçüde değiştirilebilir.

2.3 Tek-fazlı AC motorlara ilişkin temel bilgiler

2.3.1 Tek-fazlı AC motor tipleri

3-fazlı AC motorlardan sonra, tek-fazlı AC motorlar da endüstriyel ve ticari uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Temel tek-fazlı AC motor tipleri şunlardır:

- Endüksiyon motorları
- Evrensel motorlar
- Senkron motorlar

Tek-fazlı AC motorların çoğu, farklı başlangıç düzenlemelerine sahip endüksiyon motorlarıdır.

Endüksiyon motoru

Önceki kısımda, 3-fazlı kaynak, motoru çalıştırabilen dönen bir manyetik alan oluşturmaktaydı; burada sadece tek bir faz vardır. Bu sorun, başlatma amacıyla dönen bir manyetik alan oluşturmak için yapay olarak eklenen ikinci bir faz sayesinde önlenir.

İki-kutuplu tek-fazlı bir endüksiyon motorunun şematik diyagramı, Şekil 2.7'de gösterilmektedir. Stator sargısına alternatif akım uygulanır, ana eksen boyunca stator alan eksenini sabit kalır, iki kutbun merkeziyle birleşir, değişken polaritelidir ve sinüsoidal olarak değişmektedir.

Durağan sincap kafesli rotordaki bu gibi titreşimli *[;pulsating]* bir alan, dönüşü sağlayamaz.

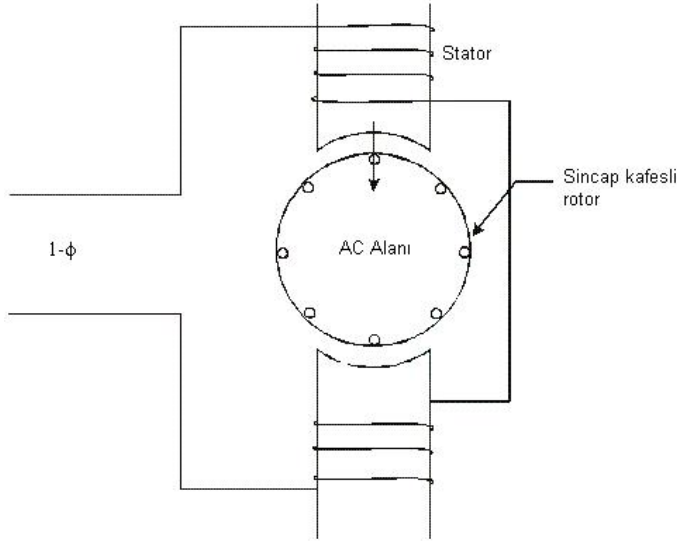
Bu, iki stator sargısı kullanılarak gerçekleştirilir. İlâve olarak, iki sargı akımı arasında bir faz farkı oluşturmak için, starter sargı devresine bir kapasitans ya da indüktans eklenir. Motor normal hıza bir kere ulaştıktan sonra, başlangıç sargısı faal olmayan hale getirilir.

Motor bir kere çalışmaya başladıktan sonra, başlamış olduğu yönde çalışmaya devam edecektir. Motorun çalışma yönünü tersine çevirmek için, sargı uçları birbiriyle değiştirilmelidir.

Tek-fazlı endüksiyon motorunun karakteristikleri:

- Tek-fazlı bir kaynaktan çalışır.
- Yardımcı başlatma araçları gereklidir.
- 3-fazlı motorla karşılaştırıldığında, aynı beygir gücü için daha büyük bir hacme sahiptir.
- Motor tarafından üretilen tork titreşimlidir ve düzensizdir.

- Çoğunlukla ev ve benzeri yerlerdeki uygulamalarda kullanılır.



Şekil 2.7 – İki-kutba sahip tek-fazlı endüksiyon motoru

2.3.2 Tek-fazlı endüksiyon motoru tipleri

Yardımcı sargılı [*split phase*] endüksiyon motoru

Bu, iki fazlı bir durum oluşturmak için iki-fazlı akımlara bölünen tek bir fazdır.

Bu nedenle, faz bölünmesi tarafından dönen bir alan oluşturulur. Yardımcı sargılı motorda, statordaki yardımcı sargı, yardımcı sargıya seri olarak bağlanan bir dirençle ya da ana sargıya seri olarak bağlanan bir reaktörle start etmek için kullanılır.

Yardımcı sargılı motorun start sargısı, yüksek direnç, düşük reaktans sağlayan ve çapı küçük olan birkaç tel turundan yapılmıştır.

Bu motorlar, düşük tork gerektiren küçük makinelerde kullanılmaktadır.

Kondansatörle çalıştırılan [*capacitor start*] endüksiyon motoru

Sadece sincap kafesli rotora sahip tek-fazlı bir endüksiyon motoru, başlangıç torku sağlayamaz.

Bu motorda, uygun büyüklükteki bir kondansatör, başlangıç sargı devresine eklenir, iki sargı arasında bir faz farkı oluşturulur.

Kondansatörle-start edilen tek-fazlı motorda, statordaki yardımcı sargı, bir kondansatörle ve bir merkezkaç anahtarıyla seri olarak bağlanır. Çalıştırma ve ivmelenme periyodunda, motor, iki-fazlı bir endüksiyon motoru gibi çalışır.

Tam yük hızının yaklaşık % 67'sinde, yardımcı devrenin bağlantısı anahtar vasıtasıyla kesilir ve bundan sonra, motor, tek fazlı bir endüksiyon motoru gibi çalışır.

Tek-değerli kondansatörlü ya da kondansatörlü yardımcı-sargılı motor

Tek-değerli kondansatörlü ya da kondansatörlü yardımcı sargılı motorda, iki-stator sargısının birine nispeten küçük sürekli beyan değerine sahip bir kondansatör bağlanır ve motor, iki-fazlı bir motor gibi çalışmaya başlar ve bu şekilde çalışmaya devam eder. Kondansatör ve sargı, sürekli beyan değerlerine sahip olmalıdır. Bu motorlar, genelde küçük pompalarda ya da benzer uygulamalarda kullanılır.

Kondansatörle-start edilen/kondansatörle-çalıştırılan motor

Kondansatörle-start edilen, kondansatörle-çalıştırılan motorda, başlangıç sargısı ya da yardımcı sargı, çalışma sırasında devreye bağlı olarak kalır.

Yüksek seviyede başlangıç torkuna sahip olmak için, kondansatör beyan değerleri büyük olmalıdır ancak çalışma sırasında, küçük bir kondansatör değeri uygundur.

Buna ilişkin bir çözüm olarak, farklı beyan değerlere sahip iki kondansatör kullanılır; biri başlatma kondansatörü olarak ve diğeri, çalıştırma kondansatörü olarak bilinir.

Motor bir kere tam hıza ulaştığında, başlangıç kondansatörü faal olmayan hale getirilir. Bu motorlar, iyi bir başlangıç torku sağlar ve sessiz bir şekilde çalışır.

Siperli kutuplu [*:shaded pole*] endüksiyon motoru

Bu, kutuplar siperlenerek faz farkına sahip iki faz oluşturmak için kullanılan diğer bir metottür. Siperli kutup, çıkık kutuplara sahiptir, her bir kutup, iki kısma bölünür. Her bir kutup yüzünün küçük bir kısmı, kısa-devreli bakır bir halkayla sarılır.

Motor beslendiğinde, siperli kısmın altındaki akı, siperli-olmayan kısmın altındaki akının arkasında kalır. Böylece, bir faz farkı oluşur ve dönen bir manyetik alan elde edilir.

Siperli kutuplu motor pahalı değildir çünkü yardımcı sargıya ya da başka mekanizmalara sahip değildir. Bu motorlar, genelde küçük fanlar için kullanılan düşük torklu motorlardır.

Geritepmeli tek-fazlı motor

Geritepmeli [*repulsion-start*] tek-fazlı motorun temel çalışma ilkesi, diğer motorlarla ilginç bir tezata sahiptir.

Geritepmeli tek-fazlı bir motorda, tambur sargılı rotor, sincap kafesli bir rotora benzer. Devre, rotor sargısının manyetik eksenini stator sargısının manyetik eksenine eğimli olacak şekilde kısa-devreli fırça çifti ile komütatöre bağlanır. Rotor devresinde akmakta olan akım, başlatıcı ve ivmelendirici bir tork oluşturmak için alanla etkileşir. Tam yük hızının yaklaşık % 67'sinde, fırçalar kaldırılır, komütatör kısa devre yaptırılır ve motor, tek-fazlı sincap kafesli bir motor gibi çalışır.

Geritepmeli endüksiyon motoru, başlangıç aşamasında ve çalışma sırasında rotordaki geritepmeli bir sargıyı kullanmaktadır. Geritepmeli endüksiyon motoru, geritepme sargısı gibi davranan dış rotor sargısına ve dahili bir sincap kafesli sargıya sahiptir. Motor hızlandıkça, indüklenen rotor akımı, geritepme sargısından sincap kafesli sargıya kısmen kayar ve motor kısmen bir endüksiyon motoru gibi çalışır.

Geritepmeyle start edilen motorlar, yüksek seviyede bir başlangıç torkuna sahiptir. Bu motorların hızları, fırçaların konumları değiştirilerek değiştirilebilir.

Seri sargılı tek-fazlı ya da evrensel motor

Seri sargılı tek-fazlı motor, seri sargılı DC motorda olduğu gibi, stator sargısıyla seri bir rotor sargısına sahiptir.

Bu motor tipi, benzer yüksek seviyede başlangıç torkuna sahip DC seri motora benzerdir. Bu motor, ayrıca evrensel motor olarak da adlandırılır çünkü bu motor, AC ya da DC kaynaktan çalışacak şekilde tasarlanmıştır.

AC uygulandığında, alan ve armatür polaritelerinde anlık bir değişiklik meydana gelir. Alan sargısı düşük indüktansa sahip olduğu için, bu motor, uygun zamanlarda akımın yönündeki tersine dönme işlemlerini gerçekleştirir.

Doğru Akımla da (DC) çalıştırılabildiği için, bu motor, evrensel motor olarak da adlandırılır.

Tek fazlı senkron motor

Hız açısından bakıldığında, bu tip motor, 3-fazlı senkron motora benzerdir çünkü bu motor sabit hızda çalışmaktadır. Stator sargısı, tek-fazlı bir kaynağa bağlanırken, rotor, sabit mıknatıslı bir maddeden yapılmıştır.

Direnç ve kondansatör, tek bir sargıyla seri olarak bağlanır. Bu, iki sargı arasında 90 derece faz farkı olmasına neden olur.

İlk 90 derece için, bir sargı grubu, elektromıknatıs rotorunu çeken bir kuvvet oluşturur. Daha sonra, ikinci faz sargısı grubu etkindir ve rotoru yeniden yeni konumuna çeker. Bu, rotora, çalışmaya başlarken ve çalışma sırasında gerekli olan kuvveti sağlar.

2.4 Motor mahfazaları

2.4.1 Motor mahfazaları

Motorlar, standart gövde büyüklüklerinde imâl edilir, beyan çıkış sağlar, gövde büyüklüğü doğal olarak beyan çıkışla bağlantılı olarak artar. Belirli bir gövde büyüklüğünde, çeşitli uygulamalara uygun belli sayıda tasarım vardır, örneğin, ayak-monteli ya da flanş monteli tipler mevcuttur.

Gerekli mahfaza tipi, motorun çalışmasının gerekli olduğu şartlara bağlıdır. Bu nedenle, iç kısımlara toz ve su girmesini önleyecek yapıda bir mahfaza seçilmelidir. Mahfaza, ayrıca çevreyi, motorun dahili elektrikli ve hareketli kısımlarından korumak için de kullanılır.

Gerekli olan yalıtım ve soğutma tipi, sıcaklık artışına ve çalışma sıcaklığı sınır değerlerine bağlıdır.

Terminal kutusunun konumu (başka bir deyişle, kutunun üstte ya da yanda olması) motor sipariş edilirken belirtilmelidir.

Gövde, bölge şartlarına uygun belli sayıda tasarıma sahip olabilir. Bazı standart tasarımlar şu şekildedir:

Tamamen mahfazalı, havalandırılmalı-olmayan tip

Bu gibi motorlar, 2 ya da 3 KW'a kadar olan büyüklüklerle sınırlıdır. Soğutma, yüzey yayılması vasıtasıyla gerçekleşir çünkü havalandırma delikleri yoktur. Gövde, sağlam bir yapıya sahiptir.

Sıçramaya-karşı korumalı tip

Bu gibi motorların gövdeleri, havalandırma deliklerine sahiptir, bu delikler, düşey olarak ya da düşey açığa göre 10 dereceden daha büyük bir açıyla düşen sıvı damlalar ve toz parçacıkları, gövdeye doğrudan ya da yüzeye çarparak ya da yüzeyden akarak giremeyecek şekilde tasarlanmıştır.

Bu tip, damlamaya karşı korumalı motorun bir benzeridir.

Tamamen-mahfazalı fan-soğutmalı

Tamamen-mahfazalı fan-soğutmalı motorlar, hava çeken ve bu havayı, içteki tamamen kapalı gövde ile dış kabuk arasında ileten ve motor şaftına monte edilen bir fana sahiptir. Dahili bir fan, dahili

olarak üretilen ısıyı mahfazalı gövdeye taşır, gövde, şafttaki fan tarafından çekilen hava vasıtasıyla soğutulur. Mahfazalı gövde, tozun ve nemin aşındırıcı etkilerine karşı koruma sağlar.

Korumalı tip

Korumalı tip motorlar, uç koruyuculardaki açıklıkları kapatan delikli kapaklara sahiptir. Bu nedenle, motorun dahili ve canlı kısımları, hava akışını engellemeyen tel ağ ya da metal kapak kullanılarak mekanik olarak korunur.

Damlamaya-karşı korumalı tipler

Bu gibi motorların gövdeleri, düşey çizgiye göre 15 dereceden daha büyük açıda makineye düşen su damlalarına ya da toz parçacıklarına karşı koruma sağlar. Su damlaları ve parçacıklar, motora doğrudan ya da yüzeye çarparak ya da yüzeyden akarak giremez.

Bu nedenle, havalandırma delikleri kapak vasıtasıyla korunur.

Boruyla ya da olukla havalandırılan tipteki motor

Motorun etrafındaki hava, motor sargısından geçerken zarar verici olabilir.

Bu durumda, motorun havalandırılması için, boru ya da oluk vasıtasıyla dışarıdan temiz hava getirilir. Hava dolaşımını sağlamak için, oluğun giriş tarafına ya da çıkış tarafına üfleyici cihaz takılır.

2.4.2 Motor isim plâkası

Motor isim plâkası, motor hakkındaki önemli bilgilerden oluşur. Motor isim plâkasında aşağıdaki bilgiler mevcuttur:

- Motor beyan değeri
- Motor beslemesine ilişkin ayrıntılar
- Motor bağlantısına ilişkin ayrıntılar
- Motor gövde tipi ve büyüklüğü
- Motor rpm'i
- İzin verilebilen sıcaklık artışı
- Motorun görevi
- Mahfaza tipi
- Kutup sayısı

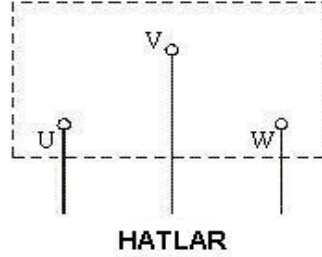
Motor hakkında genel bir fikir elde etmek için, motorun isim plâkasına bakmak faydalıdır.

2.5 Motor terminal tanımı ve bağlantı diyagramı

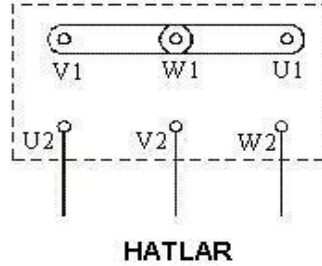
Terminal Bağlantı Diyagramı

3 ya da 6 kablolu D.O.L. ya da oto transformatörlü start
Kablo Bağlantı Sayısı

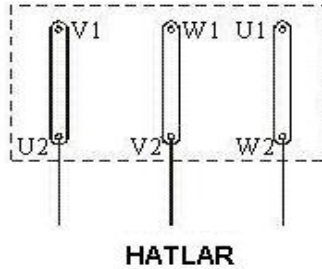
3 YILDIZ YA DA ÜÇGEN



6 YILDIZ



6 ÜÇGEN



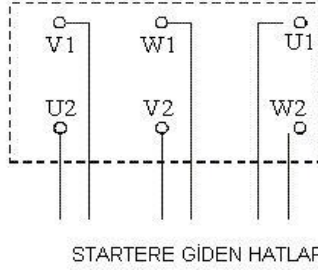
Şekil 2.8(a) – Doğrudan-hat-üzerindeki startere ilişkin tipik devre diyagramı

Genelde, motor terminali bağlantı diyagramı motor üzerinde yer almaktadır. 3-fazlı bir motor için, üç sargı ucu bağlantısı gösterilmektedir - U1&U2, V1&V2 ve W1&W2.

Otomatik transformatör ile ya da *doğrudan-hat-üzerinde* (DOL) 3 ya da 6 kablo bağlantılı çalıştırmaya ilişkin motor terminaleri ve bağlantı diyagramı, Şekil 2.8(a)'da gösterilmektedir.

6-kablo bağlantılı Yıldız-Üçgen starta ilişkin motor terminal bağlantı diyagramı, Şekil 2.8(b)'de gösterilmektedir.

6 ÜÇGEN



Şekil 2.8(b) – Üçgen starterin tipik devre diyagramı

Benzer şekilde, DC motor için, alan bağlantıları F1 & F2 ile gösterilirken, armatür sargısı, A1 & A2 ile gösterilmektedir. DC motor, seri tipli ya da bileşik tipli ise, o zaman seri sargı uçları, S1 & S2 ile gösterilmektedir.

2.6 Motor beyan değerleri ve yalıtım tipleri

2.6.1 Motor beyan değerleri

Motor beyan değerleri, sıcaklık artışı belirli sınır değerlerin altındayken, önceden belirlenmiş çalışma şartları altındaki motor çıkışı olarak ifade edilebilir.

Motorlar, çekirdek kaybı, stator kaybı, rotor kaybı, sargı kaybı ve sürtünme kaybı gibi çeşitli kayıplara sahiptir. Tüm bu kayıplar, ısı oluşumuna neden olur.

Motor üzerindeki yük arttıkça, oluşan ısı da artar. Motorun çalışmasının bozulmaması için, oluşan ısı, harcanan ısıya eşit olmalıdır.

İki tip motor beyan değeri vardır:

- Sürekli
- Aralıklı

Sürekli olarak çalışan motorlar, isim plâkasında belirtilen sürekli beyan yükte çalışan motorlardır. Bu motorlar, aşırı ısınma olmaksızın bu yüklerle sürekli olarak çalıştırılabilir.

Aralıklı çalışan motorlar, bir saat civarı gibi kısa bir süre boyunca maksimum sürekli beyan değer üstündeki yüklerle çalıştırılır. Bu motor, üretilen ısının, zaman aralıkları arasında harcanması için yeterli süre geçecek şekilde çalışmalıdır.

2.6.2 Motor yalıtımı

Yalıtım, farklı çalışma şartları altında motorun gerilim şartlarına dayanabilmelidir.

Aynı zamanda yük ve çevre şartlarına bağlı olarak, motorun sıcaklığı da artar. Bu nedenle, sıcaklık artışına da dayanabilmelidir.

Sıcaklık artışı önemlidir, bu nedenle, motorun herhangi bir kısmındaki sıcak-noktanın sıcaklığı, kullanılan yalıtım tipinin izin verilebilen sınır değerini aşmaz.

Yalıtkan malzemeler söz konusu olduğunda, termal karakteristikler, dielektrik karakteristiklerinden daha hassastır, başka bir deyişle, bir yalıtım malzemesinin arızalanmasının sebebi, gerilim sınırlamalarından çok termal sınırlamalara bağlıdır.

Birçok durumda, sıcaklıktaki ya da yükteki artış, iletken sargısında arızaya neden olmaz ancak yük akımındaki artış ya da arıza akımındaki artış aşırı yüksek seviyede olduğunda, iletkeni saran yalıtım termal olarak arızalanır, bu da sargının arızalanmasına neden olur.

Bu nedenle, elektrikli motorlardaki izin verilebilen maksimum sıcaklık artışı, kullanılan yalıtım tipi ve motor yapısının tipi açısından dikkatli bir şekilde incelenmelidir.

Elektrikli makinelerde kullanılan yalıtım malzemelerinin temel karakteristikleri şunlardır:

- Dielektrik dayanıklılık
- Termal dayanıklılık

Elektrikli makinelerde kullanılan yalıtım malzemesi, aşağıdaki şartları sağlamalıdır:

- Yüksek seviyede dielektrik dayanıklılığı, yüksek seviyede spesifik direnç ve alternatif elektrik alandaki minimum kayıp
- Yüksek seviyede mekanik dayanıklılık ve malzemenin esnek olması
- Yalıtımın termal dayanıklılığı; yalıtım malzemesi, sargıların çalışma sıcaklıklarına uzun süre maruz kaldığında, yalıtım özelliklerini ve mekanik özelliklerini korumalıdır.
- Malzeme, kimyasal faktörlerden etkilenmemelidir.

İzin verilebilen maksimum sıcaklık artışı, izin verilebilen maksimum sıcaklık – çevre sıcaklığı ile belirlenebilir.

Elektrikli makineler için, yalıtım malzemeleri aşağıdaki şekilde sınıflandırılmış ve standartlaştırılmıştır:

- *A sınıfı yalıtım:* Yağa daldırılmış pamuk, ipek, kağıt ve benzer organik malzemeler ve enamelli teller. A sınıfı yalıtıma ilişkin sınırlayıcı sıcak-nokta sıcaklığı 105°C'dir.

- *E sınıfı yalıtım:* A sınıfı malzeme ile B sınıfı malzeme arasındaki ara sınıf yalıtım malzemesi.
- *B sınıfı yalıtım:* Organik bağlayıcı maddelerle birlikte bulunan mika, asbest, cam fiber ve benzer inorganik malzemeler. B sınıfı yalıtıma ilişkin sınırlayıcı sıcak-nokta sıcaklığı 130°C'dir.
- *F sınıfı yalıtım:* Silisyum ya da benzer sıcaklık dayanımlı bağlayıcı malzemesiyle mika, asbest ya da cam fiber taban. F sınıfı yalıtıma ilişkin sınırlayıcı sıcak-nokta sıcaklığı 155°C'dir.
- *H sınıfı yalıtım:* Silisyum ya da benzer sıcaklık dayanımlı bağlayıcı malzemesiyle mika, asbest, cam fiber taban. H sınıfı yalıtıma ilişkin sınırlayıcı sıcak-nokta sıcaklığı 180°C'dir.

2.6.3 AC motor bağlantıları

Hız-kademeli motor

3-fazlı endüksiyon motoru, sabit-hızlı bir makinedir. Endüksiyon motorunun hız kontrolü, aşağıdakiler gerçekleştirilerek sağlanabilir:

- Kutup sayısı değiştirilerek
(Ve belki de teorik olarak):
- Uygulanan gerilim değiştirilerek
- Uygulanan frekans değiştirilerek

Ancak, gerilimin ve frekansın azaltılmasıyla ilgili sorunlardan dolayı, son iki metot nadiren kullanılmaktadır. İlk metot, sincap kafesli motorlar için uygundur çünkü sincap kafesli rotor, makul herhangi bir stator kutup sayısına adapte edilebilir. Stator kutup sayısındaki değişiklik, iki ya da daha fazla tamamen bağımsız stator sargısı vasıtasıyla sağlanır. Her bir sargı, farklı sayıda kutup ve bu nedenle farklı bir hız sağlar.

Her bir sargı, farklı bir terminal grubuyla sonlandırılır, bu terminaller, sargıyı kaynağa bağlayacak şekilde anahtarlanabilir. Bir anda bir sargı kullanılır ve diğer sargının bağlantısı tamamen kesilir. Bu metot, asansörlerde, taşıma işlerinde ve makine araçlarını süren küçük motorlarda uygulanır.

Çift gerilimli motor

Çift gerilimli bir motor, tek-fazlı bir endüksiyon motorudur. 110 V'luk ya da 220 V'luk iki AC gerilimle çalıştırılabilir. Bu gibi motorlar, iki ana sargıya ve bir başlangıç sargısına sahiptir. Bir gerilimden diğerine geçişi sağlamak için uygun sayıda kablo ucu dışarıya çıkarılır.

Motor, daha düşük bir gerilimle çalıştırılacaksa, iki ana sargı paralel olarak bağlanır. Daha yüksek bir gerilimde çalıştırılacaksa, iki sargı seri olarak bağlanır. Yukarıdaki devre diyagramlarından görülebileceği gibi, başlangıç sargısı her zaman alçak gerilimle çalıştırılır, bu amaçla, başlangıç sargısı ana sargılardan birine paralel olarak bağlanır.

2.7 Motorun ileri ve geri yönde çalıştırılması

2.7.1 Endüksiyon motoru

Asansör ve vinç uygulamaları gibi belirli uygulamalarda, motorun ters yönde de çalıştırılabilmesi gereklidir. Bu gibi uygulamalarda, ters yönde de çalışabilen bir motorun kullanılması gereklidir, başka bir deyişle, şaft, hem saat yönünde hem de saatin tersi yönünde dönebilmelidir. Endüksiyon motorunda, herhangi iki kablonun yer değiştirilmesiyle bu durum kolayca gerçekleştirilebilir.

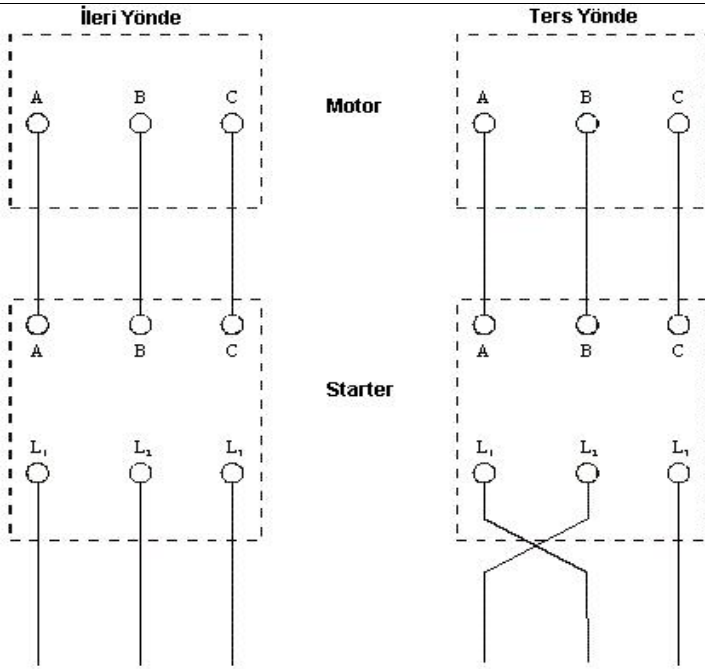
Şekil 2.9'da, DOL starterli bir endüksiyon motorunun yönü tersine çevrilebilir. L1 ve L2 fazları birbiriyle değiştirilebilir, herhangi iki fazın birbiriyle değiştirilmesiyle endüksiyon motorunun yönünün değiştirilebilmesi her zaman mümkündür.

Bu, motor terminallerindeki kabloların ya da starter uç bağlantısındaki kabloların yerleri birbiyle değiştirilerek gerçekleştirilebilir.

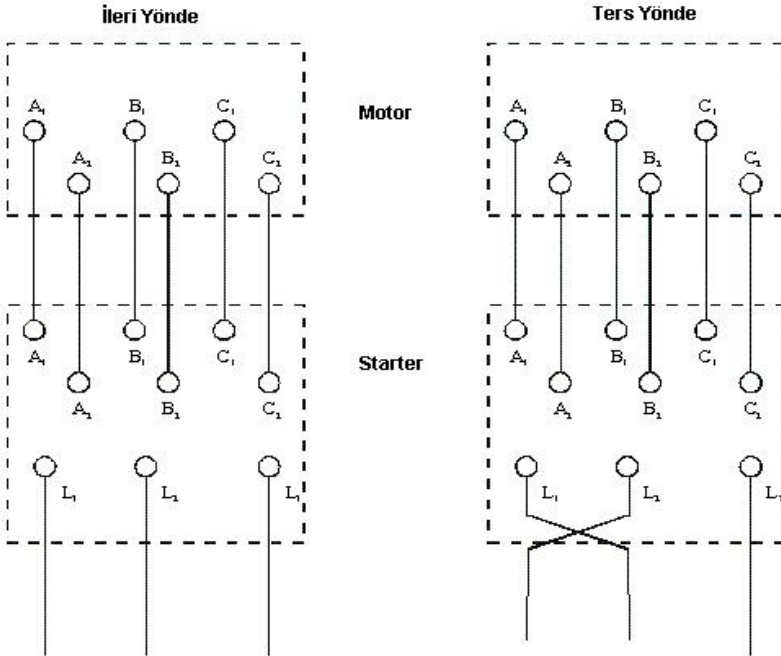
Ancak startere giden hatlarda değişiklik yapılması her zaman daha iyidir çünkü motor terminallerinde değişiklik yaparken, Yıldız-Üçgen start için düzenlenmiş motorlar söz konusu olduğunda, bağlantılarda karışıklık olabilir.

Şekil 2.10'da yıldız-üçgen starterli 3-fazlı bir endüksiyon motorunun bağlantılarının nasıl tersine çevrildiği gösterilmektedir. L1 ve L2 fazları yer değiştirilir; herhangi iki faz değiştirilerek endüksiyon motorunun çalışma yönünün değiştirilmesi her zaman mümkündür.

Daha önce açıklanmış olduğu gibi, karışıklık olmasını önlemek için startere giden hatlarda değişiklik yapılması daha iyidir.



Şekil 2.9 – Üç-fazlı bir motorun çalışma yönünün tersine çevrilmesi



Şekil 2.10 – Yıldız/üçgen motorun çalışma yönünün tersine çevrilmesi

2.8 Motor frenleme metotları

Motor frenlemesi, bir motorun çalışmasının durdurulması işlemidir. Motora verilen enerjinin kesilmesi, motorun durdurulmasını sağlar. Ancak, inerşiyadan dolayı, motor, bir süre daha dönecek; daha sonra duracaktır.

Motoru hızlı bir şekilde durdurmak için, bir fren mekanizması gereklidir. Bu, motor frenlemesi olarak adlandırılır.

Elektrikli sürücüler çalıştırılırken, genelde motorun hızlı bir şekilde durdurulması ve çalışma yönünün tersine çevrilmesi gereklidir. Özellikle, elektrikli asansör ya da vinç uygulamalarında, yük istenmeyen bir şekilde ivmelenmemelidir, bu nedenle, sürücü motorun torku buna göre kontrol edilmelidir. Bazı uygulamalar, motor şaftının doğru bir şekilde konumlandırılmasını gerektirmektedir.

Motorların durdurma ve yönlerinin tersine çevrilme işlemlerinin doğru ve hızlı olması, sistemin üretkenliğini artırır. Örneğin, haddehane motoru uygulamasını ele alın.

Bu gibi uygulamalarda, elektriksel ya da mekanik olabilen bir frenleme torku gereklidir. Frenleme, iki şekilde sınıflandırılabilir:

- Elektriksel frenleme
- Mekanik frenleme

Elektriksel frenleme

Elektriksel frenlemede, motorun sargısı, torkun frenlenmesi için kullanılır. Frenleme işlemi sırasında, dönen birimin ya da şaftın hareketine karşı koyan frenleme torku oluşur. Bu, motorun elektrik bağlantıları değiştirilerek uygun bir şekilde gerçekleştirilir. Motor, kullanılan frenleme metoduna bağlı hız-tork karakteristiğine göre çalışır.

Mekanik frenleme

Mekanik frenlemede, dönen kısımlarla fren tamburları arasındaki sürtünme kuvveti, gerekli frenlemeyi sağlar. Bunu sağlamak için, fren balataları ve fren tamburları gibi mekanik cihazların kullanılması gereklidir. Elektriksel ya da mekanik olarak, sürücünün frenlemesi, belirli bir zamanda ve konumda motoru durdurmalıdır.

Çizelge 2.1'de, elektriksel frenleme ile mekanik frenleme kısaca karşılaştırılmıştır.

	Elektriksel frenleme	Mekanik Frenleme
--	----------------------	------------------

1. Bakım	Mekanik bir cihaz olmadığı için tozsuz çalışma mevcuttur ve bakımı kolaydır.	Mekanik frenler, frenlerin ayarlanması ve yıpranmadan dolayı fren hattının değiştirilmesi gibi sık sık bakım gerektirir.
2. Enerjinin Kullanımı	Dönen kısımların enerjisi, frenleme sırasında elektrik şebekesine geri döndürülebilen ya da kullanılabilen elektrik enerjisine dönüştürülebilir.	Dönen kısımların enerjisi, sürtünmede ısı olarak harcanır. Frenleme sırasında ısı oluşur.
3. Frenlemenin yumuşak ve düzgün oluşu	Frenleme düzgün ve yumuşaktır.	Şartlara bağlı olarak, frenleme yumuşak olmayabilir.
4. Cihaz	Belli frenleme uygulamalarında, motor beyan değerinden daha büyük beyan değere sahip cihaz.	Fren ayakları, fren hattı, fren tamburu gibi düzenler gereklidir.
5. Tutma	Tutma torkunu üretmek amacıyla, çalışma için elektrik enerjisi gereklidir.	Mekanik Frenleme, dönen kısmı ya da şaftı belirli bir konumda tutmak için uygulanabilir.

Çizelge 2.1 – Elektriksel frenleme ile mekanik frenlemenin karşılaştırılması

Sonuç

Elektriksel frenleme ile mekanik frenleme arasındaki karşılaştırmanın sonucunda, elektriksel frenlemenin mekanik frenlemeye göre daha etkin ve daha üstün olduğu görülmektedir. Ancak, güvenlikle ilgili nedenlerden dolayı, yük asansörü ya da vinç uygulamalarında gücün kesilmesi durumunda meydana gelebilecek arızaları önlemek için, bekleme durumundaki mekanik bir fren sistemi kullanılmaktadır. Ancak, motorun zorlu çalışma çevrimi söz konusu olduğunda, elektriksel frenleme, sadece frenleme süresinin frenlenmesi ve yavaşlamanın kontrol edilmesi istendiğinde kullanılmalıdır.

2.8.1 Elektrik motorlarına ilişkin frenleme metotları

Elektriksel frenleme aşağıdaki şekillerde sağlanabilir:

- Karşı akımla frenleme [*plugging*]
- Rejeneratif frenleme
- Dinamik ya da reostatik frenleme

Elektromekanik frenleme, elektromekanik fren vasıtasıyla gerçekleştirilebilir.

Karşı akımla frenleme

Motor ters yönde çalışmaktayken, motorun bir anda ileri yönde bağlanması ile 'karşı akımla frenleme' işlemi gerçekleştirilir. DC motorlarda 'karşı akımla frenleme' işlemi, armatür besleme kabloları tersine çevrilerek gerçekleştirilir, böylece motor, mevcut dönüşüne karşıt yönde bir tork oluşturacak akımı çeker.

Motor, fren gibi davranır ve hızlı bir şekilde durur ancak ters yönde ivmelenme eğilimine sahiptir. Ters yöne çevirme işlemi gerekli değilse, motor beslemesi sıfır hızda kesilmelidir.

DC motor söz konusu olduğunda, bu, armatürün besleme geriliminin polaritesi tersine çevrilerek gerçekleştirilir, ancak AC motor söz konusu olduğunda, faz sırası değiştirilir.

Bu frenleme metodu, yük, rotoru yüksek hızlara çıkarmaya çalıştığında, sabit bir hız sağlamak için de kullanılır.

Bu metod verimli değildir çünkü ara bağlantıdan dolayı akımı sınırlamak için kullanılan dirençlerde güç kaybı meydana gelir. Mekanik enerji ısıya dönüştürülür ve ilâve güç gereklidir. Aynı zamanda, büyük bir motor söz konusu olduğunda motoru frenlemek için ters yönde ani bir tork uygulanırsa, o zaman makineler zarar görebilir ve sistemde yüksek seviyede bir akım akar.

Elektriksel frenleme

Elektriksel frenlemede, dönen kısımların Kinetik Enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi ve bu enerjinin elektrik şebekesine geri döndürülmesi ya da bir dirençte harcanması mümkündür.

Rejeneratif frenleme

Enerji, elektrik şebekesine geri döndürüldüğünde, frenleme, rejeneratif frenleme olarak adlandırılır.

Bu metotta, frenleme sırasında motor, jeneratör olarak kullanılır, çalışan motora uygulanan ve motoru durduran yavaşlatıcı bir tork oluşur. Kinetik Enerji ve Potansiyel Enerji eksi motordaki kayıplar, elektrik şebekesine geri döndürülür ve motor sabit hızda çalışır. Bu nedenle, rejeneratif frenleme, yükün motoru ivmelendirme eğilimini ortadan kaldırır.

Dinamik frenleme ya da reostatik frenleme

Enerji bir dirençte ısı olarak harcandığında, frenleme dinamik ya da reostatik frenleme olarak adlandırılır.

Her iki durumda da makine, jeneratör gibi çalışır. Elektrikli makineler, motor işlevinden jeneratör işlevine yumuşak bir şekilde geçebilme özelliğine sahiptir.

Dinamik frenlemede, motor, alan sabit tutularak yüke ya da frenleme direncine anahtarlanmalıdır.

Elektromekanik sürtünmeli frenleme

Bu, motoru durdurmak ve motoru tek bir konumda tutmak için kullanılan dış frendir.

Bu fren, tambur fren düzeniyle birlikte bir solenoitten oluşur. Motor çalışırken, solenoit enerjilendirilir, bu nedenle, fren ayaklarını rotor şaftından uzak tutar. Motor faal olmayan hale getirildiğinde, solenoitin enerjisi kesilir, fren ayağı dönen şafta etki eder ve frenlerle şaft arasındaki sürtünme sayesinde frenleme işlemi gerçekleşir.

Bu fren tipi, motor durduktan sonra bile yükün bir konumda tutulmasını sağlar, bu nedenle, vinç uygulamaları gibi motorun sabit bir konumda tutulmasını gerektiren uygulamalarda kullanılır.

Bu frenler, tamamen elektriksel olan frenlemeden daha fazla bakım gerektirir çünkü fren ayak mekanizması zamanla yıpranır.

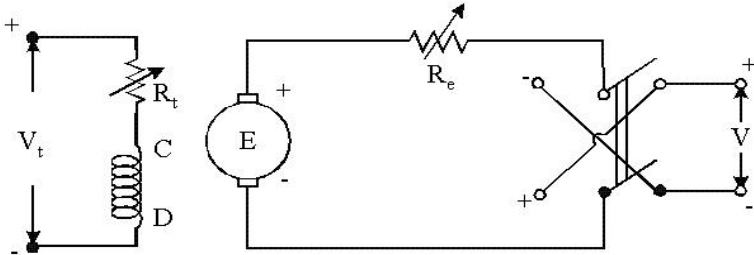
2.8.2 Endüksiyon motoru frenleme metotları

Rejeneratif frenleme

Bir endüksiyon motorunda, rotor, stator alanının senkron hızından daha yüksek bir hızda çalıştığında, kayma değeri negatif hale gelir ve makine güç üretir.

Motor, dönen alandan her ne zaman daha hızlı çalışmaya başlarsa, rejeneratif frenleme gerçekleşir ve dönen kısımların Kinetik Enerjisi elektrik şebekesine döndürülür.

Hız tork eğrisi, Şekil 2.11'de gösterildiği gibi ikinci kadrana uzanır.



Şekil 2.11 – Endüksiyon motorunun rejeneratif frenlemesi

Motorun hızı azalır ve frenleme torku motorun sabit hızda çalışmasını sağlar. Stator direncinin etkisinden dolayı, rejenerasyon

sırasında oluşan maksimum tork, motor işlevi sırasında oluşan maksimum torktan daha büyüktür.

Örneğin, yük asansörlerinde ve vinçlerde, motorun, senkron hızdan daha büyük bir hızda çalışma eğilimi vardır. Yük asansörü boş bir kafesi taşıırken, bu durum meydana gelir. Karşı ağırlıktan dolayı kafes tehlikeli hızlara ulaşabilir. Geçiş neredeyse otomatik olarak gerçekleşir, ivmelenmeyi durdurmak için bir tork oluşturulur ve rejenerasyon gerçekleşir. Otomatik rejenerasyon, aşırı ivmelenmeyi durdurur. Bu gibi durumlarda, daha iyi bir frenleme torku elde etmek için rotor direnç kontrolü uygulanabilir.

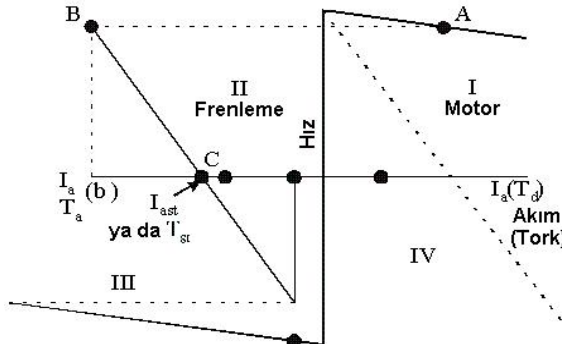
Bazı motorlarda, hız azaldığında rejeneratif frenlemenin uygulanması mümkündür. Bu durum, değişken frekanslı sürücülerde, motor frekansı anlık olarak azaltılarak da gerçekleştirilir – senkron hız düşer ve rejenerasyon için uygun şartlar oluşur.

Motor hızı düştükçe, motor durana kadar, frekans, frenleme sabit torkta ve stator akımında gerçekleşecek şekilde sürekli olarak azaltılır.

Rejeneratif frenleme sırasındaki çalışma noktası karakteristiğinin kararsız bölgesine düşerse, motor tehlikeli hızlarda çalışabilir. Yük torku motorun sağladığı torktan daha büyükse, bu durum meydana gelir. Oluşan tork, motoru frenleyemez ve aşırı ivmelenme meydana gelir. Bu ihtimal, rotorda büyük bir direnç kullanılarak ortadan kaldırılabilir.

Dinamik frenleme

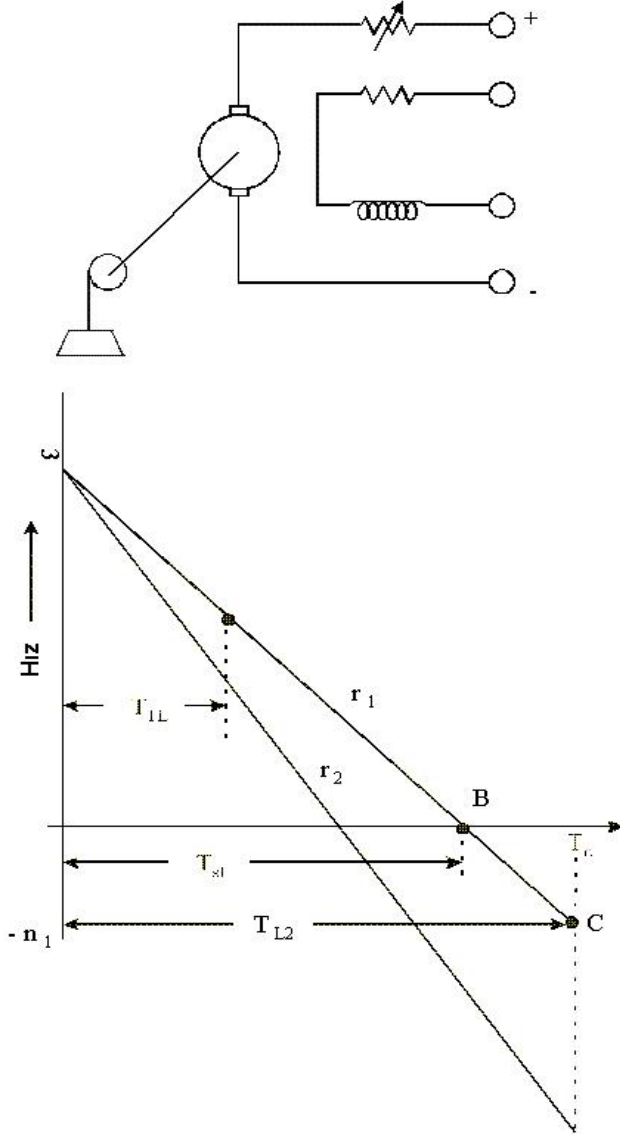
Dinamik frenleme, tersine-çevirme işlemlerini gerçekleştiremeyen sürücüler frenlemek için kullanılır. Şekil 2.12'de gösterildiği gibi, stator, AC elektrik şebekesinden DC elektrik şebekesine iletilir.



Şekil 2.12 – Endüksiyon motorunun dinamik frenlemesi

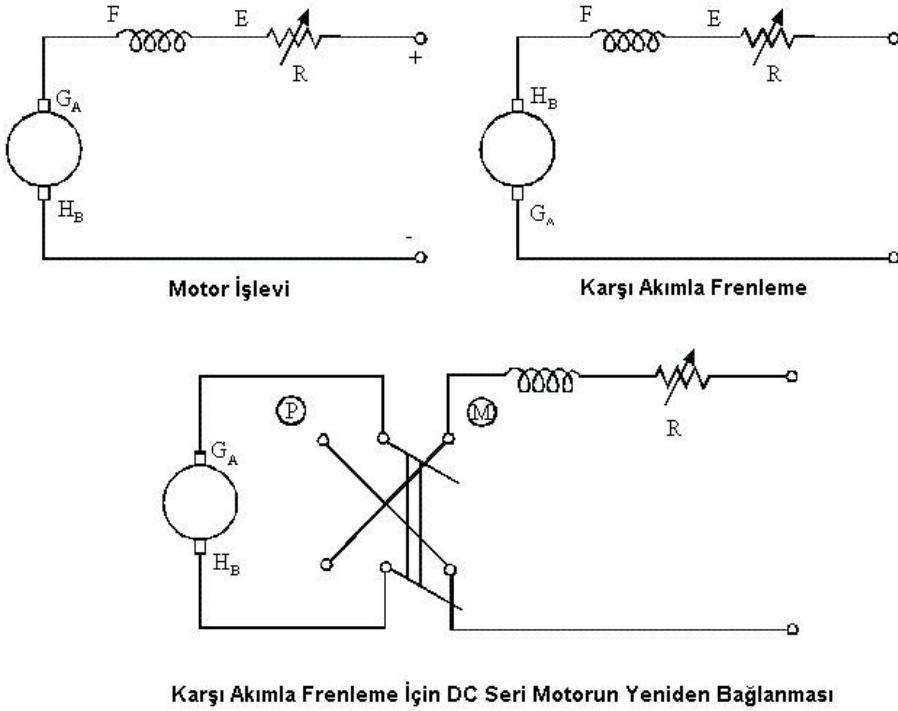
Statordan akan DC akım, durağan bir alan oluşturur. Bu, rotoru hızlı bir şekilde durdurmak için gerekli torku oluşturan rotor akımlarını indükler. Oluşan tork ve frenleme sırasındaki yavaşlama, DC güç

seviyesi ile kontrol edilebilir. Stator ve rotor devrelerindeki ilâve r_1 ve r_{2e} dirençleri, sırasıyla DC uyarma ve frenleme torklarını kontrol eder. Dinamik frenleme sırasında motorun eş değer devre ve fazor diyagramı, Şekil 2.13'te gösterilmektedir.



Şekil 2.13 – Motorun dinamik frenleme sırasındaki eş değer devre ve fazor diyagramı

Stator DC ile beslendiğinde, oluşan MMK durağıdır. MMK, DC beslemek için kullanılan stator bağlantılarına, tur sayısına ve akıma bağlıdır. DC beslemek için kullanılan olası bağlantılar, Şekil 2.14'te gösterilmektedir.



Şekil 2.14 – DC dinamik frenlemeye ilişkin stator bağlantıları

Dinamik frenleme, otomatik kontrolle birlikte kullanılır. Bu nedenle, asansör uygulamalarında endüksiyon motorları, DC motorlardan daha popülerdir. Statora DC besleme metotları, Şekil 2.20’de gösterilmektedir. DC uyarımı, sınırlayıcı R_1 direnci kullanılarak kontrol edilir.

Tork kontrolü, rotor direnç değişimi ile sağlanır. Alternatif olarak, motoru beslemek için köprülü doğrultucuya sahip bir AC kaynağı kullanılabilir.

AC dinamik frenlemede, stator, bir kondansatör grubuna anahtarlanır. Makine, kendinden-uyarımlı bir endüksiyon jeneratörü gibi davranır. Mekanik enerjinin tümü, rotor direncinde elektrik enerjisi olarak harcanır. Kondansatörlerin maliyeti yüksek olduğu için, bu metot ekonomik değildir.

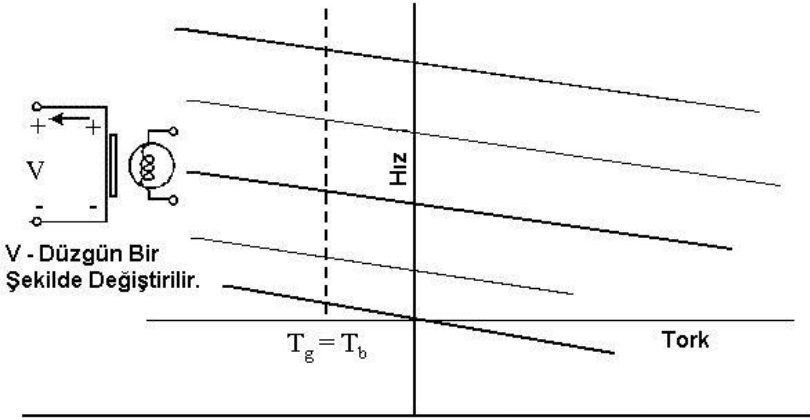
Karşı akımla frenleme

Bir endüksiyon motorunda, besleme faz sırası değiştirilerek, stator alanının yönü tersine çevrilebilir. Bu, karşı akımla frenleme olarak adlandırılır.

Uygulamada, bu, Şekil 2.15'te gösterildiği gibi motorların herhangi iki terminal beslemesi değiş tokuş edilerek gerçekleştirilir.

Giren kaynağın faz dizisi değiştirildiğinde, dönen akının yönü tersine döner, bu nedenle, ters yönde tork oluşur, bu tork, motoru frenler. Bu frenleme işlemi sırasında, motor, dönen yükten gelen kinetik enerjiyi absorbe eder, bu da, hızda azalmaya neden olur ve motor durur. Sıfır hıza yaklaştığında, motor kapatılmalıdır.

Yüksek kapasiteli motorlarda, motor yavaşlatılmadan ters yönde ani bir tork uygulanırsa (karşı akımla frenleme gerçekleştirilirse), bu, mekanik hasara neden olabilir. Bunu önlemek için, motorun hızı kabul edilebilir bir değerin altına düşmedikçe ters yönde tork uygulanmasına izin vermeyen özel bir koruma uygulanmalıdır.

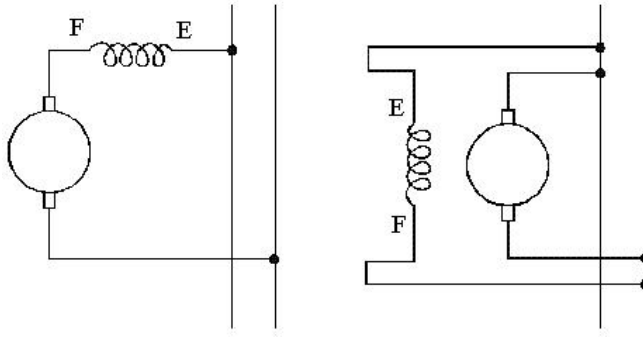


Şekil 2.15 – 3-fazlı bir endüksiyon motorunun karşı akımla frenlenmesi için faz sırasının değiştirilmesi

Bir endüksiyon motorunun hız-tork karakteristiği, rotor direnci değiştirilerek modifiye edilebilir.

Maksimum tork noktası, 1-2 kayma değeri aralığında elde edilebilir, oluşan tork rotoru frenleyecek şekildedir. Oluşan tork, rotorun ivmelenme eğilimini engellemek için de kullanılabilir.

Rotora büyük bir direnç eklenir, böylece çalışma noktası dördüncü kadrana kayar.



Şekil 2.16 – Karşı akımla frenleme sırasında endüksiyon motorunun hız-tork eğrisi

Oluşan frenleyici tork, rotorun ivmelenmesini önler ve rotor, Şekil 2.16'da gösterildiği gibi tek biçimli bir hızda çalışır.

Toplam frenleyici tork (T_P) frenleyici akımı sınırlandıran değişken rotorlu bir dirençle kontrol edilebilir.

2.8.3 Senkron motor frenleme metotları

Rejeneratif frenleme

Senkron motor, değişken frekanslı bir kaynağı kullanan değişken hızlı bir sürücü gibi çalıştığında, rejeneratif frenleme uygulanabilir ve kinetik enerjinin tümü elektrik şebekesine geri döndürülecektir.

Endüksiyon motorunda olduğu gibi, senkron hız rotor hızından daha küçükse rejenerasyon mümkündür.

Senkron motora benzer şekilde, bunu gerçekleştirmek için giriş frekansı yavaş yavaş azaltılır. Dönen kısımların kinetik enerjisi elektrik şebekesine geri döndürülür. Frenleme, sabit torkta gerçekleşir.

Dinamik frenleme

Dinamik frenlemeyi gerçekleştirmek için, senkron motor, elektrik şebekesiyle bağlantısı kesildikten sonra 3-fazlı dengeli rezistif bir yüke anahtarlanır.

Etkin frenleme için daha büyük bir frenleme torku elde etmek üzere, uyarım artırılabilir.

Hız azaldıkça terminal gerilimi ve akımı azalır. Çok düşük hızlarda, direncin etkisi daha büyüktür. Direnç, maksimum torktaki hızı etkiler. Maksimum tork, ideal olarak motor durdurulmadan hemen önce oluşturulabilir.

Karşı akımla frenleme

Karşı akımla frenleme metoduyla senkron motorun frenlenmesi, hat bozulmalarına ve etkin olmayan torka neden olan çok şiddetli frenleme akımı gibi büyük dezavantajlara sahiptir.

Motor, senkron endüksiyon motoruysa ve sadece makine bir endüksiyon motoru gibi çalışıyorsa, karşı akımla frenleme gerçekleştirilir.

2.9 Bir motora ilişkin ölçümler

Aşağıda bir motora ilişkin ölçümler yer almaktadır:

- *Sıcaklık*: Termometreler, sargıların ve makine yüzeylerinin, vb. sıcaklıklarını ölçer.
- *Gerilim ve akım*: Volt ve amper, taşınabilir voltmetre, kayıt yapan voltmetre, ammetre (kilitlemeli tip, kayıt yapan tip, CRO vb. gibi) kullanılarak ölçülür.
- *Yalıtım direnci*: Megger ile ölçülür (elle/motorla çalıştırılan)
- *Sargı direnci*: Kelvin köprüsü, Wheatstone köprüsü, direnç ölçerler, vb.
- *Titreşim*: Titreşim ölçme, izleme ve analiz cihazı
- *Hız*: Stroboskoplar, takometreler, vb.
- *Dielektrik kaybı açısı ölçümü*: Tan-Delta ölçümü

2.10 Motor arızaları ve motor ömrünün uzatılması için kullanılan metotlar

Endüksiyon motorlarının, hizmet sürelerinin uzun bir kısmında sorunsuz çalışması, düzenli ve rutin bakımın yapılmasını gerektirir. Düzenli temizleme, doğru şekilde yağlama ve uygun bakım yapılırsa, doğru şekilde seçilmiş ve uygun şekilde monte edilmiş bir motordan sürekli yüksek seviyede performans sağlanabilir.

Esas olarak, bir motorun faydalı hizmet ömrü, büyük ölçüde, bakım kalitesinin bir fonksiyonudur. Bakım, günümüzdeki motorlar için çok önemlidir çünkü bu motorlar, tam beyan değerlerde ve optimize edilmiş parametreler için tasarlanmıştır. Bu nedenle, motorların düzgün bir şekilde bakımının yapılmasındaki herhangi bir hata, muhtemelen performansı etkileyecektir.

Arızaların çoğu aşağıdakilerden dolayı meydana gelir:

- Yalıtım arızaları
- Rotor-çubuğu arızaları
- Mekanik sorunlar

Bir motora ilişkin bakım programı aşağıdaki şekildedir:

- Motorun periyodik olarak muayene edilmesi. Doğru şaft hizalaması. Doğrudan bağlanmış motorlar için, yük ile motor şaftı arasındaki şaft hizalaması düzgün olmalıdır. Kayış tipi bir sistemde, kayış durumunu ve kayış gerginliğini kontrol edin.
- Motor ısınmasını kontrol edin. Motor çabuk ısınıyorsa, hava filtrelerini kontrol edin ve temizleyin. Bu yüzden, hava akışı yeterli olmalıdır.
- Motoru kirden ve yağdan temizleyin.
- Motor etrafındaki ya da motorun içindeki nemi kontrol edin. Bu, motor sargısının yalıtım gücünü azaltabilir. Motorun, mümkün olduğunca hem içini hem de dışını kuru tutun. Ayrıca, uzun süredir kullanılmıyorsa, nem gidene kadar motoru birkaç saat çalıştırın.
- Rulman durumunu düzenli olarak kontrol edin. Rulmanlar, belirli bir yağla yağlanmalıdır. Aynı zamanda, yağlamanın her zaman uygun miktarda yapılmasına dikkat edin. Aşırı yağlama da yetersiz yağlama da zarar verebilir.
- Motordan ya da bağlantıdan herhangi bir olağan dışı gürültü gelip gelmediğini ya da motorun aşırı titreşim olup olmadığını kontrol edin. Gerekli ise titreşim analizi yapın.

Yukarıdaki ana noktalara uyulursa, o zaman motorda sorun çıkmayacaktır.

2.11 Motor kontrol sorunu – çözüm çizelgesi

Sorun	Sebeup	Çözüm
Kontaklarda takırtı	1. Kontrol devresinde zayıf kontak 2. Alçak gerilim.	1. Cihazı değiştirin. 2. Başlangıç aşamasında bobin terminal gerilimini/genel gerilim dalgalanmasını/gerilim çukurlarını kontrol edin.
Kaynak ya da donma	1. Akım demerajı anormal seviyede. 2. Uç basınç düşük	1. Kısa devreleri/toprakları kontrol edin. Motor yük akımını kontrol edin. Daha büyük kontaktör kullanın. 2. Kontakları/yayları değiştirin. Kontak taşıyıcı zarar görebilir. 3. Başlangıç aşamasında bobin terminal gerilimini

	3. Alçak gerilim 4. Konağın kapanmasını önleyen yabancı madde girişı. 5. Kısa devre / topraklama hatası.	ve gerilim çukurlarını kontrol edin. 4. Kontakları Freon'la temizleyin. 5. Arızayı giderin. Doğru beyan değere sahip sigorta/devre kesicinin kullanıldığından emin olun.
“Kısa uç ömrü. Uzun aşırı ısınması	1. Törpüleme ya da kaplama. 2. Yüksek akım kesintisi 3. Düşük uç basıncı. 4. Yabancı madde girişı 5. Kısa devre/topraklama hatası. 6. Gevşek güç devresi bağlantısı. 7. Sürekli aşırı yük.	1. Gümüş uçların törpülenmemiş olduğundan emin olun. Kaba noktalar ya da renk bozulumu arızaya neden olmaz. 2. Daha büyük bir cihazla değiştirin. Akım seviyelerini/arızaları kontrol edin. 3. Kontakları/yayları değiştirin. Kontak taşıyıcı zarar görmüş olabilir. 4. Kontakları Freon'la temizleyin. Mahfazanın çevre şartlarına uygun olup olmadığını kontrol edin. 5. Arızayı giderin. Doğru beyan değere sahip sigorta/devre kesicinin kullanılıp kullanılmadığını kontrol edin. 6. Sıkıştırın. 7. Motor yük akımını kontrol edin. Daha büyük bir cihaz monte edin.
Bobinler Açık devre	1. Mekanik hasar.	1. Bobinleri dikkatli bir şekilde tutun/saklayın.
Aşırı ısınmış bobin	1. Aşırı gerilim ya da yüksek çevre sıcaklığı. 2. Bobin uygun değil 3. Mekanik hasardan dolayı kısa devre yapılmış tür 4. Düşük-gerilim/mıknatıs sızdırmazlık düzenleri arızalıdır.	1. Terminal geriliminin, beyan geriliminin % 110'undan daha düşük olup olmadığını kontrol edin. 2. Doğru bobinle değiştirin. 3. Bobini değiştirin. 4. Bobin terminal gerilimini



	5. Kutup yüzleri kirli 6. Hareketli birimler engellenmekte	kontrol edin. Bu, beyan gerilimin en az % 85'i olmalıdır. 5. Kutup yüzlerini temizleyin. 6. Konağın ve armatür biriminin serbestçe hareket edip etmediğini kontrol edin.
Aşırı yük röle açılması	1. Sürekli aşırı yük. 2. Aşınma ya da gevşeme 3. Uygun olmayan termal birimler. 4. Yüksek seviyede bobin gerilimi	1. Aşırı motor akımlarının ve akım dengesizliğinin olup olmadığını kontrol edin. Hata varsa gerekli işlemi yapın. 2. Temizleyin/sıkıştırın. 3. Uygulama ve şartlar için doğru büyüklükle değiştirin. 4. Bobin geriliminin, beyan kapasitenin % 110'unda olup olmadığını kontrol edin.
Kapanma hatası	1. Termal birimler uygun değil. 2. Mekanik bağlayıcılar, kir, aşınma, vb. 3. Zarar görmüş röle 4. Röle konağı kaynaklı.	1. Uygun termal birimlere uygulayın. 2. Uygun çalışma durumunu yeniden elde etmek için temizleyin/parçacıkları atın. Mümkün değilse, röle/termal birimini değiştirin. 3. Röleyi ve termal birimleri değiştirin. 4. Gerekli ise, konağı ya da tüm röleyi değiştirin.
Manyetik ve mekanik kısımlar Gürültülü mıknatis	1. Tonlama bobini kırık 2. Mıknatis yüzleri kirli/paslı 3. Alçak gerilim.	1. Mıknatis ve armatür birimini değiştirin. 2. Temizleyin. 3. Bobin terminal gerilimini/gerilim dalgalanmasını/ motor start gerilim çukurlarını kontrol edin.
Sızdırmazlık arızası	1. Kontrol geriliminin kaybedilmesi	1. Kontrol devrelerini kontrol edin. Gevşek bağlantı/ zayıf kontak olup olmadığını

	2. Alçak gerilim. 3. Hareketli birimler engellenmekte. 4. Açık ya da aşırı-ısınmış bobin 5. Bobin uygun değil	kontrol edin. 2. Bobin terminal gerilimini/gerilim dalgalanmasını/motor start gerilim çukurlarını kontrol edin. 3. Güç kesilmiş haldeyken, kontak and armatür birimlerinin hareket edip etmediğini kontrol edin. 4. Değiştirin. 5. Değiştirin.
Bırakma hatası	1. Kutup yüzünde yapışkan madde 2. Gerilimin sürekliliği. 3. Ayrılamayan yıpranmış ya da aşınmış kısımlar 4. Mıknatıs yolunda hava boşluğunun olmamasından dolayı oluşan artık mıknatıslanma 5. Kontakların kaynaklanması	1. Temizleyin. 2. Bobin terminal gerilimini kontrol edin/ devreyi kontrol edin. 3. Arızalı kısımları değiştirin. 4. Mıknatıs ve armatürü değiştirin. 5. "Kontaklar – Kaynaklama ya da donma" kısmına bakın.
Pnömatik Zamanlayıcılar Düzensiz zamanlama	1. Yabancı madde girişi.	1. Zamanlama kafasını tamamıyla değiştirin. Zamanlayıcıyı tamir ya da ayar için fabrikaya gönderin.
Kontak çalışmasında arıza	1. Hareketlendirici vida doğru şekilde ayarlanmamış 2. Kanca anahtarında yıpranmış/kırılmış kısımlar.	1. Hizmet talimat el kitabına göre ayarlayın. 2. Anahtarı değiştirin
Limit anahtarları Zarar görmüş kısımlar	1. Hareket ettirici cihaz aşırı hareket ediyor.	1. Esnek hareket ettirici cihazı kullanın. Cihaz tolerans sınır değerleri dahilinde çalışsın.
Manüel starterler Resetleme hatası	1. Kilitleme mekanizması zarar görmüş.	1. Starteri değiştirin.

2.12 Motor starter kontrol çizelgesi

Sorun	Neden	Çözüm
-------	-------	-------



Kontaktör/Röle kapanma hatası	Kaynak gerilim arızası Alçak gerilim Açık-devreli bobin. Düğme, kilitler ya da röle kontağı çalışmıyor. Bağlantılar gevşemiş ya da tel kopmuş. Hatalı düğme bağlantısı. O/I röle kontağını açın Mekanik kısımlar hasarlı, aşınmış, uygun şekilde hizalanmamış/monte edilmemiş, vb.	Sigortaları kontrol edin / anahtar bağlantısını kesin. Güç kaynağını kontrol edin. Doğru büyüklükte telin kullanıldığından emin olun. değiştirin. Doğru hareketin, kolay çalışmanın ve doğru kontak basıncının olup olmadığını kontrol edin. Devreyi kontrol edin. Önce devreyi ayırın. Kablolama diyagramıyla kontrol edin. Röleyi resetleyin Doğru çalışmayı sağlamak için temizleyin/hizalayın ve ayarlayın.
Kontaktör ya da röle açılmadı	Hatalı bağlanmış düğme. Manyetik devredeki yıpranmış ayar saçı. Artık mıknatıslanma armatürü kapalı tutar. Düğme, kilit ya da röle kontağı, bobin devresini açamadı. “Muhbir” devreler. Kontakların kaynaklanması. Aşınma, vb.’den dolayı mekanik kısmın arızalanması.	Kablolama diyagramıyla bağlantıyı kontrol edin ve düzeltin. Ayar saçını değiştirin. Doğru hareket, kolay ve doğru çalışma için ayarlama yapın. Yalıtım hatası olup olmadığını kontrol edin. “Kontakların aşırı aşınması” kısmına bakınız. Mekanik kısımları temizleyin. Serbest hareketi kontrol edin. Giren yabancı maddeleri çıkarın. Yıpranmış ya da zarar görmüş kısımları tamir edin ya da değiştirin.
Kontak korozyonu/kayn aklama	Kontak yayı basıncı yeterli değil. Aşırı ısınma ya da kapanma sırasında ark. Çukurlanmadan dolayı etkin kontak yüzey alanının azalması vb. Olağan dışı çalışma şartları.	Doğru kontak basıncını ayarlayın. Gerekli ise yayı ya da yıpranmış kontakları değiştirin. Kontakları iyi bir şekilde kaplayın. Kötü bir şekilde yıpranmışsa değiştirin. Beyan değerleri ve yükü kontrol edin. Ağır çalışma şartları söz konusu olduğunda, açık kontaktörleri, yağ-

	Dış titreşimlerden dolayı kontaktların takırdaması Ağır çalışma	daldırılmış ya da toz-geçirmez cihazla değiştirin. Manuel olarak çalıştırılan cihazı uygun bir şekilde kontrol eden operatöre bilgi verin. Kontrol anahtar kontak basıncını kontrol edin. Beyan basıncı veremiyorsa yayı değiştirin. Tüm bağlantıları sıkılaştırın. Sorun devam ederse, kontrolü değiştirin böylece titreşimler azaltılır. Mekanik olarak temizleyin ve ayarlayın. Rulmanları hizalayın. Serbestçe hareket edip etmediğini kontrol edin.
Kontaktlardan ark geçişi	Delinme sorunu Seri delinme kısa-devre yapılabilir. Şönt delinme açık olabilir. Etkin olmayan delik bobin. Delinmenin kullanılmadığı durumda, kontak hareketini kaydedin. Delinme kullanılırsa, ark kutusu bırakılabilir ya da doğru konumda değildir. Aşırı yük.	Kablolama diyagramıyla delinme tipini kontrol edin. Delinen devreyi kontrol edin. Beyan değerleri kontrol edin. Hatalı uygulama söz konusu olduğunda, değiştirin. Polariteyi kontrol edin and gerekli ise, bobini değiştirin. Kontak hareketinin artırılması kırılma kapasitesinin artırılmasını sağlar. Ark kutusunun tam yerinde olduğundan emin olun. Beyan değerleri yüke karşı kontrol edin.
Gürültülü ac mıknatıs	Hatalı montaj. Kırık siperleme bobini. Alçak gerilim.	Kutup yüzlerini temizleyin. Mekanik kısımları ayarlayın. Değiştirin. Güç kaynağını kontrol edin. Tel büyüklüğünü kontrol edin.
Sık sık bobin arızası	Yüksek gerilim. Manyetik devredeki boşluk. Çevre sıcaklığı yüksek olabilir.	Kaynak gerilimini kontrolör beyan değerlerine göre kontrol edin. Armatür hareketini kontrol edin. Manyetik devreyi ayarlayın. Kutup yüzlerini temizleyin. Kontrolör beyan değerlerini



		çevre sıcaklığına karşı kontrol edin. Bobini imalatçıdan alınan ve ortam için uygun olan doğru bobinle değiştirin.
--	--	--

3 Üç-fazlı AC Endüksiyon Motorları

3.1 Giriş

Endüstriyel uygulamalarda, 3-fazlı AC endüksiyon motorları, makinaların çoğu için temel hareket ettirici cihazlardır. AC endüksiyon motorları, doğrudan elektrik şebekesinden ya da ayarlanabilir frekans sürücülerden çalıştırılabilir. Endüstrileşmiş modern ülkelerde, bu ülkelerde kullanılan toplam elektrik enerjisinin yarısından çoğu, *AC endüksiyon motorları* vasıtasıyla mekanik enerjiye dönüştürülür. Bu motorlara ilişkin uygulamalar, neredeyse tüm imalât ve işleme aşamalarını kapsar. Uygulamalar, işhanlarına ve evlere kadar uzanmaktadır. Bunlar, sürücüler, fanları, kompresörleri, mikserleri, harç makinaları, haddehaneleri, konveyörleri, kırma makinalarını, makina araçlarını, vinçleri, vb.'yi sürmek için kullanılır. Bu elektrik motoru tipinin çok popüler olması normal bir şeydir; çünkü bu motor tipi, basit, güvenilir ve ucuzdur.

Son on yılda, *Değişken Hızlı Sürücü* (VSD) uygulamaları için 3-fazlı sincap kafesli endüksiyon motorların *Değişken Gerilimli Değişken Frekanslı* (VVVF) *Konvertörlerle* kullanılması gitgide daha yaygın hale gelmiştir. VSD sisteminin nasıl çalıştığının açık bir şekilde anlaşılması için, bu motor tipinin çalışma ilkesinin anlaşılması gereklidir.

Son 50 yıldır endüksiyon motorlarının temel tasarımının çok değişmemiş olmasına rağmen, modern yalıtım malzemeleri, bilgisayar destekli tasarım optimizasyon teknikleri ve otomasyonlu imalât metotları, boyutları ve kW başına maliyeti daha düşük motorların üretilmesini sağlamıştır. Fiziksel boyutların ve gövde büyüklüklerinin uluslararası olarak standart hale getirilmesi, birçok imalâtçıya ait motorların fiziksel olarak değiş tokuş edilebildiği ve benzer performans karakteristiklerine sahip olduğu anlamına gelir.

DC motorlarla karşılaştırıldığında, sincap kafesli endüksiyon motorunun güvenilirliği yüksek seviyededir. Sincap kafesli endüksiyon motorunun tek yıpranan kısmı rulmanlardır. Bu yapı tipinde kayan bilezikler ve fırçaların kullanılması gerekli değildir. Önceden-yağlanmış modern rulman tasarımındaki gelişmeler, bu motorların ömrünün uzamasını sağlamıştır.

Tek-fazlı AC endüksiyon motorlarının oldukça popüler olmasına ve yaklaşık olarak 2,2 kW'a kadar olan düşük güç uygulamaları için yaygın olarak kullanılmasına rağmen; bu endüksiyon motorları, endüstriyel uygulamalarda da nadiren kullanılmaktadır. Tek-fazlı motorlar, daha çok evlerdeki uygulamalarda kullanılmaktadır.

Bu bölümdeki bilgi, temelde VVVF konvertörlerle en yaygın olarak kullanılan tip olan *3-fazlı Sincap Kafesli Endüksiyon Motorlarına* uygulanır.

3.2 Temel yapı

AC endüksiyon motoru, 2 elektromanyetik kısımdan oluşur:

- *Stator* olarak adlandırılan durağan kısım
- Rulmanlardaki her bir uçta desteklenen ve *Rotor* olarak adlandırılan dönen kısım

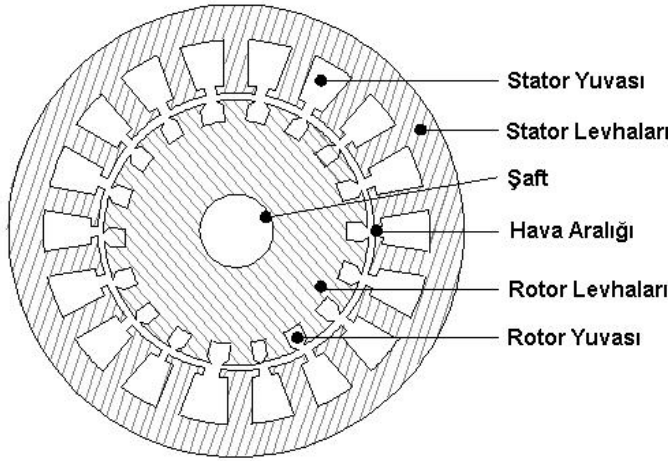
Stator ve Rotor, aşağıdaki devrelerden oluşmaktadır:

- Genelde yalıtımlı bakırdan ya da alüminyumdan yapılan ve akım taşıyan *Elektrik devresi*
- Genelde çelik levhadan yapılan ve manyetik akı taşıyan *Manyetik devre*

3.2.1 Stator

Stator, motorun durağan dış kısmıdır ve aşağıdaki kısımlardan oluşur:

- Motorun *dış silindirik gövdesi*. Gövde, kaynaklı levha çelikten, dökme demirden ya da dökme alüminyum alaşımdan yapılır. Gövde, montaj için ayaklara ya da flanşa sahiptir.
- *Manyetik yol*. Manyetik yol, dış çerçevenin içindeki silindirik boşluğa sıkıştırılan yuvalı bir çelik levha grubundan oluşur. Burgaç akımlarını azaltmak, daha düşük seviyede kayıp ve daha düşük seviyede ısınma sağlamak için, manyetik yol levhalı haldedir.
- *Yalıtımlı elektriksel sargı grubu*. Bu sargı grubu, ince levhalı manyetik yolun yuvalarının içine yerleştirilir. Bu sargıların kesit alanı, motorun güç beyan değeri için yeterince büyük olmalıdır. 3-fazlı bir motor için, her bir faz için bir tane olacak şekilde 3 sargı grubu gereklidir.



Şekil 3.1 – Stator ve rotor levhaları

3.2.2 Rotor

Bu, motorun dönen kısmıdır. Yukarıdaki statorda olduğu gibi, rotor, silindirik manyetik bir yoldan ve elektrik devresi biçimindeki *yuvalı çelik levha* grubundan oluşur. Rotorun elektrik devresi, aşağıdaki tiplerde olabilir:

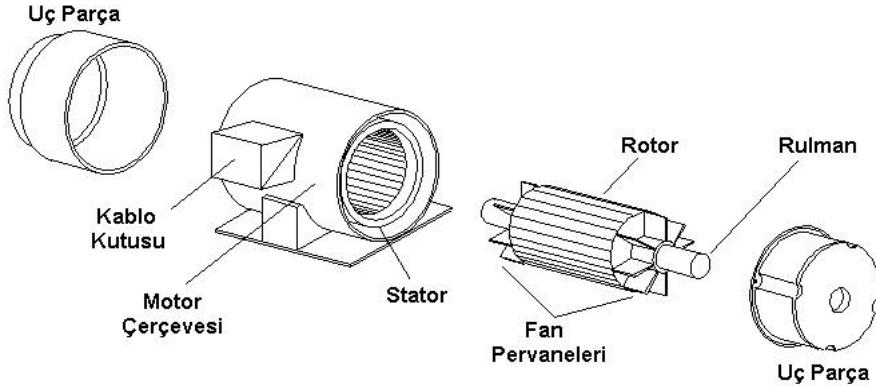
- *Sargılı rotorlu tip.* Şafta monte edilen 3 kayan bilezikle birleştirilmek üzere uçları çıkarılmış 3 tane yalıtımlı sargı grubundan oluşur. Dönen kısmın kayan bileziklerle dış bağlantıları, fırçalar vasıtasıyla gerçekleştirilir. Bunun sonucu olarak, bu motor tipi, genelde *kayan bilezikli motor* olarak adlandırılır.
- *Sincap kafesli rotorlu tip.* Yuvalara yerleştirilmiş ve rotorun her bir ucundaki uç-bileziğe bağlanan bakır ya da alüminyum çubuk grubundan oluşur. Bu rotor sargılarının yapısı, '*sincap kafesini*' andırmaktadır. Alüminyum rotor çubuklar, genelde rotor yuvalarına dökme demirdir, böylece bu rotor tipi, çok sağlam bir yapıya sahiptir. Alüminyum rotor çubukların çelik levhalarla doğrudan temasta olmasına rağmen; rotor akımının tümü, alüminyum çubuklardan geçer, levhalardan geçmez.

3.2.3 Diğer kısımlar

Endüksiyon motorunun diğer kısımları şunlardır:

- İki rulmanı destekleyen *iki tane uç-flanş*. Flanşlardan biri Sürücü-Uçta (DE), diğeri Sürücü-olmayan Uçta (NDE).
- Dönen şaftı destekleyen *iki rulman*. Bu rulmanlar, DE'de ve NDE'dedir.

- Torku yüke ileten *çelik şaft*
- Stator ve rotor için cebri soğutma [*forced cooling*] sağlamak amacıyla NDE'ye yerleştirilen *soğutma fanı*
- Dış elektrik bağlantılarını alan üstteki ya da herhangi bir yandaki *terminal kutusu*



Şekil 3.2 – Tipik bir endüksiyon motorunun birimlerinin ayrıntıları

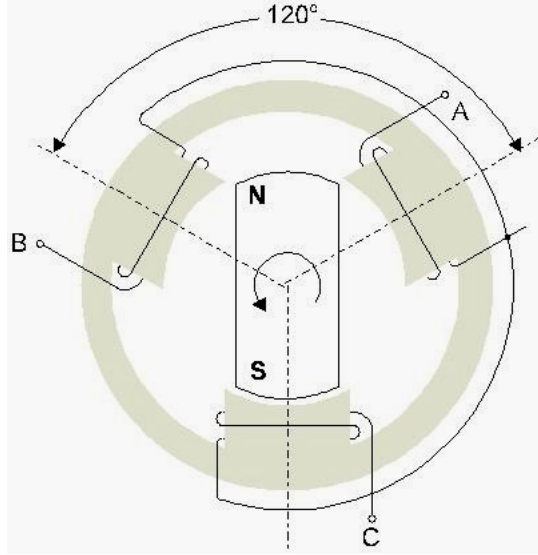
3.3 Çalışma ilkeleri

3-fazlı bir AC güç kaynağı, endüksiyon motorunun stator terminallerine bağlandığında; stator sargılarında 3-fazlı alternatif akım, akar. Bu akımlar, statorun içinde dönen değişken bir manyetik alan (akı örüntüsü) oluşturur. Dönüş hızı, elektrik gücü frekansı ile senkron ve *senkron hız* olarak adlandırılır.

En basit 3-fazlı endüksiyon motoru tipinde; dönen alan, stator çevresinde 120° aralıklarla yerleştirilmiş 3 tane sabit stator sargısı tarafından üretilir. Üç stator sargısı, 3-fazlı güç kaynağına bağlandığında; akı, besleme geriliminin her *çevrimi* için bir dönüşü tamamlar. 50 Hz'lik bir güç kaynağında, stator akısı, saniyede 50 devir hızında (dakikada $50 \times 60 = 3,000$ devir) döner.

Yukarıda açıklanmış olduğu gibi; faz başına sadece tek bir stator sargısına sahip olan bir motor, *2-kutuplu motor (2p)* olarak adlandırılır; çünkü dönen manyetik alan, dönen iki kutuptan oluşur (bir Kuzey-kutbu ve bir Güney-kutbu). Bazı ülkelerde, dönen iki kutba sahip motorlar, bazen *1 kutup-çiftli motor* olarak da adlandırılır.

Rotorun içinde sabit bir mıknatıs varsa; rotor, dönen manyetik alanla senkron olacaktır. Rotor manyetik alanı, dönen stator akısıyla etkileşir ve bir dönme kuvveti üretir. Sabit mıknatıs, çalışma ilkesinin anlaşılması kolay olduğu için burada belirtilmiştir. Aşağıda açıklanmış olduğu gibi; normal bir endüksiyon motorundaki manyetik alan, rotor hava boşluğunda indüklenir.



Şekil 3.3 – 2 kutuplu bir motorun temel (basitleştirilmiş) çalışma ilkesi

Statorun üç sargısı, stator yuvalarının yarısına uygun olacak şekilde, yeniden düzenlenmiştir; statorun diğer yarısında başka üç sargıya daha yer vardır. Sonuçta oluşmuş ve dönen manyetik alan, 4 kutba sahiptir (iki Kuzey ve iki Güney) ve bu motor, *4-kutuplu motor* olarak adlandırılır. Dönen alan, her bir güç kaynağı çevrimi için sadece üç tane stator sargısından geçtiği için, yukarıdaki örnektekinin yarı hızında (1500 devir/dakika) dönecektir.

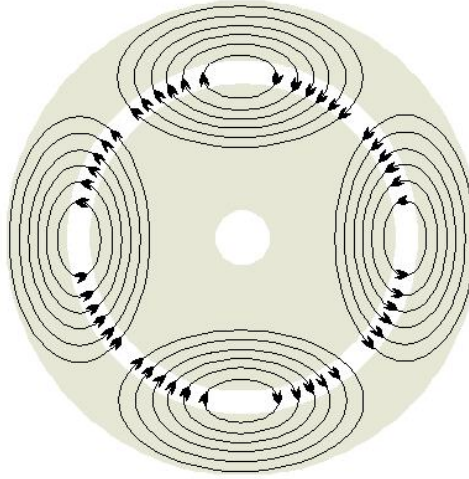
Sonuç olarak, endüksiyon motorları, farklı uygulamalar için gerekli olan taban hıza uygun sayıda stator sargısıyla tasarımılanabilir ve imâl edilebilir:

- 2 kutuplu motorlar (stator akısı 3000 devir/dak'da döner)
- 4 kutuplu motorlar (stator akısı 1500 devir/dak'da döner)
- 6 kutuplu motorlar (stator akısı 1000 devir/dak'da döner)
- 8 kutuplu motorlar (stator akısı 750 devir/dak'da döner)
- vb.

Stator akısının dönme hızı, *Senkron Hız* olarak adlandırılır ve yukarıda gösterildiği gibi, motor kutup sayısına ve güç kaynağının frekansına bağlıdır.

$$n_0 = (f \times 60) / (\text{kutup çifti}) = (f \times 60) / (p/2) \text{ devir/dak}$$

$$n_0 = (f \times 120) / p \text{ devir/dak}$$



Şekil 3.4 – Herhangi bir anda 4-kutuplu bir makinadaki akı dağılımı

Burada

n_0 devir/dak cinsinden senkron dönme hızı

f Hz cinsinden güç kaynağının frekansı

p Motor kutbu sayısı

Rotorda akımın akmasını sağlamak için; ilk önce rotor çubuklarında bir gerilim olmalıdır. Bu gerilim, stator akımı tarafından üretilen manyetik alan tarafından sağlanır. *Senkron hızda* dönen stator manyetik akısı, stator demirindeki yoldan, stator ile rotor arasındaki hava-boşluğundan ve rotor demirindeki yoldan geçer (Şekil 3.4). Manyetik alan döndükçe, akı çizgileri rotor iletkenlerini keser. *Faraday Kanunu'na* göre; bu, rotor sargılarında, *akının değişim hızına* bağlı bir gerilim indükler.

Rotor çubukları, uç-bilezikler tarafından kısa-devre yaptırıldığı için; bu çubuklardaki akım akışları, kendi manyetik alanını üretecektir. Bu alan, dönen stator akısıyla etkileşecek ve dönme kuvvetini oluşturacaktır. *Lenz Kanununa* göre, kuvvetin yönü, *akı alanındaki değişiklikleri azaltacak* şekildedir; bu da, rotorun, dönen akıyı takip edecek şekilde hızlanacağı anlamına gelir.

Başlangıç olarak, rotor durağanken, manyetik akı, rotoru *senkron hızda* keser ve en yüksek seviyede rotor gerilimini ve bunun sonucu olarak en yüksek seviyede rotor akımını indükler. Rotor, bir kere dönen alan yönünde ivmelenmeye başladığında; manyetik akının rotor sargılarını kesme hızı düşer ve indüklenen rotor gerilimi,

bununla orantılı olarak azalır. Rotor geriliminin ve akımının frekansı da düşer.

Rotorun hızı, yüksüz durumda senkron hıza yaklaştığında, rotor geriliminin hem büyüklüğü hem de frekansı azalır. Rotor senkron hıza ulaşırsa, rotor sargıları dönen akıyla aynı hızda dönecek ve rotorda indüklenen gerilim (ve akım), sıfır olacaktır. Rotor akımı olmadığında, rotor alanı ve bunun sonucu olarak *rotor torku, sıfıra eşit olacaktır*. Tork oluşturmak için; rotor, senkron hızdan daha düşük (ya da daha yüksek) bir hızda dönmelidir. Sonuç olarak, rotor, dönen akıdan biraz daha düşük bir hızda sabitlenir, bu durum, rulman sürtünmesini ve rüzgarı yenmek için yeterli torku sağlar. Rotorun gerçek hızı, Kayma Hızı olarak ve hızdaki fark *Kayma* değeri olarak adlandırılır. Sonuç olarak, endüksiyon motorları genelde *Asenkron Motor* olarak adlandırılır; çünkü rotor hızı, dönen stator akısıyla senkron değildir. Kayma miktarı, *yük torku* tarafından belirlenir. Yük torku, rotor şaftını döndürmek için gerekli olan torktur.

Örneğin, rotoru *yüksüz-durumda* 1490 devir/dak'da çalışan 4-kutuplu bir motorda; rotor frekansı 50 Hz'in 10/1500'üdür ve indüklenen gerilim, başlangıç değerinin yaklaşık olarak 10/1500'üdür. Yüksüz-durumda, bu gerilime ilişkin rotor torkunun, motorun sürtünme ve rüzgar kaybının üstesinden gelmesi gereklidir.

Şaft yük torku arttıkça; kayma değeri artar ve rotor sargılarını daha fazla akı çizgisi keser, bu da sırasıyla rotor akımını artırır; bu da, rotor manyetik alanını ve bunun sonucu olarak rotor torkunu artırır. Tipik olarak kayma değeri, yüksüz-durumda, senkron hızın % 1'i civarından tam-yükteki senkron hızın % 6'sı civarına kadar değişir.

$$Kayma = s = (n_0 - n)/n_0 \text{ (birim başına)}$$

Ve gerçek dönme hızı

$$n = n_0 (1 - s) \text{ devir/dak'tır.}$$

Burada

- n_0 devir/dak cinsinden senkron dönüş hızı
- n devir/dak cinsinden gerçek dönüş hızı
- s Birim başına kayma değeri

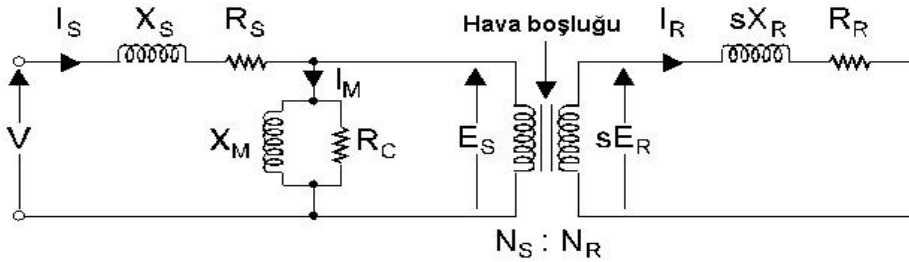
Dönen stator akısının *yönü*, stator sargılarına bağlanan güç kaynağının faz dizisine bağlıdır. Faz dizisi, 3-fazdaki gerilimin artma ve bir tepe değere ulaşma hızıdır. Genelde faz dizisi, A-B-C, L1-L2-L3 ya da R-W-B (R/Kırmızı-W/Beyaz-B/Mavi) olarak bilinir.

Avrupa’da, genelde U-V-W olarak gösterilir ve birçok IEC tipi motor, bu terminal gösterimini kullanmaktadır. İki besleme bağlantısı değiştirilirse; A-C-B faz dizisi, dönen stator akısının yönünün ve rotorun yönünün tersine çevrilmesine neden olur.

3.4 Eş değer devre

Bir VVVF konvertörden çalışan AC endüksiyon motorunun performansının değerlendirilebilmesi için, motorun elektriksel olarak *eş değer bir devre* ile gösterilmesi faydalıdır. Bu, stator gerilimi ve frekansı değiştirildiğinde ya da yük torku ve kayma değeri değiştirildiğinde, motorda nasıl bir değişiklik olduğunun daha kolay bir şekilde anlaşılabilmesini sağlar.

Ayrıntılı olma ve karmaşıklık seviyesine bağlı olarak, eş değer devrenin birçok farklı versiyonu mevcuttur. AC stator besleme gerilimi, V'den stator sargılarına çekilen I_s stator akımı, bu model kullanılarak öngörülebilir.



Şekil 3.5 – AC endüksiyon motorunun eş değer devresi

Burada

V	Stator Besleme gerilimi	R _S	Stator Direnci
E _S	İndüklenen Stator Gerilimi	X _S	50 Hz'deki Stator Kaçak Reaktansı
E _R	İndüklenen Rotor Gerilimi	R _R	Rotor Direnci
N _S	Stator turu	X _R	Rotor Kaçak Reaktansı
N _R	Rotor turu	R _C	Çekirdek kayıpları, Rulman sürtünmesi
I _S	Stator akımı rüzgar kayıpları, vb.		
I _R	Rotor akımı	X _M	Mıknatıslanma İndüktansı
I _M	Mıknatıslanma Akımı		

Motorun eş değer elektrik devresinin ana bileşenleri şunlardır:

Dirençler, endüksiyon motorundaki *rezistif (direnen) kayıpları* temsil eder ve aşağıdakilerden oluşur:

- Stator Sargı Direnci kayıpları (R_S)
- Rotor Sargı Direnci kayıpları (R_R)
- Çekirdek çeliğinin kalitesine ve akı yoğunluğuna bağlı demir kayıpları
- Sürtünme ve rüzgar kayıpları (R_C)

İndüktanslar, kaçak reaktansı temsil eder. Bu, stator sargıları tarafından üretilen tüm akının hava-boşluğundan geçmemesi ve rotor akısının tümünün, tork oluşturmak üzere hava-boşluğuna girmemesinin sonucudur:

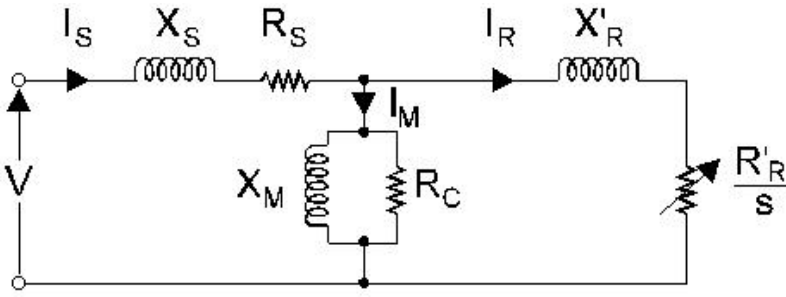
- Stator Kaçak Reaktansı (Aşağıdaki şekilde X_S gösterilmiştir)
- Rotor Kaçak Reaktansı (Aşağıdaki şekilde X_R gösterilmiştir)
- Mıknatıslanma İndüktansı (Manyetik alan akısını üreten X_M)

DC motora zıt olarak, AC endüksiyon motoru, ayrı alan sargılarına sahip değildir. Eş değer devrede gösterildiği gibi, stator akımı iki göreve hizmet etmektedir:

- Dönen manyetik alanı sağlayan akımı (I_M) taşır.
- Şaft torkunu sağlamak için rotora iletilen akımı (I_R) taşır.

Stator gerilimi E_S , kaynak geriliminden, X_S ya da R_S üzerindeki gerilim düşüşü kadar farklı olan *teorik* stator gerilimidir. X_M değeri, çekirdeğin mıknatıslanma indüktansını ve R_C değeri, çekirdek kayıplarında, rulman sürtünmesinde ve rüzgar ile kaybolan enerjiyi gösterir. Eş değer devrenin rotor kısmı, indüklenen s. E_R geriliminden oluşur, bu, daha önce açıklandığı gibi kayma değeri ve rotor reaktansı s. X_R ile orantılıdır. Rotor reaktansı ise, frekansa ve sonuç olarak kayma değerine de bağlıdır.

Eş değer devrenin analizi oldukça karmaşıktır; çünkü stator ile rotor arasındaki transformatör, kayma değerine bağlı olarak değişen bir orana sahiptir. Neyse ki, devre, rotor direnç ve reaktans değerleri $N^2 = (N_S/N_R)^2$ tur oranı kullanılarak, başka bir deyişle, bu değerleri, transformatörün stator tarafına ileterek matematiksel olarak basitleştirilebilir. Bu bileşenler ileildikten sonra, transformatör pek fazla kullanılmayacaktır ve devreden çıkartılabilir. Bu matematiksel işlem, kayma değerine bağlı olan değişken rotor gerilimi için de ayarlanmalıdır. Eş değer devre, aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi yeniden-düzenlenebilir ve basitleştirilebilir.



Şekil 3.6 – AC endüksiyon motorunun basitleştirilmiş eş değer devresi

Burada

$$X'_R = N^2 \times X_R$$

$$R'_R = N^2 \times R_R$$

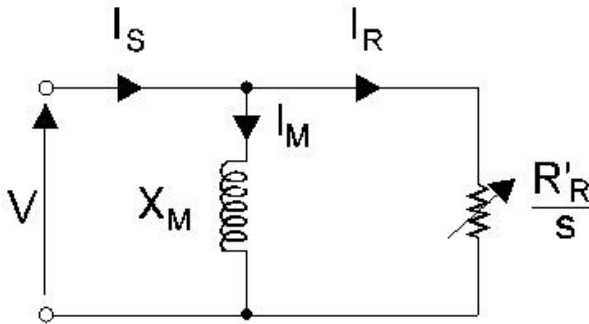
$$N = N_S/N_R \quad \text{Stator/Rotor tur oranı}$$

Geliştirilmiş bu eş değer devrede, rotor direnci, s-kayma değerine bağlı olan bir birimle gösterilir. Bu, indüklenen rotor geriliminin ve bunun sonucu olarak akımın, kayma değerine bağlı olduğunu gösterir. Sonuç olarak, endüksiyon motoru, *sabit gerilimli ve frekanslı bir güç kaynağından* beslendiğinde; motor tarafından çekilen I_S akımı, *temel olarak kayma değerine bağlıdır*.

Eş değer devre, sadece en önemli bileşenler temsil edilecek şekilde, daha da basitleştirilebilir; bu bileşenler şunlardır:

- Manyatıslanma İndüktansı (X_M)
- Değişken Rotor Direnci (R'_R/s)

Diğer bileşenlerin tümü, ihmal edilebilir seviyededir ve burada belirtilmemiştir.



Şekil 3.7 – AC endüksiyon motorunun basitleştirilmiş eş değer devresi

Yukarıda gösterildiği gibi, toplam stator akımı I_S aşağıdakilerin vektör toplamıdır:

- Yükten büyük ölçüde bağımsız olan ve dönen manyetik alanı oluşturan *reaktif mıknatıslanma akımı* I_M . Reaktif mıknatıslanma akımı, toplam akımın 90° arkasında kalır ve büyüklüğü, stator gerilimine ve frekansına bağlıdır. Motorda sabit akı sağlamak için, V/f oranı sabit tutulmalıdır.

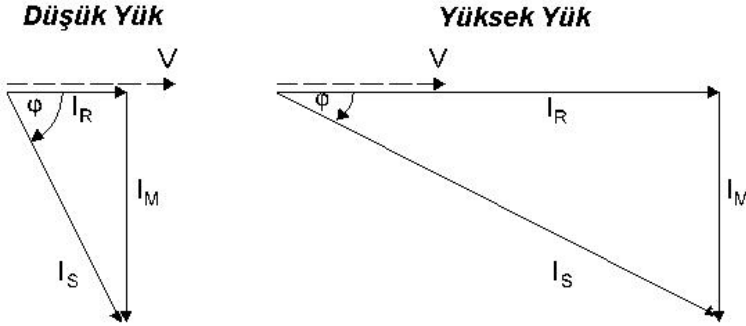
$$X_M = j\omega L_M = j(2\pi f) L_M$$

$$I_M = \frac{V}{j(2\pi f) L_M}$$

$$I_M = k(V/f) \text{ Burada } k = \text{sabittir}$$

- Rotor torkunu üreten I_M *aktif akımı*, makinanın mekanik yüküne bağlıdır ve *kayma değeri ile* doğru orantılıdır. Yüksüz durumda, kayma değeri küçük olduğunda, bu akım değeri de küçüktür. Yük ve kayma değeri arttıkça; bu akım, orantılı olarak artar. Bu akım, stator gerilimiyle hemen hemen aynı fazdadır.

Aşağıdaki şekilde, düşük ve yüksek yük şartlarına ilişkin akım vektörleri gösterilmektedir.



Şekil 3.8 – Düşük-yük ve yüksek-yük şartlarına ilişkin stator akımı

3.5 Elektriksel ve mekanik performans

İki ana stator bileşeni olan V gerilimi ve I_S akımı arasındaki açı, güç faktörü açısı (ϕ) olarak bilinir ve stator terminallerinde ölçülebilir. Daha önce gösterildiği gibi, stator akımı, I_M mıknatıslanma akımı (gerilimle aynı kuvadrattır) ile I_R tork üreten akımın (gerilimle

aynı fazdadır) vektör toplamıdır. Bu iki akım, ölçmek için uygun değildir.

Sonuç olarak, görünen toplam motor gücü (**S**) de, birbiriyle aynı kuvadrattır olan iki bileşenden oluşmaktadır.

$$S = P + JQ \quad \text{kVA}$$

- Aktif P Gücü, aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanabilir:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I_R \quad \text{kW}$$

ya da

$$P = \sqrt{3} \times V \times I_S \times \cos \phi \quad \text{kW}$$

- **Reaktif Q Gücü**, aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanabilir:

$$Q = \sqrt{3} \times V \times I_M \quad \text{kVAr}$$

ya da

$$Q = \sqrt{3} \times V \times I_S \times \sin \phi \quad \text{kVAr}$$

Burada

S	Motorun kVA cinsinden toplam görünen gücü
P	kW cinsinden aktif motor gücü
Q	kVAr cinsinden reaktif motor gücü
V	Güç kaynağının kV cinsinden faz-faz gerilimi
I _S	Motorun amp cinsinden stator akımı
φ	V ile I _S arasındaki faz açısı (Güç Faktörü = Cos φ)

Girilen elektrik gücünün tümü, mekanik çıkış gücü P_M'e çevrilmez. Bu gücün küçük bir kısmı, stator direncinde (3.I².R_S) ve çekirdek kaybı olarak (3.I_M².R_C) kaybolur ve geri kalanı, rotorda çalışmak üzere hava boşluğundan geçer. Küçük ilâve bir kısım, rotorda (3.I².R'_R) kaybolur. Denge, rotorun mekanik çıkış gücü P_M'dir.

Önemli diğer bir husus, eş değer devrenin mıknatıslanma kısmının temelde indüktif olmasıdır. Yüksüz durumda, kayma değeri küçük olduğunda (kayma s ⇒ 0), eş değer devre, etkin rotor direncinin R'_R/s ⇒ sonsuz olduğunu gösterir. Bu nedenle, motor, sadece *yüksüz-durum mıknatıslanma akımını* çekecektir. Şaft yüklenmeye başladığında ve kayma değeri arttığında, R'_R/s'nin büyüklüğü azalır ve çıkış torku ile güç arttıkça, akım hızlı bir şekilde artar.

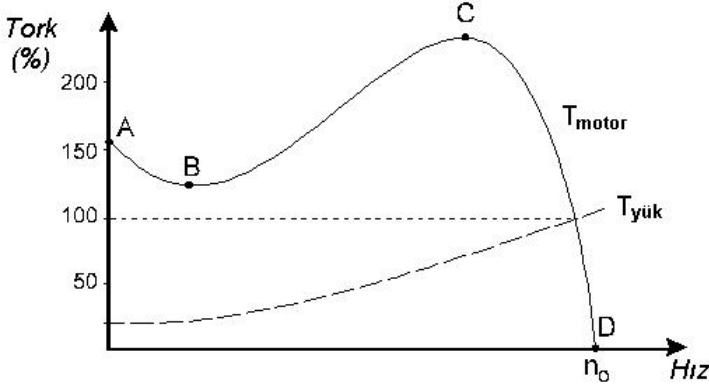
Bu, stator gerilimi, stator akımı ve cos φ güç faktörü arasındaki *faz ilişkisini* etkiler. Yüksüz durumda, güç faktörü küçüktür, bu,

mıknatıslanma akımının değeri yüksek olan bileşenini temsil eder. Mekanik yük ve kayma değeri arttıkça, etkin rotor direnci, azalır, aktif akım artar ve güç faktörü iyileşir.

Motorlar mekanik yüklere eşleştirilirken, en önemli iki husus **Tork** ve **Hızdır**. Torkun bir hız aralığında nasıl değiştiğini gösteren Tork-Hız Eğrisi, eş değer devreden ve yukarıdaki denklemlerden elde edilebilir. 3-fazlı AC endüksiyon motorlarıyla ilgili herhangi bir ders kitabına bakıldığında, motorun Çıkış Torku, hız cinsinden ifade edilebilir:

$$T_M = \frac{3 s s x V^2 x R'_R}{[(R_S + R'_R)^2 + s(X_S + X'_R)^2] n_o}$$

Bu denklem ve aşağıdaki eğri, sabit bir besleme gerilimi ve frekansı altında, motorun, durağan durumdan tam hız durumuna geçtiğinde motor çıkış torkunun (T_M) nasıl değiştiğini göstermektedir. Mekanik yükün tork şartları, kesikli çizgi ile gösterilmiştir.



Şekil 3.9 – 3-fazlı bir endüksiyon motoruna ilişkin tork-hız eğrisi

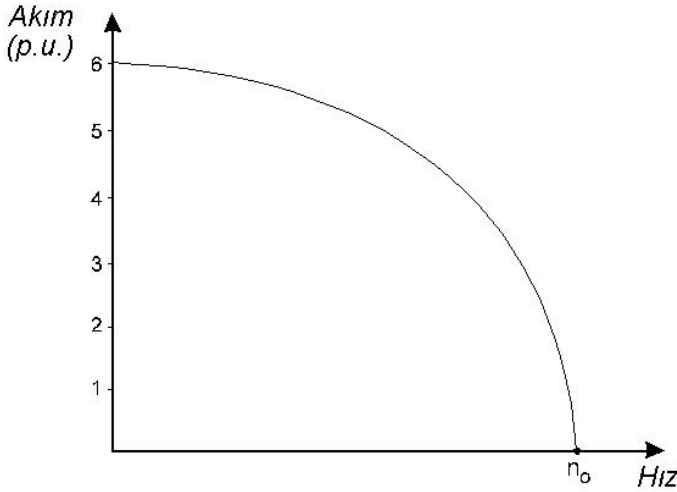
- A başlangıç demeraj torku [*breakaway torque*] olarak adlandırılır
- B ivmelenme torku [*pull-up torque*] olarak adlandırılır
- C maksimum tork [*pull-out torque*] olarak adlandırılır
- D senkron hız (sıfır tork)

Başlangıçta, başlangıç torku, yük demeraj torkunu geçmezse; motor, yükü harekete geçiremeyecektir. Bundan sonra motor, motor torkunun yük torkunu her zaman geçmesi şartıyla ivmelenir. Hız arttıkça, motor torku C noktasında maksimum torka ulaşacaktır.

Tork-hız eğrisinde, son sürücü hızı (ve kayma değeri), **yük torkunun motor çıkış torkuna tam olarak eşit olduğu** noktada kararlı hale gelir. Yük torku artarsa, motor hızı biraz düşer, kayma değeri artar, stator akımı artar ve motor torku, yük şartlarını sağlayacak şekilde artar.

Tork-hız eğrisindeki CD aralığı, motorun kararlı çalışma aralığıdır. Yük torku, maksimum torkun üzerindeki bir noktaya ulaşırsa, motor *duracaktır* çünkü, hız, eğrinin kararsız ABC kısmına düştüğünde, yük tork şartlarındaki (T_L) herhangi bir artış ve sürücü hızındaki herhangi bir düşüş, daha düşük bir motor çıkış torkuna neden olur.

Beyan gerilimde ve beyan frekansta, *stator akımı* I_s ile endüksiyon motorunun hızı arasındaki ilişki, aşağıdaki şekilde gösterilmektedir. Bir endüksiyon motoru, beyan gerilim kaynağından doğrudan-hattan çalıştırıldığında, başlangıçtaki stator akımı, motorun beyan akımının 6 ilâ 8 katı kadar yüksek olabilir. Motor, beyan hıza ulaştığında, akım, motor şaftındaki mekanik yük tarafından belirlenen bir değere düşer.



Şekil 3.10 – 3-fazlı bir AC endüksiyon motorunun akım-hız karakteristikleri

Yukarıdaki denklemlerden elde edilebilen AC endüksiyon motoruna ilişkin bazı ilginç gözlemler şunlardır:

- **Motor çıkış torku, gerilimin karesi ile doğru orantılıdır.**

$$T_M \propto V^2$$

Sonuç olarak, bir endüksiyon motorunun, yumuşak-starter, yıldız-üçgen starter, otomatik-transformatörlü starter, vb. gibi indirgenmiş bir gerilim starteriyle start edilmesi, motor başlangıç torkunun, indirgenmiş gerilimin karesiyle orantılı olarak düştüğü anlamına gelir.

- **Hız düştükçe ve kayma değeri arttıkça, bir endüksiyon motorunun verimi, yaklaşık olarak (1-s) ile orantılıdır.**

$$\text{Verim} \propto (1-s)$$

Endüksiyon motoru, rotordan ‘bakır kayıpları’ şeklinde ısı olarak yayılmakta olan kayma gücüyle bir kayma kilidi gibi davranır. Değişken dirençlere sahip sargılı-rotorlu motorlar gibi kayma değerine bağlı hız kontrol sistemlerinde, vb. hız değişimi sağlandığında, motor verimi düşer. Bir endüksiyon motorunun etkin bir şekilde kullanılması için, kayma değeri mümkün olduğunca düşük seviyede tutulmalıdır. Verim açısından bakıldığında, bu, bir endüksiyon motorunun hızını kontrol etmenin ideal yolunun adımsız frekans kontrolü olduğunu gösterir.

- **3-fazlı AC endüksiyon motorları tipik olarak tam yükte kayma değerlerine sahiptir.**

Küçük motorlar için % 3 ilâ % 6

Daha büyük motorlar için % 2 ilâ % 4

Bu, yüksüz durumdan tam yüke hız düşüşünün, düşük seviyede olduğu anlamına gelir ve bu nedenle, bu motor tipi, neredeyse sabit bir hız karakteristiğine sahiptir.

Dönen makinalara ilişkin en önemli ve en faydalı formüllerden biri, motorun *Mekanik Çıkış Gücünü* P_M torkla ve hızla ilişkilendiren formüldür.

$$P_M = \frac{(T_M \times n)}{9550} \text{ kW}$$

Burada

P_M	kW cinsinden motor çıkış gücü
T_M	Nm cinsinden motor çıkış torku
n	Devir/dak cinsinden gerçek dönme hızı

3.6 Motorun ivmelenmesi

Motorun yüke doğru bir şekilde eşleşmesine ilişkin önemli bir husus, durağan durumdan tam çalışma hızına ivmelenme süresinin hesaplanmasıdır. İvmelenme süresi, yüksek başlangıç akımlarından dolayı motorun aşırı-ısınmasının önlenmesi için önemlidir. Bu nedenle, makinanın, tam beyan hızına ulaşmasının ne kadar süreceğinin bilinmesi genelde gereklidir. Elektrik motoru imalatçıları, genelde ivmelenmenin meydana gelebileceği maksimum başlangıç

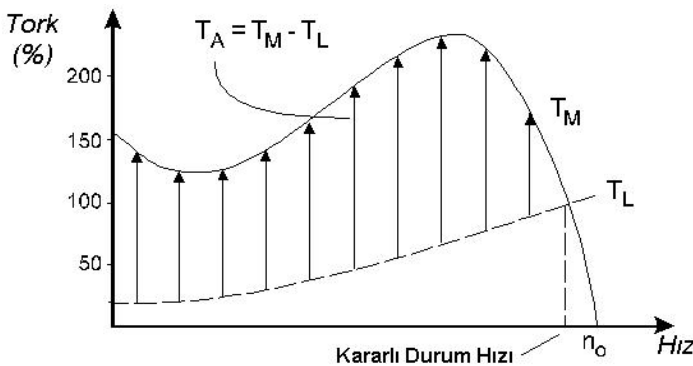
süresini belirtir. Bu, fan gibi yüksek inerşialı bir yükün ivmelenmesi sırasında, sorun teşkil edebilir.

Şekil 3.9'da durağan durumdan tam hıza kadar olan hız aralığı için aynı grafikte motor tork eğrisi ve yük tork eğrisi gösterilmektedir. DOL çalıştırma söz konusu olduğunda, mekanik bir yükün tam hıza ivmelenmesi için geçen süre aşağıdakilere bağlıdır:

- *İvmelenme torku* (T_A), Motor Torku (T_M) ile Yük Torku (T_L) arasındaki farka eşittir. $T_A = (T_M - T_L)$
- Dönen kısımların *Toplam İnerşia Momenti* (J_{toplam}) aşağıdakilerin toplamıdır:
 - Rotorun inerşia momenti
 - Söz konusu yük inerşia moment değeri

İvmelenmenin meydana gelmesi için, motorun çıkış torku, mekanik yük torkunu aşmalıdır. *İvmelenme Torku* ne kadar büyükse, ivmelenme süresi o kadar kısa olacak, *İvmelenme Torku* ne kadar küçükse, ivmelenme süresi o kadar uzun olacaktır. Motor torku yük torkundan daha düşük olduğunda, motor duracaktır. Şekil 3.11'de, doğrudan-hattan start edilen ve santrifuj pompa yükünü süren bir motorun *İvmelenme Torkuna* ilişkin bir örnek gösterilmektedir, tork şartı başlangıçta düşüktür ve hızın karesine bağlı olarak artar.

Başlangıçtaki *İvmelenme Torku*, beyan motor torkuna yaklaşık olarak eşittir, pompa sürücü ivmelendikçe artar ve daha sonra motor, beyan hıza ulaştıkça sıfıra düşer. *Motor torku* T_M *yük torku* T_L 'ye uyumlandırıldığında, kararlı durum hızına ulaşılır. Bu kararlı hıza ulaşmak için durağan durumdan sonra geçen süre, *İvmelenme Süresi* olarak adlandırılır.



Şekil 3.11 – AC endüksiyon motorun startındaki ivmelenme torku

Sürücü sistemin ivmelenme hızı da, dönen nesnenin *inerşia momentine* (J) bağlıdır. J 'nin değeri ne kadar büyük olursa, hızın artırılması o kadar uzun sürer.

$$T_A = J \frac{d\omega}{dt} \quad Nm$$

Burada

J kgm^2 cinsinden sürücü sistemin inerşiası

ω radyan/saniye cinsinden dönüş hızı

Bu formül, dönüş hızının rad/san'den devir/dak'a dönüştürülmesi için kullanılır:

$$T_A = J \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt} \quad Nm$$

Burada

n devir/dak cinsinden dönüş hızı

Yeniden-düzenlendiğinde:

$$\frac{dt}{dn} = J \frac{2\pi}{60} \frac{1}{T_A}$$

Bunun, başlangıç hızından (n_1) son hıza (n_2) kadar integrali alınır. Toplam ivmelenme süresi t_d aşağıdaki şekildedir:

$$t_d = J \frac{2\pi}{60} \int_{n_1}^{n_2} \frac{1}{T_A} dn \quad \text{sec}$$

İvmelenme torku ivmelenme periyodu boyunca sabitse, bu formül, aşağıdaki şekilde basitleştirilir:

$$t_d = J \frac{2\pi}{60} \frac{(n_2 - n_1)}{T_A} \quad \text{sec}$$

İnerşia, aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilir:

$$J = \frac{G \times D^2}{4} \quad \text{kgm}^2$$

Burada

J kgm² cinsinden dönüşün inersia momenti

G kilogram (kg) cinsinden kütle

D metre (m) cinsinden dönüş (kendi eksenini etrafında) çapı

İlk ilkelerden J değerinin hesaplanması genelde gerekli değildir çünkü bu bilgiler, motor imalatçısından ve sürülen makinadan elde edilebilir.

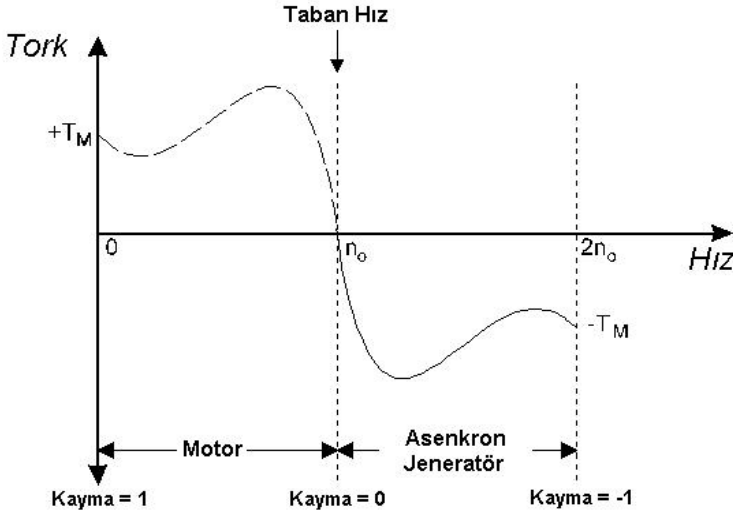
3.7 AC endüksiyon jeneratörünün performansı

3-fazlı AC endüksiyon motorunun performansı, 50 Hz'de sıfır hızdan beyan hıza kadar olan hız aralığı için tanımlanmıştır. Motor, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürür. Endüksiyon motoru, her zaman senkron hızdan daha düşük bir hızda çalışacaktır; çünkü yüksüz durumda bile, sürtünme ve rüzgar kayıplarının üstesinden gelmek için yeterli torkun sağlanması için küçük bir kayma değeri gereklidir.

Bazı dış araçlar vasıtasıyla, rotor hızı, kayma değerinin sıfır olduğu noktaya kadar çıkarılırsa; rotorda indüklenen gerilim ve akım, sıfıra düşer ve tork çıkışı sıfırdır.

Bazı dış araçlar vasıtasıyla, rotor hızı, bu noktanın üstüne çıkarılıysaydı; rotor, dönen stator alanından daha hızlı bir şekilde çalışacak ve rotor iletkenleri, yeniden manyetik akı çizgilerini kesmeye başlayacaktır. Rotorda gerilim indüklenir ancak bu gerilim *ters yöndedir*. Lenz Kanunu'na göre; böylelikle, bu değişikliğe karşı koyan akımlara ve sürülen rotordan statora ters yönde güç akışı oluşur. Güç, mekanik hareket ettirici cihazdan ve endüksiyon makinasından statora bağlanan elektrik kaynağına akar. Makinanın hızı senkron hızı geçtiğinde, makina, *endüksiyon jeneratörü* gibi davranır.

Vinçler, ağır yük asansörleri, konveyörler, vb. söz konusu olduğunda, yük, motoru 'aşırı çalıştırdığında', genelde, bu durum meydana gelir. Tork-hız eğrisi, endüksiyon, jeneratör bölgesini kapsayacak şekilde genişletilebilir. Jeneratör bölgesindeki eğrinin şekli, motor bölgesindeki eğriyle aynıdır çünkü tam olarak aynı eş değer devre geçerlidir. Tek fark, kayma değerinin negatif olması ve aktif gücün, elektrik şebekesine geri döndürülmesidir.



Şekil 3.12 – Endüksiyon motorundan endüksiyon jeneratörüne geçiş

3.8 Elektrik motorlarının verimi

Bir makinanın verimi, giren elektrik enerjisinin çıkan mekanik enerjiye ne kadar iyi çevrildiğinin bir ölçüsüdür. Verimlilik, makinanın tasarımına bağlı olarak, motor kayıplarıyla doğrudan orantılıdır.

Endüksiyon motorunun eş değer devresine atıf yapılarak; kayıplar, aşağıdaki bileşenlerden oluşur:

- **Yüke bağlı olan kayıplar**

Bunlar, temelde, stator ve rotor sargılarındaki dirençlerden geçen bakır kayıplarından kaynaklanır ve bu kayıplar, eş değer devrede kabaca $I_S^2(R_S + R'_R)$ olarak bilinir. Bu kayıplar, stator akımının karesi ile doğru orantılıdır.

- **Sabit kayıplar**

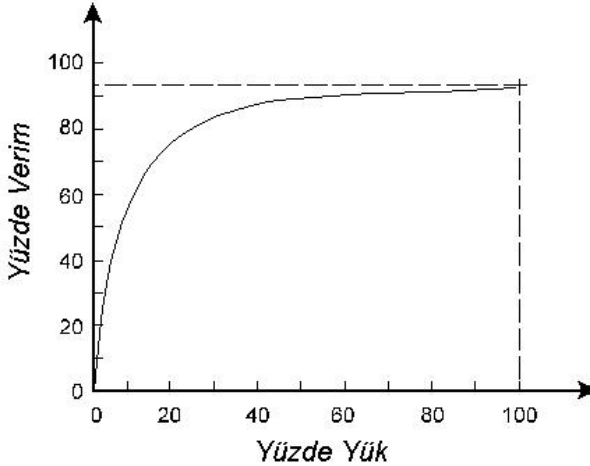
Bu kayıplar, temelde sürtünmeden, rüzgardan ve demir kayıplarından kaynaklanır ve yükten neredeyse tamamen bağımsızdır. Bu kayıplar, eş değer devrede $I_M^2 R_C$ ile gösterilir.

Sabit kayıplar esasen yükten bağımsızken, stator ve rotor kayıpları, yük akımının karesine bağlıdır, Şekil 3.13'te gösterildiği gibi, düşük yük seviyelerinde AC endüksiyon motorunun toplam verimi büyük ölçüde düşer.

Fiyat rekabetinden dolayı, AC motor imalatçıları, motorda kullanılan malzemelerin miktarını ve kalitesini düşürme baskısı altındadır. Bakır miktarının azaltılması, yüke bağlı kayıpları artırır. Demir miktarının azaltılması, demir kayıplarını artırır. Sonuç olarak, verimi yüksek olan

motorlar, genelde daha pahalıdır. Büyük motorlarda, verimin yüksek seviyede olması, enerji açısından büyük ölçüde tasarruf sağlar; bu da, motorun daha pahalı olmasından kaynaklanan dezavantajı telafi eder.

Değişken Hızlara Sahip Sürücü uygulamalarında kullanılan elektrik motorları için, ilâve harmonik akımlar, motorda ilâve kayıplara neden olur, bu da, daha yüksek verime sahip motorların kullanılmasını daha da talep edilen bir durum haline getirmektedir.



Şekil 3.13 – AC endüksiyon motorunun yüke göre verimi

E Eki, 3-fazlı kafes motorların veriminin ve kayıplarının belirlenmesi için, AS 1359.102.3:2000 Avustralya standardı tarafından tavsiye edilen metodu tanımlar. Metot, motorların, dinanometreleri kullanarak beyan kapasitelerinin % 150'sine kadar yüklenmesini kapsar. Ekte, ayrıca deneye tâbi tutulan motorun yüklenmesi için kullanılan çeşitli dinanometre tiplerini de bulabilirsiniz.

3.9 AC endüksiyon motorlarının beyan değerleri

AC endüksiyon motorları, herhangi belirli bir uygulamanın yük şartlarına uygun olacak şekilde tasarımlanmalı ya da seçilmelidir. Bazı mekanik yükler, motorun sürekli olarak belirli bir yük torkunda çalıştırılmasını gerektirir. Diğer yükler, çevrimsel olabilir ya da çok sayıda durdurma ve başlatma işlemi gerekli olabilir.

Bir motorun yükle uyumlu hale getirilmesindeki ana husus, motor sargılarının sıcaklığının, yük çevriminin bir sonucu olarak, *kritik sıcaklığı* geçen bir seviyeye çıkmamasının sağlanmasıdır. Bu *kritik sıcaklık*, stator ve rotor sargı yalıtımının, kalıcı bir hasara uğramaksızın dayanabildiği seviyedir. Yalıtım hasarı, motorun

kullanım ömrünü kısaltabilir ve sonuç olarak elektriksel arızalara neden olur.

Yalıtım malzemelerinin sıcaklık artış sınır değerleri, IEC 34.1 ve AS 1359.32 gibi standartlar ile sınıflandırılır. Bu standartlar, çeşitli yalıtım malzeme sınıflarının dayanabilmesi gereken izin verilebilen maksimum sıcaklık değerlerini belirtir. Güvenli sıcaklık değeri, belirtilen maksimum çevre sıcaklığının, mekanik yükten kaynaklanan izin verilen sıcaklık artışıyla toplamıdır.

Motor tasarımı için, IEC, AS/NZS gibi birçok motor özellik standardı, maksimum çevre sıcaklığını 40°C olarak belirtmektedir. Endüksiyon makinasının sıcaklık artışı, tam yükte çalışırken motordaki kayıpları hesaba katmak için, maksimum çevre sıcaklığına göre izin verilebilen sıcaklık artışıdır.

Yalıtım Sınıfı	E	B	F	H
Maksimum Sıcaklık	120°C	130°C	155°C	180°C
Maks Sıcaklık Artışı	70°C	80°C	100°C	125°C

Şekil 3.14 – Yalıtım malzemelerine ilişkin maksimum sıcaklık beyan değerleri

Bu çizelgelerden görüldüğü gibi, dönen elektrikli makinalar, yalıtım malzemelerine ilişkin maksimum seviyenin altındaki toplam sıcaklık artışı için tasarımılanmıştır.

Örneğin, *F sınıfı yalıtım* kullanıldığında

Maksimum Çevre Sıcaklığı + Maksimum Sıcaklık Artışı = 40°C + 100°C = 140°C'dir.

Bu, 15°C'lik bir termal rezerv sağlar. Termal rezerv, ne kadar büyük olursa; yalıtım malzemesinin ömrü o kadar uzun olacaktır.

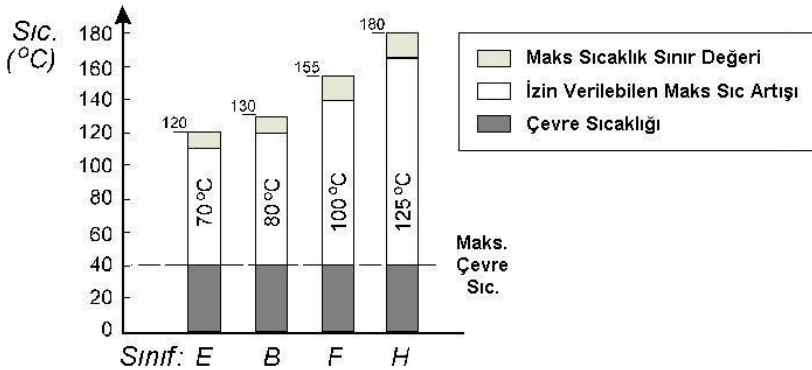
Sınıfının maksimum beyan sıcaklığında sürekli olarak çalıştırıldığında, yalıtımın beklenen çalışma ömrü yaklaşık olarak 10 yıldır. Birçok motor, bu gibi uç şartlarda çalıştırılmaz; çünkü hesaplanan yük torku şartları ile uygulama için seçilen gerçek motor büyüklüğü arasında genelde ilâve bir güvenlik marjı vardır. Böylece, yüke uygun güvenlik marjlarıyla doğru bir şekilde uyumlandırılan motorun ömrü, 15 ilâ 20 yıl olarak kabul edilebilir.

İlâve termal koruma gerekli olduğunda, motor, daha düşük bir sıcaklık için bile tasarımılanabilir. Daha iyi imalatçıların, motorlarını B-Sınıfı sıcaklık artışı için tasarımılaması ancak gerçekte F-Sınıfı yalıtım malzemelerini kullanması yaygın bir uygulamadır. Bu, ömrü en az 20 seneye çıkaracak ilâve bir 20 °C'lik termal rezerv sağlar. Bu, ayrıca,

motorun, 50 °C ya da daha yüksek çevre sıcaklıklarında (teorik olarak 65 °C'ye kadar) kullanılabilirdiği anlamına gelir.

İmalâtçıların kataloglarında, 3-fazlı AC endüksiyon motorlarının beyan değerleri, genelde aşağıdakilere göre sınıflandırılır:

- Beyan çıkış gücüne göre (kW)
- Beyan hıza göre (kutup sayısına bağlıdır)
- Sürekli görev çevrimine sahip (S1) olup olmamasına göre (aşağıya bakılmalıdır).
- 40 °C'yi geçmeyen bir çevre sıcaklığında çalışıp çalışmamasına göre
- Deniz seviyesine göre 1000 m'yi geçmeyen yükseklikte (atmosfer basıncı, 1050 mbar'ın üstündedir) çalışıp çalışmamasına göre
- % 90'dan düşük seviyede nispi nemde çalışıp çalışmamasına göre



Şekil 3.15 – Yalıtım malzeme sınıflarına ilişkin sıcaklık artışının özeti

IEC 34.1'e göre

AC endüksiyon motorları, genelde çevre sıcaklığının ve/veya denizden yüksekliğin, standart IEC ya da AS beyan değerine ilişkin taban değeri geçtiği çevre şartlarında çalıştırılmalıdır.

Çevre sıcaklığı aşırı yüksek olduğunda, imalâtçılardan sıcaklık beyan değeri düşürme çizelgeleri temin edilebilir. Şekil 3.16'da, hem sıcaklık hem de denizden yükseklik için bir imalâtçının beyan değer düşürme çizelgesi gösterilmektedir.

Daha önce belirtilmiş olduğu gibi, daha kaliteli AC endüksiyon motorları, dahili bir *termal rezerve* sahiptir. Çevre sıcaklığının 40 °C'den sadece sınırsal olarak daha yüksek olduğu bazı durumlarda; bu rezerv, sıcaklık için hiçbir ilâve beyan değeri düşürme işlemi yapılmaksızın kullanılabilir.

Çevre Sıcaklığı	Beyan Çıkışın İzin Verilebilen Çıkış Yüzdesi	Deniz Seviyesinden Yükseklik	Beyan Çıkışın İzin Verilebilen Çıkış Yüzdesi
30°C	% 107	1000 m	% 100
40°C	% 100	1500 m	% 96
45°C	% 96	2000 m	% 92
50°C	% 92	2500 m	% 88
55°C	% 87	3000 m	% 84
60°C	% 82	3500 m	% 80
70°C	% 65	4000 m	% 76

Şekil 3.16 – Sıcaklık ve denizden yükseklik için motorun beyan değerlerinin düşürülmesi

Sürekli olarak doğrudan güneş ışığına maruz kalan motor montaj konumlarında, motorların koruyucu bir kapağa sahip olması gereklidir.

Atmosfer basıncının düşük olduğu *denizden yüksek yerlerde*, motorun soğutma yüzeylerinden ısı atılması zorlaştığı için, elektrikli cihazın soğutulması zorlaşır. Denizden yükseklik arttıkça hava basıncı düşer ve havanın yoğunluğu azalır, sonuç olarak, termal kapasitesi de azalır. Standart olarak, AC endüksiyon motorları, deniz-seviyesinin 1000 metre üstündeki yüksekliklerde çalışmaktadır. Beyan güç ve tork çıkışı, bunun üstündeki yükseklikler için düşürülmelidir.

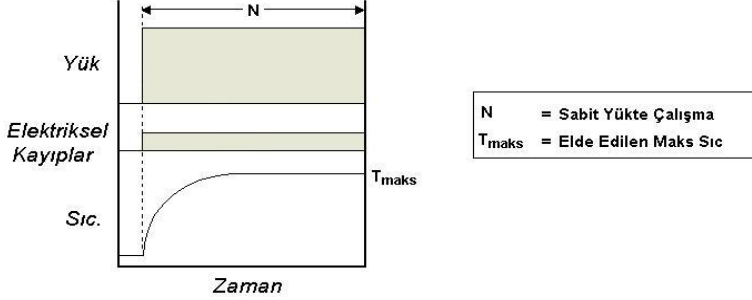
Hem sıcaklık hem de yükseklik için motorun beyan değerlerinin düşürülmesinin gerekli olduğu durumda, yukarıdaki çizelgede verilen beyan değer düşürme faktörleri birbiriyle çarpılmalıdır. Örneğin, 50 °C'lik çevre sıcaklığında 2500 m'nin üstünde çalışan bir motor için, toplam beyan değer düşürme faktörü $(0,92 \times 0,88) \times \% 100$ ya da % 81 olmalıdır.

3.10 Elektrik motorunun görev çevrimi

İmalâtçı kataloglarında verilen AC endüksiyon motorunun beyan çıkışı, önerilen motor uygulaması ve görev çevrimi hakkındaki varsayımları esas alır. Motor beyan değerinin, *sürekli beyan görev çevrimi S1'i esas alması* yaygın bir uygulamadır. Motor, S1 sürekli çalışma görevinden farklı bir uygulama görev çevrimi için kullanılacaksa, motor seçiminde bazı önlemlerin alınması gereklidir ve standart motorların beyan değerleri, uygulama için yeniden tanımlanabilir. Görev çevrimleri, normalde, belirli bir süre boyunca ortalama yük, sürekli yük beyan değeri S1'den daha düşük olacak şekilde hesaplanır.

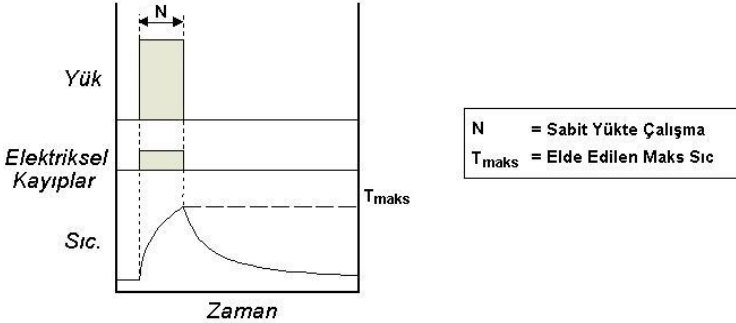
Standartlarda, birçok farklı görev çevrimi tanımlanmıştır. IEC 34.1'de ve AS 1359.30'da, S1 ilâ S8 arasındaki sembollerle sekiz farklı görev tipi tanımlanmıştır:

S1: Sürekli görev çevrimi



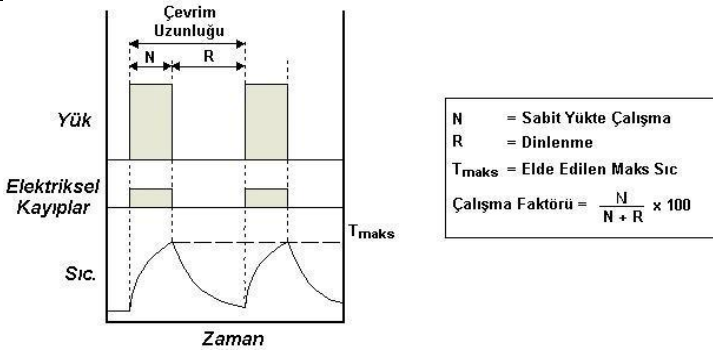
- Termal dengeye ulaşabilmek için yeterli bir süre bekledikten sonra sabit mekanik yükte çalışma
- Motorun beyan görev tipine ilişkin herhangi bir gösterge bulunmadığında, S1 sürekli çalışma görev çevrimi varsayılmalıdır.
- Gösterim örneği: S1

S2: Kısa-sürelili görev çevrimi



- Termal dengeye ulaşmak için geçen süreden daha kısa bir süre boyunca sabit yükte çalıştıktan sonra motorun dinlenmesi ve daha sonra, motorun, çevre sıcaklığının 2°C dahilindeki sıcaklıklara dönmesi için gerekli süre boyunca enerjisiz durumda beklemesi
- 10 dakika, 30 dakika ve 90 dakika değerleri, beyan görev çevrimi süresi için önerilen periyotlardır.
- Gösterim örneği: S2 – 60 dakika

S3: Başlangıç sürecinden etkilenmeyen aralıklı periyodik çalışma

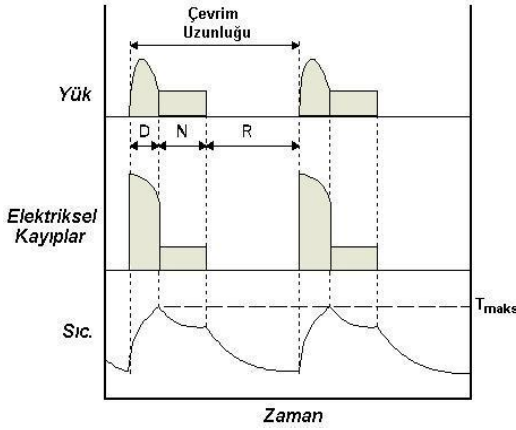


- Her biri, sabit yükte çalışma periyodundan ve motora verilen enerjinin kesildiği dinlenme periyodundan oluşan özdeş görev çevrimi dizisi,
- Görev çevrimi periyodu, termal dengeye ulaşmaya yetecek kadar uzun değildir.
- Başlangıç akımının, sıcaklık artışını önemli ölçüde etkilemeyeceği varsayılmıştır.
- Bir görev çevriminin süresi 10 dakikadır.
- Bu görev çevrimi için aşağıdaki değerler de belirtilmelidir.
 - Yüklü periyodun kullanım süresinin yüzdesini, toplam çevrimin yüzdesi olarak gösteren *Çevrimsel Süre Faktörü*,
 - Çevrimsel süre faktörü için önerilen değerler, % 15, % 25, % 40 ve % 60'tır.
- Gösterim örneği: S3 - % 25

S4: Başlangıç sürecinden etkilenen aralıklı periyodik çalışma

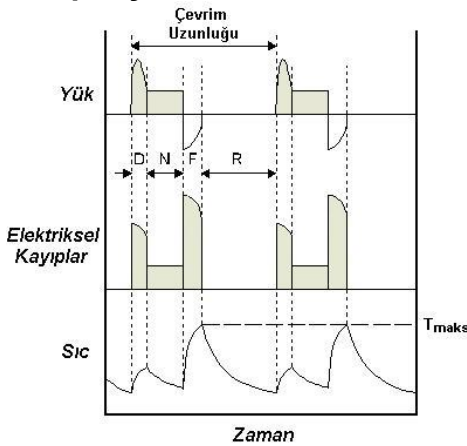
- Her biri, önemli seviyede başlangıç akım periyodundan, sabit yükte çalışma periyodundan ve motora verilen enerjinin kesildiği dinlenme periyodundan oluşan özdeş görev çevrimi dizisi,
- Görev çevrimi periyodu, termal dengeye ulaşmaya yetecek kadar uzun değildir.
- Başlangıç akımının, yüksek seviyede olduğu varsayılmıştır.
- Termal olarak yüklü olmadığı durumda, motor, mekanik frenleme ile ya da yük tarafından durdurulur.
- Bu görev çevrimi için aşağıdaki değerler de belirtilmelidir.
 - Yüklü periyodun kullanım süresinin yüzdesini, toplam çevrimin yüzdesi olarak gösteren *Çevrimsel Süre Faktörü*,
 - *Saat başına Yük Çevrimi sayısı* (c/h).
 - *İnerşia Faktörü* F_I (**toplam** inerşia momentinin, motor rotorunun inerşia momentine oranıdır)
 - Motor rotorunun *İnerşia Momenti* (J_M)

- **Ortalama Direnç Momenti T_V** (Beyan yük torkunda hız değişimi sırasında)
- Gösterim örneği: S4 - % 25 – 120 c/h – ($F_I = 2$) - ($J_M = 0,1 \text{ kgm}^2$) - ($T_V = 0,5T_N$)



D	= Start etme
N	= Sabit Yükte Çalışma
R	= Dinlenme
T_{maks}	= Çevrim Sırasında Elde Edilen Maks Sıc
Çalışma Faktörü	= $\frac{D + N}{N + R + D} \times 100$

S5: Başlangıç sürecinden ve elektriksel frenlemeden etkilenen aralıklı periyodik çalışma

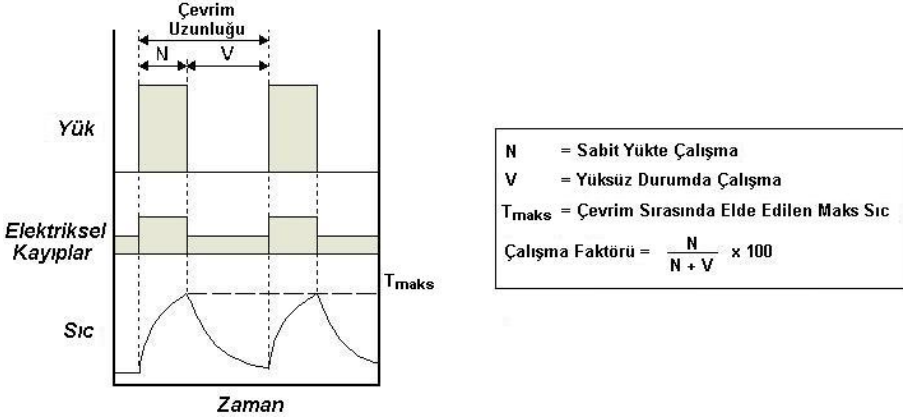


D	= Start Etme
N	= Sabit Yükte Çalışma
F	= Elektriksel Frenleme
R	= Dinlenme
T_{maks}	= Çevrim Sırasında Elde Edilen Maks Sıc
Çalışma Faktörü	= $\frac{D + N + F}{D + N + F + R} \times 100$

- Her biri, önemli seviyede başlangıç akım periyodundan, sabit yükte çalışma periyodundan, hızlı elektriksel frenleme periyodundan ve motora verilen enerjinin kesildiği dinlenme periyodundan oluşan özdeş görev çevrimi dizisi,
- Görev çevrimi periyodu, termal dengeye ulaşmaya yetecek kadar uzun değildir.
- Bu görev çevrimi için aşağıdaki değerler de belirtilmelidir.
 - Yüklü periyodun kullanım süresinin yüzdesini, toplam çevrimin yüzdesi olarak gösteren **Çevrimsel Süre Faktörü**,
 - **Saat başına Yük Çevrimi sayısı (c/h)**.

- **İnerşia Faktörü F_I** (toplam inerşia momentinin, motor rotorunun inerşia momentine oranı. Motor rotorunun **İnerşia Momenti** (J_M))
- **İzin Verilebilen Ortalama Direnç Momenti T_V** (Beyan yük torkunda hız değişimi sırasında)
- Gösterim örneği: S5 - % 40 - 120 c/h - ($F_I = 3$) - ($J_M = 1,3 \text{ kgm}^2$) - ($T_V = 0,3T_N$)

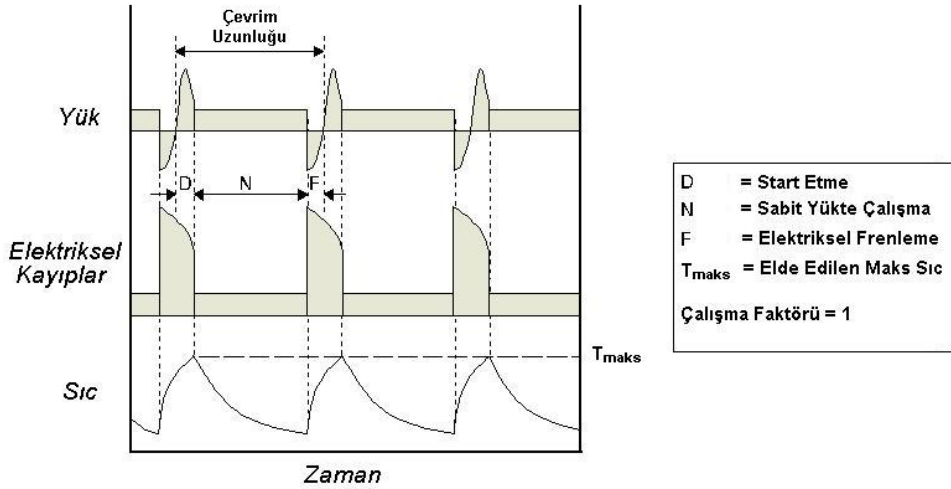
S6: Aralıklı yüklü periyodik görevli sürekli çalışma



- Her biri, sabit yüklü bir periyottan ve yüksüz çalışma periyodundan (sadece yüksüz-durum akımı) oluşan ancak motora verilen enerjinin kesildiği dinlenme periyodunu içermeyen özdeş görev çevrimi dizisi,
- Görev çevrimi periyodu, termal dengeye ulaşmaya yetecek kadar uzun değildir.
- Çevrimsel Süre Faktörüne ilişkin önerilen değerler, % 15, % 25, % 40 ve % 60'tır.
- Görev çevriminin süresi, 10 dakikadır.
- Gösterim örneği: S6 - % 40

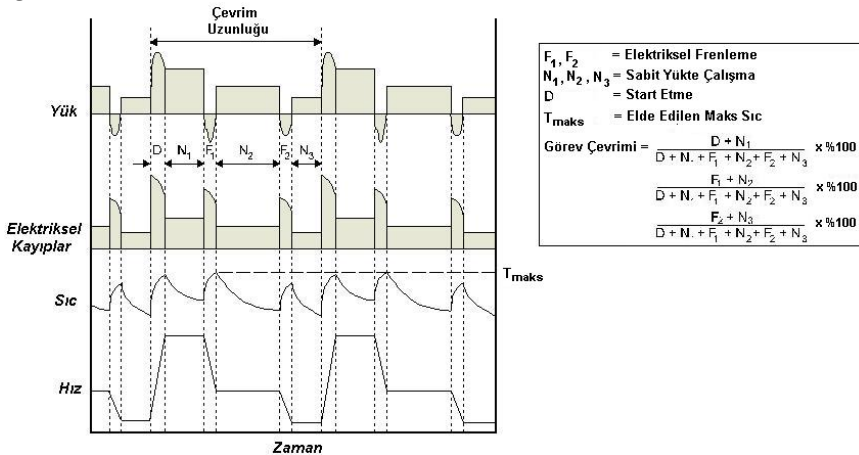
S7: Başlangıç sürecinden ve elektriksel frenlemeden etkilenen kesintisiz periyodik çalışma

- Her biri, başlangıç akım periyodundan, sabit yükte çalışma periyodundan, elektriksel frenleme periyodundan oluşan özdeş görev çevrimi dizisi,



- Frenleme metodu, termal dengeye ulaşmak için çok kısadır.
- Bu görev çevrimi için aşağıdaki değerler de belirtilmelidir.
 - Saat başına Yük Çevrimi sayısı (c/h).
 - İnerşia Faktörü F_I (**toplam** inerşia momentinin, motor rotorunun inerşia momentine oranı)
 - Motor rotorunun İnerşia Momenti (J_M)
 - İzin Verilebilen Ortalama Direnç Momenti T_V (Beyan yük torkundaki hız değişimi sırasında)
- Gösterim örneği: S7 – 500 c/h - ($F_I = 2$) - ($J_M = 0,08 \text{ kgm}^2$) - ($T_V = 0,3T_N$)

S8: Tekrarlayan hız ve yük değişiklikleriyle kesintisiz periyodik çalışma



- Her biri, önceden belirlenmiş bir dönüş hızına karşılık gelen sabit yükteki çalışma periyodundan ve bunu takiben, farklı dönüş hızlarına karşılık gelen diğer sabit yüklerdeki bir veya

daha fazla çalışma periyodundan oluşan özdeş görev çevrimi dizisi,

- Görev çevrimi periyodu, termal dengeye ulaşmaya yetecek kadar uzun değildir.
- Bu görev çevrimi tipi, kutup değiştiren motorlar için kullanılmaktadır.
- Bu görev çevrimi için aşağıdaki değerler de belirtilmelidir.
 - Saat başına Yük Çevrimi sayısı (c/h).
 - İnerşia Faktörü F_I (toplam inerşia momentinin, motor rotorunun inerşia momentine oranı)
 - İzin Verilebilen Ortalama Direnç Momenti T_V (Beyan yük torkundaki hız değişimi sırasında)
 - Her bir dönüş hızı için Çevrimsel Süre Faktörü
 - Motor rotorunun *İnerşia Momenti* (J_M)
 - Yük ve dönüş hızı kombinasyonları, kullanıldıkları sırada listelenir.
- Gösterim örnekleri:
 - S8 – 30 c/h - ($F_I = 30$) - $T_V = 0,5 T_N$ - 24 kW - 740 devir/dak - % 30
 - S8 – 30 c/h - ($F_I = 30$) - $T_V = 0,5 T_N$ - 60 kW - 1,460 devir/dak - % 30
 - S8 – 30 c/h - ($F_I = 30$) - $T_V = 0,5 T_N$ - 45 kW - 980 devir/dak - % 40 - ($J_M = 2,2 \text{ kgm}^2$)

3.11 Elektrik motorlarının soğutulması ve havalandırılması (IC)

Dönen elektrikli makinaların tümü, makinanın içindeki elektriksel ve mekanik kayıpların sonucu olarak ısı üretir. Başlangıç aşamasında ya da dinamik frenleme sırasında kayıplar yüksek seviyededir. Ayrıca, genelde yük arttıkça kayıplar da artar. Isıyı, sürekli olarak hava gibi bir soğutma ortamına iletme için bir soğutma sistemi gereklidir. Dönen makinaların soğutulmasına ilişkin farklı metotlar, IEC 34.6 ve AS 1359.21 standartlarında sınıflandırılmıştır.

AC endüksiyon motorları için, soğutucu hava, rotor şaftına monte edilen bir veya daha fazla fan tarafından dahili ve harici olarak dolaştırılır. Makinanın herhangi bir dönüş yönünde çalışmasını sağlamak için kullanılan fanlar genelde çift-yönlüdür ve güçlü plâstik bir maddeden, alüminyumdan ya da çelikten yapılır. İlâve olarak, motorun dış çerçeveleri, ısının yayılması için yüzey alanını genişletmek amacıyla genelde soğutma kanallarıyla donatılmıştır.

En yaygın AC motor tipi, *Tam Mahfazalı Fan Soğutmalı* (TEFC) motordur, bu motorda, şaftın sürücü-olmayan ucuna (NDE) monte edilen harici cebri soğutma fanı ve motor gövdesinin dış yüzeyinde eksenel olarak yerleşmiş soğutma kanalları mevcuttur. Bunlar, hava akışını, uzunluğu boyunca motor yüzeyinin yakınında tutacak ve böylece soğutma kanallarının soğutma ve kendini-temizleme özelliğini geliştirecek şekilde tasarlanmıştır. Bu amaç için, soğutma kanalları ve fan kapağı arasında genelde bir hava boşluğu bırakılır. Dahili olarak, daha küçük TEFC motorlarında, rotor uç-bilezikleri, genelde sıcaklığın düzgün bir şekilde dağıtılması amacıyla içerideki havanın ilâve dolaşımını sağlamak ve uç siperlerden ve gövdeden ısı yayılımına imkân sağlamak için kanallara sahip olacak şekilde yapılmıştır.

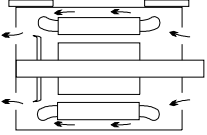
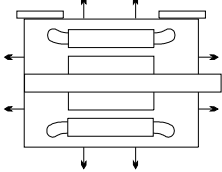
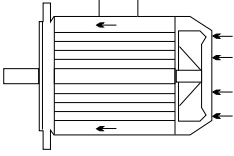
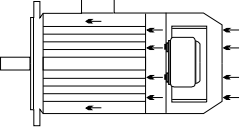
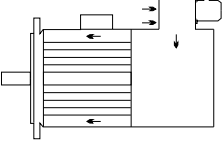
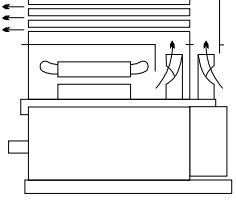
Standart TEFC endüksiyon motorları, VVVF konvertörler tarafından enerjilendirilen Değişken Hızlı AC Sürücülerle birlikte kullanıldığında, özel önlemler alınmalıdır. 50 Hz'lik beyan frekansın altındaki hızlarda, şafta-monteli fanlı soğutmanın verimi düşer. Sabit torklu yükler için, bazen düşük hızlarda yeterli soğutma sağlamak amacıyla ayrı bir şekilde enerjilendirilen cebri bir soğutma fanının (IC 43) kullanılması gereklidir. Diğer taraftan, 50 Hz'in üstündeki hızlarda uzun süreli çalışma için, şafta monteli fanlar oldukça iyi ancak gürültülü bir şekilde çalışabilir. Yine, ayrı bir şekilde enerjilendirilen bir soğutma fanının takılması tavsiye edilebilir.

Dönen daha büyük makinalar, ısı değiştiricileriyle donatılmış kapsamlı soğutma sistemlerine sahip olabilir.

Soğutma metodunu tanımlamak için kullanılan sistem, halen IEC tarafından değiştirilmektedir ancak halen kullanılmakta olan gösterim sistemi aşağıdaki şekildedir:

- IC (Soğutma İndisi) harflerinden oluşan bir önek
- Soğutma aracını gösteren bir harf (soğutma aracı olarak sadece hava kullanılırsa, bu durum ihmal edilir)
- Aşağıdakiler gösteren iki sayı:
 - Soğutma devresinin plânı
 - Soğutma sıvısının dolaşımı için güç sağlama şekli (fanlı, fansız, ayrı cebri havalandırma, vb.)

Kod	Tanım	Çizim
-----	-------	-------

IC 01	- Açık makina - Şafta monte edilmiş fan - Genelde 'damlamaya-karşı dayanıklı' motor olarak adlandırılır.	
IC 40 (Yeni: IC 410)	- Mahfazalı makina - Doğal konveksiyon ve yayılma ile soğutulan yüzey - Harici fan yok	
IC 41 (Yeni: IC 411)	- Mahfazalı makina - Düz ya da yüzgeçli mahfaza - Şafta-monte edilen harici fan - Genelde TEFC motor olarak adlandırılır.	
IC 43 A (Yeni: IC 416A)	- Mahfazalı makina - Düz ya da yüzgeçli mahfaza - Makinayla birlikte verilen harici motorlu Eksenel fan	
IC 43 R (Yeni: IC 416R)	- Mahfazalı makina - Düz ya da yüzgeçli mahfaza - Makinayla birlikte verilen harici motorlu Radyal fan	
IC 61 (Yeni: IC 610)	- Mahfazalı makina - Isı Değiştiriciyle donatılmış - İki ayrı hava devresi - Şafta-monte edilen fanlar - Genelde CACA motoru olarak adlandırılır.	

Şekil 3.17 – En yaygın soğutma metotlarının gösterimi

3.12 Motor mahfazalarının koruma derecesi (IP)

Motor mahfazası tarafından sağlanan *Koruma Derecesi* (*Koruma Derecesi - IP* olarak da adlandırılır), IEC 34.5 ve AS 1359.20 standartlarında sınıflandırılır.

Koruma Derecesini tanımlamak için kullanılan sistem aşağıdaki şekildedir:

- *IP* harflerinden oluşturan bir örnek (*IP* = Koruma Derecesi)
- Aşağıdakileri temsil eden üç sayı
 - Temasa ve toz gibi katı nesnelerin girişine karşı koruma
 - Su gibi sıvı maddelerin girişine karşı koruma
 - Mekanik koruma ve darbeye karşı dayanım

Üçüncü sayı, genelde uygulamada kullanılmamaktadır.

Bu koruma derece sistemi, korozyona karşı korumayı kapsamaz.

Örneğin, koruma derecesi *IP557* olan bir makina, aşağıdaki şekilde korunur:

- Makina, insanların yanlışlıkla, fan gibi hareketli kısımlara dokunmasına ve toz girişine karşı korunur.
Deneyin Sonucu: Dönen kısımlarla doğrudan temas tehlikesi yoktur (deney parmağı).
- Makinaya zarar verecek miktarlarda toz girişi riski yoktur.
- Makina, 3 m uzaktaki hortumlardan tüm yönlerden gelen ve 0,3 barda 12,5 litre/saniye'den daha düşük bir akış hızına sahip su fışkırmalarına karşı korunmaktadır.
Deney Sonucu: Çalışma sırasında, makina, üzerine fışkıran sudan zarar görmez.
- Makina, 6 joule değerine kadar olan darbelere karşı dayanıklıdır.
Deney Sonucu: Darbelerin neden olduğu hasar, makinanın çalışmasını etkilemez.

3.13 AC endüksiyon motorlarının yapılışı ve montajı

Modern sincap kafesli AC endüksiyon motorları, çeşitli standart yapılış ve montaj düzenlemelerine sahip olabilir. Bunlar, IEC 34.7 ve AS 1359.22 standartlarına göre sınıflandırılır.

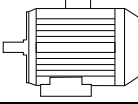
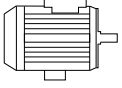
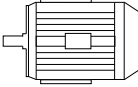
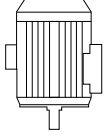
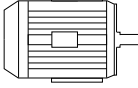
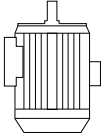
Fişlerin, rulmanların ve diğer mekanik ayrıntıların, montaj sırasında doğru bir şekilde yerleştirilmesini sağlamak için montaj konumunun belirtilmesi gereklidir.

Montaj düzenlemelerini tanımlamak için kullanılan sistem, aşağıdaki şekildedir:

- *IM* harflerinden oluşan bir örnek (Montaj İndeksi)
- Öneki takiben dört sayı
 - İlk ikisi yapılış tipini göstermektedir.

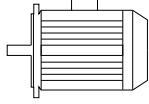
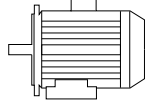
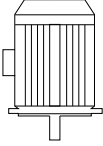
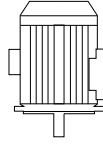
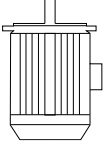
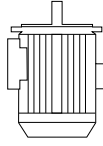
- Son ikisi, montaj konumunu göstermektedir.

Montaj gösterimlerine ilişkin bir özet, Şekil 3.19’da gösterilmektedir. Önceki bir sistem gösterimi, B (yatay montaj) ve V (düşey montaj) harflerini kullanmaktaydı. Bu sistem, hem IEC 34.7’de hem de AS 1359.22’de kullanılmaya başlanmıştır. Eski gösterimler, çizelgede parantez içinde gösterilmektedir.

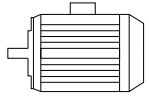
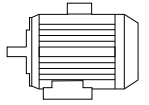
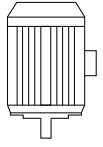
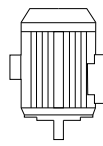
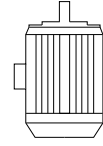
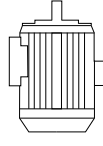
Ayak Monteli Motorlar			
IM 1001 (IM B3) - Yatay şaft - Ayaklar zeminde		IM 1071 (IM B8) - Yatay şaft - Ayaklar tavanda	
IM 1051 (IM B6) - Yatay şaft - Sürücü uçtan bakıldığında, ayaklar sol tarafta olacak şekilde duvara monte edilmiştir.		IM 1011 (IM V5) - Düşey şaft - Şaft aşağı bakıyor. - Ayaklar duvarda	
IM 1061 (IM B7) - Yatay şaft - Sürücü uçtan bakıldığında, ayaklar, sağ tarafta olacak şekilde duvara monte edilmiştir.		IM 1031 (IM V6) - Düşey şaft - Şaft yukarı bakıyor. - Ayaklar duvarda	

Şekil 3.18 – Ayak monteli motorlara ilişkin montaj gösterimleri

Flanş Monteli Motorlar

IM 3001 (IM B5) - Yatay şaft		IM 2001 (IM B35) - Yatay şaft - Ayaklar zeminde	
IM 3011 (IM V1) - Düşey şaft - Şaft aşağı bakıyor.		IM 2011 (IM V15) - Düşey şaft - Şaft aşağı bakıyor. - Ayaklar duvarda	
IM 3031 (IM V3) - Düşey şaft - Şaft yukarı bakıyor.		IM 2031 (IM V36) - Düşey şaft - Şaft yukarı bakıyor. - Ayaklar duvarda	

Şekil 3.19 – Flanş monteli motorlara ilişkin montaj gösterimleri

Yüzeye Monte Edilen Motorlar			
IM 3601 (IM B14) - Yatay şaft		IM 2101 (IM B34) - Yatay şaft - Ayaklar zeminde	
IM 3611 (IM V18) - Düşey şaft - Şaft aşağı bakıyor.		IM 2111 (IM V58) - Düşey şaft - Şaft aşağı bakıyor. - Ayaklar duvarda	
IM 3631 (IM V19) - Düşey şaft - Şaft yukarı bakıyor.		IM 2131 (IM V69) - Düşey şaft - Şaft yukarı bakıyor. - Ayaklar duvarda	

Şekil 3.20 - Yüzeye monte edilen motorlara ilişkin montaj gösterimleri

3.14 Yoğuşma-önleyici ısıtıcılar [*:Anti-condensation heaters*]

Dönen elektrikli makinaların, çok nemli bir ortam gibi ağır iklim şartları altında boşta durmasının gerekli olduğu durumda; makina nem çekebilir, stator ve rotor sargılarının yalıtımı nemlenebilir. Belirli bir süre çalıştırıldıktan sonra bir makinanın enerjisinin kesildiği durumda, iç sıcaklık yüksektir. Makina soğudukça, makina içindeki alçak basınç, şaft civarındaki contalardan makina dışarıdan nemli havanın girmesine neden olur. Nem, sargılarla motorun çerçevesi arasında kısmen iletken bir yol oluşturarak yalıtım malzemelerinin performansının kötüleşmesine neden olur. Makina enerjilendirildiğinde, yalıtımda elektriksel delinme meydana gelebilir. Belirli bir süredir kullanılmamış olan yedek motorlar ya da jeneratörler, ihtiyaç duyulduğunda çalışamayabilir.

Motorun, nemli bir ortamda uzun süre çalışmaz durumda kalmasının beklendiği bu şartlar altında, ilâve sargı emdirme işlemlerinin yapılması gerekli olabilir ve yoğuşma-önler ısıtıcılara önem verilmelidir. Bunlar, motorun içine yerleştirilmiştir ve bağlantıları, terminaller için dışarı çıkarılmıştır. Sargılarda oluşan yoğuşmayı önlemek için, motorun kullanılmadığı durumda, ısıtıcılar, 240 V'luk bir kaynaktan beslenir.

Yoğuşma-önler ısıtıcılar, normalde bant biçimindedir ve ısıtma elemanının örüldüğü düz cam-fiber banttandır. Bu bant, daha sonra cam fiber bir makaronun içine yerleştirilir ve stator sargısının etrafına sarılır. Stator sargısının her bir ucuna normalde bir tane ısıtıcı eleman takılır. Bir ısıtıcının tipik beyan değeri, küçük motorlar için 25 watt'tan, büyük motorlar için 200 watt'a kadar çıkabilir.

3.15 AC endüksiyon motorların start edilmesine ilişkin metotlar

Doğrudan-Hattan (DOL) start etme, sincap kafesli AC endüksiyon motorunu start etmenin en basit ve en ekonomik yoludur. Motorun stator sargılarını, 3-fazlı güç kaynağına doğrudan bağlamak için; uygun beyan değere sahip bir kontak kullanılır.

Bu metot basittir ve yüksek seviyede bir başlangıç torku üretir ancak birtakım dezavantajları vardır:

- Başlangıç akımı çok yüksektir (tam yük akımının 3 ilâ 8 katıdır). Motorun büyüklüğüne bağlı olarak, bu durum, güç sisteminde gerilim sarkmalarına neden olabilir.
- Başlangıç aşamasında anlık olarak tam tork uygulanır ve mekanik şok, sürücü sistemine, özellikle konveyörler gibi malzeme tutan cihazlara zarar verebilir.

- Başlangıç akımının yüksek seviyede olmasına rağmen, bazı uygulamalar için, başlangıç torku nispeten düşük seviyede (tam yük torkunun 1,0 ilâ 2,5 katı kadar) olabilir.

Bu sorunların üstesinden gelmek için, genelde başka başlatma metotları da kullanılır. Bazı yaygın örnekler şunlardır:

- Yıldız-Üçgen Start
- Seri İndüktanslı Start (örneğin, seri şoklar)
- Otomatik-transformatörlü Start
- Seri Dirençli Start (örneğin, Sıvı Dirençli Starter)
- Katı Halli Yumuşak-Start (örneğin, Akıllı Motor Kontrolör)
- Rotor Dirençli Start (kayan bilezikli bir motorun kullanılmasını gerektirir)

Yukarıdaki motor-başlatma tekniklerinin çoğu, motor stator terminallerindeki *gerilimi azaltır*, bu da etkin olarak, başlangıç torkunu ve başlangıç akımını azaltır.

Daha önce bu bölümde açıklanmış olan AC endüksiyon motorlarına ilişkin formüllerden ve eş değer devrelerden, *indirgenmiş gerilimli start* hakkında aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Başlangıç aşamasındaki stator akımı ve çıkış torku, gerilimin karesi ile doğru orantılıdır. Yıldız-üçgen start sırasında, gerilim, beyan değer 0,58'ine düşer. Akım ve tork değerleri, beklenen değerlerinin 0,33'üne düşer.

$$I_{\text{başlangıç}} \propto (\text{Gerilim})^2$$

$$T_{\text{başlangıç}} \propto (\text{Gerilim})^2$$

3.16 Motor seçimi

Bir AC endüksiyon motorunun doğru bir şekilde seçilmesi, motorun kullanılacağı uygulamanın iyi bir şekilde anlaşılmasını esas alır. Bu, mekanik yükün tipi ve büyüklüğü, başlangıç ve ivmelenme şartları, çalışma hızı şartları, görev çevrimi, durdurma şartları ve çevresel şartlar hakkında bilgi edinilmesini gerektirir. Aşağıdaki kontrol listesi ve önceki kısımlara ilişkin referans, seçim prosedürüne ilişkin bir kılavuz olarak kullanılabilir.

Bir elektrik motoru seçilirken, aşağıdaki faktörler dikkate alınmalıdır:

- Mekanik yükün tipi ve tork şartları
- Start Metodu
- İvmelenme süresi
- AC endüksiyon motorunun yapılış tipi
 - Sincap kafesli rotor

- Kayan bileziklere sahip sargılı rotor
- Ayak monteli
- Flanş monteli
- Çevre şartları
 - Çevre sıcaklığı
 - Denizden yükseklik
 - Toz şartları
 - Su
- Mahfazanın gerekli koruma derecesi
- Yalıtım sınıfı
- Motor Koruması
- Soğutma Metodu
- Montaj Düzeni
 - Yatay
 - Düşey
- Kablo bağlantıları
- Dönüş Yönü
- Görev çevrimi
- Hız kontrolü (gerekli ise)

Genel olarak, motor seçimi, motorun içinde çalışacağı ortama ve yük tipine göre belirlenir. Kafes motorun ya da kayan bilezikli motorun seçimi, makinanın büyüklüğü, gerekli ivmelenme süresi (yük tarafından belirlenir) ve başlatma metodu (elektrik kaynağı sınırlamaları tarafından belirlenir) ile yakından ilişkilidir.

Maliyet, güvenilirlik ve bakımının kolay olup olmaması açısından bakıldığında, kafes motor genelde ilk tercihtir. Genelde, kayan bilezikli motorlar aşağıdaki durumlarda gereklidir:

- Yükün, yüksek seviyede başlangıç torku gerektirdiği ancak kaynağın düşük seviyede başlangıç akımı sağlayabildiği durumlarda,
- İvmelenme süresinin, yüksek seviyede yük inerşiasından dolayı uzun olduğu durumlarda,
- Sık sık start, durdurma ve karşı akımla frenleme işlemlerinin gerekli olduğu durumlarda.

Bunlar, genel yorumlardır çünkü kafes motorlar, yukarıdaki durumların tümünde başarılı bir şekilde kullanılabilir.

Kayan bilezikli motorlar, bazen sınırlı hız kontrolü için kullanılabilir. Kayma değeri, harici rotor direnci vasıtasıyla kontrol edilebilir. Daha önce gösterilmiş olduğu gibi, bu metodun genel verimi düşüktür; böylece bu metod, sadece hız, beyan hıza göre çok fazla



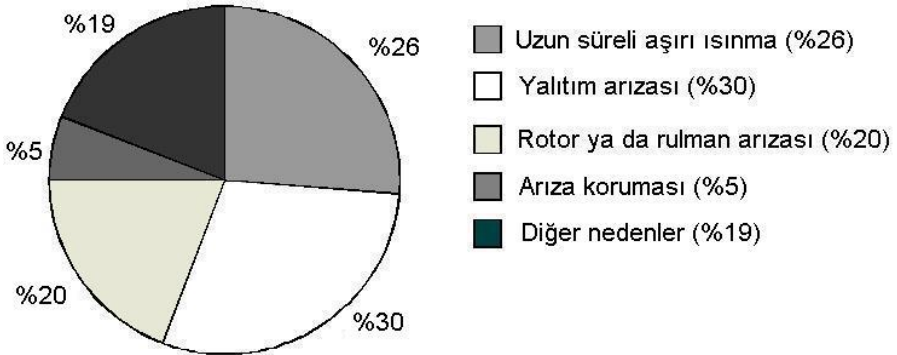
değişmemişse kullanılabilir. Kayma gücü, harici rotor dirençlerinde ısı olarak harcanır.

4 Motor Koruma Röleleri

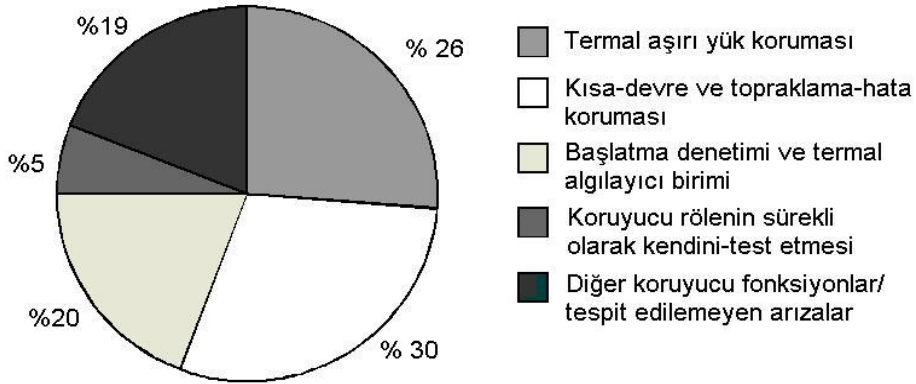
4.1 Giriş

Elektrik motorları, endüstrinin yarış atlarıdır ve elektrik enerjisini mekanik dönme enerjisine dönüştürmek için geniş kapsamlı olarak kullanılmaktadır. Sincap Kafesli Endüksiyon Motorları, özellikle TEFC tipi (Tam Mahfazalı ve Fan Soğutmalı) çok popüler hale gelmiştir; çünkü bu motorlar, basittir, sağlam yapılıdır ve iyi başlangıç ve çalıştırma torku karakteristiklerine sahiptir. Örneğin, Güney Afrika gibi küçük bir ülkede bile, yılda, 1 kW'un üstünde 100 000'lerce bu tip motor satılmaktadır. Bu motorlar, temelde yeni uygulamalar için kullanılmakta olup yıpranmış ya da yanmış motorların yerine de kullanılmaktadır. TEFC tasarımı, motorun mekanik ömrünü iyileştirmektedir; çünkü rulmanlarda ve sargılarda toz ve nem yoktur. Bu motor tipinin, çok güvenilir olduğu kanıtlanmıştır, doğru uygulamada kullanıldığında, bu motor 40 yıl kullanılabilir.

Şekil 4.1'de verilen motor hasarlanma sebepleri, ABB Grubu tarafından elde edilen istatistiklerden alınmıştır. Şekil 4.2'de gösterildiği gibi, bu arızaların % 81'i, doğru ve etkin bir röle kullanılarak önlenabilir.



Şekil 4.1 – Endüstriyel sürücülerdeki motor hasarının temel nedenleri



Şekil 4.2 – Motor sürücü arızalarını tespit etmek için gerekli olan koruyucu fonksiyonlar

Bir elektrik motorunun ömrü, aşağıdaki faktörlerin kısa olanı tarafından belirlenir:

Mekanik ömür

Rulmanların ya da şaft, fan ve gövde gibi mekanik kısımların ömrüdür ve ortam şartlarına (toz, nem, kimyasallar, vb.), titreşime ve yağlamaya bağlıdır. Mekanik ömür, düzenli muayene ve bakım sayesinde uzatılabilir.

Elektriksel ömür

Bu, motor bağlantı kutusundaki Stator Sargısı, Yalıtım, Rotor Sargısı ve Kablo Uçları gibi elektrikli kısımların ömrüdür. Kablo uçlarının düzgün bir şekilde sonlandırıldığı ve düzenli bir şekilde kontrol edildiği varsayıldığında; sargıların ve yalıtımın aşırı sıcaklığa maruz kalmaması sağlanarak; elektriksel ömür uzatılabilir. Aşırı sıcaklığın nedeni, Aşırı Yükleme ya da Tek Fazda Çalışma (bir fazın kaybolması) olabilir. İyi motor korumasının amacı, aşırı yükleme ya da arıza şartlarını tespit etmek için motora akan akımı sürekli olarak izlemek ve olağan dışı bir durum meydana gelirse, motorun bağlantılarını otomatik olarak kesmektir. Doğru bir şekilde uygulandığında, bu koruma, aşırı ısınmanın yalıtıma zarar görmesini önleyerek motorun çalışma ömrünü uzatır.

Endüstride çalışan birçok insan, elektrik motorunun nispeten basit olan mekanik özelliklerini kolayca kavrayabilir ancak çok azı, aşırı yüklemenin motorun faydalı ömrüne etkisini ve elektriksel sınırlamaları çok iyi bir şekilde kavrar. Esasen, aşırı mekanik yükleme, sargıda çok yüksek seviyede akımların akmasına neden

olur (motordaki akım, yük torkuyla orantılı olduğu için) ve bu, stator ve motor sargılarında aşırı ısınmaya neden olur.

Bu yüksek seviyedeki sıcaklıklar, yalıtım malzemelerinin kötüleşmesine ve bunun sonucu olarak arızalara neden olur. Birçok durumda, motor, statorun yeniden sarılmasıyla tamir edilebilir ancak bu, pahalıya mal olur. Motor ne kadar büyükse, maliyet o kadar yüksektir.

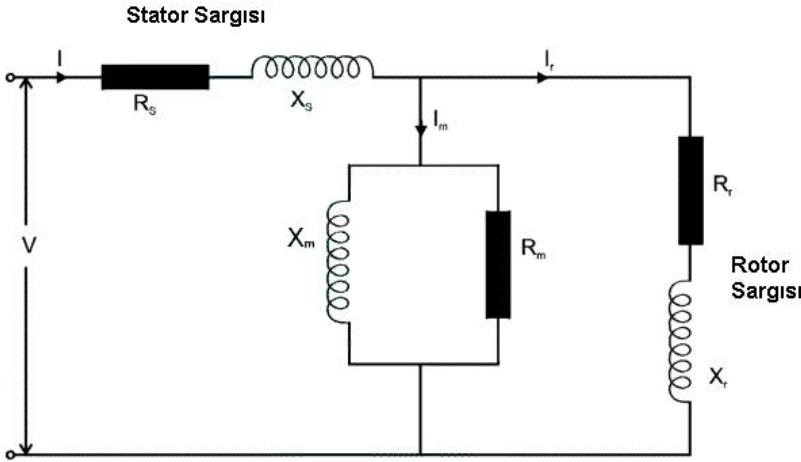
Motorlarda yaygın olarak kullanılan çeşitli yalıtım malzemesi tipleri mevcuttur. Motorlara ilişkin IEC özellik standartlarında, yalıtım malzemeleri, kalıcı hasara uğramaksızın dayanabilecekleri maksimum çevre sıcaklığının üstündeki sıcaklık artışına göre sınıflandırılır.

Örneğin, yaygın olarak kullanılan yalıtım sınıflarına ilişkin sıcaklık artışları şunlardır:

- B Sınıfı: 40°C'lik maksimum çevre sıcaklığının 80° C üstünde (başka bir deyişle, 120°C'lik maksimum sürekli sıcaklık)
- F Sınıfı: 40°C'lik maksimum çevre sıcaklığının 100° C üstünde (başka bir deyişle, 140°C'lik maksimum sürekli sıcaklık)

Sincap kafesli bir endüksiyon motorunda, stator sargısına akan akım, mekanik yük torkuyla doğrudan orantılıdır. Motor imalatçısı, motoru, belirli sınır değerleri dahilinde çalışacak şekilde tasarlamıştır. Motor, beyan besleme geriliminde (V) ve akımında (I) kilowatt (kW) cinsinden beyan değerlere sahiptir. Bu, makinanın, mekanik yükü, beyan hızda beyan torka kadar sürekli olarak sürebileceği anlamına gelir. Bu şartlar altında, besleme akımı, belirtilen beyan akım dahilinde ve dahili ısınma, belirtilen yalıtım sınıfının özellikleri dahilinde olacaktır. Tam yükte B sınıfı yalıtım kullanıldığında, sargı sıcaklığı, 120°C'nin altında kararlı hale gelecektir.

Motor sargılarındaki ısınma, stator ve rotor sargılarında akmakta olan akımın karesine bağlıdır. Bu, kayıpların $I^2 (R_s + R_r)$ olduğu, Şekil 4.3'teki eş değer motor devresinde gösterilmektedir. Bunlar, genelde bakır kayıpları olarak adlandırılır. Stator sargıları, sadece küçük bir kütleye sahiptir ve akım akışından dolayı hızlı bir şekilde ısınır. Isı yalıtımı ve soğuma süre sabiti, sonuç olarak oldukça büyüktür. Isı üretimine neden olan başka kayıplar da vardır. Bunlar, demir kayıpları olarak adlandırılır ancak nispeten küçüktür ve motorun gövdesine hızlı bir şekilde yayılır.



Sincap kafesli endüksiyon motorunun eş değer devresi

I_m = çok küçük bir değerdir, bu nedenle $I = I_r$

Bakır kayıpları = $I^2(R_s + R_r)$

R_s = stator direnci

R_r = rotor direnci

X_m = mıknatıslanma indüktansı

R_m = mıknatıslanma direnci

X_s = stator indüktansı

X_r = rotor indüktansı

Şekil 4.3 – Sincap kafesli endüksiyon motorunun eş değer devresi

4.2 Eski motor koruma röleleri

Eski motor koruma rölelerinin bazıları, amacı motoru aşırı yüklemeye karşı korumak olan tek bir fonksiyona, sahipti. Bu fonksiyon, motor tarafından çekilen akımın sürekli olarak izlenmesiyle ve akım, belirli bir süre boyunca beyan akımını geçtiğinde; motorun bağlantısının kesilmesiyle gerçekleştirilirdi. Aşırı yük akımı ne kadar yüksek seviyede olursa, bağlantı kesilmeden önceki izin verilebilen süre o kadar kısa olurdu. Bu gecikme, çeşitli şekillerde gerçekleştirilirdi. Buna ilişkin bir örnek, "lehim kabına sahip" röledir; bu röle, üzerinden yük akımı geçtiğinde, ölçme devresindeki lehimin erimesi için geçen süreye bağlı olarak çalışmaktadır. Çift metalli tip röleler, dirençten geçen yük akımı, çift metalli bir şeridi, önceden belirlenmiş bir sınır değerini aşacak kadar bükecek şekilde ısıttığında, motor bağlantısını keser. Bu işlem, kapatma mekanizmasını salmaktadır. Son yıllarda, elektronik röleler, statorun ve rotorun elektriksel özelliklerini simüle etmek için direnç ve kondansatör kombinasyonundan oluşan benzer analog bir devreyi kullanmaktadır. Tüm bu metotları birleştiren temel ilke, motorun elektriksel karakteristiklerini mümkün olduğunca iyi bir şekilde simüle eden bir kopya sistem tasarımıdır.

Aşırı sıcaklığın, motor sargısında bulunan ve sıcaklığa bağlı çalışan elemanlar vasıtasıyla tespit edilmesi yaygın bir uygulamaydı.

Ancak, bu sıcaklık ölçme biçimi, doğrudan mevcut iletkenlerden alınmadığı ve yalıtım yoluyla yapıldığı için, birçok durumda yeterli değildir. Yalıtımla ilgili sorunlardan dolayı, yüksek-gerilimli motorlara ısı çiftlerinin yerleştirilmesi sorunlara neden olabilir. Dahası, bir arıza meydana geldiğinde (örneğin, makinanın içindeki ölçme çubuğunun kırılması gibi) tamir maliyeti yüksektir. Başka bir sorun ise, tasarım sırasında kaç tane “sıcak noktanın” olacağı ve bu noktaların nerede yer alacağının öngörülebilmesidir.

Sonuç olarak, koruma, tercihen faz akımlarının izlenmesini esas alır. Sıcaklık, bakır ve demir kayıpları tarafından belirlendiği için, motor besleme kablolarındaki akım değerlendirilerek sıcaklığın doğrudan olmayan bir şekilde belirlenmesi mümkün olmalıdır.

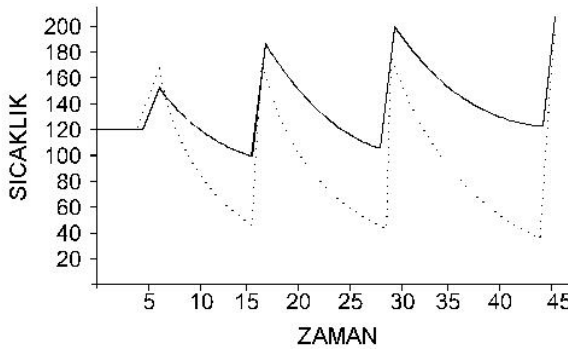
Bir Motor Koruma Rölesinin performansı, korumanın, motor karakteristiklerini ne kadar iyi ve doğru bir şekilde simüle ettiğine bağlıdır. Motor sargılarının ısınma ve soğuma zaman sabitleri, tüm çalışma şartları altında röle tarafından uyumlandırıldığında, ideal simülasyon gerçekleştirilmiş olur. Eski cihazların bazılarında, koruma, sargıların ısınma süresini soğuktan dolayı gerçek değerinden düşük olarak tahmin edebilir ve uzun başlangıç süresine sahip bir motor/yük kombinasyonu, çalışma hızına ulaşmadan önce kapatılabilir.

Diğer taraftan, ardışık durma ve başlama işlemleri sırasında, cihaz, sargıların soğutma süresini, gerçek değerinden daha düşük olarak tahmin edebilir ve motor sargılarının aşırı ısınmasına neden olabilir. Bu durum, günümüzde motor starterlerinde yaygın bir şekilde kullanılan çift-metalli termal aşırı yük röleleri söz konusu olduğunda çok kolay bir şekilde meydana gelebilir. Belirli şartlar altında, çift-metalli termal aşırı yük röleleri tam koruma sağlamaz çünkü cihaz, korumakta olduğu motorla tam olarak aynı termal ısınma ve soğuma karakteristiklerine sahip olmayabilir. Çift-metalli bir rölenin ısınma ve soğuma süre sabitleri neredeyse aynıdır ancak gerçek sistemlerde, durmuş bir motorun, çalışan bir motordan daha büyük bir soğuma süre sabitine sahip olduğu unutulmamalıdır. Bir motor durdurulduğunda, fan, çekiş sağlayamaz ve soğuma, motorun yüksüz durumda çalıştığından daha uzun sürer. Basit bir çift-metalli cihaz, normal çalışma şartları için kalibre edilir. Olağan dışı bir durum meydana geldiğinde, zorluklar oluşabilir.

Önemli noktayı göstermek için, rotor aniden durdurulduğunda, belirli bir süre boyunca tam yükte çalışmakta olan bir motoru ele alalım. Şekil 4.4'te, koruyucu cihazın ısınma ve soğuma eğrisiyle (kesikli

çizgi) sargı sıcaklığının tipik sıcaklık eğrileri (kalın çizgi) gösterilmektedir. 120 °C'lik normal sürekli çalışma sıcaklığında çalışmaya başlandığında, akım, kilitli rotor durumu için artar ve birkaç saniye sonra termal cihaz motoru durdurduğunda sıcaklık 140 °C'a çıkar. Yaklaşık 10 dakika sonra, çift-metal, çevre sıcaklığına kadar soğumuş olmalıdır ancak sargılar sadece 100 °C'dir. Çift-metal resetle, motorun yeniden çalıştırılabilmesi mümkündür. Rotor halâ kilitli iken, çift-metal, motoru yeniden durdurmadan önce, yüksek başlangıç akımı, sıcaklığın hızlı bir şekilde 165 °C'ye çıkmasına neden olur.

Yukarıda açıklanmış olduğu gibi, sargılar yeterince soğumadan önce motorun ve çift-metal şeridin soğuma sürelerinin farklı olmasının çift-metal resetlemesine izin verdiği durumda, benzer bir olay dizisinin yeniden tekrarlanabildiği göz önüne alındığında ve 10 dakika sonra motor yeniden çalıştırılırsa, sargı sıcaklığının 180 °C'yi (B sınıfı yalıtım malzemeleri için kritik sıcaklığı) geçmesi muhtemeldir. Bu, motor çalışırken ve motor durdurulduğunda, her iki durumda da koruma cihazı tarafından doğru simülasyonun yapılmasının önemini göstermektedir.



Şekil 4.4 – Bir motora ilişkin sıcaklık artışı/zaman

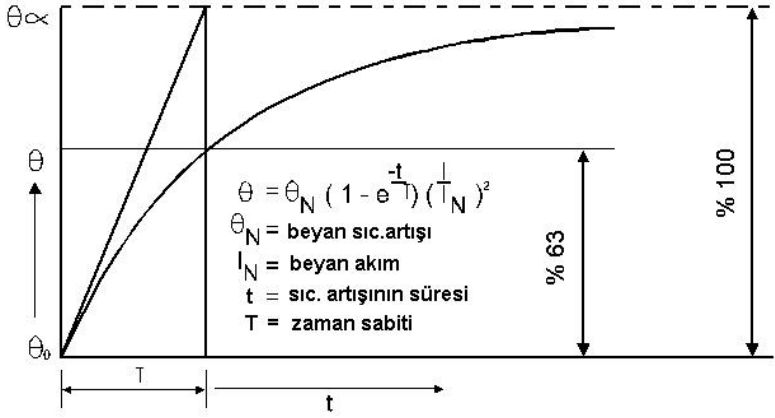
4.3 Kararlı durum sıcaklık artışı

Maksimum verim söz konusu olduğunda, elektrikli makinalar, izin verilen çalışma sıcaklık sınır değerlerine mümkün olduğunca yakın olacak şekilde yüklenmelidir; ancak, yalıtım ömrünün kısalması istenmiyorsa, uzun süreli aşırı termal zorlama önlenmelidir.

Kararlı durum şartları altında, ilgili çalışma sıcaklığına doğru, ortama ya da soğutma aracına ısı yayılmasından dolayı motorun sıcaklığı üstel olarak yükselecektir. Motor homojen bir kütle olmadığı için, ısı, çeşitli aşamalarda

harcanır. Bu sıcaklık artışları ve düşüşleri, kısmî zaman sabiti serisine göre gerçekleşir. Şekil 4.5'e bakılmalıdır.

Buna rağmen, kararlı-durum şartları altında koruma için öngörülen termal bir aşırı yük rölesinin, motorun ortalama zaman sabitine ayarlanması yeterlidir. Bu, sadece bakır kayıplarının dikkate alındığı anlamına gelir. Demir kayıplarını hesaba katmak için gerilim ölçümü gereklidir ancak genelde bu mümkün değildir çünkü gerilim transformatörleri genelde baraya yerleştirilir, motorların yakınına yerleştirilmez. Birçok modern termal aşırı yük rölesi sadece akım ölçer, üç faz akımın en yükseğini filtreler. Bir fazın başlatılması, durdurulması ve arızalanması gibi kritik durumlar, diğer koruma fonksiyonları tarafından dikkate alınmaktadır.



Şekil 4.5 – Sıcaklık artışı/zaman (Zaman sabiti gösterilerek)

4.4 Termal zaman sabiti

Zaman sabiti T (tau) θ_0 başlangıç sıcaklığından, θ_0 ile yeni kararlı durum sıcaklığı θ_∞ arasındaki farkın % 63'üne kadar değişmesi için gerekli olan süredir (dakika cinsinden).

Maalesef, motorun termal zaman sabiti T genelde bilinmeyen bir değerdir. Çizelge 16.1'de, motor beyan değerleri ve mekanik tasarımla ilgili tipik değerler verilmektedir.

Çalışma sırasındaki soğuma süre sabitleri, sıcaklık artışlarına ilişkin sürelerle oldukça yakındır, durağan durumda ise, bu süre değerleri, çizelgede verilen değerlerin dört ilâ altı katına eşittir.

	A[mm]	355	400	450	500	560	630	710	800	900	1000	1120	1250
Tip													

O	20	25	28	30	35	40	50	60	65	70		
R				45	50	55	60	70	80	90	100	110
U	30	35	40	45	50							

A = Şaft yüksekliği (mm)

O = Açık Tip (IP23 koruma derecesi)

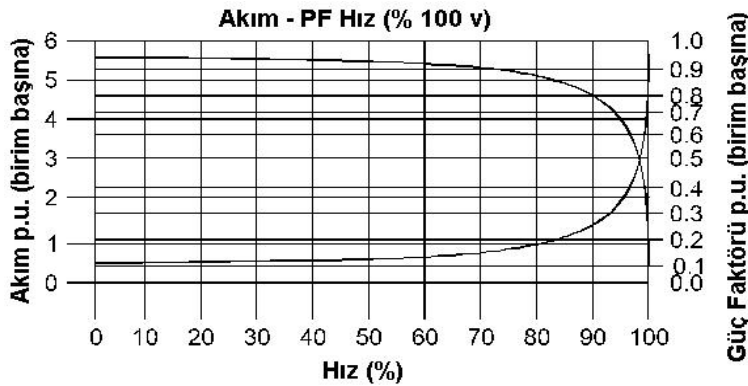
R = Havalandırılmalı kapalı tip (IP54 koruma derecesi)

U = Soğutma birimlerine sahip tamamen kapalı tip (IP54 koruma derecesi)

Çizelge 4.1 – Motor beyan değerine ve tipe göre Brown Boveri'ye ait asenkron motorların ortalama termal zaman sabitleri

4.5 Başlatma ve durdurma şartlarındaki motor akımı

Motor çalıştırma akımlarının büyüklüğü, süresi ve izin verilebilen motor durdurma akımı süresi, aşırı yük korumasının uygulanmasındaki temel faktörlerdir. Genelde makinaların doğrudan hattan çalıştırıldığı ve makinanın hızı arttıkça, başlatma akımının lineer olarak azaldığı varsayılır.



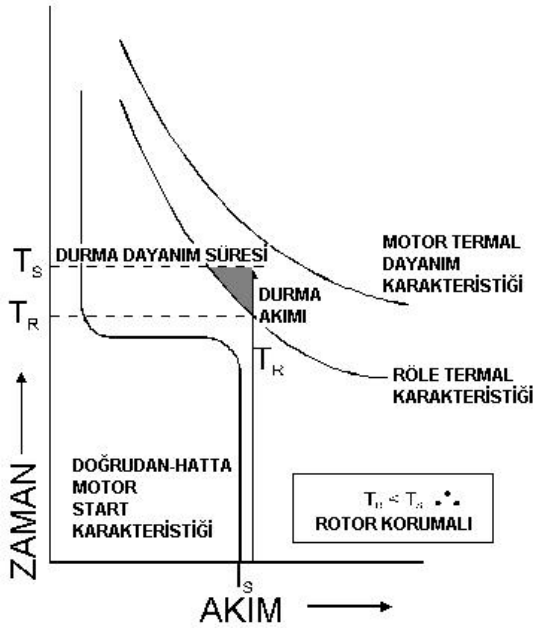
Şekil 4.6 – Başlangıç şartlarındaki motor akımı

Bu, doğru değildir. Normal tasarımlar için, start akımı, toplam start süresinin % 80 - % 90'ında başlangıç değerinde sabit kalır. Şekil 4.6'ya bakılmalıdır.

Aşırı yük korumasının akım ve zaman ayarları belirlenirken, motor başlangıç akımının, başlangıç süresinin tamamı boyunca durağan değere eşit olduğu ve sabit kaldığı varsayılabilir.

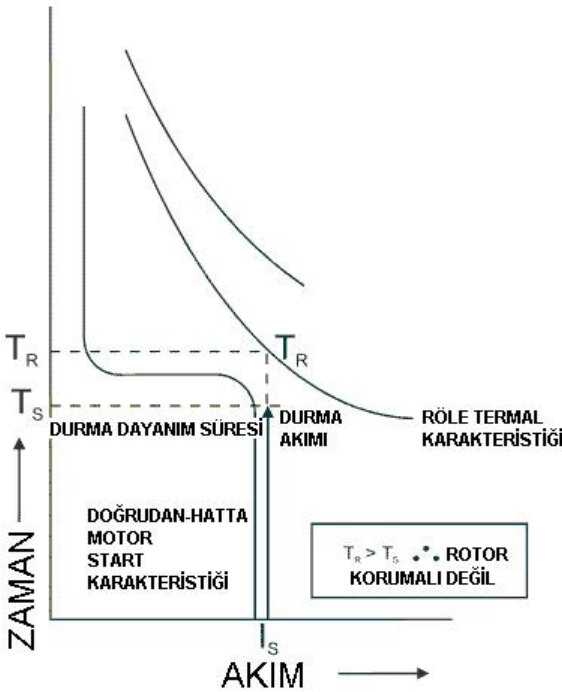
4.6 Motorların durdurulması

Şekil 4.7'ye ve Şekil 4.8'e bakılmalıdır. Motor, aşırı yüklü olduğundan dolayı çalışırken durursa ya da tekrar çalışmaya başlayamazsa, kaynaktan, kilitli rotor akımına eş değer bir akım çekecektir.



Şekil 4.7 – Röle çalışma süreleri, durma dayanım süresinden daha kısadır: röle, durma koruması sağlar.

Bu durum meydana gelirse, makineye zarar gelmemesi için makinenin bağlantılarının kesilmesi gereklidir.



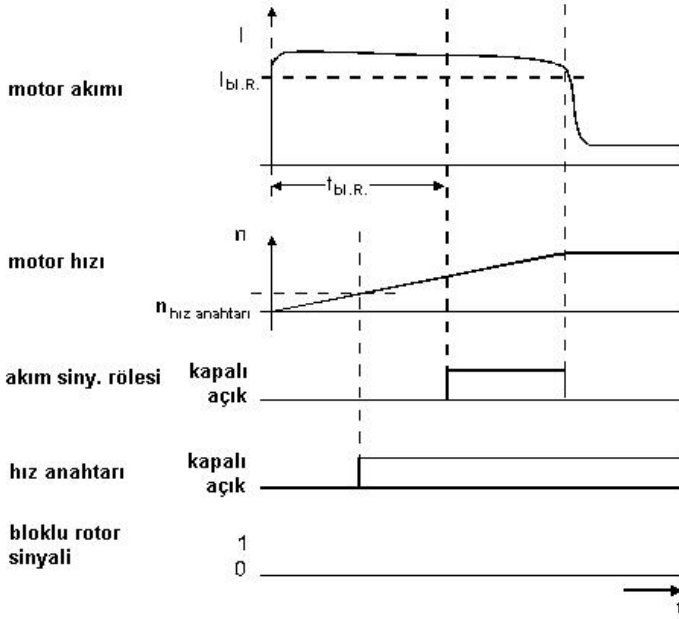
Şekil 4.8 – Röle çalışma süreleri, durma dayanım süresinden daha uzundur: röle, durma koruması sağlamaz.

Bu şartın, akım büyüklüğüne bağlı sağlıklı bir başlatma şartından ayrılması mümkün değildir.

Yüklerin çoğunluğu, normal endüksiyon motorlarının başlangıç süresi 10 saniye civarında ya da 10 saniyeden kısa olduğunda, motor yalıtımının zarar görmesini önlemek için, izin verilebilen durdurma süresi, 15 saniyeden uzundur.

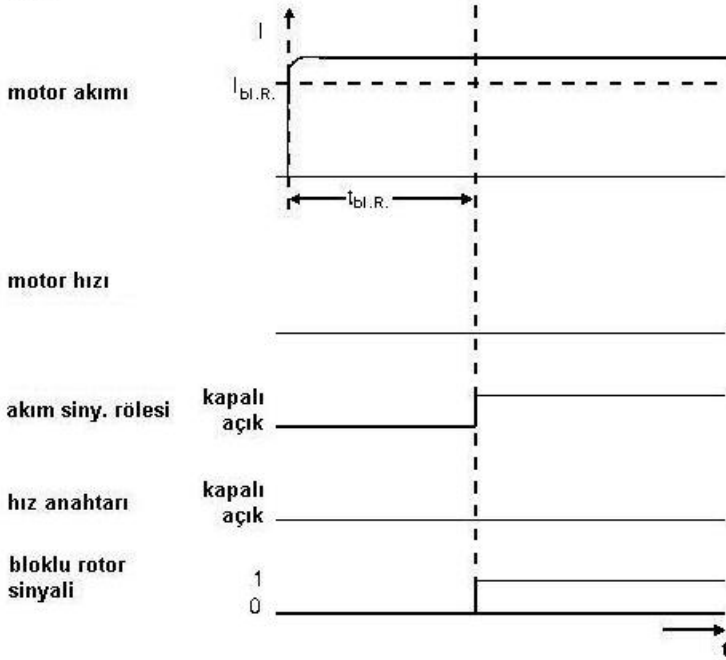
Çift-kafesli bir kafes sürücü korunacaksa, normal başlangıç süresinde bile motorun durma konumunda kalmasına izin verilemez. Bu durumda, motor şaftı üzerindeki bir hız anahtarı, motorun çalışmaya başlayıp başlamadığı konusunda bilgi vermek için kullanılabilir. Bu bilgi, uygun rölelere iletilip çalışma süreleri hızlandırılabilir. Şekil 4.9(a) ve Şekil 4.9(b)'ye bakılmalıdır.

Aşağıdakiler normal bir motor startı için tipiktir:



Şekil 4.9(a) – Tipik motor startı

Aşağıdakiler bloklu rotor durumunu karakterize eder.



Şekil 4.9(b) – Bloklanmış rotor durumu

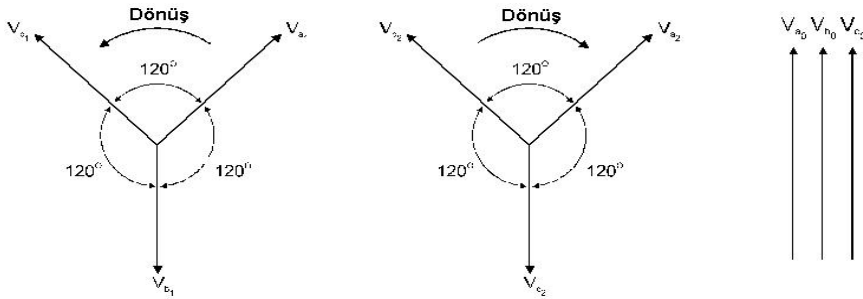
Durdurma koruması için ilâve özelliklerin gerekli olup olmaması, temelde normal start süresinin, müsaade edilen durdurma süresine oranına ve rölenin, durdurma süresiyle/akım eğrisiyle uyumlu olacak şekilde ayarlanabilme doğruluğuna, ancak yine de normal bir start sağlayabilme özelliğine bağlıdır.

4.7 Dengeli olmayan besleme gerilimleri

Üç-fazlı bir motora verilen gerilim, çeşitli nedenlerden dolayı dengeli olmayan bir gerilim olabilir, bu nedenler: tek-fazlı yükler, atmış sigortalar, vb. İlâve olarak, motora beslenen fazlardan birinin kablosu yanlışlıkla çıkarsa, motor sadece iki fazla çalışmaya devam edecektir.

Normal bir sistemdeki gerilim dengesizliğinin derecesi, motoru çok fazla etkilemez. Önemli olan gerilimin dengesiz olması değildir, önemli olan, dengesiz gerilimin neden olduğu dengesiz akımın nispeten daha büyük olan negatif dizili bileşenidir.

Simetrik bileşen metodu, dengeli olmayan herhangi bir üç fazlı vektör sisteminin, dengeli üç bileşenli sisteme indirgenmesinden oluşur: pozitif, negatif ve sıfır dizili bileşenler. Şekil 4.10'a bakılmalıdır. Pozitif dizili bileşenler, aralarında 120° faz farkı olan ancak büyüklükleri eşit olan üç vektörden oluşur, bu bileşenlerin faz dizisi ya da dönüşü, kaynağına göre aynıdır. Negatif dizili bileşenler, aralarında 120° faz farkı olan ancak büyüklükleri eşit olan üç vektörden oluşur, bu bileşenlerin faz dizisi pozitif faz dizisine ters yöndedir. Sıfır dizili bileşenler, büyüklük ve faz açısından eşit olan üç vektörden oluşur.



Şekil 4.10 – Pozitif, negatif ve sıfır bileşenler

Fazlardan birinin kaybolması, en tehlikeli dengesizlik durumunu göstermektedir. Bu nedenle, kısa devreye karşı sigortalar tarafından korunan motorların, faz koruması için hızlı bir çalışma kaybına sahip olması gereklidir.

4.8 Dizili akımların belirlenmesi

Dengeli olmayan üç-fazlı gerilimlerin söz konusu olduğu genel durumda, pozitif dizili akımlarla negatif dizili akımlar arasında sabit bir ilişki yoktur, negatif dizili akımın gerçek değeri, dengeli olmayan besleme geriliminin derecesine ve ayrıca makinanın negatif dizi empedansının pozitif dizi empedansına oranına bağlıdır.

Oran, endüksiyon motorunun genel eş değer devresinden belirlenebilir.

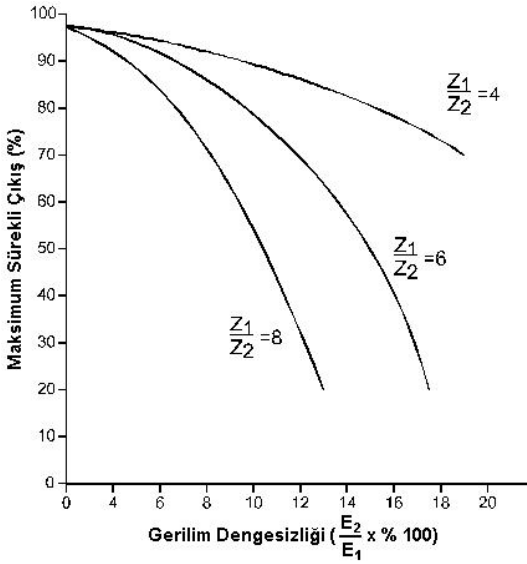
Bir endüksiyon motorunda, direnç değeri, reaktansla karşılaştırıldığında küçük olduğu için, normal çalışma hızlarındaki negatif dizili empedans, durağan durumdaki pozitif empedansa yaklaşılanabilir. Normal çalışma hızlarında, pozitif dizili empedansın negatif dizili empedansa oranı, başlangıç akımının oranına yaklaşılanabilir, bu da, bu nedenle negatif dizili gerilimle, başlangıç akımının tam yük çalışma akımına oranının çarpımına yaklaşık olarak eşittir.

Örneğin, başlangıç akımı beyan akımın altı katına eşit olan bir motorda, besleme gerilimindeki % 5 negatif dizili bileşen, akımda yaklaşık olarak % 30 negatif dizili bileşen oluşturur.

4.9 Dengeli olmayan akımlardan dolayı makinanın beyan değerlerinin düşürülmesi

Akımın negatif dizili bileşeni, motorun sürücü torkuna katkıda bulunmaz, gerçekte, küçük ve negatif bir tork üretir. Ancak, negatif dizili akımdan kaynaklanan torkun büyüklüğü, genelde % 10 derecesindeki bir gerilim dengesizliği için tam yük beyan torkun % 0,5'inden küçüktür ve bu nedenle, ihmal edilebilir düzeydedir.

Negatif dizili akımın temel etkisi, temelde bakır kaybı olmak üzere motor kayıplarını artırmaktır ve bu nedenle makina sargılarının aşırı ısınması önlenecekse, negatif dizili akım, makinanın çıkışını azaltmaktadır. Başlangıç akımının çalışma akımına oranı sırasıyla 4, 6 ve 8 olan makinaların çıkışındaki azalma, negatif dizili gerilimin pozitif dizili gerilime oranının çeşitli değerleri için Şekil 4.11'de gösterilmektedir.



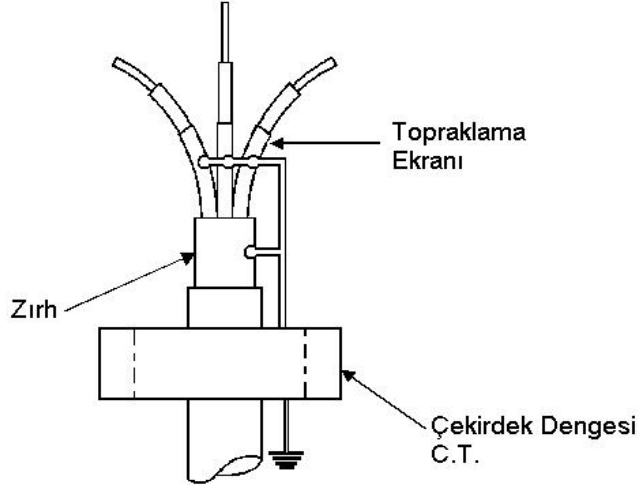
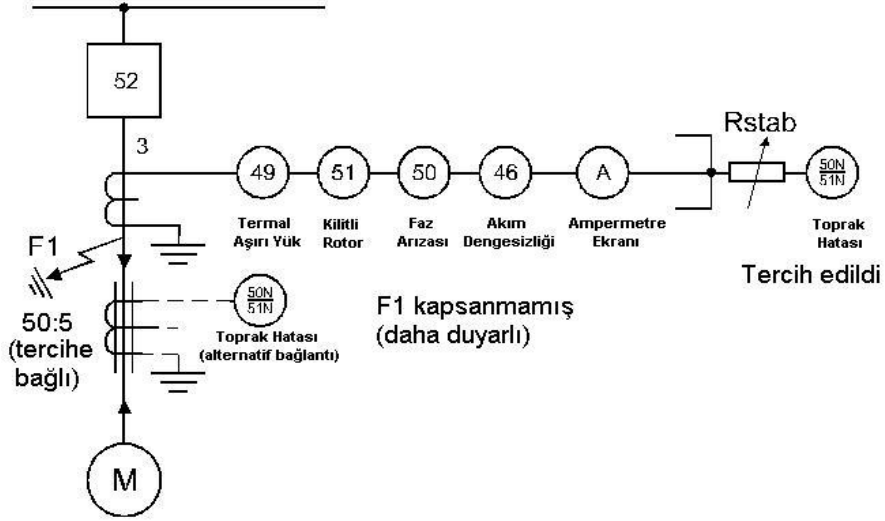
Şekil 4.11 – Maksimum sürekli çıkış/gerilim dengesizliği

4.10 Stator sargılarındaki elektriksel arızalar, topraklama hataları, faz-faz arızaları

Topraklama hataları

Motor sargılarında meydana gelen hatalar, temelde sargı yalıtımında meydana gelen delinme nedeniyle oluşan topraklama hatalarıdır. Bu arıza tipi, motor tam yük akımının yaklaşık olarak % 20'sine ayarlanmış olarak ve üç akım transformatörünün artık devresine bağlanan anlık bir röle kullanılarak çok kolay bir şekilde tespit edilebilir.

Rölenin, başlangıç akımının ilk tepesi sırasında bir veya daha fazla akım transformatörünün doymasından kaynaklanan taşma akımı vasıtasıyla çalıştırılmamasına dikkat edilmelidir; başlangıç akımı, kararlı durum r.m.s. değerinin 2,5 katı kadar yüksek olabilir ve normal rölenin çalışma hızı yüksekse, çalışmaya neden olabilir. Bu şartlar altında kararlılığı sağlamak için, röleye seri olarak bir kararlı hale getirme direnci takılarak, rölenin minimum çalışma geriliminin artırılması mümkündür. Şekil 4.12'ye bakılmalıdır.



Şekil 4.12 – Topraklama hatasına karşı koruma

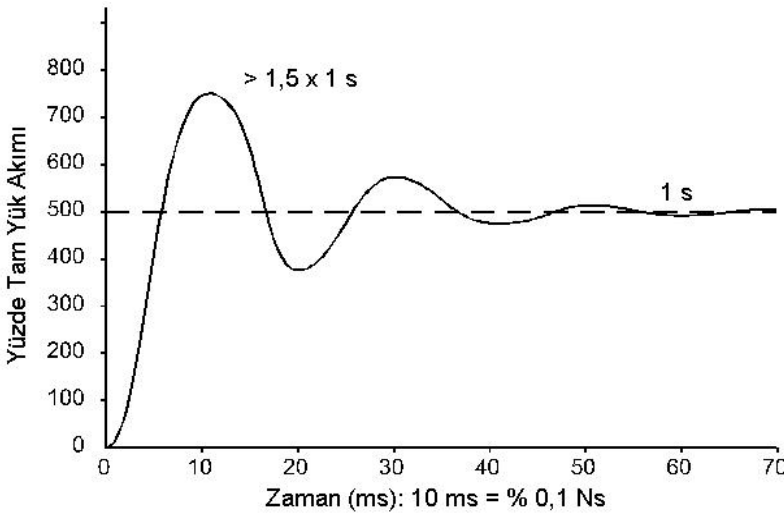
Faz-faz arızaları

Faz sargıları arasındaki yalıtım miktarının nispeten yüksek seviyede olmasından dolayı, fazlar arasında nadiren arıza meydana gelir. Stator sargıları tamamen topraklanmış metal mahfazaya konulduğunda, arıza, toprağı da içerir ve yukarıda açıklanan anlık topraklama hata koruması devreye girer.

Faz-faz arızalarına karşı koruma sağlamak için, büyük (2 MW) ve önemli motorlarda bazen diferansiyel koruma sağlanmaktadır ancak motor, topraklanmış bir sisteme bağlanmışsa, hızlı-çalışan ve duyarlı bir topraklama hatası varsa, bu durum çok fazla yarar sağlamayacaktır.

Terminal (bağlantı ucu) arızaları

Motor terminallerinde terminal arkı gibi faz arızalarına karşı koruma sağlamak için, yüksek değere ayarlanmış anlık aşırı akım röleleri kullanılmaktadır. Bu birimler ayarlanırken, birimlerin, motorun başlangıç akımının (başlangıç akımı, kararlı durum r.m.s. değerinin 2,5 katı olabilir) ilk tepesinde çalıştırılmadığından emin olunmalıdır. Başlangıç akımındaki asimetri hızlı bir şekilde azalır ve genelde bir çevrimden sonra, kararlı durum değerine düşer. Tipik motor başlangıç akımı, Şekil 4.13'te gösterilmektedir.



Şekil 4.13 – Bir motor start edilirken, ilk birkaç çevrimdeki geçici aşırı akım

4.11 Genel

Çift-metalli termal aşırı yük rölesi, 22 kW'a kadar olan küçük ilâ orta büyüklükteki motorlar için etkin ve ekonomik bir çözüm sağlar. Daha büyük, daha pahalı motorlarda ya da değişken çalışma şartlarında maksimum motor kullanımının gerekli olduğu durumda, daha gelişmiş, esnek ve doğru mikroişlemci koruma rölelerinin kullanılması dikkate alınmalıdır.

Bu röleler tipik olarak aşağıdakileri kapsar:

- Doğrudan kontrol edilen ve frekans konvertörüyle kontrol edilen sürücüler için termal kopyalarla birlikte üç fazın

tamamının izlenmesini sağlayan termal aşırı yüke karşı koruma

- Kısa devreye karşı koruma
- Başlangıç ve çalışma sırasında durmaya karşı koruma
- Faz dengesizliğine karşı koruma
- Tek-fazlı çalışma durumunda koruma
- Topraklama hatasına karşı koruma
- Düşük akıma (yetersiz akım) karşı koruma
- Ayarlanan-değerlerin, ölçülen gerçek değerlerin ve bellekte tutulan değerlerin sayısal olarak okunması
- Kendini-denetleme sistemi
- Yüksek seviyede doğruluk
- Optimum çalışma ilkesi

5 Güç Elektroniği Konvertörleri

5.1 Giriş

Bu bölüm, *Güç Elektroniği* devrelerinde ve konvertörlerinde kullanılan pasif bileşenleri (örneğin, dirençleri, şokları, kondansatörleri, vb.) ve aktif bileşenleri (örneğin, diyotlar, tristörler, transistörler, vb.) kapsar. *Güç Elektroniği*, yüksek güç uygulamaları için bir biçimden diğerine elektrik enerjisi dönüşümüyle ilgili elektronik alanıdır.

Aşağıdaki güç aralıklarındaki devrelere uygulanır:

- MVA aralığına kadar olan güç beyan değerleri
- 100 kHz civarına kadar olan frekans beyan değerleri

Güç Elektroniği, elektrik mühendisliğinde hızlı bir şekilde gelişen bir alandır ve teknoloji geniş bir spektrumu kapsar. Bu nedenle, önemli olan, *Elektrik Motorlarının Hız Kontrolü için kullanılan Konvertörlerdeki* bileşenler olacaktır. Güç kaynakları, yüksek frekanslı jeneratörler, vb. gibi diğer uygulamalar için kullanılan bileşenler, ayrıntılı olarak ele alınmayacaktır.

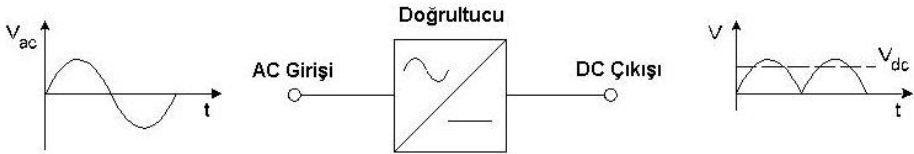
5.2 Tanımlar

Aşağıdaki tanımlar, *Güç Elektroniği* alanında kullanılan ortak terimlerdir:

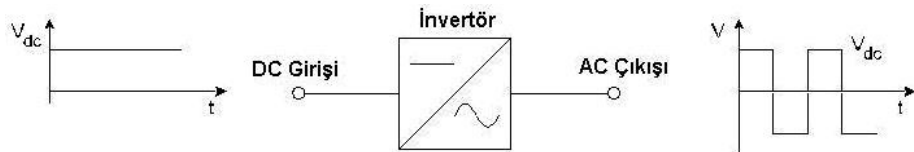
- **Güç Elektroniği Bileşenleri.** Bunlar, bir konvertörün güç devresinde kullanılan diyot, tristör, transistör, vb. gibi yarı iletken cihazlardır. Güç Elektroniğinde, bu cihazlar, lineer-olmayan anahtarlama modunda (açık/kapalı mod) kullanılmakta, lineer yükselteç olarak kullanılmamaktadır.
- **Güç Elektroniği Konvertörü** (ya da kısaca “Konvertör”). Elektrik güç sisteminin bir veya daha fazla karakteristiğinin dönüşümünü gerçekleştiren güç elektroniği bileşenlerinin bir birleşimidir. Örneğin, konvertör aşağıdaki değişimleri ve dönüşümleri gerçekleştirmek için kullanılabilir:
 - AC'den DC'ye
 - DC'den AC'ye
 - Frekans
 - Gerilim seviyesi
 - Akım seviyesi
 - Faz sayısı

Farklı konvertör tiplerini göstermek için aşağıdaki grafik sembolleri kullanılır.

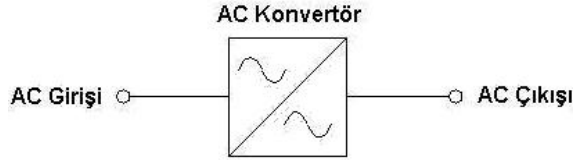
- **Doğrultucu.** AC'yi DC'ye dönüştüren özel bir konvertör tipidir.



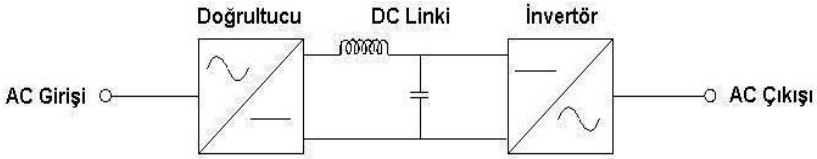
- **İnvertör.** DC'yi AC'ye dönüştüren özel bir konvertör tipidir.



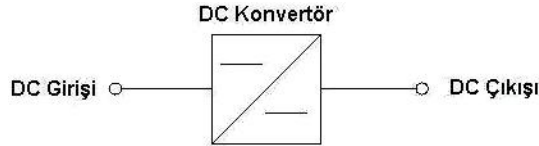
- **AC konvertör.** Bir gerilim ve frekanstaki AC'yi, genelde değişken olan başka bir gerilimdeki ve frekanstaki AC'ye dönüştüren özel bir konvertör tipidir. *AC Frekans konvertörü*, özel bir AC konvertör tipidir.



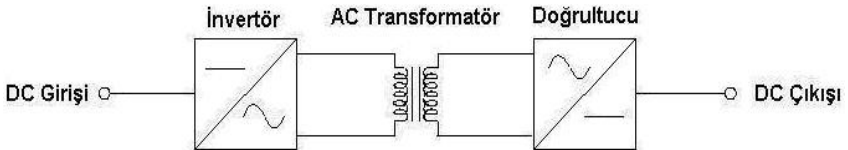
- **Bir güç elektroniği AC konvertöründe**, bir miktar düzgünleştirme ile bir DC linkin kullanılması yaygındır.



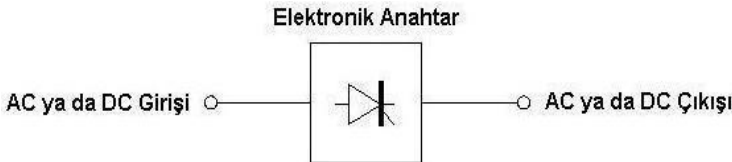
- **DC konvertör.** Bir gerilimdeki DC'yi, başka bir gerilimdeki DC'ye dönüştüren konvertördür.



- DC konvertörde, transformatör vasıtasıyla galvanik yalıtımlı ara seviye bir AC linkinin kullanılması yaygındır.



- **Elektronik Anahtar.** Bir AC ya da DC devreyi elektronik olarak bağlayan ya da ayıran bir anahtardır ve sık sık FAAL ya da FAAL OLMAYAN hale getirilebilir. Genelde sadece tek bir yönde iletme izin verilir.



Aşağıdaki bileşenler, *güç elektroniği konvertörlerinde* yaygın olarak elektronik anahtar olarak kullanılan bileşenlerdir. Yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler, bu güç elektroniği bileşenlerinin daha

küçük, daha güvenilir, daha etkin (daha düşük seviyede kayıplar), daha ucuz ve daha yüksek gerilimlerde, akımlarda ve frekanslarda çalışabilir hale gelmesini sağlamıştır.

Bu bileşenlerin ideal çalışma ilkeleri, basit matematiksel ifadeler cinsinden tanımlanabilir.

- Güç Diyotları
- Güç Tristörleri
- Kapı Sinyalli Tristörler (GTO) [*:Gate turn-off thyristor*]
- MOS Kontrollü Tristörler (MCT)
- Bipolar Jonksiyonlu Güç Transistörleri (BJT) [*:Power bipolar junction transistor*]
- Alan Etkili Transistörler (FET, MOSFET) [*:Field effect transistor*]
- Yalıtımlı Kapılı Bipolar Güç Transistörü (IGBT) [*:Integrated gate bipolar transistor*]
- Dirençler (direnebilirlik sağlar)
- Reaktörler ya da Şoklar (indüktans sağlar)
- Kondansatörler (kapasitans sağlar)

Güç elektroniği devrelerinde, yarı iletken cihazlar genelde *iki durumlu* modda çalıştırılır, bu da bu cihazların *iki kararlı durumdan birinde* çalıştırıldığı anlamına gelir:

- Bloklama Modu: tamamen FAAL OLMAYAN HALE GETİRİLİR.
 - Bileşen üzerindeki gerilim *Yüksektir*.
 - Bileşenden geçen akım *Düşüktür* (sadece kaçak akım)
- İletim Modu: tamamen FAAL HALE GETİRİLİR.
 - Bileşen üzerindeki gerilim *Düşüktür*.
 - Bileşenden geçen akım *Yüksektir*.

Diyotlar ve Tristörler, *yapısal olarak iki durumludur ancak transistörler iki durumlu değildir*. Transistörler, iki durumlu cihazlar gibi davranmak için tamamen FAAL OLARAK kutuplanmalıdır.

5.3 Güç diyotları

Güç Diyodu, nispeten büyük tek bir P-N jonksiyonuna 2-terminalli yarı iletken bir cihazdır. Dayanıklı bir bakır tabana bağlı 2-katmanlı silikon puldan oluşur. Baz, ısı alıcı, mahfazaya ilişkin bir destek ve ayrıca diyodun elektriksel terminallerinden biri gibi davranır. Silikon pulun diğer yüzeyi, diğer elektriksel terminale bağlanır. Mahfaza, silisyum pulun hava ile temasını

keser ve diyodun iki terminali arasında yeterli yalıtım sağlar. Diyodun iki terminali, *Anot (A)* ve *Katot (K)* olarak adlandırılır. Bu isimler, Valflerin yaygın olarak kullanıldığı günlerden kalma isimlerdir.

Simge



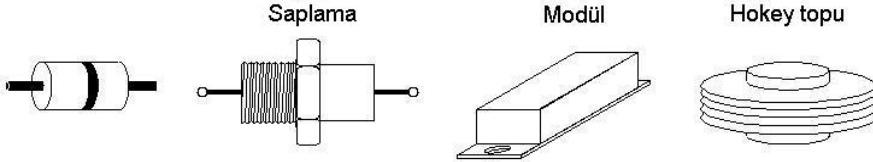
İdeal

İleri Yönde İletimde: Direnç yok.

Ters Yönde Bloklamada: Kayıp yok.

FAAL HALE GETİRME/FAAL OLMAYAN HALE GETİRME SÜRESİ: Kısa

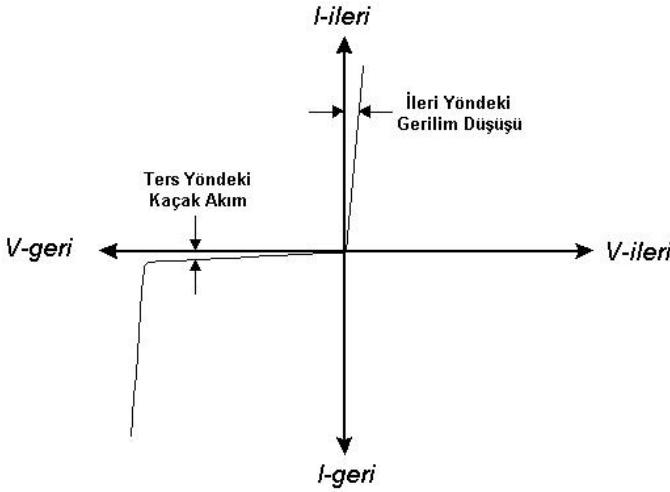
Diyotlar için birçok farklı mekanik tasarım yaygın olarak kullanılmaktadır, bazıları aşağıda gösterilmektedir. Birkaç amper beyan değerine sahip güç diyotları, genelde saplamayla montelidir ancak çok sayıda diyodun yalıtımlı bir modüle konması yaygın (daha ekonomik) hale gelmektedir. Tam dalgalı doğrultucular, 6-darbeli diyotlu köprüler, vb. buna ilişkin örneklerdir.



Şekil 5.1 – Diyotların tipik mekanik yapısı

Bu diyot modülü tipinin baz kısmı, genelde elektriksel olarak aktif değildir, bu nedenle, konvertörün ısı alıcısına doğrudan monte edilebilir. Yüksek akım beyan değerlerine sahip daha büyük birimler, genelde disk tipindedir, bu da, daha iyi soğutma sağlamak için mahfaza ile ısı alıcı arasında daha büyük bir temas alanı sağlar.

Anot, katoda göre pozitif olduğunda, diyot *ileri yönde kutuplanmış* olur ve diyot, akım iletir. Anot, katoda göre negatif olduğunda, diyodun *ters yönde kutuplanmış* olduğu söylenir ve akım akışı bloklanır. Güç diyodunun tipik karakteristiği, aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 5.2 – Güç diyodunun tipik karakteristiği

Maalesef, güç diyotları çeşitli kısıtlamalara sahiptir:

- *İletim modunda*, diyot *ileri yönde kutuplanmış* olduğunda:
 - Gerçek diyotlarda direnç yoktur ve iletim sırasında *ileri yönde* 0,5 volt ilâ 1,0 volt *gerilim düşüşü* meydana gelir.
 - Sonuç olarak, aşırı ısınma olmaksızın akabilen maksimum akıma ilişkin bir sınır değeri mevcuttur. Bu, diyodun maksimum beyan akımıdır.
- *Bloklama modunda*, diyot *ters yönde kutuplanmıştır*.
 - Düşük seviyede kaçak akımı mevcuttur.
 - Ters yönde delinme olmadan ve ters yönde akım akmaya başlamadan önce, diyodun dayanabileceği gerilime ilişkin bir sınır değeri mevcuttur. Uygulamadaki değer en az iki katında ters yönde gerilim sınır değerine sahip diyotların seçilmesi yaygın bir uygulamadır.
- Bloklama modundan iletim moduna ve iletim modundan bloklama moduna *anahtarlama süresi*, sonlu bir süredir.

Güç diyodu, içinde kullanılacağı elektriksel ortama uygun beyan değerlere sahip olmalıdır. Bir konvertör uygulaması için Güç Diyodu seçerken, değerlendirilmesi gereken en önemli faktörler şunlardır:

- *İleri Yöndeki Akım Beyan Değeri*: Akım beyan değeri, belirli bir dalga biçimini esas alır ve sadece bir kılavuz olarak kabul edilmelidir. Gerçek seçim, gerçek dalga biçimi, yük çevrimi ve soğutma şartları hesaba katılarak diyottaki toplam güç kaybını esas almalıdır.

- **İleri Yöndeki Gerilim Düşüşü:** Bu, diyot içeren paralel devreler arasında akım paylaşırma etkisine sahiptir.
- **İleri Yöndeki Darbe Akımı:** Kapasite (akım artış hızı, di/dt)
- **Ters Yöndeki Gerilim Beyan Değeri:** (bazen PIV olarak adlandırılır – ters yöndeki tepe gerilimi)
- **Ters Yöndeki Toparlanma Akımı di/dt :** Diyot devresindeki anahtarlama geçişleri dikkate alındığında, bu akım, hesaba katılmalıdır.
- **I^2t beyan değeri:** Bu, kısa devre olduğunda kalıcı hasar olmaksızın diyodun kaldırabileceği enerji miktarının bir ölçüsüdür. Bu, diyodu korumak amacıyla hızlı sigortaların seçilmesine ilişkin bir kılavuz niteliğindedir. Açık bir şekilde, I^2t değeri diyodunkinden daha düşük olan koruyucu bir sigorta seçilmelidir.

Uygulama şartlarına bağlı olarak, çeşitli diyot tipleri mevcuttur:

- **Schottky diyotları**

Bu diyotlar, düşük çıkışlı gerilim devreleri için (tipik olarak 0,4 volt gibi) ileri yöndeki gerilim düşüşünün düşük seviyede olmasının gerektiği durumlarda kullanılır. Bu diyotlar, 50 ilâ 100 volt arasında sınırlı bir bloklama gerilimine sahiptir.

- **Hızlı toparlamalı diyotlar [*fast recovery diodes*]**

Bu diyotlar, kısa toparlanma sürelerinin gerekli olduğu devrelerde kullanılmak üzere tasarlanmıştır, örneğin, bu diyotlar, yüksek frekanslı devrelerdeki kontrol edilebilir anahtarlarla birlikte kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Bu gibi diyotların toparlanma süresi (t_{RR}) birkaç mikrosaniyeden daha kısadır.

- **Hat frekansı diyotları**

Bu diyotların faal-durumdaki gerilimi, doğrultucu köprü uygulamalarında hızlı bir şekilde faal hale gelmelerini sağlamaya yetecek kadar düşük seviyede olacak şekilde tasarlanmıştır.

Maalesef, toparlanma süresi (t_{RR}) oldukça uzundur ancak hat-frekansı doğrultucu uygulamaları için bu süre kabul edilebilir seviyededir. Bu diyotlar, birkaç kV'lık bloklama gerilim beyan değerine ve birkaç yüz kAmp'lik akım beyan değerine sahip olabilir. İlâve olarak, bu diyotlar, yüksek gerilim ya da akım şartlarını sağlamak için seri ya da paralel olarak bağlanabilir.

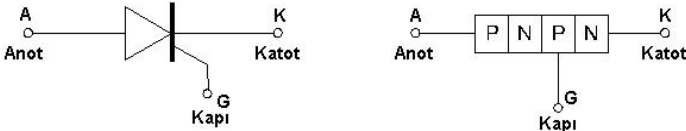
5.4 Güç tristörleri

Tristörler, genelde SCR (Silikon Kontrollü Doğrultucular) olarak adlandırılır. Bu, 1957 yılı civarında ilk olarak General Electric (USA) tarafından geliştirilmiş cihaza verilen isimdi. Bu isim, hiçbir zaman evrensel olarak kabul edilmiş ve kullanılmış bir isim olmamıştır. Hem IEC hem de ANSI/IEEE tarafından kabul edilen isim, *Ters Yönde Bloklama Triyotlu Tristör* ya da kısaca *Tristördür*. *Tristör* ismi, rejeneratif anahtarlama karakteristiklerine sahip bir yarı iletken ailesine verilen genel bir isimdir. Tristör ailesinde Güç Tristörü, Kapı Sinyalli Tristör (GTO), Alan Kontrollü Tristör (FCT), Triak, vb. gibi çok sayıda cihaz vardır.

Bir tristör, 3 P-N jonksiyonuna sahip 4-katmanlı silikon puldan oluşur. Tristör, *Anot* (A) ve *Katot* (K) olarak adlandırılan iki güç terminaline ve *Kapı* (G) olarak adlandırılan üçüncü bir kontrol terminaline sahiptir. Yüksek gerilimli, yüksek güçlü tristörler bazen yardımcı katot olarak adlandırılan ve tetikleme devresiyle bağlantı sağlamak için kullanılan dördüncü bir terminale de sahiptir. Bu, ana devrenin kapı devresini etkilemesini önler.

Tristör, hem fiziksel görünüm hem de yapı itibarıyla güç diyoduna çok benzerdir. Tek fark, tristörü iletim moduna tetiklemek için gerekli olan kapı terminalidir.

Simge



İdeal

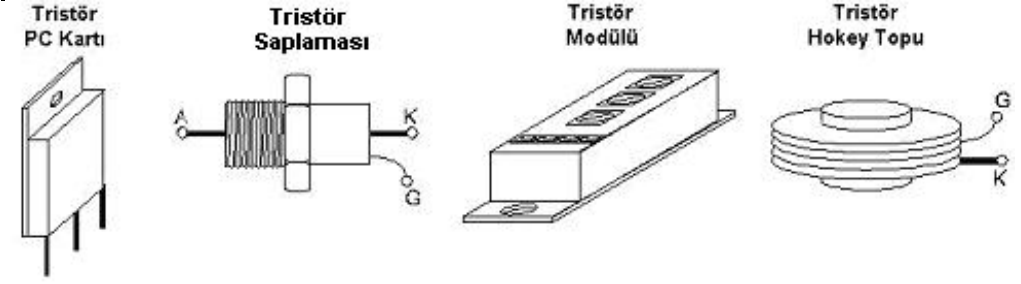
İleri Yönde İletimde: Direnç yok

İleri Yönde Bloklamada: Kayıp yok (kaçak akımı yok)

Ters Yönde Bloklamada: Kayıp yok (kaçak akımı yok)

Faal hale getirme/faal olmayan hale getirme süresi: Çok kısa

Güç diyotlarında olduğu gibi, daha küçük birimler, genelde saplamayla montelidir ancak 2 veya daha fazla tristörün, tristör modülüne konması yaygın hale gelmektedir. Bu tip bir paketin tabanı elektrikselsel olarak aktif değildir, bu nedenle, bu paket, bir konvertörün ısı alıcısına doğrudan monte edilebilir. Daha iyi soğutma sağlamak için, büyük tristör birimleri genelde disk tipindedir.



Şekil 5.3 – Tristörlerin tipik mekanik yapısı

Motorların hız kontrolü için kullanılan tristörlerin çoğu hava soğutmalıdır, daha küçük birimler, doğal konveksiyonel soğutma için ısı alıcısını ve daha büyük birimler, cebri soğutma için fanı kullanmaktadır.

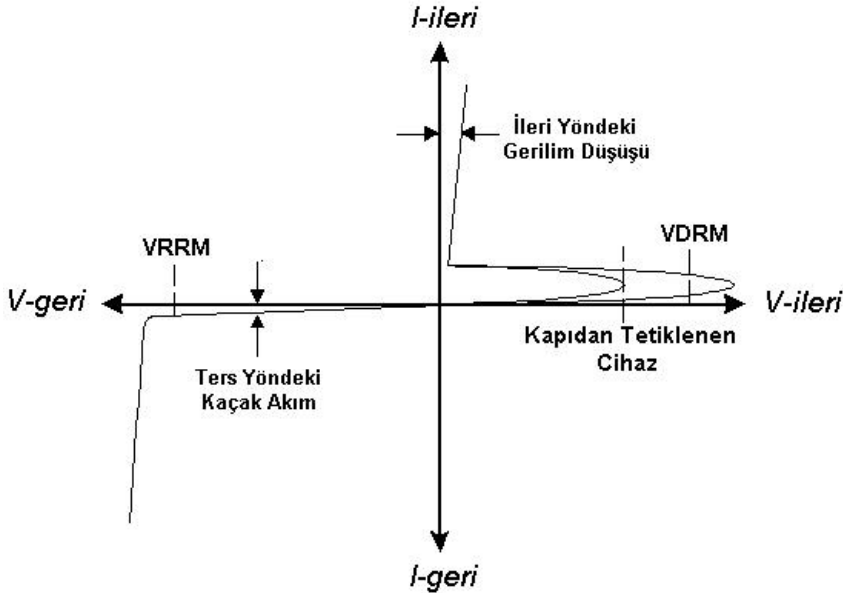
Tristör, uygun bir kapı darbesiyle bloklama durumundan (yüksek gerilim, alçak akım) iletim durumuna (alçak gerilim, yüksek akım) anahtarlanabilen, *kontrol edilebilen bir cihazdır*. Kapı terminaline pozitif bir dış darbe uygulanana kadar ileri yöndeki iletim bloklanır. Bir tristör, kapı vasıtasıyla kapatılamaz. İleri yöndeki iletim sırasında, tristörün davranışı, bir güç diyodunun davranışına benzer ve ayrıca, 1 ilâ 3 volt arasında ileri yönde bir gerilim düşüşüne de sahiptir. Diyoda benzer şekilde, ters kutuplanmış yönde iletim bloklanır. Tristörün tipik karakteristiği, Şekil 5.4'te gösterilmektedir.

Tristörün faal hale getirilmesini ya da *ileri yönde iletim* gerçekleştirmesini sağlamak için çeşitli yollar mevcuttur:

- **Pozitif Akım Kapı Darbesi:** Bu, tristörün normal iletim sağlama yoludur. Kapı darbesi, tristörün büyüklüğüne bağlı olarak uygun bir büyüklüğe ve süreye sahip olmalıdır.
- **İleri Yönde Yüksek Seviyede Gerilim:** Anot ile katot arasındaki ileri yönde aşırı yüksek seviyedeki gerilim, faal hale getirme sürecini tetiklemeye yetecek kadar kaçak akım üretebilir.
- **İleri Yöndeki Gerilimde Yüksek Seviyede Artış Hızı, dV/dt :** Yüksek bir dV/dt değeri, faal hale getirme sürecini tetiklemeye yetecek kadar kaçak akımı üretebilir.
- **Aşırı sıcaklık:** Kaçak akımının büyüklüğü sıcaklık arttıkça artar, bu nedenle, sıcaklığın yüksek seviyede olması, yukarıda bahsedilen sorunların büyümesine neden olabilir.

Tristör, içinde kullanıldığı elektriksel ortama uygun olmalıdır. Bir konvertör uygulaması için tristör seçilirken, değerlendirilmesi gereken en önemli faktörler aşağıdadır:

- Diyotlar için belirtilenlerle aynı faktörler
- Tristördeki *güç kayıpları*; iletim kayıplarını, anahtarlama kayıplarını (faal hale getirme ve faal olmayan hale getirme), kapı güç kayıpları, ileri yöndeki durum kayıplarını ve ters yöndeki bloklama kayıplarını kapsar. Veri föyü, genelde çeşitli dalga biçimlerine ilişkin güç kayıplarının tahmin edilmesi için kullanılan eğrileri sağlar.
- **İleri Yöndeki Tepe Gerilimi (PFV):** Bu, cihazın faal hale gelmeden ve zarar görmeden dayanması gereken ileri yöndeki anot gerilimidir.
- **İleri yöndeki gerilimin artış hızı dV/dt ,** aşırı yüksek seviyede olmamalıdır, tipik olarak 200 volt/ μs 'den daha düşük seviyede olmalıdır. Tristörü korumak için, genelde paralel bir RC bastırma devresi gereklidir.



Şekil 5.4 – Tristörün tipik karakteristiği

- **Anot akımının artış hızı di/dt ,** aşırı yüksek olmamalıdır, tipik olarak 100 Amp/ μs 'den daha düşük seviyede olmalıdır. Akım, başlangıçta kapı civarında yoğunlaşmıştır ve iletken bölgeye yayılması belirli bir süre alır.

Artış hızı çok yüksekse, lokal aşırı ısınma tristöre zarar verebilir. Devre indüktansı, genelde akımın artış hızını sınırlamak için gereklidir.

- **Tutma akımı [*holding current*].** İleri yönde iletim yapmak amacıyla tristör için gereken ileri yöndeki minimum akım.
- **Kilitleme akımı [*latching current*].** Tristörün başlangıçta kilitlenmesine neden olan ileri yöndeki minimum akım. Bu, genelde tutma akımından daha büyüktür ve kapı darbesi nispeten kısa olabileceği için önemlidir.
- **Kapı tetikleme şartları.** Nispeten küçük bir kapı darbesi, tristörü faal hale getirecektir. Tipik olarak 10 μ s için 100 mA'lık akım değeri eşik değeridir. Uygulamada, optimum tristör çalışması sağlamak için daha yüksek bir değer kullanılmalıdır. Ayrıca, faal hale getirme süresi, kapı darbesinin büyüklüğünden etkilenir.

Tristör, ters yönde kutuplanmış olduğunda ve/veya ileri yöndeki akım, tutma akımının altına düştüğünde, **tristör, faal olmayan hale getirilir**. Bu, güç devresinde harici olarak kontrol edilmelidir.

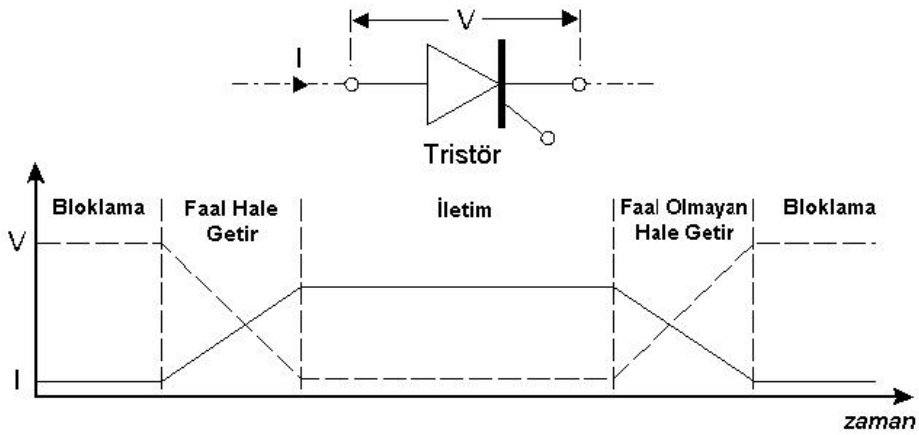
5.5 Komütasyon

Bloklamadan iletme ve iletimden bloklamaya geçiş süreci *Komütasyon* olarak ve bir bileşenin *faal/faal olmayan* hale dönüştürülme süresi ise *komütasyon süresi* olarak adlandırılır. Komütasyon sırasında, bileşen, devre şartlarındaki değişikliklerden dolayı *elektriksel zorlamaya* ve kayıplardan dolayı termal zorlamaya maruz kalır.

Bu kayıplar, bileşende ısı üretir ve ayrıca yalıtım ve akım yollarında zorlamaya neden olur:

- **Bloklama Modu:** Bu modda kayıplar genelde düşük seviyededir ve bu kayıplar, temelde cihazdan geçen kaçak akımdan kaynaklanır.
- **İletim Modu:** Bu modda kayıplar nispeten daha yüksek seviyededir ve bu kayıplar, temelde bileşen üzerindeki akımdan ve ileri yöndeki gerilim düşüşünden kaynaklanır (I^2R kayıpları).
- **Komütasyon Sırasında,** kayıplar, kapıyı tetiklemek için kontrol devresinde ve bileşende bulunan geçiş geriliminden ve akımından kaynaklanır.

Şekil 5.5'te, hem faal hem de faal olmayan periyotlardaki tristör komütasyonu gösterilmektedir.



Şekil 5.5 – Elektronik bir anahtarın basit komütasyonu

Modern PWM invertörlerde, daha hızlı tepkiler ya da daha iyi dalga-biçimine sahip bir çıkış elde etmek için, elektronik anahtarların daha yüksek anahtarlama frekanslarında kullanılmasına ilişkin bir eğilim vardır. Maalesef, komütasyon sayısının artması, hem tetikleme devrelerindeki hem de bileşenlerin güç devrelerindeki kayıpların artmasına neden olur.

Aşağıdaki karakteristiklere sahip cihazlar kullanılarak kayıplar azaltılabilir:

- Bloklama sırasında düşük seviyede kaçak akım
- İletim sırasında ileri yönde düşük seviyede gerilim düşüşü
- Yüksek anahtarlama hızı, kısa komütasyon süresi
- Kontrol devresinde düşük seviyede tetikleme kayıpları

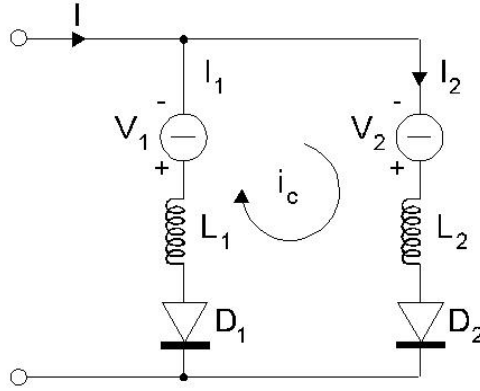
5.6 Güç elektroniği doğrultucuları (AC/DC konvertörleri)

AC Frekans Konvertörünün ilk aşaması, 3-fazlı bir AC güç kaynağının düzgün bir DC Gerilimine ve akımına dönüştürülmesi sürecidir. Diyot ve tristör gibi iki-durumlu basit cihazlar, bu amaç için etkin bir şekilde kullanılabilir.

Başlangıçta, güç elektroniği devreleri analiz edilirken, diyotlar ve tristörler gibi iki durumlu yarı iletken cihazların, kaybı olmayan ve ileri yöndeki gerilim düşüşü düşük seviyede olan *ideal anahtarlar* oldukları varsayılacaktır. Reaktörlerin, Kondansatörlerin, Dirençlerin ve diğer devre bileşenlerinin, ideal doğrusal karakteristiklere sahip olduğu ve kayıplarının olmadığı varsayılacaktır. Bir devrenin çalışma ilkesi bir kere anlaşıldıktan sonra, güç elektroniği devresinin performansını modifiye etmek için bileşenlerle ilgili hatalar açıklanabilir.

Güç elektroniğinde, herhangi bir konvertörün çalışması, *anahtarların* sıra ile faal ve faal olmayan hale getirilmesine bağlıdır. FAAL haldeyken anahtardan akım geçer ve FAAL OLMAYAN haldeyken akım bloklanır. Yukarıda belirtilmiş olduğu gibi, *komütasyon* sözcüğü, FAAL OLMAYAN hale gelen bir anahtardan gelen akımın, FAAL hale gelen bir anahtara iletilmesi olarak tanımlanır.

Diyotlu doğrultucu devresinde, diyot FAAL hale gelir ve üzerinde *ileri yönde bir gerilim* olduğunda (başka bir deyişle, üzerindeki ileri yöndeki gerilim pozitif olduğunda), akım iletmeye başlar. Bu süreç, genelde başka bir diyottaki ileri yöndeki gerilimin negatif hale gelmesine neden olur, bu diyot faal olmayan hale gelir ve akım iletimi durur. Tristörlü doğrultucu devresinde, anahtarlar, faal ve faal olmayan hale gelmek için ilâve olarak bir kapı sinyaline ihtiyaç duyar.



Şekil 5.6 – Diyot D1'den Diyot D2'ye komütasyonu gösteren basit devre

Komütasyonu etkileyen faktörler, Şekil 5.6'daki idealleştirilmiş diyot devresinde gösterilebilir, şekilde her biri kendi değişken DC gerilim kaynağına ve devre indüktansına sahip iki devre kolu gösterilmektedir. Başlangıçta, devrede I akımının akmakta olduğunu ve V_1 geriliminin V_2 geriliminden daha büyük olduğunu varsayın. V_1 , V_2 'den daha büyük olduğu için, D_1 diyodu ileri yönde pozitif bir gerilime sahiptir ve devre indüktansı L_1 üzerinden I_1 akımını iletir. D_2 diyodu ileri yönde negatif bir gerilime sahiptir, bloklama yapar ve akım taşımaz.

Sonuç olarak, t_1 anında:

$$I_1 = I$$

$$I_2 = 0$$

V_2 'nin V_1 'den daha büyük bir değere ayarlandığını varsayın, D_2 diyodu üzerinde mevcut ileri yöndeki gerilim pozitif hale gelir ve daha sonra diyot faal hale gelmeye başlar. Ancak, L_1 devre indüktansı, I_1

akımının anlık olarak değişmesini önler, bu nedenle D_1 diyodu hemen kapanmayacaktır. Böylece, hem D_1 hem de D_2 diyodu, *komütasyon süresi* (t_c) olarak adlandırılan bir üst üste binme periyodu boyunca FAAL HALDE kalır.

Her iki diyot da faal halde olduğunda, her iki kolu da kapsayan kapalı bir devre oluşur. *Komütasyon gerilimi* olarak adlandırılan etkin devre gerilimi $V_c = (V_2 - V_1)$, komütasyon akımı olarak adlandırılan, $L_c = (L_1 + L_2)$ değerinde toplam devre indüktansına sahip iki kol üzerinde dolaşan bir **ic** akımını oluşturur.

Bu ideal devrede, diyotlar üzerindeki gerilim düşüşü ve devre direnci ihmal edilmiştir. Temel indüktif devre teorisine göre, **ic** akımı, devre indüktansına bağlı bir hızda zamana bağlı olarak artar. Komütasyon akımının büyüklüğü, aşağıdaki denklemlerden hesaplanabilir.

$$(V_2 - V_1) = (L_1 + L_2) \frac{di_c}{dt}$$

$$V_c = L_c \frac{di_c}{dt}$$

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{V_c}{L_c}$$

Komütasyon t_1 anında başlar ve t_2 anında biterse, komütasyon sırasında herhangi bir t anındaki komütasyon akımının (I_c) büyüklüğü, yukarıdaki denklemin t_1 'den t 'ye kadar integrali ile hesaplanabilir.

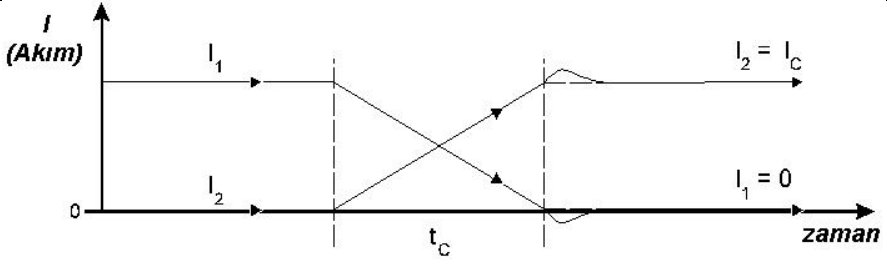
$$I_c = \frac{1}{L_c} \int V_c dt$$

Komütasyon periyodu sırasında:

- Devredeki toplam akımın sabit kaldığı varsayılır.
 $I = (I_1 + I_2)$ *sabit*

Dolaşan komütasyon akımı arttığında:

- Diyottan geçen faal hale gelme akımı (I_2) *artar*
 $I_2 = I_c$ *artar*
- Diyottan geçen faal olmayan hale gelme akımı (I_1) *azalır*
 $I_1 = I - I_c$ *azalır*



Şekil 5.7 – Komütasyon sırasında her bir koldaki akım

Bu özel örnek için, kısa komütasyon periyodu sırasında V_c komütasyon geriliminin sabit olduğu varsayılabilir. t anında, integral işleminin sonucu olarak zamanla birlikte doğrusal olarak artan aşağıdaki I_c değeri elde edilir.

$$I_c = \frac{V_c}{L_c} (t - t_1)$$

I_c , t_2 anında I yük akımına eşit bir değere çıktığında, tüm akım, Kol 1'den Kol 2'ye iletilmiştir ve kapanan anahtardan geçen akım sıfıra düşmüştür. Böylece komütasyon sona erer.

Sonuç olarak, t_2 anında

$$I_1 = 0$$

$$I_2 = I_c = I$$

$t = t_2$ olduğunda komütasyonun sonunda, yukarıdaki denklemde I_c yerine I yazılarak, akımı bir devre kolundan diğerine iletmek için gerekli süre (komütasyon süresi) hesaplanabilir.

$$I = \frac{V_c (t_2 - t_1)}{L_c}$$

$$I = \frac{V_c t_c}{L_c}$$

$$t_c = \frac{I L_c}{V_c}$$

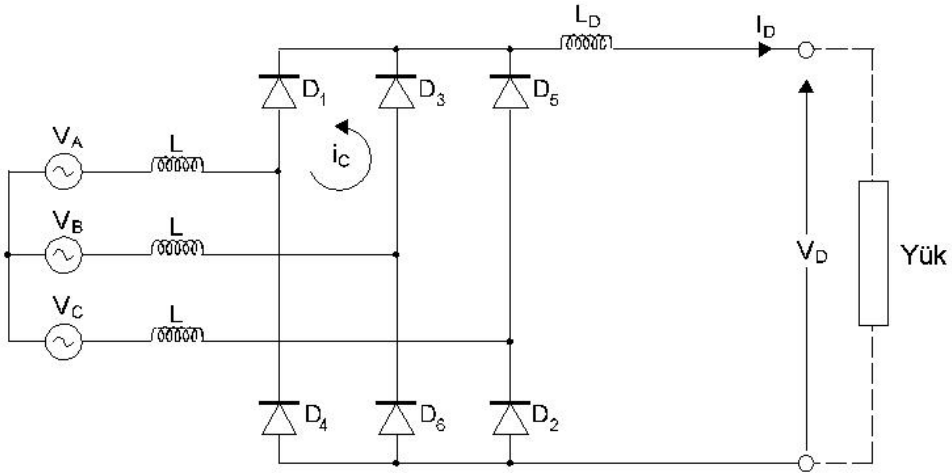
Bu denklemden görülebileceği gibi, komütasyon süresi (t_c) toplam devre indüktansına ($L_1 + L_2$) ve komütasyon gerilimine bağlıdır. Bundan şu sonuçları çıkarabiliriz:

- Devre indüktansının büyük olması, komütasyon süresinin uzun olmasına neden olacaktır.
- Komütasyon geriliminin büyük olması, komütasyon süresinin kısa olmasını sağlayacaktır.

Uygulamada, bu ideal durumdan bazı sapmalar mevcuttur:

- *Diyotlar* ideal değildir ve ileri yöndeki gerilim negatif hale geldiği anda, hemen kapanmaz. Bir *diyot* iletim yaparken, ters gerilim uygulandığında, Şekil 5.7’de gösterildiği gibi birkaç mikrosaniye boyunca bir miktar ters akım akabilir. I_1 akımı, yeniden sıfır olmadan önce sıfır değerini geçip negatif bir değere düşmeye devam eder. Bu, bloklama sağlanmadan önce PN jonksiyonundan çıkarılması gereken serbest yüklerden kaynaklanmaktadır.
- Komütasyon süresi çok kısa bile olsa, AC ile beslenen Doğrultucu Köprüsünün komütasyon gerilimi komütasyon periyodu boyunca sabit kalmaz, biraz değişir. Artan bir komütasyon gerilimi, komütasyon süresini kısaltabilir.

Uygulamadaki güç elektroniği konvertör devrelerinde, komütasyon, yukarıda belirtilenle aynı temel sırayı izler. Aşağıdaki şekilde, 3-fazlı AC akımlarını (I_A , I_B ve I_C) bir DC akımına (I_D) dönüştürmek için kullanılan 6-darbeli tipik bir doğrultucu köprü devresi gösterilmektedir.



Şekil 5.8 – 6-darbeli diyotlu köprüyle 3-fazlı komütasyon

Bu devre tipinin analiz edilmesi nispeten kolaydır çünkü herhangi bir anda 6 diyodun sadece 2 tanesi akım iletir. İdealleştirilmiş komütasyon devresi, kolay bir şekilde tanımlanabilir. Bu örnekte, pozitif grupta Diyot D1’den Diyot D3’e komütasyonun gerçekleştiği ve negatif grupta Diyot D2’nin iletim yaptığı varsayılmaktadır.

Güç elektroniği köprü devrelerinde, D1 ilâ D6 arasındaki diyotların AÇILMA ve KAPATILMA sırasına göre numaralandırılması geleneksel bir uygulamadır. V_A en yüksek ve V_C en düşük gerilim olduğunda, D1 ve D2 iletim yapmaktadır.

Şekil 5.6'daki idealleştirilmiş devreye benzer şekilde, V_B , V_A 'yı geçtiğinde, Diyot D3 faal hale gelir ve komütasyon, akımı Diyot D1'den Diyot D3'e iletir. Daha önce olduğu gibi, komütasyon süresi devre indüktansına (L) ve komütasyon gerilimine ($V_B - V_A$) bağlıdır.

Yukarıda Şekil 5.8'deki 6-darbeli diyotlu doğrultucu köprü örneğinden görülebileceği gibi, *komütasyon genelde dış değişiklikler tarafından başlatılır*. Bu durumda, komütasyon, 3-fazlı besleme hattı gerilimleri tarafından kontrol edilir. Diğer uygulamalarda, komütasyon, konvertörün ve uygulamanın tipine bağlı olarak başka faktörler tarafından başlatılabilir ya da kontrol edilebilir.

Bu nedenle, konvertörler, genelde haberleşmeyi başlatan dış değişiklik kaynağına göre sınıflandırılır:

- Yukarıdaki örnekte, konvertör, *hat anahtarlama* bir konvertördür çünkü komütasyon geriliminin kaynağı elektrik şebeke hattındadır.
- Komütasyon geriliminin kaynağı konvertörün kendisi ise, konvertör, *kendinden-anahtarlama*lıdır. Kapı-anahtarlama konvertörler, buna ilişkin tipik örneklerdir.

5.6.1 Hat anahtarlama diyotlu doğrultucu köprüsü

Güç elektroniğinde yaygın olarak kullanılan devrelerden biri, *köprü şeklinde bağlanmış 6 diyottan oluşan 3-fazlı hat anahtarlama 6-darbeli doğrultucu köprüdür*. Tek-fazlı köprüler burada ele alınmayacaktır çünkü çalışma ilkeleri, 3-fazlı köprünün basitleştirilmiş halidir.

Çeşitli konvertör tiplerinin analiz edilmesinde, prosedür, başlangıç olarak şartların ve bileşenlerin ideal olduğunun varsayılmasıdır. İlkeler açıklandıktan sonra, ideal durumdan sapmalar da açıklanacaktır.

Aşağıdaki *ideal* varsayımlar yapılmaktadır:

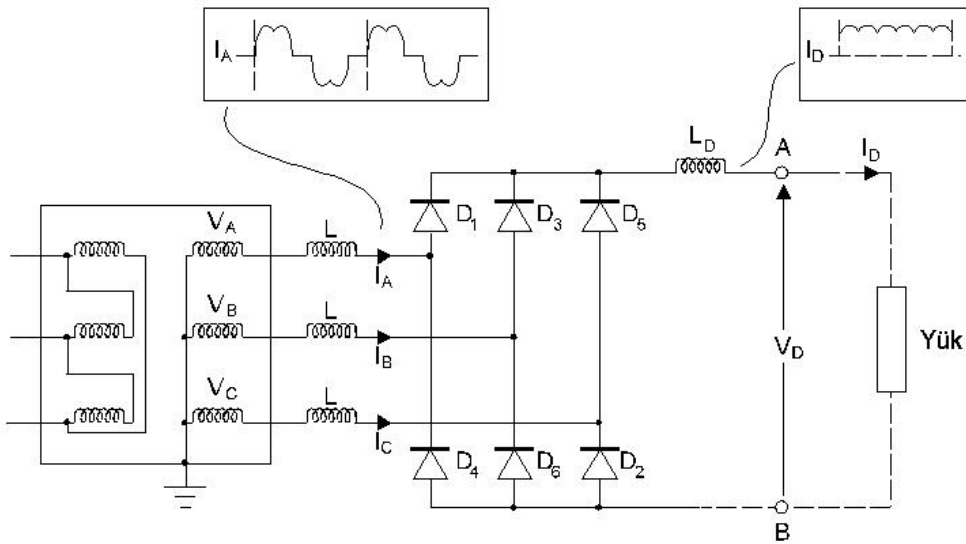
- Besleme gerilimleri '*güçlüdür*' ve tamamen sinüs biçimlidir.
- Komütasyonlar anlıktır ve toparlanma sorunları yoktur.
- Yük akımları tamamen düzgündür.
- Transformatörler ve diğer hat bileşenleri lineer ve idealdir.
- Güç elektroniği anahtarlarında gerilim düşüşü meydana gelmez.

Bu varsayımlar, devrelerin daha iyi bir şekilde anlaşılabilmesi ve akımların, gerilimlerin, komütasyon sürelerinin tahmin edilmesi için gereklidir. Bundan sonra, ideal durumla uygulama arasındaki farkları anlamak ve bu farkları ortadan kaldırmak için, konvertörlerin

performansını etkileyen ve ideal durumdan sapmalarına neden olan sınırlayıcı şartlar incelenecektir.

Diyotlu köprüde, diyotlar, harici bir kontrol devresinden kontrol edilmez. Bunun yerine, komütasyon, besleme hat gerilimlerinde meydana gelen değişiklikler tarafından dışarıdan başlatılır, bu nedenle bu cihazın ismi *Hat Anahtarlama Doğrultucudur*.

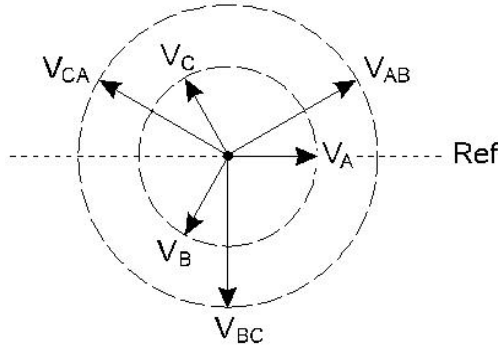
Alışıl gelmiş geleneğe göre, diyetler, AÇILMA ve KAPATILMA sıralarına göre D1 ilâ D6 şeklinde işaretlenmiştir. Bu sıra, besleme hat gerilim sırasını takip eder.



Şekil 5.9 – Hat anahtarlama diyotlu doğrultucu köprüsü

3-fazlı besleme gerilimleri, $A - B - C$ sırasında maksimum değerine yükselen 120° aralıklı 3 tane sinüs biçimli gerilim dalgasından oluşur. Alışlagelmiş geleneğe göre, faz-nötr gerilimleri V_A , V_B ve V_C ile ve faz-faz gerilimleri V_{AB} , V_{BC} ve V_{CA} vb. ile gösterilir.

Bu gerilimler, genelde grafiksel olarak, saniyede 50 kere saatin-tersi yönünde dönen bir vektör diyagramı ile gösterilir. Bu gerilimlerin, nispi konumlarının ve büyüklüklerinin vektör diyagramı aşağıda gösterilmektedir. Besleme geriliminin sinüs biçimli gerilim dalga biçimleri, vektör diyagramının dönüşünden elde edilebilir.



Şekil 5.10 – 3-fazlı elektrik şebeke gerilimlerinin vektör diyagramı

Konvertörün çıkışı, doğrultulmuş DC gerilimidir (V_D), bu gerilim, doğrultucunun DC tarafındaki yükten geçen bir DC akımı (I_D) üretir. İdeal devrede, DC akımının (I_D) sabit olduğu, tamamen düzgün ve dalgasız olduğu varsayılmaktadır.

Köprü iki komütasyon grubundan oluşur, gruplardan biri, D1-D3-D5 diyotlarından oluşan pozitif bacağa ve diğeri, D4-D6-D2 diyotlarından oluşan negatif bacağa bağlanır. Komütasyon, akımı sırayla bir diyottan diğerine iletir ve her bir diyot, Şekil 5.11’de gösterildiği gibi her bir çevrimin 120° ’si boyunca akım iletir.

Üst grupta, pozitif DC terminali, D1-D3-D5 diyotları vasıtasıyla $V_A - V_B - V_C$ sırasında en yüksek gerilimi izler. V_A pozitif tepe değerine yakın olduğunda, D1 diyodu iletim yapar ve + DC terminalinin gerilimi V_A ’yı takip eder. DC akımı, yükten geçer ve daha alt gruptaki diyotlardan biri vasıtasıyla geri döndürülür. Zaman geçtikçe, V_A , sinüs biçimli tepe değerine ulaşır ve düşmeye başlar. Aynı zamanda, V_B artar ve sonuç olarak, V_A ’ya eşit olduğu ve geçmeye başladığı bir noktaya ulaşır. Bu noktada, D3 diyodu üzerindeki ileri yöndeki gerilim pozitif hale gelir ve D3 diyodu iletim yapmaya başlar. Bu devredeki komütasyon gerilimi, $V_B - V_A$ devre indüktanslarından artan bir komütasyon akımı çekmeye başlar ve D1’deki akım azaldıkça D3’ten geçen akım artmaya başlar. Yukarıda açıklanan olaylara benzer bir olay dizisinde komütasyon gerçekleşir ve akım, D1 diyodundan D3 diyoduna iletilir. Komütasyon periyodunun sonunda, D1 diyodu bloklamaktadır ve akımı D5 diyoduna iletmeden önce sıradaki komütasyon gerçekleşene kadar + DC terminali, V_B ’yi takip eder. D5 diyodundan sonra, komütasyon, akımı D1’e geri iletir ve çevrim tekrarlanır.

Alt grupta, çok benzer bir olay dizisi gerçekleşir ancak gerilim negatiftir ve akım, yükten elektrik şebekesine geri akmaktadır. Başlangıç olarak, V_C gerilimi V_A ’dan daha negatif olduğunda D2’nin

iletim yapmakta olduğu varsayılır. Zaman geçtikçe, V_A gerilimi, V_C 'ye eşit ve daha sonra daha küçük hale gelir. Komütasyon gerçekleşir ve akım, D2 diyodundan D4 diyoduna iletilir. D2 diyodu faal olmayan hale ve D4 diyodu faal hale gelir. Akım, daha sonra D6 diyoduna ve daha sonra D2 diyoduna iletilir ve çevrim tekrarlanır.

Şekil 5.11'de, üst ve alt gruplardaki diyotların iletim periyotları, 3-fazlı kaynağın çok sayıdaki çevriminde gösterilmektedir. Bu, herhangi bir anda (çok kısa olduğu varsayılan komütasyon periyodu hariç olmak üzere) sadece 2 diyodun akım ilettiğini ve 6 diyodun her birinin düzenli bir sırada çevrimin sadece bir kısmında iletim yaptığını gösterir. Komütasyon, alternatif olarak üst grupta ve alt grupta gerçekleşir.

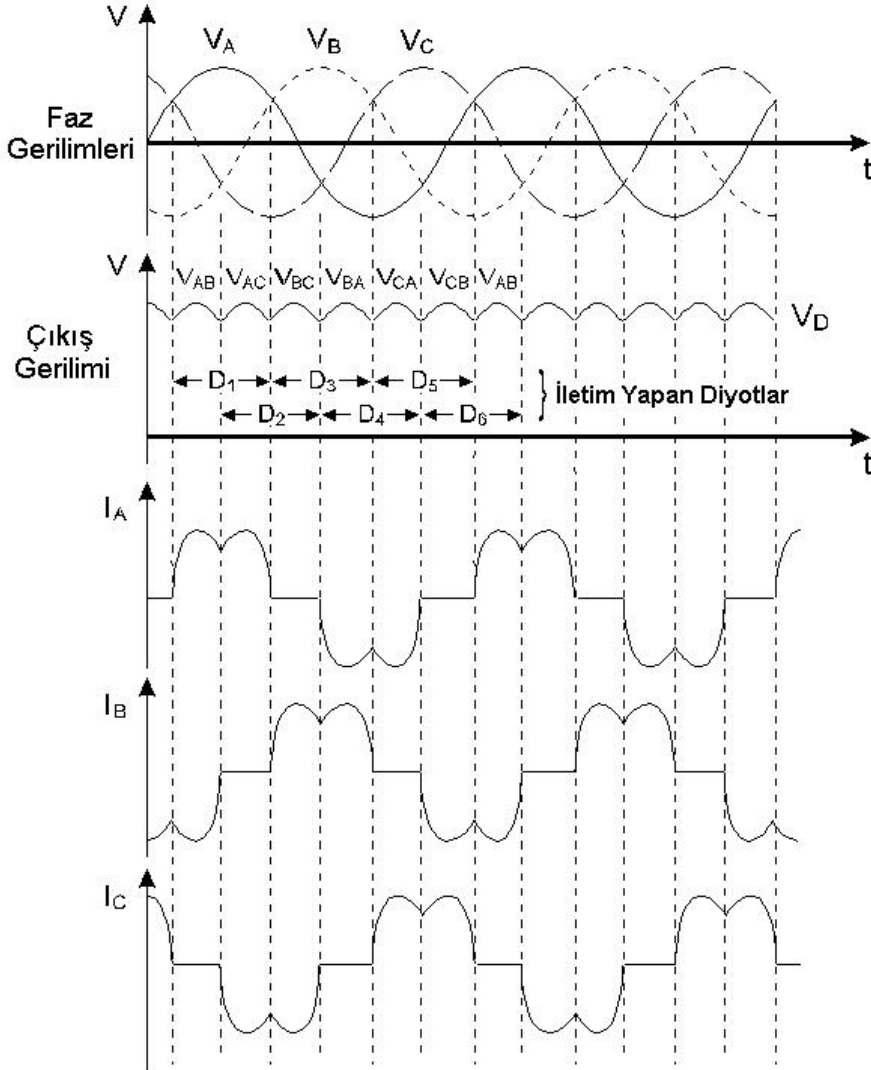
DC çıkış gerilimi (V_D) düzgün bir gerilim değildir ve *faz-faz gerilim dalga biçimi* kısımlarından oluşur. 50 Hz'lik AC Dalga biçiminin her çevrimi (20 msaniye) için, DC gerilimi (V_D) 6 gerilim darbesinin (V_{AB} , V_{AC} , V_{BC} , V_{BA} , V_{CA} , V_{CB} , vb.) kısımlarından oluşur ve bu nedenle, adı *6-darbeleri doğrultucu köprüsüdür*.

DC geriliminin ortalama büyüklüğü, yukarıda gösterilen gerilim dalga biçiminden hesaplanabilir. Ortalama değer, DC gerilim eğrisinin 120°'lik tekrarlayan kısımlarından biri boyunca gerilimin integrali hesaplanarak elde edilir. Bu integral, V_D geriliminin ortalama büyüklüğünü aşağıdaki gibi verir.

$$V_D = 1,35 \times (\text{RMS Fazı} - \text{Faz Gerilimi})$$

$$V_D = 1,35 \times V_{RMS}$$

Örneğin, $V_{RMS} = 415$ volt ise, $V_D = 560$ volt DC'dir.



Şekil 5.11 – Komütasyon sırasındaki gerilim ve akım dalga biçimleri

DC devresinde yeterli indüktans varsa, DC akımı (I_D) oldukça kararlı hale gelecektir ve AC besleme gerilimi, sıra ile her bir diyoda ait DC segman kısımlarından oluşacaktır. Örneğin, A-fazındaki akım Şekil 5.9'da gösterilmektedir. Elektrik şebekesinde her bir fazda akan sinüs-biçimli olmayan akım, sinüs dalga biçimleriyle çalışacak şekilde tasarlanmış besleme hattına bağlanan diğer AC cihazlarının performansını etkileyebilir. Sinüs-biçimli olmayan akımların etkileri, *Bölüm 4: Elektromanyetik Uyumluluk (EMU)* bölümünde tamamiyle kapsanmıştır.

Uygulamada, diyot ters bloklama gerilim kapasitesinin uygun bir şekilde belirtilmesini sağlamak için, diyotların her biri üzerindeki

ters bloklama geriliminin büyüklüğünün bilinmesi gereklidir. Teorik olarak, bir diyot üzerindeki maksimum ters gerilim, faz-faz geriliminin tepe değerine eşittir. Örneğin, bloklama periyodu sırasında D5 diyodu üzerinde V_{CA} ve V_{CB} ters gerilimleri mevcuttur. Uygulamada, diyotların ve diğer güç elektroniği anahtarlarının ters bloklama kapasitesini belirtmek için 2,5 değerinde bir güvenlik faktörü yaygın olarak kullanılır. 415 V'luk güç kaynağından beslenen bir doğrultucu köprüsünde, diyodun ters bloklama gerilimi (V_{bb}) $2,5 \times 440 \text{ V} = 1,100 \text{ V}$ 'tan daha büyük olmalıdır. Bu nedenle, ters bloklama gerilimi 1,200 V olan diyotların kullanılması yaygındır.

5.6.2 Hat anahtarlama tristörlü doğrultucu köprüsü

Yukarıdaki diyotlu doğrultucunun çalışma sırası ve DC gerilim çıkışı, besleme hattı gerilimlerindeki sürekli değişikliklere bağlıdır, herhangi bir kontrol devresine bağlı değildir. Bu konvertör tipi, *kontROLSÜZ diyotlu doğrultucu köprüsü* olarak adlandırılır çünkü DC gerilim çıkışı, kontrollü değildir ve $1,35 \times V_{RMS}$ değerinde sabittir.

Diyotların yerine tristörler geçerse, tristörlerin tetiklendiği noktanın ve böylece DC çıkış geriliminin büyüklüğünün kontrol edilmesi mümkün hale gelir. Bu konvertör tipi, *kontrollü tristörlü doğrultucu köprüsü* olarak adlandırılır ve tristörlü doğru anda tetiklemek için ilâve bir kontrol devresine ihtiyaç duyar. Şekil 5.12'de tipik bir 6-darbeli tristörlü konvertör gösterilmektedir.

Önceki bölümde de açıklandığı gibi, bir tristörün, güç elektroniği devresinde akım iletebilmesi için gerekli olan şartlar şunlardır:

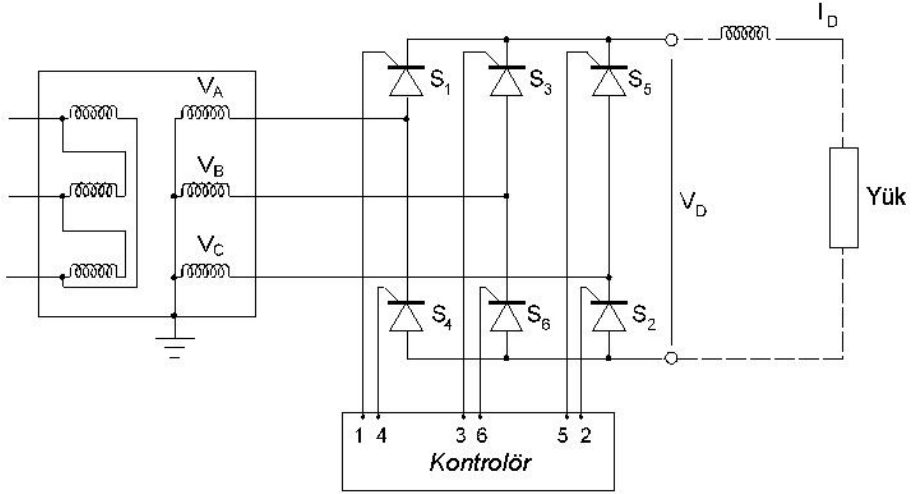
- Tristör üzerinde ileri yönde bir gerilim olmalıdır.
- Tristör kapısına pozitif bir darbe uygulanmalıdır.

Her bir tristör, üzerindeki ileri yöndeki akım pozitif olmaya başladığı anda tetiklenseydi, o zaman tristörlü doğrultucu yukarıda açıklanan diyotlu doğrultucu ile aynı şekilde çalışırdı. Diyotlu köprünün tüm gerilim ve akım dalga biçimleri, tristörlü köprü için de geçerlidir. Bu modda çalışan tristörlü bir köprü, *sıfır gecikme açısıyla* çalışmaktadır ve aşağıdaki şekilde bir gerilim çıkışı sağlar:

$$V_D = 1,35 \times V_{RMS}$$

Doğrultucu köprüsünün çıkışı, tristörün tetikleyici darbe alma zamanı geciktirilerek kontrol edilebilir. Bu gecikme, ileri yöndeki gerilimin pozitif hale gelmesinden dolayı, genelde anahtarın faal hale GELEBİLDİĞİ noktadan itibaren derece cinsinden ölçülür. *Gecikme açısı*, bazen *ateşleme açısı* olarak da adlandırılır ve α simgesi ile gösterilir. Gecikme açısına ilişkin referans nokta, bir faz gerilim

dalgasının önceki fazın gerilimini kestiği ve bu gerilim değerine göre pozitif hale geldiği noktadır. Diyotlu bir doğrultucu, *gecikme açısı* $\alpha = 0^\circ$ olan bir konvertör olarak düşünülebilir.

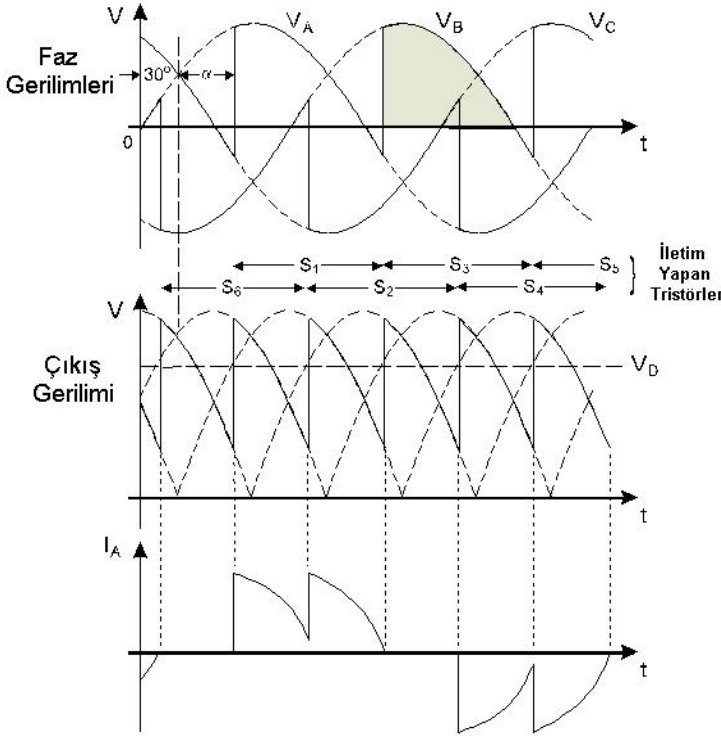


Şekil 5.12 – 6-darbeleri kontrollü tristörlü doğrultucu köprüsü

Bir konvertörün kontrol edilmesinin temel amacı, DC çıkış geriliminin büyüklüğünü kontrol etmektir. Genel olarak, *gecikme açısı ne kadar büyük olursa, DC geriliminin ortalama büyüklüğü de o kadar küçük olur*. Kontrollü bir tristörlü konvertörün kararlı durumda çalışması sırasında, her bir anahtara ilişkin gecikme açısı aynıdır. Şekil 5.13'te, anahtarların tetiklemesinin α derece gecikmiş olduğu durumdaki gerilim dalga biçimleri gösterilmektedir.

Pozitif anahtar grubunda, pozitif DC terminali, $V_A-V_B-V_C$ sırasında iletim yapan anahtarla ilgili gerilimi izler. Başlangıç olarak, V_A gerilimiyle ilgili S1 tristörünün iletim yapmakta olduğunu ve S3'ün henüz tetiklenmemiş olduğunu varsayın. DC tarafındaki + *baradaki* gerilim, düşen V_A gerilimini izler çünkü S3 iletiminin gerçekleşmediği durumda, S1 üzerinde halâ ileri yönde bir gerilim vardır ve iletim yapmaya devam edecektir. S3, bir gecikme açısından (α) sonra tetiklendiğinde, + *baradaki* gerilim V_B 'ye atlar ve daha sonra bu değeri takip etmeye başlar. Bu anda, hem S1 hem de S3 iletim yaparken, komütasyon süresi boyunca S1 anahtarı üzerinde $V_B - V_A$ değerinde negatif bir komütasyon gerilimi oluşur ve anahtar kapanmaya başlar. Zaman geçtikçe, V_B gerilimi sinüs biçimli tepe değerine ulaşır ve azalmaya başlar. Aynı zamanda, V_C artmaktadır

ve S5 tetiklendiğinde, aynı olay dizisi tekrarlanır ve akım, S5'e anahtarlanır.



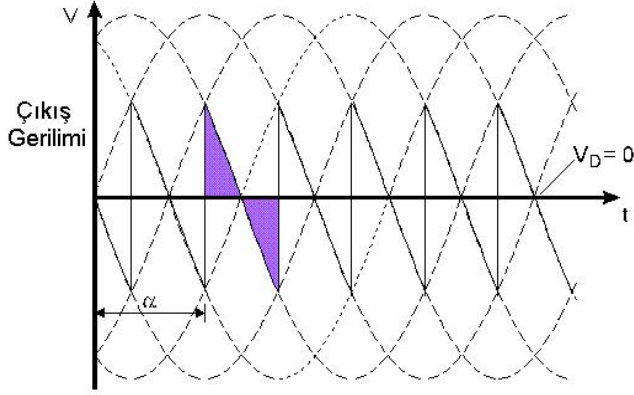
Şekil 5.13 – Kontrollü bir doğrultucunun gerilim dalga biçimleri

Diyotlu doğrultucuda olduğu gibi, V_D DC geriliminin ortalama büyüklüğü, DC gerilimin tekrarlayan bir kısmını temsil eden 120° 'lik bir periyot boyunca gerilim dalga biçiminin integrali alınarak hesaplanabilir. α gecikme açısında, DC gerilimi aşağıdaki şekildedir:

$$V_D = 1,35 \times (\text{RMS Faz – Faz Gerilimi}) \times \cos \alpha$$

$$V_D = 1,35 \times V_{RMS} \times \cos \alpha$$

Bu formül, ateşleme açısı sıfır olan ($\alpha = 0$) tristörlü bir doğrultucunun teorik DC gerilim çıkışının, diyotlu bir doğrultucunun çıkışıyla aynı olduğunu gösterir. Bu, ayrıca DC geriliminin ortalama değerinin, gecikme açısı arttıkça azalacağını ve gecikme açısının kosinüsüne bağlı olduğunu gösterir. $\alpha = 90^\circ$ olduğunda, $\cos \alpha = 0$ ve $V_D = 0$ 'dır, bu da, DC gerilimin ortalama değerinin sıfır olduğu anlamına gelir. DC geriliminin anlık değeri, aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi *testere-dişi* şeklindedir.



Şekil 5.14 – Gecikme açısı $\alpha = 90^\circ$ için DC çıkış gerilimi

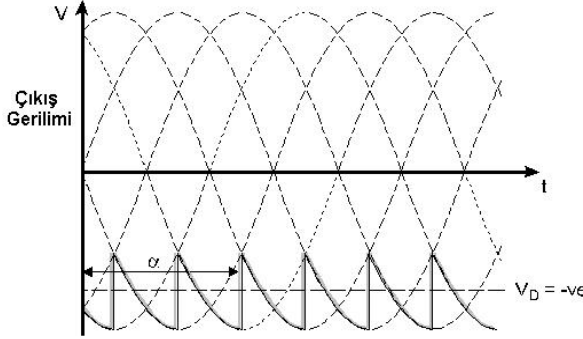
Gecikme açısı daha da arttırılırsa, DC geriliminin ortalama değeri negatif olur. Bu çalışma modunda, konvertör, *invertör* gibi çalışır. Burada ilginç bir durum vardır: DC akımının yönü değişmez çünkü akım, anahtarlardan sadece tek bir yönde akabilir. Ancak, negatif bir DC geriliminde güç akışının yönü tersine döner ve güç, DC tarafından AC tarafına doğru akar. Bu moddaki kararlı durum çalışması, sadece DC tarafında bir gerilim kaynağı var olduğunda mümkündür. $\alpha > 90^\circ$ için DC gerilimin anlık değeri, Şekil 5.15'te gösterilmektedir.

Uygulamada, komütasyon anlık değildir ve devre indüktansına ve komütasyon geriliminin büyüklüğüne bağlı olan bir periyot kadar sürer. İdeal durumda olduğu gibi, komütasyon süresinin, komütasyon devre indüktansının ve ortalama komütasyon geriliminin tahmini kullanılarak tahmin edilmesi mümkündür.

Diyotlu doğrultucuda olduğu gibi, kararlı DC akımı (I_D) AC tarafındaki 3 fazın her birinden gelen akımlardan oluşur. AC tarafında, her bir fazdaki akım, diyotlu doğrultucuda olanlara benzeyen ve benzer harmonik bileşenlere sahip sinüs biçimli olmayan bloklardan oluşur. Gecikme açısı $\alpha = 0$ olan diyotlu köprü söz konusu olduğunda, AC tarafındaki faz akımı ile karşılık gelen faz gerilimi arasındaki açı kabaca sıfıra eşittir. Sonuç olarak, güç faktörü, kabaca bire eşittir ve konvertör, rezistif bir yük gibi davranır.

Gecikme açısı α olan kontrollü bir doğrultucu için, faz akımı ile karşılık gelen faz gerilimi arasındaki açı da kabaca α 'dır ancak normalde *güç faktörü açısı* $\emptyset$ olarak adlandırılır. Bu açı, *fark faktörü* olarak adlandırılmalıdır çünkü gerçekten de güç faktörünü temsil etmez (daha sonra bakılmalıdır). Sonuç olarak, DC gerilimini

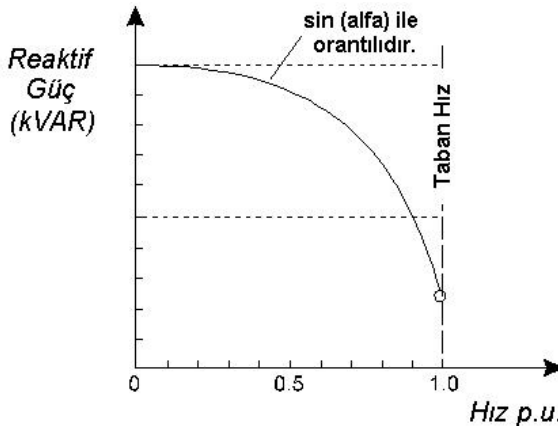
azaltmak için tristörlü doğrultucunun gecikme açısı değiştirildiğinde, faz akımı ile gerilim arasındaki açı da aynı oranda değişir. Konvertör, fark faktörü $\cos \phi$ olan rezistif-indüktif bir yük gibi davranır. DC çıkış gerilimi azaltıldığında, kontrollü doğrultucuya ilişkin *güç faktörünün* azalacağı iyi bilinen bir durumdur.



Şekil 5.15 – Gecikme açısı $\alpha > 90^\circ$ olduğu durumdaki DC gerilimi

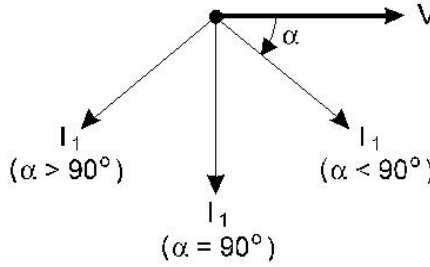
Gecikme Açısı	Konvertör Davranışı
$\alpha = 0^\circ$	Rezistif bir yük gibi davranır.
$0^\circ < \alpha < 90^\circ$	Rezistif/İndüktif bir yük gibi davranır ve aktif gücü absorbe eder.
$\alpha = 90^\circ$	İndüktif bir yük gibi davranır, aktif güç çekmez.
$\alpha > 90^\circ$	İndüktif bir yük gibi davranır ancak aynı zamanda aktif bir güç kaynağıdır.

Buna ilişkin yaygın bir örnek, tristörlü konvertör tarafından kontrol edilen DC Motor Sürücüdür. DC motor hızını sabit torkta azaltmak için DC gerilimi azaltıldığında, güç faktörü düşer ve konvertörü beslemek için daha fazla reaktif güç gereklidir.



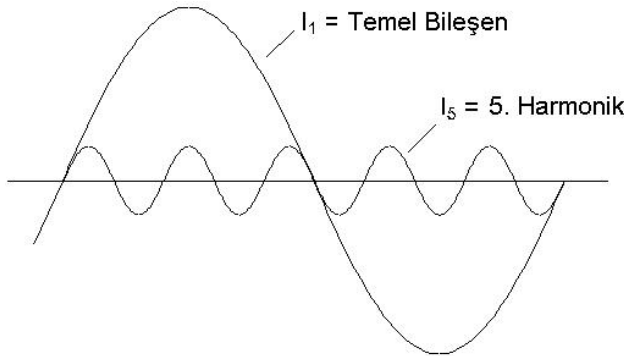
Şekil 5.16 – Hat-anahtarlamalı bir konvertörden beslenen sabit torklu bir yüke sahip DC motor sürücüsüne ait reaktif güç şartları

Şekil 5.17’de, α gecikme açısının çeşitli değerleri için, besleme hattındaki faz akımının temel bileşeni ile faz gerilimi arasındaki çeşitli olası vektör ilişkileri özetlenmektedir.



Şekil 5.17 – Kontrollü tristörlü doğrultuculu bir köprüye ilişkin faz geriliminin ve temel akımın vektör diyagramı

AC tarafındaki faz akımı, temel olarak sinüs biçimli-olmayan *kare dalgadır*. Harmonik analiz ilkeleri uygulanarak ve Fourier Transformu kullanılarak, sinüs-biçimli olmayan bu dalga, sinüs biçimli temel (50 Hz) bir dalga artı sinüs biçimli belli sayıda harmoniğe çözülebilir (Bölüm 4’e bakılmalıdır). Temel dalga biçimi en yüksek genliğe sahiptir ve bu nedenle, güç besleme sisteminde çok etkilidir. 6-darbeleri bir doğrultucu köprüsünde, 5. harmonik en büyük harmoniktir, bu harmonik, teorik olarak temel akımın % 20’sine eşittir.



Şekil 5.18 – Temel akım ve 5. harmonik akım

Temel akımın RMS değeri, temel ilkeler kullanılarak elde edilen aşağıdaki formülden hesaplanabilir:

$$I_1 = 0,78 I_D \text{ amp}$$

Karşılık gelen görünen güç S_1 (kVA) aşağıdaki formülle elde edilir:

$$S_1 = \sqrt{3} V_{RMS} I_1 \quad kVA$$

$$S_1 = \sqrt{3} V_{RMS} 0.78 I_D \quad kVA$$

$$S_1 = 1.35 V_{RMS} I_D \quad kVA$$

Aktif güç bileşeni şu şekilde verilir:

$$P_1 = S_1 \cos \phi \quad kW$$

$$P_1 = 1.35 V_{RMS} I_D \cos \phi \quad kW$$

Bu, AC tarafında hesaplanan aktif gücün, DC tarafı için hesaplanan güce ($V_D \cdot I_D$) eşit olduğunu ispatlar, çünkü önceki formülden elde edildiği gibi $V_D = 1,35 V_{RMS} \cos \alpha$ 'dır.

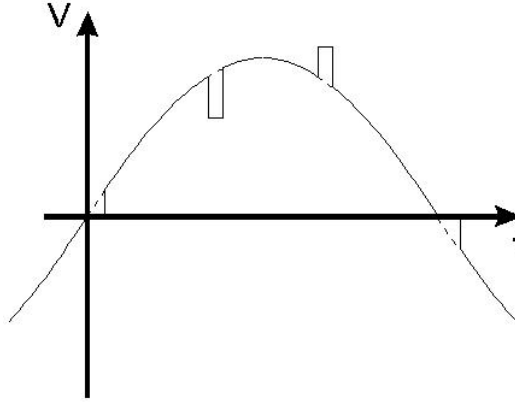
Reaktif güç, aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$Q_1 = S_1 \sin \phi \quad kVar$$

$$Q_1 = 1,35 V_{RMS} I_D \sin \phi \quad kVar$$

Yük akımı sabit tutulursa (DC motorda sabit torklu yük varsa), tetikleme *gecikme açısı* arttıkça, reaktif güç, $\sin \alpha$ ile orantılı olarak artacaktır.

3-fazlı kaynaktan doğrultucuya bakıldığında, 2 ardışık anahtar iletim yaparken, anahtarlama sırasında ilgili besleme hatlarında etkin bir fazdan-faza kısa devre oluşur. Örneğin, S3 anahtarı tetiklendiğinde ve S1 anahtarı iletim yapmaya devam ederken, anahtarlardaki V_A ve V_B gerilimleri eşit olmalıdır (anahtarlar üzerindeki küçük gerilim düşüşü hariç). $V_B - V_A$ komütasyon gerilimi, S1 ve S3'ten akım geçmesine neden olur, devre indüktansı $2L$ 'dir. *Gecikme açısına* bağlı olarak, komütasyon gerilimi oldukça büyük olabilir. Gerilim kaynağında, bu periyottaki V_A ve V_B gerilimlerinin büyüklüğü, dolaşan akıma ve devre indüktansına bağlı olarak bir miktar azalır. Besleme hattındaki bu istenmeyen etki, *gerilim çentiği* olarak adlandırılır. Çentiğin etkisiyle, DC gerilimi (V_D) biraz düşer ancak bu düşüş çok küçüktür ve ihmal edilebilir. Ancak, konvertördeki kayıplar değerlendirildiğinde, çentiğin etkisi hesaba katılacak kadar önemlidir.

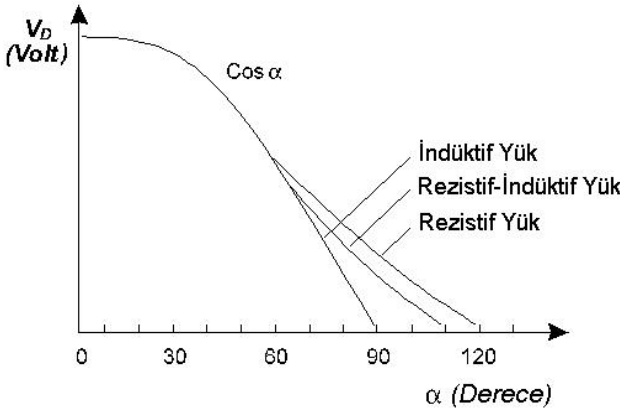


Şekil 5.19 – Besleme hattındaki gerilim çentiği

5.6.3 Hat anahtarlamalı konvertörlere ilişkin sınırlamalar

Yukarıdaki analiz, kontrollü ve kontrollü olmayan konvertörlerle ilgili teorik hususları kapsar. Uygulamada, bileşenler ideal değil ve anahtarlamalar anlık değildir. Bu, teorik performanstan sapmalara neden olur.

Sapmaların en önemlilerinden biri, DC yük akımının hiçbir zaman tamamen düzgün olmamasıdır. Bunun nedeni açıktır. Anlık DC geriliminin (V_D) hiçbir zaman tamamen düzgün olamadığını kabul edersek, yük tamamen *rezistif* ise, DC yük akımı tamamen düzgün olamaz çünkü DC akımı, DC gerilimini lineer olarak izleyecektir. Ayrıca, gecikme açısı $\alpha > 60^\circ$ olduğunda, DC çıkış gerilimi, sürekli olmayan bir hale gelir ve sonuç olarak, DC akımı da sürekli olmayan bir hale gelir. Düzgün bir DC akımı sağlamak için, uygulamada kullanılan konvertörler, genelde DC tarafındaki yüke göre seri olan L_D indüktansı ile donatılmıştır. Tam düzgünleştirme sağlamak için, L_D değeri teorik olarak sonsuz olmalıdır, bu da uygulamada mümkün değildir.

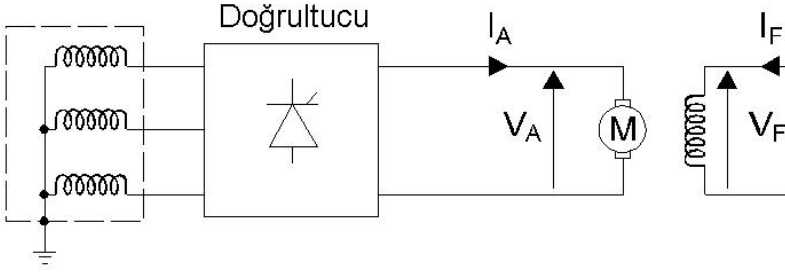


Şekil 5.20 – DC geriliminin teorik değerden sapması-gecikme açısı

Bunun uygulamadaki sonucu, hesaplanan DC gerilimine ($V_D = 1,35 V_{RMS} \cos \alpha$) ilişkin teorik formülün, tüm gecikme açısı (α) değerleri için tamamen doğru olmamasıdır. Uygulamadaki ölçümler, bunun sadece 75° civarına kadar olan gecikme açıları için geçerli olduğunu göstermektedir ancak bu, yükün tipine ve özellikle DC yük indüktansına bağlıdır. Tecrübeler, belirli bir gecikme açısı $\alpha > 60^\circ$ için, ortalama DC geriliminin, teorik değerden daha büyük olacağını göstermektedir (aşağıdaki şekilde de gösterilmektedir).

5.3.7 Hat anahtarlamalı doğrultuculara ilişkin uygulamalar

Hat anahtarlamalı konvertöre ilişkin önemli bir uygulama, DC motor sürücüdür. Aşağıdaki şekilde, DC motorunun armatürüne bağlanan tek bir *kontrollü* hat-anahtarlamalı konvertör gösterilmektedir. Konvertör, motorun armatürüne, konvertörün kontrol devresinden kontrol edilen değişken bir DC gerilimi sağlar.



Şekil 5.21 – Konvertörle beslenen DC motor sürücü

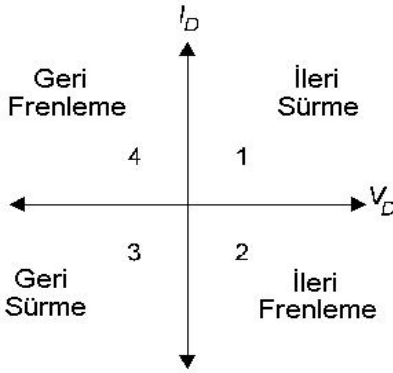
Gecikme açısı 90° 'den küçük olduğunda, DC gerilimi pozitifdir ve yüke aktif güç iletmek için DC motorun armatürüne pozitif bir I_A akımı akar. Kaynaktan motora ve mekanik yüke aktif güç iletilmekteyken motorun ileri yönde çalıştığı durumda, sürücü sistemi, *1. kadranda* çalışmaktadır.

Motor alan sargısı, genelde basit bir diyotlu doğrultucudan ayrı olarak uyarılır ve bir alan mıknatıslanma akımını (I_F) taşır. Sabit bir alan akımı için, motorun hızı, armatürdeki DC gerilimi ile doğru orantılıdır. Konvertörün gecikme açısı ve çıkış armatür gerilimi (V_A) değiştirilerek hız kontrol edilebilir.

Konvertörün gecikme açısı 90° 'den büyük bir açıya çıkarılırsa, V_D gerilimi negatif hale gelecek ve motor yavaşlayıp duracaktır. I_D akımı sıfıra düşer ve herhangi bir akım kesilmeksizin besleme hattının motorla bağlantısı kesilebilir.

Sonuç olarak, DC motoru durdurmak için, V_D geriliminin negatif olmasını sağlamak amacıyla, gecikme açısı 90° 'den yeterince büyük bir açıya çıkarılmalıdır. V_D negatif ve I_D hâlâ pozitifken, konvertör, geçici olarak bir invertör gibi davranır ve motordan besleme hattına aktif güç iletir. Bu, ayrıca motoru ve yükünü yavaşlatan ve hızlı bir şekilde durduran bir fren gibi davranır. Bu durumda, sürücü sistem, motorun ileri yönde çalıştığı ancak aktif gücün motordan besleme hattına geri iletiildiği *2. kadranda* çalışmaktadır.

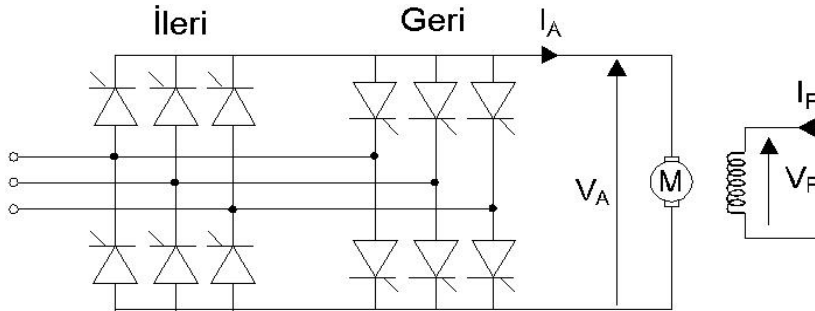
4 kadranlı çalışma kavramı, 1. Bölüm'de kapsamıştır ancak aşağıda gösterilmektedir. Şekilde, herhangi bir sürücü sisteminin 4 olası çalışma durumu, ayrıca DC Motor Sürücü uygulamasına ilişkin V_D ve I_D 'nin yönleri gösterilmektedir.



Şekil 5.22 – Değişken hızlı sürücülere ilişkin çalışma kadrantları

Şimdiye kadar açıklanmış olan konvertörler, *tekli konvertörlerdi*. Tekli konvertörler, sadece pozitif DC akımıyla ($I_D = +ve$) çalışabilir, motor sadece *ileri yönde* çalışabilir ancak aktif güç herhangi bir yönde iletilir. Tekli DC konvertörler, sadece Kadrant 1 ve Kadrant 4'te çalışabilir ve bu konvertörler, 2 kadrantlı konvertörler olarak bilinir.

Kadrant 3 ve Kadrant 2'de çalışmak için, I_D akımının yönünün tersine çevrilebilmesi mümkün olmalıdır. Bu, akımın ters yönde akabilmesi için ilâve bir konvertörlü köprünün bağlanmasını gerektirir. Bu konvertör tipi, *4 kadrantlı DC konvertör* olarak bilinir ve bazen çift ya da arka-arkaya 6-darbeli doğrultucu olarak da adlandırılır.



Şekil 5.23 – 4 kadrantlı hat-anahtarlamalı doğrultucu

4 kadrantlı bir DC konvertörden beslenen DC Motor Sürücüsü ile, ileri yönde ya da ters yönde hız kontrolüyle birlikte 4 kadrantın tümünde çalışmak mümkündür. Motor hızlı bir şekilde yön değiştirebilir. Konvertör-1, ileri dönüş yönünde hız kontrolü sağlamak için kontrollü bir doğrultucu olarak kullanılabilirken, Konvertör-2 bloklanır ya da tam tersi gerçekleştirilir.

Başlangıç olarak, motorun, ileri yönde Konvertör-1'in kontrolü altında gecikme açısı $< 90^\circ$ olacak şekilde çalışmakta olduğunu varsayın. Konvertör-2 bloklanır. İleri yönde çalışırken ters yöne dönmek için aşağıdaki değişim dizisi gerçekleştirilir:

Konvertör-1 gecikme açısı $\alpha > 90^\circ$ 'ye çıkarılır. Bu, DC gerilimi V_D 'nin < 0 olduğu ve DC akımı I_D 'nin azalmakta olduğu anlamına gelir.

$I_D = 0$ olduğunda, Konvertör-1 bloklanır ve tristör ateşlemesi sonlandırılır.

Küçük bir gecikmeden sonra, Konvertör-2'nin bloğu kaldırılır ve ateşleme açısı 90° 'den büyük olacak şekilde invertör modunda çalışmaya başlar.

Motor halâ ileri yönde dönüyorsa, Konvertör-2 DC akımı (I_D) negatif yönde artmaya başlar ve DC makina, enerjiyi besleme hattına geri döndürerek jeneratör gibi çalışır ve durdurulur.

Ateşleme açısı azaltıldığında ($\alpha < 90^\circ$), Konvertör-2, invertör modundan doğrultucu moduna geçtiğinde ve V_D gerilimi arttığında, motor, ters yönde çalışmaya başlar.

DC motor sürücüsünde, tek bir konvertör kullanılarak ve uyarma akımının yönü değiştirilerek de, dönüş yönünün tersine çevrilmesi sağlanabilir. Bu metot, sadece ileri yönde çalışmadan ters yönde çalışmaya geçiş yapmak için hiçbir özel sürücü şartının olmadığı durumda kullanılabilir. Bu durumda, değişim, durağan durumdaki bir periyot sırasında, alan devresindeki anahtarlar kullanılarak mekanik olarak gerçekleştirilir. Durağan durumda alanın, ters yöndeki mıknatıslığını gidermek için önemli zaman gecikmeleri gereklidir.

Hem kontrollü hem de kontrollü-olmayan hat-anahtarlama doğrultucular için çok sayıda uygulama mevcuttur. Daha yaygın olan bazı uygulamalar şunlardır:

Değişken hız kontrollü DC motor sürücüler

Değişken gerilimli değişken frekanslı invertörler için DC kaynağı

Sargılı rotorlu endüksiyon motorları için kayma-enerjisi toplama konvertörleri

Makinalar için DC uyarım kaynağı

Yüksek gerilimli DC konvertörleri

Elektrokimyasal süreçler

5.7 Kapı anahtarlama invertör (DC/AC konvertör)

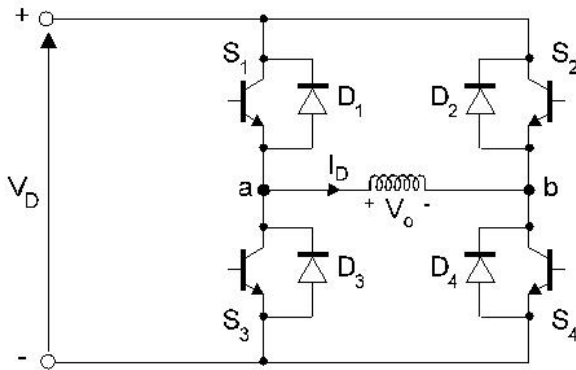
1 kW ilâ 500 kW aralığındaki birçok modern Değişken Hızlı AC Sürücü, GTO, MOSFET, BJT ve IGBT gibi *kapı-anahtarlama cihazları* esas alır, bu cihazlar, kontrol kapılarına bağlanan düşük güçlü kontrol devreleri tarafından FAAL ve FAAL OLMAYAN hale getirilebilir.

PWM invertörlerinin ilk zamanlarındaki tristörlü komütasyon ile yaşanan zorluklar, güç elektroniği teknolojisindeki yeni gelişmeler sayesinde aşılmıştır. Hat-anahtarlama doğrultucularda, diyotlar ve tristörler halâ geniş çaplı olarak kullanılmaktadır.

Bir DC kaynağıyla başlayarak ve bu yarı iletken *elektronik anahtarları* kullanarak, yükte tam sinüs biçimli bir gerilim elde etmek mümkün değildir. Diğer taraftan, sinüs-biçimliye yakın bir akım üretmek mümkündür. Sonuç olarak, amaç, indüktif devreden geçen akım mümkün olduğunca sinüs biçimli olacak şekilde bu anahtarları kontrol etmektir.

5.7.1 Tek-fazlı kare dalgalı invertör

Kapı-kontrollü invertör devrelerinin ilkelerini açıklamak için, aşağıdaki şekilde, tek-fazlı bir kaynaktan indüktif bir yükü besleyen dört tane yarı iletken güç anahtarı gösterilmektedir.



Şekil 5.24 – Tek-fazlı DC-AC invertör

Bu devre, elektronik bir tersleme anahtarı olarak kabul edilebilir, aşağıdaki şekillerden herhangi birinde giriş DC geriliminin (V_D) indüktif yüke bağlanmasına imkân verir.

S1 = faal, S4 = faal, yükte $+V_D$ gerilimi sağlar.

S2 = faal, S3 = faal, yükte $-V_D$ gerilimi sağlar.

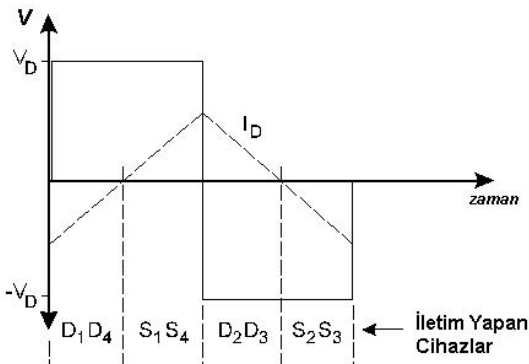
S1 = faal, S2= faal, yükte sıfır gerilim sağlar.

S3 = faal, S4 = faal, yükte sıfır gerilim sağlar.

S1 = faal, S3 = faal, kısa devre arızasına neden olur.

S2 = faal, S4 = faal, kısa devre arızasına neden olur.

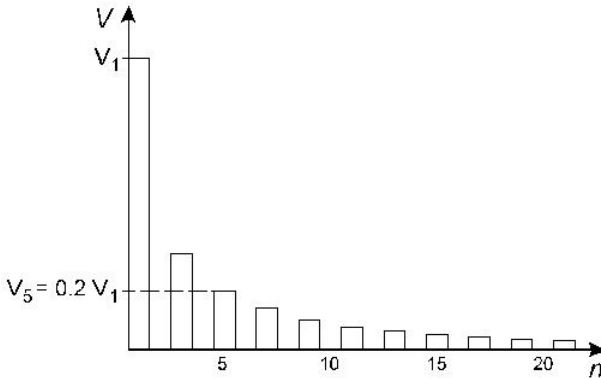
Ancak, bu dört anahtar, Şekil 5.24'te gösterildiği gibi indüktif yük üzerinde kare bir dalga biçimi elde edilecek şekilde kontrol edilebilir. Bunun için, anahtar konfigürasyonu (1) ve (2) kullanılır, anahtar konfigürasyonu (3) ya da (4) kullanılmaz. Açık bir şekilde görüldüğü gibi, sürekli güvenli çalışma için, seçenek (4)'ün kullanılmaması gereklidir. Yükün tam olarak indüktif bir yük olması durumunda, akım dalga biçimi, Şekil 5.25'te gösterildiği gibi üçgen şeklindeki bir dalga biçimidir.



Şekil 5.25 – Kare dalga modülasyon dalga biçimleri

Çevrimin ilk kısmında, sadece S1 ve S4 anahtarlarının faal halde olmasına rağmen akım negatiftir. Birçok güç elektroniği cihazı negatif iletim yapamadığı için, anahtarların zarar görmesini önlemek açısından, bu negatif akımın anahtarlardan uzaklaştırılması gereklidir. Sonuç olarak, akımın akmaya devam etmesini sağlamak için, diyotlar, anahtarlara anti-paralel olarak bağlanır. Bu diyotlar, bazen *reaktif diyotlar ya da free-wheeling diyotlar* olarak adlandırılır ve gerilim ve akım polariteleri ters olduğunda iletim yapar. Bu durum, DC kaynağına geri güç akışı olduğunda meydana gelir.

Periyodik kare dalga çıkışının frekansı, temel frekans olarak adlandırılır. Fourier Analizi kullanılarak, tekrarlayan her türlü dalga biçimi, belli sayıda sinüs biçimli dalga biçimine çözülebilir, bu dalga biçimleri, *temel frekanstaki sinüs biçimli bir dalgadan* ve temel frekansın katları olan *daha yüksek frekanslardaki* belli sayıda sinüs biçimli harmonikten oluşur. Tek-fazlı kare dalga çıkışına ilişkin harmonik spektrum, aşağıdaki şekilde gösterilmektedir. Frekans arttıkça, daha yüksek derecedeki harmonik gerilimlerin büyüklüğü hızlı bir şekilde azalır.



Şekil 5.26 – Kare-dalgalı harmonik spektrum

Sinüs biçimli temel gerilim bileşeninin RMS değeri aşağıdaki şekildedir:

$$V_1 = 2 \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_a \text{ Volt}$$

n. harmonik gerilimin RMS değeri:

$$V_n = \frac{V_1}{n} \text{ Volt}$$

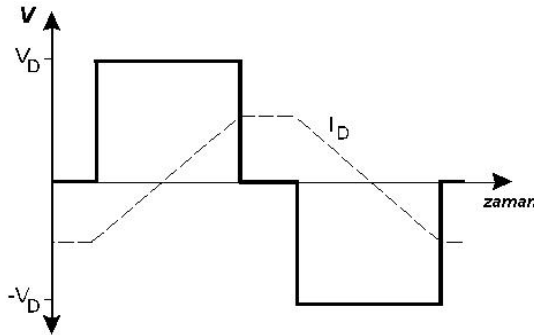
Bu, kare dalgalı çıkış geriliminin, temel frekansa yakın frekanslarda çok sayıda oldukça büyük istenmeyen bileşeni vardır. Sinüs biçimli olmayan akım dalga biçimi ile gösterildiği

gibi, çıkış gerilimine bağlı olarak yükte akmakta olan akım bozulur. Bu örnekte, akım, üçgen şeklindedir.

Kare dalgalı gerilim, tek-fazlı bir endüksiyon motoruna beslenseydi, motor, kare-dalganın frekansında çalışırdı ancak lineer bir cihaz olduğu (indüktif/rezistif yük) için, sinüs biçimli olmayan bir akım çekerdi ve harmonik akımlar yüzünden aşırı ısınabilirdi. Bu akımlar, titreşimli tork da üretebilir.

Motorun hızını değiştirmek için, invertör çıkışının temel frekansı, anahtarlama hızı ayarlanarak değiştirilebilir. Frekansı artırmak için, anahtarlama hızı artırılabilir ve frekansı azaltmak için, anahtarlama hızı azaltılabilir.

Çıkış geriliminin de büyüklüğünün kontrol edilmesi gerekli ise, Şekil 5.24'te gösterilen anahtar konfigürasyonu (3) kullanılarak, sıfır gerilimli periyotlar eklenerek ortalama invertör çıkış gerilimi azaltılabilir. O zaman her bir yarım çevrim, aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi yarım periyodun sadece bir parçası olan kare dalgadan oluşur.



Şekil 5.27 – İndirgenmiş gerilim darbe genişliğine sahip kare dalga modülasyonu

Bir dalga biçiminin ortalama RMS değerini azaltmak için darbe genişliğinin değiştirilmesi süreci, Darbe Genişliği Modülasyonu (PWM) olarak adlandırılır. Yukarıda Şekil 5.27'deki tek-fazlı örnekte gösterildiği gibi, Darbe Genişliği Modülasyonu, çıkış geriliminin RMS değerinin kontrol edilmesini mümkün kılar. Gerilimin temel sinüs biçimli bileşeni, aşağıdaki aralıkta sürekli olarak değişir:

$$\text{sıfır} - 2 \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_d \text{ Volt}$$

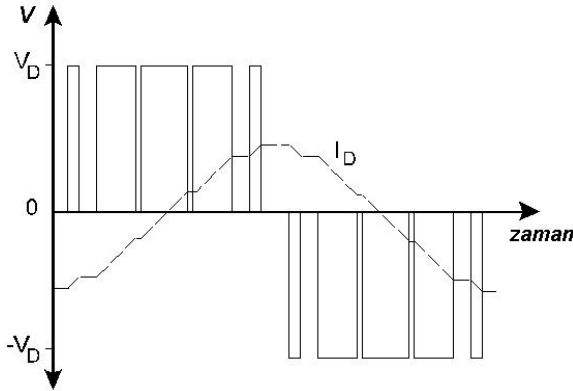
Modifiye edilmiş bu dalga biçiminin harmonik spektrumu, darbenin tam kare dalgaya oranına bağlıdır ancak genel olarak, Şekil 5.26'da gösterilen dalga biçimine benzerdir.

5.7.2 Tek-fazlı Darbe Genlik Modülasyon (PWM) invertörü

Bir AC endüksiyon motorunun statoruna sağlanan gerilim kaynağının kare dalgalı olması ve bozulması, motor için sorun oluşturmaz. Temel sorun, akım dalga biçiminin bozulmasıdır, bu, ilâve bakır kayıplarına ve şaft torku titreşimlerine neden olur. İdeal invertör çıkışı, *düşük harmonik bozulmaya sahip bir akım dalga biçimine* neden olan çıkıştır.

AC endüksiyon motorunun reaktansı frekansa bağlı olup ($X_L = j2\pi fL$) baskın olarak indüktif yapıda olduğu için, *gerilim harmonik bozulumu* yüksek frekanslara itilebilirse iyi olur, çünkü yüksek frekanslarda motor empedansı büyük olur ve pek bozulmamış bir akım akar.

Bunu gerçekleştirmek için kullanılan bir teknik, *sinüs-kodlu Darbe Genişlik Modülasyonudur* (sinüs-PWM). Bu, güç cihazlarının, temel frekanstan çok daha yüksek frekanslarda anahtarlanmasını gerektirir ve her bir periyot için belli sayıda darbe üretilir. Darbelerin frekansı, *modülasyon frekansı* olarak adlandırılır. Darbelerin genişliği çevrim boyunca sinüs biçimli olarak değişir ve Şekil 5.28’de gösterilen gerilim dalga biçimi oluşur. Bu şekilde, ayrıca dalga biçimindeki gelişmeyi gösteren indüktif yüke ilişkin akım dalga biçimi gösterilmektedir.

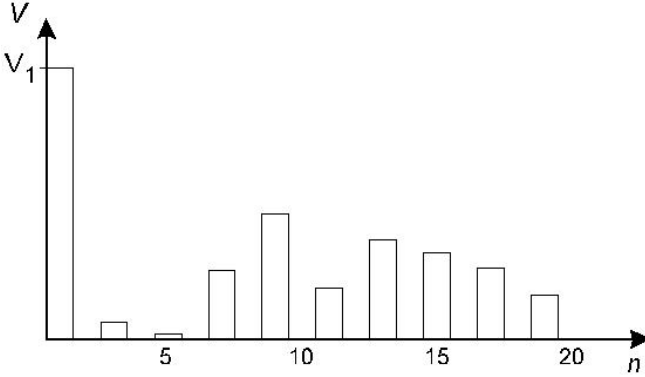


Şekil 5.28 – Sinüs-kodlu darbe genişlik modülasyonlu gerilim ve akım

Akım dalga biçimindeki gelişme, Şekil 5.29’da gösterilen harmonik spektrum ile açıklanabilir. Şekilden de görülebildiği gibi gerilim dalga biçiminde halâ çok sayıda bozulum bileşeninin olmasına rağmen, bu bileşenler şimdi daha yüksek harmonik frekanslardadır ve motorun yüksek seviyedeki yük empedansı, bu akımların azaltılmasında etkindir.

Modülasyon frekansının artırılması, akım dalga biçimini iyileştirecektir ancak bunun karşılığında, invertörün anahtarlama cihazlarındaki kayıplar artacaktır. Modülasyon frekansı seçimi, anahtarlama cihazının tipine ve frekansına bağlıdır. Güdümlü-anahtarlama tristörlü invertör kullanılırken (10 sene önce)

1 kHz'e kadar olan bir modülasyon frekansının elde edilmesi mümkündür. GTO'ların ve BJT'lerin kullanılmaya başlanması ile birlikte, bu, 5 kHz civarına kadar çıkarılabildi! IGBT'ler kullanıldığında ise, modülasyon frekansı 20 kHz'e kadar çıkarılabilmektedir. Uygulamada, IGBT kullanıldığında, 22 kW civarındaki büyüklüklere sahip motorlarda maksimum modülasyon frekansı 12 kHz ve 500 kW civarındaki motorlarda 8 kHz olabilmektedir. Modülasyon frekansı seçimi, motordaki kayıplarla invertördeki kayıplar arasında bir tercih yapılmasına dayanmaktadır. Düşük modülasyon frekanslarında, invertördeki kayıplar düşük ve motordaki kayıplar yüksek seviyededir.



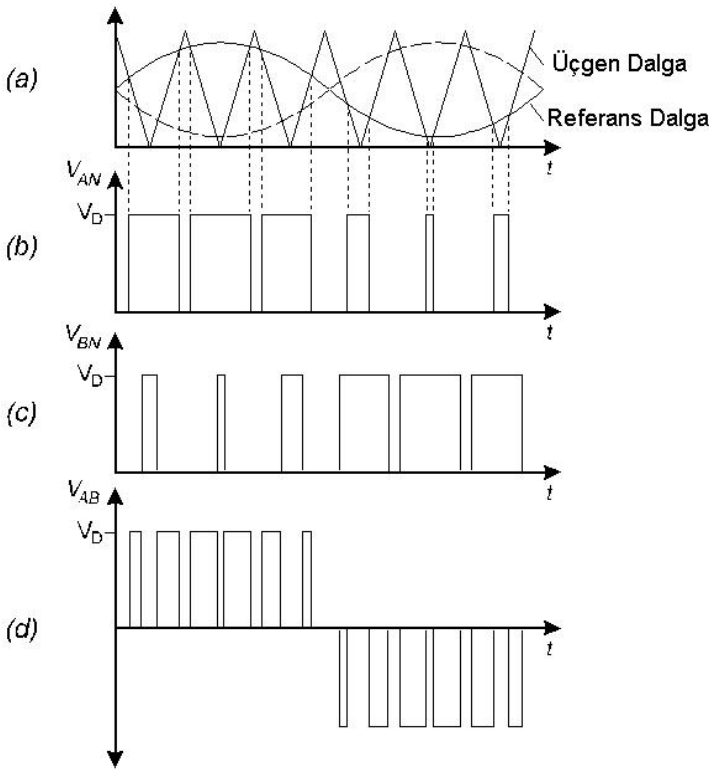
Şekil 5.29 - Bir PWM invertöre ilişkin harmonik spektrum

Yüksek modülasyon frekanslarında, invertördeki kayıplar artarken, motordaki kayıplar azalır.

Uygulamadaki invertörlerde sinüs-kodlu PWM gerçekleştirmek için kullanılan en yaygın tekniklerden biri, Şekil 5.30'da gösterilen sinüs-üçgen kesişim metodudur.

Kontrol devresinde istenen invertör anahtarlama frekansında üçgen şeklinde *testere-dişli* bir dalga biçimi oluşturulur. Bu, bir komparator kullanılarak sinüs biçimli referans sinyalle karşılaştırılır, bu referans sinyalin büyüklüğü istenen sinüs biçimli çıkış geriliminin büyüklüğüyle orantılıdır, frekansı ise aynıdır. Referans dalga biçimi, üçgen dalga biçiminden daha büyük olduğunda, V_{AN} (Şekil 5.30(b)) gerilimi yükseğe anahtarlanır. V_{BN} (Şekil 5.30(c)) gerilimi de aynı aç dalga biçimiyle kontrol edilir ancak referans dalga biçimi 180° kaydırılır.

Gerçek fazdan-faza çıkış gerilimi V_{AB} 'dir (Şekil 5.30(d)), V_{AB} gerilimi, V_{AN} ile V_{BN} arasındaki farktır ve her birinin genişliği, o andaki referans sinüs dalgasının değeriyle ilişkili olan bir darbe serisinden oluşur. V_{AB} çıkış gerilimindeki darbe sayısı, invertör bacak gerilimindeki (V_{AN}) iki katıdır. Örneğin, 5 kHz'de anahtarlanan bir invertör, çıkış fazdan-faza geriliminde 10 kHz'de anahtarlama bozulumu oluşturmamalıdır. Gerilimin polaritesi, istenen çıkış frekansında alternatif olarak pozitif ve negatiftir.



Şekil 5.30 – Üçgen kesişimli PWM ilkesi

Şekil 5.30'daki referans sinüs-dalgasına, bir DC bileşenin verildiği görülebilir böylece bu teknikle üretilen darbe pozitif bir genişliğe sahiptir. Bu, Şekil 5.30(b)'de ve Şekil 5.30(c)'de gösterildiği gibi, her bir bacaktaki gerilime bir DC farkı ekler. Ancak, her bacak aynı DC fark değerine sahiptir.

Sinüs-üçgen kesişimini kullanan teknik, özellikle daha eski analog kontrol devrelerinde kullanılmak için uygundur, bu tekniğe göre, iki referans dalga biçimi bir komparatora iletilir ve komparator çıkışı, invertör anahtarlarını tetiklemek için kullanılır.

Modern sayısal teknikler, bir anahtarlama algoritmasını temel alarak, örneğin, sinüs dalgasının bir kısmının altındaki bölgeyle orantılı tetikleme darbeleri üretmek çalışır. Eskiden, imalatçılar, AC endüksiyon motorları için çıkış dalga biçimlerinin performansını optimize eden çok sayıda farklı algoritma geliştirmişti. Bu teknikler, Şekil 5.30'da gösterilenlere benzer PWM çıkış dalga biçimleri verir.

Sinüs-kodlu PWM gerilim dalga biçimi, darbe frekansındaki yüksek frekanslı bir kare dalga ile (anahtarlama taşıyıcı) genişliğinin sinüs biçimli değişiminin (modüle eden dalga biçimi) birleşimidir. En düşük harmonik bozulma için, modüle eden dalga biçiminin taşıyıcı frekansı ile senkron olması gereklidir,

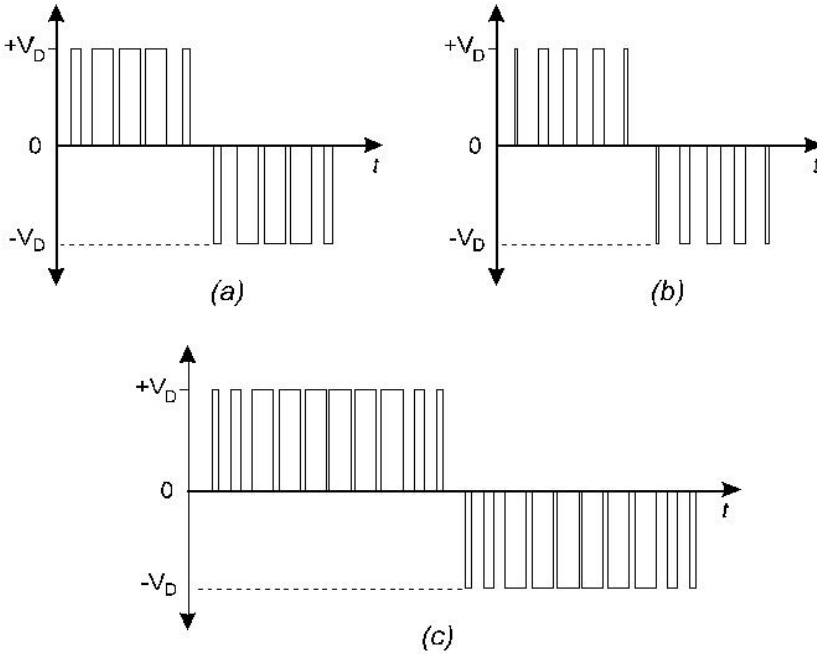
bu nedenle tam sayıda taşıyıcı periyodu içermelidir. Modülasyon frekansının yirmi katından daha büyük taşıyıcı frekanslarında bu şart daha önemsiz hale gelir.

Sinüs biçimli bir PWM dalga biçiminin gerilimi ve frekansı, Şekil 5.30(a)'daki referans dalga biçimi değiştirilerek değiştirilir ve Şekil 5.31'deki gerilim çıkışları elde edilir.

Şekil 5.31(a)'da, beyan V/f oranına sahip taban durum gösterilmektedir.

Şekil 5.31(b)'de, gerilim referansının yarıya indiği, bunun sonucu olarak her bir darbenin yarıya indiği durum gösterilmektedir.

Şekil 5.31(c)'de, referans frekansın yarıya indiği, bunun sonucu olarak darbe sayısının iki katına çıktığı durum gösterilmektedir.



Şekil 5.31 – Frekansın ve gerilimin sinüs biçimli PWM ile değişmesi

Ortakdaki darbeler en geniş darbeler olduğunda, tepe gerilimi kaynağın gerilimine eşit bir çıkış sağlar ve sinüs-kodlu PWM'deki en yüksek gerilim oluşur.

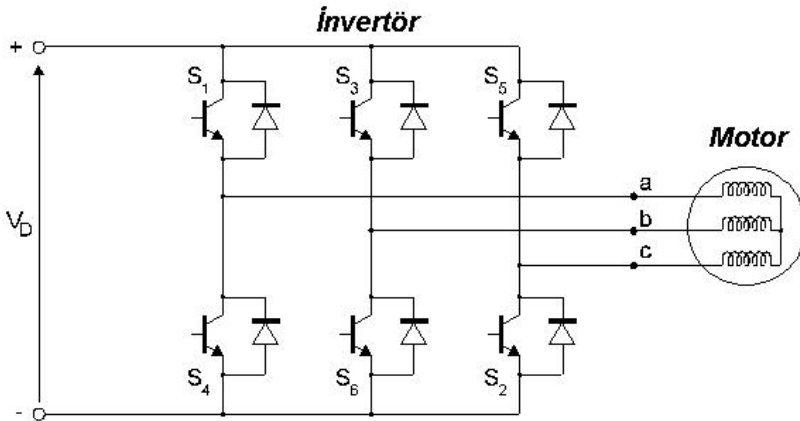
Modülasyon indeksi, tepe AC çıkışının DC kaynağına oranı olarak tanımlanır. Bu nedenle, modülasyon indeksi 1 olduğunda en yüksek çıkış gerilimi elde edilir. Sinüs biçimli referans gerilime bir miktar bozulma eklenerek tam sinüs-PWM'den vazgeçilerek DC kaynağından daha yüksek gerilimlerin elde edilmesi mümkündür. Bu, dalga biçiminin pozitif ve negatif kısımlarının merkezine yakın darbelerin bazılarının ortadan kaldırılmasını sağlar ve darbe

düşürme olarak adlandırılır. Maksimumda, tam sinüs-PWM ile elde edilebilen gerilimin % 127'sine kadar olan tepe değerine sahip kare dalgalı bir gerilim dalga biçimi elde edilebilir.

5.7.3 Üç-fazlı invertör

Üç-fazlı invertör, Şekil 5.24'te gösterilen üç invertör tipinden yapılabilir. Ancak, Şekil 5.32'de gösterildiği gibi 6-darbeli (üç-bacaklı) köprülü bir invertörün kullanılması daha ekonomiktir.

En basit biçimde, Şekil 5.33'te gösterildiği gibi, her bir bacak bir yarım-periyotta yüksek ve diğer yarım-periyotta düşük olarak anahtarlanarak ve aynı zamanda her bir fazın bir periyodun üçte biri kadar (120°) kaydırılması sağlanarak kare şeklinde bir çıkış gerilim dalga biçimi elde edilebilir. Sonuçta oluşan fazdan-faza gerilim dalga biçimi, genişlikleri her bir fazdaki anahtar periyodunun üçte ikisi kadar olan bir kare darbe serisinden oluşur. Oluşan gerilim dalga biçimi *Sözde-Kare Dalga (QSW)* gerilimi olarak adlandırılır. Bu basit teknik, eski Gerilim Kaynağı İnvörtörlerinde (VSI) kullanılmaktaydı, bu invertörler, invertör köprüsünde güdümlü-anahtarlamalı tristörleri kullanılmaktaydı. Sabit bir V/f oranı sağlamak için, DC bara geriliminin büyüklüğü, çıkış frekansına sabit bir oran sağlamak için doğrultucu köprüsü tarafından kontrol edilirdi. Bu teknik, bazen *Darbe Genlik Modülasyonu (PAM)* [*Pulse Amplitude Modulation*] olarak adlandırılırdı.

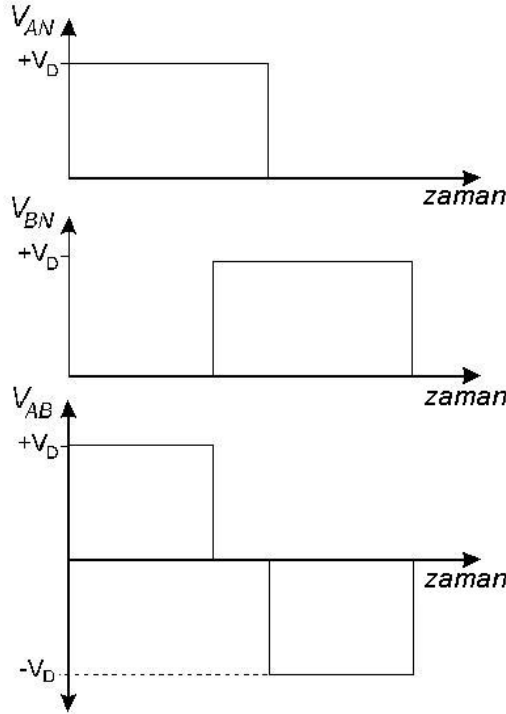


Şekil 5.32 – Kapi kontrollü anahtarları kullanan üç-fazlı invertör

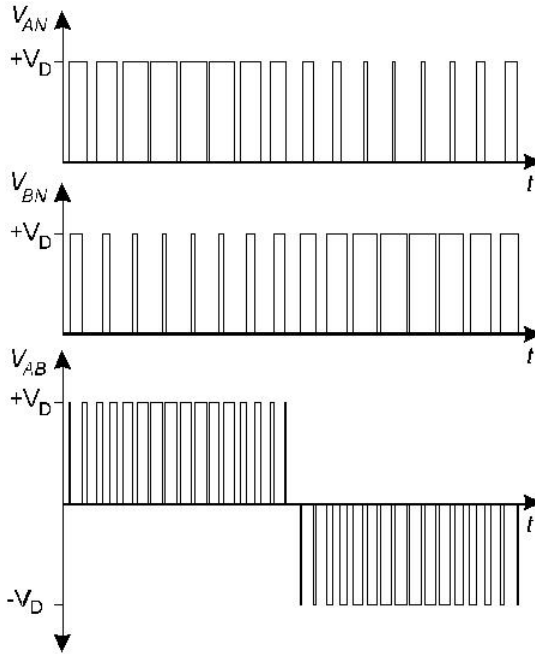
Üç-fazlı bir konvertörün çıkış gerilimi, frekansı temel frekansın üç katı olan harmonikler hariç olmak üzere, tek-fazlı kare dalgaya çok benzeyen harmonik bir spektruma sahiptir. Üç-fazlı çıkışa sahip bir invertörde, bu, 3., 9., 15., 21., vb. harmoniklerin

çıkarılmış olduğu anlamına gelir. Belirli bir frekansın 3-fazlı Değişken Gerilimli AC çıkışını oluşturmak için, Şekil 5.32'deki üç çıkış terminali a, b ve c'deki V_{AN} , V_{BN} , V_{CN} gerilimleri, hem gerilimi hem de frekansı kontrol etmek için modüle edilebilir. Periyot boyunca darbe-genişlik oranı, sinüs-kodlu PWM algoritmasına göre değiştirilebilir.

Fazdan-faza V_{AB} gerilimi oluşturulduğunda, mevcut modülasyon stratejisi, yarım periyot boyunca sadece pozitif darbeleri ve bunu takiben yarım periyot boyunca negatif darbeleri verir, bu durum, *sürekli darbe polaritesi* olarak adlandırılır. *Sürekli darbe polaritesinin*, en düşük seviyede harmonik bozulum sağladığı ve bozulumun büyük bir kısmının, invertör kırıyıcı frekansının iki katında olduğu gösterilebilir. Fazdan-faza gerilimin tüm periyodu boyunca hem pozitif hem de negatif darbelerin olması (*sürekli olmayan darbe polaritesi*) invertör kırıyıcı frekansında bozuluma neden olur, bu durum, akım bozulumu üzerinde daha fazla etkiye sahip olacaktır ve modülasyon sisteminin kötü olduğunun bir işaretidir.



Şekil 5.33 – Sözde kare dalgalı modülasyon çıkış dalga biçimleri



Şekil 5.34 – Üç-fazlı sinüs kodlu PWM'in çıkış gerilim dalga biçimi

AC frekans konvertör imalatçıları, akım dalga biçimini geliştirmek için daha etkin PWM algoritmalarının geliştirilmesi üzerinde çalışmaya devam etmektedir. Temel hedef, motorda harmonik kayıp oluşturmayan tamamen sinüs biçimli bir akımdır. Mikroişlemcilerin hızının ve gücünün artmasının sonucu olarak, bu daha gelişmiş PWM algoritmalarının gerçekleştirilmesi mümkün hale gelmiştir. En tanınmış PWM invertörleri, 2 kHz ilâ 16 kHz arasındaki modülasyon frekanslarında çalışabilir ve harmonik kayıplar için motorun beyan değerlerinin düşürülmesi sorununun üstesinden gelmeye yetecek seviyede sinüs biçimli bir akım dalga biçimi üretir. Ancak, PWM frekanslarının yüksek olmasının sonucu olarak, yeni bir sorun ortaya çıkmıştır. Bu sorun, motor kablo kapasitansından dolayı yüksek frekanslı kaçak akımının oluşmasıdır. Bu konu, 4. Bölüm'de ele alınmaktadır.

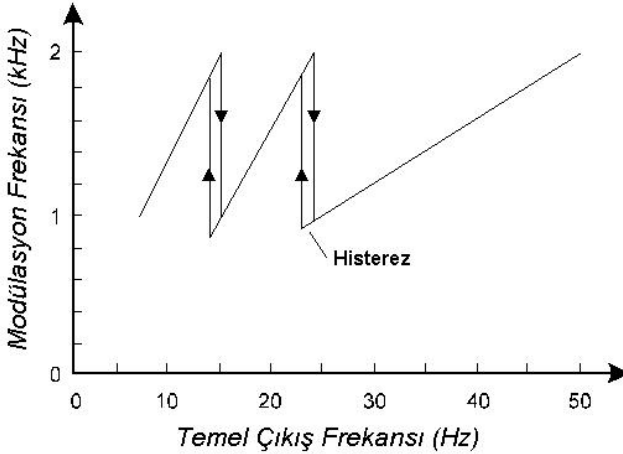
Piyasada kullanılan invertörlerde, bir motorun durağan durumdan sabit V/f hız oranında beyan hıza ivmelenmesinin gerektiği durumda yerine getirilmesi gereken ve birbiriyle çatışan iki gereksinim mevcuttur.

- Düşük akım bozulumu sağlamak için, invertörün mümkün olan en yüksek anahtarlama hızında çalıştırılması gereksinimi

- Senkronizasyonun sağlanmasının önemi

Özellikle daha eski PWM invertörleri için her iki gereksinimi de sağlamanın ortak bir yolu, invertör anahtarlama frekansının maksimum değerin yaklaşık olarak yarısından başlamasıdır. Hız artırıldıkça, senkronizasyonu sağlamak için testere-dişi taşıyıcı frekansı orantılı olarak artırılır. Taşıyıcı frekansı maksimum değerine ulaştığında, çıkış frekansında daha fazla artış sağlamak için yarı değerine anahtarlanır.

Böylece invertör, frekansta sürekli bir artış ve sonra da değişim noktasında ani bir azalma gösterir. Invertör duyulabilir aralıkta çalışıyorsa, o zaman bir arabanın vitesle hızlanması sırasında motordan gelen sese benzer bir ses duyulacaktır, bu nedenle, bu durum 'vites-değiştirme' olarak adlandırılır.



Şekil 5.35 – Modülasyon frekansının adım adım değiştirilmesi (Vites-değiştirme)

Motor hızı maksimumdan sıfıra düştüğünde, taşıyıcı frekansında da benzer bir değişiklik meydana gelir. Ancak, değişim noktaları farklı olmalıdır, aksi halde, değişim frekanslarının birinde bulunan bir invertör, üst ve alt taşıyıcı frekansları arasında sürekli olarak salınım yapabilir. Şekil 5.35'te gösterildiği gibi kontrol sisteminde histerez kullanılarak bu sorun önlenir.

5.8 Kapı kontrollü güç elektroniği cihazları

Son on yılda belli sayıda kapı-kontrollü cihaz üretilmiştir, bu cihazlar, Değişken Hızlı AC Sürücüler için Güç İnvertörlerindeki iki-durumlu anahtarlar olarak kullanılmaktadır.

Bu cihazlar, iki ana bileşen grubuna ayrılabilir:

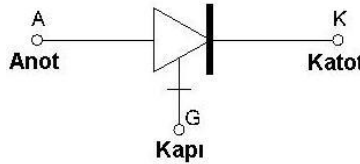
Kapı Sinyalli Tristör (GTO) ve Alan Kontrollü Tristör (FCT) gibi Tristör teknolojisini esas alan cihazlar

- Bipolar Jonksiyonlu Transistörler (BJT-tek kutuplu jonksiyonlu transistör), Alan Etkili Transistörler (FET) ve Yalıtımlı Kapılı Bipolar Transistörler (IGBT) gibi transistör teknolojisini esas alan cihazlar

5.8.1 Kapı-sinyalli Tristör (GTO)

Bir *GTO Tristörü*, tristör ailesinin başka bir üyesidir ve hem fiziksel görünüm hem de performans açısından *normal bir tristöre* çok benzerdir. GTO Tristörün önemli bir ilâve özelliği, *kapıya negatif bir akım darbesi uygulanarak faal olmayan hale getirilebilmesidir*. GTO Tristörleri, yüksek akım ve gerilim kapasitesine sahiptir ve özellikle kendinden-anahtarlamının gerekli olduğu durumda, büyük konvertörler için yaygın olarak kullanılır.

Simge



İdeal

İleri Yönde İletimde: Direnç yok

İleri Yönde Bloklamada: Kayıp yok (kaçak akım yok)

Ters Yönde Bloklamada: Kayıp yok (kaçak akım yok)

Faal hale getirme/faal olmayan hale getirme süresi: Çok kısa

GTO'nun performansı, normal bir tristörün performansına benzerdir. Kapı terminaline pozitif bir darbe uygulanana kadar ileri yönde iletim bloklanır. GTO faal hale geldiğinde, tristör gibi davranır ve akımın tutma akımından daha büyük olması şartıyla, kapı darbesi ortadan kalksa bile iletim yapmaya devam eder. GTO'nun ileri yöndeki gerilim düşüşü tipik olarak 3 V ilâ 5 V arasında olup daha yüksek seviyededir. Kilitleme ve tutma akımları da biraz daha yüksek seviyededir.

GTO'nun önemli bir farkı, kapı terminaline negatif bir akım darbesi uygulanarak faal olmayan hale getirilebilmesidir. Bu önemli özellik, GTO'nun kendinden-anahtarlama invertör devrelerinde kullanılmasına imkân verir. Faal olmayan hale getirme darbesi büyüktür ve güç devresindeki akımın büyüklüğüne bağlıdır. Tipik olarak, kapı akımı anot akımının % 20'sine eşit olmalıdır. Sonuç olarak, tetikleme devresi oldukça büyük olmalıdır ve bu, ilâve komütasyon kayıplarına neden olur. Tristöre benzer şekilde, ters kutuplanmış yönde ya da tutma akımı belirli bir seviyenin altına düşüğünde iletim bloklanır.

GTO özel bir tristör tipi olduğu için, yukarıda belirtilen diğer tristör karakteristiklerinin çoğu, GTO için de geçerlidir ve burada tekrar edilmeyecektir. GTO'nun mekanik yapısı, normal bir tristöre çok benzerdir, daha küçük birimler için saplamalı tipler ve daha büyük birimler için disk tipleri daha yaygındır.

GTO Tristörleri, genelde yüksek gerilim ve akım uygulamaları için kullanılır ve Güç Transistörlerine göre aşırı-akıma ve aşırı-gerilimlere karşı daha dayanıklı ve toleranslıdır. GTO'lar, 2,500 Amp ve 4,500 Volt'a kadar olan beyan değerlere sahip olabilir. GTO'ların temel dezavantajları, ileri yöndeki gerilim düşüşünün ve GTO'yu faal olmayan hale getirmek için gerekli olan kapı akımının yüksek seviyede olmasıdır.

Tüm *Güç Elektroniği Konvertörleri* genelde elektronik bir Kontrol Devresi tarafından kontrol edilir, kontrol devresi, güç elektroniği cihazlarının faal/faal olmama durumunu kontrol eder ve dış kontroller için ara yüz sağlar. Yakın zamana kadar, tüm kontrol devreleri İşlevsel Yükselteçleri (Op-Amp) kullanmaktaydı ve analog tipteydi. Modern kontrol devreleri, genelde mikro işlemcileri kullanmaktadır ve *sayısal* tiptedir.

5.8.2 Alan Kontrollü Tristörler (FCT)

GTO'nun, yüksek güçlü, kendinden-anahtarlama konvertör uygulamaları için bir süre daha yaygın bir şekilde kullanılabilmesinin muhtemel olmasına rağmen, kapının gerilim tarafından kontrol edildiği yeni tristör tipleri geliştirilmektedir. *Faal hale getirme işlemi*, kapıya *pozitif bir gerilim* uygulanarak ve *faal olmayan hale getirme işlemi*, kapıya *negatif bir gerilim* uygulanarak kontrol edilir. Bu gibi bir cihaz, *Alan Kontrollü Tristör (FCT)* olarak adlandırılır, bu isim, *Alan Etkili Transistörle* (FET) olan benzerliği vurgular. FCT'nin sonunda GTO'nun yerine geçmesi beklenmektedir çünkü hem maliyeti hem de kayıpları azaltılabilen çok daha basit bir kontrol devresine sahiptir. Küçük FCT'ler kullanılmaya başlanmıştır ve önümüzdeki yıllarda

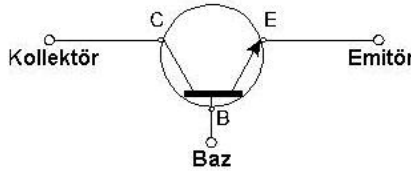
daha küçük cihazların kullanılmaya başlanması beklenmektedir. Ucuz bir cihazın geliştirilmesi, beklenenden daha yavaş bir şekilde gerçekleşmiştir.

5.8.3 Bipolar Jonksiyonlu Güç Transistörleri (BJT)

Transistörler geleneksel olarak yükseltme cihazları olarak kullanılmıştır. Transistörü ileten hale getirmek için taban akımı kontrol edilir. Yakın zamana kadar, transistörler, güç elektroniği uygulamaları için geniş çaplı olarak kullanılmamaktaydı. Bunun temel nedenleri, kontrol devreleri ve koruyucu devrelerin daha karmaşık ve daha pahalı olması ve transistörlerin yüksek güç uygulamaları için uygun olmamasıydı. Ayrıca, transistörler, tristörler gibi aşırı yük kapasitesine sahip değildi ve transistörlerin sigortalar tarafından korunması mümkün değildi.

1980'lerin ortalarında, *Bipolar Jonksiyonlu Transistör* (BJT) olarak adlandırılan NPN transistör, güç elektroniği konvertörlerinde kullanılan ucuz bir cihaz haline geldi. Modern BJT'ler, genelde kapalı bir modül içinde verilmektedir ve her bir BJT *Kollektör* (C) ve *Emitör* (E) olarak adlandırılan iki *güç terminaline* ve *Baz* (B) olarak adlandırılan üçüncü bir *kontrol terminaline* sahiptir.

Simge



İdeal

İleri Yönde İletimde: Direnç yok

İleri Yönde Bloklamada: Kayıp yok (kaçak akım yok)

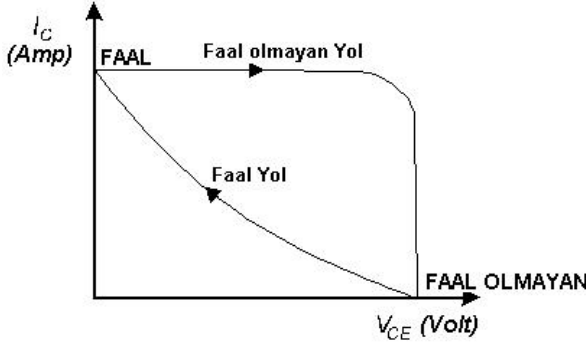
Ters Yönde Bloklamada: Kayıp yok (kaçak akım yok)

Faal hale getirme/faal olmayan hale getirme süresi: Çok kısa

Transistör, yapısal olarak *iki-durumlu* (faal/faal değil) bir cihaz değildir. Bir transistörü, *bloklama durumundan* (yüksek gerilim, alçak akım) *iletim durumuna* (alçak gerilim, yüksek akım) anahtarlamanın gerekli olduğu bir güç elektroniği devresindeki şartlara uygun hale getirmek için, transistör, uç durumlarda kullanılmalıdır, başka bir deyişle tamamen faal ya da tamamen faal olmayan duruma getirilmelidir. Koruyucu devreler, transistörün Güvenli Çalışma Bölgesinin dışında çalışmasını önleyecek şekilde düzenlenmelidir.

Transistör faal hale getirildiğinde aşırı-akıma karşı koruma ve transistör faal olmayan hale getirildiğinde aşırı-gerilime karşı koruma sağlamak için, uygun kontrol ve koruma devreleri geliştirilmiştir.

Faal hale getirildiğinde, kontrol devresi, transistörün satüre olmamasını sağlamalıdır, aksi halde yüksek seviyede gücün harcanması gerekli olacaktır. Uygulamada, kontrol sisteminin, ucuz, verimli ve güvenilir olduğu kanıtlanmıştır.



Şekil 5.36 – İndüktif yüklü bir güç BJT'sinin anahtarlama eğrisi

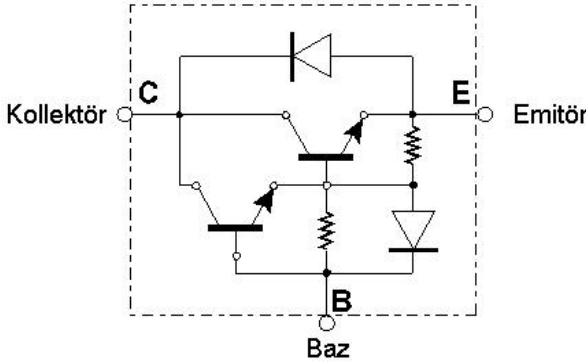
Transistörler ters gerilimlerde çalışamaz. BJT'ler invertör köprülerinde kullanıldığında, transistörler, seri ya da paralel bağlı ters bir diyotla yüksek seviyede ters gerilimlere karşı korunmalıdır. Aynı sebepten, transistörler, ters gerilimlere dayanması gerekli olan doğrultucu köprülerinde kullanılmaz.

Genel olarak, transistörler, tristörlere göre aşırı yüklerle ve 'ani darbelere' [:spike] karşı daha dayanıksızdı ve toleransları daha düşüktü. Konvertörler için genelde *GTO tristörleri* tercih edilirdi. Transistörlerle önceden yaşanan sorunlara rağmen, AC konvertörleri, 415 V'ta 150 kW civarına kadar güç beyan değerlerinde güç transistörleri kullanmıştır.

Transistörlerin temel avantajı, baz terminalinden faal ve faal olmayan hale getirilebilmeleridir, bu da, transistörlerin *kendinden anahtarlama invertör devreleri* için uygun olmasını sağlar. Bu, tristörler için gerekli olanlardan daha basit güç ve kontrol devrelerinin oluşmasını sağlar.

Maalesef, bir transistörün baz yükseltme faktörü oldukça (genelde 5 ilâ 10 kat) düşüktür böylece transistörün tetikleme devresi, kontrol devresinden istenen baz tetikleme akımını azaltmak için, yardımcı bir transistör tarafından sürülmelidir. Yardımcı transistör sürücülerin emitör akımı, Darlington bağlantısını kullanarak ana transistörün bazını sürer. Şekil

5.37’de, çiftli bir Darlington bağlantısı gösterilmektedir, ancak yüksek güç uygulamaları için, gerekli yükseltme faktörünü elde etmek için ard arda iki yardımcı transistör (*üçlü Darlington*) kullanılabilir. Toplam yükseltme faktörü, yaklaşık olarak iki (ya da üç) transistörün yükseltme faktörlerinin çarpımına eşittir.

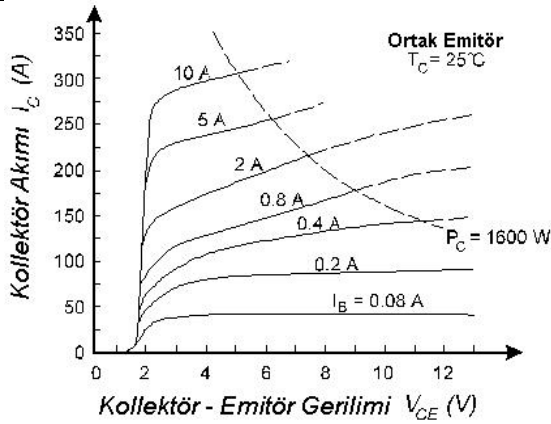


Şekil 5.37 – Darlington güç transistörü

VSD uygulamalarında kullanılan transistörler, genelde dirençler ve anti-paralel koruma diyodu gibi diğer gerekli bileşenler de bulunacak şekilde entegre bir devre olarak imal edilir ve 3-terminalli bir modüle yerleştirilir. Modül, ısı alıcısına doğrudan monte edilmeye uygun yalıtımlı bir tabana sahiptir. Bu modül tipi, bazen *Darlington Güç Transistörü modülü* olarak da adlandırılır.

Şekil 5.37’de gösterildiği gibi, anti-paralel diyot, transistörleri ters kutuplanmadan korur. Uygulamada, entegre yapıdaki bu diyot yavaştır ve invertör uygulamaları için yeterince hızlı olmayabilir. Sonuç olarak, konvertör imalatçıları, transistörleri korumak için hızlı bir dış diyot kullanmaktadır.

Aşağıdaki şekilde, beyan değerleri 1400 V, 160 Amp olan ve dahili bir serbest-dönen diyoda sahip Toshiba MG160 S1UK1 üçlü Darlington güç transistörünün satürasyon karakteristikleri gösterilmektedir.



Şekil 5.38 – 160 Amp'lik Bipolar Jonksiyonlu Transistörün (BJT) karakteristikleri

Kontrol devrelerinin tamamen farklı olmasından dolayı, BJT'nin güç devre performansı, GTO tristöre benzerdir. Kapı terminaline pozitif bir akım uygulanana kadar ileri yönde iletim bloklanır ve gerilim uygulandığı sürece iletme devam edecektir. İleri yönde iletim sırasında, güç devresinde kayıplara neden olan ileri yönde gerilim düşüşü de meydana gelir. Kapıya negatif bir akım uygulanarak BJT faal olmayan hale getirilebilir.

Bipolar Jonksiyonlu Transistörün (BJT) temel avantajları şunlardır:

- Güç kontrol yeteneğinin gelişmiş olması
- İleri yönde iletim gerilim düşüşünün düşük olması

BJT'lerin temel dezavantajları şunlardır:

- Anahtarlama sürelerinin nispeten uzun olması
- Güvenli Çalışma Bölgesinin daha kötü olması
- Akım kontrollü kapı sürücü şartlarının karmaşık olması

Bipolar Jonksiyonlu Güç Transistörlerinin, maksimum beyan değerleri 300 Amp ve 1400 Volt civarında olabilir. Daha yüksek güç beyan değerleri gerektiren VSD'ler için, invertör devresinde genelde GTO'lar kullanılır.

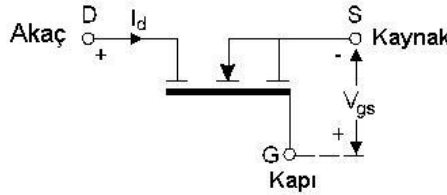
5.8.4 Alan Etkili Transistör (FET)

Alan Etkili Transistör (FET), özellikle yüksek hızlı anahtarlama uygulamaları için uygun olan özel bir transistör tipidir. Temel avantajı, kapısının *akım kontrollü* değil *gerilim kontrollü*

olmasıdır. Yüksek frekansta performans gösterebilecek gerilim kontrollü bir direnç gibi davranmaktadır.

FET'ler, MOSFET olarak bilinen özel bir yapıya da sahip olabilir. MOS, Metal Oksit Silisyum'un kısaltmasıdır. MOSFET, *Kaynak (S)*, *Akçe (D)* (*Drain*) ve *Kapı (G)* olarak adlandırılan üç terminale sahip bir cihazdır. Bu üç terminal, NPN transistördeki emitör, kollektör ve kapıya karşılık gelir.

Simge



İdeal

İleri Yönde İletimde: Direnç yok

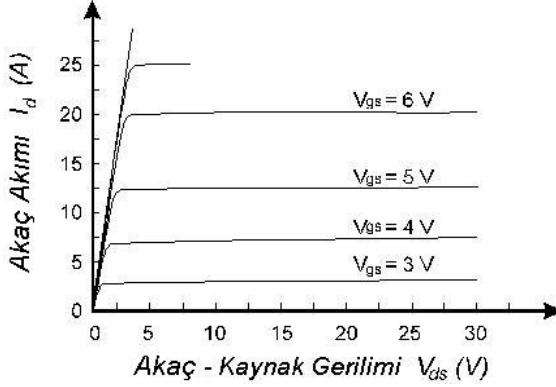
İleri Yönde Bloklamada: Kayıp yok (kaçak akımı yok)

Ters Yönde Bloklamada: Kayıp yok (kaçak akımı yok)

Faal hale getirme/faal olmayan hale getirme süresi: Çok kısa

FET'in toplam performansı, kapının *gerilim kontrollü* olması hariç olmak üzere bir Güç Transistörüne benzerdir. Kapı gerilimi düşükse (tipik olarak 2 volttan küçükse), ileri yönde iletim bloklanır. Kapı terminaline pozitif bir V_{gs} gerilimi uygulandığında, FET iletim yapar ve FET'teki akım, hızlı bir şekilde kapı gerilimine bağlı olan bir seviyeye çıkacaktır. Kapı gerilimi uygulandığı sürece, FET iletim yapacaktır. Kapı terminaline uygulanan gerilim ortadan kaldırılarak ya da bu gerilim negatif yapılarak FET faal olmayan hale getirilebilir.

MOSFET'ler çoğunlukla taşıyıcı cihazlardır, bu nedenle, anahtarlama süreleri uzun değildir. Anahtarlama süreleri çok kısa olduğu için, *anahtarlama kayıpları düşük seviyededir*. Bunun sonucu olarak, MOSFET'ler, yüksek frekanslı anahtarlama uygulamaları için uygundur. Alan Etkili Transistörün tipik bir performans karakteristiği aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 5.39 - Alan Etkili bir Transistörün tipik karakteristiği

Başlangıçta, yüksek hızlı anahtarlama AC konvertör uygulamaları için önemli bir şart değildi. *Darbe Genişliği Modülasyonlu* (PWM) invertörlerin geliştirilmesiyle birlikte, yüksek frekans anahtarlama, düzgün bir çıkış akım dalga biçimi sağlamak için istenen bir özellik haline gelmiştir. Sonuç olarak, güç FET'leri yakın zamana kadar geniş çaplı olarak kullanılmamaktaydı.

Halen, FET'ler sadece küçük PWM frekans konvertörlerinde kullanılmaktadır. 50 voltta 100 Amp civarından 1000 voltta 5 Amp'a kadar olan beyan değerlerinin sağlanması mümkündür ancak VSD uygulamaları için, MOSFET'lerin 300-600 Volt aralığında olması gereklidir. *MOSFET'lerin* avantajları ve dezavantajları, *BJT'lerin* avantajların ve dezavantajlarının tam tersidir.

Güç *MOSFET'inin* temel avantajları şunlardır:

- Yüksek hızlı anahtarlama özelliğine sahiptir (10 nsaniye ilâ 100 nsaniye)
- Koruma devreleri nispeten basittir.
- Düşük kapı akımına sahip, nispeten basit bir gerilim kontrollü kapı sürücüsüne sahiptir.

Güç *MOSFET'inin* temel dezavantajları şunlardır:

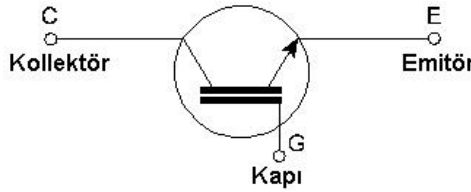
- Güç kontrol kapasitesi nispeten düşüktür.
- İleri yöndeki gerilim düşüşü nispeten yüksek seviyededir, bu da, GTO'lardakinden ve BJT'lerdekinden daha yüksek seviyede kayıplara neden olur ve daha yüksek güç uygulamalarında MOSFET'lerin kullanımını sınırlar.

5.8.5 Yalıtımlı Kapılı Bipolar Transistör (IGBT)

Yalıtımlı Kapılı Bipolar Transistör (IGBT), Bipolar Jonksiyonlu Transistör ve MOSFET teknolojilerinin en iyi özelliklerini birleştirmek için tasarlanmıştır. IGBT'nin yapısı MOSFET'in yapısına benzerdir, iletkenlik modülasyonu sağlamak için ilâve bir katmana sahiptir, bu, güç BJT'sinin iletim geriliminin düşük seviyede olmasının nedenidir.

IGBT'nin yapısı, MOSFET'in ters iletim yapmasını önler ancak önceki cihazların istenmeyen bir şekilde çalışmasına neden olabilen parazitik bir tristöre sahiptir. IGBT cihazı, ileri yönde iyi bir şekilde bloklama yapabilir ancak ters yönde bloklama özelliği çok sınırlıdır. Daha küçük bir çip sağlayan güç BJT'sinden ya da MOSFET'ten daha yüksek akım yoğunluklarında çalışabilir. IGBT üç terminalli bir cihazdır. BJT terminalleri kullanıldığında, güç terminalleri *Emitör (E)* ve *Kollektör (C)* olarak adlandırılırken, MOSFET terminolojisi kullanıldığında, kontrol terminali *Kapı (G)* olarak adlandırılır.

Simge



İdeal

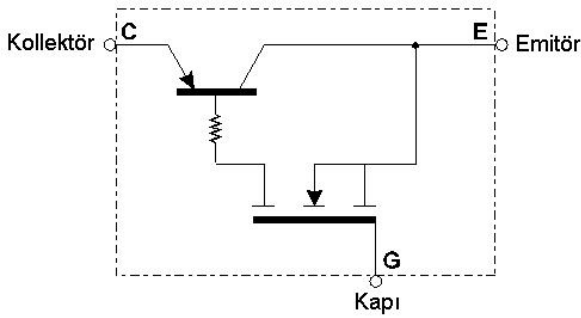
İleri Yönde İletimde: Direnç yok

İleri Yönde Bloklamada: Kayıp yok (kaçak akımı yok)

Ters Yönde Bloklamada: Kayıp yok (kaçak akımı yok)

Faal hale getirme/faal olmayan hale getirme süresi: Çok kısa

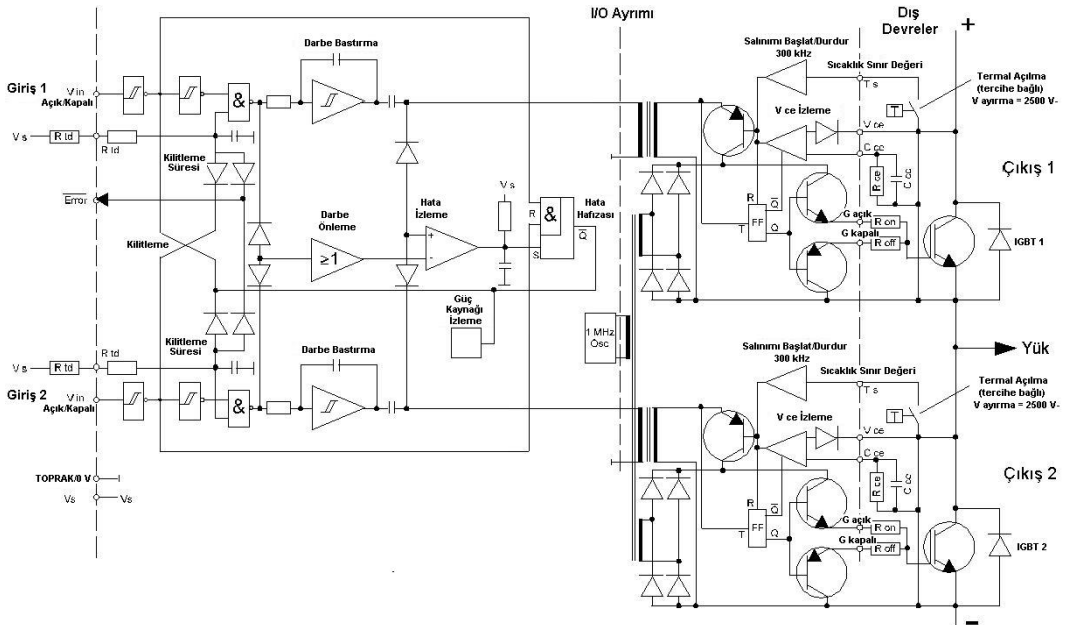
Şekil 5.40'da gösterilen IGBT'nin elektriksel eş değer devresi, *IGBT'nin, MOSFET sürücülü ve Bipolar PNP transistörlü* Darlington transistör konfigürasyonuna benzer hibrit bir cihaz olarak kabul edilebileceğini göstermektedir. Yukarıdaki devre simgesi, cihazın bir NPN transistör ile ilgili olduğunu ifade etse de, bunun ille de doğru olduğu düşünülmemelidir.



Şekil 5.40 – IGBT'nin eş değer devresi

Kapı giriş karakteristikleri ve kapı sürücü şartları, bir güç MOSFET'inin şartlarına çok benzerdir. Eşik gerilimi tipik olarak 4 V'tur. Çalışmaya başlamak için, 10 V ilâ 15 V gereklidir ve çalışma 1 μ s içinde başlar. Gerekli olduğunda, negatif bir sürücü gerilimi kullanılarak kapatma süresi hızlandırılabilir. IGBT cihazları, daha kısa anahtarlama süresine sahip olacak şekilde üretilebilir, ancak buna karşılık olarak ileri yöndeki gerilim düşüşü artacaktır.

Aşağıda Şekil 5.41'de IGBT sürücü devresine ilişkin bir örnek gösterilmektedir. Bu devre, yayılma süreleri 1 μ s'yi geçmeyecek şekilde 10 kHz anahtarlama frekansındaki 1000 V'luk bir kaynağa bağlanmış iki IGBT'yi sürebilir.



Şekil 5.41 – Semikron SKHI 20 Hibrit Çiftli IGBT ya da Çiftli MOSFET Sürücünün devre diyagramı

IGBT'ler, halen 1500 V'ta birkaç amperden 500 A civarına kadar beyan değerlerine sahip olabilir. Bu cihazlar, 380V/415V/480V'ta 500 kW civarına kadar beyan değerlerine sahip 3-fazlı AC VSD'ler için uygundur. Bu cihazlar, 100 kHz'e kadar olan anahtarlama frekanslarında kullanılabilir. AC Değişken Hızlı Sürücüler için Bipolar Jonksiyonlu Transistörler (BJT'ler) IGBT'lerin yerini büyük ölçüde almıştır.

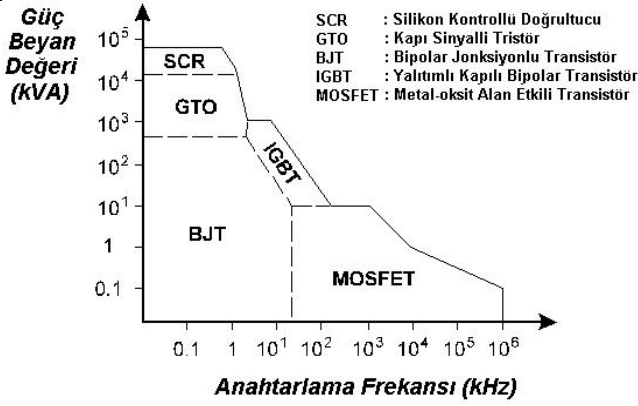
Yalıtımlı Kapılı Bipolar Transistörün (IGBT) temel avantajları şunlardır:

- Güç kontrol özellikleri gelişmiştir.
- İleri yönde iletim gerilim düşüşü 2 V ilâ 3 V arasındadır, bu gerilim düşüşü, benzer beyan değerlerine sahip bir BJT'ninkinden daha yüksek, MOSFET'inkinden daha düşüktür.
- Bu gerilim, sıcaklık arttıkça *artar*, bu da, cihazın, termal kararsızlık tehlikesi olmaksızın paralel olarak daha kolay bir şekilde çalışmasını sağlar.
- Anahtarlama hızı yüksektir.
- Nispeten basit gerilim kontrollü kapı sürücüyeye sahiptir.
- Kapı akımı düşüktür.

IGBT'nin bazı diğer önemli özellikleri şunlardır:

- IGBT'de ikinci bir delinme meydana gelmez, böylece iyi bir *Güvenli Çalışma Bölgesi* sağlanır ve anahtarlama kayıpları düşüktür.
- Sadece küçük bastırıcılar gereklidir.
- Elektrotlar arası kondansatörler, bir MOSFET'te olduğu kadar önemli değildir, böylece Miller geri beslemesi azalır.
- MOSFET'te olduğu gibi IGBT'de de hiçbir diyot yoktur ve ters yönde iletim gerekli olduğunda, ayrı bir diyot anti-paralel olarak bağlanmalıdır, örneğin, gerilim kaynağı invertörlerinde olduğu gibi.

Kapı-kontrollü güç elektroniği cihazlarının anahtarlama hızlarının ve güç beyan değerlerinin karşılaştırılması

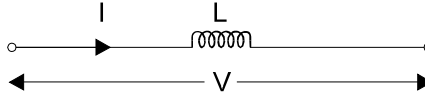


Şekil 5.42 – Kapı kontrollü cihazların performans sınır değerleri

5.9 Diğer güç konvertörü devre bileşenleri

İndüktans

Simge



İdeal

İndüktans: sabit (lineer)

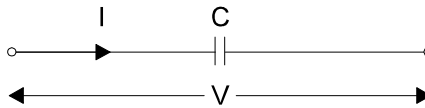
Direnç: sıfır (kayıp yok)

Denklemler

$$V = L \frac{dI}{dt} \quad X_L = j 2\pi f L$$

Kapasitans

Simge

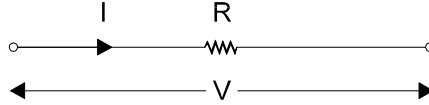


İdeal

Kapasitans: sabit (lineer)
Direnç: sonsuz (kayıp yok)

Denklemler

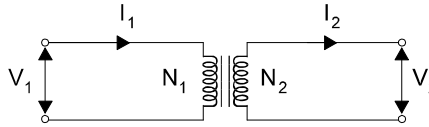
$$I = C \frac{dV}{dt} \quad X_c = \frac{1}{j 2\pi f C}$$

Direnç**Simge****İdeal:**

Direnç: sabit (lineer) ve indüktans ve kapasitans yok

Denklemler

$$V = R I$$

Transformatör**Simge****İdeal**

Mıknatıslanma akımı ihmal edilebilir.
Kayıp ve kapasitans yok.

Denklemler

$$I_1 \times N_1 = I_2 \times N_2 \quad \frac{V_1}{N_1} = \frac{V_2}{N_2}$$

6 AC Konvertör ve Motorun Korunması

6.1 Giriş

Değişken Hızlı AC Sürücülerin korunması, VSD'nin aşağıdaki iki bileşeninin korunmasını kapsar.

- AC konvertör
- Elektrik motoru

Modern sayısal Değişken Hızlı AC Sürücülerde, koruma fonksiyonlarının çoğu, AC konvertörün kontrol sisteminde elektronik olarak implement edilmektedir. Ancak, etkin olması açısından, akımın ya da sıcaklığın doğrudan izlenmesi için dış algılayıcıların kullanılması gereklidir. Hasarın ana nedeni, motordaki ve konvertördeki sıcaklık artışıdır. Sıcaklık artışı genelde yüksek seviyede akan akımdan kaynaklandığı için, aşırı yük ve kısa devre korumasının implement edilmesi için yaygın olarak kullanılan metot, akım algılama metodudur.

6.2 AC frekans konvertör koruma devreleri

Sayısal AC Frekans Konvertörleri genelde AC konvertörü, çıkış kablolarını ve motoru korumak için çok sayıda koruma sistemine

sahiptir. Ancak, AC konvertör kontrol sisteminde bulunan koruma, besleme kablosundan ve doğrultucudan oluşan *konvertör giriş kısmı gibi tarafları KORUMAZ*. Ana *Dağıtım Kartında* (DB) ya da *Motor Kontrol Merkezinde* (MMC) üst tarafta kısa devre ve topraklama-hata koruması sağlanmalıdır.

Uygun koruma, aşağıdaki cihazlar vasıtasıyla sağlanmalıdır:

- Kalıplanmış Mahfazalı Devre Kesiciler [*Moulded Case Circuit Breaker*] (MCCB)
- Yeterli hızı sağlamak için, bu cihazların akım sınırlayıcı tipte olması gereklidir.
- Yüksek Kırılma Kapasiteli [*High Rupturing Capacity*] (HRC) Sigortalar
- Sigortalar, genelde güvenlik ayırma işlemi için kullanılan ana ayırma anahtarının bir parçası olarak kullanılır.

Çıkış tarafında iyi-tasarımlanmış modern bir VSD, kendini konvertörün motor tarafındaki yaygın arızaların (kısa-devre, topraklama hatası, termal aşırı yük, vb.) neredeyse tümünden koruyacaktır. VSD'ler ayrıca motor için de termal aşırı yük koruması sağlar.

Konvertörde hasara neden olacak hatalardan biri, motor terminallerinin elektrik şebekesine hatalı bir şekilde bağlanmasıdır. İnvertördeki ters bağlanmış diyotlardan geçen demeraj akımı, invertörde hasara neden olacaktır.

Genelde modern sayısal AC konvertörlerin çoğunda aşağıdaki koruma özellikleri mevcuttur. Bu koruma özellikleri, Şekil 6.3'te de özetlenmiştir.

- AC Giriş düşük-gerilim [*under-voltage*] koruması
- DC Bara [*bus*] düşük-gerilim koruması
- AC Giriş aşırı-gerilim koruması
- DC Bara aşırı-gerilim koruması
- Çıkış aşırı-akım (kısa-devre) koruması
- Çıkış topraklama-hata koruması
- Isı alıcı aşırı-sıcaklık koruması
- Motor termal aşırı-yük koruması

6.2.1 AC ve DC Düşük-Gerilim koruması

Düşük-gerilim koruma sistemi, giren 3-fazdaki gerilimi ve DC bara gerilimini izler ve aşağıda belirtilen arızalara karşı gerekli işlemleri yapar.

Besleme geriliminin seviyesi, güç sisteminin yüksek gerilim seviyelerinde meydana gelen bir arızadan dolayı düşerse, konvertörün bu durumdan zarar görme riski çok düşüktür. Bir PWM konvertörün diyotlu giriş doğrultucusu, sıfır ilâ aşırı gerilim kapama noktası [*tripping point*] arasındaki herhangi bir gerilimde güvenli bir şekilde çalışabilir. Bu nedenle, güç devresi için güç kaynağının düşük-gerilim sağlaması gerçekte bir sorun oluşturmaz.

Düşük-gerilim koruması, temelde çeşitli güç kaynaklarının tümünün, gerekli özelliklere göre çalışmasını sağlamak için gereklidir.

Bir güç kaynağının çıkış gerilim düzenlemesi bozulursa, aşağıdaki durumlar meydana gelebilir:

- DC bara şarj röleleri çalışmayabilir.
- Mikroişlemci belirsiz bir çalışma durumuna geçebilir.
- Ana güç anahtarlarına ilişkin sürücü devreleri, anahtarlama cihazının uygun bir şekilde faal ya da faal olmayan hale getirilmesini sağlamak için gerekli olan gerilimi ve akımı kaybedecektir.
- Çalıştırma akımı yeterli seviyede değilse, bir güç cihazı satüre olabilir ve lineer bölgede çalışmaya başlayabilir, bu durumda kayıplar artacaktır.
- Yeterli ters kutuplanma yoksa, güç cihazı yavaş kapanacak ya da hiç kapanmayacaktır. Her iki durumda da, güç elektroniği anahtarları arızalanacaktır.

Bir VSD'deki düşük-gerilim koruması çeşitli şekillerde gerçekleştirilebilir.

AC besleme gerilimi kaybı

AC güç kaybı, üç AC hat gerilimi izlenerek ve bu gerilim değerleri önceden ayarlanmış bir kapama noktasıyla karşılaştırılarak tespit edilebilir. AC kaynağındaki düşük-gerilimler, kaynağın tamamen bozulmasından ya da kısa süreli bir gerilim çukurundan kaynaklanabilir.

Konvertör kontrol devrelerine ilişkin güç beslemesi, Anahtar Modundaki bir Güç Kaynağından (SMPS) alındığı için, besleme gerilim kaybı gerçekleşir gerçekleşmez konvertörün hemen durdurulması gerekmez. Gerekli ise, konvertör, başlangıç olarak DC baradaki büyük bir kondansatörden enerji alarak çalışmaya devam edebilir. DC bara gerilimi düşmeye başladıkça, motorun, mekanik yükün inerşiası tarafından sürülen bir endüksiyon jeneratörü gibi davranmasını sağlamak için çıkış frekansı azaltılabilir. Bu durum, motorun dönmesi durana kadar bir süre daha devam ettirilebilir.

Alternatif olarak, kontrol devresi, AC besleme gerilimi kaybı gerçekleşir gerçekleşmez kapanacak şekilde programlanabilir. AC besleme kaybının meydana gelmesi durumunda da genelde kontrol lojğinde bir bit değiştirilerek kapanma gerçekleştirilebilir.

DC Bara gerilim kaybı

DC gerilimi, DC bara gerilimini önceden ayarlanmış minimum gerilim seviyesiyle karşılaştıran bir komparator devresi (donanım ya da yazılım) tarafından izlenebilir. DC bara gerilimi bu seviyenin altına düştüğünde, konvertör kapatılabilir. Bu kapanma seviyesi, tipik olarak en düşük beyan giriş gerilimi eksi % 15'e ayarlanır. Örneğin, VSD, 380 V - 460 V $\pm$ % 10 beyan değerine sahipse, belirtilen en düşük çalışma seviyesi, 342 V AC'dir, eş değer DC gerilimi 485 V DC'dir. DC bara kapanma noktası, tipik olarak 485 V DC - % 15'e ayarlanır, bu, 411 V DC'ye eşittir.

Bu ana DC bara kapanma noktasına ilâve olarak, münferit modüllerin bazıları bazen bağımsız olarak kapatılır. Örneğin, her bir sürücü modülü, anahtarlama öncesi yeterli baz ya da kapı sürücü geriliminin olmasını sağlamak için, kendi düşük-gerilim algılama devresine sahip olabilir. Bunlar kapatılırsa, ana işlemciye, lokal cihaz arızasının meydana geldiğini belirten bir sinyal döndürülür. Bu lokal düşük-gerilim kapanma işlemleri, genelde sadece transistör sürücü devreleri gibi kritik modüllerde kullanılır.

6.2.2 AC ve DC Bara Aşırı-Gerilim koruması

Belirli bir seviyede aşırı-gerilime maruz kalan tüm elektriksel bileşenler eninde sonunda arızalanacaktır. Değişken hızlı bir AC sürücüde, aşağıdaki nedenlerden dolayı aşırı-gerilimler oluşabilir:

- Elektrik şebekesindeki yüksek seviyede gerilimler
- Yüksek inerşiyalı bir yükün hızını çok hızlı bir şekilde azaltmaya (frenlemeye) çalışırken, endüksiyon jeneratörü gibi davranan (bağlanılan) motor tarafından üretilen yüksek seviyede gerilimler

Bir AC konvertörde, DC bara kondansatör grubu, DC baraya bağlanan güç kaynağı modülü ve ana güç elektroniği anahtarlama cihazları, yüksek gerilimlere karşı en düşük toleransa sahip cihazlardır.

Kondansatör grubu genelde seri ve paralel olarak bağlanan münferit kondansatörlerden oluşur. Kondansatörler seri olarak bağlandığında, gerilim paylaşırma mükemmel olmayacaktır ve bu nedenle,

maksimum gerilim, münferit beyan değerlerin toplamından daha küçük olacaktır.

Örneğin, 400 V'luk iki kondansatör seri olarak bağlanırsa, anma beyan değeri 800 V DC'dir. Ancak, gerilimin eşit bir şekilde paylaştırılamamasından dolayı, gerçek güvenli çalışma gerilimi sadece 750 V DC olabilir. Bu değer, kondansatör kaçak akımının ve her bir kondansatörle paralel olarak bağlanan paylaştırma direncinin değerine bağlı bir değer olacaktır. Paylaştırma direncinin değeri ne kadar küçükse, paylaştırma işlemi o kadar iyi olacaktır ancak sürücü kayıpları da artacaktır.

DC baradaki tepe gerilim, elektrik şebekesi faz geriliminin 1,414 katıdır. Maksimum beyan kondansatör gerilimi 750 V DC ise ve elektrik şebekesi geriliminde artı % 10 değişim olabileceği hesaba katılırsa, giriş gerilimine ilişkin uygulama sınır değeri 480 V AC'dir.

Doğrultucudaki ve invertördeki *yarı iletken anahtarlama cihazları*, genelde 1200 V DC maksimum beyan gerilime sahiptir. Bu, maksimum kondansatör gerilim beyan değerinin oldukça üstünde gibi görünse de, kapanma sırasında bir cihaz üzerindeki gerilim, özellikle arıza şartlarında DC bara geriliminden çok daha yüksek seviyede olacaktır. Bu, devredeki kaçak indüktanstan kaynaklanmaktadır. Bu gerilim tepe değerleri, 400 V civarına yaklaşabilir, bu nedenle, arızadan önceki bara gerilimi, sürücü tasarımına ve güç cihazlarının beyan değerlerine bağlı olarak genelde maksimum 800 V DC civarında sınırlandırılmalıdır.

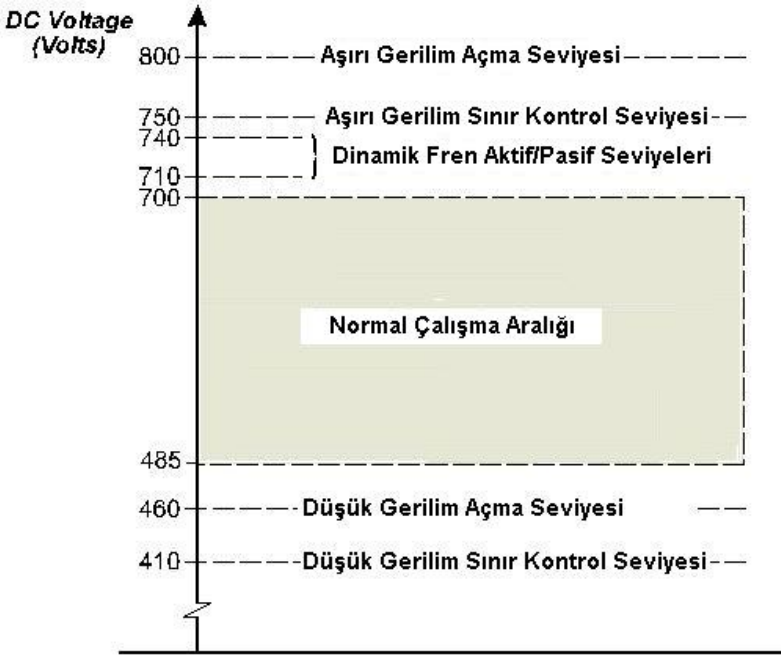
Analog konvertörlerde, aşırı-gerilim koruması, genelde sabit bir ayar noktasında çalışan basit bir komparator devresini kullanan bir donanım koruma sistemidir.

Modern sayısal konvertörlerde, aşırı-gerilim koruması genelde mikroişlemci tarafından sağlanmaktadır. Bunun gerçekleşmesi mümkündür çünkü kondansatörlerin filtreleme etkisinden dolayı DC bara gerilimi nispeten yavaş bir şekilde değişmektedir.

Mikroişlemci tarafından kontrol edilen VSD'lerde, işlemci de belirli bir derecede aşırı-gerilim kontrolü sağlayabilir. Birçok DC bara aşırı-gerilimi, yüksek inerşialı motor yüklerinin yavaşlama süre ayarının hatalı yapılması nedeniyle oluşur. Dönen bir yükün doğal yavaşlama süresiyle karşılaştırıldığında yavaşlama süresi çok düşük bir değere ayarlanırsa, motor, bir endüksiyon jeneratörü gibi davranacak ve güç, motordan DC baraya iletilecektir. DC bara gerilimi, aşırı-gerilim kapama seviyesine ulaşılan kadar artabilir. Birçok VSD şu seçeneğe sahiptir: kontrolör, ayarlanmış olan yavaşlama süresini geçersiz kılacak ve aşırı-gerilim kapanması önlenecektir. DC bara geriliminin, tipik olarak 750 V DC gibi 'güvenli' yüksek bir gerilime

çıkmasına izin verilir ve yavaşlama hızı, gerilim, 800 V DC kapama seviyesinin altında tutulacak şekilde kontrol edilir.

Düşük-gerilim ve aşırı-gerilim koruması normalde DC barada izlenir çünkü bu, hem invertör hem de kontrol devreleri için DC gücün kaynağıdır. Tipik çalışma bölgeleri ve koruma kapama seviyeleri, Şekil 6.1'de gösterilmektedir.



Şekil 6.1 – Tipik DC barası düşük-gerilim ve aşırı-gerilim koruma seviyeleri

6.2.3 Çıkış aşırı-akım koruması

Aşırı-akım korumasının amacı, konvertörün motor tarafındaki fazdan-faza kısa devreler sırasında ana güç yarı iletkenlerinin (IGBT'lerin, BJT'lerin, MOSFET'lerin, GTO'ların, vb.) arızalanmasını önlemektir. Diyotlardan ve SCR'lerden farklı olarak, I^2t karakteristiklerinden dolayı birçok güç anahtarının korunması için sigortaların kullanılması uygun değildir.

En etkin koruma metodu, akım, belirli bir ayar noktasını geçtiğinde, tüm invertör anahtarlama cihazlarının faal olmayan hale getirilmesidir. Koruma seviyesi, güvenli çalışma bölgesinin karakteristiğine bağlıdır. Bu maksimum arıza akımı, genelde sürücünün maksimum beyan değerini belirleyen unsurdur. Tipik olarak, kapatma akımı, sürücü akım beyan değerinin % 200'ü civarındadır, akım, % 150'de ya da bazen % 180'de sınırlanır.

VSD'nin etkin beyan değerini en yüksek seviyeye çıkarmak için, akım *artış hızı* (di/dt) kontrol edilirse, kapanma akımına daha yakın bir değerde çalışmak mümkündür. Bu, yarı iletken güç cihazı ile VSD'nin çıkış terminalleri arasına bir şok bobini konularak gerçekleştirilebilir. VSD çıkışında bir kısa devre meydana gelirse, akımın değişim hızı (di/dt) bara gerilimi/indüktans değerine eşittir:

$$di/dt = V_{\text{bara}} / L_{\text{çıkış}}$$

Örneğin, 600 V DC bara gerilimi ve 100 μH çıkış şok bobini ile, akım artış süresi 6 Amp/ μsaniye ile sınırlı olacaktır. Kapanma akımı seviyesi 200 Amp olan 50 kW'luk bir AC konvertörün çıkışındaki bir kısa devre için, kapama noktasına ulaşmak 33,3 μsaniye sürecektir.

Akım geri beslemesindeki ve koruma devrelerindeki *yayılma gecikmesi* değerlendirilirken, bu durum önemlidir. Yayılma gecikmesi, gerçek akımın kapama noktasına ulaşması ile güç cihazlarının kapanması arasında geçen süredir. Bu gecikme süresi, akım ölçüm cihazında, sinyalin geçtiği yükselteçlerde, komparatorun kendisinde, güç cihazı sürücü devresinde ve gerçek güç cihazında mevcuttur.

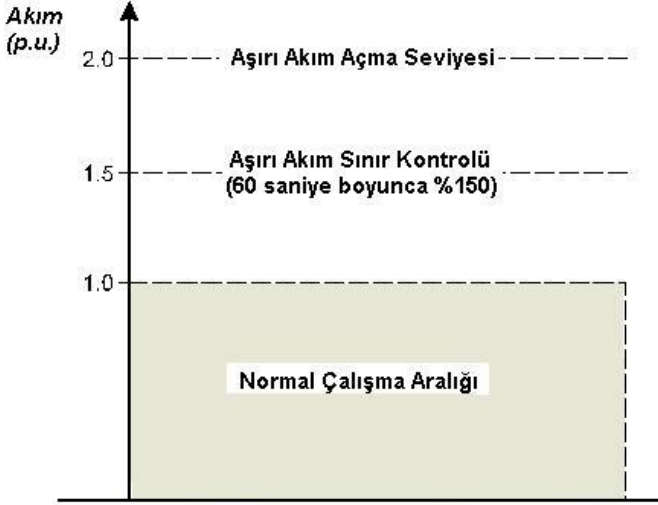
Yayılma gecikmesi ve akım değişim hızı biliniyorsa, güç cihazlarının faal olmayan hale geldiği durumdaki gerçek cihaz akımı tahmin edilebilir. Örneğin, toplam yayılma gecikmesi 3 μs ve di/dt 6 Amp/ μs ise, gerçek cihaz akımı, cihazlar gerçekten de faal olmayan hale geldiğinde, akım kapama noktasından 18 Amp daha yüksek olacaktır. Bu, akım aşması [*current overshoot*] olarak adlandırılır.

Daha büyük çıkış şok bobinleri bu aşma değerini azaltacaktır ve başka bazı avantajlara da sahiptir ancak bu şok bobinleri kayıplara neden olur, çok yer kaplar ve pahalıdır. Bu nedenle, aşırı-akım koruma devresindeki yayılma gecikmesinin en düşük seviyeye indirilmesi önemlidir. Sonuç olarak, genelde yüksek bant genişliğine sahip akım geri beslemesi ve yükselteçleri kullanılır. Mikroişlemciye yayılma gecikmelerini en düşük seviyeye indirmek için, *aşırı-akım korumasının*, sayısal bir VSD'de bile *tamamen donanımsal olarak gerçekleştirilmesi yaygındır*.

Aşırı-akım olayları, motor yük torkundaki ani artışların sonucu olarak ya da yüksek motor ivmelenme periyotları sırasında da meydana gelebilir. Akımdaki bu artışlar nispeten yavaş bir şekilde gerçekleştirilir ve akımın, mikroişlemci tarafından izlenmesine ve kontrol edilmesine imkân verir. Akımdaki artış, tipik olarak beyan konvertör akımının % 150'sine kadar olan ve önceden ayarlanmış bir değerle sınırlandırılabilir. Akım sınırlama kontrol sistemi, çıkış frekansını, motor torkunu azaltacak şekilde düzenler. Aşırı-akım,

yüksek ivmelenme hızından kaynaklanıyorsa, akım artış hızı azaltılarak akım azaltılır. Aşırı-akım geçici motor aşırı-yükünden kaynaklanıyorsa, çıkış hızı azaltılabilir.

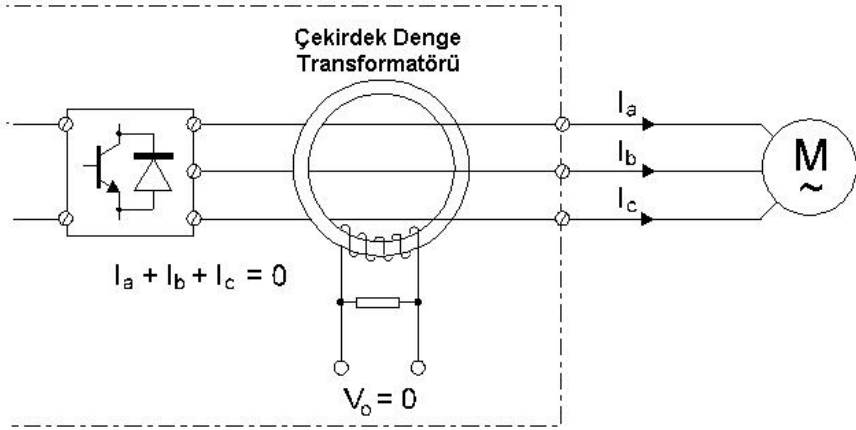
Tipik aşırı-akım koruma ve akım sınır seviyeleri, Şekil 5.2'de özetlenmiştir.



Şekil 6.2 – Tipik aşırı-akım koruma seviyeleri ve akım sınır ayarları

6.2.4 Çıkış topraklama-hatasına karşı koruma

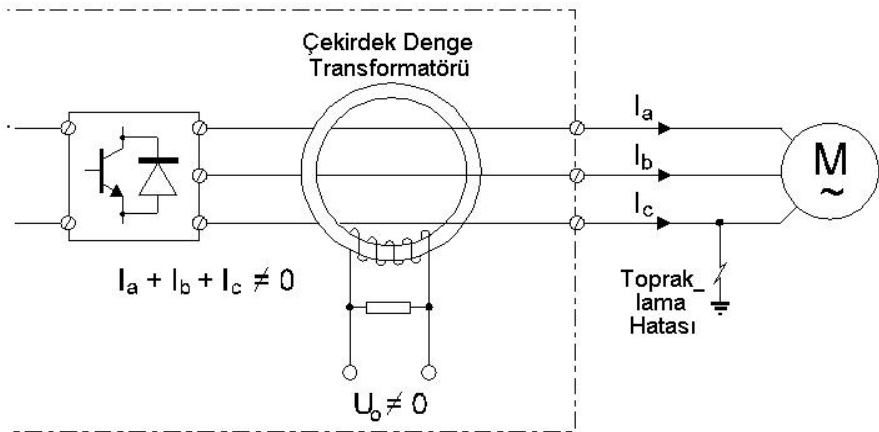
Topraklama hatasına karşı koruma, fazla toprak arasında ve VSD'nin çıkış kısmında bir kısa-devre olup olmadığını kontrol edecek ve varsa, konvertörü hemen kapatacak şekilde tasarlanmıştır. Bu korumanın, genelde insanları elektrik şokuna karşı koruması amaçlanmaz çünkü kapama noktaları, kabul edilebilir güvenlik sınır değerlerinden çok daha yüksek bir değere ayarlanır. Bu özellik, temel olarak AC konvertörün korunması içindir.



Şekil 6.3 – Topraklama-hatasına karşı koruma için çekirdek denge akım transformatörü; normal çalışma şartları; hiçbir topraklama-hatası yok.

Topraklama-hatasına karşı koruma, genelde çekirdek denge akım transformatörü vasıtasıyla implement edilir. Bu, DC bara kablolarının ya da çıkış motor faz kablolarının geçtiği halka biçimindeki manyetik bir çekirdekten yapılır. Düşük akımlı sekonder bir sargı, halka etrafına sarılır ve koruma devresine bağlanır. Çekirdekten geçen akımların tümünün vektör toplamı sıfıra eşitse, çekirdekteki akı sıfıra eşit olacaktır. Net akı değerinin sıfır olması, çalışmanın normal sürdüğünü gösterir.

Bir topraklama hatası varsa ve toprağa giden bir akım yolu mevcutsa, çekirdek denge transformatöründen geçen akımların toplamı bundan sonra sıfıra eşit olmayacaktır ve Şekil 6.4'te gösterildiği gibi çekirdekte akı olacaktır.



Şekil 6.4 – Topraklama-hatasına karşı koruma sağlamak için kullanılan çekirdek denge akım transformatörü; net akım sıfıra eşit değildir.

Bu akı, sekonder koruma sargısında bir akım oluşmasına neden olacaktır, bu akım, bir yük direnci kullanılarak gerilime dönüştürülür. Bir komparator devresi arızayı tespit eder ve tüm güç cihazı sürücülerini faal olmayan hale getirir. Tipik olarak, koruma kapama seviyesi 5 Amp civarındadır.

Topraklama hata kapama devresi için ayar noktasının belirlenmesine dikkat edilmelidir. Tüm PWM VSD'lerde, motor akım dalga biçiminin yüksek frekanslı bileşenlerinden ve toprağa giden motor kablolarının kapasitansından dolayı, toprağa her zaman bir miktar kaçak akım akacaktır. Yüksek kaçak akımları bazen topraklama-hatasına karşı korumanın uygulanmasına neden olabilir.

6.2.5 Isı alıcının aşırı sıcaklığa karşı korunması

Aşırı-sıcaklık koruması, genelde konvertördeki çeşitli bileşenlerin aşırı ısınmasını önlemek ve özellikle güç yarı iletkenlerinin jonksiyon sıcaklığını (150° ile sınırlıdır) sınırlamak için uygulanır. Bu sınır değerlere ulaşılmamasını sağlamak için, ısı alıcı sıcaklıkları gerçek tasarıma bağlı olarak genelde 80°C ilâ 90°C 'nin altındaki sıcaklıklarda tutulur. Sonuç olarak, birçok ısı alıcı, maksimum sıcaklıklara ulaşıp ulaşılmadığını tespit eden sıcaklık algılayıcılarıyla ya da anahtarlarla donatılmıştır.

Güç kaynakları ya da cihaz sürücü modülleri gibi diğer modüller, kendi münferit aşırı-sıcaklık koruma sistemine sahip olabilir. Sıcaklığın cihaz beyan değerlerini (genelde $\pm 70^{\circ}\text{C}$) aşmasını önlemek için elektronik kontrol cihazlarının yakınındaki çevre sıcaklığının ölçülmesi yaygın bir uygulamadır.

Maliyeti düşük olan sürücüler, spesifik bir sıcaklıkta çalışan bimetalik sıcaklık anahtarlarını (Mikroterm) kullanabilir. Ancak birçok modern sürücü, gerçek sıcaklık değerini mikroişlemciye geri beslemek için *silisyum jonksiyonlu sıcaklık algılayıcılarını* kullanmaktadır.

Bu metodu kullanarak, işlemci, gerçek kapanmadan önce operatöre bir uyarı mesajı gönderebilir. Daha gelişmiş VSD'lerde, motor hızının azaltılması ya da PWM anahtarlama frekansının düşürülmesi gibi bazı düzeltme işlemleri otomatik olarak gerçekleştirilebilir.

6.2.6 Motorun aşırı termal yükten korunması

Hemen hemen tüm modern VSD'lerde, motorun aşırı termal yükten korunması için kullanılan bazı sistemler mevcuttur.

En basit koruma biçimi, aşırı termal yük ya da termistör rölesi gibi bir dış cihaz etkin hale getirildiğinde, sürücüyü faal olmayan hale getiren sayısal bir giriş kullanmaktır. Birçok VSD imalatçısı, bir termistör algılayıcısından doğrudan giriş alacak şekilde VSD imal etmektedir,

bu nedenle, motor sargılarına sadece termistörlerin yerleştirilmesi gereklidir ve böylece termistör rölesine gerek kalmaz. Girişler, normalde, terminaller arasına bir direnç bağlı olacak şekilde teslim edilir, bu direnç, işletmeye alma sırasında çıkarılmalıdır. Kurulum talimatlarını (el kitaplarını) okumayan kimseler için, bu durum genelde bazı sorunlara neden olur.

Sayısal VSD'lerdeki motor aşırı termal yük koruması için en yaygın olarak kullanılan metot, mikroişlemci kontrol programının bir parçası olarak *motor koruma modeliyle birlikte akım algılama metodunu* kullanmaktır. Motor akımının ölçülmesi, diğer amaçlar için de gereklidir, bu nedenle, motor akımının ölçülmesi, motorun termal modellemesini gerçekleştirmek için küçük bir adımdır. Model, motordaki termal şartları sürekli bir şekilde tahmin edebilir ve sınır değerler aşılsa, VSD'yi faal olmayan hale getirir.

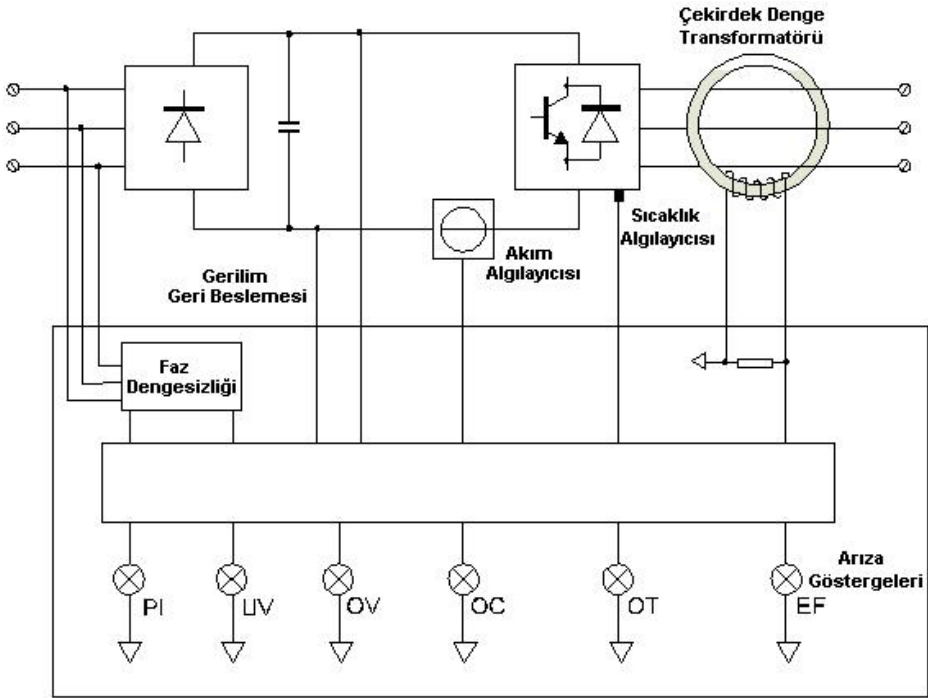
En basit motor modeli, motor akımı zamana göre toplanarak ötektik bir termal aşırı yük rölesinin simüle edilmesidir. Bu basit metot, iyi motor koruması sağlamaz çünkü motorun soğutma ve ısınma zaman sabitleri hıza göre değişir.

Belirli bir zaman periyodunda, VSD'lerdeki motor koruma özellikleri, farklı hızlardaki shaft fanı soğutma performansı modellenebilecek şekilde motor frekansını bir girdi olarak kullanarak daha gelişmiş hale gelmiştir. En gelişmiş VSD'ler, beyan hız, akım, gerilim, güç faktörü ve güç gibi motor parametrelerinin girilmesini gerektirir, bu da, kapsamlı bir termal motor modelinin yazılımda implement edilmesini mümkün kılar ve herhangi bir doğrudan sıcaklık ölçme cihazı kullanılmaksızın mükemmel motor koruması sağlar.

Bu motor modellerinin doğru ve etkin olması için, gücün kesilmesi durumunda, önceki şartların uçucu-olmayan bellekte saklanması gereklidir. Bu, EEPROM'lar ve NVPRM'lar gibi uçucu-olmayan hafıza çipleri ya da kondansatör gibi basit cihazlar vasıtasıyla sağlanabilir.

6.2.7 Genel koruma ve teşhis

Aşağıdaki blok diyagramı, modern sayısal PWM AC konvertörlerinde yaygın olarak kullanılan koruma özelliklerinin bir özetidir. Yukarıda belirtilmiş olduğu gibi bu koruma özelliklerinin çoğu, uygun algoritmalar kullanılarak yazılımda implement edilir. Temel istisnâî durumlar, aşırı-akımdan ve topraklama-hatasından korunmadır, bu koruma sistemleri, yarı iletken güç cihazını korumaya yetecek kadar hızlı olabilmelerini sağlamak amacıyla implement edilir.



Şekil 6.5 – VSD koruma blok diyagramına ilişkin örnek

6.3 Operatör bilgisi ve arıza teşhisi

Değişken Hızlı Modern Sayısal Sürücülerin (VSD'lerin) tümü, normal çalışma sırasındaki kontrol ve durum parametrelerine ilişkin ve arıza şartlarındaki teşhis parametrelerine ilişkin iç bilgilere erişimi sağlayan bir *operatör ara yüz modülüne* sahiptir. Bu modül, bazen *İnsan Ara Yüz Modülü* (HİM) ya da buna benzer bir isme sahiptir. *HİM*, kontrol devresini sorgulamak için LED ya da LCD ekranına ve bazı düğmelere sahiptir. Bu operatör ara yüzü, VSD ayar parametrelerini belirlemek ve değiştirmek için de kullanılabilir.

İlâve olarak, modern VSD'ler, bu parametrelerin, uzak konumlara *sayısal seri veri haberleşmesi* vasıtasıyla iletilmesine de imkân verir. Seri haberleşmeyle ilgili bazı ayrıntılı bilgiler, 8. Bölüm'deki kurulumla ilgili kısımda yer almaktadır. Haberleşme ara yüzü, genel bir otomasyonlu kontrol sisteminin parçası olarak uzaktan *Programlanabilir Lojik Kontrolörden (PLC)* kontrole imkân verir. Teşhis bilgisi, seri ara yüz üzerinden merkezi bir kontrol merkezine iletilebilir, böylece operatör, mevcut bilginin avantajını tamamıyla kullanabilir.

İçte ya da dışta bir arıza meydana geldiğinde, kontrol devresi, arıza tipini kaydeder, bu da, arıza nedeninin tespit edilmesine ve sorunun çözülmesine yardımcı olur. Mikroişlemci kontrollü modern

konvertörler, hem iç hem de dış çalışma şartlarını izleyen ve kullanıcı tarafından programlanan şekilde arızalara müdahale eden bir teşhis sistemini kullanmaktadır. Kontrol sistemi, meydana gelen olayların sonradan analiz edilmesi için, arıza bilgisini uçucu-olmayan bellekte tutar. Bu özellik, *Arıza Teşhisi* olarak adlandırılır.

Üç tane operatör bilgi ve arıza teşhis seviyesi mevcuttur:

- *İlk seviye*, bir VSD'deki mevcut durum hakkında bilgi sağlar ve temel olarak ayar parametrelerine ve gerçek zamanlı çalışma parametrelerine ve çıkış gerilimi, çıkış akımı, çıkış frekansı, vb. gibi sayaç tarafından ölçülen bilgilere atıf yapar.
- *İkinci seviye*, koruma devrelerinin durumu hakkında teşhis bilgisi sağlar ve yukarıda açıklandığı gibi *dış arızaları* gösterecektir.
- *Üçüncü seviye*, arızalanan modüllerin tanımları gibi *iç arızaların* durumu hakkında teşhis bilgisi sağlar. Adanmış iç teşhis sistemleri, sadece yüksek performanslı VSD'ler de mevcuttur.

Aşağıda tipik iç parametrelere ve arıza şartlarına ilişkin kısa bir liste mevcuttur.

Modül	Parametreler ve Arıza Teşhisi
Güç Kaynağı	Güç Kaynağı Gerilimi, Akım ve Frekans
DC Bara	DC Link Gerilimi ve Akımı
Motor	Çıkış Gerilimi, Akım, Frekans, Hız, Tork, Sıcaklık
Kontrol Sinyalleri	Ayar Noktası, Süreç Değişkeni, Hata, Artış Süreleri
Durum	Koruma devreleri, modül arızaları, iç sıcaklıklar, fanların çalışması, anahtarlama frekansı, akım sınır değeri, motor koruması, vb.
Arıza Şartları	Güç cihazı arızası, güç kaynağının bozulması, sürücü devresinin arızalanması, akım geri beslemesinde arıza olması, gerilim geri beslemesinde arıza olması, ana kontrolörde arıza olması

Şekil 6.6 – *Tipik değişken hızlı sürücü parametre listesi*

İlk seviyede, birçok modern sayısal VSD, aşağıdakilerin durumları hakkında bilgi sağlar:

- Çalışma şartlarını tanımlayan tüm ayar parametreleri
- Başlat, durdur, olanaklı kıl, ileri/geri, aralıklı çalıştır, vb. gibi sayısal girdiler ve çıktılar

- Hız referansı, tork referansı, vb. gibi analog girdilerin durumu
- Çıkış frekansı, çıkış gerilimi, çıkış akımı, vb. gibi geniş bir bilgi dizisini kapsayan gerçek-zamanlı çalışma parametreleri

İkinci seviyede, bir arıza meydana geldiğinde ve VSD durduğunda, arızanın düzeltilmesi için teşhis bilgisinin kullanılması faydalı olur, böylece arıza süresi kısılır. Bu teşhis seviyeleri arasında her zaman bir miktar örtüşme vardır. Örneğin, motorun bağlı olmadığı durumda sürekli bir aşırı-akım kapanması, konvertör içinde arızalı bir güç elektroniği anahtarlama cihazının bulunduğu göstergesi olabilir. Şekil 6.7'deki çizelgede, VSD teşhis sistemi tarafından sağlanan en yaygın dış arıza göstergeleri ve bu arızalara neden olabilen iç ya da dış sorunlar gösterilmektedir.

Koruma	İç Arıza	Dış Arıza
Aşırı-gerilim	Yavaşlama hızı çok yüksek	Şebeke gerilimi çok yüksek Geçici aşırı-gerilim ani darbesi
Düşük-gerilim	Dahili güç kaynağı arızalı	Şebeke gerilimi çok düşük Gerilim çukuru var
Aşırı-akım	Güç elektroniği anahtarı arızalı Sürücü devresi arızalı	Motorda ya da kabloda kısa devre var
Termal Aşırı-yük	Kontrol devresi arızalı	Motor aşırı-yüklendi ya da durdu.
Topraklama Hatası	İç Topraklama hatası	Motorda ya da kabloda topraklama hatası
Aşırı-sıcaklık	Soğutma fanı arızalı Isı alıcı bloklanmış	Çevre sıcaklığı çok yüksek Mahfaza soğutması bloklanmış
Termistör Kapanması		Motor termistör koruması

Şekil 6.7 – Değişken hızlı sürücü teşhis çizelgesi

İç teşhis sistemi, sürücü içinde meydana gelmiş olan arızalar hakkında operatöre bilgi sağlayabilir. Bu, arıza şartlarına da ayrılabilir, örneğin, arızalı bir çıkış cihazı, anahtarlama arızaları, vb. arıza şartları, belirli bir modülün ya da cihazın arızalanmış olduğuna ya da normal bir şekilde çalışmadığına ilişkin göstergelerdir. Arıza

durumlarını izleyebilmek için, sürücü, iç arıza teşhis devrelerini içerecek şekilde tasarımlanmalıdır.

Örneğin, yarı iletken güç sürücüler, satürasyon gerilimini ölçen devreleri içerebilir, satürasyon gerilimi, her bir güç yarı iletkeni için, faal haldeki cihaz üzerinde ölçülen gerilimdir. Bu, güç anahtarındaki bir kısa devreyi tespit edebilir ve dış aşırı-akım kapanması gerçekleşmeden ya da sigortalar çalışmadan önce VSD kapatılabilir.

İç arıza durum izlemeyi implement etmek için, önemli ölçüde para ve çaba gereklidir ve sadece, yüksek performanslı birkaç VSD kapsamlı iç teşhis sağlar. Bu özellik, arıza arama için çok faydalı olabilir ancak çok pahalı olduğu için, sadece arıza süresinin kullanıcıya çok pahalıya mâl olduğu durumda bu özelliğin kullanılması anlamlı olur.

6.4 Elektrik motorunun korunması

Bir elektrik motorunun faydalı ömrü, aşağıdaki temel faktörlere bağlıdır:

- Stator sargıları & yalıtım, rotor sargıları & yalıtım ve ilgili dış bağlantılar gibi *elektrikli kısımlar*
- Yuvalı stator çekirdeği, yuvalı rotor çekirdeği, şaft, rulmanlar, gövde & uç siperler ve soğutma sistemi gibi *mekanik kısımlar*

Modern malzemeler kullanılarak, bu bileşenlerin çoğu, yüksek güvenilirlik seviyesine sahip olacak şekilde tasarlanabilir. Motorlarla ilgili tecrübelerle göre mekanik arızalar çok sık meydana gelmez ve en yaygın arıza nedenleri şunlardır:

- Motorun aşırı-yüklenmesi – akım, belirli bir süre boyunca beyan seviyeyi geçer.
- Sık sık çalıştırma, darbeli çalıştırma [*inching*], aralıklı çalıştırma [*jogging*] & karşı-akımla frenleme (yüksek akım)
- Tek fazlı çalıştırma ya da dengeli olmayan güç kaynağının kullanılması (yüksek akım)
- Durdurma (yüksek akım)
- Çevre sıcaklığının yüksek seviyede olması
- Soğutma sisteminin iyi çalışmaması

Yukarıdaki olağan dışı çalışma şartlarında, stator ve/veya rotor sargılarındaki sıcaklıklar aşırı yüksek seviyelere çıkabilir, bu da, sargıları birbirinden ve motorun topraklanmış gövdesinden ayırmak için kullanılan yalıtım malzemelerinin kötüleşmesine neden olur.

Bir motor sargısındaki sıcaklık artışı, temelde I^2R kayıplarından ya da bakır kayıplarından kaynaklanır, stator sargılarının direnci üzerinden

akmakta olan yük akımı (I) nedeniyle ısı oluşur. Tasarım sırasında, stator sargılarının kesit alanı, belirli bir maksimum akım akılda tutularak seçilir. Tasarımın hedefi, maksimum beyan yükte I^2R kayıplarını dengelemektir. Sargıda meydana gelen sıcaklık artışı, seçilen yalıtım malzemelerinin kritik sıcaklığının altında olacak şekilde yeterli havalandırma ya da soğutma sağlanmalıdır. AC motorlarda, stator akımı, mekanik yük torkuyla orantılıdır. DC motorlarda, armatür akımı, mekanik yük torkuyla orantılıdır. Sonuç olarak, her bir standart motor büyüklüğü, maksimum stator ya da armatür akım beyan değerlerine sahiptir.

Genelde yük akımı maksimum beyan değeri geçtiğinde sargı sıcaklığı aşırı yüksek seviyelere çıkar. Bu durum, *aşırı termal yükleme* olarak adlandırılır.

Bir sargıdaki sıcaklık, belirli kritik bir seviyenin üstüne çıktığında, yalıtım kalıcı olarak hasar görür. Kritik sıcaklık (kritik sıcaklığın üstünde kalıcı hasar meydana gelir) kullanılan yalıtım malzemesinin tipine bağlıdır. Standartlarda, farklı yalıtım tipleri, Sınıf-B, Sınıf-F, Sınıf-H, vb. gibi sınıflara ayrılır.

Örneğin, F-Sınıfı yalıtıma sahip bir sargıdaki sıcaklığın, yalıtım kalıcı hasar görmeksizin yaygın olarak belirtilen 40°C'lik maksimum çevre sıcaklığının 100°C üstünde maksimum 140°C'ye kadar güvenli bir şekilde yükselmesine izin verilir.

Sargının çalışma sıcaklığı 140°C'nin üstüne çıkarsa, yalıtım malzemelerinin karakteristikleri bozulmaya başlar. 155°C'nin üstünde, yalıtım kalıcı olarak hasar görecektir ve yalıtımın yararlı ömrü büyük ölçüde kısılacaktır. Yalıtım arızası, kısa devrelere ya da topraklama hatalarına neden olur, bu da, arızalı sargının değiştirilmesini ya da tamir edilmesini gerektirir. Yalıtım ömrünün uzun olması, özellikle, sürekli değişen yük şartları altında endüstrideki stratejik bölgelerde çalışan elektrik motorları için önemlidir. Maksimum beyan sıcaklığının sadece 10°C üstünde sabit bir şekilde uygulanan sıcaklık artışı, aşağıdaki eğride gösterildiği gibi, motorun faydalı ömrünü orijinal değerinin % 50'sine düşürebilir.

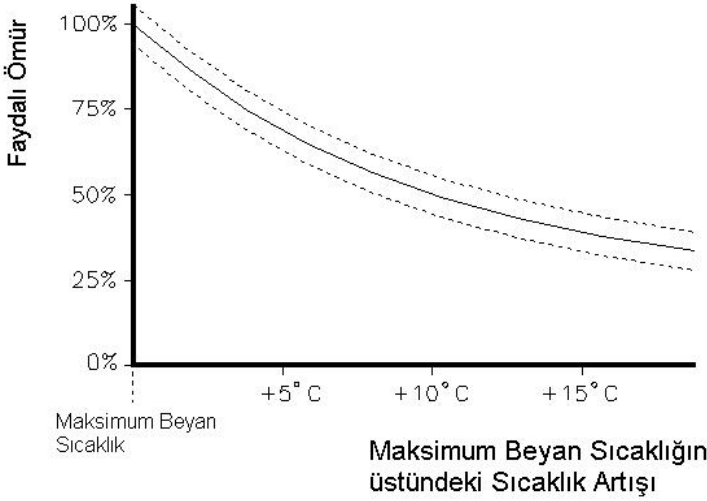
Bir motoru aşırı sıcaklıktan kaynaklanan yalıtım hasarından korumak için, potansiyel olarak zarar verici her türlü çalışma şartı, bir algılama cihazı tarafından tespit edilmeli ve yalıtımda hasar meydana gelmeden önce, motorun güç kaynağıyla bağlantısı kesilmelidir.

Elektrik motorlarının korunması için en yaygın olarak kullanılan cihazlar şunlardır:

- Motor sargılarına akan primer akımı sürekli olarak izleyen ve önceden ayarlanmış bir akım seviyesi aşıldığında bir Kapatma

işlemi başlatan, Termal Aşırı Yük Koruma Röleleri gibi *Akım Algılama Cihazları*

Motor sargılarındaki gerçek sıcaklığı sürekli olarak izleyen ve önceden belirlenmiş bir sıcaklık seviyesi aşıldığında bir Kapatma işlemi başlatan Termostatlar, Termistörler, Isıl Çiftler ve RTD'ler gibi *Doğrudan Sıcaklık Algılama Cihazları*.



Şekil 6.8 – Elektrik motorunun faydalı ömründe, sıcaklık artışının maksimum beyan değerinin üstüne çıkmasının etkisi

6.5 Termal aşırı yük koruması – akım algılayıcıları

Doğrudan olmayan bir şekilde ısınmış bimetalik tip ya da elektronik tip akım algılayan *Termal Aşırı Yük* (TOL) koruma röleleri, AC motorlardaki stator akımını ya da DC motorlardaki armatür akımını izler ve motorun aşırı-yüklenmiş olup olmadığını belirlemek için, bu bilgiyi kullanır. TOL röleleri, motorun termal karakteristikleriyle uyumlu olacak şekilde tasarlanmalıdır.

Daha küçük motorlarda, bimetalik tip TOL rölesi normalde motor kontaktörüyle birlikte monte edilir ve bir aşırı yük durumunu tespit ettiğinde açılır. İlâve özellikler, genelde faz arıza tespitini (tek-fazlı çalışma) kapsar. Bimetalik TOL rölesinin temel avantajı basit olması ve maliyetinin düşük olmasıdır.

Bimetalik TOL röleleri, tekrarlayan başlatıp durdurma işlemleri, aralıklı çalıştırma ve diğer periyodik görevler için yeterli koruma sağlamaz. Bunun sebebi, bimetalin ısınma ve soğuma zaman sabitinin aynı olmasıdır, oysa, tipik sincap kafesli bir motorun soğuma zaman-sabiti, ısınma zaman-sabitinin iki katıdır, bunun

sebebi, motor hareketsiz durumdayken, soğutma fanının durmasıdır. Tekrarlayan başlatıp durdurma ve aralıklı çalıştırma sırasında, bimetal, motordan daha hızlı bir şekilde soğur ve sonuç olarak yeterli termal koruma sağlayamaz.

Daha büyük ve aralıklı çalışan motorlar için, elektronik Motor Koruma Rölesinin kullanılması gereklidir, bu rölenin termal karakteristikleri ve ayarları, motorun termal karakteristiklerine ve ayarlarına daha uygun olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu durumda, aşırı-yük koruması, kısa-devrelere, topraklama hatalarına, durmaya, tek-fazlı çalışmaya, çok sayıda başlatıp durdurma işlemine, vb.'ye karşı da koruma sağlayan genel bir Motor Koruma Rölesinin parçasıdır. Değiştirilebilen çeşitli ayarlar, Motor Koruma Rölesinin, motorun tipine, büyüklüğüne ve uygulamasına uyumlu hale getirilmesine imkân sağlar. Modern mikroişlemci röleleri, ayrıca hat akımları, dengesiz akımlar, motorun termal kapasitesi, vb. gibi verileri saklayıp görüntüleyebilir ve bu bilgiyi, seri bir haberleşme linki üzerinden uzaktaki bir ana bilgisayara iletebilir.

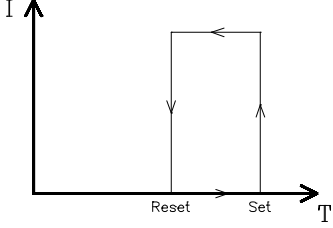
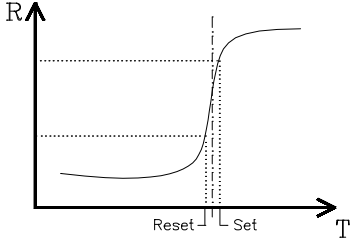
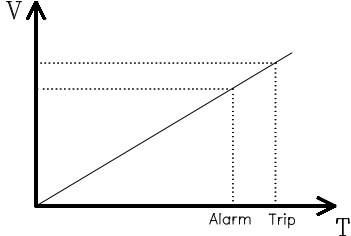
Stator ya da armatür akımını izleyen *Akım Algılayıcı* TOL koruma cihazlarının maliyetinin düşük olmasına ve oldukça iyi bir tepki süresine sahip olmasına rağmen, bu cihazlar, indirgenmiş soğutma, sınırlı ya da tam havalandırma kaybı ya da aşırı yüksek çevre sıcaklıkları gibi diğer çevresel şartları nadiren dikkate alır. Örneğin, değişken hızlı AC sürücülerde, motor hızı azaldıkça, standart bir AC motordaki şafta monteli fanın soğutucu etkisi azalır, bu da, 50 Hz'in altındaki hızlarda çalışırken, motorun ısınma süre sabitini değiştirir. Birçok modern sayısal AC konvertör, hız ayarlandıkça, ısınma ve soğuma zaman sabitlerindeki değişiklikleri telafi edecek şekilde tasarlanmış dahili termal aşırı yük korumasına sahiptir. Ancak, stator akımının izlenmesi, motor sargı yalıtımının aşırı-sıcaklık yüzünden zarar görmesini önlemek için her zaman güvenli bir metot değildir.

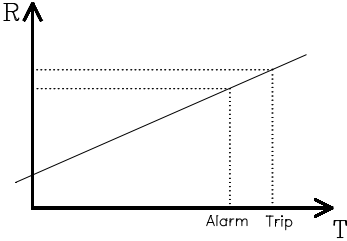
6.6 Termal aşırı-yük koruması - doğrudan sıcaklık algılama

Daha zor uygulamalar için, *sıcak noktalarda* ya da diğer stratejik noktalarda sargı sıcaklığının *doğrudan algılanması* tercih edilir. *Doğrudan sıcaklık algılaması* için kullanılabilen çeşitli cihaz tipleri mevcuttur. Daha yaygın olan bazı teknikler, Şekil 6.9'daki çizelgede özetlenmiştir.

Doğrudan sıcaklık algılamasının, stator ya da armatür *akım algılamasından* daha güvenilir olarak kabul edildiği bazı uygulamalar şunlardır:

- AC Frekans Konvertörlerinden beslenen Sincap Kafesli AC Endüksiyon Motorları
- Genelde geçici aşırı yüklerle sahip AC motorlar
- Sık sık durdurulup başlatılan AC motorlar
- Uzun başlatma sürelerine sahip yüksek inerşialı uygulamalarda kullanılan AC motorlar
- Rotorun kilitleme ya da durma ihtimalinin olduğu uygulamalarda kullanılan AC motorlar
- DC konvertörler tarafından kontrol edilen DC motorlar
- Büyük rulmanlar, dişli mahfaza kutuları [*gear housings*], yağ banyoları [*oil baths*], ısı alıcılar, vb. gibi mekanik uygulamalardaki termal koruma

Tip	Çalışma İlkesi	Çalışma İlkesi	Sağlanan Koruma	Gerekli Sayı
Mikroterm (Termostat)	Kontakları normalde açık ya da normalde kapalı olan bimetalik şerit		Geçici-olmayan aşırı yükler için sıcaklık izleme	N/O için paralel olarak, N/C için seri olarak bağlanan 2 ya da 3 mikroterm
Pozitif sıcaklık katsayılı termistör	Lineer-olmayan değişken termistör algılayıcı direnci		Geçici aşırı-yükler için sıcaklık izleme	Seri olarak bağlanan 2 ya da 3 termistör
Isıl Çift	Peltier Etkisi J-tipi ($T < 750^{\circ}\text{C}$) K-tipi ($T < 1250^{\circ}\text{C}$) T-tipi ($T < 350^{\circ}\text{C}$)		Sıcak noktalarda sürekli sıcaklık izleme	Sıcak nokta başına bir tane ısı çift

RTD Direnç Sıcaklık Detektörü	Platinyum algılayıcısının (Pt-100 Ω) lineer değişken direnci		Sıcak noktalarda, yüksek doğruluğa sahip sürekli sıcaklık izleme	Sıcak nokta başına 1 detektör
--------------------------------------	--	---	--	-------------------------------

Şekil 6.9 – Doğrudan sıcaklık ölçümü için kullanılan koruma cihazları

Pratik uygulamalarda, elektrik motorundaki çeşitli stratejik noktalarda sıcaklığı izlemek için genelde bir veya daha fazla *doğrudan ölçme termal algılayıcı* kullanılmaktadır.

Bu algılayıcılar, aşağıdaki özellikleri sağlamak için motor kontrol devresine bağlanan yardımcı röle ya da kontrolörlerle birlikte kullanılır:

- **Alarm:** Motoru durdurmadan, sesli ve/veya görsel ikaz sinyalleri vererek operatörü, sıcaklığın yüksek olduğuna dair uyarır.
- **Kapatma:** Motorun güç besleme devresini kapatarak motoru durdurur.

Ayrı Alarm ve Kapama ayar noktalarının hedeflerini gerçekleştirmek için, mikrotermiler ve termistörler, her bir stratejik noktada iki algılayıcıdan oluşan bir gruba ihtiyaç duyar. İki, daha düşük sıcaklık ayar noktasına sahip olup Alarm fonksiyonunu gerçekleştirmek için kullanılır, ikincisi, daha yüksek sıcaklık ayar noktasına sahip olup Kapama fonksiyonunu gerçekleştirmek için kullanılır.

Her bir stratejik noktada gerçek sıcaklığı sürekli olarak ölçebilen ısı çiftler ve RTD'ler söz konusu olduğunda, elektronik kontrolör normalde alarm ve motorun durdurulması için önceden ayarlanmış sıcaklık seviyelerine sahiptir. Motoru çalıştırmak, alarm vermek ya da kapatmak için iki ayrı kontak çıkışı kullanılabilir.

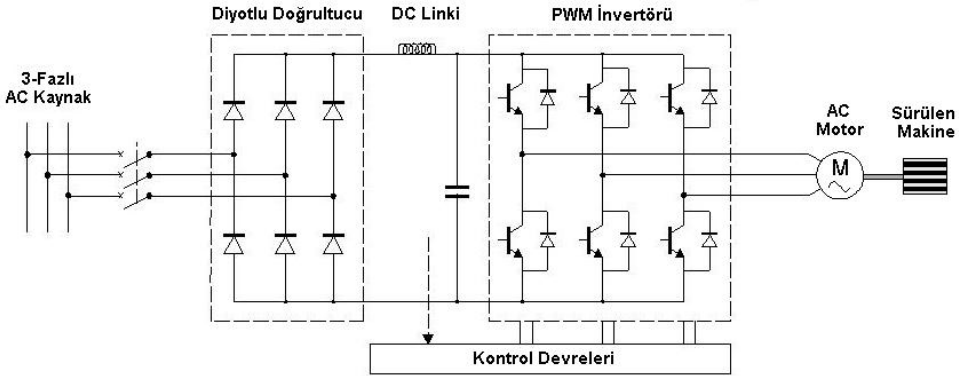
Motor koruması için çeşitli Doğrudan Sıcaklık Algılama metotlarına ilişkin kapsamlı bir tanım, Ek A: Motor koruması – doğrudan sıcaklık algılama kısmında verilmiştir.

7 Değişken Hızlı AC Sürücülere İlişkin Kontrol Sistemleri

7.1 Genel kontrol sistemi

Birçok modern *Değişken Hızlı AC Sürücü* (VSD'ler) modüler yapıdadır. Giriş doğrultucu, DC linki, çıkış invertörü ve bağlanılan motor gibi temel bileşenlere ilişkin bazı teknik ayrıntılar önceki

bölümlerde açıklanmıştı. Bu bölümde, *Kontrol Devrelerinde bulunan Kontrol Sistemi* kapsamaktadır.



Şekil 7.1 – Değişken hızlı AC sürücünün temel bileşenleri

Modern PWM-tipi AC VVVF konvertörlere ilişkin kontrol sisteminin ana fonksiyonunun PWM invertörün yarı iletken anahtarlarını kontrol etmek olmasına rağmen, kontrol edilmesi gereken başka bazı önemli fonksiyonlar vardır.

Genel kontrol sistemi, 4 ana bölgeye ayrılabilir.

- Invertör kontrol sistemi
- Hız geri besleme ve kontrol sistemi
- Akım geri besleme ve kontrol sistemi
- Aşağıdakileri kapsayan dış ara yüz:
 - Kullanıcı tarafından ayarlanan parametreler
 - Operatör bilgisi ve arıza teşhisi
 - Kontrol sinyallerini almak için kullanılan sayısal ve analog girişler (başlatma, durdurma, vb.)
 - Durum bilgisini (çalışıyor, arızalandı, vb.) aktarmak için kullanılan sayısal ve analog çıkışlar

Sayısal elektronik alanında son on yıldaki hızlı gelişmelerle birlikte, modern VSD kontrol sistemlerinde bir veya daha fazla mikroişlemci kullanılmaktadır. Kontrol sistemi, aşağıdaki ana hedefleri gerçekleştirecek şekilde tasarlanmalıdır:

- Yüksek seviyede *Güvenilirlik* sağlamalıdır.
- Çıkış akım dalga biçimi, motor kayıpları minimum olacak şekilde, seçilen hızda yeterli motor torku sağlamak için yüksek *invertör performansı* sağlamalıdır.
- *Invertör kayıpları* en düşük seviyeye indirilmelidir.

- Dış kontrol ve haberleşme ara yüz imkânlarıyla birlikte *kontrol sistemini toplam süreç kontrol sistemine* entegre edebilmesi mümkün olmalıdır.
- *Güç kaynağı dalgalanmalarına ve EMI'ya* karşı yüksek toleransa sahip olmalıdır.

7.2 Kontrol sistemi için kullanılan güç kaynağı

VSD'nin güvenli bir şekilde çalışabilmesi için, güç çukuru, yüksek enterferans seviyeleri, vb. gibi olağan dışı şartlar altında bile AC konvertörün kontrol devrelerine güç sağlamak amacıyla güvenli bir güç kaynağının kullanılması önemlidir. Modern bir VSD'de güce ilişkin genel şartlar, aşağıdaki çizelgede belirtilmektedir.

Fonksiyonel blok	Yaklaşık yük	Ortak potansiyel	Gerilimler
Kontrol Devreleri	Sürücü büyüklüğünden bağımsız olarak 20 VA	Genelde Toprağı referans alır.	μP için $\pm 5 V$ $\pm 12 V$ ya da $\pm 15 V$
Güç Ara Yüz Devreleri	Akım geri besleme metoduna bağlı olarak 20 VA	Genelde Toprağı referans alır, bara potansiyelinde ayrı bir yardımcı kaynağa sahip olabilir.	$\pm 12 V$ ya da $\pm 15 V$
Kullanıcı Ara Yüz Devreleri	Lojik girişleri için 5 VA Optik girişler için 20 VA	Lojik girişleri kullanılıyorsa toprağı referans alır. Optik girişleri kullanılıyorsa ayrımlıdır.	Lojik girişler söz konusu olduğunda 5 V ya da 12 V Optik girişler söz konusu olduğunda 12 V ya da 24 V
Güç Cihazı Sürücüler	KW başına 0,2 VA – 1 VA Güç cihazına bağlıdır. GTO için en yüksek BJT için daha düşük FET/IGBT için en düşük	4 ya da 6 tane ayrımlı çıkış Motor faz potansiyelinde 3 tane, -ve değerindeki dc bara potansiyelinde 1 ya da 3 tane	$\pm 12 V$, 15 V, 24 V Güç cihazına göre Faal hale getir ... artı Faal olmayan hale getir ... eksi
DC Bara Şarj Devreleri	Sürücü kW başına 0,1 VA	Topraklı ya da topraksız	12 V DC, 24 V DC 110 V, 240 V ya da 415 V AC
Soğutma Fanının	Sürücü kW başına	Topraklı ya da	12 V DC, 24 V DC

Gücü	0,5 VA	topraksız	110 V, 240 V ya da 415 V AC
------	--------	-----------	-----------------------------

Şekil 7.2 – Değişken hızlı bir PWM sürücünün gücüne ilişkin genel şartlar

Konvertör kontrol devrelerine yardımcı güç sağlamak için kullanılan en basit metot, elektrik şebekesine bağlanan yardımcı bir transformatör kullanmaktır. Kontrol devreleri ve cihaz sürücüleri için gerekli ayrımı sağlamak amacıyla çoklu sekonder sargıların kullanılması gereklidir. Elektrik şebekesinden sağlanan güçte bir kesinti meydana geldiğinde, bu yaklaşımla ilgili temel sorun oluşur.

Güç kaynağında kısa çukurlar olsa bile, invertör kontrolü kaybolur ve VSD'nin durdurulması gerekli hale gelir. Birçok sürücü uygulamasında, VSD'lerin kısa süreli gerilim çukurlarından 'ride through' etmesi gereklidir.

Sonuç olarak, kontrol sistemine yardımcı güç sağlamak için DC linkinden doğrudan beslenen *Anahtarlama Modlu Güç Kaynaklarını* kullanır. Bunlar, esasında DC-DC konvertörlerdir. Bu yaklaşımın temel avantajı, elektrik şebekesinin durumundan bağımsız olarak motor durana kadar kontrol gücünün sağlanabilmesidir. Elektrik şebekesi arızalandığında, yardımcı güç ilk önce DC linkine bağlanan büyük kondansatörler tarafından ve daha sonra inerşia motorunun kendisinden sağlanır. Elektrik şebekesinin gücü kesildiğinde, birçok AC konvertör frekansı azaltacak ve frekans azaltıldığında AC indüksiyon jeneratörü gibi davranan motordan gücü geri alacak şekilde programlanır.

Azaltan-artıran konvertörler [*fly-back converter*], ileri yönlü konvertörler [*forward converter*] ve köprü konvertörler dahil olmak üzere, birçok anahtarlama modlu güç kaynağı tipi mevcuttur. Bu güç kaynakları, ayrılmış olabilir ya da olmayabilir ve tekli ya da çoklu çıkışlara sahip olabilir. Yüksek frekansta çalıştıklarından dolayı (10 kHz ilâ 100 kHz arasında) geleneksel elektrik şebekesi frekansı transformatörünü esas alan güç kaynaklarından fiziksel olarak çok daha küçüktürler ve SMPS'lerin karmaşık olmasına rağmen, bu güç kaynakları nispeten ucuzdur.

Modern sürücülerin yapısının modüler olmasından dolayı, her biri VSD'nin tek bir modülüne (kontrol modülü, darbe yükseltici sürücü aşaması, soğutma fanları, vb.) adanmış olan çok sayıda yardımcı güç kaynağının kullanılması yaygındır. Bu farklı SMPS'ler DC linkten bağımsız olarak ya da DC link gerilimini tek bir ayrılmış alçak gerilim kaynağına (24 V DC) dönüştüren merkezi bir SMPS'den çalışabilir. Her bir modül, güç gereksinimini, bu 24 V DC'lik güç kaynağından sağlayabilir.

Şekil 7.2'de gösterildiği gibi, *Cihaz Sürücü Güç Kaynaklarının* 4 ya da 6 tane ayrımlı güç girişine sahip olması gereklidir. Bu güç girişlerinin *ayrımlı hale getirilmesi* gereklidir çünkü DC linkin pozitif terminaline bağlanan üç güç elektroniği anahtarının Emitör (IGBT & BJT), Kaynak (MOSFET) ya da Katot (GTO) terminalleri, motorun çıkış fazlarına bağlanır. Bu terminal, sürücü aşaması için referans terminalken, Baz ya da Kapı terminali, *faal hale gelmek için pozitif* olarak ya da *faal olmayan hale gelmek için negatif* olarak sürülmelidir. Bu cihazların her biri için güç kaynağı referans noktası farklı bir potansiyeldedir, bu nedenle, ayrımlı hale getirilmeleri gereklidir.

DC linkin negatif terminaline bağlanan üç güç elektroniği anahtarı olan Emitör, Kaynak ya da Katot terminalleri negatif baraya bağlanmalıdır ve bu nedenle, üç cihaz sürücü devresinin tümü için tek bir güç kaynağı kullanılabilir, çizelgede minimum 4 tane ayrımlı güç kaynağı gösterilmektedir. Ancak, cihaz sürücü aşamalarını gerçekleştirmek için 6 tane özdeş güç kaynağının kullanılması daha yaygındır, çünkü modülerlik ve kablolamanın yaygın oluşu açısından bu durum daha faydalıdır.

Bu cihaz sürücü güç kaynaklarının sağlanması için iki temel metot mevcuttur. İlki, elektrik şebekesi frekansı transformatöründen ya da SMPS'den altı tane ayrımlı kaynak (kontrol gücünün diğer tüm kısımlarının üretilmesiyle aynı şekilde) sağlamaktır. Diğer bir alternatif, her bir sürücü devresinin adanmış yüksek frekanslı (genelde halka biçiminde) transformatörler vasıtasıyla altı sürücü devresiyle doğrudan birleşen tek bir yüksek frekanslı kare dalga kaynağı sağlamaktır. Ayrı doğrultucu ve düzenleme devreleri, her bir sürücü aşaması için gerekli artı ve eksi beslemeyi sağlar.

Konvertör ısı alıcılarına ilişkin *soğutucu fanlar*, SMPS'ten ya da doğrudan elektrik şebekesinden enerjilendirilebilir, bu, daha düşük maliyetli bir çözümdür. Elektrik şebekesinin temel dezavantajı, dünya genelinde farklı seviyede elektrik şebekesi gerilimlerinin ve frekanslarının olması ve bunun sorun yaratmasıdır. Bu sorun, genelde en yaygın gerilim seçenekleriyle uyumlu olması için, fan, çeşitli primer bağlantılara sahip yardımcı bir transformatör vasıtasıyla enerjilendirilerek çözülebilir.

7.3 DC bara şarj kontrol sistemi

Modern bir PWM-tipi AC Sürücü, sabit gerilimli bir DC Bara ile çalışır. Sabit DC Bara gerilimi, normalde 3-fazlı bir güç kaynağından 6-darbeleri Diyotlu Doğrultucu Köprüsü vasıtasıyla elde edilir. Bu gerilim,

genelde 415 Volt, 3-fazlı, 50 Hz iken, bazı ülkelerde gerilim, 380 Volt, 3-fazlı, 50 Hz'dir.

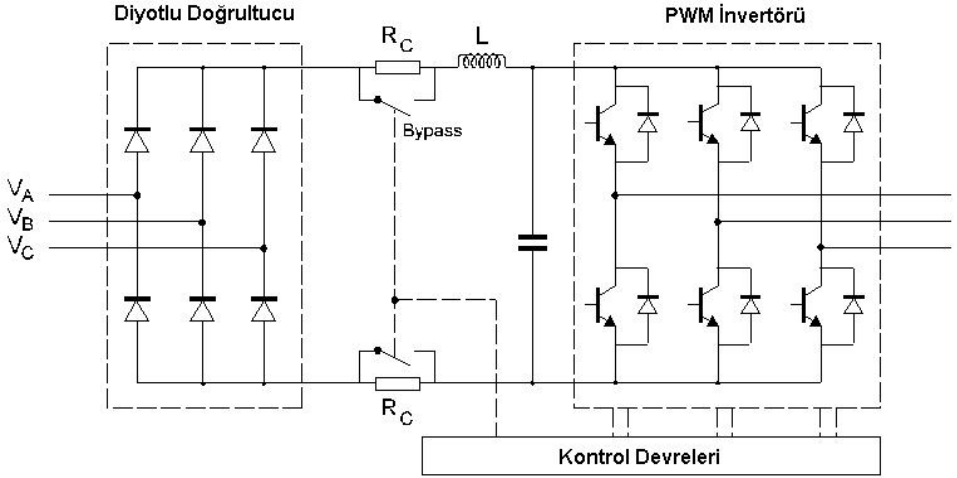
Elektrik şebekesi gücü, AC sürücünün giriş terminallerine ilk defa bağlandığında, DC baradaki filtre kondansatör grubu şarj olurken çok yüksek seviyede demeraj akımları akar. Kondansatörler ve doğrultucu modülündeki diyotlar bu yüksek seviyedeki akımlara dayanabilirken, sigortaların ya da devre kesicilerin bu durumdan etkilenmesi ve devreye girmesi mümkündür. Bu nedenle, bu demeraj akımını sınırlamak için bazı önlemlerin alınması gereklidir. *DC bara ön-şarj devresi*, normalde bu amaç için kullanılmaktadır.

Demeraj akımı sorununu çözmek için iki temel yaklaşım kullanılabilir:

- AC/DC doğrultucu köprüsünün AC ya da DC tarafında yan-geçit kontaktörlü *[bypass contactor]* ön-şarj dirençleri kullanılabilir.
- AC/DC doğrultucusu, kontrollü olmayan diyotlu köprü yerine kontrollü bir doğrultulu köprü olabilir.

İlk metot en yaygın olarak kullanılan metottur, Şekil 7.3'te buna ilişkin bir örnek gösterilmiştir. Giriş kaynağı ile kondansatör grubu arasına, gücün ilk uygulanmasında oluşan akımı sınırlamak için şarj dirençleri yerleştirilir. Kondansatörler bir kere şarj olduktan sonra, bu dirençler, VSD'de ilâve kayıplara neden olacaktır, bu nedenle, normal çalışma sırasında bu dirençlerin iptal edilmesi gereklidir. Şarj dirençlerini iptal etmek ve sürücünün tam beyan akımını taşımak için, bir röle (küçük VSD'ler) ya da kontaktör (büyük VSD'ler) kullanılır.

Röle kontrolü, uygulanmakta olan güç ile olanaklı kılınan invertör aşaması arasında sabit bir zaman gecikmesine sahip basit bir zamanlayıcı devre kullanılarak gerçekleştirilebilir. DC bara geriliminin izlenmesi daha iyi bir metottur ve belirli bir gerilim seviyesine ulaşıldıktan sonra, yan-geçit (bypass) rölesi kapatılır. Daha kaliteli VSD'lerde, durumlarını onaylamak için merkezi bir kontrolördeki güç kaynaklarının her birinden geri besleme alınabilir.



Şekil 7.3 – DC bara ön-şarj devresine ilişkin örnek

Invertör aşamasının çalışmasına izin verilmeden önce rölenin kapatılmasını sağlamak için bir kilit sisteminin kullanılması gereklidir. Aksi halde, VSD'den geçen yüksek seviyedeki yük akımı, şarj dirençlerini ısıtacak ve yakacaktır. İlâve olarak, tüm güç kaynaklarının kararlı hale gelme ve düzenleme imkânının olması önemlidir. Sonuç olarak, birçok VSD, enerjilendirildikten sonra kısa bir süre boyunca başlatma işlemini geciktiren *başlangıç kilitleme devresine* sahiptir.

Bu konuda çeşitli varyasyonlar mevcuttur, örneğin, dirençler ve röle, DC linkinde ya da 3-fazlı besleme hatlarında yer alabilir. Sadece tek bir büyük direnç grubu ya da tek bir röle mevcut olabilir ya da çok sayıda küçük direnç ya da röle grubu mevcut olabilir. Bu tekniğin diğer varyasyonları, yarı-iletken yan geçit anahtarlarını kapsar.

Bu metodun temel avantajları şunlardır:

- Kontrol devresinin basit olması
- İmplementasyonun ucuz ve kolay olması

Bu metodun temel *dezavantajları* şunlardır:

- Röle kontaklarıyla ve bobinlerle ilgili kayıplar
- Bu bileşenlerin fiziksel büyüklüğü
- Özellikle motor kontrol sistemi çok sayıda enerjilendirme ve enerji-kesme işlemi gerektirdiğinde, bu elektromekanik cihazların güvenilirliği

İkinci ancak daha az yaygın olan yaklaşım, normal diyetli doğrultucunun yerine faz-kontrollü doğrultucu köprüsünün

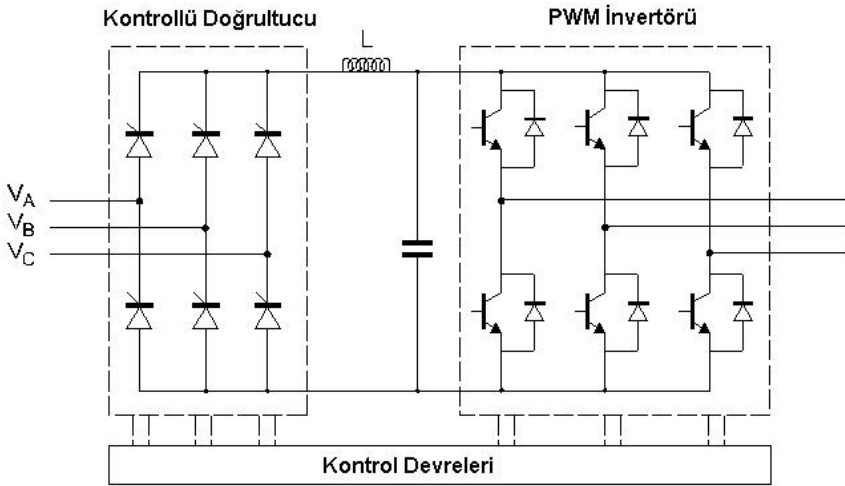
kullanılmasıdır. Bu, kondansatör geriliminin, ateşleme açısını kontrol ederek yavaş yavaş artırılmasını ve böylece demeraj akımının kontrol edilmesini sağlar. Bu metod, genelde güç beyan değerleri 22 kW civarının üstünde olan VSD'lerde kullanılır.

Bu metodun temel *avantajları* şunlardır:

- İletim kayıpları daha düşüktür.
- Röle kullanılmadığı için fiziksel olarak küçüktür.

Bu metodun temel *dezavantajları* şunlardır:

- Güç tristörleri güç diyotlarından daha pahalıdır.
- Kontrol devresi, röle devresiyle karşılaştırıldığında daha karmaşıktır.
- Çentikten ve elektrik şebekesindeki diğer bozulmalardan dolayı, faz kontrol devresinin hatalı bir şekilde tetiklenmesi riski vardır.
- Toplam reaktif güç gereksinimi biraz daha yüksektir.



Şekil 7.4 – Faz-kontrollü tristörlü köprü kullanan DC bara şarjı

7.4 AC konvertörler için PWM doğrultucu

Geleneksel bir AC VVVF Konvertör, 5 temel alt-birimden oluşur:

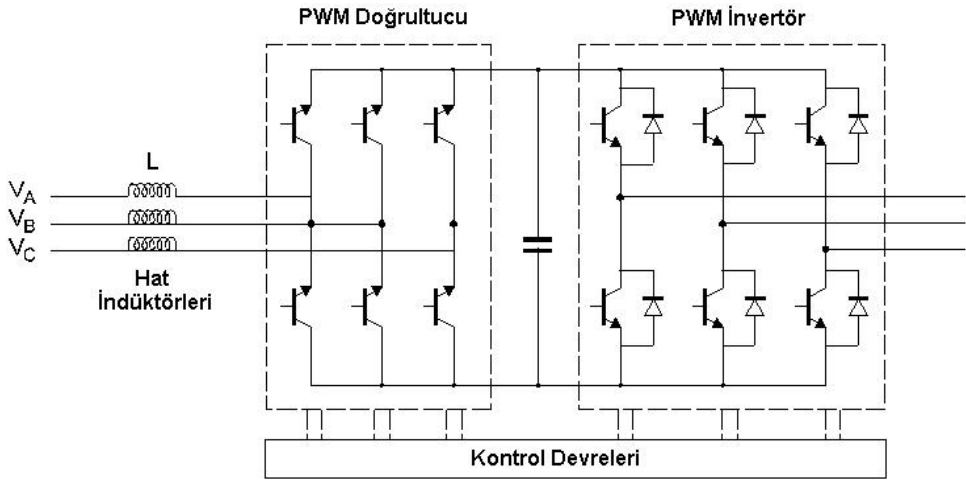
- 3-fazlı AC gerilimi sabit büyüklükteki DC gerilime dönüştürmek için kullanılan, genelde diyotlu bir doğrultucudan oluşan *AC/DC konvertör*. Bazı durumlarda, DC bara şarjı için faz kontrollü tristörlü bir köprü kullanılır. Tam DC gerilimi bir kere sağlandığında, tristörlü köprü, diyotlu bir köprü şeklinde davranacak biçimde kontrol edilir.

- İnvörtör aşaması için düzgün sabit bir DC gerilimi elde etmek amacıyla, genelde DC şok bobininden, DC kondansatörden ve bir DC barasından oluşan *DC link*
- DC gerilimini değişken frekanslı değişken gerilimli bir AC çıkışına dönüştürmek için yarı iletken bir köprüden oluşan *DC/AC invörtör*
- Ara yüz sistemi ve invörtör anahtarları için kontrol devrelerine güç iletmek amacıyla kullanılan *güç kaynağı modülleri*
- Dizi kontrolü, iç kontrol döngüleri, koruma devreleri ve kullanıcı ara yüzlerinden oluşan *sayısal kontrol sistemi*

Konvertörün ön ucundaki *AC/DC doğrultucu*, AC elektrik şebekesinden gelen gerilimle DC barayı ve kondansatörü besler. Bu amaç için 6-darbeleri diyotlu bir köprü doğrultucusunun kullanılması iki temel dezavantajı vardır:

- AC hat akım dalga biçimi, sinüs biçimli değildir (4. Bölüme bakılmalıdır) ve 5. 7. 11. 13. ve vb. gibi tek harmoniklerin kaynağıdır. Bu yüksek enterferans seviyesi, diğer cihazları da etkileyebilir ve normal çalışmalarında kötüleşmeye neden olabilir.
- Harmonik akım bozulumu, *Ortak Kuplaj Noktasındaki (PCC)* gerilimin bozulmasına neden olur, bu bozulmanın seviyesi çok yüksekse (büyük VS sürücüler) güç besleme sistemine bağlanan diğer elektrikli cihazların performansını etkileyebilir.
- Diyotlu doğrultucu kullanıldığında, dört kadranlı çalışma zordur çünkü elektrik gücü sadece tek bir yönde iletebilir (3. Bölüme bakılmalıdır), bu da, standart bir AC VVVF sürücü kullanıldığında rejeneratif frenlemenin uygulanamamasına neden olur.

PWM-tipi kontrollü doğrultucu (“Aktif Ön Uç [*Active Front End*]” olarak da adlandırılır) kullanılsaydı, bu sorunların çoğuna çözüm getirilebilirdi. IGBT’li 6-darbeleri PWM köprülü konvertör Şekil 7.5’te gösterilmektedir ve bu konvertör, elektriksel açıdan normal bir PWM invörtöre benzerdir. PWM invörtörde olduğu gibi, bu konvertör, IGBT’lerin anahtar dizisine bağlı olarak herhangi bir yönde elektrik enerjisi iletebilir. Doğru bir şekilde çalışabilmesi için, anahtarlama sırasında yarı iletken güç cihazlarının zarar görmesini önlemek amacıyla hatta minimum indüktans değerinin olması gereklidir. Kaynak yüksek bir arıza seviyesine sahipse (düşük kaynak empedansı) hat şok bobinlerinin eklenmesi gerekli olabilir.



Şekil 7.5 – AC konvertörlere ilişkin PWM doğrultucu

Tristörlü köprüleri kullanarak AC'den DC'ye güç dönüşümü gerçekleştirmenin temel sorunlarından biri, akımın fazının gerilimin fazına göre kaymasından dolayı *fark faktörünün* kötü olması ve sinüs biçimli olmayan AC akım dalga biçiminin bozulmasından dolayı *güç faktörünün* kötü olmasıdır. PWM konvertörü, birim fark faktöründe elektrik şebekesinden neredeyse sinüs biçimli bir akım çekerek bu sorunların her ikisini de düzeltebilir.

Birim *fark faktörü*, akım dalga biçimlerini, genelde 50 Hz olan temel frekansta temel gerilim dalga biçimini tam olarak izlemeye zorlayarak elde edilir. Akımın aynı fazdaki bileşeni, kondansatör gerilimi gerekli seviyede tutulacak şekilde kontrol edilirken, akımın farklı fazdaki (kuvadratür) bileşeni sıfır yapılabilir ya da bu bileşen, diğer yükler için bir güç-faktörü düzeltme derecesi sağlayacak hale getirilebilir.

Darbe Genişliği Modülasyon teknikleri kullanılarak, akım dalga biçimi nispeten bozulmayan (sinüs biçimli) hale getirilebilir ve bozulmadan kaynaklanan reaktif güç gereksinimi de ortadan kaldırılabilir. Bu, hat indüktansının filtreleme etkisi ile desteklenir.

7.5 Değişken hızlı sürücü kontrol döngüleri

Bir AC frekans konvertörü, *motora beslenen Gerilimi ve Frekansı kontrol edecek* şekilde tasarlanmıştır ve bu nedenle, genelde *Değişken Gerilimli Değişken Frekanslı* (VVVF) kontrolör olarak adlandırılır. Sayısal kontrol sistemi, bu süreci otomatik hale getirir. Örneğin, operatör, bir potansiyometre üzerindeki hız ayarını seçtiğinde, VSD kontrol sistemi, motorun *ayarlanan hızda* çalışmasını sağlamak için çıkış frekansını ve gerilimini ayarlayarak bu seçimi implement eder. Kontrol sisteminin doğruluğu ve

operatörün komutuna cevabı, söz konusu VSD’de kullanılan *kontrol sisteminin tipine* bağlı olarak belirlenir.

VSD kontrol sistemlerinde kullanılan kontrol tipi, normal *endüstriyel süreç kontrolünde* kullanılan yaklaşıma benzer bir yaklaşımı izler. Kontrol seviyesi aşağıdaki şekillerde olabilir:

- *Basit Açık-Döngülü Kontrol* – süreçten geri besleme alınmaz.
- *Kapalı-Döngülü Kontrol* – süreç değişkeni geri beslenir.
- *Ardışık Kapalı-Döngülü Kontrol* – birden fazla değişken geri beslenir.

7.5.1 Açık-döngülü kontrol

Elektriksel bir VSD’nin hedefi, elektrik şebekesinden gelen *elektrik enerjisini* değişken hızda ve torkta *mekanik yük enerjisine* dönüştürmektir. Birçok uygulamada, operatör ya da süreç kontrolör tarafından sağlanan ayar noktası komutu esas alınarak yükün hızını kontrol etmek için VSD’lerin kullanılması gereklidir.

Geleneksel VVVF konvertörler, *çıkış geriliminin* büyüklüğünü ve frekansını kontrol eden gerilim kaynağı cihazlarıdır. Akan akım, motor şartlarına ve yüke bağlıdır, bunlar AC konvertör tarafından kontrol edilmez ancak gerilimin uygulanmasının bir sonucudur. Uygulanan tek akım kontrolü, büyüklüğü yüksek bir seviyeye (örneğin, tam yük akımının % 150’sine) ulaştığında akımı sınırlamaktır.

Motorun gerekli hızda çalışıp çalışmadığını ya da sadece çalışıp çalışmadığını kontrol etmek amacıyla motordan gelen hız bilgisinin *geri beslenmesi* için bir sistem kullanılmaz. Yük torku değişirse ve kayma değeri artar ya da azalırsa, konvertör, çıkışını, süreçteki bu değişiklikleri telafi edecek şekilde ayarlamaz.

Bu *açık-döngülü kontrol* metodu, santifuj pompaları & fanlar ya da konveyörler gibi kararlı-durum şartlarını ve basit uygulamaları kontrol etmek için yeterlidir. Bu metot, bir seviyeden diğerine hız değişiklikleri için oldukça uzun bir süre sağlar ve süreçteki değişikliklerin çok ciddi sonuçlara neden olmadığı durumlarda kullanılır.

7.5.2 Kapalı döngülü kontrol

Endüstride, Hızın ve/veya Torkun *sürekli olarak ve doğru bir şekilde kontrol* edilmesinin gerekli olduğu daha zor uygulamalar da mevcuttur. Gerekli kontrol doğruluğu önemlidir ve sürücü teknolojisinin seçimi üzerinde büyük bir etkiye sahip olabilir. Sıkı dinamik kontrol gerektiren sürücü uygulamaları için, kapalı-döngülü kontrolün uygulanması gereklidir. Bu performans tipi, *AC sürücülerin*

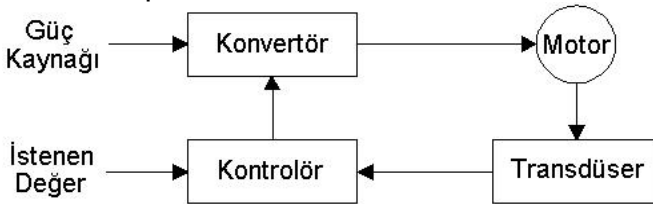
ve standart DC sürücülerin *Kapalı Döngülü Vektör Kontrolü* ile sağlanabilir.

Standart VVVF AC Sürücüler, basıncı ya da akışı düzenleyen pompa sistemleri gibi kapalı-döngülü kontrol sistemlerinde kullanılabilir ancak genel olarak bu uygulamaların *performansları yüksek değildir*. *Kapalı-döngülü bir VSD sisteminin* tipik konfigürasyonu Şekil 7.6'da gösterilmektedir, bu konfigürasyon, aşağıdaki temel bileşenlerden oluşur:

- Görevi, kaynaktan gelen elektrik enerjisini yük için gerekli olan mekanik enerjiye dönüştürmek olan *motor*
- Kontrol edilmesi gereken yük miktarını *ölçmek için kullanılan transdüser*. Bu, kontrol sistemi için bir *geri besleme* sinyali olarak kullanılır. *Hızın* önemli olduğu durumda, transdüser, bir takometre (analog sistem) ya da enkoder (sayısal sistem) olabilir.

Konumun önemli olduğu durumda, transdüser çözücü cihazdır [*resolver*] (analog sistem) ya da mutlak enkoderdir (sayısal sistem). Ancak, gerekli doğruluğa bağlı olarak hızın ve konumun ölçülmesi için kullanılan daha ucuz metotlar vardır. *Akımın* önemli olduğu durumda, transdüser, bir akım transformatörüdür.

- Motora elektrik gücü akışını kontrol eden bir *konvertör*. Bu durum, sayısal bir devrenin kontrolü altında yüksek frekansta anahtarlanan katı hal cihazlarını içeren bir *güç elektroniği konvertörü* ile sağlanabilir.
- *Ayar-Noktası* (SP) olarak adlandırılan gerekli hız ya da konum değerini, *Süreç Değişkeni* (PV) olarak adlandırılan ölçülen değerle karşılaştıran ve hatayı (SP-PV) sıfıra düşürmek için hızı ve torku ayarlayan *Kontrol Çıkışı* sağlayan bir *kontrolör*. Eskiden, kontrolörler, işlevsel yükselteçler (Op-amp) kullanılarak analog devreler tarafından implement edilirdi. Modern kontrolörler, mikroişlemciler ve sayısal devreler kullanılarak implement edilmektedir.

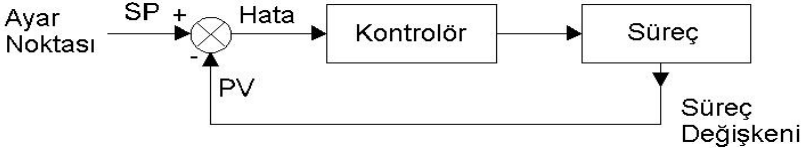


Şekil 7.6 – Kapalı-döngülü bir VSD kontrol sisteminin şematik gösterimi

Hız gibi, istenen yük değeri de, bir potansiyometre kullanılarak (analog sistem) operatör tarafından manuel olarak ya da tuş takımında bir değer girilerek (sayısal sistem) ayarlanabilir. VSD, karmaşık bir kontrol sisteminin parçası ise, istenen değer, *Süreç Kontrol Sisteminden (PLC ya da DCS)* 4 - 20 mA'lık bir sinyalle (analog sistem) ya da seri bir veri linki vasıtasıyla (sayısal sistem) iletilir.

Kontrol döngüsündeki her bir büyüklük önündeki büyüklük ile doğru orantılı olsaydı, Süreç Değişkeninin (PV) geri beslenmesine gerek olmaksızın basit *açık-döngülü hız kontrolü* yeterli olurdu. AC sürücülerde, doğru hız kontrolü gerekli olursa, o zaman tork ve hız değişkenlerinin geri beslenmesi gerekli hale gelir. Motor akımı, artış süresi kaçak indüktansa bağlı olacak şekilde motor frekansındaki artışa cevap verir. Diğer taraftan, motor hızı, artış süresi, inerşiyaaya bağlı olarak torku izler. Bu hataların meydana gelmesi, pompa hızı kontrolü gibi basit uygulamalarda kabul edilebilirken, çeşitli sürücülerin peş peşe çalıştığı kağıt makinesindeki değişken hızlı sürücüler gibi diğer zor uygulamalarda kabul edilmeyebilir. Bu zor uygulamalarda, çok-döngülü ya da ardışık kontrol olarak bilinen ve birlikte çalışan çeşitli kapalı-döngülü kontrol sistemlerinin kullanılması sayesinde gelişmiş performans sağlanabilir.

En önemli kontrol etmenlerini vurgulamak için bu *kapalı-döngülü kontrol sistemi*, Şekil 7.7'de yeniden çizilmiştir. *Kapalı-döngülü geri besleme kontrolü* terimi, kontrolörün çıkışından girişine *geri beslemenin* sağlandığı kontrol sisteminin yapısını vurgular.



Şekil 7.7 – Kapalı-döngülü geri beslemeli kontrol sistemi

Kapalı-döngülü Değişken Hızlı bir Sürücüde, aşağıdakiler gerçekleşir:

- Bir enkoder kullanılarak *Süreç değişkeni* ölçülür.
- Bir hata sinyali elde etmek için *Süreç değişkeni* (ölçülen hız) *Ayar Noktası* (istenen hız) ile karşılaştırılır, $SP - PV = \text{hata sinyali}$ dir.
- Bu *hata sinyali*, Çıkış sinyalini sürece ayarlamak (bu durumda, AC konvertör, motor ve hız transdüseri) için kontrolör tarafından işleme tâbi tutulur.

Şekil 7.7 yanıltıcı olabilir çünkü uygulamada, hata noktası genelde kontrolörde yer almaktadır.

7.5.3 Ardışık kapalı-döngülü kontrol

Çok yakın hız ve tork kontrolü gerektiren ve süreçteki değişikliklere hızlı cevap veren zor uygulamalar için, süreçteki tüm gecikmeleri önceden belirleyebilmek amacıyla tek-döngülü bir kontrolörün kullanılması yeterli olmayabilir. Bu durum, kontrolör tasarımının zorlaşmasına ve işletmeye alma sırasında kurulumun zor olmasına neden olur. Neyse ki, DC Sürücülerle geçmişte yaşanan tecrübeler sonucunda, sorunla adım adım uğraşan bir teknik geliştirilmiştir. Bu çözüm, iki tane *Ardışık Kapalı-Döngülü Kontrolörden* oluşur. Temel ayar noktası, operatör tarafından bir potansiyometre vasıtasıyla ya da PLC'den ayarlanan *Hız Ayar-noktasıdır*. Bu hız gereksinimlerini sağlamak için gerekli invertör frekansını hesaplamaya çalışmak yerine, bir DC Sürücü bunu iki aşamada çözer:

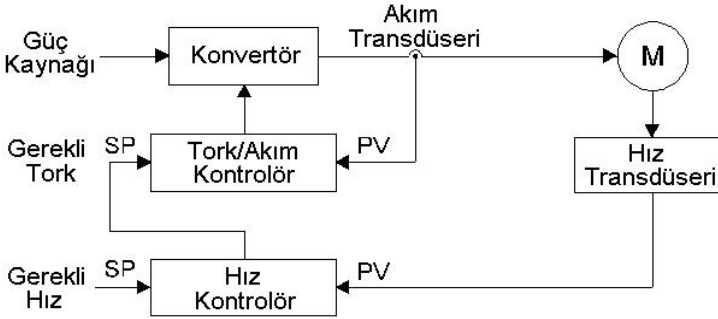
- İlk *Hız Kontrol Döngüsü*, hızı artırmak (ivmelenme sağlamak) ya da hızı azaltmak (yavaşlama sağlamak) amacıyla istenen tork ayar noktasını hesaplamak için hız hata değerini kullanır. *Hız kontrol döngüsünün*, sistemdeki zaman gecikmelerinin sadece birine, tork ve ölçülen hız arasındaki gecikmeye izin vermesi gereklidir. Bu, temelde yük inerşiası olmak üzere sistemdeki mekanik geçici durumları telafi eder.
- İkinci *Tork Kontrol Döngüsü*, ayarlanmış olan bu torku, hız kontrolörün çıkışını, ölçülen gerçek değerle karşılaştırır ve istenen çıkış frekansını hesaplar. Bu durumda ölçülen Süreç Değişkeni, ölçülen motor akımıdır, motor akımı, motor torkuyla doğru orantılıdır. Bu nedenle, bu kontrol döngüsü, genelde *Akım Döngüsü* olarak adlandırılır.

Vektör Kontrollü Sürücü, benzer bir strateji kullanır. *Tork Kontrol Döngüsünün* tasarımında, *akım değişim hızının, hızın değişim hızından çok daha yüksek seviyede olduğu* varsayılır. Bu, motorun sabit bir hızda çalıştığının varsayılmasıyla eş değerdir. Sonuç olarak, *Akım Döngüsünün*, sadece çıkış frekansı ile akım arasındaki zaman gecikmesini hesaba katması gereklidir. İstenen invertör çıkış frekansını sağlamanın yanı sıra, istenen invertör gerilimini de sağlar, çünkü bu iki değer birbiriyle ilişkilidir. Her iki büyüklük de PWM anahtarlama lojiğine iletilir, bu, invertör anahtarlama dizisini ve hızlarını kontrol eder (Şekil 7.8).

Akım Kontrol Döngüsü, temelde sargı indüktansı ve direnci olmak üzere elektriksel geçici rejimleri telafi eder.

Ardışık döngülü kontrolörün blok diyagramı aşağıdakileri içerir:

- Dış (büyük) Hız Kontrol Döngüsü
- İç (küçük) Tork Kontrol Döngüsü

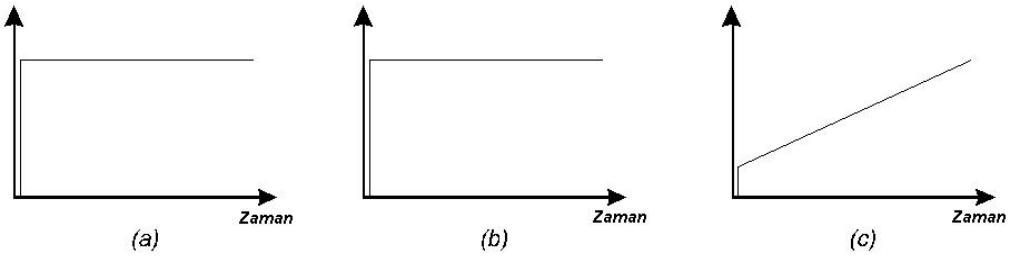


Şekil 7.8 – Hız ve tork için ardışık kontrolör

Ardışık kontrolörün temel avantajı, akım/tork döngüsü girişine bir sınırlama getirerek sürücü çıkışına bir akım sınırı konmasının mümkün olmasıdır. Bu, genelde, hız kontrol döngüsünün, akım döngüsünden beyan akımın % 150'si civarından fazlasının istenmesi önlenerek şekilde ayarlanır.

Akım döngüsü, hızlı bir şekilde (10 ms'den kısa bir sürede) cevap verebilir. Hız döngüsü, daha yavaş bir şekilde cevap verir çünkü motor ve yük inerşiası genelde yüksek seviyededir. Hız kontrol döngüsü için tepki süresi tipik olarak 100 ms civarındadır.

Hız ya da akım kontrolör için yükseltecin *adım değişikliğe* olan tepkisi, Şekil 7.9'da gösterilmektedir. En basit kontrolör yükselteç tipi, çıkışı girişle orantılı olan yükselteçtir, bu yükselteç, oransal yükselteç [*proportional amplifier*] ya da P-kontrol olarak adlandırılır. P-kontrol, hız ve akım kontrol döngülerinde kullanılmaz çünkü yüksek seviyede doğruluk ve hızlı dinamik tepki gibi gereksinimleri yeterince iyi bir şekilde sağlayamaz. Yüksek performanslı VSD'lerde Oransal-İntegral Kontrol ya da *PI-Kontrolünün* kullanılması daha yaygındır. PI-Kontrolü için adım tepkinin kullanılması, P-kontrolünün adım çıkışının ve integral kontrolden kaynaklanan rampanın kombinasyonundan oluşur.



Şekil 7.9 – P ve PI kontrolörlerin adım çıkışına tepkisi

- Adım giriş kontrol değişikliği
- Oransal Kontrolör Çıkışı
- Oransal/İntegral Kontrolör Çıkışı

7.6 AC sürücüler için vektör kontrolü

Vektör Kontrolü terimi, endüstriyel kontrolde yanlış kullanılan terimlerden biridir ve sonuç olarak VS sürücüler arasında büyük ölçüde karışıklığa neden olmuştur. Değişken Hızlı AC Sürücülere ilişkin *Vektör Kontrolü*, 1980'lerin ortalarından beri bazı sürücü imalatçılarından tedarik edilebilmektedir. *Vektör Kontrolü* tekniği, katı hal elektroniğindeki (hem mikroişlemcilerdeki hem de güç elektroniğindeki) büyük gelişmelerin sonucunda mümkün hale gelmiştir.

Bu, DC sürücülere eş değer bir AC sürücü olarak tanıtılmış ve en zor sürücü uygulamaları için bile uygun olduğu ifade edilmiştir ve karışıklık bu noktada ortaya çıkmaktadır. Bu ifade, sadece Vektör Kontrolünün ilkeleri implement edildiğinde geçerlidir. Bu gelişmiş kontrol tipinin Değişken Hızlı AC Sürücülere uygulanabilme dereceleri vardır. Bazı imalatçılar, *Vektör Kontrolünü* sadece kısmi olarak uygulayan ürünlere daha üstün performans karakteristikleri atfetmeye çalışarak bu karışıklığı daha da kötüleştirmiştir. Çeşitli terimlerin anlamları bu bölümde *Vektör Kontrolünün* temel ilkelerinden sonra açıklanmaktadır. Günümüzde, "Vektör Kontrolü" terimi, daha yüksek performans seviyesi sağlayan (sabit V/f sürücülerle karşılaştırıldığında) tüm sürücüler için geçerli olan genel bir isim haline gelmiştir.

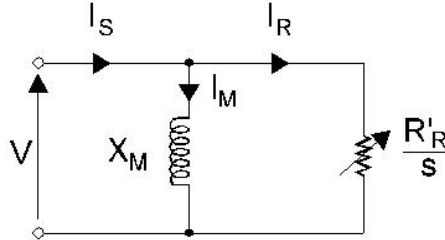
2. Bölüm'de açıklanmış olduğu gibi, elektrik motorları, iki manyetik alanın etkileşiminin sonucunda tork üretir, manyetik alanlardan biri sabit kısımda (stator) ve diğeri dönen kısımdadır (rotor/armatür). Manyetik alanlar, statorun ve rotorun sargılarında akmakta olan *akım* tarafından üretilir. Motor torku, *bu iki manyetik alanın şiddetine bağlıdır*. Gerçekte, tork değeri, bu iki manyetik alanı üreten akımların çarpımı ile doğru orantılıdır.

Bir *DC Sürücüde*, çıkış torkunun, iki akım vektörünün çarpımıyla doğru orantılı olduğu anlaşılmaktadır. Bunlardan biri armatür akımı I_a (tork üreten akım) ve alan akımı I_f 'dir (akı üreten akım), aralarında 90° açı farkı vardır. Uygulamada, alan akımı (akı üreten akım) normalde sabit tutulur. Sonuç olarak, armatür akımı (I_a) motorun çıkış torkuyla doğru orantılıdır. Armatür akımı (I_a) ardışık kapalı döngülü kontrolörde tork geri beslemesi olarak kullanılabilir. Bu akımların her ikisi de kolayca ölçülebilir ve DC Sürücünün basit bir şekilde kontrol edilmesini sağlar.

Bir *AC İndüksiyon Motorunda* (Şekil 2.5, Şekil 2.6 ve Şekil 7.10'daki eş değer devreye bakılmalıdır), akı üreten akım (I_m) ve tork üreten akım (I_r) motorun "içindedir", dışarıdan ölçülemez ya da ayrı olarak kontrol edilemez. DC sürücüde olduğu gibi, bu iki akım arasında kabaca 90° fark vardır ve bu akımların vektör toplamı, ölçülebilen *Stator Akımını* oluşturur (Şekil 7.11). Bu nedenle, AC motorun Vektör Kontrolü, DC motorun Vektör Kontrolünden daha zordur. AC Akı-Vektör sürücüye ilişkin sorun, iki ayrı devre kullanılmaksızın bu iki akım Vektörününün ayırt edilmesi, kontrol edilmesi ve sadece stator akımının ölçülebilmesi ve kontrol edilebilmesidir.

AC Vektör Kontrol sürücünün stratejisi, tüm hız & yük şartları altında akı akımının ve/veya tork akımının ayrı olarak kontrol edilebilmesini olanaklı kılmak için *münferit akım vektörlerinin hesaplanmasıdır*. DC sürücüde olduğu gibi, hedef, motorda sabit bir akı akımının sağlanmasıdır.

Akım vektörlerinin hesaplanması, mevcut değişkenlerin (stator akımı (I_s), stator gerilimi (V_s), faz ilişkisi, frekans, shaft hızı, vb.) ölçülmesi ve motor sabitlerini (stator direnci & indüktans, rotor direnci & indüktans, mıknatıslanma indüktansı, kutup sayısı, vb.) içeren bir "Motor Modeline" uygulanmasıdır. Çok sayıda değişken var olduğu için, çok sayıda motor modeli uygulamasının (çok basit modellerden çok karmaşık ve doğru modellere kadar çeşitli modellerin olması mümkündür) olması mümkündür. Motor modeli ne kadar kapsamlı ise, o kadar çok çalışma gücü gereklidir.

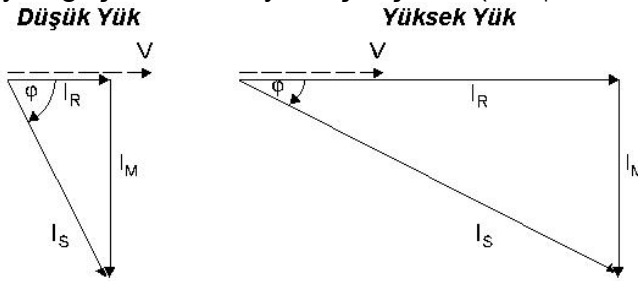


Şekil 7.10 – Bir AC indüksiyon motorunun basitleştirilmiş eş değer devresi

Motorun yüksüz olması durumunda, yüksüz-durum stator akımının (I_s) neredeyse tamamı mıknatıslanma akımından oluşur. Sadece motordaki rüzgar ve sürtünme kayıplarının üstesinden gelmek için, tork üreten bir akım gereklidir. Kayma değeri neredeyse sıfıra eşittir, stator akımı gerilimin 90° arkasındadır, bu nedenle, güç faktörü sıfıra yakındır ($\cos\phi = 0$).

Hafif yüklü motorlarda, stator akımı I_s , mıknatıslanma akımının I_M (değişmez) biraz artırılmış tork-üreten aktif akımla *vektör toplamıdır*. Stator akımı, gerilimin büyük bir açı farkı (ϕ) kadar gerisindedir, bu nedenle, güç faktörü kötüdür ($\cos\phi \ll 1$). Kayma değeri halâ küçüktür.

Ağır yüklü motorlarda, stator akımı I_s , mıknatıslanma akımının I_M (değişmez) büyük ölçüde artırılmış tork-üreten aktif akımla (bu akım, yük torkundaki artışla orantılı olarak artar) *vektör toplamıdır*. Stator akımı, gerilimin belli bir açı farkı (ϕ) kadar gerisindedir, böylece, güç faktörü tam yük güç faktörüne yaklaşmış olur ($\cos\phi = 0,85$).



Şekil 7.11 – Bir AC indüksiyon motorundaki akım vektörleri

Bu nedenle, Vektör kontrol sisteminin merkez kısmı, motorun içindeki şartları sürekli olarak modelleyen *Aktif Motor Modelidir*.

- Aşağıdaki işlemleri implement ederek gerçek zamanlı Tork-üreten akımı sürekli olarak hesaplar:
 - Hesaplamanın bir kısmı olarak kullanılmak üzere motor sabitlerini bellekte saklar.
 - Her bir fazdaki stator akımını ve gerilimini ölçer.
 - Hızı ölçer (enkoderle) ya da hızı hesaplar (enkodersiz)
- Akı-üreten akımı gerçek zamanlı olarak sürekli bir şekilde ölçer.
- Tork Kontrol Döngüsüne hata çıkışı sağlamak için hız geri beslemesini Hız Ayar Noktası ile karşılaştırarak Hız Kontrol Döngüsünü implement eder.

- PWM anahtarlama lojik kontrolörüne hata çıkışı sağlamak için akım ve hız geri beslemesinden hesaplanan aktif torkları karşılaştırarak Tork Kontrol Döngüsünü implement eder.
- Bu bilgiyi sürekli olarak günceller ve Süreç üzerinde sıkı bir kontrol sağlar.

Sürücünün yeterli dinamik tepki sağlaması için, saniyede en az 2000 kere model hesaplaması yapılması gereklidir, bu da, 0,5 ms'den daha kısa güncelleme süresi sağlar. Modern yüksek hızlı işlemcilerle bunun kolayca gerçekleştirilebilmesine rağmen, indüksiyon motorunun bu hızda sürekli olarak modellenebilmesi sadece son on yıldır, 16-bitli mikroişlemcilerin geliştirilmesiyle mümkün hale gelmiştir. Başlangıçta, Vektör kontrolü için yeterli işleme gücünün sağlanması oldukça maliyetliydi ancak belirli bir süre içinde, işlemci maliyeti düştü ve çalışma hızı büyük ölçüde arttı.

Sabit V/f oranına sahip geleneksel bir Konvertör ile modern bir Vektör Kontrol sürücü arasındaki temel fark, büyük ölçüde kontrol sisteminde ve invertörün IGBT'lerinin anahtarlama örüntüsünü kontrol etmek için Vektör kontrolüne ilişkin Aktif Motor Modelinin implement edilme derecesindedir.

Vektör konvertöre ait güç devresi, VVVF sürücü tarafından kullanılan devreye neredeyse özdeştir:

- 3-fazlı AC Gerilimi, DC Gerilime dönüştüren *doğrultucu*
- Besleme tarafındaki harmonikleri azaltmak için kullanılan *indüktif şok bobini*
- Düzgün ve kararlı bir DC gerilimi sağlamak için kondansatör filtreli *DC link*
- DC'yi, AC indüksiyon motoru için uygun olan değişken PWM gerilimli değişken frekanslı çıkışa dönüştüren *yarı iletken IGBT invertör köprüsü*
- Anahtarlamaı kontrol etmek, koruma ve kullanıcı ara yüzü sağlamak için *mikroişlemciye dayalı sayısal kontrol devresi*

Günümüzde, çok ünlü imalatçılara ait Değişken Hızlı “standart” AC Sürücüler, belirli bir dereceye kadar Vektör kontrolünü implement eder. Örneğin, Algılayıcısız Vektör Kontrolü, modern AC sürücülerin neredeyse tümü için bir performans özelliği olarak tanıtılır.

Günümüzde Değişken Hızlı AC Sürücüler için esas olarak 3 temel kontrol tipi mevcuttur:

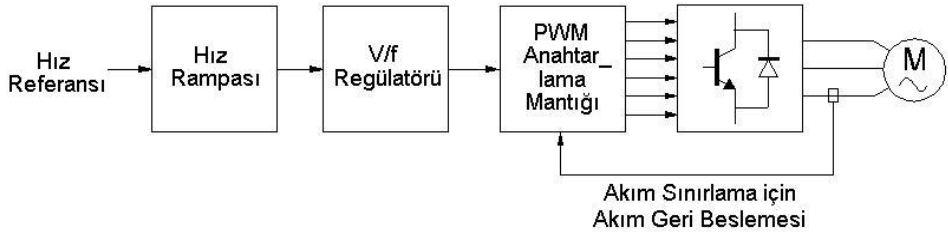
- Temel Sabit V/f sürücü, makul bir fiyatta oldukça iyi bir hız kontrolü sağlar ve santrifuj pompalarının ve fanların kontrol edilmesi için uygundur.
- Algılayıcısız V/f Vektör sürücü, akı üreten akım vektörünün (akı-vektörü) kontrolünün daha fazla/daha iyi bir şekilde implement edilmesiyle daha iyi ivmelenme, daha iyi hız regülasyonu ve daha yüksek seviyede başlangıç torku sağlar.
- Alana Dayalı Kapalı Döngülü Vektör Kontrol sürücü; hız, tork ve akı regülasyonu üzerinde ardışık PI kontrolünü kullanan DC benzeri performansla mükemmel hız ve tork kontrolü sağlar. Bu sürücünün dinamik performansı mükemmeldir.

7.6.1 Temel sabit V/f sürücüler

Sabit bir V/f sürücünün kontrol stratejisi, aşağıda gösterildiği gibi *açık-döngülü kontroldür*.

- *Hız Referansı*, dış kaynaktan alınır ve motora uygulanan Gerilimi ve Frekansı kontrol eder.
- Hız referansı, hız talebindeki adım değişikliği yavaş değişen bir sinyale dönüştürmek için ilk önce rampa devresine beslenir. Bu, hız kontrol sistemini etkileyen elektriksel ve mekanik şokları önler. İvmelenme ve yavaşlama rampa süreleri, kullanıcı tarafından ayarlanabilir.
- Sinyal daha sonra motora beslenen gerilimin ve frekansın büyüklüğünü belirleyen bir kısma iletilir. Gerilim ve Frekans arasındaki V/f oranı, her zaman sabit tutulur. Ayrıca, bu sürücüler söz konusu iki değer motor ivmesini belirleyen *değişim hızını* da ayarlar.
- Bu oran için kullanılan baz gerilimi ve baz frekansı motor isim plâkasından alınır.
- Son olarak sinyal, Anahtarlama PWM Lojik modülüne iletilir, bu modül, çıkış terminallerinde PWM algoritmasına göre gerilim örüntüsü (sinüs-kodlu, vb.) elde etmek için IGBT anahtarlarının anahtarlama örüntüsünü kontrol eder.
- Genelde motordan hız geri beslemesi alınmaz. Motorun, çıkış frekansına cevap verdiği ve bu frekansı izlediği *varsayılır* (açık-döngülü kontrol).
- Akım transdüserinin akım geri beslemesi, temel olarak koruma, gösterge ve bir akım sınır değeri belirlemek için kullanılır, kontrol stratejisinin bir parçası olarak KULLANILMAZ.

Motora akmakta olan stator akımının izlenmesi gereklidir. Sürücü genelde toplam akımı izler ve I_m ile I_r arasındaki farkı ayırt edemez.



Şekil 7.12 – Sabit V/f sürücüsünün blok kontrol diyagramı

Bu akım, torku kontrol etmek için kullanılmaz ancak aşağıdaki fonksiyonları gerçekleştirmeyi hedef alır:

- Motorun I^2t aşırı yük koruması için gerçek akımı ölçer.
- Güç elektroniği bileşenlerinin korunmasını sağlar.
- Bir *Akım Sınır değeri* sağlar, akım önceden belirlenmiş bir değeri geçtiğinde, kontrol sistemi, frekans komut sinyalini azaltır. Genel olarak, akım sınır değeri, beyan motor akımının % 150'sine ayarlanır.
- Daha yeni bazı V/f sürücüleri motor yük torkunda değişiklik meydana geldiğinde bile nispeten sabit motor hızı elde etmek için hız tutma kapasitesini geliştirmek amacıyla strateji olarak *Kayma Telafisini* kullanır. Çıkış torku arttıkça motor akımı artar, bu, konvertörün çıkış frekansını ayarlamak için kullanılabilir. Örneğin, tam beyan yükte, tam kayma değeri çıkış frekansına eklenebilir. *Kayma telafisi* ile, hız geri besleme cihazı kullanılmaksızın bir indüksiyon motoruyla gelişmiş hız regülasyonu sağlanabilir.

Bu açık-döngülü sabit V/f kontrol metodu, kararlı-durum şartlarının kontrol edilmesi için yeterlidir, bu metot ayrıca bir seviyeden diğerine hız değişiklikleri için uzun bir süre sağlayan ve süreçteki değişikliklerin sonuçlarının ciddi olmadığı pompalar, fanlar ve konveyörler gibi basit uygulamalar için yeterlidir.

Bu sürücü tipi, aşağıdaki uygulamalar için uygun değildir:

- Motorların düşük hızlarda çalıştığı uygulamalar (5 Hz'in altında). Düşük hızdaki tork genelde kötüdür çünkü stator gerilim düşüşü, akı-üreten akımın büyüklüğünü önemli ölçüde etkiler. Birçok V/f sürücü, akıyı ve sonuç olarak başlangıç torkunu artırmak için, başlangıçtaki V/f oranının

güçlendirilmesine imkân veren bir “Başlangıç Güçlendirmesi”ni [*Start Boost*] uygular.

- Daha yüksek dinamik performans gerektiren uygulamalar
- Motor torkundan çok motor frekansınının doğrudan kontrol edilmesini gerektiren uygulamalar
- Şok yüklere sahip bu sürücü tipinin dinamik performansı kötüdür.

7.6.2 Algılayıcısız V/f akı-vektör sürücüleri (Açık-döngülü Vektör)

Algılayıcısız Akı-Vektör sürücülerinin geliştirilmesi, sabit V/f sürücülerin temel dezavantajlarının üstesinden gelinmesini ve temelde düşük hızlardaki tork kaybını hedeflemektedir.

Bu sürücü tipi genelde Açık Döngülü Vektör sürücü olarak da adlandırılır çünkü temel, halâ sabit V/f oranlı kontrolördür. Ancak bu çekirdek etrafına çeşitli ilâve kontrol bileşenleri sarılmaktadır:

- Akı-üreten akımı (I_m) ve tork-üreten akımı (I_r) temsil eden iki ayrı akım vektörünü (gerçek zamanlı olarak) hesaplamak için, ölçülen stator akımını kullanan *Akım Çözücü Cihaz (matematiksel model)*
- Frekans komutunu, akımı sınırlayacak kadar hızlı bir şekilde ayarlamak için, tork-üreten bir akımı (I_r) kullanan *Yüksek Performanslı Akım Sınırlayıcı*
- Akı-üreten akımın (I_m) optimum bir şekilde kontrol edilmesini sağlamak için V/f oranını sürekli bir şekilde ayarlayan *Akı Regülatörü*
- Bir enkoder kullanmaksızın bilinen motor parametrelerine bağlı olarak rotor hızının doğru bir şekilde tahmin edilmesini sağlayan *Kayma Değeri Tahmin Cihazı*. Bu, tüm hız ve yük şartları altında gelişmiş kayma değeri telafisi sağlar.

Sonuçta, şok yüklerine karşı gelişmiş dinamik tepki ve yüksek seviyede demeraj ve ivmelenme torku sağlamak için, özellikle düşük hızlarda büyük ölçüde gelişmiş tork elde edilir. Ancak, bu sürücü tipi, Tork Kontrolü sağlamaz, halâ bir Hız Kontrol cihazıdır. İlâve olarak, hız tutma kapasitesi büyük ölçüde gelişmiştir.

Bu sürücü tipi, kapalı-döngülü hız kontrolü sağlayan bir enkoder vasıtasıyla da çalıştırılabilir. Bu, hız regülasyonu % 0,1 olacak şekilde VS sürücünün hız tutma kapasitesini geliştirir.

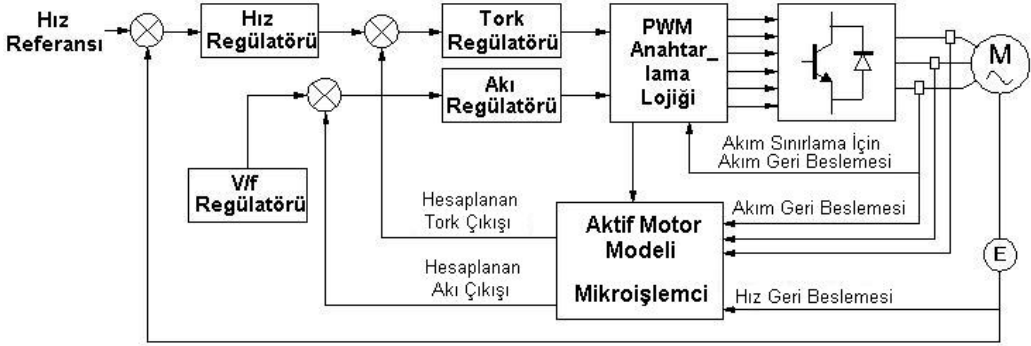
7.6.3 Alana dayalı kapalı-döngülü vektör sürücüler

1980'lerin sonlarına kadar, yüksek performanslı sürücü uygulamaları, mutlaka DC sürücünün kullanılmasını gerektirmekteydi. Ancak, DC sürücülerin bakım gereksinimlerinin fazla olması, alternatif çözümlerin üretilmesine neden olmuştur. Günümüzde vektör kontrollü AC sürücüler, DC sürücülerinkini aşan bir dinamik performans seviyesi sağlayacak şekilde gelişmiştir.

Kapalı-döngülü Vektör kontrolü, her AC VSD uygulaması için gerekli değildir, sadece uygulamaların küçük bir kısmında gereklidir. Ancak, hız regülasyonu % 0,01'den iyi olan ve dinamik tepkisi 50 radyan/s'den iyi olan bir hız regülasyonu ile birlikte sıkı kapalı-döngülü kontrol gerektiren belli sayıda uygulama mevcuttur. Bu dinamik tepki, standart V/f sürücüler tarafından sağlanan tepkiden yaklaşık 10 kat daha iyidir.

Yüksek performanslı Vektör Kontrollü AC sürücü sistemine ilişkin kontrol blok diyagramı, hız ve tork kontrol döngülerine sahip *Ardışık Kapalı-Döngülü* tiptedir:

- İki ayrı kontrol döngüsü mevcuttur, biri *Hız* için, diğeri *Akım* için kullanılır. Bu kontrol stratejisi, DC Sürücünün kontrol edilmesi için kullanılan stratejiye benzer bir stratejidir.
 - *Hız Döngüsü*, çıkış frekansını (hızla orantılıdır) kontrol eder.
 - *Tork Döngüsü*, motor faz akımını (torkla orantılıdır) kontrol eder.
- Kullanıcıdan gelen *Hız Referans* komutu, ilk önce bir komparatora iletilir, burada hata, hız regülatörünü kontrol eder.
- Hız hata sinyali, tork (akım) regülatörüne ilişkin ayar noktası haline gelir. Bu sinyal, motor devresinden gelen *hesaplanmış* akım geri beslemesi ile karşılaştırılır ve hata sinyali, motorun ivmelendirilmesinin mi yoksa yavaşlatılmasının mı gerekli olduğunu belirler.
- Akı akımı için ayrı bir kontrol döngüsü mevcuttur (V/f regülatörü)
- Son olarak, sinyal, PWM ve Anahtarlama Lojik Kısımına geçer, bu kısımda, IGBT'ler, PWM algoritmasına göre (sinüs-kodlu, yıldız modülasyonlu, VVC, vb.) çıkışta gerekli gerilim ve frekans üretilecek şekilde kontrol edilir.



Şekil 7.13 – Akı-vektör konvertör kontrol devresinin blok diyagramı

Bir AC sürücüsünde hız ölçümü için şafta-monteli artımlı bir enkoderin kullanılabilmesine rağmen, bu, genelde ilâve bir masraf olarak görülür. Bazı durumlarda, özellikle motorlar dahili frenlere sahip olduklarında, enkoderin motora monte edilmesi zordur. Bir enkoderin kullanılmadığı durumda bile, kapalı-döngülü ardışık kontrol implement edilebilir çünkü hız, Aktif Motor Modeli ile hesaplanabilir ancak doğruluk seviyesi daha düşüktür çünkü özellikle çok düşük hızlarda kayma değerinin hesaplanması zordur. Enkoder kullanmayan vektör kontrollü sürücüler genelde *Algılayıcısız Vektör sürücüler*i olarak adlandırılır. Enkoder kullanmayan vektör kontrollü sürücülerin dinamik tepkisi, genelde kullananlardan daha kötüdür. Aşağıdaki değerler, lider Değişken Hızlı Sürücü imalatçıları tarafından sunulmuş olan bazı ilginç değerlerdir:

	Enkoderli DC sürücü	V/f Akı Vektörü (Algılayıcısız)	Enkoderli V/f Akı Vektörü	Alana Dayalı (Algılayıcısız)	Enkoderli ve Alana Dayalı
Hız Doğru_luğu	% 0,01	% 1,0	% 0,1	% 0,5	% 0,001
Tork Tepkisi	10 – 20 ms	100 ms	10 – 20 ms	1 – 10 ms	1 – 10 ms

Söz konusu yüksek performanslı VS sürücü tipine ilişkin tipik uygulamalar aşağıdadır:

- Vinç ve Yük Asansörü sürücüler

- Kağıt ve çelik-şerit hatlarındaki tekrar sarıcılar
- Kağıt makineleri
- Yazıcı makineleri
- Otomasyonlu imalât hatları için konumlandırma sistemleri
- Vb.

Yüksek performanslı VSD kontrolörler kurulurken, ortalama bir *Oransal kazanç*, iyi bir geçici rejim tepkisi sağlarken, *İntegral kazanç*, yüksek seviyede kararlı durum doğruluğu sağlar. PI-kontrolörlerin avantajı, girişlerinin sıfır olmasına rağmen, konvertörü sürmek için sıfır-olmayan bir çıkış sağlayabilmeleridir. Kapalı-döngülü kontrolde bu bir avantajdır çünkü yüksek seviyedeki doğruluk, kontrolör girişinde sıfır hata sağlamalıdır.

Uygun P ve I değerleri, sırasıyla tepkinin adım ve rampa kısımlarını belirler ve bu değerlerin, her bir İnvertör-Motor-Yük kombinasyonu için hesaplanması gereklidir.

- *Hız döngüsüne ilişkin P ve I değerleri* motor akısına, yük sürtünmesine ve inerşiya bağlıdır çünkü bu değerler, hızın akıma karşı olan tepkisini etkiler.
- *Akım döngüsüne ilişkin P ve I değerleri* invertör kazancına, motor direncine ve kaçak indüktansa bağlıdır çünkü bu değerler, akımın motor frekansına olan tepkisini etkiler.

Modern sayısal sürücülerde, akım ve hız döngülerine ilişkin P ve I değerleri tuş takımı tarafından ayarlanabilir ya da alternatif olarak, birçok modern sayısal sürücü, *kendinden-ayarlama* için kullanılan bir algoritmayı içerir. Bu, geleneksel olarak daha eski analog DC Sürücüler için gerekli olan ‘döngülerin ayarlanması’ işleminin zorluklarını ortadan kaldırır. Hız döngüsünün P ve I kazançları, uygulama gereksinimlerini sağlamak için işletmeye alma esnasında belirlenebilir ve genelde değiştirilmesi pek gerekli değildir.

Vektör kontrollü AC sürücünün, DC sürücü ile karşılaştırıldığında belli sayıda dezavantajı vardır:

- Vektör kontrolör, DC Sürücünün basit ardışık kontrolörüyle karşılaştırıldığında çok daha karmaşık ve pahalıdır.
- Motor şaft hızına ilişkin doğru geri besleme elde etmek için genelde enkoder hızının geri beslenmesi gereklidir. Bu enkoderlerin, standart sincap kafesli bir AC indüksiyon motoruna takılması genelde zordur ve motorun daha pahalı hale gelmesine neden olur. Son yıllarda, bir enkoderin gerekli olmadığı durum için, ‘Algılayıcısız’ Vektör Kontrolü

geliştirilmiştir. Yaklaşık hız değeri, gerilim ve akım bilgisi gibi diğer mevcut bilgiler kullanılarak işlemci tarafından hesaplanır. Ancak, bu sürücülerin hız doğruluğu ve dinamik tepkisi, enkoder kullanan sürücülerden daha kötüdür.

- Sürücünün yapısı, genelde AC motorun düşük hızlarda yüksek seviyedeki tork yüklerinde çalıştırılmasını gerektirir. Standart sincap kafesli AC indüksiyon motoru, motorun ND ucuna takılan ve ayrı bir şekilde enerjilendirilen bir soğutma fanının kullanılmasını gerektirir.
- Regeneratif frenleme, Vektör sürücünün kullanıldığı durumda DC sürücünün kullanıldığı durumdakinden daha zordur. Rezistif tipli *dinamik frenleme* sistemleri, çoğunlukla AC Vektör kontrol sürücüleriyle kullanılmaktadır.

7.7 Değişken hızlı AC sürücülere ilişkin akım geri beslemesi

7.7.1 Değişken hızlı sürücülerde akımın ölçülmesine ilişkin metotlar

Birtakım nedenlerden dolayı Değişken Hızlı AC Sürücülerde Akım Geri Beslemesinin kullanılması gereklidir:

- *Koruma* – motor devrelerindeki termal aşırı yük, kısa devre ve topraklama hatası
- *Ölçme* – süreç kontrol sistemine ilişkin gösterge ve ölçüm için
- *Kontrol* – akım sınır değeri kontrolü ve akım döngü kontrolü

Akımı ölçmek ve sürücü kontrolör için uygun olan elektronik biçime dönüştürmek amacıyla çeşitli metotlar geliştirilmiştir. Seçilen metot, gerekli ölçüm doğruluğuna ve implementasyon maliyetine bağlıdır. Temel ölçüm metotları aşağıdadır:

- Akımın önceden-kalibre edilmiş dirençli bir linkten geçtiği *Akım Şöntü*. Linkte ölçülen gerilim, üzerinden geçen akımla doğru orantılıdır. Bu metot, genelde analog kontrol devrelerine sahip sürücülerde kullanılmaktaydı.
- Algılayıcıdan geçen akımla doğru orantılı olan DC gerilim çıkışının *Hall Etkili Algılayıcısı* [*Hall Effect Sensor*]. Geniş bir akım ve frekans aralığında yüksek seviyede doğruluk ve kararlılık sağlaması, bu cihazın temel avantajları arasındadır. Bu cihaz, genelde modern sayısal kontrol devreleriyle yaygın olarak kullanılmaktadır.

Normal çekirdek tipi bir akım transformatörünün performansı, genelde güç elektroniği uygulamaları için yeterli değildir çünkü bu transformatörün düşük frekanslardaki performansı düşük seviyededir ve sinüs biçimli olmayan dalga biçimlerinin ölçme doğruluğu yeterli değildir. Temel akım ölçme metotları, Ek B'de kapsamlı olarak açıklanmaktadır.

7.7.2 Genel amaçlı VVVF sürücülerde akım geri beslemesi

Genel amaçlı VSD'lerdeki akım geri beslemesine ilişkin temel gereksinim, invertör anahtarlama cihazının korunmasıdır. Kısa devrenin ya da topraklama hatasının meydana geldiği durumda, cihaz akımı hızlı bir şekilde yükselecektir. IGBT, BJT, GTO ya da MOSFET gibi elektronik bir güç anahtarlama cihazı, hızlı bir şekilde kapatılırsa, cihaz arızalanacaktır. VSD'nin güvenilirliği, aşırı-akım şartlarının hızlı ve doğru bir şekilde algılanmasına bağlıdır.

Akım geri beslemesine ilişkin ikincil ihtiyaç, *akım sınırlamasının* gerçekleştirilmesidir. AC VVVF konvertörlerinin eski versiyonları, akım sınırlama özelliğine sahip değildi ve yük çok arttığında, bu konvertörlerin, operatör tarafından manuel olarak resetlenmesi gerekmektedir. Bu durum, arızalanma süresinin uzamasına ve aşırı yükten dolayı kapanmaların gerçekleştiği birçok endüstride VVVF invertörlerinin kötü bir üne sahip olmasına neden olur. Yüksek seviyede yüklerle karşılaşıldığında, birçok VSD, çıkış akımını sınırlamak için akım geri beslemesini kullanır.

Akım sınırlama, akım kontrolü ile aynı değildir. Akım kontrolü, yüksek de olsa düşük de olsa akımın her zaman kontrol edilmekte olduğu anlamına gelir. Akımın sınırlanması, akımın, istenen sınır değerini aşmasını önlemek için önlem alındığını gösterir. Bu işlem, frekansta ya da gerilimde bir değişiklik olması gibi akımla sadece doğrudan olmayan bir ilişkiye sahip olabilir.

Akım geri beslemesine ilişkin üçüncü bir gereksinim, yükte kabaca orantılı olan bir akım sinyalinin sağlanmasıdır. Bu sinyal, yük, hız regülasyonunu iyileştirecek şekilde arttıkça frekansın biraz arttığı durumda, motor Volt/Hertz oranını optimize etmek ya da *kayma telafisi* sağlamak için sürücü tarafından dahili olarak kullanılabilir. Sinyal, bir yük gösterge sinyali olarak kullanıcı tarafından dışarıdan kullanım için de uygun hale getirilebilir. Bu bölümde daha önce açıklanmış olduğu gibi, motorun stator akımı mekanik yükte sadece kabaca orantılıdır çünkü stator akımı, mıknatıslanma akımı I_M ile tork-üreten akım I_R 'nin vektör toplamıdır.

Motor akımının geri beslenmesi, motora termal koruma sağlamak için de kullanılabilir. Bu, motorun termal bir modelinin, motorun iç

sıcaklığını tahmin etmek için frekansın, akım geri beslemesinin ve motor parametrelerinin kullanılarak (konvertörde I^2t kopyası kullanılarak) sürücü kontrol sisteminde implement edilmesini gerektirir. Akım seviyesi, belirli bir süre boyunca bir ayar noktasını aşarsa, motor koruması sürücüyü kapatacak (trip) ve motor termal aşırı yüküne ilişkin bir gösterge sağlayacaktır.

7.7.3 Yüksek performanslı vektör sürücülerde akım geri beslemesi

Vektör kontrollü sürücüler gibi yüksek performanslı sürücüler, alana dayalı kontrolü kullanır ve bu sürücüler, kontrol döngülerinin tümleşik bir kısmı olarak akımın geri beslenmesini gerektirir. Bu durumlarda, motor akımı basit bir şekilde önceden-tanımlanmış bir seviye ile sınırlı değildir. Akım, sürekli olarak değişen tork gereksinimiyle uyumlu olacak şekilde kontrol edilir. Her bir fazdaki stator akımının vektör bileşeni hesaplanır, her 3 fazdan da akımın gelmesi gereklidir. Bu durum, her bir çıkış fazında tercihen bir tane Hall Etkili CT ya da alternatif olarak çıkış fazlarında iki tane ve DC barasında bir tane CT kullanılarak elde edilir. Sadece iki tane faz algılayıcısı kullanılırsa, üçüncü faz bunlardan hesaplanabilir, ancak cihazın korunması için halâ bara akım algılayıcısının kullanılması gereklidir.

Motor torkunu kontrol etmek için, yüksek doğruluğa sahip motor akım geri beslemesi de gereklidir. Tork kontrolünün, yeniden sarma/sarım açma sistemleri, yük asansörleri, vinçler, konumlandırma sistemleri, vb. gibi uygulamalarda kullanılması gereklidir.

7.7.4 DC bara akım geri beslemesi

DC bara akım geri beslemesi, birçok AC VSD'de akımın sınırlandırılması ve anahtarlama cihazının korunması için uygundur. Uygun değere sahip olursa, yük göstergesi de sağlayabilir. Ancak, bu, genelde sadece dar bir hız ve yük aralığında uygundur çünkü sinyalin, bara akım dalga biçiminden *sentezlenmesi* gereklidir. Genel amaçlı sürücülerde, bu, tercih edilen metottur çünkü sadece tek bir akım geri besleme cihazının kullanılmasını gerektirir, bu nedenle karmaşık değildir ve maliyeti düşüktür.

DC bara akım sınırlandırmasının dikkatli bir şekilde implement edilmesi ile, çeşitli yük tipleri için iyi bir performans sağlanabilir. Bu durum, motor frekansının, bara akımını önceden belirlenmiş bir sınır noktasında ya da sınır noktasının altında tutması sayesinde elde edilir. Örneğin, yüksek inersiyalı bir yük çok hızlı bir şekilde ivmelendirilirse, aşırı seviyedeki yüklerle karşılaşılabilir. VSD

üzerindeki ivmelenme süresi, yük dinamiğinden bağımsız olarak ayarlanırsa, bu durum meydana gelebilir.

Örneğin, 22 kW'luk bir motorun, yüksek inerşialı bir yükü beyan torkun ve beyan akımın % 150'sinde ivmelendirmesinin 10 saniye sürdüğü bir uygulamayı ele alalım. Operatör, ivmelenme süresini 5 saniyeye ayarlarsa, bu, yükün ivmelenmesi için % 300 beyan tork ve % 500 civarında akım gerektirir. Açık bir şekilde görüldüğü gibi, % 150 akım aşırı yük beyan değerine sahip bir sürücü, istenen ivmelenme süresini sağlayamayacaktır. Bu durumda, iyi tasarlanmış modern bir VSD kapanmayacak, DC bara akımını akım sınır noktasında tutmak için ivmelenme süresini modifiye edecektir. Operatör, gerekli ivmelenme süresini sağlayamamış olabilir ancak, bu, açık bir şekilde her çalışmaya başladığında aşırı akım durumunda sürücünün kapanmasından daha iyidir ve tercih edilir.

7.8 Motordan gelen hız geri beslemesi

Elektrik motorlarının ve konumlandırma sistemlerinin kapalı-döngülü hız kontrolünde, mekanik hızı ya da konumu elektriksel bir birime dönüştüren transdüserler vasıtasıyla, dönen sistemden gelen hız ve konum geri beslemesi sağlanır.

Günümüzde aşağıdaki teknikler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır:

- Dönüş hızını, hızla orantılı olan elektriksel gerilime dönüştüren ve ekranlı bir tel çifti üzerinden kontrol sistemine ileten Takometreli Jeneratör (Tako-jeneratör) gibi *analog hız transdüseri*.
- Hızı, frekansı hızla orantılı olan bir darbe serisine dönüştüren Dönen Artımlı bir Enkoder gibi *sayısal bir transdüseri*. Darbeler, bir veya daha fazla ekranlı tel çifti üzerinden kontrol sistemine iletilir.
- Konumu, değeri açısal konumu temsil eden bir bit koduna dönüştüren Dönen Mutlak Enkoder gibi *sayısal bir konum transdüseri*. Kod, ekranlı paralel ya da seri haberleşme linki üzerinden kontrol sistemine sayısal olarak iletilir.

Analog hız transdüserlerinin yerine sayısal cihazlar geçmektedir, bu sayısal cihazlar, modern sayısal kontrol sistemleriyle daha uyumludur.

Temel hız ölçüm metotları, Ek C'de ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

8 Değişken Hızlı Sürücü Uygulamaları için AC Konvertörlerin Seçilmesi

8.1 Giriş

İmalâtçı kataloglarında mümkün olduğunca basit hale getirilmeye çalışılmasına rağmen, *Değişken Hızlı Sürücü (VSD)* uygulaması için optimum elektrik motoru ve AC konvertörün seçimi ve beyan değeriyle ilgili çok sayıda değişken olabilir. Birçok durumda, doğru seçimin yapılması, önemli ölçüde tecrübe gerektirir.

Zor olmasının nedeni, aşağıdaki gereksinimlerden biri iyileştirildiğinde, diğerinin kötüleşmesidir:

- Seçim prosedürüne bir *güvenlik marjı* ekleme gereksinimi
- Her bir uygulama için optimum motor ve konvertör *tipini* ve *büyükliğini* seçerek *maliyeti minimumda* tutma gereksinimi

Bu bölümde, standart *sincap kafesli AC indüksiyon motorlarının* hızını kontrol etmek için *PWM-tipi Değişken Gerilimli Değişken Frekanslı (VVVF)* konvertörleri kullanan *Değişken Hızlı AC sürücülerin* doğru bir şekilde seçilmesine ilişkin çok sayıda ilke yer almaktadır.

Aşağıdaki kontrol listesinde dikkate alınması gereken faktörlerin çoğu belirtilmektedir:

- Uygulamanın yapısı
- Maksimum tork ve güç gereksinimi ve bunların hıza bağlı olarak nasıl değiştiği
- Başlangıç torku şartları
- Hız aralığı – minimum ve maksimum hız
- İvmelenme & Yavaşlama şartları (frenleme gerekli midir?)
- Elektrik şebekesi gerilimiyle uyumluluk
- Konvertörün ve motorun çalışacağı çevre şartları – çevre sıcaklığı, denizden yükseklik, nem, su, kimyasal maddeler, toz, vb.
- Konvertör ve motor için havalandırma ve soğutma
- Yön (tek-yönlü ya da çift-yönlü olması)
- Hız kontrolünün doğruluğu
- Dinamik tepki (Hız ve tork tepki şartları)
- Yükteki, sıcaklıktaki, besleme gerilimindeki değişikliklerle birlikte hız düzenleme şartları
- Saat başına başlatma ve durdurma sayısı dahil olmak üzere görev çevrimi
- Sürücü sistemin genel güç faktörü ve bunun elektrik şebekesi üzerindeki etkisi
- Elektrik şebekesindeki, motordaki ve motor kablolarındaki harmonikler ve EMI
- EMI filtreleri gerekli midir?
- Topraklama, siperleme ve darbeye karşı koruma şartları
- Rotor şaftındaki *tork titreşimleri*
- *Kontrol metodu* – manüel, otomatik, analog, sayısal, haberleşmeler
- Tesisin kontrol sistemi için gerekli olan *kontrol ve haberleşme* ara yüzleri
- Gerekli *göstergeler*
- *Güvenilirlik* şartları – adanmış bir bekleme birimi gereklidir.
- *Koruma özellikleri* – iç ve dış özellikleri gereklidir.
- *Güç ve Kontrol kablolarına ilişkin* şartlar
- *Parametre ayarları*, lokal ya da uzaktan programlama

- *Bakım – yedek birim ve tamir hususları*
- Toplam maliyet, performans avantajları, enerji tasarrufu, süreçteki gelişmeler ya da verim dikkate alındığında *alternatif sistemlerin maliyeti*
- Motordaki harmoniklerden kaynaklanan *gürültü*
- Belirli motor hızlarındaki *mekanik rezonans*

Bu bölümde, dikkate alınması gereken çok sayıda teknik husus kapsamaktadır ancak yukarıdaki faktörlerin tümü ayrıntılı olarak açıklanmayacaktır.

8.2 Temel seçim prosedürü

Tecrübelerden bilindiği gibi, AC VSD uygulamalarında yaşanan sorunların çoğu, genelde insan hatasından kaynaklanmaktadır, bunlar temel olarak:

- AC indüksiyon motorunun hatalı bir şekilde seçilmesi ve beyan değerleri
- AC konvertörün hatalı bir şekilde seçilmesi ve beyan değerleri
- VSD kontrol sistemine hatalı parametre ayarlarının girilmesi

Diğer elektrikli cihazlarda olduğu gibi, *beklenen tüm şartlar altında*, sürücünün *beyan değerlerinin* doğru ve uygun olması önemlidir. *Değişken Hızlı AC Sürücü Sistemi*, aşağıdaki durumlarda doğru bir şekilde seçilir:

- **Motorun özelliği doğru olduğunda**
Doğru tipte ve büyüklükte elektrik motoru seçilmiştir, motorun çıkış torku, hızı ve doğruluğu tüm yük ve çevre şartları için yeterlidir.
- **AC konvertörün özelliği doğru olduğunda**
Doğru tipte ve büyüklükte AC konvertör seçilmiştir, konvertörün çıkışı (gerilim, akım, frekans) tüm yük ve çevre şartları için motor şartlarını sağlar.

Genelde, pahalı kısım olan konvertörün seçilmesine çok fazla önem verilmektedir, motor seçimine ise pek fazla önem verilmemektedir. Doğru prosedür şu şekilde olmalıdır:

- *İlk adım*, doğru beyan değerine sahip bir elektrik motoru seçmektir.
- Sadece bu ilk adım gerçekleştikten sonra, *motorun şartlarına* uygun bir AC konvertör seçilir.

Motor açısından bakıldığında, değerlendirilmesi gereken temel faktörler, motor şaftı üzerindeki yük torkunun, hız aralığındaki tüm hızlarda sürekli tork kapasitesi dahilinde kalmasını sağlayan motor güç beyan değeri (kW), kutup sayısı (hız) ve gövde büyüklüğüdür. Başlangıç torku gibi kısa süreli yüksek seviyedeki torkların, genelde aşağıda belirtilen belli sınırlar dahilinde kolayca üstesinden gelinebilir.

8.3 Konvertörle beslenen sincap kafesli motorların yüklenme özelliği

Herhangi bir sürücü uygulaması için bir AC motor seçilirken, en önemli şart, motorun, tüm hız ve yük şartları altında (başka bir deyişle, tüm hız aralığında) aşırı yüklenmemesinin ya da durmamasının sağlanmasıdır.

Motorun sıcaklık artış sınır değerleri dahilinde kalabilmek için, başlangıç, ivmelenme ve sürekli çalışma için yükün ihtiyaç duyduğu tork, *motorun beyan çıkış tork kapasitesi dahilinde olmalıdır*.

Güç kaynağına *Doğrudan-Hattan* (DOL) bağlanan AC motorlar için, motorun beyan hızında, yük torkunun motor torkunun yeterince altında olmasının sağlanması genelde yeterlidir, örneğin, 4-kutuplu bir motorda 1450 devir/dak'daki tork gibi. Sabit hızlı bu sürücüler, sadece tek bir hızda çalışmaktadır. Ayrıca, motorun başlangıç torkunun, yükün demeraj torkundan daha büyük olmasının sağlanması da gerekli olabilir.

Değişken hızlı sürücü söz konusu olduğunda, yük torku genelde *hıza bağlı olarak değişir*, bu nedenle, *hız aralığındaki tüm hızlar için* motor torkunun yük torkundan büyük olduğunun kontrol edilmesi önemlidir. Örneğin, bir santrifuj pompası, değişken bir tork karakteristiğine sahiptir, Şekil 8.6'da gösterildiği gibi, başlangıç torku düşük seviyededir ve tork, hızın karesiyle orantılı olarak artar. Konveyör (taşıyıcı bant sistemleri) gibi diğer yükler, sabit bir tork karakteristiğine sahip olabilir, yük torku, Şekil 8.7'de gösterildiği gibi tüm hızlar için sabit kalır.

VVVF konvertörlerle kullanılan standart TEFC sincap kafesli indüksiyon motorunun sürekli yük tork kapasitesi (yüklenilme kapasitesi) aşağıdaki sebeplerden dolayı, motorun beyan torkundan her zaman daha düşüktür.

Tüm hızlarda, harmonik akımlar nedeniyle motorda oluşan ilâve ısınmanın sonucu olarak yük kapasitesi azaltılır, ancak bu azalma çok fazla değildir. Bu azaltma gerçekleştirilir çünkü konvertörün çıkış akım dalga biçimi, anahtarlama frekansları 10 kHz civarında olan modern PWM invertörlerde bile tamamen sinüs biçimli değildir.

Geleneksel olarak, motorun tipine (kutup sayısına) ve konvertörün tipine bağlı olarak % 5 ilâ % 10 arasında beyan değer düşürme işlemi uygulanır. Ancak, modern PWM invertörlerde *beyan değerlerin düşürülmesi* ile ilgili neredeyse hiçbir işlem yapılmaz. Bunun nedeni, modern IEC motorların dahili bir termal rezerve sahip olmasıdır (2. Bölüm), bu rezerv, her türlü ilâve ısınma sorununu ortadan kaldırır. Ayrıca, mekanik yük nadiren motor beyan değerine eşittir, genelde % 20 daha düşüktür.

Küçük bir *güvenlik marjı* bırakmak iyi bir yaklaşımdır, böylece beyan değerler genelde maksimum % 5 azaltılır.

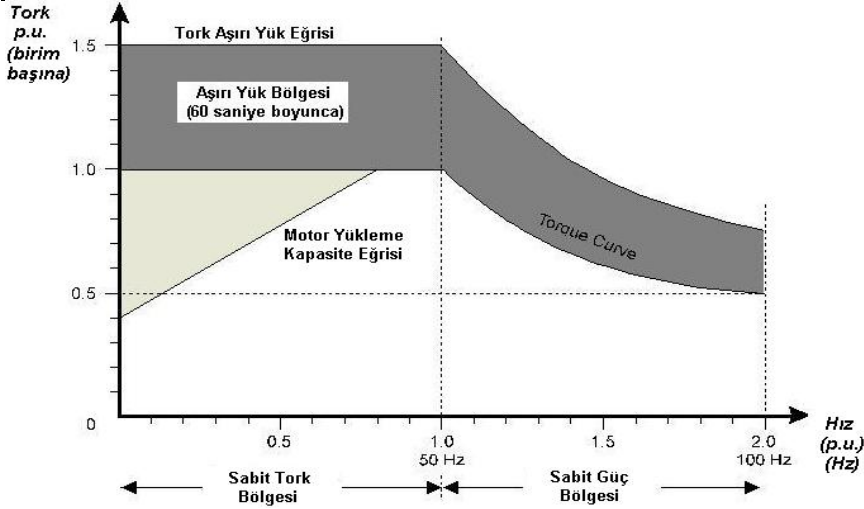
Sonuç olarak, 50 Hz'lik *taban hızda* çalışan VSD'nin çıkış torku, 50 Hz'de ve beyan DOL besleme geriliminde motor kataloğunda belirtilen beyan torkun % 95'i civarında olarak kabul edilir.

0 – 50 Hz hız aralığında *taban hızın altındaki hızlarda*, motorun sürekli yük kapasitesi azalır çünkü hem statorun hem de rotorun fan soğutması kötüleşir. Sürekli tork çıkışındaki azalma, motorun tipine ve büyüklüğüne bağlıdır ancak diğer beyan değer düşürme çizelgelerinin olmadığı durumda, hareketsiz halde beyan torkun % 40'ı civarına azalacağı varsayılabilir. Motor durduğunda bile, motor gövdesinden doğal bir şekilde ısının yayılmasıyla, soğutma ve konveksiyonel soğutma meydana gelir.

Bazı sabit torklu uygulamalar için, stator soğutmasını iyileştirmek ve düşük hızlarda yük kapasitesini artırmak için, motora monte edilen ve ayrı bir şekilde enerjilendirilen yardımcı bir soğutma fanı kullanılabilir. Bunlar genelde, motora, eşit gövde büyüklüğüne sahip bir motor için beyan hızda akan havanın hacmine eşit hacimde hava sağlar. Bu ilâve soğutma, yük kapasitesi sorununun tamamıyla üstesinden gelinmesini sağlamaz. Sincap kafesli bir motorda, rotor kayıpları genelde stator kayıplarından daha yüksek seviyededir ve düşük hızlarda rotor kayıplarının, ilâve soğutma sağlandığında bile harcanması zorlaşır. Ayrı soğutma, açık motorlarda daha etkindir (IC01).

Taban hızın üstündeki hızlarda, motorun çıkış tork kapasitesi düşer çünkü hava boşluğu akısı azalır (manyetik alan azalır). Çıkış torku, 50 Hz'in üstünde, motor hızıyla doğru orantılı olarak azalır (Bölüm 8.4'e bakılmalıdır).

Aşağıda Şekil 8.1'de gösterildiği gibi AC VSD *yükleme kapasite eğrisi*, yukarıdaki faktörleri özetler ve kesiksiz çizgiler, *sürekli* yük torkunun maksimum sınır değerlerini işaretler. VVVF konvertörlerden beslenen motorlar, hız-aralığı için yükleme kapasite sınır çizgisinin altındaki tork değerlerinde sürekli olarak yüklenebilir.



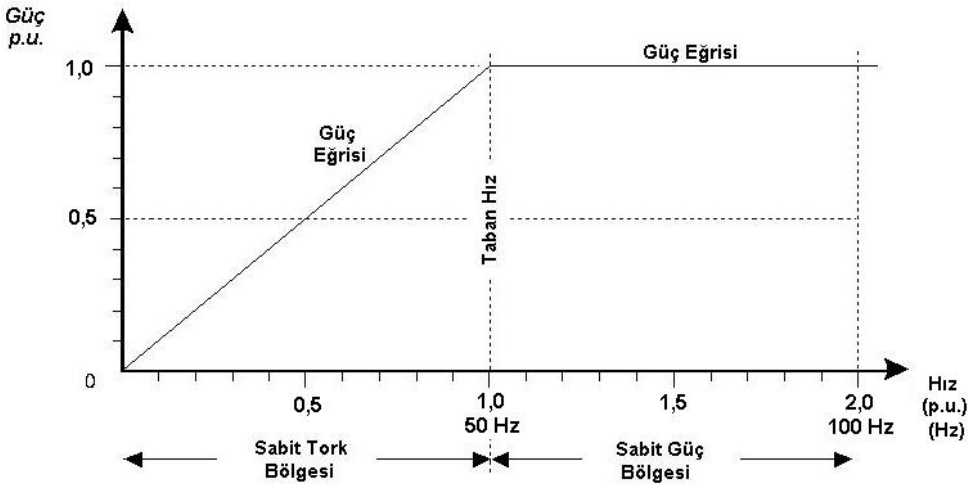
Şekil 8.1 – PWM-tipi bir VVVF konvertör tarafından kontrol edildiğinde, TEFC sincap kafesli motorun hız aralığı ve yük tork kapasitesi

Ancak, motorlar, *kısa süreler boyunca* yükleme kapasite eğrisi tarafından izin verilen seviyeden daha yüksek seviyede yük torklarını tolere edebilir. Başlatma sırasında ve önceden belirlenmiş bir hız aralığına kadar ivmelenme sırasında genelde yüksek seviyede torklar gereklidir. İzin verilen aşırı yükleme süresi, motorun büyüklüğü, aşırı yükün şiddeti ve hız gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Birçok AC konvertör, başlatma ve geçiş işlemi için 60 saniye boyunca % 150'ye kadar aşırı-akım kapasitesine sahiptir.

Yukarıdaki eğride, birçok sürücü uzmanı tarafından kullanılan ve AC VSD'nin termal yük kapasitesini gösteren bir eğri mevcuttur. Bunlar, PWM-tipi VVVF konvertörlerle çalışan standart IEC-tipi sincap kafesli motorları esas alır. Eğriler, birim başına (p.u.) değerler cinsinden verilir, bu nedenle, her türlü gerilime ve büyüklüğe sahip motorlara uygulanabilir. 5,5 kW'un altında çalışan küçük motorlar, düşük hızlarda biraz daha yüksek seviyede yük kapasitesine sahiptir.

Eş Değer Yük Güç (kW) Kapasite eğrisi, aşağıdaki şekilde gösterilmektedir. *Sabit tork bölgesi* olarak bilinen taban hızın altındaki bölgede, güç kapasitesi, sıfır hızda sıfır güçten, taban hızda tam güce kadar lineer olarak artar.

Taban hızın üstünde, güç çıkış kapasitesi daha fazla artırılmaz ve hızda daha fazla artış olduğunda, güç çıkış kapasitesi sabit kalır. Bu bölge, *sabit güç bölgesi* olarak adlandırılır.



Şekil 8.2 – PWM-tipi VVVF konvertör tarafından kontrol edildiğinde TEFC sincap kafesli motorun yük gücü kapasitesi

8.4 Sabit güç bölgesinde çalışma

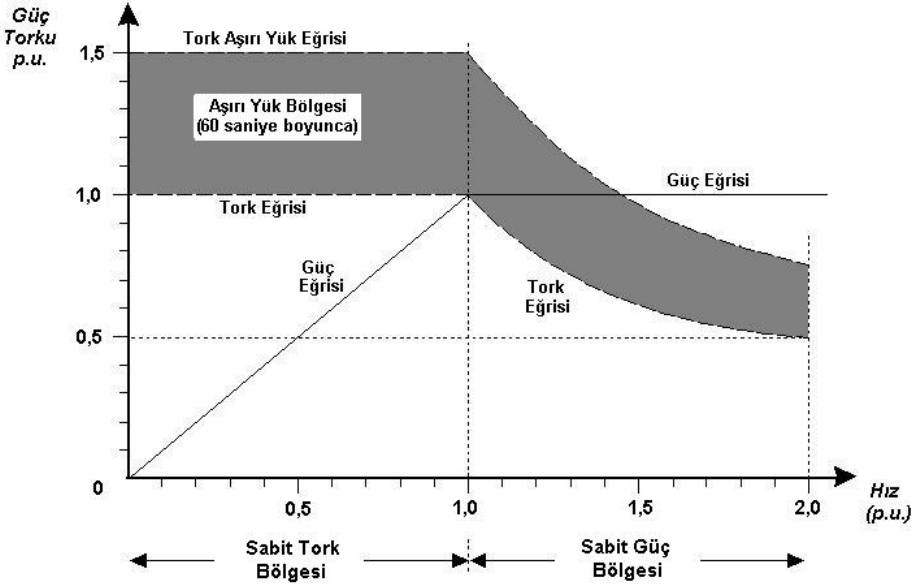
DC sürücünde olduğu gibi, bir AC VSD'nin motor çıkış torku, hava boşluğu akısı ve tork-üreten rotor akımının çarpımı ile doğru orantılıdır. *Stator akımı*, kabaca rotor akımına eşit olarak kabul edilebilir (6. Bölüme bakılmalıdır).

Açık-döngülü tipik bir VVVF sürücü sisteminin kontrol sistemi, sıfır hız ile taban hız (50 Hz) arasında yaklaşık olarak *sabit bir motor hava boşluğu akısı* sağlamak için sabit bir V/f oranına sahip bir çıkış gerilimi üretir. Bu durum, sıfır hız ile taban hız (50 Hz) arasında sabit bir tork karakteristiği üretir ve güç, hız ile orantılı olarak artar.

İnvertör çıkış frekansının taban hızın üstüne ve bazı konvertörlerde, 400 Hz kadar yüksek frekanslara çıkarılması mümkündür. Taban hızın üstündeki hızlarda, çıkış gerilimi, sabit DC baraya göre mümkün olan maksimum seviyede sabit kalır.

Sonuç olarak, V/f oranı (hava boşluğu akısı) invertör frekansı ile ters orantılı olarak ve motorun çıkış torku akıyla doğru orantılı olarak azalacaktır. Bu bölgede torkun azalmasına rağmen, çıkış gücü sabit kalır ve bu bölge, *sabit güç bölgesi* ya da *alan-zayıflatma bölgesi* olarak bilinir. *Alan-zayıflatma bölgesi* terimi, DC sürücü terminolojisinden gelmektedir, alan akısı azaltılarak (zayıflatılarak) hız, taban hızın üstüne çıkarılabilir. Esas olarak, burada da aynı şey meydana gelmektedir.

Taban hızın üstünde çalışmanın temel etkisi, *motorun çıkış torkunun hızdaki artışla doğru orantılı olarak azalmasıdır*. Bu bölgede, motor torkunun yük torkunun altına düşmemesi sağlanmalıdır, aksi halde motor duracaktır.



Şekil 8.3 – AC VSD için tork-hız ve güç-hız eğrileri

Yukardaki şekilde, iki bölge için tork-hız eğrisi (kesikli çizgi ile) ve güç-hız eğrisi (kesikli olmayan çizgi ile) gösterilmektedir:

- Sabit tork bölgesi – taban hızın altındadır.
- Sabit Güç Bölgesi – taban hızın üstündedir (alan zayıflatma bölgesi)

8.5 Makina yükünün yapısı

Sabit ya da değişken hızlı hiçbir elektrik motoru sürücüsü, sürülecek makina hakkında belli bazı bilgiler bilinmeden (özellikle *makina yükü* bilinmeden) doğru bir şekilde tanımlanamaz.

Sabit hızlı sürücüler için, beyan hızdaki *güç gereksiniminin* (kW cinsinden) belirtilmesinin yeterli olduğu zannedilir. Daha büyük sürücülerde, motor imalatçıları, motor tasarımının ivmelenme gereksinimlerini sağlayıp sağlamadığından emin olmak için genelde yük hakkında (inerşia momenti gibi) daha fazla bilgi ister. Değişken hızlı AC sürücüler söz konusu olduğunda, her zaman yük karakteristikleriyle ilgili daha fazla ayrıntılı bilginin verilmesi gereklidir. Aşağıdaki durumlar gerçekleştiğinde, AC VSD'nin çıkış torkunun yeterli olduğu kabul edilir:

- Çıkış torku, makina yükünün demeraj torkunu aştığında
- Çıkış torku, sürecin gerektirdiği ivmelenme süresi içinde, yükü, hareketsiz durumdan önceden ayarlanmış olan hıza getirebildiğinde

- Çıkış torku, hız aralığındaki herhangi bir hızda ve tüm şartlar altında, sürekli çalışma sırasında, yük torkunu yeterli bir marj değeri kadar aştığında
- Motor akımı, elektriksel bileşenlerin tümünün termal beyan değerlerini aşmadığında ve sürekli çalışma sırasında yük kapasite eğrisinin altında kaldığında

Aşağıda belirtilen seçim prosedürü, temelde özel gereksinimleri olmayan ve başlangıçtaki ivmelenme periyodundan sonra sürücünün sürekli olarak çalıştığı tek-motorlu değişken hızlı AC sürücülere uygulanır. Bu, *standart* TEFC sincap kafesli indüksiyon motorunun ve *standart* AC VVVF konvertörünün kullanılabileceği anlamına gelir. Çok-motorlu VSD'ler ve diğer özel uygulamalar daha fazla araştırma yapılmasını gerektirir ve sonraki kısımlarda açıklanacaktır. Genel olarak, özel uygulamalar söz konusu olduğunda özel beyan değeri hesaplamaları için motor ve/veya AC konvertör imalatçılarına danışılmalıdır.

VSD'ler tarafından yaygın olarak sürülen çok sayıda farklı makina yük tipi mevcuttur, bunların her biri farklı tork, inersia, vb. gibi karakteristiklere sahiptir. Bunlara örnek olarak fanlar, kırma makinaları [*crusher*], kompresörler, konveyörler, harç makinaları, vb. verilebilir.

VSD uygulamaları için, *makina yükü hakkında bilinmesi gereken hususlar* şunlardır:

- *Yük Torku* – motorun çıkış şaftına bağlı yük torkunun tipi, büyüklüğü ve karakteristiği
- *Hız Aralığı* – değişken hızlı sürücünün minimum ve maksimum hızı
- Motor şaftına bağlı *mekanik yükün ve motorun inersiası*

8.5.1 Yük torku

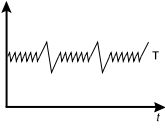
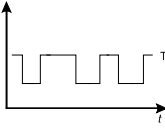
Sürülen makinanın gerektirdiği tork, motorun büyüklüğünü belirler çünkü motorun sürekli beyan torku, sürülen makinanın gerektirdiği torktan her zaman daha büyük olmalıdır.

Yük torkunun büyüklüğü, motorun maliyetini belirler çünkü genel kural olarak, *bir elektrik motorunun maliyeti, beyan çıkış torkuyla (beyan güçle değil!) yaklaşık olarak doğru orantılıdır*. Yük torkunun mutlaka sabit bir değer olması gerekmez. Şekil 8.4'teki çizelgede gösterildiği gibi, yük torku, hıza, konuma, açığa ve zamana göre değişebilir.

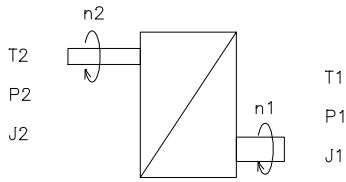
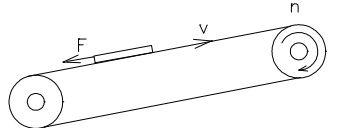
Yük torkunun önemli başka bir özelliği, torkun, *motorun şaftında* uygulanmasının gerekli oluşudur. Dişli kutuları, konveyörler ya da

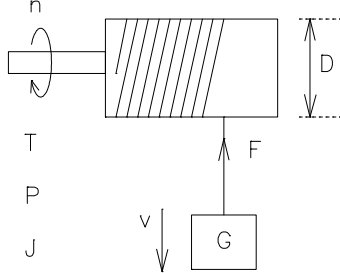
yük asansörleri söz konusu olduğunda, makinadaki gerçek tork, motor şaftındaki torka dönüştürülmelidir. Yük torkunu, hızını ve inerşia momentini, motor şaftındaki değerlerine dönüştürmek için Şekil 8.5'te verilen dönüşüm formülleri kullanılır.

Makina yükü	Karakteristik Eğri	Formül
Konveyörler Helezon Konveyörler Pozitif Boşaltma Pompaları [:Positive displacement pump] Kompresörler Haddehaneler		$T = k \text{ (Constant)}$ $P = k \cdot n \cdot T$
Santrifüj Pompaları Santrifüj Fanları		$T = k \cdot n^2$ $P = k \cdot n^3$
Sıkıp çıkarma presi [:extruder] Çamur pompaları [:slurry pumps]		$T_B = \text{Breakaway}$
Vinç motorları [:winder] Torna tezgâhları [:lathe]		$P = k$ $T = \frac{k \cdot P}{n}$
Karşıt Makinalar		
Presler		

Kırma makineleri <i>[crusher]</i> Haddehaneler Odun yontma cihazı		
Döner vinçler <i>[crane]</i> Kereste fabrikaları <i>[sawmill]</i> Presler		

Şekil 8.4 – Hız açısının ve zamanın bir fonksiyonu olarak tipik makina yükü tiplerinin tork karakteristiği (Not: $k = \text{sabit}$)

Mekanik Cihaz	Karakteristik	Dönüşüm Formülü
<i>Dişli Kutusu</i>		$T_2 = \frac{T_1 n_1}{\eta n_2}$ $P_2 = \frac{P_1}{\eta}$ $J_2 = J_1 \frac{n_1^2}{n_2^2}$
Konveyör		$T = \frac{F v}{\eta 2\pi n}$ $P = \frac{F v}{\eta}$ $J = M \frac{v^2}{(2\pi n)^2}$
Asansör		$T = \frac{F D}{\eta 2}$

		$P = \frac{F v}{\eta}$ $J = M \frac{D^2}{4}$ $v = \pi D n$
--	---	--

$T = Nm$ cinsinden tork $F = N$ cinsinden kuvvet
 $P = kW$ cinsinden güç $v = m/saniye$ cinsinden hız
 $J = kgm^2$ cinsinden inerşia $\eta = p.u. (birim başına)$ cinsinden verim

Şekil 8.5 – Yük torkunun, gücün ve inerşia momentinin motor şaft değerlerine dönüştürülmesi için kullanılan formüller

Yük şartları genelde belirli bir hızdaki (n devir/dak) absorbe edilen mekanik güç (P_M kW) olarak verilir. Mekanik yük torku, 2. Bölüm’de verilen aşağıdaki formülden hesaplanabilir:

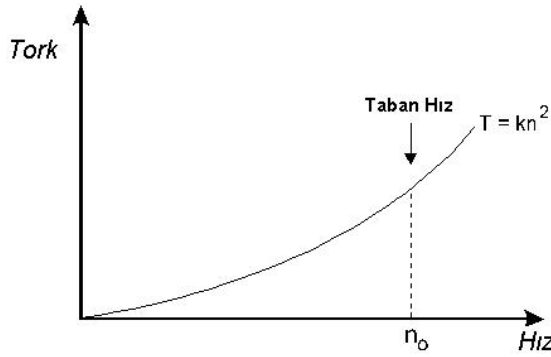
$$T_M = [9550 \times P_M (kW)] / n(devir/dak)$$

Burada

T_M Nm cinsinden motor şaftındaki mekanik tork
 P_M kW cinsinden motor şaftındaki absorbe edilen yük
 gücü
 n devir/dak cinsinden motor şaftının gerçek dönüş hızı

8.5.2 Değişken torklu makina yükleri

Değişken torklu makina yükleri, santrifuj pompaları ve fan gibi tüm hız aralığı üzerinde değişken bir torka sahip yüklerdir. Bu yüklere ilişkin tork-hız eğrileri, aşağıda Şekil 8.6’da gösterilmektedir.



Şekil 8.6 – Değişken torklu bir yükün tork-hız karakteristikleri

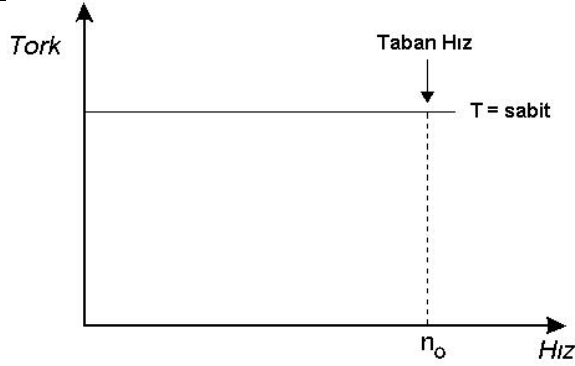
Pompaların ve fanların hızının kontrol edilmesi için değişken hızlı sürücülerin kullanılması, en basit ve en az sorun çıkaran uygulamalardır. Bunun nedeni, başlangıç demeraj torkunun genelde çok düşük olması ve daha sonra, torkun, hıza bağlı olarak artmasıdır. Aşağıda, bu yük tipiyle ilgili bazı önemli faktörler belirtilmektedir:

- Normal santrifuj pompaları ve fanları için başlangıç torku çok düşüktür ve tüm hızlar için AC motorun yükleme kapasite eğrisinin altındadır. Çamur pompaları bazen sorun çıkarabilir çünkü bu pompalar, yüksek bir demeraj torkuna sahip olabilir.
- Gerekli başlangıç torku düşük seviyededir, bu nedenle, ivmelenme sırasında, konvertörlerin aşırı yüklenmesi pek gerekli değildir.
- Düşük hızlarda uzun süre boyunca çalışılması, nadiren sorun çıkarır.
- Ancak, motorun taban hızının üstündeki hızlarda çalıştırılması sorun çıkarabilir çünkü bu sürücünün güç gereksinimi, *hızın kübüyle* orantılı olarak artar. Bu durum, sabit güç bölgesinin özelliklerine uygun değildir.

Modern PWM konvertör imalatçıları, 30 saniye boyunca % 120'ye kadar olan düşük aşırı-akım kapasitesine sahip indirgenmiş performanslı sürücülerini kullanarak pompa ve fan uygulamaları için VSD maliyetini düşürmeye çalışmaktadır:

8.5.3 Sabit torklu makina yükleri

Sabit torklu makina yükleri, konveyörler, pozitif boşaltma pompaları, vb. gibi tüm hız aralığında sabit torka sahip yüklerdir. Bu yüklere ilişkin tork ve güç eğrileri, aşağıda Şekil 8.7'de gösterilmektedir.



Şekil 8.7 – Sabit torklu bir yükün tork-hız karakteristiği

Konvertörle beslenen bir elektrik motoruyla *sabit torklu yükler* sürülürken karşılaşılan olası sorunlar şunlardır:

- *Başlangıç torku*, teorik olarak tam hızlı yük torkuna eşittir ancak uygulamada, gerçek başlangıç torku, aşağıdaki ilâve gereksinimlerden dolayı çok daha yüksek seviyede olabilir:
 - Demeraj torku
 - İvmelenme torku (dinamik tork)
- Yük torku, motor yükleme kapasite eğrisinin üstündeyse, uzun süre boyunca *düşük hızlarda* çalışılması, motorun termal olarak aşırı-yüklenmesine neden olabilir. Bazı durumlarda, ayrı cebri soğutma gerekli olabilir.
- Motorun taban hızının üstündeki hızlarda çalışılması da sorun yaratabilir, motor kayma değeri artar ve motorun durma ihtimali yükselir.

Modern PWM konvertör imalatçıları, aşağıdaki özellikleri sağlayarak bu sorunların bazılarının üstesinden gelmeye çalışmıştır:

- Yüksek seviyede kısa-süreli aşırı-akım kapasitesi, tipik olarak 60 saniye boyunca % 150'ye kadar çıkabilir, bu kapasite genelde başlangıç aşamasında gereklidir.
- Düşük frekanslarda stator gerilim-düşüşünü telafi etmek için gerilim güçlendirmesi
- Motoru aşırı yükten korumak için yeterli motor koruması
 - Düşük hızlı soğutma azalmasını modelleyen motor termal koruması
 - Motor termistör koruma girişleri

Bu sınırlamaların bazıları, Şekil 8.1'deki *Yükleme Kapasite Eğrisinde* gösterilmektedir.

8.5.4 Hız aralığı

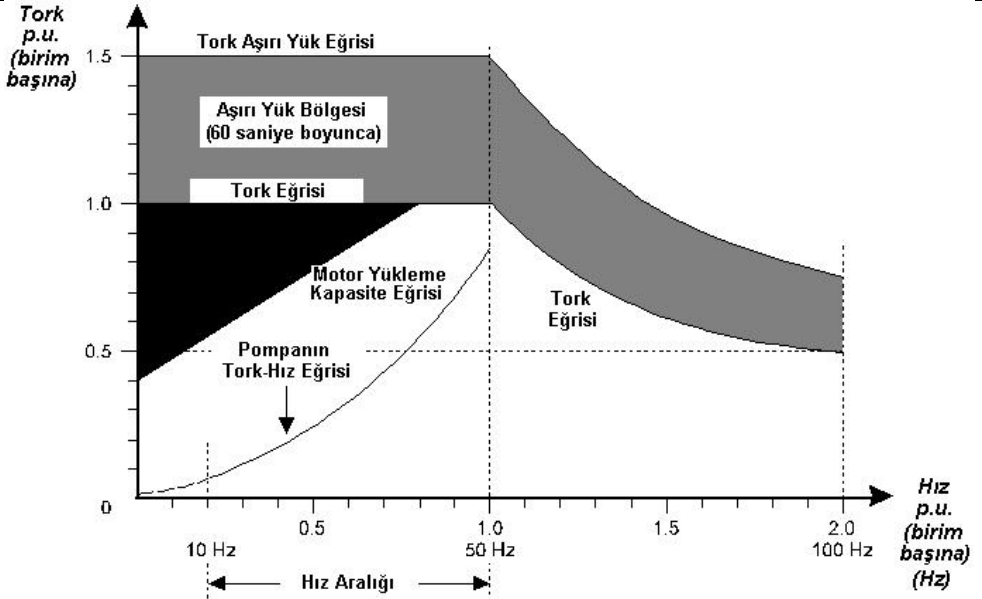
VSD için doğru büyüklükteki bir elektrik motorunun seçilmesi, motorun sürekli olarak çalışmasının beklendiği hız aralığından etkilenir. Önemli olan husus şudur: Motor, *hız aralığı dahilindeki* herhangi bir hızda, yükü, durmaksızın ve motorda aşırı ısınma meydana gelmeksizin sürekli bir şekilde çalıştırabilmelidir, başka bir deyişle, motorun torku ve termal kapasitesi, hız aralığındaki tüm hızlar için (yükleme kapasitesi sınır değerleri dahilinde) yeterli olmalıdır.

Motorun, standart bir TEFC kafesli motorda *taban hızın altındaki hızlarda* ($f < 50$ Hz) çalıştırılması, motor üzerinde aşağıdaki etkilere neden olur.

- Motorun soğutma işlevi zayıflar çünkü motor şaftına bağlı olan soğutma fanı, daha düşük bir hızda çalışmaktadır. Bu nedenle, motordaki sıcaklık artışı, beklenenden çok daha yüksek olabilir (Şekil 8.1'e bakılmalıdır).

Şekil 8.8'de, 10 Hz ilâ 50 Hz aralığında çalışan değişken hızlı bir pompa sürücüsüne ilişkin tork-hız eğrisi örneği gösterilmektedir. Şekle ilişkin bazı açıklamalar şu şekildedir:

- Yük torku, tüm hızlarda yükleme kapasitesinin sınır değerleri dahilindedir.
- Maksimum hız, 50 Hz'lik taban hızı altındadır. Hız aralığı 50 Hz'in üstüne ÇIKARILMAMALIDIR çünkü yük torku, sürücünün yükleme kapasite sınır değerini geçecektir (Yük torku, hızın karesine bağlı olarak artar).
- Başlangıç torku düşüktür, bu nedenle demeraj sorunu ortadan kalkar.
- İvmelenme torku yüksektir, böylece hızlı bir şekilde ivmelenme gerekli ise, sürücünün hızlı bir şekilde maksimum hızına ulaşması beklenebilir. Ancak, pompalar söz konusu olduğunda, *su çarpmasını* önlemek için normalde ivmelenme süresinin uzun olması istenir.



Şekil 8.8 – PWM-tipi VVVF konvertör tarafından kontrol edilen değişken hızlı bir pompa sürücünün hız aralığı ve tork eğrisi

Standart TEFC kafesli motorla, motorun *taban hızın üstündeki hızlarda* ($f > 50$ Hz) çalıştırılması, motor üzerinde aşağıdaki gibi bir etkiye sahiptir:

- Hava boşluğu akısı azalır çünkü V/f oranı azalır. Sonuç olarak, motorun çıkış tork kapasitesinde bir düşüş meydana gelir. Tork, frekansla orantılı olarak düşer. Yük torkunun, kısa bir periyot için bile motorun ivmelenme torkunu aşmasına izin verilmez, aksi halde motor duracaktır.

Senkron hızların üzerinde izin verilen maksimum tork, aşağıdaki şekilde motor karakteristiklerine ve frekansa bağlıdır:

$$T_{en\ büyük} \leq 0,6 T_P (50/f)$$

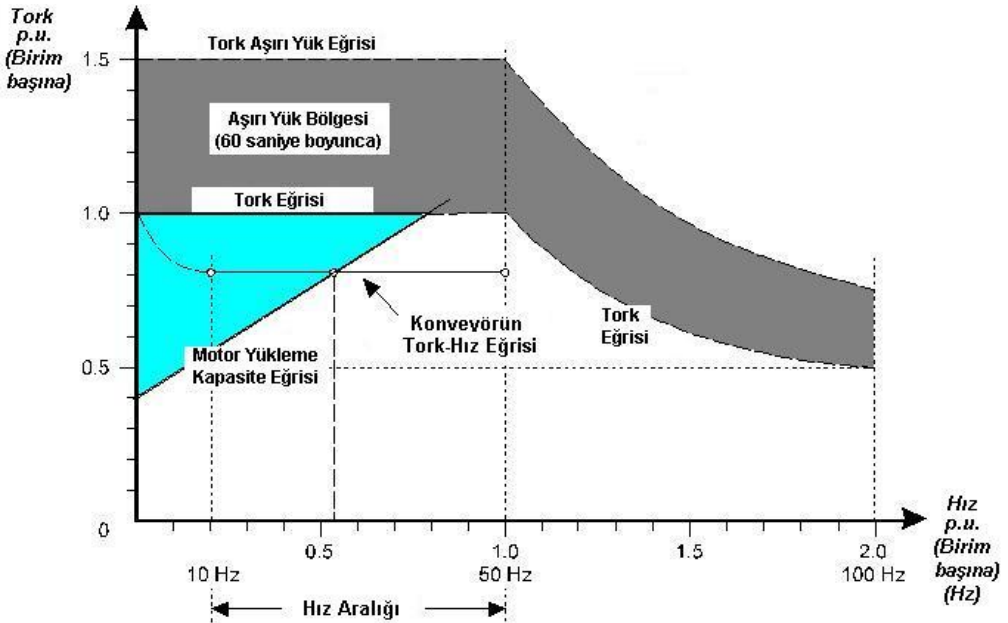
Burada

T_p Nm cinsinden motorun maksimum torku

F Hz cinsinden senkron aralığın üstündeki gerçek frekans

0,6 Güvenlik faktörü

Şekil 8.9'da, 10 Hz ilâ 50 Hz arasında benzer bir aralıkta çalışan değişken hızlı bir konveyör sürücünün tork-hız eğrisine ilişkin bir örnek gösterilmektedir.



Şekil 8.9 - PWM-tipi VVVF konvertör tarafından kontrol edildiğinde değişken hızlı bir konveyör sürücünün hız aralığı ve tork eğrisine ilişkin örnek

Bu uygulamaya ilişkin bazı açıklamalar aşağıdaki şekildedir:

- 28 Hz'in altındaki düşük hızlarda, yük torku, yükleme kapasite sınır değerlerinin dışına çıkar. Bazen motorun sürekli olarak 28 Hz'in altındaki hızlarda çalıştırılmasıyla ilgili sorunlar yaşanabilir.
- Maksimum hızın, 50 Hz'lik taban hızın altında olmasına rağmen, 50 Hz'in üstündeki yükleme kapasite karakteristiğinin avantajlarından faydalanmak için hız aralığı 50 Hz'in üstüne çıkarılabilir (Hızda artış olur, yük torku sabit kalır).
- Yüksek seviyede demerajla birlikte başlangıç torku yüksek seviyededir, bu nedenle demerajla ilgili bazı sorunlar ortaya çıkabilir.
- İvmelenme torku düşüktür, bu nedenle, VSD akım sınır değerinin aşılmasını önlemek için sürücü hızlanma süresinin uzun olması gerekli olabilir.

8.5.5 Makina yükünün inerşiası

İvmelenme ve yavaşlama sırasında, yükün inerşia momenti, motor üzerinde ilâve dinamik ivmelenme torku oluşturabilir. Dinamik ivmelenme torku, yük bir hızdan diğerine ivmelendiğinde, yükün kinetik durumunu değiştirmek için gerekli olan ilâve torktur. İnerşia momenti ve gerekli ivmelenme süresi, motor torkunu ve sonuç olarak motorun büyüklüğünü ve maliyetini etkiler.

Dinamik ivmelenme torku (T_A) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$T_A = J 2\pi (dn/dt) \text{ Nm}$$

Burada

dn Devir/saniye cinsinden ivmelenme sırasındaki hız değişimi

dt Hız değişiminin gerçekleşmesi için geçen süre (saniye cinsinden)

J Sürücü sistemin inerşia momenti (kgm^2 cinsinden)

2. Bölüm'de açıklanan bilgiler kullanılarak, bu formül aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir (hız, devir/dak cinsindendir).

$$T_A = J_{\text{toplamlam}} 2\pi (n_2 - n_1)/60t \text{ Nm}$$

Sabit bir hızda çalıştırıldığında, motor, makina yük torkuna (T_L) karşılık gelen bir tork sağlamalıdır. İvmelenme sırasında, ilâve olarak T_A ivmelenme torku gereklidir. Bu nedenle, motordan istenen toplam tork, yük torku (T_L) ile dinamik torkun (T_A) toplamından daha büyük olmalıdır. Motor, yük kapasitesini aşmadan bu toplam torku sağlayabilecek şekilde seçilmelidir.

$$T_M \geq T_L + T_A \text{ Nm}$$

Örnek

Bir konveyör sürücü, 10 saniye içinde sıfır hızdan 1500 devir/dak hızına ivmelenecektir. Yükün inerşia momenti $J_L = 4,0 \text{ kgm}^2$ 'dir. Motor şaftına göre konveyör yükünün torku, 520 Nm'de sabittir. Söz konusu motor, J_M değeri $1,3 \text{ kgm}^2$ olan 110 kW'luk, 1480 devir/dak'lık bir motordur. Bu motor bu görev için yeterli midir?

Sürücü sistemin toplam inerşia momenti şu şekildedir:

$$J_{\text{toplamlam}} = 4,0 + 1,3 = 5,3 \text{ kgm}^2$$

İvmelenme sırasındaki gerekli dinamik tork şu şekildedir:

$$T_A = 5,3 \times 2\pi (1500-0)/600 \text{ Nm}$$

$$T_A = 83,25 \text{ Nm}$$

Makina yükü, değeri aşağıdaki gibi verilen sabit bir torktur:

$$T_L = 520 \text{ Nm}$$

İvmelenme sırasında, motor, şu değerdeki toplam torku sağlamalıdır:

$$T_{\text{toplamlam}} = T_L + T_A \text{ Nm}$$

$$T_{\text{toplamlam}} = 520 + 83,25 = 603,25 \text{ Nm}$$

Beyan motor torku, imalâtçının çizelgelerinden ya da hesaplanan beyan güçten aşağıdaki şekilde elde edilebilir:

$$T_N = 9550 \times 110 / 1480 \text{ Nm}$$

$$T_N = 709,8 \text{ Nm}$$

$T_N \geq T_{Toplam}$ olduğu için, açık bir şekilde görüldüğü gibi, motor sürücü şartları için uygundur.

Motor, mekanik yükü, dişli kutusu ya da makaralar vasıtasıyla sürdüğünde, yükün inerşiası, Şekil 8.5'teki çizelgede verilen formül kullanılarak motor şaftındaki inerşiaya çevrilmelidir.

$$J_M = J_L [(Yük Hızı)^2 / (Motor Hızı)^2] \text{ kgm}^2$$

Burada

J_M Motor şaftındaki inerşia

J_L Yük şaftındaki inerşia

Örnek

Beyan hızı 1430 devir/dak olan ve rotor inerşiası $0,03 \text{ kgm}^2$ olan 5,5 kW'luk bir motor, 2:1'lik makara ve bir kayış sürücü vasıtasıyla, bir makinayı 715 devir/dak hızında çalıştırmaktadır. 715 devir/dak hızında tam beyan hızda çalışan mekanik yükün inerşiası $5,4 \text{ kgm}^2$ 'dir. Yük, 715 devir/dak'ta 4,5 kW güç çeken sabit torklu bir yükse, bu sürücünün durağan durumdan 715 devir/dak'lık tam yük hızına ivmelenme süresi nedir? Tam motor torkunun beyan torkun % 150'sine eşit olduğunu ve ivmelenme periyodu boyunca sabit olduğunu varsayın.

Motorun beyan çıkış torku şu şekilde verilir:

$$T_N = \frac{9550 \times 5.5}{1430} \text{ Nm}$$

$$T_N = 36,7 \text{ Nm}$$

İvmelenme periyodu sırasında maksimum çıkış torku % 150'dir.

$$T_M = 1,5 \times 36,7 = 55,05 \text{ Nm}$$

Yük tarafından absorbe edilen güç, 715 devir/dak'ta 4,5 kW'tur ve aşağıdaki gibi bir yük torku sağlar.

$$T_N = \frac{9550 \times 4.5}{715} \text{ Nm}$$

$$T_L = 60,1 \text{ Nm}$$

Bunun, makara oranı vasıtasıyla motor şaftına göre dönüştürülmesi gereklidir:

$$T_{Lm} = 60,1 \frac{715}{1430} = 30,05 \text{ Nm}$$

İvmelenme torku, motor şaftına göre olan yük torku ile maksimum motor torku arasındaki farktır.

$$T_A = (T_M - T_{Lm}) \text{ Nm}$$

$$T_A = (55,05 - 30,05) = 25 \text{ Nm}$$

Mekanik yükün motor şaftına göre olan inerşiası şu şekildedir:

$$J_M = 5.4 \frac{(715)^2}{(1430)^2} \text{ kgm}^2$$

$$J_M = 1,35 \text{ kgm}^2$$

$$J_{\text{toplamlam}} = 1,35 + 0,03 = 1,38 \text{ kgm}^2$$

Bir dişli kutusu kullanılırsa, dişli kutusunun motora göre olan inerşiası da dikkate alınmalıdır.

Bu nedenle, sürücü sistemin toplam ivmelenme süresini hesaplamak için, *ivmelenme torkunun sabit kalması* ve sürücünün tek biçimli bir sürede lineer olarak ivmelenmesi şartıyla yukarıdaki basit formül uygulanabilir.

$$t = J_{\text{Top}} 2\pi (n_2 - n_1) / 60 T_A \text{ saniye}$$

Burada

t saniye cinsinden toplam ivmelenme süresi

J_{Top} (motor + yükün) kgm² cinsinden inerşia momenti

n devir/dak cinsinden sürücünün son hızı

T_A Nm cinsinden sürücü sistemin ivmelenme torku

İvmelenme torkunun ivmelenme periyodu boyunca sabit kaldığı varsayılarak, konveyör sürücü sisteminin minimum ivmelenme süresi şu şekildedir:

$$t = 1,38 \frac{2\pi (1430 - 0)}{60 \cdot 25} \text{ saniye}$$

$$t = 8,3 \text{ saniye}$$

Bu formül, ivmelenme süresi için *kaba bir tahmin* olarak kullanılabilir ancak bu formül sadece yaklaşık bir değer verir çünkü ivmelenme torku, değişen iki değer olan *motor torku* ile *yük torku* arasındaki fark olup genelde sabit bir değer değildir.

Daha doğru bir sonuç elde etmek için iki alternatif metot mevcuttur:

- Sonucu doğru bir şekilde hesaplamak için bir bilgisayar programı kullanın. Bu teknik, büyük mühendislik firmaları, motor imalâtçıları ve motor satıcıları tarafından kullanılır.
- İvmelenme süresini hesaplamak için manüel bir grafik sistemi kullanın.

İvmelenme süresinin hesaplanmasındaki ilk adım, motorun ve yük tork-hız karakteristiklerinin açık bir şekilde tanımlanmasıdır.

Motor tork-hız eğrisi genelde imalâtçıdan elde edilebilir. Bu mümkün değilse, eğri üzerindeki önemli noktalar, genelde imalâtçı kataloğunda dört nokta şeklinde verilir:

- Başlangıç Demeraj Torku
- İvmelenme Torku ve Hız

- Maksimum Tork ve Hız
- Beyan Tam-Yük Torku ve Hız

8.6 Motorun çalışmaya başlatılmasına ilişkin şartlar

Santrifuj pompaları ve fanları gibi *değişken torklu yükler*, çok *düşük başlangıç torku gereksinimine* sahiptir ve bu yükler, ayarlanan hıza, herhangi bir VSD tarafından kolayca ivmelendirilebilir. Buradaki temel husus, çamur pompaları gibi bazı pompalarda bazen *yüksek seviyede demeraj torkunun* gerekli olmasıdır. Çamur pompalarında, pompanın durdurulduğu periyotlarda pompa içinde bir miktar tortu kalabilir. Diğer sınırlayıcı faktör, sürücünün kapasitesi dahilinde kalması gereken, tam beyan hızda absorbe edilen toplam güçtür.

Konveyörler ve pozitif boşaltma pompaları gibi *sabit torklu yüklerde çalışmak*, biraz daha zordur çünkü bu yükler, başlangıçta tam tork gerektirir ancak bu, genelde sorun oluşturmaz. Ancak ağaç-yongalı helezon konveyörler gibi bazı yük tiplerinde, yüklerin durağan durumdan hareketli duruma geçmesi için ilâve demeraj torku gerekli olabilir. Buna ilişkin diğer örnekler, özellikle katılaştan sıvılarla kullanılan sıkıp çıkarma presi sürücüleri ve pozitif boşaltma pompalarıdır. Yüksek seviyedeki bu tork, genelde geçici bir yapıya sahiptir ancak sürücü, VSD'nin, durmaksızın gerekli demeraj torkunu sağlayacağından emin olacak şekilde seçilir.

AC VVVF konvertör tarafından kontrol edilen sincap kafesli bir motorun başlangıç ve düşük hız tork kapasitesini etkileyen iki faktör mevcuttur:

- Motorun aşırı-akıllı biçimde çalışmasını önlemek için, V/f oranı sabit tutulmalıdır. Düşük frekanslarda, motorun statoruna uygulanan gerilim, bu V/f oranını sabit tutacak şekilde düşük seviyededir. İndüksiyon motorunun eş değer devresine bakıldığında görüleceği gibi (2. Bölüm) stator sargısında bir gerilim düşüşü mevcuttur ve hava boşluğu akısı büyük ölçüde azalır. Bu, sürücünün çıkış torkunu etkiler. Stator gerilim düşüşünü telafi etmek için, düşük hızlarda gerilimin güçlendirilmesi ile sorunun nispeten kolay bir şekilde üstesinden gelinir. Birçok modern konvertör, kullanıcı tarafından ayarlanabilen bir *tork güçlendirme* ayarına sahiptir.
- Birçok VVVF, güç elektroniği bileşenlerinin aşırı-akımlara karşı korunması için bir akım sınırlama kontrol özelliğine sahiptir. Böylece, maksimum motor akımı, konvertör üzerindeki akım sınır değeri ayarı ile sınırlandırılır. Motor torku, akımla kabaca doğru orantılı olduğu için, çıkış torku, konvertör akım sınır değeri ayarı tarafından belirlenen bir değerle sınırlıdır.

Sonuç olarak, başlangıç torku, temel olarak konvertörün akım sınır değeri tarafından sınırlandırılır. Çok aşırı yüksek akım beyan değerlerine sahip bir konvertör tasarımı ekonomik değildir ve genelde gerekli de değildir. Bu nedenle, başlangıç tork kapasitesi, konvertör akım beyan değerinin motor beyan akımını ne kadar aştığına bağlıdır. Konvertör genelde, konvertör akım beyan değerinin % 150'sindeki aşırı akımda, sınırlı bir süre (genelde 60 saniye) çalışacak ve beyan akımda sürekli olarak çalışacak şekilde tasarımılanır. *Akım sınır değeri kontrolü*, 60 saniye sonra zamanı dolan bir koruma zamanlayıcıyla % 150 seviyesine ayarlanır. Değişken hızlı sürücü sistemin başlangıç torku:

$$T_S = [(1,5 \times I_{konv}) / I_{motor}] T_N \quad Nm$$

Burada

T_N motorun Nm cinsinden beyan torku

Açık bir şekilde görüldüğü gibi, çok büyük bir konvertör kullanıldığında, motorun *beyan torkun* üzerinde üretebileceği tork miktarı sınırlıdır. Tasarımına bağlı olarak, motor genelde beyan torkun 2,5 ilâ 3 katında duracaktır.

Çok yüksek seviyede başlangıç torkları için, daha büyük bir motor ve konvertör düşünülmeli ya da imalatçıya danışılmalıdır.

8.7 Motorun durdurulmasına ilişkin şartlar

Sürücü *birinci ya da üçüncü kadranlarda* çalışıyorsa, makina bir motor olarak çalışmaktadır ve mekanik bir yükü ileri ya da geri yönde sürmektedir. Bu durumda, elektrik enerjisinden mekanik enerjiye dönüşüm gerçekleşir. Dönen sistemde, *kinetik enerji* şeklinde enerji depolanır.

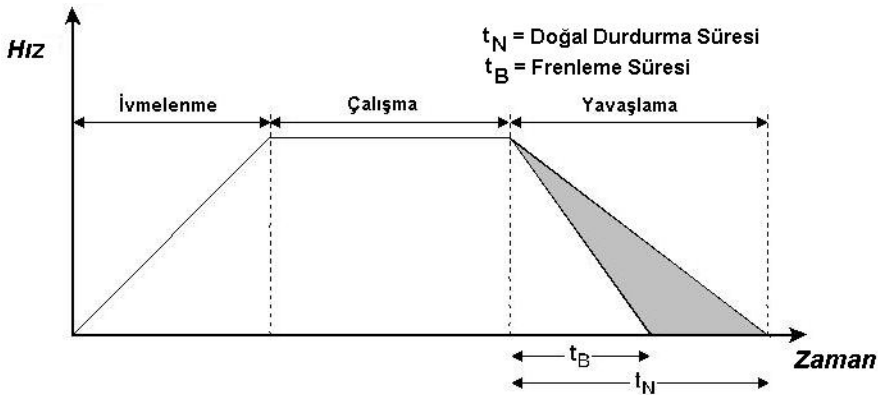
Sürücü çalışmasını *ikinci ya da dördüncü kadranlara* çevirdiğinde, mekanik yükün hızını azaltmak için frenleme yapılması gereklidir. Hızı azaltmak için, dönen sistemdeki (AC indüksiyon motoru artı mekanik yük) *kinetik enerjinin* ortadan kaldırılması ve sistem durağan hale gelmeden önce başka bir enerji biçimine dönüştürülmesi gereklidir. Bu, genelde yüksek inerşialı yükler için büyük bir sorun haline gelmektedir.

Değişken hızlı bir sürücü sisteminin yavaşlatılması ve durdurulması için kullanılan çeşitli metotlar vardır:

- Kinetik enerji yükün kendisinde harcanabilir,
- Kinetik enerji sürtünmeden dolayı ısıya dönüşür (*mekanik frenleme*)

- Kinetik enerji, güç kaynağına geri iletilmeden önce elektrik enerjisine dönüştürülür ya da motorda ya da dirençte ısı olarak harcanır (*elektriksel frenleme*)

Birçok sabit ve değişken hızlı sürücü, enerji kesilerek ve sürülen makinanın durmasını izin verilerek durdurulur. Motordan ve yükten oluşan dönen sistem, Şekil 8.10'da gösterildiği gibi 'doğal' bir yavaşlama t_N süresinden sonra durur. Bu durdurma tipi, konveyörler, helezon konveyörler, fanlar, vb. gibi birçok mekanik yük için yeterlidir. Gerçek durma süresi, yük inerşiasına, yük kayıplarına ve sürecin tipine bağlıdır. Ancak, Şekil 8.10'da gösterildiği gibi, *daha kısa bir yavaşlama süresi* sağlamak için ilâve frenlemenin gerekli olduğu bazı uygulamalar mevcuttur.



Şekil 8.10 – Dönen sürücülere ilişkin frenleme süreleri

Geleneksel yaklaşım, mekanik frenleme kullanmaktır ancak bu, hem mekanik kısımlara hem de fren pabuçlarına önemli ölçüde bakım yapılmasını gerektirir. Mekanik frenleme söz konusu olduğunda, frenleme enerjisi, fren pabuçları ile fren diski/tamburu arasındaki sürtünmeden dolayı ısı olarak harcanır.

Değişken hızlı modern sürücü sistemleri için, tercih edilen frenleme metodu elektriksel frenlemedir. Elektriksel frenleme sistemleri, motorun geçici olarak indüksiyon jeneratörü gibi kullanılması ve mekanik yükün jeneratörü sürmesi ilkesine göre çalışır.

Bir motor her zaman, rotorun, dönen hava boşluğu manyetik alanının senkron hızına yaklaşmasını sağlayacak yönde bir tork uygular.

- *Motor işlevi modunda*, invertör çıkış frekansı, rotor hızından her zaman daha yüksek seviyede olacaktır.
- *Jeneratif (frenleme) modda*, invertör çıkış frekansı, rotor hızından daha düşük bir frekansta olacaktır. Yavaşlama

sırasında üretilen frenleme torku, motordaki kayma değerine bağlıdır.

Elektriksel frenleme sırasında, mekanik enerjiden elektrik enerjisine enerji dönüşümü gerçekleşir. Bu enerji, üç şekilde harcanabilir:

- Motorun rotorunda ısı olarak harcanır – *DC Frenleme*
- Motorun statorunda ısı olarak harcanır – *Akı Frenlemesi*
- Dış dirençte ısı olarak harcanır – *Dinamik Frenleme*
- Elektrik enerjisi kaynağa geri döndürülür – *Regeneratif Frenleme*

Elektriksel frenleme, mekanik frenlemeye göre çeşitli avantajlara sahiptir:

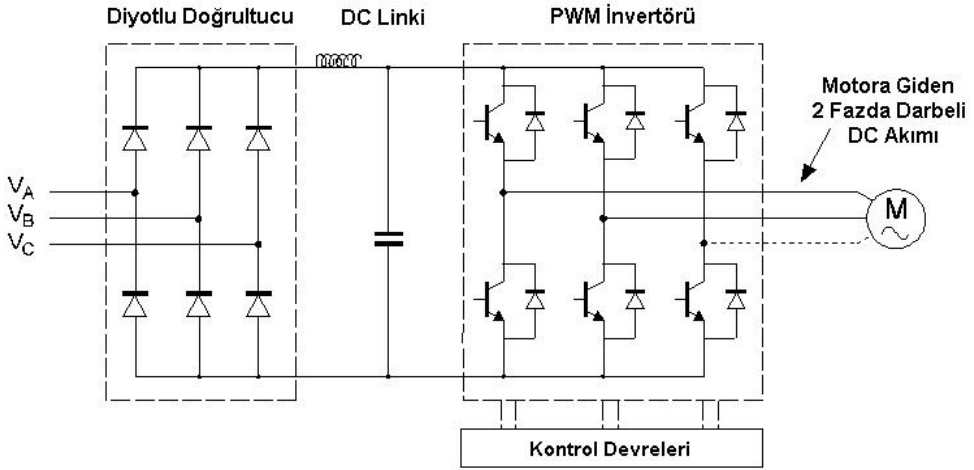
- Mekanik frenleme bileşenlerinin yıpranmasında azalma sağlar.
- Frenleme süreci sırasında hız daha doğru bir şekilde kontrol edilebilir.
- Enerji bazen yeniden elde edilebilir ve kaynağa geri döndürülebilir.
- Sürücü çevrim süreleri, hiçbir ilâve mekanik frenleme olmaksızın azaltılabilir.

Akım-Kaynağı İnvertörleri (CSI), modifikasyon olmaksızın regeneratif frenleme gerçekleştirebilir ve diğer frenleme tekniklerinin dikkate alınması gerekmez.

PWM tipler dahil olmak üzere Gerilim-Kaynağı İnvertörleri (VSI), doğrultucu modülünde pahalı modifikasyonlar olmaksızın regeneratif işlevi gerçekleştiremez. Kaybolan enerjinin maliyeti önemli seviyede değilse, diğer elektriksel frenleme metodlarının daha öncelikli olarak değerlendirilmesi gereklidir.

8.7.1 DC injeksiyonlu frenleme

DC injeksiyonlu frenlemenin temel ilkesi, motor hava boşluğunda durağan bir manyetik alan oluşturmak için motorun stator sargısına DC akım enjekte etmektir. Bu, indüksiyon motorunun iki fazı bir DC kaynağa bağlanarak gerçekleştirilebilir. Enjekte edilen akım, motorun uyarma akımına ya da yüksüz-durum akımına kabaca eşit olmalıdır. PWM tipi bir VVVF konvertörde, DC injeksiyonlu frenlemenin gerçekleştirilmesi nispeten daha kolaydır. İnvertör kontrol dizisi, bir fazdaki IGBT'ler kapatılırken, diğer iki faz, DC akımın büyüklüğünü ve süresini kontrol etmek için PWM (darbeli) çıkışı sağlayacak şekilde modifiye edilir. Konfigürasyon, Şekil 8.11'de gösterilmektedir.



Şekil 8.11 – PWM konvertörden DC enjeksiyonlu frenleme

Rotor çubukları bu alanı kestikçe, rotorda, büyüklüğü ve frekansı hızla orantılı olan bir akım oluşacaktır. Bu, hızla orantılı bir frenleme torkunun oluşmasına neden olur. Frenleme enerjisi, rotor sargılarında kayıp olarak harcanır, bu da ısı oluşumuna neden olur. Frenleme enerjisi, motorda izin verilen sıcaklık yükselmesi ile sınırlandırılır. Bu metot kullanılırken, motor ısınma süresinin kontrol edilmesi için gerekli önlemler alınmalıdır.

Rotor, yüksek seviyede başlangıç torku sağlayacak şekilde tasarlanmamışsa, frenleme torku yüksek seviyede olmayacaktır. Başka bir zorluk, hız sıfıra yaklaştığında frenleme torkunun azalacak olması ve motoru hızlı bir şekilde durdurmak ya da durağan durumda tutmak için mekanik frenlerin gerekli olabilmesidir. Bununla birlikte, metot, mekanik fren yıpranmasında yine de büyük ölçüde azalma sağlayabilir. Tüm frenleme gücü rotorun ısınmasına gider ve bu durum, frenleme görevini sınırlandırabilir.

8.7.2 Motor aşırı-akı frenlemesi

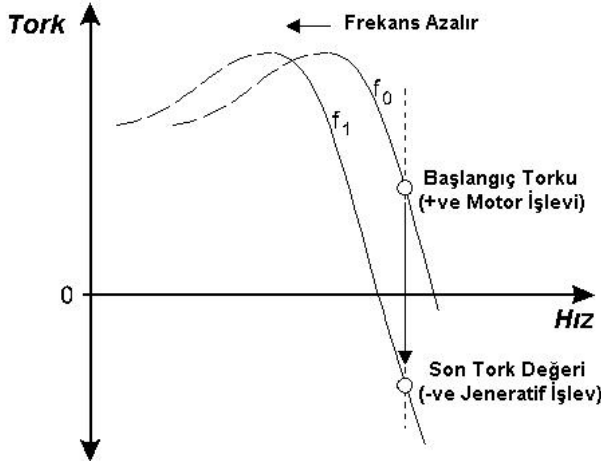
Modern PWM AC sürücülerde popüler hale gelen bir teknik, motor akısının kontrol edilmesidir. Yavaşlama sırasında invertör çıkış V/f oranı artırılarak, motor, aşırı-akı bir duruma getirilebilir, bu nedenle, motordaki kayıplar artar. Frenleme enerjisi, motorun stator sargısında ısı olarak harcanır. Birçok şekilde, bu DC enjeksiyonlu frenlemeye benzerdir çünkü frenleme enerjisi, konvertörde değil motorda harcanır.

Bu teknik kullanıldığında, beyan motor torkunun % 50'sine kadar olan frenleme torkları elde edilebilir. Frenleme enerjisi, yine aynı şekilde motor içinde izin verilen sıcaklık artışı ile sınırlıdır.

8.7.3 Dinamik frenleme

VVVF konvertörün hız ayarı azaltıldığında, bağlanılan motora verilen çıkış frekansı da düşer ve motorun senkron hızı düşecektir. Ancak, bu, motorun gerçek hızının hemen değişeceği anlamına gelmez. Gerçek motor hızındaki değişiklikler, *dış mekanik faktörlere*, özellikle *dönen sistemin inersiyasına* bağlı olacaktır.

Şekil 8.12'de, konvertör çıkış frekansı aniden f_0 'dan f_1 'e indirildiğinde, motor torkunda meydana gelen değişiklik gösterilmektedir. Kayma değeri, pozitiften (motor işlevi) negatife (jeneratif işleve) değişir ve enerji akışının yönü tersine çevrilir, kinetik enerji motordaki elektrik enerjisine dönüştürülür ve daha sonra motordan konvertöre iletilir.



Şekil 8.12 – Frekans f_0 'dan f_1 'e indirildiğinde indüksiyon motorunun tork-hız karakteristikleri

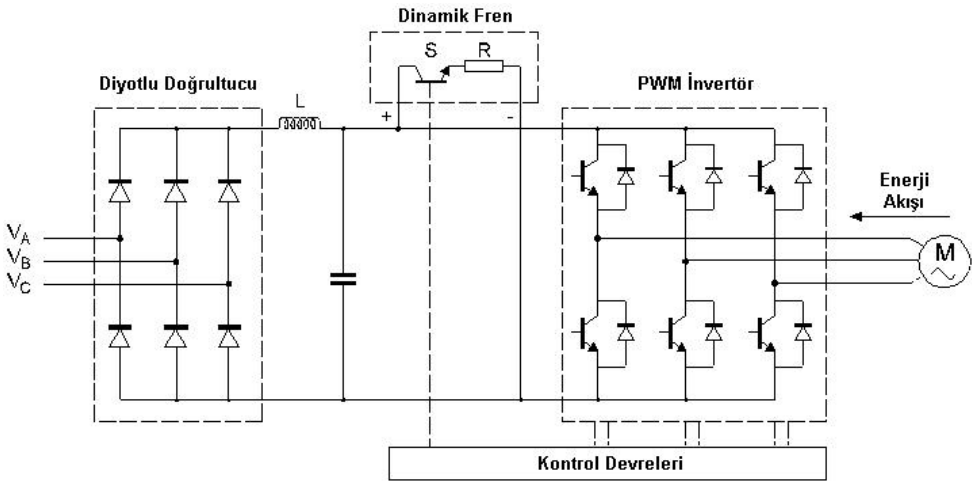
Uygulamada, aksi halde akacak olan büyük frenleme akımlarını önlemek için VVVF konvertörün çıkış frekansı yavaşça azaltılır. Maksimum frenleme torku sağlamak için, akım, invertör köprüsünün akım sınır değerinde ya da akım sınır değerinin altında kalacak şekilde kontrol edilebilir. Bu prosedür, motorun, durağan durumdan akım sınır değerinde tam hız durumuna ivmelendiği normal başlangıç dizisinin tersi olarak kabul edilebilir.

Frenleme sırasında, konvertör, motora iletilen enerjiyi kontrol edebilmelidir. Frenleme modunda DC bara geriliminin polaritesi değişmediği için, DC bara akımının yönü frenleme sırasında tersine

döner. Diyotlu bir doğrultucu köprüsünü kullanan PWM konvertörlerde, frenleme akımının elektrik şebekesine geri dönmesi engellenir. Bu nedenle, frenleme sırasındaki bu enerjiyi absorbe etmek için bir mekanizma kullanılmazsa, DC baradaki gerilim zarar verici seviyelere çıkacaktır.

Dinamik frenleme söz konusu olduğunda, frenleme enerjisi, konvertörün DC baraya bağlanan bir *frenleme direncinde* harcanır. Yukarıda açıklanmış olduğu gibi, invertör çıkış frekansı gerçek rotor hızının altına düşürülerek frenleme gerçekleştirilir. Kayma değeri, motor işlevine eşit seviyede amper başına tork sağlayacak şekilde optimize edilebilir.

Güç akışı, motordan invertöre oradan da DC baraya doğrudur. Frenleme enerjisi, elektrik şebekesine geri döndürülemez çünkü giriş doğrultucu sadece tek bir yönde güç iletebilir. Bunun yerine, enerji, DC kondansatör tarafından absorbe edilir ve kondansatör gerilimi artar. DC bara geriliminin tehlikeli olacak kadar yüksek bir seviyeye çıkmasını önlemek için, kondansatörün periyodik olarak deşarj edilmesi gereklidir. Bu, Şekil 8.13'te gösterildiği gibi, bir güç elektroniği anahtarından (genelde IGBT ya da BJT) ve DC link kondansatörünün karşısına bağlanan bir deşarj direncinden oluşan dinamik bir fren modülü vasıtasıyla gerçekleştirilir.



Şekil 8.13 – DC link dinamik frenine sahip PWM AC konvertör

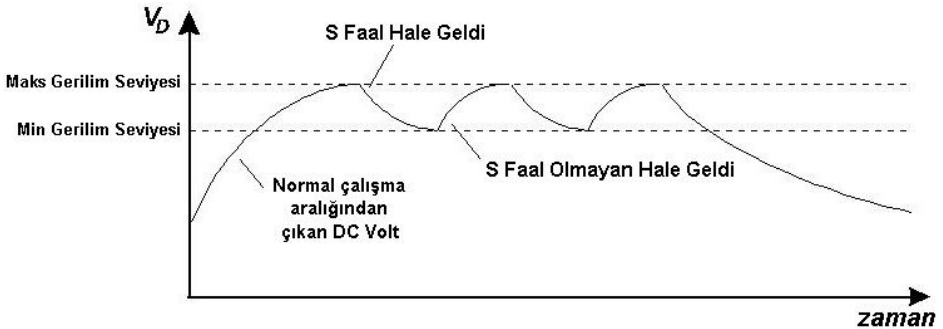
Şekil 8.14'te gösterildiği gibi, IGBT ya da BJT, kondansatör gerilimi çok yüksek olduğunda faal hale geçecek ve gerilim belirli bir seviyenin altına düştüğünde faal olmayan hale geçecek şekilde bir histerez devresi tarafından kontrol edilir. Alternatif olarak, bara gerilimi spesifik bir aralıkta ve görev çevrimi % 0 ilâ % 100 arasında

lineer olarak değıştikçe, IGBT sabit bir frekansta faal ya da faal olmayan hale getirilebilir.

Frenleyici IGBT'nin anahtarlama seviyesi, en yüksek gerilim toleransında çalıştığında elektrik şebekesinden daha yüksek bir seviyede olacak ancak invertör bileşenlerinin maksimum güvenli anahtarlama geriliminin altında olacak şekilde seçilmelidir. Uygulamada, anma DC tepe gerilimi 586 V olan 3-fazlı 415 voltluk bir kaynağa bağlanan bir konvertör için, anahtarlama seviyesinin, bu değerin en az % 10 üstüne 650 V'a ancak DC baranın maksimum güvenli çalışma gerilimi olan 800 V'un altına ayarlanması gereklidir. Uygulamadaki bir faal hale getirme seviyesi tipik olarak 750 V'tur, üst ve alt seviye arasındaki histerez 20 V ilâ 30 V daha düşüktür. İzin verilebilen gerilim salınımı, IGBT ve kondansatör gerilim beyan değerleri ve besleme geriliminin toleransı tarafından belirlenir.

Motor hızı çok düşük olduğunda, iyi frenleme torku sağlamak için gerekli kayma değerini sağlamak amacıyla, invertör tarafından biraz negatif bir frekans uygulanabilir ve böylece motorun elektriksel olarak sıfır hıza düşmesi sağlanır. Ancak, bu işlem yüksek kalitede kontrol gerektirir ve standart sürücülerde frenleme sadece beyan hızın yaklaşık % 2'si civarına kadar sağlanabilir.

Direnç değeri, maksimum motor hızında % 100 beyan torka karşılık gelen bir DC bara akımına izin verilecek şekilde seçilir ve güç beyan değeri, frenlemenin süresine, büyüklüğüne ve frekansına göre gerekli frenleme *işlevini* yansıtmalıdır. Frenleme IGBT'si, frenleme direncinin değeri ve maksimum bara gerilimi tarafından belirlenen maksimum frenleme akımına anahtarlancak şekilde seçilmelidir. IGBT, genelde invertör aşamasında kullanılanla aynı tipte ve büyüklüktedir.



Şekil 8.14 – Dinamik frendeki histerez kontrollü DC bara gerilimi

Örnek

22 kW'luk VSD ve motor kombinasyonu, frenleme sırasında % 100 beyan motor torku sağlamalıdır. Maksimum frenleme görevi, her 10 saniyede 3 saniyedir. Frenleme sırasındaki bara geriliminin 650 V DC olduğunu ve DC bara aşırı-gerilim kapama seviyesinin 700 V DC'ye ayarlandığını varsayın. Uygulama için hangi değerde frenleme direnci kullanılmalıdır?

Frenleme sırasında beyan tork elde etmek için, motor tam hızdayken, direnç tam olarak 22 kW absorbe etmelidir. Bu nedenle, maksimum DC bara akımı kabaca aşağıdaki değere eşit olacaktır:

$$DC \text{ Akımı} = (22 \times 10^3)/650 = 34 \text{ Amp}$$

Bara gerilimi 650 V DC olduğunda 34 Amp çekmek için, frenleme direncinin $650/34 = 19$ ohm olması gerekecektir. Frenleme sadece her 10 saniyede 3 saniye boyunca gerçekleşirse, o zaman görev % 30 olacaktır. Frenleme direncinin güç beyan değeri 22 kW'un % 30'u (yaklaşık olarak sürekli 7 kW) olacaktır. Bir frenleme direnci seçilirken, yeterli aşırı beyan değerinin sağlanması hususuna dikkat edilmelidir çünkü anlık güç çok yüksektir ve sıcak noktalar, vakitsiz arızalanmalara neden olabilir.

Maksimum transistör akımı, maksimum DC bara geriliminde oluşacaktır:

$$I_{en \text{ büyük}} = 700/19 = 37 \text{ Amp}$$

Güvenlik marjı hesaba katılarak, 50 Amp beyan akıma sahip bir frenleme transistörü seçilir.

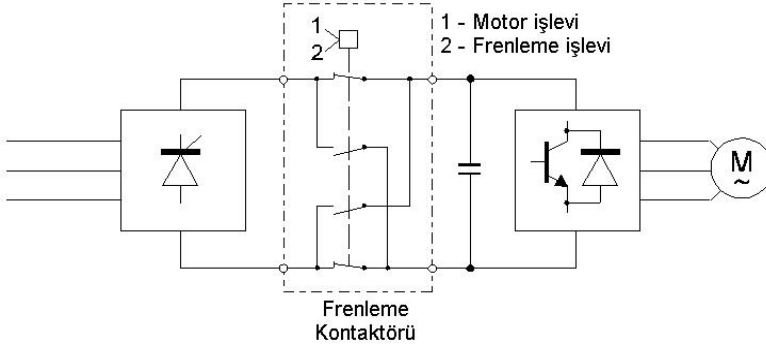
8.7.4 Rejeneratif frenleme

Invertör açısından bakıldığında, *rejeneratif frenleme*, dinamik frenleme için olanla aynı şekilde gerçekleştirilir. Frenleme gerekli olduğunda, invertörün çıkış frekansı, gerçek rotor hızının altındaki bir seviyeye düşer. Frenleme gücü motordan çıkar, invertörün ters bağlanmış diyotlarından geçer ve DC bara kondansatörüne gelir ve kondansatör gerilimi yükselir. Normal diyotlu doğrultucu, gücü elektrik şebekesine geri döndüremediği için, tristörlü bir konvertör kullanılmalıdır.

Aşağıda iki alternatif metot gösterilmektedir:

- Normal motor işlevi için enerji sağlamak amacıyla diyotlu köprü yerine tristörlü bir doğrultucu köprüsü kullanılırsa, tristörlü doğrultucudaki akım akışı, frenleme için yön değiştiremez. Rejenerasyon sadece DC bara geriliminin

polaritesi değiştirilerek gerçekleştirilebilir. Bu, doğrultucu ile kondansatör arasına bir tersleme anahtarı yerleştirilerek ve anahtar, gerekli güç akış yönüne göre anahtarlanarak gerçekleştirilebilir. Bu gibi bir sistem, frenlemenin sık sık değil arada sırada meydana geldiği ve değişimin hızlı olmasının gerekli olmadığı sürücüler için faydalıdır (örneğin, elektrikli küçük lokomotifler).



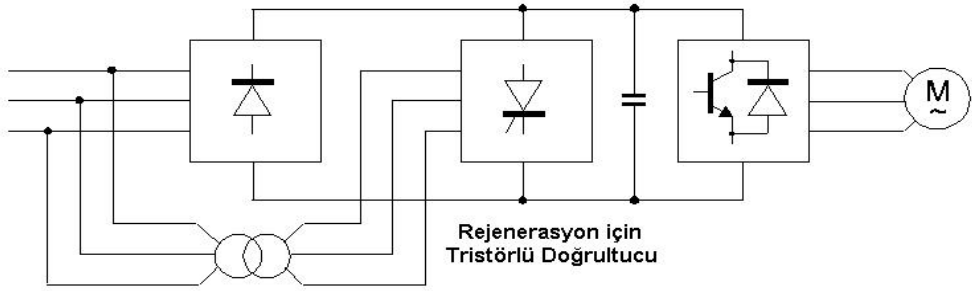
Şekil 8.15 – Rejeneratif frenleme için DC barada tersleme anahtarına sahip VSD

- Daha hızlı frenleme için, Şekil 8.16'daki sistem, motor işlevi gücünü sağlamak amacıyla diyotlu bir doğrultucu ve frenleme gücünü almak amacıyla tristörlü bir doğrultucu ile birlikte kullanılabilir.

Her iki doğrultucunun da aynı AC gerilim seviyesinde çalıştırılması mümkün değildir. Besleme geriliminin, fazdan-faza 415 V olduğunu varsayalım. Motor işlevi sırasında, 3. Bölüm'deki formül kullanılarak, kondansatör üzerindeki DC bara gerilimi şu şekilde hesaplanabilir:

$$V_{DC} = 1,35 \times 415 = 560 \text{ volt DC}$$

700 V DC tipik değer olacak şekilde, frenleme sırasındaki kondansatör gerilimi yükselecektir. Tristörlü doğrultucunun, ateşleme açısı 90°'den daha büyük ve DC gerilimi negatif olan bir invertör gibi çalışması gerekli olacaktır. Bu nedenle, tristörlü doğrultucu, diyotlu doğrultucu ile karşılaştırıldığında ters polaritede bağlanır.



Şekil 8.16 – Rejeneratif frenleme için ayrı tristörlü köprüye sahip VSD

180°'ye yakın ateşleme açılarında, kaynakta az miktarda gürültü olması, tristörün ileri bloklama özelliğini geri kazanmasını tamamen engelleyebilir. Sıradaki tristörün ateşlenmesi, DC tarafındaki yolda kısa devreye neden olur, bu durum tersleme arızası olarak bilinir ve düzeltilmesi zordur. Bunu önlemek için, tristörlü doğrultucunun, 150°'den büyük bir ateşleme açısıyla çalıştırılmaması gereklidir.

Motor açısından bakıldığında, dinamik frenleme ile rejeneratif frenleme arasında esasen hiçbir fark yoktur. Rejeneratif sistemin başlangıç maliyeti, frenleme enerjisinin elektrik şebekesine döndürülmesinin katkısı ile karşılaştırılarak rejeneratif sistemin kullanılmasının kârlı olup olmadığı belirlenir. Bu durum, uygulamanın tipine, frenleme için harcanan güce ve gerekli frenlemenin süresine bağlıdır.

8.8 Hızın, torkun ve doğruluğun kontrol edilmesi

Birçok VSD uygulamasında, yüksek doğruluk derecesine sahip olmayan açık-döngülü basit hız kontrolünün kullanılması oldukça yeterlidir. Bu durumlarda, hız manuel olarak ya da bir PLC'den ayarlanabilir ve gerekli olduğunda değiştirilir.

Birçok VSD uygulamasında, pompalama sistemlerindeki sıvı akışı gibi bir *Süreç Değişkeninden* (PV) geri besleme alınarak kapalı döngülü hız kontrolü gerçekleştirilir. Bu sistemlerde, hızın çok doğru bir şekilde kontrol edilmesi gerekli olmayabilir çünkü süreç şartlarını karşılamak için kontrol sisteminin, hızı sürekli olarak ayarlaması gereklidir.

Ancak hızın doğru bir şekilde kontrol edilmesinin gerekli olduğu bazı uygulamalar mevcuttur. Bu durumlarda, aşağıdaki hususlar değerlendirilmelidir.

- *Termal hususlara* göre seçilmiş olan motor yeterli hız doğruluğu sağlar mı? Başka bir deyişle, normal motor kayma değeri kabul edilebilir mi?

- Kayma değerini azaltmak ve hız doğruluğunu artırmak için daha büyük bir motorun ve konvertörün seçilmesi tavsiye edilebilir.
- Doğru hız kontrolü sağlamak için, örneğin bir takometre ya da sayısal hız enkoder vasıtasıyla motordan hız geri-beslemesinin yapılması da gerekli olabilir. Bu, kapalı-döngülü hız kontrolü olarak mı adlandırılır?

8.9 Motor ve konvertör için doğru büyüklüğün seçilmesi

Motor ve frekans konvertör imalatçıları, belirli bir makina yükü için motorların ve frekans konvertörlerinin hızlı bir şekilde seçilmesi amacıyla çeşitli metotlar geliştirmiştir. Aynı temel prosedür, çoğu uygulama mühendisi tarafından kullanılmaktadır. Günümüzde, uygulama seçimleri genelde PC temelli yazılım ile gerçekleştirilir. Ancak, mühendislerin, seçim prosedürünü *açık bir şekilde anlaması* önemlidir.

En iyi prosedürlerden biri, temel motor büyüklüğü seçimi için yük sınır eğrilerine dayalı basit bir *Nomogram* kullanmaktır. Bu prosedür aşağıda açıklanmaktadır.

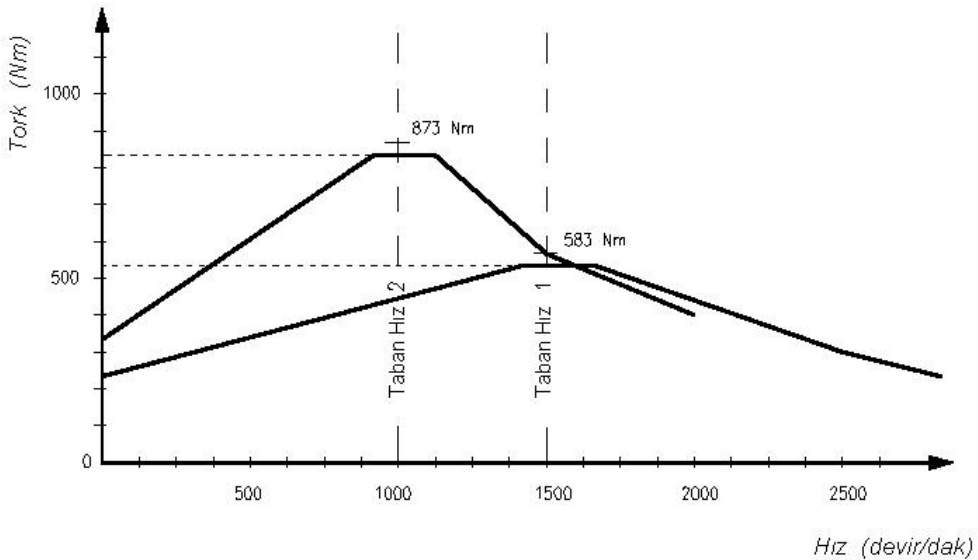
Diğer faktörler, optimum motor ve konvertör kombinasyonunun seçildiğinden emin olacak şekilde kontrol edilmelidir.

Aşağıdaki seçim ilkeleri tavsiye edilir:

- İlk olarak, motorun tipi ve büyüklüğü seçilmelidir. Kutup sayısı (temel hız), motor, 50 Hz'lik taban hızın (mümkün olduğunca) biraz üstündeki bir hızda çalışacak şekilde seçilmelidir. Bu, istenen bir durumdur çünkü:
 - $f \geq 50$ Hz olduğunda motorun termal kapasitesi yükselir çünkü yüksek hızlarda soğutma daha etkindir.
 - Konvertör, 50 Hz'in üstündeki alan zayıflatma bölgesinde çalıştırıldığında konvertör komütasyon kayıpları minimumdadır.
 - Sabit torklu bir yük için, motor, maksimum hızda alan zayıflatma bölgesinde çalıştığında, daha geniş bir hız aralığı elde edilir. Bu, değişken hızlı sürücünün tork/hız kapasitesinin en verimli şekilde kullanıldığı anlamına gelir. Bu da, maliyetten tasarruf sağlar.
 - Birçok imalatçı, konvertörlerinin 400 Hz'e kadar çıkış frekansları sağlayabildiğini beyan etse de, çok özel (ve sıradan olmayan) uygulamalar hariç olmak üzere bu yüksek frekanslar uygulamada pek kullanılmaz. Standart

kafesli motorların yapısı ve alan zayıflatma bölgesinde tepe tork kapasitesinin azalması, bu motorların 100 Hz'in üstündeki frekanslarda kullanılmasını sınırlandırır. Standart sincap kafesli bir motorun çalıştırılabildiği maksimum hız, özellikle 200 kW'tan yüksek seviyede güç çeken daha büyük 2-kutuplu (3000 devir/dak) motorlar için her zaman imalatçı ile birlikte kontrol edilmelidir. Motor hızı arttıkça, motor tarafından üretilen fan gürültüsü de büyük ölçüde artar.

- 4-kutuplu ve 6-kutuplu bir motor tarafından üretilen tork değerlerinin karşılaştırılması, Şekil 8.17'de gösterilmektedir. Bu, 6-kutuplu bir makinanın daha yüksek bir tork kapasitesine sahip olduğunu gösterir.
- Sadece “güvenli” olması için fazla büyük bir motorun seçilmesi genelde tavsiye edilmez çünkü bu, fazla büyük bir frekans konvertörünün seçilmesi gerektiği anlamına gelir. Özellikle PWM-tipi frekans konvertörler, motordaki temel akımla harmonik akımların toplamı olan en yüksek tepe akım değeri için tasarlanırlar. Motor ne kadar büyük olursa, tepe akımları da o kadar büyük olur. Bu tepe akımın tasarım sınır değerini aşmasını önlemek için, konvertör, hiçbir zaman kendisi için belirtilenden daha büyük bir motorla birlikte çalıştırılmamalıdır. Daha büyük olan motor hafif bir şekilde yüklenmiş olduğunda bile, harmonik akım tepeleri yüksek seviyededir.



Şekil 8.17 – İki tane 90 kW TEFC sincap kafesli motor için termal kapasite sınır değeri eğrilerinin karşılaştırılması

- 90 kW 4-kutuplu motor (1475 devir/dak)
- 90 kW 6-kutuplu motor (985 devir/dak)
- Motor bir kere seçildikten sonra, imalâtçı kataloğundan doğru konvertör büyüklüğünün seçilmesi daha kolaydır. Konvertörler, genelde spesifik bir gerilimi esas alan *akım* cinsinden (kW cinsinden değil) beyan değerlerine sahiptir. Bu, sadece bir kılavuz olarak kullanılmalıdır çünkü konvertörler her zaman *Maksimum Sürekli Motor Akımı* esas alınarak seçilmelidir. Birçok kataloğun, standart IEC motor güç beyan değerlerini (kW) esas almasına rağmen, farklı imalâtçılara ait motorlar farklı akım beyan değerlerine sahiptir.
- Motor ve konvertör, değişken hızlı sürücünün bağlanacağı güç kaynağının gerilimi ve frekansı için belirtilmelidir. IEC standartlarını kullanan birçok ülkede, standart besleme gerilimi, 50 Hz'de 380 volt $\pm$ % 6'dır. Avustralya'da, bu değer, 50 Hz'de 415 volt $\pm$ % 6'dır. Sürücünün çok büyük olduğu bazı uygulamalarda, kablo maliyetini azaltmak için daha yüksek gerilimlerin kullanılması genelde daha ekonomiktir. Yaygın olarak kullanılan diğer gerilimler, 500 V ve 660 Volttur. Son yıllarda, AC konvertörler, 3,3 kV ve 6,6 kV'ta kullanılmak üzere imal edilmektedir. Frekans konvertörler, kaynağıyla aynı çıkış gerilimini üretecek şekilde tasarlanmıştır, böylece hem motor hem de konvertör aynı beyan taban gerilime sahiptir. Konvertörün çıkış frekansının değişken olmasına rağmen, giriş frekansı (50 Hz ya da 60 Hz) açık bir şekilde belirtilmelidir çünkü bu, indüktif bileşenlerin tasarımını etkileyebilir.

8.10 Seçim prosedürlerinin özeti

Seçim prosedürü, aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

ADIM 1. Sürücü uygulaması için başlangıç verisinin belirtilmesi

Doğru motor/konvertör kombinasyonunu seçmek için, aşağıdaki bilgiler verilmelidir:

- Güç Kaynağının gerilimi (volt) ve frekansı
- Demeraj torku ya da başlangıç torku (Newton metre)
- Yük torku (Newton metre) ve hızla olan ilişkisi
- Değişken hızlı sürücünün hız aralığı (devir/dak)

- İvmelenme şartları ya da “Rampa Süreleri”
- Motorun ve yükün inerşia momentleri (kgm^2)

ADIM 2. Motorun kutup sayısının seçilmesi

Kutup sayısı, motorun senkron hızını belirler ve bu sayı, genelde uygulamanın gerektirdiği maksimum hıza göre seçilir. Modern VVVF konvertörler, 400 Hz'e kadar olan çıkış frekanslarına sahip olabilir, ancak yukarıda belirtilmiş olduğu gibi 100 Hz'in üstünde az sayıda uygulama mevcuttur.

Senkron hızın üstündeki hızlar, sabit torklu yükler için avantajlıdır, burada, maksimum hız ideal olarak 50-100 Hz aralığında olmalıdır.

Yük torkunun hızın karesine bağlı olarak arttığı pompa ve fan sürücülerinde durum farklıdır. Motor hızı, maksimum sürücü hızı 50 Hz'de olacak şekilde seçildiğinde, motorun tork karakteristikleri optimum şekilde kullanılmış olur.

ADIM 3. Motor güç beyan değerlerinin seçilmesi

Yük torku şartlarında, motorun güç beyan değerleri, aşağıdaki formül kullanılarak motor imalâtçısının kataloğundan seçilebilir:

$$\text{Güç} = [\text{Tork (Nm)} \times \text{Hız (devir/dak)}] / 9550 \text{ kW}$$

Ancak, harmonik ısınma için motorun beyan değerlerinin düşürülmesi gerektiği, düşük hızlarda soğutmada azalma olması ve yüksek hızlarda torkta azalma olması hesaba katılmalıdır. *Motor seçim nomogramının* kullanılması hızlı ve elverişli bir yol sağlar, buna ilişkin bir örnek eğitimle ilgili kısımda verilecektir. Bu nomogram, bir VVVF konvertör ile kullanıldığında, harmonik ısınmayı ve motor soğutmasındaki azalmayı hesaba katar.

Nomogramın kullanılmasına ilişkin prosedür şu şekildedir:

- Kadran 1'de, ilk olarak, seçilen motorun kutup sayısına (senkron hız) karşılık gelen sütunu seçin.
- Gerekli hız aralığındaki devir/dak cinsinden maksimum hız değerini seçin. Gerekli olursa kadranın sağ tarafında ilgili frekans okunabilir.
- Yük sınır eğrisine kadar Kadran 2'ye doğru yatay olarak takip edin. Tork sınır değerinin birim başına değeri, gerekli olursa kadranın en üst kısmındaki ölçekten okunabilir.
- Yatay izleme ve yük sınır eğrisinin kesişiminden, hesaplanan yük torkuna karşılık gelen çizgiye kadar aşağı Kadran 3'e doğru izleyin. Bu eğrinin eğimi, yukarıda 3'teki formüle karşılık gelir.

- Düşey izleme ile tork çizgisinin kesişiminden, seçilen kutup sayısına karşılık gelen motor güç ölçeğine doğru sola yatay olarak izleyin. Yatay izleme ile güç ölçeğinin kesişimi, kW cinsinden gerekli motor gücünü verir.
- *Kare-kuralı* tork yükü için (pompa ya da fan sürücüsü), motor güç beyan değerine karşılık gelen standart motoru seçin.
- Sabit torklu bir yük için, minimum hıza ilişkin motor gücünü belirlemek için yukarıdaki adımları tekrarlayın. İki güç beyan değerinden daha büyük olanına sahip standart motoru seçin.

ADIM 4. Uygun frekanslı bir konvertörün seçilmesi

İmalâtçının kataloğundan motora için uygun beyan değere sahip bir konvertör seçilmelidir. Konvertörler, genelde sincap kafesli motorların standart büyüklüklerine uygun güç beyan değerlerine sahip olacak şekilde üretilir. Kataloglar genelde, motor akımının konvertör akımının altında olmasını sağlamak için gerekli kontrolü ve akım değerini verir. Aşağıdaki faktörler değerlendirilmelidir:

- Besleme gerilimi ve frekansı
- Motorun beyan akımı
- Görev tipi (değişken tork ya da sabit tork)

Konvertör, konvertörün beyan akımı, motorun beyan akımından daha yüksek olacak şekilde seçilir. Ayrıca, konvertör tipi, gerekli görev için uygun olmalıdır. Bazı imalâtçılar iki görev tipi için farklı konvertörlere sahiptir.

ADIM 5. Son kontroller

Aşağıdaki son kontroller yapılmalıdır:

- Motorun sürekli güç beyan değerleri (denizden yükseklik, sıcaklık, harmonikler, vb. yüzünden beyan değerleri düşürülmüştür) yükün güç gereksinimlerinden daha büyük müdür?
- Değişken Hızlı Sürücünün başlangıç tork kapasitesi, yükün demeraj torkunu sağlamaya yetecek kadar büyük müdür?
- VSD senkron hızın üstündeki bir bölgede çalışıyorsa, maksimum hızdaki motor tork kapasitesi yük torku için yeterli midir?
- Hız doğruluğu uygulama için yeterli midir?

ADIM 6. Bir seçime ilişkin hesaplama örneği

Bir mineral işleme tesisindeki kırma makinesi konveyörü için Değişken Hızlı bir Sürücü uygulaması önerilmiştir. Gerekli hız aralığı 600 devir/dak ilâ 1400 devir/dak arasındadır. Yükün, motor şaftına indirgenmiş hesaplanan güç gereksinimi, 1400 devir/dak'da 66 kW'tur. Demeraj torkunun, beyan torkun % 110'u kadar olması beklenmektedir. Besleme gerilimi 415 volt, 50 Hz'dir. En etkin çözüm için sincap kafesli motorun optimum büyüklüğünü ve beyan değerini seçin.

Yük, tipik *sabit torklu yük tipidir*. Önceki denklemlerden, hız aralığındaki sabit yük torku gereksinimi aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$T_M = 9550 \times P_A (kW) / \text{Hız (devir/dak)} = 450 \text{ Nm}$$

$$T_M = 9550 \times 66 / 1400 = 450 \text{ Nm}$$

Gerekli demeraj torku şu şekildedir:

$$T_B = 1,1 \times 450 = 495 \text{ Nm}$$

Bu uygulama için iki alternatif çözüm mevcuttur.

- **Beyan hızı 1480 devir/dak olan 4 kutuplu bir motoru ele alın.**

Motor seçim nomogramı kullanılarak ve minimum ve maksimum hızlar için tork gereksinimleri çizilerek, 600 devir/dak'lık minimum hızdaki motor yük kapasitesine bağlı olarak 110 kW, 415 V değerlerine sahip 4-kutuplu bir motor seçilmelidir. (75 kW'luk bir motor, 1400 devir/dak temel alınarak seçilir). Motor gövde büyüklüğü 280 M'dir ve akım beyan değeri 188 Amp'dir.

Motor kataloğundan görüldüğü gibi, motorun beyan tork değeri 710 Nm'dir. VSD, başlangıçta torkun % 150'sine eş değer akım verebilir, bu nedenle VSD'nin demeraj torkunun üstesinden gelme kapasitesi iyidir.

Bu nedenle, tavsiye edilen konvertör 110 kW, 415 volt, 220 Amp'lik bir birimdir.

Motor, ayrı olarak enerjilendirilen bir fan tarafından cebri olarak soğutulursa, motorun ve konvertörün beyan değeri azaltılabilir.

- **Beyan hızı 985 devir/dak olan 6-kutuplu bir motorun incelenmesi**

Motor seçim nomogramı kullanılarak ve minimum ve maksimum hızlar için tork gereksinimleri çizilerek, 75 kW, 415

volt, 6 kutuplu motor, hem 600 devir/dak'lık minimum hızda hem de 1400 devir/dak'lık maksimum hızda motor **yük kapasitesi** esas alınarak seçilmelidir. Motor gövde büyüklüğü 280 M'dir ve akım beyan değeri 135 Amp'dir.

Motor kataloğundan görüldüğü gibi, bu motorun beyan tork değeri 727 Nm'dir. VSD, torkun % 150'sine eş değer akım verebilir, böylece başlangıçtaki demeraj torkunu sağlamak için yeterlidir.

Bu nedenle, tavsiye edilen konvertör 75 kW'luk, 415 voltluk, 140 Amp'lik bir birimdir. İkinci alternatif en ekonomik çözümdür çünkü her iki motor alternatifinin maliyetinin kabaca aynı (aynı gövde büyüklüğü = yaklaşık olarak aynı maliyet) olmasına rağmen, ikinci alternatif için gerekli olan konvertör, daha düşük başlangıç maliyetine sahiptir çünkü bu konvertör, daha düşük bir akım beyan değerine sahiptir.

9 Değişken Hızlı AC Sürücülerin Kurulması ve İşletmeye Alınması

9.1 Genel kurulum ve çevre şartları

Elektrik motorlarının hız kontrolü için kullanılan modern güç elektroniği AC VVVF konvertörleri, genelde aşağıdaki konfigürasyonlardan birine sahip *bağımsız* birimler halinde piyasada mevcuttur.

İlk ikisi en yaygın konfigürasyonlardır:

- IP00 Koruma Derecesi
- Genelde bir *Motor Kontrol Merkezinin* (MCC) parçası olarak kullanıcının kendi mahfazasına şase montajı için tasarlanmıştır.
- IP20/IP30 Koruma Derecesi
- Rüzgar geçirmez, havalandırmalı cihaz odası gibi “*temiz bir ortama*” monte edilmek üzere tasarlanmıştır. Ortamda, toz, nem ve pislik olmamalı ve sıcaklık belirli sınır değerleri dahilinde tutulmalıdır.
- IP54 Koruma Derecesi
- Tozlu ve/veya nemli olabilen kısmi olarak korunan bir ortama monte edilmek üzere tasarlanmıştır.

9.1.1 Genel güvenlik tavsiyeleri

İmalâtçının kurulum tavsiyeleri, dikkatli bir şekilde takip edilmeli ve implement edilmelidir. Güç besleme kablolarında, motor kablolarında ve diğer enerji kablo uçlarında bulunan gerilimler, ciddi elektrik şoklarına neden olabilir.

Özellikle, kablolama kuralları ve diğer uygulama açıklamalarında belirtilen *Güvenliğe* ilişkin lokal şartlar, imalâtçının tavsiyelerinden her zaman daha öncelikli olmalıdır. Değişken Hızlı Sürücü cihazına *enerji verilmeden önce*, önerilen topraklama bağlantıları güvenliğini sağlamak için her zaman dikkatli bir şekilde yapılmalıdır.

Bölüm 3'te açıklanmış olduğu gibi, Değişken Hızlı AC Sürücülerde DC linke *büyük kondansatörler* bağlanmıştır. Bir VSD faal olmayan hale getirildiğinde, cihaz üzerinde çalışılmadan önce, bu iç kondansatörlerin tamamen deşarj olması için birkaç dakika beklenmelidir. Birçok modern konvertör, kondansatörler dolduğunda görsel bir işaret verecek şekilde tasarlanmıştır.

9.1.2 Tehlikeli bölgeler

Genel olarak, güç elektroniği konvertörleri, *Tehlikeli Bölge* olarak sınıflandırılan bölgelere monte edilmemelidir çünkü bu durum konvertör sertifikasını geçersiz kılar. Gerekli olduğunda, konvertörler onaylanmış bir mahfaza içine monte edilebilir ve konvertörü ve motoru içeren tüm VSD sistemi için sertifika alınmalıdır.

9.1.3 Kurulumla ilişkin çevre şartları

Değişken Hızlı AC Sürücünün (VSD) temel avantajı, TEFC sincap kafesli motorun kötü çevre şartlarına karşı kendiliğinden korumalı olmasıdır ve genelde IP54 ya da daha yüksek koruma derecelerine sahiptir. Bu sürücü, tozlu ve ıslak ortamlarda güvenli bir şekilde kullanılabilir.

Diğer taraftan, *AC konvertör, bulunduğu ortama karşı çok daha duyarlıdır* ve aşağıdaki maddelerden korunacağı bir ortama yerleştirilmelidir:

- Toz ve diğer aşındırıcı maddeler
- Paslandırıcı gazlar ve sıvılar
- Yanabilir gazlar ve sıvılar
- Yüksek atmosferik nem seviyeleri

Bir AC konvertör kurulurken, aşağıdaki çevre sınır değerleri dikkate alınmalıdır:

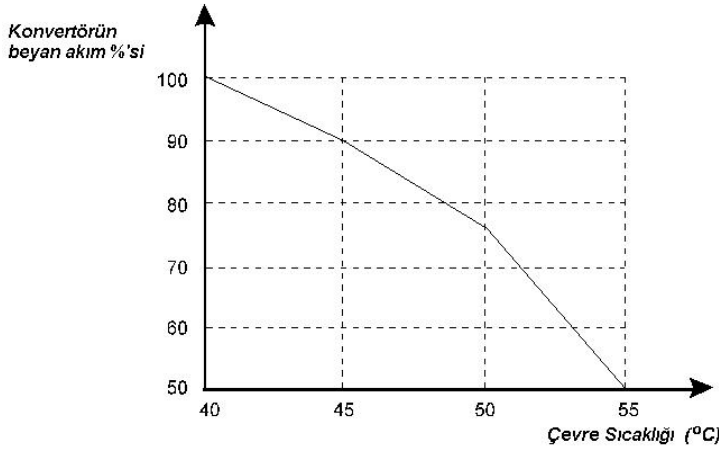
- Belirtilen Çevre Sıcaklığı: $\leq 40^{\circ}\text{C}$
- Denizden Yükseklik: $\leq 1000\text{ m}$
- Nispi Nem: $\leq \% 95$

9.1.4 Yüksek sıcaklık için beyan değerlerin düşürülmesi

Çevre sıcaklığının, standartlarda belirtilen kabul edilmiş 40°C 'lik sıcaklığın üstünde olduğu bölgelerde ya da ortamlarda, hem motorun hem de konvertörün beyan değerlerinin düşürülmesi gereklidir, bu da, yalıtım malzemelerinin termal olarak zarar görmesini önlemek için, bu malzemelerin sadece 40°C 'deki beyan yüklerden daha küçük yüklerde çalıştırılabilirlikleri anlamına gelir.

AC konvertör imalatçıları, genelde 40°C 'nin üstündeki yüksek sıcaklık ortamları için beyan değer düşürme çizelgeleri sağlar. Modern bir PWM konvertöre ilişkin tipik bir çizelge aşağıda verilmiştir. Bu çizelge *sadece bir kılavuz* olarak kullanılmalı ve genel olarak AC konvertörler için ya da özellikle herhangi bir konvertör için KULLANILMAMALIDIR. Çeşitli imalatçılara ait AC konvertör tasarımları birbirinden farklıdır, bu nedenle, soğutma şartları da hiçbir

zaman aynı değildir. Aynı imalatçıya ait farklı modellerin soğutma şartları da farklı olabilir.



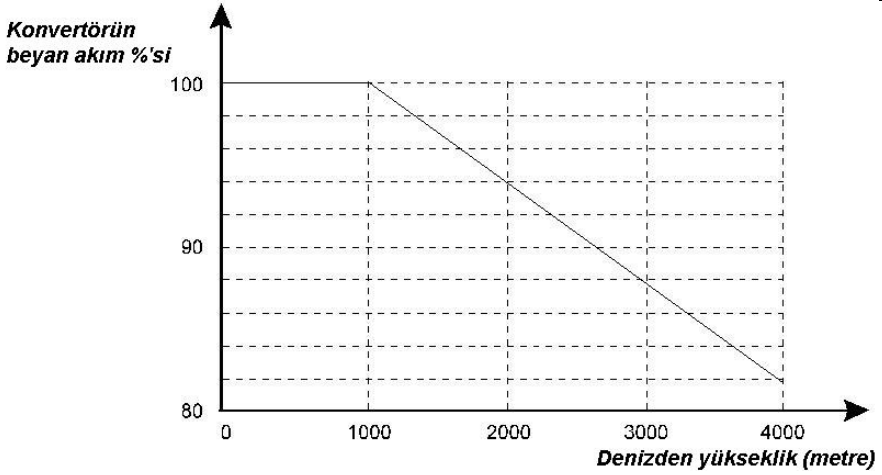
Şekil 9.1 – PWM konvertöre ilişkin tipik sıcaklık beyan değeri düşürme grafiği

9.1.4 Denizden yüksek yerlerde çalışma durumu için beyan değerlerin düşürülmesi

Denizden çok yüksek yerlerde, havanın, konvertörün ısı alıcısındaki ya da motordaki ısıyı atabilme özelliğinin azalmasından dolayı, elektrik cihazlarının soğutulması zayıflar. Bunun nedeni, denizden yükseklik arttıkça, hava basıncının azalması, hava yoğunluğunun azalması ve sonuç olarak, termal kapasitenin azalmasıdır.

Standartlara göre, AC konvertörler, deniz seviyesinin 1000 metre üstündeki yüksekliklerde çalışabilir. Bunun üstündeki yükseklikler için, beyan çıkış değerleri düşürülmelidir.

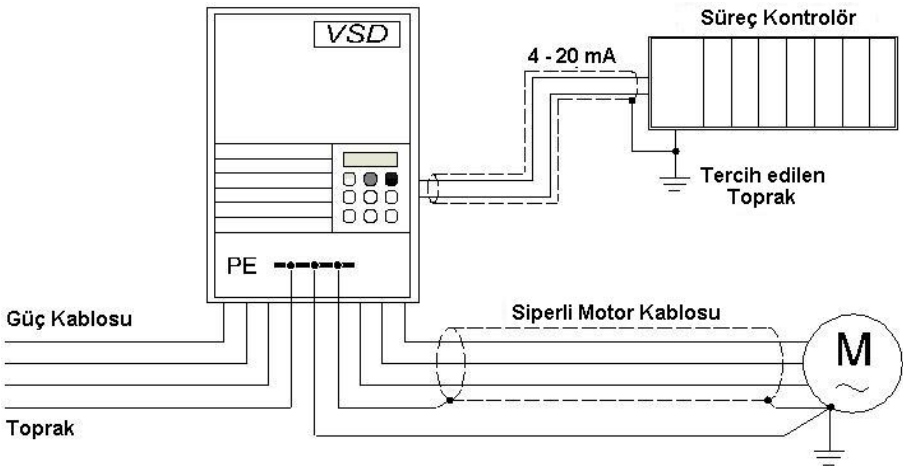
AC konvertör imalatçıları genelde 1000 m'den yüksek yerler için beyan değeri düşürme çizelgelerine sahip olmalıdır. Modern bir IGBT-tipi AC konvertör için *tipik bir çizelge* aşağıda verilmiştir. Bu çizelge, *tüm AC konvertörler için geçerli DEĞİLDİR*. Kayıpları büyük olan BJT ya da GTO gibi elemanları kullanan konvertörler için beyan değerlerin düşürülmesi, kayıpları az olan IGBT ya da MOSFET konvertörler için gerekli olan beyan değeri düşürme oranından çok daha yüksek seviyede olacaktır. IGBT ve MOSFET konvertörlerin veriminin daha yüksek seviyede olması, daha az soğutma gerektirir ve bu nedenle, denizden yüksekliğin değişiminden, diğerlerine göre daha az etkilenir.



Şekil 9.2 – IGBT-tipi konvertör için denizden yükseklik beyan değerlerin düşürülmesine ilişkin grafik (Allen-Bradley)

9.2 Güç kaynağı bağlantıları ve topraklama şartları

Uygulamalarda yaygın olarak kabul edildiği gibi, VSD'ye verilen enerji, normalde bir *Dağıtım Kartından* (DB) ya da *Motor Kontrol Merkezinden* (MCC) sağlanmaktadır. Güç kaynağı bağlantı noktasında güvenlik ayırma anahtarları ve kısa-devre koruması sağlamak için gerekli düzenleme yapılmalıdır. AC konvertöre giren enerji kablosunu ve konvertördeki giriş doğrultucu köprüsünü korumak için kısa-devre koruması gereklidir. Konvertör, motor için ve motor kablosu için koruma sağlar.



Şekil 9.3 – Güç kaynağı, motor ve topraklama bağlantıları

Lokal *Kablolama Kurallarına* ve *Uygulama Notlarına* göre yeterli *güvenlik topraklaması* da sağlanmalıdır. Dokunma potansiyellerini güvenli sınır değerleri dahilinde tutmak için, AC konvertörün ve AC motorun metal gövdeleri, Şekil 9.3'te gösterildiği gibi topraklanmalıdır. AC konvertörün şasesi, ortak güvenlik topraklama çubuğuna bağlanması gereken bir veya daha fazla *Koruyucu Toprakla* (PE) donatılır.

9.2.1 Güç kaynağı kabloları

Değişken hızlı sürücüler, VSD'nin akım beyan değeri için yeterli bir kablo vasıtasıyla güç kaynağına bağlanmalıdır. Kablo seçilirken, Avusturalya standardı AS 3008 referans alınabilir. AC konvertör, 3-fazlı bir besleme kablosuna (kırmızı/beyaz/mavi) ve koruyucu toprak iletkenine (yeşil/sarı) ihtiyaç duyar, bu da, bakır ya da alüminyum iletkenlere sahip 4-damarlı bir kablonun kullanılmasının gerekli olduğu anlamına gelir. Nötr bir iletken gerekli değildir ve genelde frekans konvertöre bağlanmaz.

AC konvertör, güç kaynağı sisteminin düşük empedansına geri akan harmonik akımların bir kaynağıdır. Bu harmonik akım, diğer elektrikli cihazlara iletilir, burada ilâve ısı kayıplarına ve enterferansa neden olur. Manyetik akış-ölçerler, ısı çiftler ve mikroişlemciye-dayalı diğer cihazlar gibi duyarlı elektronik cihazlar, ideal olarak aynı güç kaynağına bağlanmamalıdır (filtreli bir güç kaynağı kullanılmadığı sürece).

İlâve olarak, güç kaynağı kablosundan da enterferans yayılabilir ve bu enterferans, diğer devrelerle birleşebilir, bu nedenle, kablolar, duyarlı kontrol devrelerinin uzağından geçirilmelidir.

Güç kaynağı kablosu, metal bir kanala ya da bir kablo merdivenine yerleştirilmeli ve harmonik akımlardan kaynaklanan EM alanların yayılmasını azaltmak için bir şekilde siperlenmelidir. Çelik Telli Zırhlı (SWA) [*Steel Wire Armoured*] kablolar, bu amaç için özellikle uygundur. Enerji kablosu siperli değilse, kontrol ve haberleşme kabloları, enerji kablosunun 300 mm civarının yakınına yerleştirilmemelidir.

İletken büyüklükleri, normal ekonomik kablo seçme kriterlerine göre seçilmelidir. Bu kriterler, VSD'nin maksimum sürekli akım beyan değerini, kısa-devre beyan değerini, kablonun uzunluğunu ve güç kaynağı sisteminin gerilimini dikkate almalıdır. İlgili yerel güvenlik düzenlemelerine ciddi bir şekilde uyulmalıdır.

Ancak, güç kaynağı kabloları ve üst aşamalardaki transformatörler için kablo kesit-alanı seçilirken, iletilen harmonik akımlardan kaynaklanan ilâve ısınmayı hesaba katmak açısından (4. Bölüm) en az % 10'luk beyan değeri düşürme faktörü göz önünde

bulundurulmalıdır. Konvertöre kaynak tarafında bir harmonik filtre takılırsa, bu, gerekli olmayabilir. Mümkünse, üç tane tek-iletkenli kablodan oluşan üç-fazlı sistemler kullanılmamalıdır. Yonca konfigürasyonuna sahip enerji kabloları, daha düşük seviyede EM alanı oluşturur.

9.2.2 Konvertör ile motor arasındaki kablolar

AC konvertör ile motor arasındaki kablo, invertör tarafından yüksek bir frekansta modüle edilen anahtarlama bir PWM gerilimini taşır. Bu, güç kaynağı kablosundakinden daha yüksek seviyede harmoniğin oluşmasına neden olur. Harmonik frekanslar, 100 kHz ilâ 1 MHz arasındaki frekans spektrumunda yer alır. Motor kablosu, tercihen ekranlanmalı ya da metal bir kanalın içine yerleştirilmelidir. Kontrol ve haberleşme kabloları, bu kablonun yakınına yerleştirilmemelidir. Bir kablo merdivenine yatay olarak yerleştirilmiş 3 ayrı tekli damara sahip kabloya ilişkin EM alanlarının seviyesi, eş merkezli sipere sahip yonca kabloya ilişkin EM alanlarından daha yüksektir.

AC konvertör ile motor arasındaki kablo için önerilen büyüklük, tercihen güç kaynağı kablosunun büyüklüğü ile aynı olmalıdır. Bunun nedenleri şunlardır:

- Daha sonraki bir tarihte, aynı kablo, kablo askıları ve bağlantıları kullanılarak, frekans konvertörle paralel olarak bir yan geçit düzeninin eklenmesi daha kolay olacaktır.
- Harmonik akımlar yüzünden ve ilâve olarak kapasitif kaçak akımlar yüzünden, motor kablosunun yük-taşıma kapasitesi düşer.

AC konvertör VSD'sinin kablo ve motor için kısa-devre ve aşırı yük koruması sağladığı akılda tutulmalıdır.

Hem güvenlik hem de gürültünün azaltılması için konvertör ile motor arasında *ayrı bir toprak iletkeninin* kullanılması önerilir. Motorun toprak iletkeni, konvertörün PE terminaline *bağlanmalı* ve dağıtım kartına bağlanmamalıdır. Bu, topraklama sisteminde yüksek frekanslı akımların dolaşmasını önleyecektir.

Konvertör ile motor arasında zırlı ya da siperli kablolar kullanıldığında, kablo 50 m civarından daha uzun olduğunda, motorun ucuna bir bariyer sonlandırma bezinin yerleştirilmesi gerekli olabilir. Bunun nedeni, kablodan çıkan yüksek frekanslı kaçak akımların şönt kapasitansından geçerek sipere ulaşmasıdır. Bu akımlar, motor vasıtasıyla ya da topraklama sisteminin diğer kısımları vasıtasıyla geri döndürülürse, enterferans daha geniş bir bölgeye

yayılır. Kaçak akımların, en kısa yol üzerinden, başka bir deyişle siper üzerinden kaynağa geri döndürülmesi önerilir. Siper ya da *Çelik Tel Zırhı* (SWA) hem konvertör ucunda hem de motor gövde ucunda topraklanmalıdır.

9.2.3 Kontrol kabloları

Kullanılan kontrol kabloları, normal yerel uygulamaya uygun olmalıdır. Bu kablolar, en az 0,5 mm²'lik kesit alanına ve makul bir gerilim düşme performansına sahip olmalıdır. Konvertöre bağlanan kontrol ve haberleşme kabloları, EMI'dan korunmak amacıyla siperli olmalıdır. Siperler, konvertörden uzak bir noktada, *sadece bir uçta topraklanmalıdır*. Siperin, sürücünün PE terminalinde topraklanması önlenmelidir çünkü konvertör büyük bir enterferans kaynağıdır. Siper, tercihen cihaz ucunda topraklanmalıdır.

Her çift için ayrı bir ekrana sahip kablolar, eşleşen enterferansa karşı en iyi koruma şeklini sağlar.

Kontrol kabloları tercihen ayrı kablo merdivenlerine ya da kanallarına sahip olmalı ve enerji kablolarından mümkün olduğunca uzağa yerleştirilmelidir. Kontrol kabloları enerji kablolarıyla aynı kablo merdivenine yerleştirilirse, minimum uzaklık 300 mm civarında olup aralarındaki uzaklık mümkün olduğunca büyük olmalıdır. Aynı kablo merdiveninde uzun paralel kabloların kullanılması engellenmelidir.

9.2.4 Topraklama şartları

Daha önce belirtilmiş olduğu gibi, lokal standartların şartlarına göre hem AC konvertör hem de motor için güvenlik topraklaması sağlanmalıdır. Bu topraklamanın temel amacı, arıza şartlarında açık metal kısımlardaki tehlikeli gerilimleri önlemektir.

Bu topraklama bağlantıları tasarımlanırken ve yerleştirilirken, EMI'nın (elektromanyetik enterferans) azalmasına ilişkin şartlar da *bu topraklama bağlantıları*yla yerine getirilmelidir. AC konvertörün temel topraklama bağlantıları, genelde Şekil 9.3'te gösterildiği gibi döşenmelidir.

Konvertördeki PE terminali, genelde Dağıtım Kartında yer alan sistem topraklama çubuğuna bağlanmalıdır. Bu bağlantı, toprağa dönen düşük empedanslı bir yol sağlamalıdır.

9.2.5 Yaygın kablolama hataları

VSD'lerin kurulması sırasında yaygın olarak yapılan bazı kablolama hataları şunlardır:

- AC konvertöre ait topraklama iletkeni, diğer cihazlara ait kontrol kabloları ve enerji kabloları gibi diğer kablolarla aynı kanala ya da kablo merdivenine döşenir. Duyarlı devreler,

harmonik akımlardan etkilenebilir. İdeal olarak, cihaz kablolarının ayrı metal kanallarda ya da çelik boruda yer alması gereklidir.

- Sipersiz motor kablosunun AC konvertörün besleme kablosunun ya da diğer cihaza ait enerji kablolarının yakınında yer alması. Yüksek frekanslı harmonik akımlar enerji kablosuyla birleşebilir ve diğer duyarlı elektronik cihazları etkileyebilir. Diğer kablolar, motor kablosundan ya da konvertör enerji kablosundan en az 300 mm uzakta olmalıdır.
- AC konvertör ile motor arasında çok uzun kabloların kullanılması. Bu kablolar, 100 m'den uzun olmamalıdır. Daha uzun kablolar gerekli olursa, kaçak akımı azaltmak için motor filtrelerinin kullanılması gereklidir. Alternatif olarak, anahtarlama frekansı azaltılabilir.

9.3 AC sürücülerin başlatma/durdurma kontrolü

Değişken Hızlı AC Sürücülere ilişkin koruma şartları, Bölüm 5'te (*Bölüm 5: AC Konvertörlerin ve Motorların Korunması*) ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Konvertörün elektrik şebekesi tarafının korunması, kısa devre korumasını gerektirir. Bu koruma için, genelde Anahtar-sigorta Biriminin bir parçası olarak yeterli beyan değerine sahip sigortalar ya da bir Ana Devre Kesici kullanılabilir.

AC sürücünün Başlatma/Durdurma kontrolü çeşitli şekillerde gerçekleştirilebilir:

- *Konvertör Kontrol Devresinin* Başlatma/Durdurma girişi kontrol edilerek
- *Kontaktör* vasıtasıyla güç devresi kesilerek

İlk metot, AC konvertörün durdurulmasının ve başlatılmasının kontrol edilmesiyle ilgili metottur. Bu, Şekil 9.7'de gösterildiği gibi, konvertörün kontrol terminallerine doğrudan bağlanan Durdurma ve Başlatma düğmeleri ile gerçekleştirilebilir.

Alternatif olarak, kontrol, PLC gibi uzak bir cihazdan gerçekleştirilirse, Şekil 9.8'de gösterildiği gibi, kontrol, PLC'den AC konvertörün terminallerine doğrudan bağlanabilir.

İkinci metot, normal sabit hızlı AC motorların *Doğrudan Hattan* (DOL) çalıştırılması için yaygın olarak kullanılan bir metottur. Önceki DOL '*standart*' uygulamasında da kullanılmakta olan bu metot, özellikle konveyörler gibi Değişken Hızlı Sürücülerin kontrol edilmesi için endüstride oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Acil bir durma işlemi gerçekleştirildiğinde ya da tel-çekme anahtarı çalıştırıldığında, güç

devresinin kesilmesi genelde güvenlik için gereklidir. Bu metot, motora enerji veren güç kaynağının bağlantısı kesilerek güvenlik durumunu sağlasa da, bu kontrol metodu da bazı potansiyel tehlikelere sahiptir. Temel sorunlar şunlardır:

AC konvertörün kaynak tarafındaki kontaktör

Durdurma/başlatma kontrolü için AC konvertörün kaynak tarafının açılıp/kapanması önlenmelidir çünkü birçok modern konvertör, enerjisini DC baradan almaktadır.

Her enerji kesilişinde:

- Kontrol devrelerine enerji iletimi durur.
- Kontrol ekranı kaybolur.
- Teşhis bilgisi kaybolur.
- DC kondansatörler boşalır.
- Seri haberleşme kaybolur.

Değişken hızlı AC sürücünün yeniden çalıştırılmaya başlanması gerektiğinde, DC bara şarj sistemi, DC kondansatörü yeniden doldurmak için gerekli işlem dizisini tamamlarken, bir gecikme meydana gelir (tipik olarak 2 saniye). Bu, şarj dirençlerini, DC kondansatörü ve diğer bileşenleri zorlar. Birçok AC konvertörün şarj direnci, kısa süreli beyan değerlere sahiptir ve kullanıcı kitabında bazen vurgulanmamış olmasına rağmen, gerçekleştirilebilen başlatma sayısına ilişkin bir sınır değeri mevcuttur. Birçok kullanıcı, “enerji verildiğinde çalıştır” ilkesini benimsemiştir. Aşağıdaki paragraf, lider bir AC konvertör imalatçısına ait kullanıcı kitabından alınmıştır:

Dikkat: Sürücünün, motoru başlatıp durduracak kontrol giriş sinyalleri ile kontrol edilmesi amaçlanmaktadır. Motorun başlatılıp durdurulması amacıyla rutin olarak sürücüye giden hat enerjisini kesen ve daha sonra tekrar veren bir cihazın kullanılması önerilmemektedir. Bu devre tipi kullanılırsa, herhangi bir 5 dakikalık periyotta maksimum 3 tane durdurma/başlatma çevrimi (her bir çevrim arasında minimum dinlenme periyodu olacak şekilde) gereklidir. Bu 5 dakikalık periyotlar, sürücü ön yükleme dirençlerinin soğumasını beklemek için 10 dakikalık dinlenme çevrimleri ile ayrılmalıdır. Spesifik şartlar ve ilâve bilgi için, kendi sisteminizle ilgili açıklamalara ve standartlara bakınız.

AC konvertörün motor tarafındaki kontaktör

Özellikle AC sürücü çalışırken, durdurma/başlatma kontrolü için AC konvertörün motor tarafındaki 3-fazlı güç devresinin açılıp/kapanması önlenmelidir. İndüktif devrenin motorla bağlantısının kesilmesi,

IGBT'lere ve diğer bileşenlere zarar verebilen geçici aşırı-gerilim üretir. Birçok modern AC konvertör, IGBT'leri bu tip anahtarlardan korumak için RC bastırma devrelerine sahiptir. Aşağıdaki paragraf, lider AC konvertör imalatçılarından birine ait kullanıcı kitabından alınmıştır:

Dikkat: U, V ve W sürücü çıkış terminallerine bağlanan herhangi bir bağlantı kesme aracı, sürücü çalışması sırasında çalıştırılırsa, sürücüyü faal olmayan hale getirebilmelidir. Sürücü çalışırken açılırsa, U, V ve W arasında çıkış gerilimi üretmeye devam edecektir. Sürücünün çok hızlı bir şekilde faal olmayan hale getirilebilmesi için yardımcı bir kontak kullanılmalıdır, aksi halde çıkış bileşeni zarar görebilir.

Hedef, konvertör ile motor arasındaki kontaklar açılmadan önce AC *Konvertörün FAAL OLMAYAN* hale getirilmesini sağlamaktır. Bu, geçici aşırı-gerilimlerden dolayı IGBT'nin zarar görmesini önleyecektir.

İlave olarak, konvertör çıkış gerilimi mevcutken motor tarafındaki kontaktörün kapatılması, DOL başlatmasındakine benzer bir motor demeraj akımının akmasına neden olabilir. Bunun konvertörde neden olduğu zorlamanın yanısıra, sürücü, aşırı-akım söz konusu olduğunda kapanacaktır. Konvertör çalışmaya başladıktan sonra motor kontaktörünün kapatılmasına ilişkin tekrarlayan girişimler, sonuçta IGBT arızasına neden olabilir.

Lokal güvenlik şartlarını sağlamak için Değişken Hızlı AC Sürücü sisteminin güç devresine bir kontaktörün takılmasının gerekli olduğu durumda, bu kontaktörün AC konvertörün *alt kısımlarına* yerleştirilmesi daha iyidir. Kontaktör açılmadan ÖNCE konvertör kontrol devresini faal olmayan hale getiren ya da alternatif olarak kontaktör kapatıldıktan SONRA olanaklı kılma devresini faal olmayan hale getiren bir yardımcı kontağın kontaktörde yer alması gereklidir. Bu, kontaktör üzerinde *Geç Kapanmalı – Erken Açılmalı* tipteki yardımcı bir kontağın kullanılması ve konvertör *Olanaklı Kıl* girişine bağlanması gerektiği anlamına gelir.

Yukarıdaki konfigürasyon, AC konvertörü arızalara karşı korurken, bu rutin durdurma/başlatma kontrolünün kullanılması ÖNERİLMEZ. Bu kontrol işlemi, sadece Acil Durma durumunda kullanılmalıdır. Rutin durdurma/başlatma dizileri, AC konvertör *kontrol terminallerinden* gerçekleştirilmelidir. Tesis operatörlerinin bu şartı gerçekleştirmesini sağlamak için kullanılan alternatif bir metot, mandallı bir röle ve bir *reset* düğmesi eklemektir. Mandallı röle, her Acil Durma dizisinden sonra resetlenmelidir.

9.4 AC konvertörlerin metal mahfazalara yerleştirilmesi

Çevresel şartların, kabul edilen bu çalışma aralıklarını aşma ihtimali varsa, AC konvertör için ilâve soğutma ve/veya çevresel koruma sağlamak için düzenleme yapılması gereklidir. AC konvertöre ilişkin sıcaklık sınır değerleri, elektrik motoruna ilişkin sıcaklık sınır değerlerinden çok daha kritiktir. Sıcaklıkla ilgili beyan değer düşürme işleminin ciddi bir şekilde uygulanması gereklidir. Ancak, modern bir PWM konvertörün, sıcaklık sınır değerlerinin aşılmasından dolayı zarar görmesi muhtemel değildir. Modern AC konvertörler, ısı alıcıya monte edilen dahili termal korumaya sahiptir (genelde silikon jonksiyonlu cihazlar). Aşırı-sıcaklıktan dolayı kapanmaya ilişkin temel sorun, *yanlış yere kapanmayla* ve ilgili arıza süresiyle ilgilidir.

Modern AC konvertörlerin veriminin yüksek olmasına (tipik olarak $\pm$ % 97) rağmen, konvertörlerin tümü, temelde güç elektroniği devrelerindeki anahtarlama kayıplarından dolayı az miktarda ısı üretmektedir. Kayıp seviyesi, konvertörün tasarımına, PWM anahtarlama frekansına ve toplam güç beyan değerine bağlıdır. İmalâtçılar, konvertör tam yükte çalışırken meydana gelen kayıplara (watt) ilişkin değerleri sunar. Bu ısıнын harcanarak yok edilmesi ve konvertör mahfazası içindeki sıcaklığın kabul edilemeyecek kadar yüksek seviyelere çıkmasını önlemek için, gerekli önlemler alınmalıdır.

Konvertörler genelde hava-soğutmalıdır, konveksiyon (düşük beyan değerleri) ya da daha büyük beyan değerlerine sahip soğutma fanları kullanılır. Giriş ve çıkış deliklerinden soğutucu hava girişini engelleyen herhangi bir engelin olması, soğutma sisteminin verimini düşürecektir. Soğutucu hava akar ve güç kaybı harcaması, cihaz odası için havalandırma şartlarını belirler.

Soğutma, ayrıca ısı alıcı ile soğutucu hava arasındaki sıcaklık farkına da bağlıdır. Çevre sıcaklığı ne kadar yüksekse, soğutma o kadar verimsiz olur. Hem AC konvertörün hem de motorun, sıcaklığın 40° C'yi aşmadığı bir ortamda çalışacağı beyan edilmiştir.

AC konvertörler mahfazaların içine yerleştirildiğinde, mahfazanın içindeki sıcaklığın belirli sınır değerleri dahilinde kaldığından emin olunmalıdır. Sıcaklık, sınır değerleri dahilinde değilse, imalâtçının beyan değer düşürme çizelgelerine göre, konvertörlerin beyan değerleri düşürülmelidir.

Sürücünün kullanılmadığı periyotlar sırasında yoğunlaşmanın meydana gelme ihtimalinin olduğu bir ortamda, mahfaza içine yoğunlaşma-önler ısıtıcılar yerleştirilmelidir. Kontrol devresi, sürücünün enerjilenmediği durumda ısıtıcı faal hale gelecek şekilde

tasarım lanmalıdır. Isıtıcı mahfaza içinde sıcak ve kuru bir ortam sağlar ve konvertör faal olmayan hale geldiğinde ve soğuduğunda, mahfazada nem toplanmasını önler.

AC konvertörler genelde, konveksiyonel soğutmaya destek olması için düşey bir konuma monte edilecek şekilde tasarımı lanmıştır. Daha büyük VSD'lerde soğutma, ısı alıcının en altına ya da en üstüne monte edilen bir veya daha fazla fan tarafından desteklenir.

Birçok modern konvertör, iki alternatif montaj düzenlemesine imkân verir:

- *Yüzey montajı* [:Surface mounting]: Bu montaj tipinde, konvertörün arka düzlemi, mahfazanın arkası gibi düşey bir yüzeye monte edilir (Şekil 9.4 ve Şekil 9.5).
- *Gömme montaj* [:Recessed mounting]: Bu montaj tipinde, konvertörün arkasındaki ısı alıcılar, mahfazanın arkasından bir soğutma kanalına yönelir. Bu, ısının, ısı alıcılardan daha etkin bir şekilde atılmasına imkân verir (Şekil 9.6)

Soğutucu havanın ısı alıcılardan ve elektronik kontrol kartlarından kısıtlanmadan geçmesini sağlamak için diğer cihazlarla yeterli ayırım mevcut olmalıdır. *Genel kural* olarak, VSD'nin tüm kenarları etrafında *100 mm'lik bir aralığa* izin verilmelidir. Aynı mahfazaya birden fazla VSD yerleştirildiğinde, bu VSD'ler tercihen üst üste değil yan yana monte edilmelidir. Sıcaklığa karşı duyarlı cihazların, VSD'nin soğutma hava yolunun hemen üstüne yerleştirilmemesine dikkat edilmelidir.

Konvertör kayıplarının dış ortama atılması için gerekli önlemler alınmalıdır. Mahfaza içindeki sıcaklık artışı, konvertörün maksimum beyan sıcaklığının altında tutulmalıdır.

9.4.1 Mahfazanın boyutlarının hesaplanması

Mahfaza, konvertörün ve içine yerleştirilen diğer her türlü elektrikli cihazın ürettiği ısıyı harcamaya yetecek kadar büyük olmalıdır. Mahfaza içinde üretilen ısı, temel olarak mahfaza yüzeyinden yayılmak üzere dış ortama iletilir. Sonuç olarak, yüzey alanı, iç sıcaklığın beyan sınır değerlerini aşmasına izin vermeksizin içeride üretilen ısıyı harcayacak kadar büyük olmalıdır.

Uygun bir mahfazanın yüzey alanı aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$A = P/k(T_{en\ büyük} - T_{çevre})$$

Burada

A	m ² cinsinden etkin ısı iletim alanı (başka herhangi bir yüzeyle temas halinde olmayan yüzey alanlarının toplamı)
P	Isı üreten cihazın watt cinsinden güç kaybı
T _{en büy}	Konvertörün °C cinsinden izin verilebilen maksimum çalışma sıcaklığı
T _{çevre}	Dış çevre sıcaklığının °C cinsinden maksimum değeri
k	Mahfaza maddesinin ısı iletim kat sayısı

Örnek

22 kW beyan değere sahip tipik bir PWM tipi frekans konvertör için IP54 koruma dereceli kabinin minimum büyüklüğünü hesaplayın.

Bu örnekte aşağıdaki varsayımlar yapılır:

- Konvertör kayıpları tam beyan yükte 600 watttır.
- Konvertör, 2 mm'lik çelikten yapılmış bir IP54 kabinine monte edilecektir.
- Mahfaza tamamen kapalıdır ve sadece çelikten iletim yoluyla yayılarak ve dış yüzeyden dışarıdaki havaya yayılarak, mahfazadan ısı atılabilir.
- Kabin, maksimum çevre sıcaklığı 25°C olan havalandırılmalı bir odada, arkası duvara yaslanacak şekilde zemine konulmuştur.
- Konvertör, maksimum 50° C'de çalışabilir.
- Isı iletim kat sayısı 5,5'tir (boyanmış 2 mm'lik çelik için tipik bir değerdir).

İlk adım, mahfazanın gerekli minimum yüzey alanını hesaplamaktır. Bu, yüzey alanı için aşağıdaki formül uygulanarak gerçekleştirilebilir.

$$A = 600 / 5,5 (50 - 25) = 4,36 m^2$$

Kabin zeminde duvara dayalı duruyorsa, bu alan, mahfazanın sadece üst kısmını, ön kısmını ve yan taraflarını kapsar. Standart kabin çeşitleri içinden uygun bir kabin seçilebilir ya da bu kurulum için uygun bir kabin üretilebilir. Her iki durumda da, konvertörün boyutlarının dikkate alınması ve konvertörün tüm taraflarında en az 100 mm aralığın olduğundan emin olunması önemlidir.

Bu şartlar akılda tutulduğunda, prosedür, boyutlardan en az iki tanesinin seçilmesi ya da tahmin edilmesidir, üçüncü boyut yukarıdaki denklemden hesaplanabilir. Hesaplanan bu boyut, gerekli 100 mm'lik aralığın sağlandığından emin olmak için kontrol edilmelidir.

Boyutları H x W x D olan ve zeminde duvara dayalı duran bir kabin için, etkin ısı iletim alanı şu şekildedir:

$$A = HW + 2HD + WD$$

Yüksekliği 2,0 m ve derinliği 0,5 m olan standart bir kabinin seçilmiş olduğunu varsayarsak, genişlik aşağıdaki denklemden elde edilir:

$$A = 2,0 W + 2 + 0,5 W$$

$$A = 2,5 W + 2$$

Yukarıdaki denklemden elde edilen gerekli ısı harcaması kullanılarak

$$4,36 = 2,5 W + 2$$

ya da

$$2,5 W = 2,36$$

$$W = 0,94$$

Isı harcama şartları esas alındığında, kabinin genişliğinin 0,94 m'den daha büyük olması gereklidir. Bu durumda, 1,0 m'lik standart bir genişlik seçilir.

Konvertörün yan taraflarındaki açıklıkların kontrol edilmesi gereklidir.

H x W X D = 700 x 350 x 300'lük tipik konvertör boyutları ile, seçilen kabin, konvertörün etrafında 100 mm'den geniş bir açıklık sağlar ve ayrıca kablo bağlantıları ve diğer bileşenler için yeterli boşluk kalır.

Bu hesaplamadan, kabinin boyutları aşağıdaki değişiklikler yapılarak indirgenebilir:

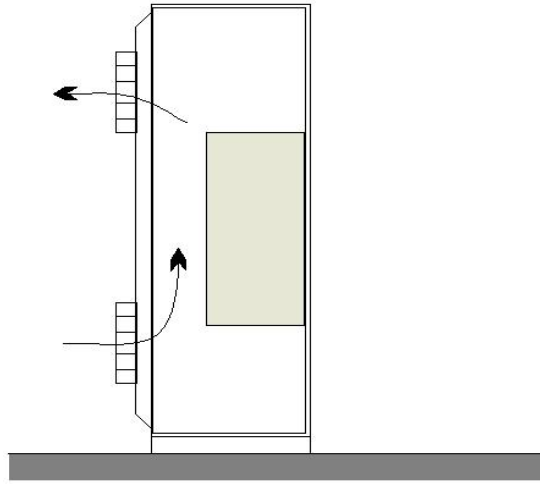
- Kabin, duvardan en az 200 mm uzağa yerleştirilir.
- Havalandırma faal olmayan hale getirilerek çevre sıcaklığı azaltılabilir.
- Isı iletimini artırmak için kabinde havalandırma sağlanabilir.

9.4.2 Mahfazaların havalandırılması

Kabinin iç kısmı ve dış kısmı arasında hava alışverişini gerçekleştirmek için ilâve havalandırma sağlınırsa, mahfaza daha küçük olabilir. Konvertörlerde yaygın olarak kullanılan çeşitli havalandırma teknikleri vardır ancak bu teknikler temel olarak iki kategoriye ayrılır.

Doğal havalandırma

Bu havalandırma tipi, kabinin en altına ve en üstüne yakın deliklerden geçen konveksiyonel soğutucu hava akışını esas alır ("baca" etkisi).



Şekil 9.4 – Kabindeki konvertörün doğal bir şekilde havalandırılması

Cebri havalandırma

Bu havalandırma tipi, kabinin en altına ya da en üstüne yakın bir yere yerleştirilen bir fan tarafından desteklenen soğutucu hava akışını esas alır. Havalandırmalı kabinlerde yüksek IP (koruma derecesi) beyan değerleri sağlamak zordur, bu nedenle, havalandırmalı kabinlerin, tozsuz cihaz odası gibi korumalı bir ortama yerleştirilmesi gereklidir.

Soğutmayı gerçekleştirmek için, mahfaza içinde üretilen ısıyı dış ortama iletmek üzere belli miktarda hava akışı gereklidir. Gerekli hava akışı, aşağıdaki formülden hesaplanabilir:

$$V = 3,1P/(T_{en\ büyük} - T_{çevre})$$

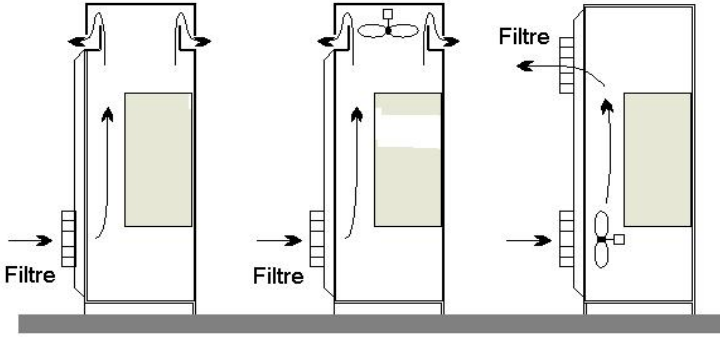
Burada

V m³/saat cinsinden gerekli hava akışı

P Watt cinsinden ısı üreten cihazın güç kaybı

T_{en büyük} °C cinsinden konvertörün izin verilebilen maksimum çalışma sıcaklığı

T_{çevre} °C cinsinden maksimum dış çevre sıcaklığı



Şekil 9.5 – Bir kabindeki konvertörün cebri havalandırması

Örnek

Aynı varsayımları kullanarak yukarıdaki örnekte kullanılan 22 kW'lık Konvertörün hava akışı havalandırma şartlarını hesaplayın. Yeterli soğutmayı sağlamak için gerekli hava akışı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$V = (3,1 \times 600)/(50-25) = 74,4 \text{ m}^3/\text{saat}$$

Mahfaza içinde üretilen ısınn dışarı atılması için 75 m³/saat hızında hava akışı gereklidir. Bu durumda, kabinin boyutları, konvertör ve kabin içine monte edilen diğer her türlü cihaz için gerekli olan minimum fiziksel boyutları esas alır.

En üstteki/en alttaki açıklıkların yeterince büyük olması ve hava akışının toz-filtre yastıkları tarafından kısıtlanmaması şartıyla, bu hava akışı konveksiyonel hava akışı ile sağlanabilir. Alternatif olarak, gerekli hava akışını sağlamak için fan-destekli bir havalandırma sisteminin kullanılması gerekli olur.

9.4.3 Alternatif montaj düzenlemeleri

Konvertör kabinlerinin havalandırılması ile ilgili temel sorunlardan biri, havalandırılan bir kabinde yüksek IP beyan değerlerinin elde edilmesinin çok zor olmasıdır. İlâve olarak, filtreler kullanılırsa, ilâve bir bakım sorunu oluşur, filtrelerin düzenli olarak kontrol edilmesi ve değiştirilmesi gereklidir.

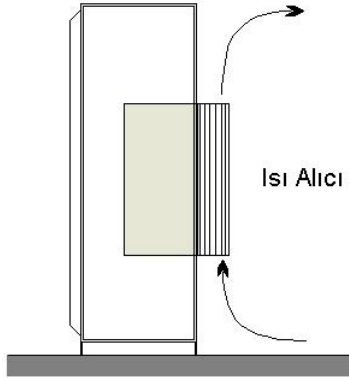
Popüler hale gelmeye başlayan bir çözüm *gömme montajdır*. Bu teknik, günümüzde çok sayıda konvertör imalâtçısı tarafından benimsenmiştir.

Konvertör tarafından üretilen ısınn çoğu, doğrultucu modülü, invertör modülü, kondansatörler, reaktör ve güç kaynağı gibi güç elektroniği bileşenleriyle ilgilidir. Bu birimler, genelde konvertörün ısı alıcı tabanına monte edilir ve ısınn çoğu, bu ısı alıcının yüzeylerinden

yayılır. Sayısal kontrol devreleri, çok fazla ısı üretmez. (belki sadece birkaç watt)

Isı alıcı, mahfazanın arka montaj düzlemine monte edilirse, ısının çoğu, kabinin dışındaki ortama yayılacaktır. Konvertörün, kontrol devrelerine sahip kısmı mahfaza içinde kalır. Konvertör etrafında uygun bir sızdırmazlık halkası olduğunda, mahfaza nispeten küçük olabilir ve cebri ya da konveksiyonel havalandırma gerekmeksizin IP 54'ten daha yüksek beyan değerlere sahip olabilir.

Mahfazanın dışına bakan ısı alıcı kısmı, daha düşük bir IP beyan değeriyle (örneğin, IP 20 gibi) dış ortama açılabilir ya da ısıyı bina dışına atan bir soğutma hava kanalı sistemine yönelecek şekilde düzenlenebilir. Şekil 9.6'da, ısı alıcıların havalandırma kanalına yönlendirildiği bu konvertör tipine ilişkin tipik montaj düzeni gösterilmektedir.



Şekil 9.6 – Kabin dışında ısı alıcıyla monte edilmiş konvertör

9.5 Değişken hızlı sürücüler için kontrol kabloları

Değişken Hızlı Sürücüler (VSD), konvertörün ön kısmına monte edilen manüel düğmeler, anahtarlar ve potansiyometreler vasıtasıyla 'lokal olarak' kontrol edilebilir. Manüel olarak kontrol edilen basit işlemler için, VSD'nin çalıştırılması için tüm gerekli olan şey bu lokal kontrol işlemleridir.

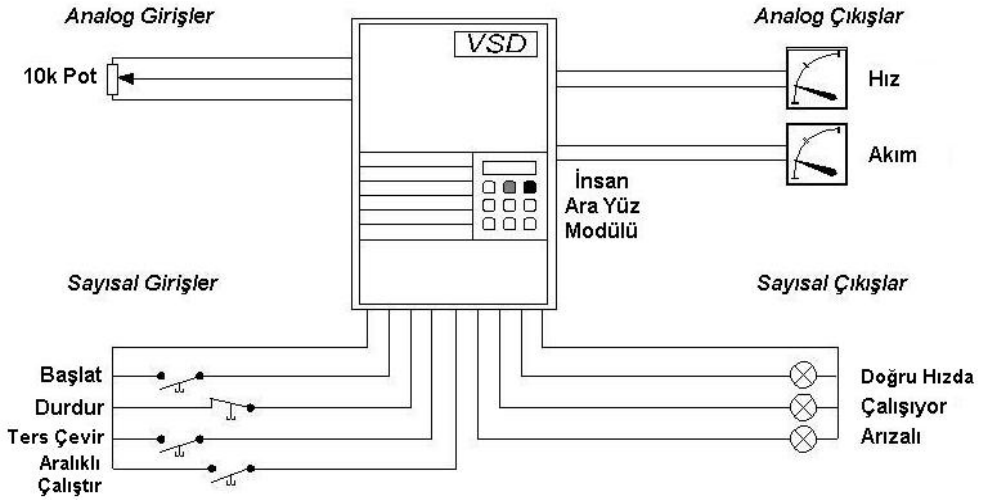
Birçok endüstriyel uygulamada, VSD'nin yerleştirildiği yerden kontrol edilmesi pek mümkün değildir. VSD'ler genelde anahtarlama odalarında bulunan Motor Kontrol Merkezlerine (MCC) yerleştirilir, anahtarlama odaları genelde güç kaynağı transformatörünün yakınına yerleştirilir ancak mutlaka operatörün süreci kontrol ettiği yere yakın bir yere yerleştirilmeleri gerekli değildir.

Sonuç olarak, neredeyse tüm VSD'ler, operatöre yakın bir bölgeden *Uzaktan Kontrole* izin veren terminallere sahiptir. VSD'ler aşağıdaki kontrol işlemleri için kullanılan terminallere sahiptir:

- Genelde aşağıdakiler tarafından implement edilen uzaktan Başlatma, Durdurma, Yön Değiştirme, Aralıklı Çalıştırma, vb. gibi **Sayısal Girişler**:
 - Manüel olarak kontrol edilen bir sistemde uzaktaki düğmeler
 - Otomatik bir sistemdeki Süreç Kontrolörün Sayısal Çıkışları (DO)
- Genelde aşağıdakiler tarafından implement edilen Çalışıyor, Durdu, Doğru Hızda Çalışıyor, Arızalandı şeklindeki göstergeler, vb. gibi **Sayısal Durum Çıkışları**:
 - Manüel olarak kontrol edilen bir sistemdeki uzaktan ikaz ve gösterge lambaları
 - Otomatik bir sistemdeki Süreç Kontrolörün Sayısal Girişleri (DI)
- Genelde aşağıdakiler tarafından implement edilen uzaktan Hız Referansı, Tork Referansı, vb. gibi **Analog Girişler**:
 - Manüel olarak kontrol edilen bir sistemdeki uzak potansiyometre (10 k ohm pot)
 - Otomatik bir sistemdeki Süreç Kontrolörün Analog Çıkışları (AO), genelde ekranlı bükmeli bir kablo çiftinde taşınan 4 – 20 mA'lık bir sinyali kullanır.
- Genelde aşağıdakiler tarafından implement edilen uzak Hız Göstergesi, Akım Göstergesi, vb. gibi **Analog Çıkışlar**:
 - Manüel olarak kontrol edilen bir sistemdeki ekranlı uzaktan sayaçlar (0 – 10 V)
 - Otomatik bir sistemdeki Süreç Kontrolörün Sayısal Girişleri (AI), genelde ekranlı bükmeli bir kablo çiftinde taşınan 4 – 20 mA'lık bir sinyali kullanır.

Manüel ve otomatik kontrol sistemleri, 'doğrudan bağlanan' bu kontrol sistemini yıllardır etkin olarak kullanmaktadır. Bu sistemin temel dezavantajları şunlardır:

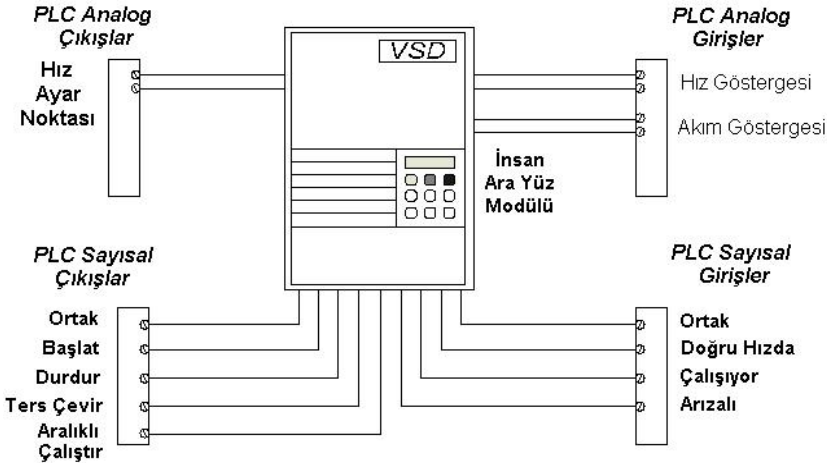
- Tüm DI'lar ve DO'lar fonksiyon başına bir tane kabloya (artı ortak kabloya) ihtiyaç duyar.
- Tüm AI'lar ve AO'lar fonksiyon başına iki tane kabloya (artı siper bağlantısına) ihtiyaç duyar.



Şekil 9.7 – Doğrudan bağlanan tipik manüel kontrol sistemi konfigürasyonu

9.5.1 PLC kontrol sistemlerine ilişkin doğrudan bağlanan bağlantılar

Programlanabilir Lojik Kontrolörleri (PLC) ve Dağıtılmış Kontrol Sistemlerini (DCS) kullanan otomatik kontrol sistemlerinin kullanılmaya başlanması ile birlikte, manüel kontrollerin yerine Giriş/Çıkış (I/O) modülleri geçmiş ve 'doğrudan bağlanan' kontrol bağlantıları uzatılmıştır.



Şekil 9.8 – Doğrudan bağlanan tipik otomasyonlu kontrol sistem konfigürasyonu

Kontrol sistemleri daha karmaşık hale geldikçe ve alan algılayıcılarının gerektirdiği bilgi miktarı arttıkça, maliyet ve karmaşıklık açısından bakıldığında, otomasyonlu kontrol sistemini implement etmek için gereken iletken sayısı büyük bir sorun haline

gelmiştir. Kontrol sistemine gitgide daha fazla sayıda alan cihazı bağlandığı için, bu kablo sorunu daha da büyümüştür.

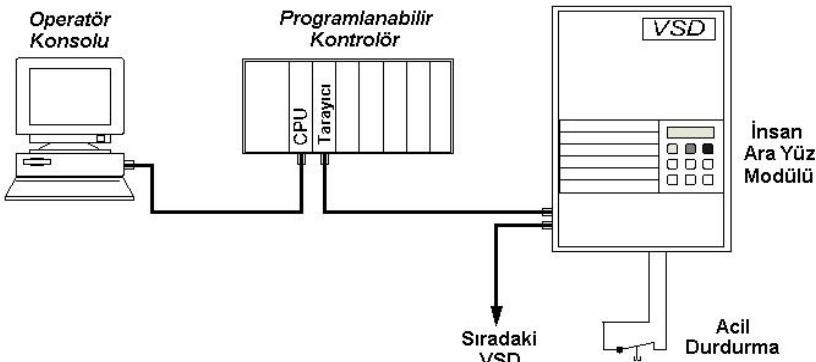
Değişken Hızlı Bir Sürücü (VSD) ile Programlanabilir Lojik Kontrolör arasındaki doğrudan bağlanan ara yüz, tipik olarak aşağıdaki gibi 15 civarında iletken gerektirecektir.

- Başlat, Durdur, Olanaklı Kıl, Yön değiştir, vb. gibi kontrol işlemleri için 5 iletken
- Çalıştı, Arızalandı, Doğru Hızda Çalışıyor, vb. gibi durumlar/ikazlar için 4 iletken
- Hız ayar noktası gibi analog kontrol için 2 ya da 3 iletken
- Hız göstergesi, akım göstergesi gibi analog durumlar için 4 iletken

Sistemde çeşitli VSD'ler varsa, kablo sayısı, sistemdeki VSD sayısı ile çarpılır.

9.5.2 PLC kontrol sistemleriyle seri haberleşme

Seri Haberleşme bu sorunların üstesinden gelinmesini sağlar ve karmaşık alan cihazlarının ve Değişken hızlı AC sürücü sistemlerinin daha basit ve minimum kablo kullanılacak şekilde *Otomasyonlu Kontrol Sisteminde* birleştirilmesini sağlar. Bazen 'Akıllı' cihazlar olarak adlandırılan mikroişlemci tabanlı sayısal kontrol cihazları, modern fabrika otomasyonunda ve endüstriyel süreç kontrol sistemlerinde artan bir şekilde kullanılmaktadır. Çeşitli 'akıllı' cihazlar bir kablo çifti üzerinde 'çok-sayıda prize sahip' [:multi-dropped] olabilir ya da 'zincirleme' [:daisy-chained] bağlanabilir ve otomasyonlu kontrol sistemine entegre edilebilir. Kontrol ve durum bilgisi, alanda yer alan VSD'ler ile Süreç Kontrolör arasında seri olarak iletilebilir. Parametre ayarları, uzaktaki merkezi bir noktadan ayarlanabilir.



Şekil 9.9 – Tipik seri haberleşme sisteminin konfigürasyonu

Verici	EIA-232	EIA-423	EIA-422	EIS-485
Çalışma modu	Dengeli değil	Dengeli değil	Diferansiyel	Diferansiyel
Hatta max. sürücü & alıcı sayısı	1 Sürücü 1 Alıcı	1 Sürücü 10 Alıcı	1 Sürücü 10 Alıcı	32 Sürücü 32 Alıcı
Max. Kablo Uz.	15 m	1,200 m	1,200 m	1,200 m
Max. Veri Hızı	20 kbps	100 kbps	10 Mbps	10 Mbps
Maksimum Ortak Mod Gerilimi	± 25 V	± 6 V	+ 6 V ilâ – 0,25 V	+12 V ilâ -7 V
Sürücü Çıkış Sinyali	± 5.0 V min ± 25 V maks	$\pm 3,6$ V min $\pm 6,0$ V maks	$\pm 2,0$ V min $\pm 6,0$ V maks	$\pm 1,5$ V min $\pm 6,0$ V max
Sürücü Yükü	≥ 3 kohm	≥ 450 ohm	≥ 100 ohm	≥ 60 ohm
Sürücü Çıkış Direnci	Enerji veril_ diğinde	n/a	n/a	n/a
(Yüksek-Z durumu) [:high-Z state]	Enerji kesil_ diğinde	300 ohm	≤ 100 microA @ ± 6 V	≤ 100 microA -7 V $\leq V_{cm} \leq 12$ V
Alıcı Giriş Direnci	3 kohm ilâ 7 kohm	≥ 4 kohm	≥ 4 kohm	≥ 12 kohm

Şekil 9.10 – RS-232, RS-423, RS-422 ve RS-485'in özelliklerinin karşılaştırılması

Bu kontrol sistemi seviyesi, genelde '*alan seviyesi*' olarak ve bu seviyedeki veri haberleşme ağı '*alan yolu*' olarak adlandırılır.

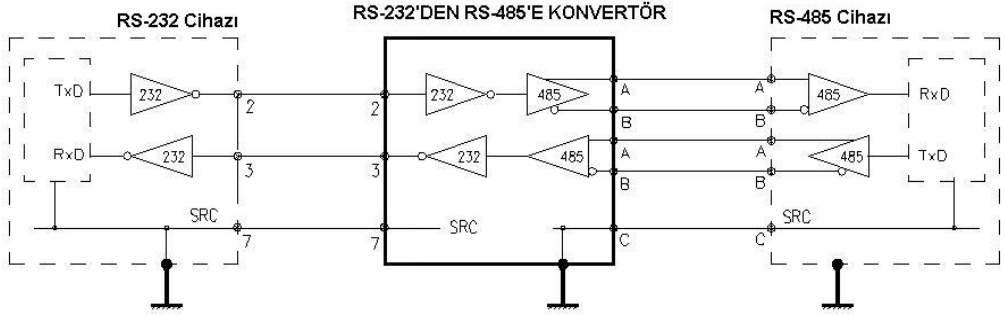
Fiziksel ara yüz standartları, aralarında seri ikili veri sinyal iletimi gerçekleşen iki elektronik cihaz arasındaki bağlantının elektriksel ve mekanik ayrıntılarını tanımlar. EIA-232, EIA-422 ve EIA-485 gibi yaygın bir şekilde kullanılan çeşitli fiziksel ara yüz standartları mevcuttur. En yaygın dört EIA ara yüz standardının temel özellikleri, Şekil 9.10'daki çizelgede karşılaştırılmaktadır.

9.5.3 Ara yüz konvertörleri

Birçok PC ve PLC, standart olarak RS-232 ara yüzleriyle donatılmıştır, bu portlar, bu ara yüz vasıtasıyla değişken hızlı sürücülerin kontrol edilmesi için genelde uygun değildir çünkü gerilim seviyeleri ve konfigürasyon arasında farklar vardır (dengeli olmayan/dengeli).

Gerilim seviyelerini ve bağlantı konfigürasyonunu birinden diğerine (dengeli olmayandan dengeliye) dönüştürmek için iki cihaz arasında bir RS-232/RS-422 ya da RS-232/RS-485 ara yüz konvertörü bağlanabilir. Alandaki değişken hızlı sürücülerle olan uzun mesafeler için RS-485 ara yüzünün performans karakteristikleri daha iyi olduğundan, RS-232 portuna (PC ucundaki) fiziksel olarak yakın bir yere bir ara yüz konvertörü yerleştirilmelidir. Toprak gerilim farklarından ve elektriksel gürültüden kaynaklanan sorunlara karşı maksimum koruma sağlamak amacıyla, bu konvertörlerin ve sürücü uçtaki ara yüzün, kontrol cihazını değişken hızlı sürücülerden *optik olarak ayırması* tercih edilir.

PC ile ara yüz konvertör arasındaki ara yüz bire-birken, RS-485 tarafında, çeşitli cihazlar (32 taneye kadar) çok-prizli bir konfigürasyonda bağlanabilir. Bir RS-232/RS-485 konvertörün iç bağlantısına ilişkin ayrıntılar, aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 9.11 – Bir RS-232/RS-485 konvertörün blok diyagramı

9.5.4 Yerel alan ağları

Veri paylaşmak ve kontrol komutlarını aktarmak için sayısal donanımların ve kontrol cihazlarının bağlanması tekniği, otomatik endüstriyel kontrol sistemlerinin önemli bir parçası haline gelmiştir. Kontrol sisteminin temel bileşenlerinin 'veri otoyolu' ile birbirine bağlanması oldukça yaygın bir uygulamadır. Veri otoyolu için kullanılan diğer bir isim *Yerel Alan Ağıdır* (LAN).

LAN, iki ya da daha fazla akıllı cihazı bağlayan bir haberleşme yoludur. LAN, ağdaki tüm *düğüm*ler arasında tam bağlanılabilir özelliği sağlayarak *çok sayıda kullanıcının ortak haberleşme kablo ağına Paylaşımlı Erişimine* [:Shared Access] imkân verir. LAN, nispeten küçük bir alanı kapsar ve bölgesel bir tesiste ya da bina grubunda yer alır.

Bir haberleşme cihazının LAN'la bağlantısı *Düğüm* vasıtasıyla gerçekleştirilir. Düğüm, bir cihazın bağlandığı herhangi bir noktadır

ve her bir düğümüne ayrı bir *Adres* numarası tahsis edilir. LAN üzerinde gönderilen her mesajın önekinde hedef adres yer almalıdır. *Düğüm* vasıtasıyla *Ağa* bağlanan bir cihaz, ağ üzerinde iletilen tüm mesajları alır ancak sadece kendi adresine gönderilen mesajlara cevap verir. LAN'lar, oldukça küçük yerel bir alanda paylaşılan bir iletim ortamında nispeten yüksek bir hızda (50 kbps ve üstü) çalışır.

Çok sayıda düğüm LAN ağına *aynı zamanda* erişebildiği için, ağ yazılımı, *veri çatışması ya da bozulumu meydana gelmeden ortak ağ kaynaklarının paylaşılmasıyla* ilgili sorunları çözmelidir. OSI modelinde, bu yazılım seviyesi, *Veri Link Katmanı* olarak adlandırılır. *Hangi cihazların, ne zaman ve hangi şartlar altında* ağa erişebileceğine ilişkin bazı kurallar geliştirilmelidir.

Birçok modern sayısal *değişken hızlı sürücü* (VSD) haberleşme kapasitesine sahiptir. Fiziksel ara yüz, genelde RS-232 ya da RS-485 gibi iyi bilinen bir fiziksel standardı esas alır. Örneğin *DeviceNet, Profibus, ASI-bus, Modbus, Interbus-S*, vb. gibi geniş çapta kabul edilen belli sayıda endüstriyel haberleşme standardı mevcuttur. VSD'ye yüklenen uygun bir program, VSD'ye yapılan seri veri iletimini kontrol edebilir. Bu yeni çıkan standartlar hakkında halâ kafa karıştıran önemli noktalar vardır ancak bunlar, önümüzdeki birkaç yıl içinde çözülecektir.

9.6 Değişken hızlı sürücülerin işletmeye alınması

9.6.1 İşletmeye almanın nedenleri

VSD'lerin işletmeye alınmasının temel nedeni aşağıdaki şartların sağlandığından emin olmaktır:

- AC konvertörün ve motorun doğru bir şekilde monte edilmiş olduğundan ve AS 3000 gibi kablolama ve güvenlik standartlarını karşıladığından emin olmak
- Enerji ve motor kablolarının doğru uzunlukta olduğundan, doğru bir şekilde döşenmiş olduğundan ve bağlantı uçlarının doğru şekilde yapılmış olduğundan emin olmak
- Tüm enerji kablo siperlerinin, her iki uçta da konvertördeki, motordaki ve DB ya da MCC'deki PE terminalinde doğru bir şekilde topraklandığından emin olmak
- Kontrol kablolarının, kontrol sistemi tasarımına göre döşenmiş olduğundan emin olmak

- Kontrol kablo siperlerinin tümünün, sadece bir uçta, tercihen süreç kontrol sistemi ucunda topraklanmış olduğundan emin olmak
- İlk defa enerjilendirmeden önce kablolarda arıza olmadığından emin olmak

9.6.2 Doğru uygulama ayarlarının seçilmesi

Tüm temel kontroller ve işletmeye alma test föyü tamamlandıktan sonra, VSD'ye enerji verilebilir.

Konvertör ilk defa enerjilendirilirken, temel parametre ayarlarının tümü konvertöre girilene kadar motor kablo bağlantılarının kesilmesi önerilir. Bu, motorun yanlış yönde ya da çok yüksek seviyede bir ivmelenmeyle çalışmaya başlatılmasıyla ilgili sorunları önleyecektir. Çıkış tarafı tamamen açık devre olan bir PWM konvertörle çalışmak tehlikeli değildir.

Tüm başlangıç ayarları ve yüklü çalışma kontrol işlemleri tamamlandıktan sonra, motor kablosunun yalıtımı deneyden geçirilebilir ve son yüklü durum işletmeye alma deneyleri için bağlanabilir.

9.6.3 Doğru parametre ayarlarının seçilmesi

Değişken hızlı bir sürücü, sadece temel parametreler ilgili uygulamaya uygun olacak şekilde ayarlanmışsa doğru bir şekilde çalışacaktır. *VSD'nin mekanik bir yüke bağlanmasından önce kontrol edilmesi gereken* temel parametreler şunlardır:

- Besleme gerilimi için, çıkışa bağlanan elektrik motoruna uygun doğru *taban gerilimi* seçilmelidir. Avustralya'da, bu standart gerilim genelde 415 V'tur ve 3-fazlıdır. Bu, motora, doğru çıkış Volt/Hz oranının verilmesini sağlayacaktır.
- Besleme gerilimi için, çıkışa bağlanan elektrik motoruna uygun, doğru *taban frekansı* seçilmelidir. Avustralya'da, bu standart frekans genelde 50 Hz'dir. Bu, motora, doğru çıkış Volt/Hz oranının verilmesini sağlayacaktır.
- Soğutma fanının bağlantıları, transformatör üzerinde doğru kademe ayarlarının seçilmesini sağlamak için kontrol edilmelidir.

Daha sonra, kalan parametre ayarları aşağıdaki şekilde seçilebilir:

- Genelde 50 Hz'e ayarlanan ancak uygulamaya uygun olması için sık sık daha büyük bir hıza ayarlanan *maksimum hız*. Maksimum hızın, sürücüyü *yükleme kapasitesi sınır değerinin*

üstüne çıkarmadığından emin olmak için Bölüm 6'ya bakılmalıdır.

- Bir pompa ya da fan sürücü için genelde 0 Hz'e ayarlanan ancak sabit tork uygulamalarına uygun olması için sık sık daha yüksek bir hıza ayarlanan *minimum hız*. Minimum hızın, sürücüyü *yükleme kapasitesi sınır değerinin* altına düşürmediğinden emin olmak için Bölüm 6'ya bakılmalıdır.
- *Motorun beyan akım değeri* – bu değer, motorun büyüklüğünün konvertörün beyan değerine oranına bağlıdır. Konvertörün akım beyan değeri, her zaman motor beyan değerine eşit ya da motor beyan değerinden büyük olmalıdır. Motorun yeterli bir şekilde korunması için, doğru akım beyan değeri seçilmelidir.
- *Akım sınır değeri* – bu değer, motorun başlangıç torkunu belirler. Yüksek bir demeraj torku bekleniyorsa, bu değer % 150'ye kadar olan bir değere ayarlanması en yüksek başlangıç torkunu sağlayacaktır.
- *İvmelenme süresi* – bu değer, sıfır hızdan maksimum hıza çıkmak için geçen rampa süresini belirler. Bu değer, mekanik yükün inerşiasına ve uygulama tipine göre seçilmelidir. Örneğin, bir pompa uygulamasında, borulara su çarpmasını önlemek için ivmelenme süresinin yeterince kısa olması gereklidir.
- *Yavaşlama süresi* – bu değer, maksimum hızdan sıfır hıza düşmek için geçen süreyi belirler. Sadece “durmak için rampa” seçeneği seçilirse bu ayar uygulanabilir. Genelde alternatif olarak “DC frenleme” seçeneği ve bir seçenek daha mevcuttur. Yüksek inerşialı yüklerde, bunun çok küçük bir değere ayarlanmaması gereklidir. Yavaşlama süresi, yükün doğal bir şekilde yavaşladığı süreden daha kısa ise, DC gerilimi yüksek bir seviyeye çıkacak ve “aşırı-gerilim” durumu gerçekleşip beklenmedik bir şekilde motor duracaktır. Sadece dinamik bir frenleme direncinin takılmış olduğu durumda, yavaşlama süresi, doğal hız azalma süresinden daha kısa olabilir.
- *Başlangıç torkunun güçlendirilmesi* – yük, yüksek bir demeraj torkuna sahipse, bu özellik seçilebilir. Motorun düşük-hızlarda aşırı-akıya sahip olmasını önlemek için bu özelliğin dikkatli bir şekilde kullanılması gereklidir. Bir ayarın çok yüksek seviyede olması, motorun aşırı-ısınmasına neden olabilir. VSD'nin, başlangıç aşamasında yükün demeraj torkunu aşmasını

sağlamak için sadece yeterli seviyede tork güçlendirmesi seçilmelidir.

Modern sayısal VSD'lerde yaygın olarak gerekli olan başka birçok ayar daha vardır. Yukarıdakiler en önemli ayarlardır ve çalışmaya başlamadan önce kontrol edilmelidir. Kalan parametreler, genelde birçok uygulama için muhtemelen yeterli olacak “önceden tanımlı” bir ayara sahiptir. Ancak, optimum çalışma için bunlar kontrol edilmeli ve ayarlanmalıdır.

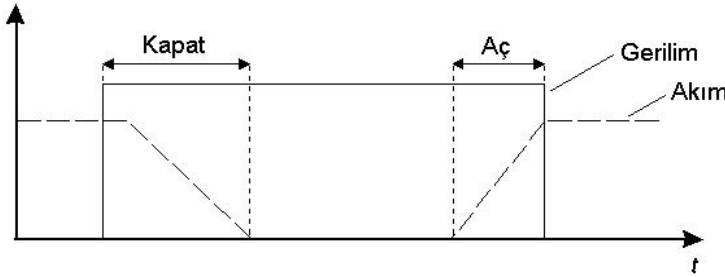
10 Özel Başlıklar ve Yeni Gelişmeler

10.1 Yumuşak anahtarlama

Mevcut *PWM gerilim kaynağı invertör* tasarımı, indüktif bir yükü besleyen anti-paralel diyotları olan yarı iletken anahtarlama cihazlarını ve sabit bir DC link gerilim kaynağını kapsar. Cihaz anahtarlama gerçekleştiğinde, aynı bacaktaki diğer anti-paralel diyot iletim yapar ve anahtarlama cihazı üzerinde tam gerilimin olmasını sağlar. Bu, Şekil 10.1’de gösterildiği gibi *kilitlemeli indüktif yük anahtarlama dalga biçimi* sağlar. Bu, invertörde yüksek seviyede anahtarlama kayıplarına neden olan büyük eş zamanlı gerilimlerin ve akımların oluşmasına neden olur.

Halen inceleme aşamasında olan yeni bir invertör topolojisi, anahtarlama güç kaybını çok düşük bir seviyeye indirmek için anahtarlama sırasında *sıfır gerilim* ya da *sıfır akım* sağlar. Bu yeni

teknik *yumuşak anahtarlama* olarak adlandırılır ve gelecekte kullanılacak yarı iletken cihazların daha yüksek frekanslarda anahtarlama ve böylece daha iyi dalga biçimi kontrolü sağlar.

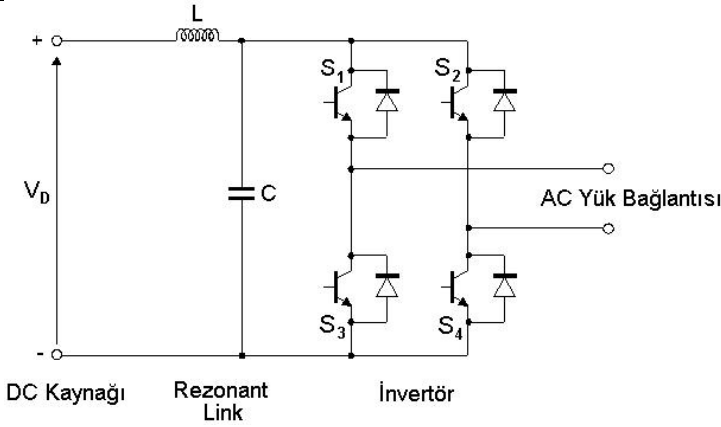


Şekil 10.1 – Kilitlemeli indüktif yük anahtarlama dalga biçiminin karakteristiği

Bu hedefe ulaşmak için kullanılabilen tasarımlardan bir tanesi, Şekil 10.2’de tek-fazlı durum için gösterilen rezonant link invertördür. DC bara ile invertör aşaması arasındaki seri indüktör ve şönt kondansatörü hariç olmak üzere, ön-uç, normal ‘*sert-anahtarlama*’ bir invertöre özdeşir.

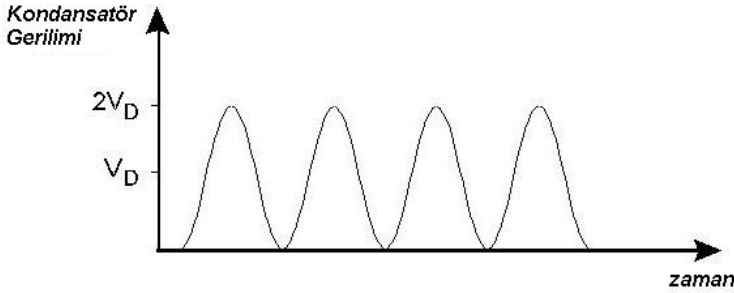
Devre aşağıdaki şekilde kontrol edilir:

- Kondansatörün önceki invertör çalışma çevriminde anlık olarak deşarj edildiğini varsayın.
- Tüm invertör anahtarları, yüke sıfır volt uygulanarak ve kondansatör kısa devre yapılarak sıfır gerilimde FAAL HALE getirilir. Daha sonra anahtarlar vasıtasıyla indüktör akımı artırılır.
- İndüktör akımı uygun bir seviyeye ulaştığında, yüke gerilim uygulamak için her bir bacakta bir tane anahtar açılır (sıfır gerilimde). İndüktör akımı azalırken, kondansatör gerilimi, besleme geriliminden yüksek bir değere çıkar. Kondansatör gerilimi düşerken salınım devam eder.
- Kondansatör gerilimi sıfıra düşerken, anti-paralel diyotlar, kondansatör geriliminin negatif bir değer olmasını önler (Kondansatörü kısa devre yapar ve bir anda deşarj eder).
- Süreç tekrar edilir.



Şekil 10.2 – Tek-fazlı rezonant linkli 'yumuşak' invertör topolojisi

İnvertör bacakları arasındaki kaynak, Şekil 10.3'te gösterildiği gibi kondansatör gerilimiyle aynı dalga biçimine sahip bir darbe serisi biçimindedir. Rezonans devam edecek ve düşük anahtarlama kayıpları elde edilecekse, invertör bacakları sıfır gerilimlerden birinde anahtarlmalıdır.



Şekil 10.3 – İnvertör bacağındaki rezonant linkli invertör dalga biçimi

Bu devre, geleneksel invertörde olduğu gibi darbe genişliği sürekli değişen darbe üretebilme özelliğine sahip değildir. Çıkış gerilimi, darbe genişlik modülasyonu tarafından değil ayrıık darbe modülasyonu tarafından kontrol edilmelidir. Ancak, rezonans, çıkış akımının düzgünlüğünü etkilemeyecek kadar yüksek bir frekanstadır (50 – 100 kHz) çünkü yük indüktansı, bu gibi yüksek bir frekansın filtrelenmesinde çok etkindir.

Halen inceleme aşamasında olan başka birçok yumuşak-anahtarlama devre tipleri mevcuttur. Bazıları sürekli rezonans sağlamaz ancak istenen bir anahtarlama momentinde salınım yapacak şekilde kontrol edilir, bu da sürekli darbe genişlik modülasyonuna imkân verir. *Sözde-rezonant linkli invertör* olarak

adlandırılan bu tasarım tipi, cebri-anahtarlama devreleriyle ilgilidir, tek fark, çalışmanın çok daha yüksek frekanslarda gerçekleştirilmesi ve bu tasarımın, kendiliğinden kapatılabilen kapı kontrollü cihazlarla kullanılmasıdır. Diğer tasarımlar, sıfır-gerilimde kapanma yerine sıfır-akımda kapanmaya izin verir.

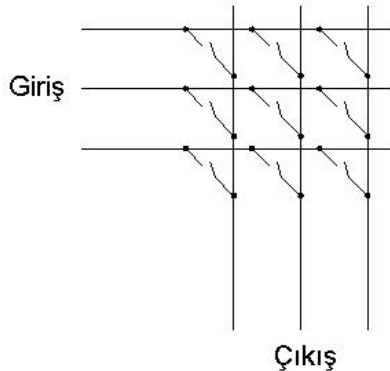
Bu anahtarlama tipinin avantajlarından biri, daha düşük RFI seviyeleri sağlamasıdır çünkü gerilim ve akım artış hızları daha düşüktür.

Potansiyel tasarımların çoğu aşağıdaki genel sorunlara sahiptir:

- Rezonans, yapısal olarak kaynak geriliminden daha yüksek seviyede gerilimin oluşmasına neden olur, bu da, güç anahtarları ve yük üzerinde daha zorlayıcı bir etkiye sebep olur. Aşırı enerjiyi absorbe etmek için başka anahtarların ve enerji depolama elemanlarının eklenmesiyle bunun üstesinden gelinebilir.
- Bu tasarımlar, daha karmaşık kontrol sistemlerine ihtiyaç duyar çünkü rezonans sağlamak için, anahtarlamanın gerçekleştiği an, yüke bağlı olarak değiştirilmelidir. Bu kontrol, geleneksel bir invertörün anahtarlama frekansının 20 katı civarında implement edilmelidir. Bu, *sayısal sinyal işlemci* gibi hızlı bir kontrolör donanımının ve yazılımının kullanılmasını gerektirir.

10.2 Matris konvertör

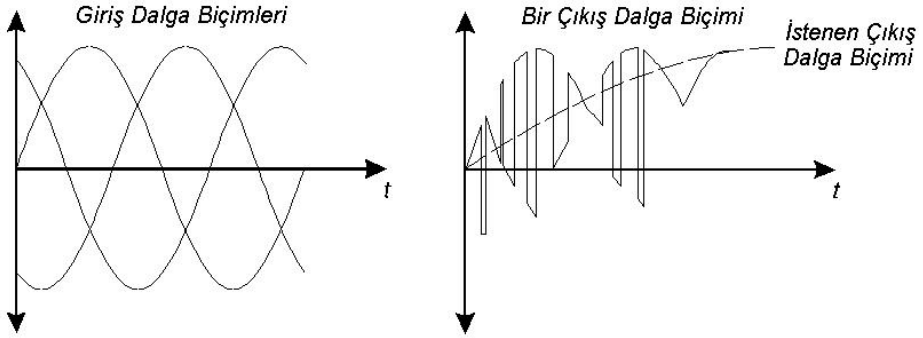
Bu kitapta şimdiye kadar açıklanmış tüm AC konvertör tasarımları, indüktans, kapasitans ve yarı iletken güç anahtarları gibi enerji depolama elemanlarını içermektedir. Enerji depolama bileşenleri ilâve kayıplara neden olur, hantaldır ve güvenilir değildir. Matris konvertör, bu depolama bileşenlerine ilişkin ihtiyacı ortadan kaldırmaya çalışmaktadır.



Şekil 10.4 – Matris konvertör bağlantı devresi

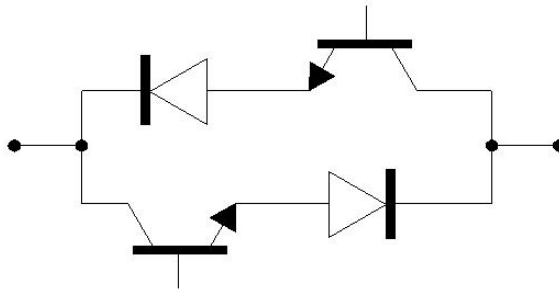
Buradaki kavram çok basittir, 3 giriş hattının her birini bir çıkış hattıyla birleştiren anahtar matrisinden oluşur.

Çıkış gerilim dalga biçimi, aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi girişin kısımlarından oluşmaktadır. Giriş hat akımı istenen herhangi bir güç faktörüne sahip olacak şekilde, devrenin, dört kadranın tümünde çalışabildiği gösterilmiştir.



Şekil 10.5 – Matris konvertörün giriş ve çıkış gerilim dalga biçimleri

Devreye ilişkin temel zorluk, anahtarların her iki yönde de iletim ve bloklama yapabilmesinin gerekli oluşudur. İki güç anahtarı ve iki diyot kullanan cihazların üretilmesinin mümkün olmasına rağmen, bu, ekonomik bir çözüm değildir. Son üç yıldır tek çipli “evrensel bir anahtarın” üretilmesiyle ilgili çeşitli girişimler olmuştur ancak bugüne kadar ticari anlamda bir başarı kazanılamamıştır.



Şekil 10.6 – Dört-kadranlı yarı iletken anahtar

11 Ekler

Ek A Motor Koruması – Doğrudan Sıcaklık Algılama

A.1 Giriş

AC konvertörlerin ve AC indüksiyon motorlarının korunmasına ilişkin temel şartlar, 5. Bölüm'de (*Bölüm 5: AC konvertörlerin ve motorların korunması*) ayrıntılı olarak kapsamaktadır. Bu ekte, elektrik motorlarının korunmasına ilişkin *Doğrudan Sıcaklık Algılama* metotlarıyla ilgili bazı ayrıntılı bilgiler yer almaktadır.

A.2 Mikroterm (Termostat)

Termostat, önceden ayarlanmış Beyan Tepki Sıcaklığındaki kontak çiftinin konumunu değiştirmek için bimetalik bir şerit kullanan ve sıcaklığa bağlı olarak çalışan bir cihazdır. Sıcaklık önceden ayarlanan bir seviyeyi geçtiğinde, kontaklar, röle ya da kontaktör gibi bir dış kontrol cihazını anahtarlama için kullanılır. '*Bir nokta çevresindeki dalgalanmayı*' önlemek amacıyla, Ayar ve Resetin farklı

sıcaklıklarda gerçekleşmesini sağlamak için genelde cihazda bir histerez tipi kullanılır.

Elektrik motorlarında yaygın olarak kullanılan mikrotermier, sargıyla yakın bir termal ilişki sağlamak için motorun ya da transformatörün sargılarına doğrudan takılabilecek kadar küçük, duyarlı minyatür termostatlardır. Tipik olarak, 240 V 2,5 Amp beyan değerlere sahip kontaklar, bir kontaktörü ya da bir röleyi doğrudan anahtarlama özelliğine sahiptir. Genelde bir motora çok sayıda mikrotermi takılır; mikrotermierin her biri, motorun içine yerleştirildikleri bölgenin tasarım sıcaklığıyla ilişkili bir sıcaklıkta çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Tipik stratejik bölgeler, sargılar, havalandırma yolu ve rulmanlardır. DC motor imalatçıları, mikrotermier tercih etme eğilimindeyken, AC motor imalatçıları, aşağıda açıklanan termistörleri tercih etmektedir.

Mikrotermier genelde ikili gruplar halinde kullanılır, sıcaklık ön-uyarı ikazını sağlamak için gruplardan biri diğerinden 5°C ya da 10°C daha düşük beyan referans sıcaklık değerine sahiptir. İkinci grup, sargı yalıtımının zarar görmesini önlemek amacıyla motoru kapatmak için kullanılır. Önemli beyan değerlere ve termal inerşiyaya sahip bir motorda, ön-uyarı ikazının olması, aşırı yük kapama sinyali gelmeden önce aşırı yük durumunu düzeltmek ya da süreç makinesini temizlemek için operatöre birkaç dakika kazandırır.

DC motorlarda genelde iki mikrotermi grubu kullanılır. İlk grubun montaj konumu, genelde armatür akımını taşıyan en sıcak ara kutbun en sıcak noktasıdır. Bu konum, armatür akımı aşırı yükü için koruma sağlar. İkinci grup genelde hem şönt bobin sıcaklığı hem de motordaki genel sıcaklık için koruma sağlamak amacıyla şönt alanına yerleştirilir.

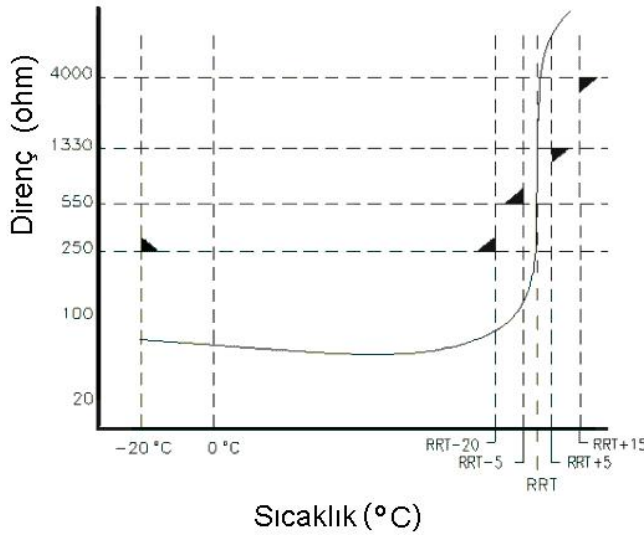
Modern şönt sargılı DC motorda, şönt sargısının çalışma sıcaklığı, armatürün çalışma sıcaklığına çok yakın bir değerdir. Doğrudan ölçüm yapmak dışında izlenmesi zor olan soğutucu hava kaybı ya da hava sınırlaması, alan sargısının sıcaklığında hızlı bir artışa neden olacak ve mikrotermi tarafından tespit edilecektir.

A.3 Termistör algılayıcıları ve termistör koruma röleleri

Termistör, lineer olmayan küçük dirençli bir algılayıcıdır ve sargıyla yakın bir termal ilişki sağlamak için motor sargısının yalıtımına eklenebilir. Termistör algılayıcıları, metal oksit ya da yarı iletken maddeden yapılır. Direnç ve sıcaklık arasındaki ilişki lineer değildir ve direnç, ayar noktasının etrafındaki küçük sıcaklık değişikliklerine bağlı olarak ciddi ölçüde değişir.

Doğru şekilde konumlandırma ile, termistörler, sargının sıcak noktalarının ya da termal olarak kritik bölgelerin yakınına yerleştirilebilir ve burada, termistörlerin büyüklüğüne ve sargıya ne kadar iyi bir şekilde yerleştirildiklerine bağlı olarak belirli bir zaman gecikmesiyle bakır sıcaklığını yakından takip edebilir.

Termistörler, AC motordaki stator sargısı ya da DC motordaki kutuplar arası ve alan sargıları gibi *motorun dönmeyen kısımlarına* daha kolay bir şekilde takılabilir.



Şekil A.1 – PTC termistör algılayıcısının karakteristik eğrisi (IEC TC2)

RRT = Beyan Tepki Sıcaklığı

Belirtilen IEC Sıcaklık/Direnç sınır değerleri açık bir şekilde işaretlenmiştir.

Termistörlerin ana avantajları şunlardır:

- Boyutlarının küçük olması, stator sargısıyla doğrudan temasta olacak şekilde takılmalarına imkân verir.
- Termal inerşialarının düşük seviyede olması, sargı sıcaklık değişikliklerine hızlı ve doğru bir şekilde tepki vermelerini sağlar.
- Termistörler, sıcaklık artışının başlangıcından bağımsız olarak sıcaklığı doğrudan ölçer.
- Termistörler, frekans konvertörler tarafından sürülen motorlardaki aşırı yük durumlarını tespit etmek için kullanılabilir.

Sıcaklık kat sayısı, *pozitif (Pozitif Sıcaklık Kat Sayısı – PTC [Positive Temperature Coefficient] – direnç sıcaklığa bağlı olarak artar) ya da negatif (Negatif Sıcaklık Kat Sayısı – NTC direnç sıcaklığa bağlı olarak azalır) olabilir. Endüstride en yaygın olarak kullanılan tip, PTC termistördür, PTC termistörün tipik direnç karakteristiği aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.*

Normal sıcaklıklardaki direnç nispeten düşüktür ve *Beyan Tepki Sıcaklığına (RRT)* kadar neredeyse sabit kalır. RRT'ye yaklaşıp geçildiğinde, direncin gradyanı hızlı bir şekilde artar, bu da PTC termistörün, küçük sıcaklık değişikliklerine karşı yüksek bir duyarlılığa sahip olmasını sağlar. Direnç, termistör koruma rölesi (TPR) tarafından izlendiğinde ve dirençte bir artış tespit edildiğinde, bir ikaz mesajı göndermek ya da korunan cihazı kapatmak için, TPR tarafından bir kontak harekete geçirilir.

Algılayıcı direnci 3 kΩ civarının üstüne çıktığında, termistör koruma rölelerinin güvenli bir şekilde kapatılması gereklidir. Bu röleler, kablodaki ya da termistör algılayıcısındaki açık devreye karşı da tepki verecek, böylece arızasız çalışma sağlanacaktır. Algılayıcı direnci 50 Ω civarının altına düştüğünde, termistör algılayıcı kısa devresini tespit etmek için de modern TPR'ler tasarlanmıştır.

Belirtilen çalışma seviyeleri şunlardır:

- IEC'ye göre termistör aşırı-sıcaklık koruması
 - Tepki seviyesi = $3300 \Omega \pm 100 \Omega$
 - Reset seviyesi = $1650 \Omega \pm 100 \Omega$
- IEC'ye göre termistör kısa-devre koruması
 - Tepki Seviyesi $\leq 15 \Omega$

Değişken hızlı AC sürücülerde, invertörden beslenen sincap kafesli AC motoru korumak için yaygın olarak PTC termistörler kullanılmaktadır. Birçok modern AC konvertör, dahili bir termistör koruma birimine sahiptir, böylece ayrı bir termistör koruma rölesine ihtiyaç kalmaz.

DC motorlarda, yukarıdaki kısımda açıklanan mikrotermilerin yerine PTC termistör algılayıcıları kullanılmaktadır.

Elektrik motorlarındaki yalıtımın çeşitli sınıfları için yaygın olarak seçilen *Beyan Tepki Sıcaklıkları* (RRT), Şekil A.2'deki çizelgede özetlenmektedir.

Yalıtım Sınıfı	Beyan Sıcaklık	İkaz Sıcaklığı	Açma Sıcaklığı
Sınıf B	120°C	120°C	130°C
Sınıf F	140°C	140°C	150°C
Sınıf H	165°C	165°C	175°C

Şekil A.2 – Dönen elektrik makinelerinde kullanılan tipik sıcaklık seviye ayarları

Yalıtım ortamı üzerinden algılayıcılara iletilen ısının iletim hızının nispeten düşük seviyede olmasından dolayı, PTC termistörleri, motorlardaki ya da transformatörlerdeki kısa devrelere karşı yeterince hızlı koruma sağlamaz. Ayrıca PTC termistörleri genelde stator sargılarında yer aldıkları için, rotoru kritik motorlar ya da yüksek inersiyalı başlatma şartları ya da durmuş rotor şartları için yeterli koruma sağlamaz. Bu durumlarda, tam koruma sağlamak için, PTC termistörlerin, motor tarafından çekilen birincil akımı izleyen elektronik motor koruma röleleriyle birlikte kullanılması gereklidir.

PTC termistörlerin sıcaklık algılayıcıları olarak kullanılması sadece aşağıdaki şartlar yerine getirildiğinde etkin hale gelir:

- Termistör Beyan Tepki Sıcaklığı (RRT - [*Rated Response Temperature*]), sargı üzerinde kullanılan yalıtım sınıfı için doğru bir şekilde seçildiğinde,
- Termistörler, termal olarak kritik bölgelere doğru bir şekilde yerleştirildiğinde,
- Sargı ile PTC termistörü arasında düşük bir termal direnç olduğunda. Bu, sargı ile termistör arasındaki elektriksel yalıtıma bağlıdır. Termistörlerin yüksek gerilimlerden ayrılması gerektiği için, daha fazla yalıtım kalınlığına sahip HV motorlarda düşük ısı iletiminin sağlanması daha zordur.

Çevre sıcaklıklarındaki toplam direnç $1,5 \text{ k}\Omega$ 'u geçmiyorsa, çeşitli termistör algılayıcıları, tek bir algılayıcı devresine seri olarak bağlanabilir. Uygulamada ve IEC tarafından önerildiği gibi, altı taneye kadar termistör algılayıcı, seri olarak bağlanabilir.

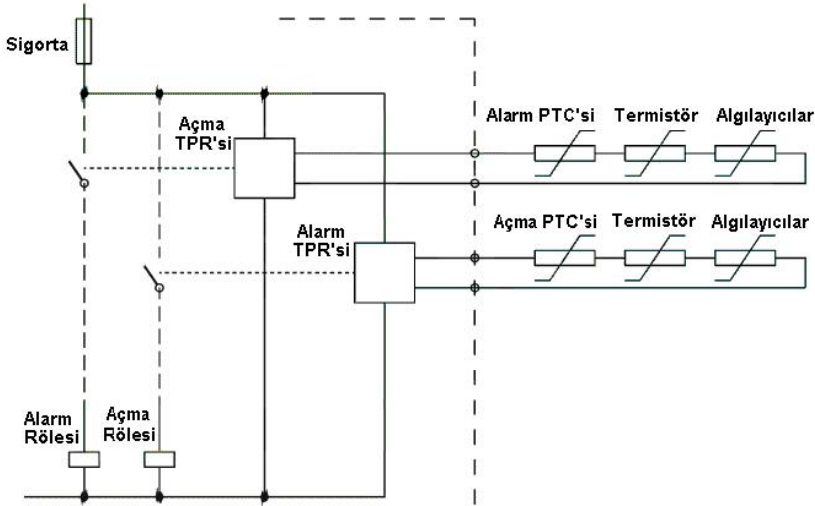
3-fazlı bir AC motor için, 3 sargının her birinde iki termistör algılayıcısı mevcuttur ve bunlar, iki tane 3'lük grup halinde bağlanmıştır. Bir grup, ikaz için ve diğer grup

motorun kapatılması için kullanılabilir. İkaz grubu, kapama grubundan tipik olarak 5°C ya da 10°C daha düşük *Beyan Tepki Sıcaklığına (RRT)* sahip olacak şekilde seçilir. Operatör hiçbir işlem yapmazsa, sargı yalıtımının zarar görmesini önlemek için motorun doğrudan kapatılması amacıyla kapama grubu kullanılır. Birçok durumda, kullanıcılar, her iki grup da aynı RRT'ye sahip olacak şekilde grup seçimi yapmaktadır. Bu durumda, sadece tek bir termistör grubu (her fazda bir tane) kullanılmaktadır ve bunlar, daha sonra motorun kapatılması için kullanılmaktadır. Bu, her bir fazda yedek bir termistör sağlar.

Bir AC motordaki termistör algılayıcıların fiziksel konumu, motorun yapısına, silindirik bir rotora mı yoksa çıkık kutuplu bir rotora mı sahip olduğuna ve diğer birçok tasarım ve imalat faktörüne bağlıdır. Bazı durumlarda, optimum konumun, deney sonuçları kullanılarak belirlenmesi gerekli olabilir.

Termistör Koruma Röleleri (TPR), genelde standart termistör raylarındaki Motor Kontrol Merkezine ya da bir kontrol kabinine monte edilecek şekilde tasarlanmıştır. Şekil A.3'te, 3-fazlı bir AC indüksiyon motorunun İkaz ve Kapama kontrolü için İki Termistör Koruma Rölesinin tipik bağlantısı ve ilgili termistör algılayıcı grupları gösterilmektedir. Termistör Koruma Rölelerinin performansı, algılayıcı kablosunda gerilimin indüklenemediği durumda, dış elektriksel enterferanstan etkilenebilir. Sonuç olarak, Termistör Koruma Rölesi ile PTC Termistör algılayıcıları arasındaki kablolar, indüklenen gürültünün etkilerini en düşük seviyeye indirecek şekilde seçilmeli ve döşenmelidir. Kablolar, mümkün olduğunca kısa tutulmalıdır ve kabloların uzun mesafeler boyunca gürültülü kabloların ya da yüksek gerilim kablolarının yakınına döşenmesi önlenmelidir.

Deney sırasında, termistörler arasında *megger* ile ölçme yapılmamasına dikkat edilmelidir çünkü bu, termistörlere zarar verebilir. Doğru prosedür, tüm termistör kablolarının birbirine bağlanması ve bu kablolarla toprak ya da fazlar arasında deney geriliminin uygulanmasıdır



Şekil A.3 – Termistör koruma rölelerinin tipik bağlantısı

Kullanılması gereken kablo tipi için bazı pratik öneriler şu şekildedir:

Mesafeler ≤ 20 m ise	Standart paralel kablo kabul edilebilir.
Mesafeler ≥ 20 m, ≤ 100 m ise	Bükmeli Kablo Çifti (STP) gereklidir.

Mesafeler ≥ 100 m ise
gereklidir.

Ekranlı Bükmeli Kablo Çifti (STP)

Yüksek enterferans seviyesi

Ekranlı Bükmeli Kablo Çifti (STP) gereklidir.

Ekran sadece bir uçta topraklanmalıdır.

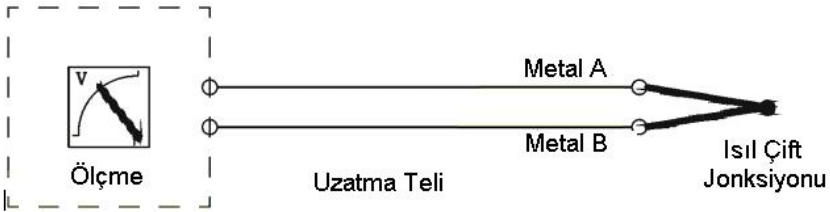
Algılayıcılarla olan kabloların mesafeleri 200 metreden büyük olduğunda, iletkenlerin kesit alanının da dikkate alınması gereklidir. Aşağıdaki çizelgede gösterilen değerler önerilir:

İletken Kesit-alanı	Maksimum Uzunluk	Kablo Tipi
0,5 mm ²	200 m	Ekranlı Bükmeli Çift (Sadece bir uçta topraklanmış ekran)
0,75 mm ²	300 m	Ekranlı Bükmeli Çift (Sadece bir uçta topraklanmış ekran)
1,0 mm ²	400 m	Ekranlı Bükmeli Çift (Sadece bir uçta topraklanmış ekran)
1,5 mm ²	600 m	Ekranlı Bükmeli Çift (Sadece bir uçta topraklanmış ekran)
2,5 mm ²	1000 m	Ekranlı Bükmeli Çift (Sadece bir uçta topraklanmış ekran)

Şekil A.4 – Termistör algılayıcılarına ilişkin önerilen kablo büyüklükleri

A.4 Isıl çift (termokuplür)

Isıl çiftler/Termokuplör, bir jonksiyon oluşturmak için bir uçta birleştirilmiş benzer olmayan iki metal parçadan oluşur. Diğer açık uçta, jonksiyondaki sıcaklığa bağlı küçük bir gerilim oluşur. Bu, *Peltier Etkisi* [:Peltier Effect] olarak bilinir. Sıcaklık değiştikçe, oluşan termiyonik gerilim değişir ve sıcaklığa ilişkin bir gösterge sağlanır.



Şekil A.5 – Bir ısı çift algılayıcısı ile kontrolörü arasındaki bağlantılar

Gerilim/sıcaklık, hata sınır değerleri ve tellerin bağlanmasına ilişkin renk kodları gibi ısı çiftlerinin performans karakteristiklerini belirten çeşitli ulusal standartlar mevcuttur. En yaygın olarak kullanılan standartlar aşağıda listelenmiştir. Gerilim ve sıcaklık ilişkileri açısından bakıldığında bu standartlar genelde birbirinin yerine geçebilir.

ANSI M96.1 Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü ([:American National Standards Institute] NBS Standardı olarak da bilinir)

Bu standart, cihazlar için en yaygın olarak kullanılan standarttır. ANSI renk kodu, her zaman negatif kırmızı bacak ve ısı çiftin tipini ve sıcaklık aralığını gösteren farklı renkte pozitif bir bacak kullanmaktadır. Genel kılıf rengi kahverengidir.

BS 1843 İngiliz Standardı

Bu standart, farklı renkte kılıfı olan mavi negatif bacak renk kodunu ve ısı çiftin tipini ve sıcaklık aralığını gösteren pozitif bir bacağı kullanır.

DIN 43714 Alman Standardı

Bu standart, farklı renkte kılıfı olan kırmızı pozitif bacak renk kodunu ve ısı çiftin tipini ve sıcaklık aralığını gösteren negatif bir bacağı kullanır.

JIS C1610 Japon Standardı

Bu standart, ısı çiftin tipini ve sıcaklık aralığını gösteren farklı renkli kılıflara sahip kırmızı pozitif bir bacak ve beyaz negatif bir bacak kullanır.

NF C42-323 Fransız Standardı

Bu standart, farklı renkte kılıfı olan sarı pozitif bir bacağı ve ısı çiftin tipini ve sıcaklık aralığını gösteren negatif bir bacağı kullanır.

IEC 584 Uluslar arası Elektroteknik Komisyonu (IEC)

Bu yeni standart, gelecekte kabul görmeye başlayacaktır. Umuyoruz ki, bu standardın kullanılması ile ısı çift renk kodlarıyla ilgili mevcut karışıklığın büyük ölçüde üstesinden gelinecektir.

Tip	Sıcaklık Aralığı	Metaller		NBS Renkleri	BS Renkleri
		+ve	-ve		
J-Tipi	0°C ilâ 750°C	Demir	Konstantan	Beyaz/Kırmızı Kahverengi Kılıf	Sarı/Mavi Siyah Kılıf
K-Tipi	-200°C ilâ 1250°C	Bakır	Nikel	Sarı/Kırmızı Kahverengi Kılıf	Kahverengi/Mavi Kırmızı Kılıf
N-Tipi	-270°C ilâ 1300°C	Nikrosil	Nisil	Turuncu/Kırmızı Kahverengi Kılıf	Turuncu/Mavi Turuncu Kılıf
E-Tipi	-200°C ilâ 900°C	Krom	Konstantan	Mor/Kırmızı Kahverengi Kılıf	Kahverengi/Mavi Kahverengi Kılıf
T-Tipi	-200°C ilâ 350°C	Bakır	Konstantan	Mavi/Kırmızı Kahverengi Kılıf	Beyaz/Mavi Mavi Kılıf

Şekil A.6 – ANSI-NBS ve BS 1843 renk kodlarıyla birlikte en yaygın olarak kullanılan baz-metalli [:base metal] ısı çiftlere ilişkin ayrıntılar

Sıcaklık algılayıcıları olarak, ısı çiftler aşağıdaki temel avantajlara sahiptir:

- Sağlam olması: endüstriyel ortam için çok uygundur.

- Doğruluğun iyi olması: tipik olarak her 1°C için % 0,5
- Maliyetin düşük olması: benzer olmayan iki metalin jonksiyonundan oluşur.
- Kendinden enerjili olması: termal enerji, elektrik enerjisine dönüştürülür.
- Sıcaklık aralığının geniş olması: birçok sıcaklık aralığı için ilgili tipler mevcuttur.

Isıl çift jonksiyonları için kullanılan malzemeler, baz metal [*base metal*] ya da asil metaldir [*noble metal*]. Baz-metalli ısı çiftler, endüstride en yaygın olarak kullanılan ısı çiftlerdir çünkü maliyetleri daha düşüktür. Asil metallerden yapılan ısı çiftler daha pahalıdır ve korozyon sorununun oluşabildiği özel uygulamalarda kullanılır. Ayrıca, genelde tungstenden yapılan çok yüksek sıcaklığa sahip belli sayıda ısı çift de mevcuttur.

Geleneksel bakır tel, ısı çiftleri sıcaklık kontrolörüne bağlamak için kullanılmamalıdır. Bu, devrede ilâve jonksiyonlara ve büyük sıcaklık algılama hatalarına neden olur. Jonksiyonu kontrolöre bağlamak için ısı çift jonksiyonuyla aynı malzemeleri kullanan özel bir ısı çift teli kullanılmalıdır. Isıl çift uzatma telleri de genelde ısı çift renkleriyle uyumlu olacak şekilde renk kodlarına sahip olmalıdır. Isıl çift bağlantıları da dış elektriksel enterferansa maruz kalır ve jonksiyon geriliminin üstüne binen indüklenen gerilimler, ölçme hatalarına neden olacaktır. Uzatma telleri, yüksek akımlı ya da yüksek gerilimli enerji kablolarıyla aynı kablo güzergahına döşenmemelidir. Yüksek seviyede gürültünün mevcut olduğu durumlarda, ekranlı uzatma telleri kullanılmalıdır. Endüstriyel bölgelerde, elektriksel gürültüye karşı fiziksel koruma ve siperleme sağlayan ısı çift uzatma tellerinin galvanize demir boruların içine döşenmesi yaygın bir uygulamadır.

A.5 Direnç Sıcaklık Detektörü (RTD)

Algılayıcı Adı	Metal	0°C'deki Direnç
Cu-10	Bakır	10 Ω
Pt-100	Platinyum	100 Ω
Ni-120	Nikel	120 Ω

Şekil A.7 – En yaygın RTD algılayıcı tipleri

Direnç Sıcaklık Algılayıcıları (RTD'ler), genelde bakırdan, platinyumdan ya da nikelden yapılmış ve doğru bir şekilde kalibre edilmiş rezistif bir algılayıcının direnç değerindeki değişimi ölçerek sıcaklığı izler. Yüksek sıcaklık uygulamaları için bazen tungsten kullanılır. RTD algılayıcıları, belirli bir periyot boyunca yüksek seviyede kararlılığa sahip tele-sargılı tipte olabilir ya da metal film tipinde olabilir, bu tip daha ucuzdur, daha kısa tepki süresine sahiptir ancak bu tipin karakteristikleri belirli periyotlar sırasında bozulabilir.

Elektrikli makinelerde en yaygın biçimde kullanılan RTD algılayıcı tipi, direnci 0°C'de 100 Ω 'a ayarlanan, platinyumdan yapılan bir *Pt-100 algılayıcı* birimden oluşur. Algılayıcı, genelde yalıtımlıdır ve boyutları tipik olarak 10 mm çapında ve 200 mm uzunluğunda olan silindirik metal bir borunun içine monte edilir.

RTD algılayıcısının, diğer ölçme algılayıcı tiplerinden fiziksel olarak daha büyük olmasından dolayı, bu algılayıcı, küçük elektrikli motorların rulmanlarına ya da sargılarına kolayca monte edilemez. Sonuç olarak, RTD'ler sadece büyük makinelerde kullanılır ve imalât sırasında stator yuvalarına takılır. Rulman

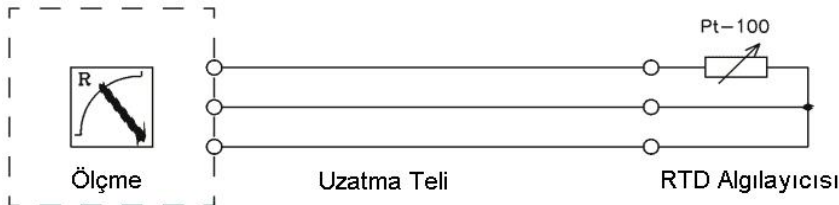
yuvalarına montaj için biraz farklı bir mekanik format uygulanır. Termistörler ya da ısı çiftler halâ elektrikli motorlar için en yaygın olarak kullanılan sıcaklık algılayıcılarıdır.

RTD, dirençle sıcaklık arasında lineer bir ilişkiye sahiptir (Pt-100 algılayıcı için tipik olarak $0,4 \Omega/^{\circ}\text{C}$ 'dir). RTD'nin direncindeki küçük değişikliklerin sürekli olarak ölçülmesi için genelde Wheatstone Köprüsünü esas alan çok duyarlı bir ölçme cihazının kullanılması gereklidir. Bu cihazlar, rezistif algılayıcıdan küçük bir uyarma akımı geçirir.

Uyarma akımının, ısınmayla ilgili bazı sorunlara neden olmasına rağmen, bu pek sorun oluşturmaz çünkü akımlar tipik olarak 1 mA'den düşük seviyededir ve RTD'lerin, bağlantı telleri boyunca ölçülen ortama ısı yayma hızı yüksektir.

Dirençteki sıcaklığa bağlı küçük değişiklikleri dikkate alırsak, RTD direnç ölçümünün doğruluğu, ölçme cihazı ve Pt-100 algılayıcısı arasındaki uzatma telinin seri döngü direncinden etkilenir. Bu, tellerin kesit alanına ve RTD algılayıcısı ile ölçme cihazı arasındaki uzaklığa bağlıdır. Bu, 3-telli RTD'lerin geliştirilmesini sağlamıştır, 3-telli RTD'de, cihazla algılayıcı arasına üçüncü bir özdeş uzatma teli bağlanır. Üçüncü telin kullanılmasının amacı, ölçme cihazının, RTD algılayıcısına ilişkin tel döngü direncini ölçmesini sağlamaktır. Doğruluğu artırmak için, tel döngü direnç değeri, ölçülen toplam direnç değerinden çıkarılır. RTD algılayıcısında, üçüncü tel, Şekil A.8'de gösterildiği gibi algılayıcının bacaklarından birine basitçe bağlanır.

Termistörlere ve ısı çiftlere benzer şekilde, RTD bağlantıları da dış elektriksel enterferansa ve indüklenen gerilimlere maruz kalır, bu da, ölçme hatalarına neden olabilir. Kablo güzergah seçimi ve ekranlamayla ilgili olarak da benzer önlemler alınmalıdır. RTD'ler endüstride çok popüler hale gelmiştir çünkü bu cihazlar ucuzdur, nispeten hızlı bir termal tepki ve yüksek doğruluğa sahip sıcaklık ölçümü sağlar.



Şekil A.8 – 3-telli direnç sıcaklık detektörüne ilişkin bağlantılar

Pt-100: 0°C ilâ $+299^{\circ}\text{C}$ arasındaki sıcaklıklara ilişkin direnç değerleri: DIN 43760

$^{\circ}\text{C}$	$+0^{\circ}\text{C}$	$+1^{\circ}\text{C}$	$+2^{\circ}\text{C}$	$+3^{\circ}\text{C}$	$+4^{\circ}\text{C}$	$+5^{\circ}\text{C}$	$+6^{\circ}\text{C}$	$+7^{\circ}\text{C}$	$+8^{\circ}\text{C}$	$+9^{\circ}\text{C}$
0	100,00	100,39	100,78	101,17	101,56	101,95	102,34	102,73	103,12	103,51
+10	103,90	104,29	104,68	105,07	105,46	105,85	106,24	106,63	107,02	107,40
+20	107,79	108,18	108,57	108,96	109,35	109,73	110,12	110,51	110,90	111,28
+30	111,67	112,06	112,45	112,83	113,22	113,61	113,99	114,38	114,77	115,15
+40	115,54	115,93	116,31	116,70	117,08	117,47	117,85	118,24	118,63	119,01
+50	119,40	119,78	120,17	120,55	120,94	121,32	121,70	122,09	122,47	122,86
+60	123,24	123,62	124,01	124,39	124,77	125,16	125,54	125,92	126,31	126,69
+70	127,07	127,46	127,84	128,22	128,60	128,99	129,37	129,75	130,13	130,51
+80	130,89	131,28	131,66	132,04	132,42	132,80	133,18	133,56	133,94	134,32
+90	134,70	135,08	135,46	135,84	136,22	136,60	136,98	137,36	137,74	138,12
+100	138,50	138,88	139,26	139,64	140,02	140,40	140,78	141,15	141,53	141,91
+110	142,29	142,67	143,04	143,42	143,80	144,18	144,55	144,93	145,31	145,69

Elektrik Motorları (1)
AC Motorlar ve Sürücüler

+120	146,06	146,44	146,82	147,19	147,57	147,95	148,32	148,70	149,07	149,45
+130	149,83	150,20	150,58	150,95	151,33	151,70	152,08	152,45	152,83	153,20
+140	153,58	153,95	154,33	154,70	155,07	155,45	155,82	156,20	156,57	156,94
+150	157,32	157,69	158,06	158,44	158,81	159,18	159,56	159,93	160,30	160,67
+160	161,05	161,42	161,79	162,16	162,53	162,91	163,28	163,65	164,02	164,39
+170	164,76	165,13	165,50	165,88	166,25	166,62	166,99	167,36	167,73	168,10
+180	168,47	168,84	169,21	169,58	169,95	170,32	170,69	171,05	171,42	171,79
+190	172,16	172,53	172,90	173,27	173,64	174,00	174,37	174,74	175,11	175,48
+200	175,84	176,21	176,58	176,95	177,31	177,68	178,05	178,41	178,78	179,15
+210	179,51	179,88	180,25	180,61	180,98	181,34	181,71	182,08	182,44	182,81
+220	183,17	183,54	183,90	184,27	184,63	185,00	185,36	185,73	186,09	186,46
+230	186,82	187,18	187,55	187,91	188,27	188,64	189,00	189,37	189,73	190,09
+240	190,45	190,82	191,18	191,54	191,91	192,27	192,63	192,99	193,35	193,72
+250	194,08	194,44	194,80	195,16	195,53	195,89	196,25	196,61	196,97	197,33
+260	197,69	198,05	198,41	198,77	199,13	199,49	199,85	200,21	200,57	200,93
+270	201,29	201,65	202,01	202,37	202,73	203,09	203,45	203,81	204,16	204,52
+280	204,88	205,24	205,60	205,96	206,31	206,67	207,03	207,39	207,74	208,10
+290	208,46	208,82	209,17	209,53	209,89	210,24	210,60	210,96	211,31	211,67

Şekil A.9 – 0°C ilâ +299°C aralığındaki sıcaklık değişimine bağlı Pt-100 algılayıcı direnç değişimi

Pt-100: 0°C ilâ -219°C arasındaki sıcaklıklara ilişkin direnç değerleri: DIN 43760

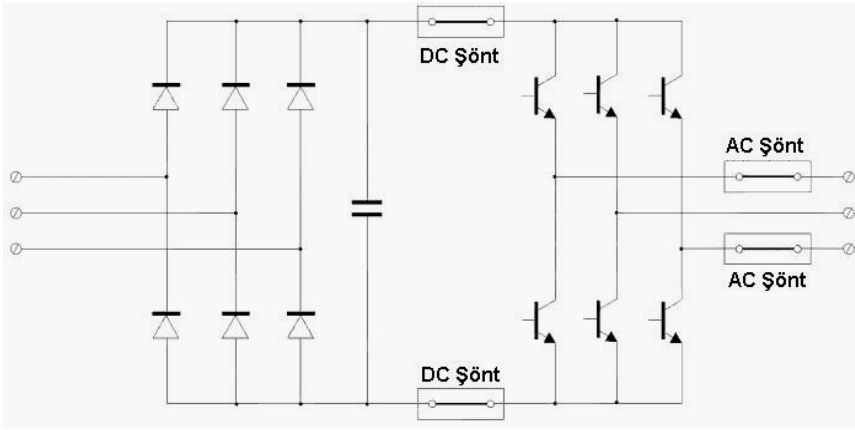
°C	- 0°C	- 1°C	- 2°C	- 3°C	- 4°C	- 5°C	- 6°C	- 7°C	- 8°C	- 9°C
0	100,00	99,61	99,21	98,82	98,43	98,03	97,64	97,25	96,86	96,46
-10	96,07	95,68	95,28	94,89	94,49	94,10	93,71	93,31	92,92	92,52
-20	92,13	91,73	91,34	90,94	90,55	90,15	89,75	89,36	88,96	88,57
-30	88,17	87,77	87,38	86,98	86,59	86,19	85,79	85,40	85,00	84,61
-40	84,21	83,81	83,42	83,02	82,63	82,23	81,83	81,44	81,04	80,65
-50	80,25	79,85	79,46	79,06	78,66	78,26	77,87	77,47	77,07	76,68
-60	76,28	75,88	75,48	75,08	74,68	74,28	73,89	73,49	73,09	72,69
-70	72,29	71,89	71,49	71,09	70,69	70,28	69,88	69,48	69,08	68,68
-80	68,28	67,88	67,47	67,07	66,67	66,26	65,86	65,46	65,06	64,65
-90	64,25	63,84	63,44	63,03	62,63	62,22	61,82	61,41	61,01	60,60
-100	60,20	59,79	59,39	58,98	58,57	58,16	57,76	57,35	56,94	56,54
-110	56,13	55,72	55,31	54,90	54,49	54,08	53,68	53,27	52,86	52,45
-120	52,04	51,63	51,22	50,81	50,40	49,98	49,57	49,16	48,75	48,34
-130	47,93	47,52	47,10	46,69	46,28	45,86	45,45	45,04	44,63	44,21
-140	43,80	43,38	42,97	42,55	42,14	41,72	41,31	40,89	40,48	40,06
-150	39,65	39,23	38,82	38,40	37,98	37,56	37,15	36,73	36,31	35,90
-160	35,48	35,06	34,64	34,22	33,80	33,38	32,96	32,54	32,12	31,70
-170	31,28	30,86	30,43	30,01	29,59	29,16	28,74	28,32	27,90	27,47
-180	27,05	26,62	26,20	25,77	25,34	24,91	24,49	24,06	23,63	23,21
-190	22,78	22,35	21,93	21,50	21,08	20,65	20,23	19,80	19,38	18,95
-200	18,53	18,11	17,70	17,28	16,86	16,44	16,03	15,61	15,19	14,78
-210	14,36	13,96	13,57	13,17	12,78	12,38	11,99	11,59	11,20	10,80

Şekil A.10 – 0°C ilâ -219°C aralığındaki sıcaklık değişimine bağlı Pt-100 algılayıcı direnç değişimi

Ek B Akım Ölçme Transdüserleri

B.1 Akım şöntü

Bir akım şöntü [*current shunt*] ve yükselteç kullanılarak, en basit akım geri besleme biçimi elde edilebilir. Kanıtlanmış bu geri besleme tekniği, Şekil B.1’de gösterilmektedir. DC bara akımı, önceden kalibre edilmiş bir linkten geçirilir ve üzerindeki gerilim ölçülür. Gerilim, şöntten geçen akımla doğru orantılıdır.



Şekil B.1 – AC konvertördeki şönt gerilimleri

Bu cihazla ilgili temel sorun *elektriksel ayırmadır*. Bir PWM AC konvertördeki DC bara akımını ölçmek için, şöntün, DC baranın pozitif ya da negatif bacağına yerleştirilmesi gereklidir, bu nedenle, şönt, Şekil B.1’de gösterildiği gibi toprak potansiyelinin bir miktar üzerinde (ya da altında) bir gerilime sahip olacaktır. Bu ayırma sorunu, motorun çıkış fazlarındaki akımlar ölçülürken de ortaya çıkar.

Bu sorunun üstesinden gelmenin en basit yolu, kontrol devresinin, toprağın 300 V kadar üstüne çıkabilen şönt potansiyelini referans almasıdır. Çok sayıda eski AC VSD’de bu yaklaşımın benimsenmesine rağmen, kontrol cihazları sürücüyeye bağlandığında ara yüz ve güvenlik sorunları ortaya çıktığı için bu yaklaşım artık kabul edilmemektedir.

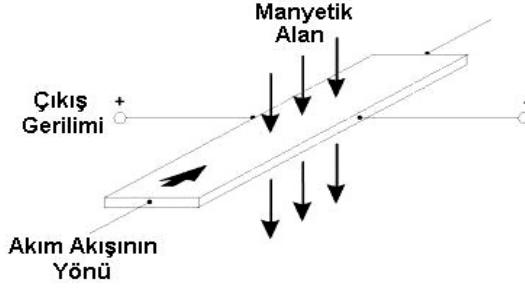
Başka bir yaklaşım, şönt devresinin kontrol devresinin geri kalanından bir *ayırma yükselteci* [*isolation amplifier*] ile galvanik olarak ayrılmasıdır. Bu, opto-kuplör ya da sinyal transformatörü içeren ayırık devreler vasıtasıyla gerçekleştirilebilir. Ancak, bu, akım geri besleme devrelerinin önemli ölçüde karmaşık ve pahalı hale gelmesine neden olur.

Akım şöntleri, sayısal VSD’lerde nadiren kullanılmaktadır. Hall etkili algılayıcılar, çok daha yaygındır.

B.2 Hall-etkili algılayıcının çalışma ilkesi

Hall etkili algılayıcının temel çalışma ilkesi, Şekil B.2’de gösterilmektedir. Yarı-iletken malzemeden geçen akım, akıma dik olan bir düzlemde manyetik bir alan

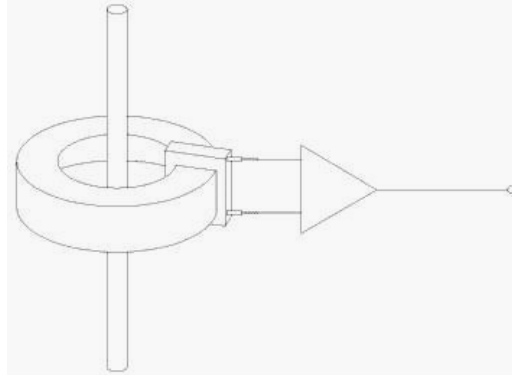
oluşturur, bu alan, hareketli taşıyıcıların iletkenin bir tarafında toplanmasına neden olur. Bu toplanmanın sonucu olarak, hem akıma hem de manyetik alana dik bir *hall gerilimi* oluşacaktır.



Şekil B.2 – Hall-etkili akım algılayıcının çalışma ilkesi

B.2.1 Açık-döngülü hall-etkili algılayıcı

Akım taşıyan bir iletkeni içeren toroidal bir manyetik çekirdeğin hava boşluğuna Hall Etkili yarı-iletken bir entegre devre yerleştirilirse, Hall cihazının çıkış gerilimi, ana iletkendeki akımla orantılıdır. Bu konfigürasyon, aşağıda Şekil B.3'te gösterilmektedir. Böylece, ölçülmekte olan birincil akımdan kendiliğinden ayrılmı ve az sayıda bileşene sahip bir akım ölçme sinyali oluşur. Bu cihaz, ayrıca 10 kHz civarında nispeten büyük bir bant genişliğine sahiptir.



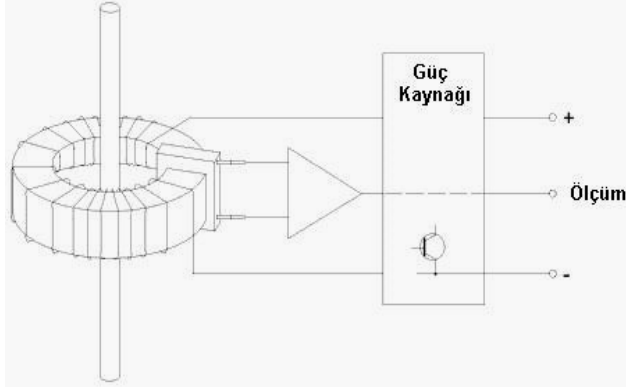
Şekil B.3 – Açık-döngülü Hall-etkili akım algılayıcının çalışma ilkesi

Bu metodun basit olmasına ve imalatının ucuz olmasına rağmen, bu Hall cihazının performansı değişkendir ve her bir çekirdek ve cihaz kombinasyonu dikkatli bir şekilde düzenlenmelidir. Bu, genelde arıza şartlarında maksimum doğruluk sağlanacak şekilde sürücü için gerekli akım kapama noktasında gerçekleştirilir. Normal çalışma akımlarında ölçme hataları mevcut olacak ve sıfır akımda maksimuma çıkacaktır. Uygulamada, genel amaçlı AC Sürücülerde bu büyük bir sorun değildir çünkü akım sinyali temelde akım sınır değeri kontrolü ve güç cihazı koruması için kullanılmaktadır.

Ancak, bu yapısal sorunlardan dolayı, açık-döngülü Hall-Etkili Algılayıcı, daha büyük VSD'lerde yaygın olarak kullanılmaz ancak küçük VSD'lerde oldukça yaygındır.

B.2.2 Kapalı-döngülü hall-etkili algılayıcı

Açık-döngülü algılayıcının doğruluk ve tekrarlanabilirlik sorunlarının üstesinden gelmek için kullanılan bir metot, manyetik çekirdekteki akıyı sıfırlamak için bir geri besleme döngüsünün kullanılmasıdır. Bu, birçok modern VSD'de geniş çapta kullanılan LEM (imalâtçının adı) Hall Etkili akım algılama modüllerinin temel çalışma ilkesidir. Bu cihazın konfigürasyonu, aşağıda Şekil B.4'te gösterilmiştir.



Şekil B.4 – LEM Hall-etkili akım algılayıcının çalışma ilkesi

Kapalı-döngülü modülde, sekonder sargı, primer sargıdan çok daha fazla sayıda tura sahiptir. Çekirdekteki net manyetik alan sıfır olacak şekilde bu sekonder sargıya akım vermek için bir yükselteç kullanılır. Bu noktada, sekonder akım I_S şu şekilde ifade edilir:

$$I_S = I_P \times (\text{Primer tur sayısı}) / (\text{Sekonder tur sayısı})$$

Kapalı-döngülü metodun temel avantajı, geniş bir sinyal aralığında yüksek doğruluk ve tekrarlanabilme özelliği sağlamasıdır. Geniş bant genişliği sağlama konusunda yükselteç performansının iyi olmasına rağmen, bant genişliği halâ iyidir (10 kHz civarındadır). Bu modeller de önemli ölçüde güç kaynağı gereksinimlerine sahiptir çünkü sekonder sargı akımı, yukarıdaki denklemde gösterildiği gibi maksimum primer akım ile tur oranının çarpımına eşittir. Örneğin, 1000:1 tur oranına sahip bir LEM modülü, ölçülen primer akım 100 A ise 100 mA akım çekecektir.

Yüksek akım gereksinimine ilâve olarak, LEM, sekonder sargıda yüksek bir akım değişim hızı elde etmek için genelde 15 V DC civarında DC güç beslemesi gerektirir. Bu yüksek di/dt oranı ayrıca büyük bir bant genişliği elde etmek için de gereklidir.

Doğrulukları, tekrarlanabilme özellikleri mükemmel olduğu ve bant genişlikleri iyi olduğu için, kapalı-döngülü cihazların genelde mükemmel olarak görülmesine rağmen, bu cihazlar, temelde daha büyük sürücülerde kullanılmaktadır. Daha küçük VSD'ler (4 kW'ın altındaki) pahalı oldukları ve güç besleme gereksinimleri yüksek seviyede olduğu için, bu güç seviyesinde yaygın olarak açık-döngülü Hall algılayıcısı kullanılmaktadır.

Ek C Hız Ölçme Transdüserleri

C.1 Analog hız transdüserleri

Takometre Jeneratörü ya da *Tako-jeneratör* (kısaca: *Tako*) genelde bir elektrik motorunun sürücü-olmayan ucuna (NDE) takılan küçük bir elektromanyetik

jeneratördür. Tako-jeneratörler, flanş-monteli [*flange-mounted*], yekpare şaft [*solid-shaft type*] ya da oyuklu-şaft tipindedir [*hollow-shaft type*].

Takolar genelde bağlandıkları motorlara göre küçük boyutlardadır, flanş-monteli tip, aşırı eksenel kuvvetlerden dolayı zarar görebilir. Sonuç olarak, hizalanma sorunlarını ve bakımla ilgili zor takma ve çıkarma işlemlerine ilişkin sorunları önlemek için tako ile motor şaftı arasındaki bağlantıya önem verilmelidir. Hatalı-hizalama, filtrelenmesi zor düşük frekanslı bir dalgacığa da neden olabilir. Yaygın olarak kullanılan "körüklü" tip bağlantı, eksenel kuvvetleri ve titreşimi azaltacak şekilde tasarlanmıştır ancak bu bağlantı tipi, fırçaların ömrünü kısaltır ve az miktarda hizalama hatasına neden olur. Dış manyetik alanlar, tako jeneratörün çıkışını da etkileyebilir.

Oyuklu-şaft tipindeki takolar, flanş-monteli tiplerle karşılaştırıldığında, montajla ilgili birçok zorluğun üstesinden gelebilir. Oyuklu-şaft tipi takoların montajıyla ilgili en yaygın olarak kullanılan iki metot aşağıdadır:

Ayrı rotor ve stator kısımlarına sahip oyuklu-şaft tipi tako

Rotor, döner makinenin NDE ucundaki çubuk-şafta bir kama yatağı ya da sürtünme pres-fit kullanılarak doğrudan monte edilir. Çubuk-şaft çapı tipik olarak 8 mm ilâ 16 mm arasındadır. Stator, makinenin rulman yuvasındaki bir flanşa sabitlenir. Bu oyuklu-şaft tipi takoda rulman yoktur. Ancak, tako rotorunun, tako statoruyla eş merkezli olduğundan emin olunmalıdır. Fırça tutucular ve kablo bağlantıları, stator gövdesine monte edilir.

Rulmanlı iç oyuklu-şaft tipi tako

Bu birimler, döner makinenin NDE ucundaki çubuk-şafta doğrudan montaj için uygundur ve bu birimlerde rulmanlar mevcuttur. Statorun dönmelerini önlemek amacıyla, statoru, makinenin rulman yuvasına kilitlemek için bir montaj desteği kullanılır.

Tako-jeneratörler, aşağıdaki gibi DC ya da AC çıkış sağlayan tiplerde olabilir:

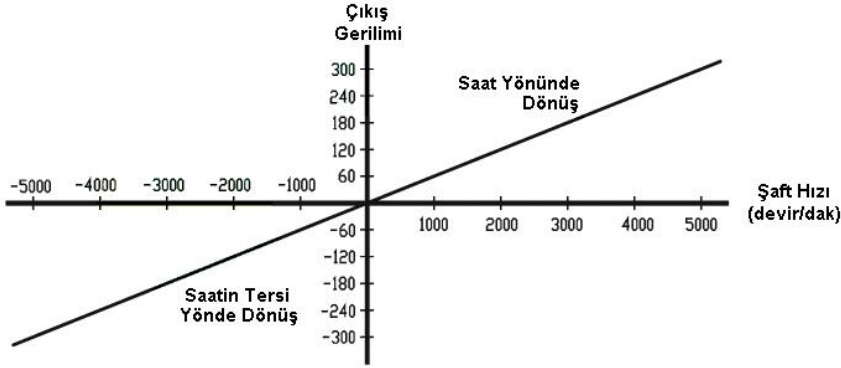
DC tako-jeneratör

Bu, komütatörlü ve fırçalı sargılı rotor armatürüyle sabit mıknatıslı bir statordan oluşan sabit mıknatıslı bir DC jeneratördür. DC takonun çıkışı, büyüklüğü, motorun dönüş hızıyla doğru orantılıdır ve polaritesi, dönüş yönüne bağlı olan bir DC gerilimdir. Genel olarak, saat yönünde dönüş için çıkış gerilimi pozitif ve saatin tersi yönde dönüş için çıkış gerilimi negatiftir.

Kaliteli bir tako-jeneratör, aşağıdaki şartları sağlamalıdır:

- Çıkış gerilimi, her iki yönde de dönüş hızıyla hassas bir şekilde orantılıdır.
- Hem saat yönünde hem de saatin tersi yönünde dönüşlerdeki spesifik hızlar için çıkış gerilimleri arasındaki fark, ihmal edilebilir düzeydedir.
- Çıkış gerilimi, sıcaklığa ve zamana göre kararlıdır.
- Çıkış DC gerilimindeki dalgacık seviyesi düşüktür.
- Dönen kısımların inerşia momenti düşük seviyededir, tako-jeneratör küçüktür.
- Elektriksel ve mekanik yapı yüksek seviyede güvenilirlik sağlayacak şekilde sağlamdır.

- Mahfaza koruma sınıfı, endüstriyel ortama uygundur.
- Bakımı kolaydır.
- En yaygın uygulamalar için yeterli hız aralığını sağlar.



Şekil C.1 – 60 volt/1000 rpm’lik çift-yönlü DC takonun çıkış gerilimi

Değişken hızlı sürücü uygulamaları için kullanıldıklarında tako-jeneratörler genelde maksimum hızı 5000 rpm olacak şekilde 1000 rpm için 60 volt beyan çıkış gerilimine (Hız Sabiti = 0,06 V/rpm) sahiptir. Bu, maksimum 300 volta kadar çıkış gerilimi sağlar. Ancak, spesifik şartlara uygun başka çıkış gerilimleri ve hız aralıkları da mevcuttur. Tako mahfazasının koruma sınıfının, genelde bağlandığı makinenin koruma sınıfıyla aynı olduğu belirtilir (örneğin, IP54, IP55 ya da IP56 gibi).

AC tako-jeneratör

Bu tako-jeneratör DC tako-jeneratöre çok benzerdir, tek fark, çıkışın, büyüklüğü ve frekansı dönme hızıyla doğru orantılı olan alternatif bir AC gerilim olmasıdır. AC gerilim çıkışı, genelde kontrol sistemindeki bir DC gerilime doğrultulur ve dönüştürülür. Sonuç olarak, AC tako-jeneratör, çift-yönlü uygulamalar için uygun değildir çünkü doğrultma işleminden sonraki gerilim büyüklüğü tek kutupludur. Ayrıca, düşük hızdaki gerilim sinyalinde büyük bir dalgalık bileşeninin olması, AC tako-jeneratörün düşük hızlı uygulamalar için uygun olmamasını sağlar.

AC tako-jeneratörler, nadiren değişken hızlı sürücülerle birlikte kullanılmaktadır.

C.2 Sayısal dönme hızı ve konum transdüserleri

Döner sayısal bir enkoder, elektromekanik bir transdüserdir ve dönme hızını ya da konumunu, sayısal bir elektronik darbe serisine dönüştürür.

Döner enkoderler, yaygın olarak aşağıdaki uygulamalarda kullanılır:

- Değişken hızlı sürücü kontrolü için elektrikli motorlardan dönme hızının geri beslenmesi
- Hareketlerin senkron hale getirilmesi için döner makinelerin açısal konumunun belirlenmesi
- Robotların, temizleyicilerin ve diğer otomatik makinelerin konumunun izlenmesi
- Bir konveyördeki ürünlerin konumunun izlenmesi

- Merdaneden beslenen malzemelerin doğru büyüklükte kesilmeleri için uzunluklarının ölçülmesi

İki temel sayısal enkoder tipi aşağıdaki şekildedir:

Artımlı döner enkoder [*Incremental rotary encoder*]

Bu enkoder, şaft döndükçe bir kare gerilim darbe serisi üretir. Darbeleri sayarak ya da enkoder tarafından iletilme hızlarını ölçerek, bir merdaneden beslenen malzemenin açısal konumu, yönü ve dönme hızının belirlenmesi için dış elektronik devrelerin kullanılması gereklidir.

Mutlak döner enkoder [*Absolute rotary encoder*]

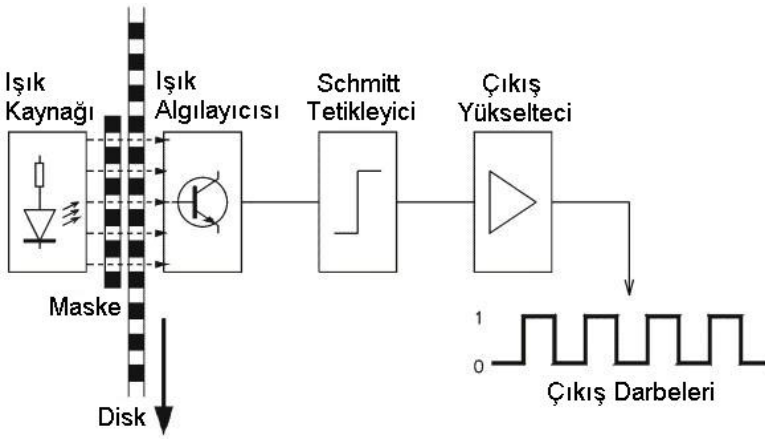
Bu enkoder, şaftın açısal konumunu gösteren ve 4, 8, 12 ya da 16 bitten oluşan paralel bir kod üretir. Gri kod, en yaygın şekilde mutlak enkoderler için kullanılmaktadır, bazen ikili kod ya da BCD kodu da kullanılır.

C.2.1 Artımlı döner enkoder

Artımlı döner enkoder, VSD'ler ve diğer endüstriyel konumlandırma ve senkronizasyon sistemleri için en yaygın şekilde kullanılan enkoderlerdir. Dönme hızını temsil eden gerilim darbe serisi, ışık kaynağından geçen ışığın, dönen şeffaf bir diske işaretlenmiş çizgi örüntüsünden geçerken etkileşmesi sonucu üretilir.

Diskler genelde mekanik şoka karşı yüksek seviyede dayanıklılığa sahip olmaları, hafif ve düşük inersiyalı olmaları için plastikten yapılmaktadır. Bazı imalatçılar, camdan yapılan diskleri kullanmaktadır ancak bu diskler, plastik disklerden daha ağır ve kırılgandır. Diskin dış kenarlarının etrafına radyal bir örüntüde eşit genişlikte (boşluk/genişlik oranı = 1) çizgiler çizilir. 10000 civarında çizgiye sahip enkoderler piyasada mevcuttur.

Bir LED ya da odaklama merceğine sahip minyatür bir lamba tarafından üretilen ışık hüzmesi, dereceli şeffaf bir diskten geçirilir ve diğer taraftaki bir algılayıcı tarafından tespit edilir. Bazı çok düşük hızlı artımlı enkoderler hariç olmak üzere, disk döndükçe ışık hüzmesini tercihe bağlı olarak bloklamak ya da geçirmek için, çizgi örüntüsü diskin üzerindeki çizgi örüntüsüne özdeş olan durağan bir "maskenin" kullanılması gereklidir. Toplam ışık yoğunluğu, bir fotosel (transistör) tarafından algılanır, bu fotosel, ışık hüzmesi geçirildiğinde faal hale gelir, ışık hüzmesi bloklandığında faal olmayan hale gelir. Bu teknik, Moire Fringe ilkesi olarak bilinir.



Şekil C.2 – Artımlı enkoderin çalışma ilkesi

Durağan maske genelde 3 ayrı alana sahiptir, bu alanların her biri, dönen diskle aynı çizgi aralığına sahiptir. Üç fotosel, bu üç maske vasıtasıyla ışığın var olup olmadığını tespit eder ve bilgiyi üç çıkış kanalına aktarır. İlk maske/algılayıcı, Kanal-A içindir. İkinci maske/algılayıcı, Kanal-A'nın 90° arkasında kalan Kanal-B içindir. Üçüncü maske/algılayıcı, her devir için bir tane çıkış darbesi sağlayan referans Kanal-O içindir.

Foto-algılayıcının elektronik çıkışı, sabit büyüklüğe sahip bir çıkış darbe dizisi üretmek için **Schmitt tetikleyici (Schmitt trigger)** tarafından sayısal hale getirilir ve daha sonra sinyal, bir yükseltecten geçer. Büyüklük önemli değildir çünkü alıcı sadece darbe hızıyla ve darbeler arasındaki faz ilişkisiyle ilgilenmektedir.

Artımlı bir enkoderin sayısallaştırılmış darbe çıkış hızı aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

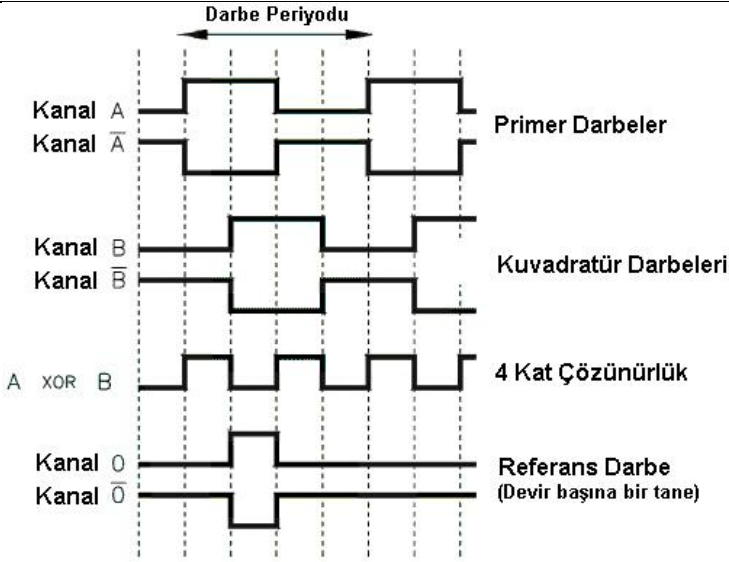
Çözünürlük: Diskin çevresinde çizilen çizgi sayısı

Bu, normalde *devir başına çizgi ya da devir başına darbe (ppr)* olarak belirtilir. Çözünürlük bazen dönen diskin çevresindeki iki ardışık çizgi arasındaki açısal uzunluk olarak da verilir.

Dönme Hızı: Makine shaftının dönme hızı

Dönüş hızını ölçmek için, artımlı döner enkoder, dönen diskin çevresi etrafında sadece bir tane iz çizgisinin olmasını gerektirir ve bu nedenle, mutlak enkoderle karşılaştırıldığında, iç sistem olarak çok daha basittir. Çıkış gerilim dizisi, *Kanal-A* olarak gösterilen bir çıkış kanalından elde edilebilir. Sinyal gürültü bağışıklığı için, genelde tersine çevrilen ilâve bir sinyal (*Kanal-A'nın tümeleri*) mevcuttur (Çıkış Ara Yüzleriyle ilgili olarak Madde C.2.3'e bakılmalıdır). Gerçek hız, hızı ve konumu belirlemek için yukarı/aşağı sayıcıları kullanan dış elektronik cihaz tarafından ölçülür. Dış elektronik cihaz, genelde enkodere güç beslemesi de sağlar.

Yönü ölçmek için, Kanal A'ya göre 90° gecikme açısı farkına sahip benzer bir *Kanal-B'den* gelen ikinci bir darbe dizisi gereklidir. Kanal-B, kuvadratür kanalı olarak da bilinir. Kuvadratür Kanal-B, disk çevresinde aynı çizgi izlerini kullanır ancak 90° kayma değerine sahip ayrı bir maske ızgarası kullanmaktadır. Genelde, tersine çevrilmiş bir Kanal-B sinyali de mevcuttur.



Şekil C.3 – Tipik artımlı döner enkoderin sayısallaştırılmış çıkış darbeleri

Dış elektronik cihazdaki sayaçlar, şaft hızını ve yönünü belirlemek için Kanal-A ile Kanal-B arasındaki ilişkiyi izler. Bu özellik ayrıca çözünürlüğü artırmak için dahili bir Dışarılayıcı YA DA (XOR, Exclusive OR) kapısını kullanarak artımlı değerin dört ile çarpılmasını da sağlar.

Örneğin, çizgi sayısı 10000 olan artımlı bir enkoder, devir başına 40000 adımlık bir çıkış sağlayabilir.

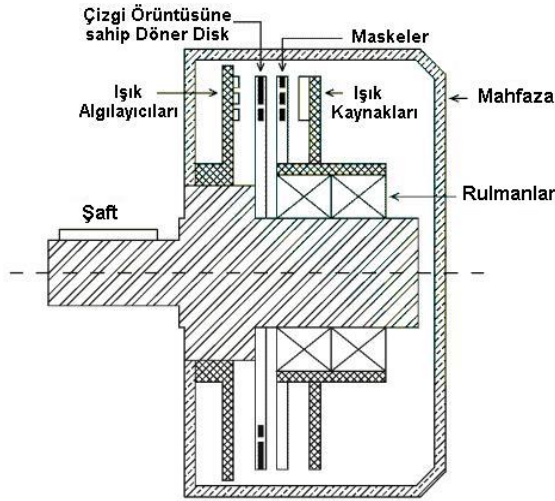
- Kanal-A, Kanal-B'nin 90° önündeyse, dönüşün saat yönünde olduğu,
- Kanal-B, Kanal-A'nın 90° önündeyse, dönüşün saatin tersi yönünde olduğu tespit edilir.

Üçüncü Kanal-O, şaft devri başına bir çıkış darbesi sağlar. Bu sinyal, seri darbe dizisinin, bilinen bir mekanik konumla senkron hale getirilmesi için kullanılabilir. Bu durumda, diskteki Kanal-O darbesinin konumunun, gerekli dış referans noktasıyla mekanik olarak hizalı olmasını sağlamak için özen gösterilmelidir.

Aşağıda, Artımlı Döner Enkoderlere ilişkin yaygın olarak kullanılan Çözünürlük Değerleri (ppr) gösterilmektedir.

2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048
4096	8192	16384	32768	65536	131072	262144	524288	1048576	2097152	4194304

Artımlı döner enkoderdeki bileşenlerin fiziksel düzenlemesi imalatçıya bağlıdır. Tipik yapıya ilişkin kesit alan aşağıda gösterilmektedir.



Şekil C.4 – Tipik artımlı döner enkoderin fiziksel düzenlemesi

C.2.2 Mutlak döner enkoder

Tek-turlu mutlak döner enkoderler, bir devir boyunca şaftın açısal konumunu gösteren paralel bir sayısal çıkış üretmektedir. Her bir açısal konum, çok sayıda sayısal bittten oluşan bir kodla temsil edilir. Döner optik disk, her çıkış kodu biti için bir tane olacak şekilde çok sayıda ize sahiptir. Enerji kesintisi olsa bile, enerji verilmeye başlandığında herhangi bir resetleme programı olmaksızın şaftın konumu doğru bir şekilde bilinmektedir, zaten artımlı enkoderin doğru bir şekilde çalışması için bu durum gereklidir.

Bir devir (360°) belirli sayıda konuma bölünür. Aşağıdaki çizelgede gösterildiği gibi, olası konumların sayısı (*konum çözünürlüğü*) diske çizilen izlerin sayısına bağlıdır.

İz sayısı (Koddaki bit sayısı)	Çözünürlük (Konum Sayısı)	Çözünürlük (Konum başına derece)	Çözünürlük (derece/dakika/saniye)
1	2	180.00°	$180^\circ 00' 00''$
2	4	90.00°	$90^\circ 00' 00''$
3	8	45.00°	$45^\circ 00' 00''$
4	16	22.50°	$22^\circ 30' 00''$
5	32	11.25°	$11^\circ 15' 00''$
6	64	5.63°	$5^\circ 37' 30''$
7	128	2.81°	$2^\circ 48' 45''$
8	256	1.41°	$1^\circ 24' 23''$
10	1,024	0.35°	$0^\circ 21' 06''$
12	4,096	0.088°	$0^\circ 05' 16''$
16	65,536	0.0055°	$0^\circ 00' 20''$

Şekil C.5 – Diskteki iz sayısı ile mutlak döner enkoderin çözünürlüğü arasındaki ilişki

Mutlak döner enkoderler, aşağıdaki kodlardan birini kullanan çıkışlara sahip olabilir:

- İkili Kod
- İkiye Kodlanmış Onlu (BCD) Kodu [*Binary Coded Decimal*]
- Gray Kodu
- Gray Artı Kodu [*Gray Excess Code*]

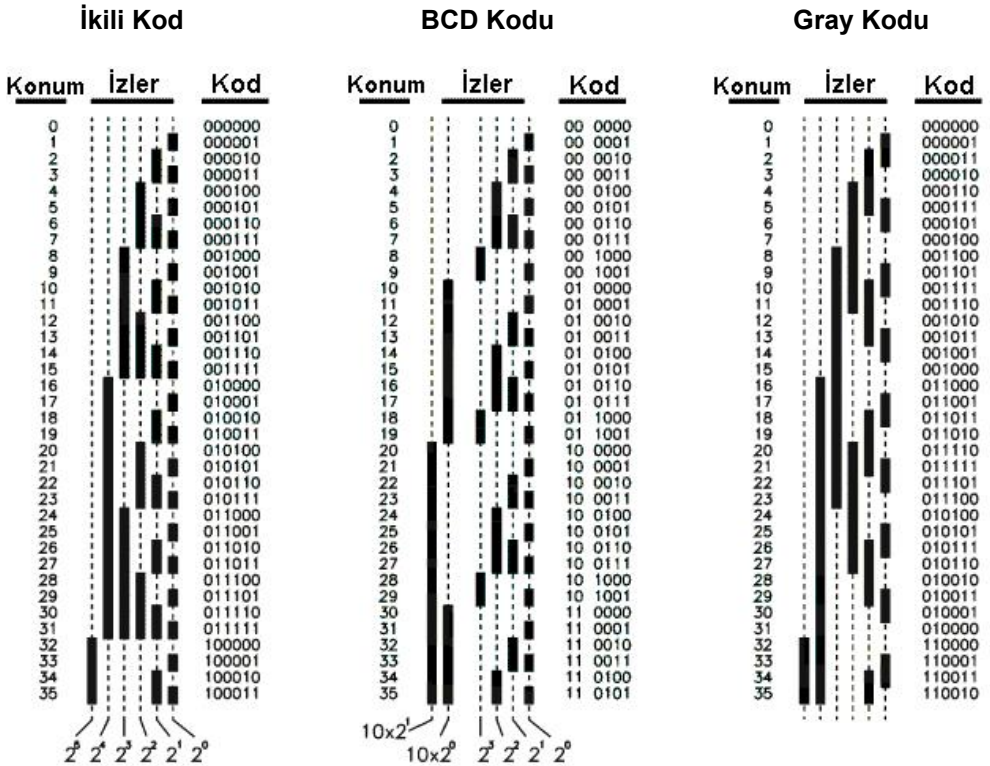
Şekil C.6'da, bir devirde 36 konumluk (10°) çözünürlük için İkili, BCD ve Gray kodlarını kullanan 6 izli mutlak enkoderler için 6-bit kodlu çıkış sinyali gösterilmektedir. Gerekli çözünürlükle uyumlu olması için bu dizi kısaltılabilir ya da genişletilebilir.

İkili Mutlak Enkoder, shaftın konum sayısını göstermek için ikili bir sayıyı (sayma sisteminden 2 tabanına) kullanmaktadır. Bu, bir örnekle en iyi şekilde gösterilir.

Örnek

270° shaft konumunda durağan 8 izli (256 konumlu) tek-turlu ikili mutlak enkoderin paralel 8-bitli çıkış kodu nedir?

8 izli mutlak enkoder, 0 ilâ 255 arasında numaralandırılan 256 (2^8) olası konuma sahiptir.



Şekil C.6 – 36 konumluk çözünürlük için 6-bit İkili Kod, BCD ve Gray kodları

270°'deki konum → Konum-191'dir.

Onlu konum, ikili eş değerine dönüştürülür.

Konum-191 → İkili Konum Kodu = 10111111

Herhangi bir onlu sayıyı (10 tabanında) eş değer ikili sayıya (iki tabanında) dönüştürme prosedürü, kalan değer, sıfıra eşit olana kadar onlu sayıyı sürekli 2'ye bölmektir.

Her bir aşamada kalanlar, ikili sayının münferit bitleridir

$$191/2 = 95 \text{ kalan } 1 \text{ (En Önemsiz Bit ya da LSB)}$$

$$95/2 = 47 \text{ kalan } 1$$

$$47/2 = 23 \text{ kalan } 1$$

$$23/2 = 11 \text{ kalan } 1$$

$$11/2 = 5 \text{ kalan } 1$$

$$5/2 = 2 \text{ kalan } 1$$

$$2/2 = 1 \text{ kalan } 1$$

$$1/2 = 0 \text{ kalan } 1 \text{ (En Önemli Bit ya da MSB)}$$

Kalan değer = 10111111 Bu, 270° için 8-bitli koddur.

İkili konum sayısını, eş değer onlu konum sayısına dönüştürme prosedürü çok daha basittir. İkili sayının her bir biti, aşağıda gösterildiği gibi 2'nin kuvvetlerinin çarpım faktörünü temsil eder:

$$\text{İkili} = 10111111$$

$$\text{Onlu} = 1 \times 2^7 + 0 \times 2^6 + 1 \times 2^5 + 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 191$$

İkili kod, sayısal elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılmasına rağmen, döner enkoderler için temel bir avantaja sahiptir. Şaft konumu, açılmal bir konumdan diğerine geçtiğinde, kodda çok sayıda bitin eş zamanlı olarak durum değiştirmesi gereklidir. Örneğin, Şekil C.6'da, Konum 15 ilâ Konum 16 arasında beş bit durum değiştirir. Farklı izleri okuyan fotosellere ilişkin anahtarlama süreleri arasında küçük farklar varsa, sonuçtaki çıkış kodu, hatalı bir konumu gösterecektir.

BCD (İkiye Kodlanmış Onlu) Kodu, ikili kodun bir uzantısıdır. BCD kodunun *en az önemli olan (LSB) dört biti*, ikili kodu izlerken, BCD kodundaki daha yüksek dereceli bitler aşağıdaki gibi onlu değerleri göstermektedir:

$$\text{Bit 1} : 2^0 \text{ (LSB)}$$

$$\text{Bit 2} : 2^1$$

$$\text{Bit 3} : 2^2$$

$$\text{Bit 4} : 2^3$$

$$\text{Bit 5} : 10 \times 2^0$$

$$\text{Bit 6} : 10 \times 2^1$$

$$\text{Bit 7} : 10 \times 2^2$$

$$\text{Bit 8} : 10 \times 2^3 \text{ (MSB)}$$

Vb.

BCD kodu, 7-segmanlı LED modül grubundaki şaft konumunu göstermek için en uygun koddur. 7-segmanlı LED modülleri genelde onlu formatta düzenlenir, en sağda *birler* sola doğru, *onlar*, *yüzler*, *binler*, vb. basamakları mevcuttur. BCD enkoderleri, ikili enkoderlerle aynı dezavantajlara sahiptir.

Özellikle konum kontrolü için kullanıldığında, mutlak enkoderlerde tercih edilen kod *Gray kodudur*. Gray kodu, İkili ve BCD enkoderlerle ilgili okuma hatalarını önler çünkü iki komşu konum arasında sadece bir bit değişir (Şekil C.6'ya bakılmalıdır). Fotosellerdeki küçük bir yanlış hizalamadan kaynaklanan okuma hatası sadece 1 adıma indirilir.

Ancak, mutlak döner enkoderdeki gerekli çözünürlük (konum sayısı) 2^x -ten ($x = \text{iz sayısı}$) küçük bir değer olduğunda, diskin sıfır konumunda çeşitli bitlerin değiştirilmesi gereklidir ve Gray enkoder, ikili enkoderle aynı dezavantajlara sahip olacaktır.

Gray artı kodu

Poz	İzler	Kod
0		0000
1		0001
2		0011
3		0010
4		0110
5		0111
6		0101
7		0100
8		1100
9		1101
		1111
		1110
		1010
		1011
		1001
		1000

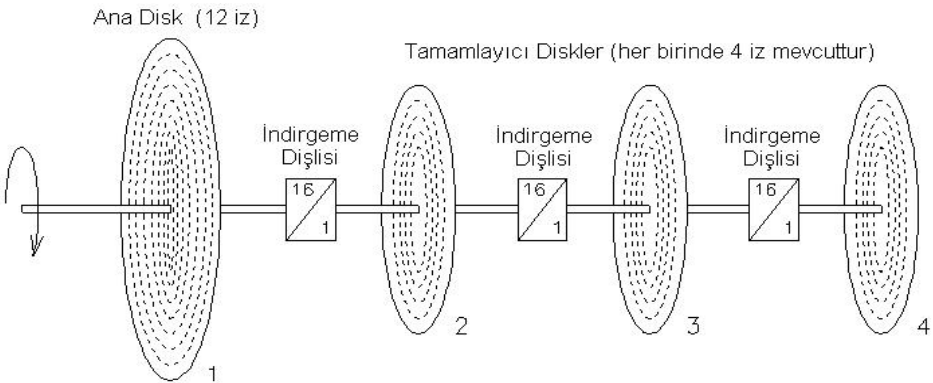
Şekil C.7 – Gray artı koduna ilişkin örnek: 10-artı-3 Gray kodu

Gray Artı Kodu, bu sorunun üstesinden gelmek için geliştirilmiştir ve Gray kodunun sadece *orta* kısmından oluşur. Örneğin, 4 izli mutlak enkoderde, 2^4 lük (16 konum) çözünürlük mümkündür. Devir başına sadece 10 konum gerekli ise, Gray kodu Konum 9'dan sonra yuvarlanır, Şekil C.7'de gösterildiği gibi kodu Konum 0'a döndürmek için üç bitin değiştirilmesi gereklidir. Dönen diskte yer alan örüntüdeki ilk 3 konum ihmal edilir ve sonraki 10 konum kullanılırsa, o zaman diskteki tüm konumlar için sadece 1 bitlik değişiklik sağlanabilir. Bu örneğe ilişkin Gray Artı kodu, o zaman **10-artı-3 Gray kodu** olarak adlandırılır.

Yaygın başka bir örnek, Gray Artı kodunu kullanan mutlak enkoderdir, bu enkoder, devir başına 360 konumluk konum çözünürlüğüne ya da konum başına 1° lik konum çözünürlüğüne sahiptir. Bu durumda, 9-bitli Gray Kodu ($2^9 = 512$) sağlamak için en az 9 izli bir disk gereklidir, bu da, **360-artı-76 Gray kodu** sağlar.

Bazı endüstriyel uygulamalar, BİR devirden büyük açısal konum çözünürlüğü gerektirir. Bu durumlarda, çeşitli devirler arasında ayırım yapmak için **Çok-turlu Mutlak Döner Enkoderlerin** kullanılması gereklidir. Aralarında mekanik indirgeme dişlisi olan dereceli ilâve diskler mevcuttur.

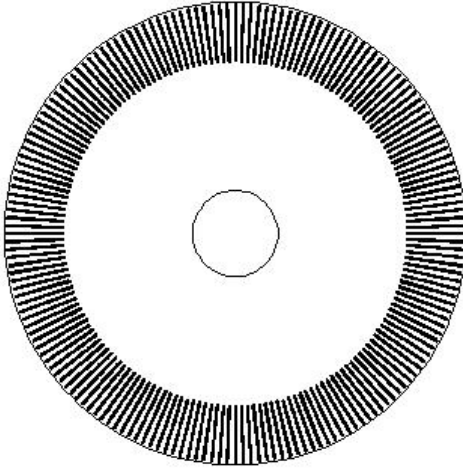
En yaygın çok-turlu mutlak enkoderler, 12 izli ana diskten ($\text{çözünürlük} = 2^{12}$ ya da 4096) ve her biri 4 ize sahip ve dişli oranı 16:1 olan maksimum 3 tamamlayıcı diskten oluşur ve paralel 24 bitli Gray kodunu kullanır.



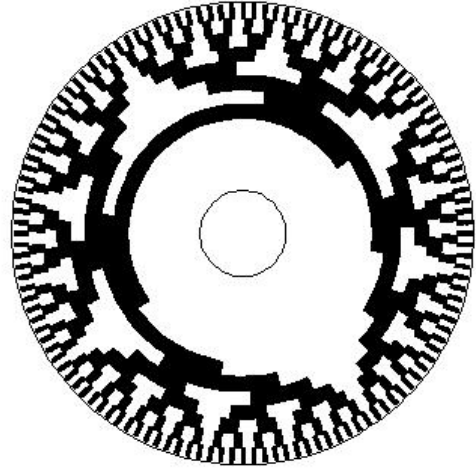
Şekil C.8 – 4 diskten ve dişliden oluşan çok-turlu mutlak enkoder örneği

Bu düzenleme ile, aşağıdaki konum ve tur çözünürlüğü elde edilebilir:

12 izli Ana Disk	2^{12} ’lik Çözünürlük	(4096 konum)
1x4 izli Tamamlayıcı Disk	2^4 ’lük Çözünürlük	(16 devir)
2x4 izli Tamamlayıcı Disk	$2^4 \times 2^4$ ’lük Çözünürlük	(256 devir)
3x4 izli Tamamlayıcı Disk	$2^4 \times 2^4 \times 2^4$ ’lük Çözünürlük	(4096 devir)



180 ppr Artımlı enkoder disk



Mutlak Gray kodlu disk

Şekil C.9 – Artımlı ve mutlak döner enkoderler için disk görüntü örnekleri

C.2.3 Çıkış Ara Yüz Bağlantıları

Çeşitli elektronik devre tiplerini beslemek için, çeşitli çıkış seçeneklerine sahip döner sayısal enkoderler imal edilir. Maksimum çıkış frekansı tipik olarak 100 kHz’dir ancak belirli uygulamalar için bazı birimlerde daha yüksek olabilir.

Bir makinedeki döner sayısal enkoder ile uzaktaki kontrol cihazında bulunan elektronik dekoder arasındaki bağlantı tipi, temelde aralarındaki uzaklık tarafından belirlenir. Seri gerilim düşüşü, şönt kapasitansı ve indüklenen elektriksel gürültü, sinyallerin kalitesini etkiler.

Enkoderler ve dekoderler arasında çeşitli çıkış ara yüz bağlantılarının kurulması mümkündür:

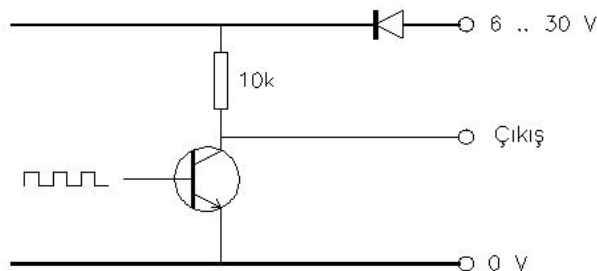
- NPN Akım Alıcı Ara Yüzü (dengeli olmayan-tek telli) temelde PLC sayıcılar gibi kontrol cihazlarına giriş sağlamak için kullanılır.
- PNP Akım Kaynağı Ara Yüzü (dengeli olmayan-tek telli) temelde PLC sayıcılar gibi kontrol cihazlarına giriş sağlamak için kullanılır.
- İtmeli-Çekmeli [*Push-Pull*] – NPN ya da PNP Ara Yüzü, temelde PLC sayıcılar gibi kontrol cihazlarına giriş sağlamak için kullanılır.
- Hat Sürücü Ara Yüzü (dengeli diferansiyel – iki telli EIA-422) temelde sayısal enkoderlerden Değişken Hızlı Sürücü Kontrolörlere hız geri beslemesi sağlamak için kullanılır.

Enkoder ile elektronik dekoder arasındaki mesafenin yaklaşık olarak 10 m’ye kadar olduğu ve dışarıda indüklenen gürültünün büyük bir sorun teşkil etmediği durumlarda, basit bir enkoder hat sürücü yeterli sonuçları sağlayacaktır. Bu

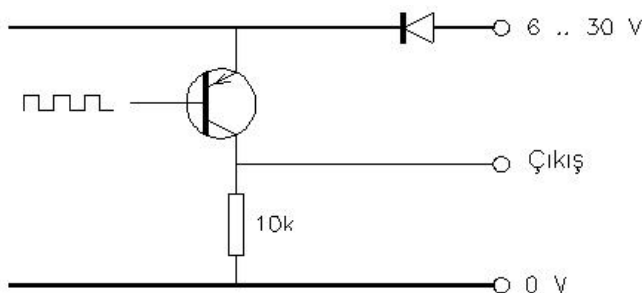
durumlarda, her bir kanal için dengeli-olmayan (tek telli) bağlantı yeterlidir. Enkodere ilişkin güç, normalde dekode ucundan sağlanır ve çıkış, dengeli olmayan bir konfigürasyonda bağlanır.

Gerilim ve akım seviyeleri, dekode tipine bağlıdır, bu, 5 V (TTL-standardı) 12 V ya da 24 V olabilir. Genelde PLC'lerde 12 V ve 24 V kullanılır.

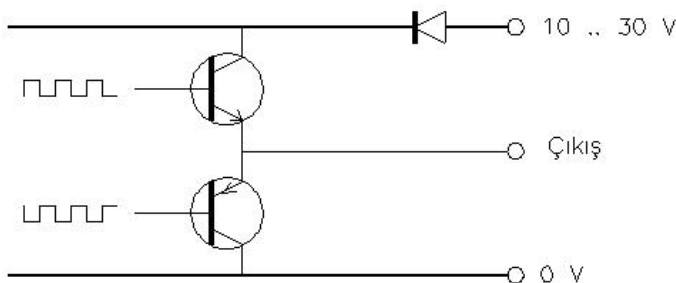
Tipik devre konfigürasyonları aşağıdaki şekildedir:



Şekil C.10 - + volt besleme hattına çıkaran yükseltici dirence sahip ve 0 volt hattına anahtarlama yapan NPN Akım Alıcı Ara Yüz (dengeli olmayan – tek telli)



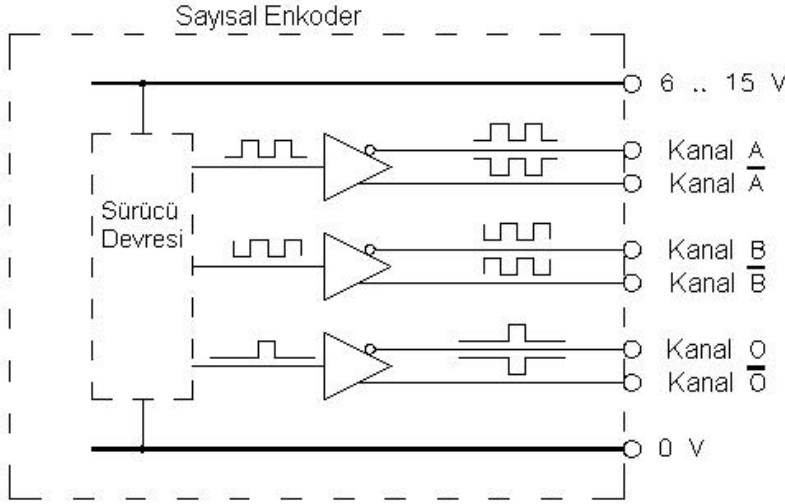
Şekil C.11 - 0 volt hattına indiren indirici dirence sahip ve + volt hattına anahtarlama yapabilen PNP Akım Kaynağı Ara Yüz (dengeli olmayan – tek telli)



Şekil C.12 – İtmeli-çekmeli dengeli olmayan hat sürücü kullanılabilir.

Enkoder ve elektronik dekode arasındaki ± 100 m'ye kadar olan daha uzun mesafeler için ve dışarıda indüklenen gürültünün daha büyük sorunlara neden olduğu durumlarda, kabul edilebilir güvenilirlik sağlamak için dengeli diferansiyel bir hat sürücünün kullanılması gereklidir. Bu, döner enkoderlerde en yaygın olarak kullanılan devredir. Bu durumlarda, tüm kanallar için iyi-bilinen EIA-422 (RS-422)

Ara Yüz Standardını esas alan iki-telli bir ara yüz (kanal başına) yaygın olarak kullanılmaktadır. Her bir kanal, iki gerilim üretir, bunlar, sinyal gerilimleri (A, B & O) ve bunların tümleyenleridir (A, B & O). Enkodere ilişkin güç, genelde dekoder ucundan verilir. Bu bağlantı tipi için, yansımaları önlemek amacıyla dekoder ucunda sonlandırma dirençlerinin bulunması gereklidir.



Şekil C.13 – Uzak güç kaynağına bağlanmış EIA-422 dengeli diferansiyel hat sürücüsü

Enkoder ile elektronik dekoder arasındaki ± 1000 m'ye kadar olan daha bile uzun mesafeler için ve dışarıda oluşan gürültünün ve güç kaynağı gerilim düşüşünün sorun yarattığı durumda, kabul edilebilir seviyede güvenlik sağlamak için lokal güç kaynağına sahip dengeli diferansiyel bir hat sürücünün (EIA-422) kullanılması gereklidir. Bu durumda, yansımaları önlemek için dekoder ucunda sonlandırma dirençlerinin kullanılması gereklidir.

Modern mutlak enkoderlerde, bağlantı tellerinin sayısını azaltmak ve yüksek elektriksel gürültü seviyesine sahip bölgelerde performansı artırmak amacıyla, genelde 2 ya da 4 tel üzerinden senkron haberleşme kullanılarak paralel kodu (maksimum 24 bit) iletim için eş değer seri veri koduna dönüştürmek için ilâve iç elektronik kullanılır.

Ek D Uluslararası Standartlar

D.1 Giriş

Uluslararası ticaretin varlığı ve ihracat ve ithal edilen ürünlerin kabul edilebilir oluşu, uluslararası olarak kabul edilebilen standartların ve normların varlığına bağlıdır. Bu ekte, Dönen Elektrik Makinelerine ve Değişken Hızlı Sürücülere uygulanabilen çeşitli Uluslararası ve Ulusal Standartlar özetlenmektedir.

D.2 Uluslararası Standartlar

Standardizasyon, dünyadaki tüm ülkelerden üyeleri olan ISO – *Uluslararası Standartlar Organizasyonu* tarafından uluslararası olarak koordine edilir. ISO,

standartların uluslar arası olarak koordine edilmesine yoğunlaşmaktadır. ISO, çeşitli konuları kapsayan neredeyse 9000 standart yayınlamıştır. Uluslararası ticareti kolaylaştırmak için, birçok ülke kendi standartlarını Uluslararası Standartlarla uyumlaştırma yoluna gitmektedir. Standardizasyon, genelde ulusal standart organizasyonları, ilgili akademik birimler, bilim adamları ve imalatçılar gibi birimlerin katılımı ile sağlanır.

Standartlar konusunda uluslar arası olarak fikir birliğine varmak zorlu bir süreçtir ve aşağıdaki birimler vasıtasıyla koordine edilir:

- TC:** Teknik Komiteler
- SC:** Teknik Alt-Komiteler
- WG:** Çalışma Grupları

Elektroteknik hususların standardizasyonu, *Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC)* tarafından uluslararası olarak koordine edilir. ISO'ya benzer şekilde, standardizasyon, genelde ulusal standart organizasyonları, ilgili akademik birimler, bilim adamları ve imalatçılar gibi ilgili tarafların katılımı ve çoğunluğun sağlanması ile gerçekleştirilir.

ISO'da olduğu gibi, aşağıdaki birimler vasıtasıyla koordine edilir:

- TC:** Teknik Komiteler
- SC:** Teknik Alt-Komiteler
- WG:** Çalışma Grupları

D.3 Avrupa Standartları

Tüm Avrupa ülkeleri, kendi ulusal standartlarını geliştirmiştir. 1945'ten beri, Avrupa'daki büyük ülkeler, aktif olarak ortak bir pazar için çalışmaktadır ve bu periyotta, Avrupa ülkeleri arasındaki ticarete büyük gelişmeler olmuştur. Başlangıçta bu ortak pazar, Avrupa Ekonomik Topluluğu (EEC), daha sonra Avrupa Topluluğu (EC) ve yakın zamanda Avrupa Birliği (EU) olarak adlandırılmıştır. Avrupa ülkelerinde üretilen ürünler arasındaki teknik farkların üstesinden gelmek amacıyla, standartları uyumlaştırmak için çeşitli komiteler oluşturulmuştur. Bazı durumlarda, Avrupa Normları (EN) olarak bilinen yeni standartlar geliştirilmiştir.

Avrupa'daki standardizasyonu koordine etmek için aşağıdaki komiteler oluşturulmuştur:

- CEN:** Comité European de Normalization
(Avrupa Standardizasyon Komitesi)
- CENELEC:** Comité European de Normalization - Electrotechnique
(Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi)
- CCITT:** Comité Consultatif International Telegraphique et
Telephonique
(Uluslararası Telefon ve Telgraf Danışma Komitesi)
- ECISS:** Demir ve Çelik Standartları için Avrupa Komitesi

Avrupa'nın ekonomik gücünden dolayı, bu "Normlar" Avrupa'da yer almayan ve Avrupa ülkeleriyle ticaret yapmak isteyen ülkeler için de önemlidir. Bu EN'lerin çoğu, fiili uluslar arası standartlar haline gelecek ya da ISO ya da IEC standartlarına eklenecektir.

D.4 Amerikan Standartları

Ekonomik ve askeri açıdan bakıldığında, Amerika son 50 yılın en güçlü ve en etkili ülkesi olmuştur. Dev ekonomisi ve kaliteli teknik uzmanları, Amerika'nın teknik kapasite açısından çok yüksek bir seviyeye çıkmasını sağlamıştır. Fiili uluslar arası standart haline gelmiş birçok iyi-bilinen standart, Amerika'da geliştirilmiştir. Birçok elektrik mühendisi, Amerikan standartlarıyla aşinadır. Bu standartlar, ANSI, FCC, IEEE, NEMA, MIL, EIA/TIA ve UL gibi kurumlar tarafından geliştirilmiştir. Bunların çoğu, ISO ve IEC standartlarına resmi olarak eklenmiştir. Ayrıca, Amerika'daki büyük savunma sanayisinden dolayı, zorlayıcı ortamlar için çok sayıda askeri (MIL) standart geliştirilmiştir. Bu standartlar, askeri-olmayan standartlara göre çok daha sıkı kurallara sahiptir.

Bu ekonomik ve teknik güce rağmen, Amerika'daki standardizasyon, dünyanın geri kalanına göre geri kalmıştır. Bu, temelde Amerika'da kullanılan ölçüm birimlerinin sonucudur. Batı Avrupa, Doğu Avrupa, Japonya, Kanada, Avustralya & Yeni Zelanda, Afrika, Güney Amerika, Çin, Tayvan ve hızla gelişen güney doğu Asya Ülkeleri gibi Amerika dışındaki birçok ülke, Metrik Ölçüm Sistemini kullanmakta ve standartlarını ISO ve IEC'ye göre uyumlaştırmaya çalışmaktadır. Diğer taraftan, Amerika, sadece kısmi olarak metrik sistemi kullanmakta, büyük ölçüde eski İngiliz ölçüm sistemini (feet, inch, pound, gallon, vb.) kullanmaktadır. Genel olarak, Amerika, standartlarını ISO ve IEC standartlarıyla uyumlaştırmaya karşı isteksizdir. Bu durum, uluslar arası serbest ticarete zorluk oluşturmaktadır.

D.5 Diğer Ulusal Standartlar

Tüm endüstrileşmiş ülkeler, ulusal standartları hazırlayan ve koordine eden kendi ulusal standart enstitülerine sahiptir. Bu standart enstitüleri genelde ISO ve IEC üyesidir.

Uluslararası ticareti kolaylaştırmak için, Ulusal Standartlar, ilgili ISO ve IEC Standartlarıyla "uyumlu hale getirilmektedir". Buna rağmen ulusal ve uluslararası standartlar arasında fark varsa, bu farklar, genellikle bazı özel lokal şartlar ve lokal uygulamalarla ilgilidir.

Daha büyük endüstrileşmiş ülkelerin Ulusal Standart kurumları, Şekil D.1'de gösterilen çizelgede listelenmiştir.

D.6 Güney Afrika Standartları

Diğer ülkelerle uyumlu hale gelebilmek için, SA standartlar enstitüsü, uygun olmaları şartıyla mümkün olan her yerde uluslar arası standartları kullanmayı hedeflemiştir. Bu durumda, kendi standartlarını hazırlamak yerine, ISO, IEC ve CENELEC gibi diğer kurumların çıkardığı standartları incelemek ve bu standartların sürekli olarak incelenmesi ve güncellenmesini sağlamak temel hedef haline gelmiştir.

Bu kitapta kapsanan teknik hususlara uygulanabilen standartlar, *Kaynaklar & Önerilen Diğer Yardımcı Kaynaklar* bölümünün "Standartlar" kısmında listelenmiştir.

Ülke	Kısaltma	Standart kurumunun ismi
------	----------	-------------------------

Avustralya	AS	Avustralya Standartları
Belçika	IBN	Institut Belge de Normalization
Kanada	CSA	Canadian Standards Association
CIS (eski USSR)	GOST	Gosudarstvenne Komitet Standartov
Danimarka	DS DEMKO	Dansk Standardiseringsraad Danmarks Elektrise Material Kontrol
Avrupa	CEN CENELEC CCITT	Avrupa Standardizasyon Komitesi Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi Uluslararası Telefon ve Telgraf Danışma Komitesi
Finlandiya	SFS	Suomen Finland Standardisoimisliitto
Fransa	AFNOR UTE	Association Française de Normalization Union Technique de l'Electricité
Almanya	DIN VDE	Deutsches Institut für Normierung Verband Deutscher Elektrotechniker
Uluslar arası	IEC ISO ITU	Uluslar arası Elektroteknik Komisyonu Uluslar arası Standartlar Organizasyonu Uluslar arası Telekomünikasyon Birliği
İtalya	CEI	Comitato Electrotechnico Italiano
Japonya	JIS	Japanese Industrial Standard
Netherlands	NNI	Nederlands Normalisatie Instituut
Türkiye	TSE	Türkiye Standartlar Enstitüsü
Norveç	NSF DNV	Norges Standardiseringsforbund Det Norsk Veritas
Polonya	PRS	Polish Register of Ships
Suudi Arabistan	SASO	Saudi Arabian Standards Association
Güney Afrika	SABS	South African Bureau of Standards
İspanya	UNE	Una Norma Española
Sweden	SIS	Standardiseringskommissionen i Sverige
Switzerland	SEV	Schweizerischer Electrotechnischer Verein
United Kingdom	BSI	İngiliz Standartları Enstitüsü
Amerika	ANSI FCC IEEE NEMA UL	Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü Federal Haberleşme Komisyonu Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü Ulusal Elektrik İmalâtçıları Birliği Underwriters Laboratuvarları

EK E AC Kafesli Motorların Veriminin ve Kayıplarının Belirlenmesi

Bu bölümde, belirli bir yükte motor veriminin hesaplanması ve AC kafesli motorlardaki kayıpların belirlenmesi için kullanılan metot açıklanmaktadır. AC motorların yük deneylerinin gerçekleştirilmesi için yaygın olarak kullanılan dinamometrelerin özellikleri ve çalışma ilkeleri de açıklanmaktadır.

E.1 Giriş

Dönen AC makinelerin çeşitli yüklerdeki veriminin hesaplanması ve kayıplar, uygulamada önemli bir yere sahiptir. Özellikle, gerçek yükleme ile sincap kafesli AC motorların veriminin belirlenmesi için gerçekleştirilen deneyler, birçok araştırmanın ve standardın temel konusu olmuştur. Bunun nedeni, AC kafes motorun, her türlü endüstrideki elektriksel yükün büyük bir kısmını oluşturmalarıdır. Genelde, motorun verimi ve kayıp değerleri, imalatçı ile alıcı arasındaki spesifik performans garantisine tâbidir ve bu değerlerin doğru belirlenmesi önemlidir. Bu gibi garantiler mevcut olmasa bile, kayıplar, faydalı elektrik enerjisinin sürekli olarak boşa harcandığı gösterir ve bu nedenle, bir motorun verimiyle ilgili bilgiler önemlidir. Makinenin kayıpları ve verimi hakkında doğru bilgilere sahip olunması, yüksek verime sahip daha iyi motor tasarımları sağlayabilir ve böylece çalışma maliyeti de daha düşük olacaktır. Birçok motor, genelde motor seçimine ilişkin çeşitli faktörlerden dolayı gerçek uygulamada kısmî yük şartları altında çalışır. Geleneksel tasarımlar, kısmî yükte çalışma durumunda daha düşük verime sahiptir ve bu nedenle, bu konudaki gelişmelerle ilgili geniş bir kapsam mevcuttur.

Bu bölümde, Avustralya standardı AS/NZS 1359.102.3:2000'e spesifik olarak atıf yapılarak motorların yük deneylerine ilişkin temel ilkeler açıklanmaktadır. 1359 standardı, dönen elektrikli makineler konusunu içermektedir, bu standarttaki Bölüm 102.3'te ise, üç-fazlı kafes indüksiyon motorlarının veriminin ve kayıplarının belirlenmesi ile ilgili metotlar ele alınmaktadır. Bu standardın temel referansı, Uluslar arası Elektroteknik Komisyonu (IEC) tarafından yayınlanan şu standartlardır:

IEC 60034-1:1996	Dönen Elektrikli Makineler – Bölüm 1 – Beyan değerleri ve performans
IEC 60034-2:1972	Dönen Elektrikli Makineler – Bölüm 2 – Deneylerden kayıpların ve verimin belirlenmesi için kullanılan metotlar

Standart, deneylerin gerçekleştirilmesi için iki metot önermektedir:

- Metot:1 Tork ölçümü ile
- Metot:2 Tork ölçümü olmaksızın

Ancak, deneylerin gerçekleştirilmesi için kullanılan gerçek prosedür, referans IEC dokümanlarına dayandırılır ve yukarıdaki standartta ayrıntılarıyla verilmez. Kafes motorda yer alan farklı kayıp bileşenlerine ve verime ulaşmada kullanılan teorik ilkeler açıklanmaktadır. Deneyler, motorun gerçek yüklemeye (beyan değerinin % 150'sine kadar yüklenir) tâbi tutulmasını kapsamaktadır. Makinelerin yüklenmesi, yük miktarını deney şartlarına göre değiştirebilme imkânına sahip spesifik bir

cihazın kullanılmasını gerektirir. Bu, dinamometrelerin kullanılması sayesinde gerçekleştirilir. Bu bölümde, önemli bir deney cihazı olan dinamometreyle ilgili ayrıntılı bilgiler verilecek ve piyasada bulunan farklı dinamometre tipleri kısaca belirtilecektir.

E.2 Kayıplar ve verim

Simgeler ve terimler

Bu deneyler sırasında ölçülen çeşitli parametreler için kullanılan simgeler, aşağıda Çizelge E.1'de belirtilmektedir (referans standarda dayandırılmıştır).

Çizelge E.1
Terimler ve simgeler (Referans: AS/NZS 1359.102.3:2000)

Simge	Parametre
$\cos \phi$	Güç faktörü
f	Kaynak frekansı
$(I^2R)_d$	Dinamometre deneyi sırasındaki sargı kayıpları
$(I^2R)_0$	Yüksüz durumdaki stator sargı kayıpları
$(I^2R)_s$	Stator sargı kaybı
$(I^2R)_r$	Rotor sargı kaybı
I	Hat akımı
I_N	Beyan yükteki hat akımı
I_0	Yüksüz durumdaki hat akımı
I_X	Kısmî yük durumundaki hat akımı
K_d	Dinamometre tork düzeltmesi
n	Çalışma Hızı (devir/dak)
P	Kutup çifti sayısı
P_1	Giriş gücü
P_2	Çıkış gücü
P_{FE}	Çekirdek kaybı
P_f	Sürtünme ve rüzgar kaybı (toplam)
P_k	Sabit kayıplar
P_L	İlave yük kayıpları (işlenmemiş veri)
P_{LL}	İlave yük kayıpları (regresyondan sonra)
$P_{\%LL}$	P_1 'in %'si olarak ilave yük kayıpları

Simge	Parametre
P_{LL}	Kısmî yük durumundaki ilâve yük kayıpları
P_0	Yüksüz durumdaki giriş gücü (yüksüz durum kayıplarını temsil etmektedir)
P_{d0}	Dinamometre bağlanmış şekilde yüksüz durumdaki giriş gücü
R	Hattan-hata stator direnci
R_a	θ_a çevre sıcaklığındaki hattan-hata stator direnci
R_N	Beyan yükteki hattan-hata stator direnci
R_0	Yüksüz durumdaki hattan-hata stator direnci
R_S	Çevre sıcaklığına göre düzeltilmiş hattan-hata stator direnci
S	Senkron hız birimi başına kayma değeri
s_{d0}	Dinamometre deneyi sırasındaki kayma değeri
T	Tork
T_d	Tork ölçme cihazının okuduğu değer
T_{d0}	Dinamometre bağlanmış şekilde yüksüz durumda okunan tork değeri
U	Terminal gerilimi
U_0	Yüksüz durumdaki terminal gerilimi
U_N	Beyan gerilim
U_r	Stator sargısındaki gerilim düşüşünü hesaba katmak için hesaplamalarda kullanılan indirgenmiş gerilim
η	Verim
θ	Stator sargı sıcaklığı
θ_a	Çevre sıcaklığı
θ_N	Beyan yükteki stator sargı sıcaklığı

Temel ilkeler

Özellikle hareketli bileşenlere sahip dönen makineler olmak üzere, tüm elektrikli makinelerde kayıp meydana gelir. Kayıp, makineye giren elektrik gücü ile motor shaftındaki mekanik güç çıkışı (genelde giriş gücüyle aynı şekilde kilowatt cinsinden ifade edilir) arasındaki farktır. Burada önemli olan, örneğin watt saniye ya da kilowatt-saat cinsinden ifade edilen kaybedilen enerji miktarıdır çünkü kayıp sonuçta, harcanan elektrik enerjisi ya da maddi değeri olan eş değer yakıt tüketimidir. Ancak, gerçek uygulamada, kayıp, sabit bir değer değildir ve makinenin çıkışına ya da yüküne bağlı olarak değişir. Bu nedenle, kaybın enerji cinsinden ifade edilmesi yerine, enerjinin anlık gösterimi cinsinden (başka bir deyişle, güç cinsinden) ifade edilmesi yaygın hale gelmiştir.

Bir motorun verimi, belirli bir yük değerinde, çıkış gücünün giriş gücüne oranıdır ve aşağıdaki formülle gösterilebilir:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (\text{Denklem:1})$$

P_1

Burada

η , verimdir (birim değer başına)

P_1 giriş gücüdür ve

P_2 çıkış (mekanik) şaft gücüdür.

Bir motorun veriminin doğrudan mekanik çıkış (eş değer elektriksel birimler cinsinden) ve elektrik girişi ölçülerek belirlenebilmesine rağmen, sonuçlar, ölçme doğruluğundan büyük ölçüde etkilenir. Bu nedenle, IEC standardı 60034-2, verimleri % 90'dan daha düşük olan makineler için bu metodun kullanılmasını önerir. Özellikle daha yüksek kapasiteleri içeren diğer tüm durumlar için, verim, kayıpların ölçülmesi esas alınarak hesaplanmalıdır.

$P_1 = P_2 + \text{kayıplar}$ olduğu için,
verim, şu şekilde de ifade edilebilir:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \text{Kayıplar}} \quad (\text{Denklem:2})$$

Ya da

$$\eta = \frac{P_1 - \text{Kayıplar}}{P_1} \quad (\text{Denklem:3})$$

Mekanik çıkışın doğrudan ölçülmesinin mümkün olmadığı durumlarda Denklem:3'ün kullanılması faydalıdır.

Kayıp tipleri

Elektrikli bir makinedeki kayıplar genelde iki tiptedir, bunlar sabit kayıplar ve değişken kayıplardır. Sabit kayıplar tüm yük şartları altında sabittir (belirli bir hız, gerilim, frekans ve diğer çevre şartları için) değişken kayıplar ise, makinedeki yüke bağlıdır. Dönen bir makine söz konusu olduğunda, sabit kayıplar şunlardır:

- Makinenin manyetik çekirdeğindeki kayıplar. Bu kayıplar genelde çekirdek kayıpları (bazen de demir kayıpları) olarak adlandırılır ve yüksüz durumda stator sargısının dönen manyetik alanı tarafından çekirdek malzemesinde indüklenen burgaç akımının akışından ve manyetik malzemedeki histerezden kaynaklanmaktadır.

Not:

- Histerez kaybı, manyetik devrenin düşük histerezli malzemelerden yapılmasıyla ve burgaç akım kaybı, her bir ince manyetik levhası, yanındaki levhadan, iletken olmayan vernik [varnish] kaplama ile yalıtılmış bir çekirdeğin kullanılmasıyla azaltılabilir. Bu yapı, burgaç akımlarının akacağı alanı kısıtlayarak burgaç akım devresinin direncini artırır ve böylece burgaç akımlarının değerini ve bu akımlardan kaynaklanan kayıpları azaltır. Yük akımının aktif malzemeler ve diğer manyetik kısımlar üzerinde indüklediği burgaç akımlarından kaynaklanan kayıpların, sabit kaybın parçası olmadığını unutmayın.*

- b) Çekirdek kayıpları temelde manyetik akıya (besleme gerilimine) ve giriş güç kaynağının frekansına bağlıdır ve sadece belirtilen şartlar için geçerlidir. Örneğin, histerez kaybı aşağıdaki denklemlerle verilir:

$$\text{Histerez kaybı} = K_h \cdot f \cdot B_{en \text{ büyük}}^n$$

Burada

$B_{en \text{ büyük}}$ maksimum akı yoğunluğudur.

f frekanstır.

n 1,5 ilâ 2,5 (genelde 2 olduğu varsayılır) arasındadır.

K_h sabittir.

Benzer şekilde

$$\text{Burgaç Akım kaybı} = K_e \cdot (B \cdot f \cdot \tau)^2$$

Burada

$B_{en \text{ büyük}}$ maksimum akı yoğunluğu

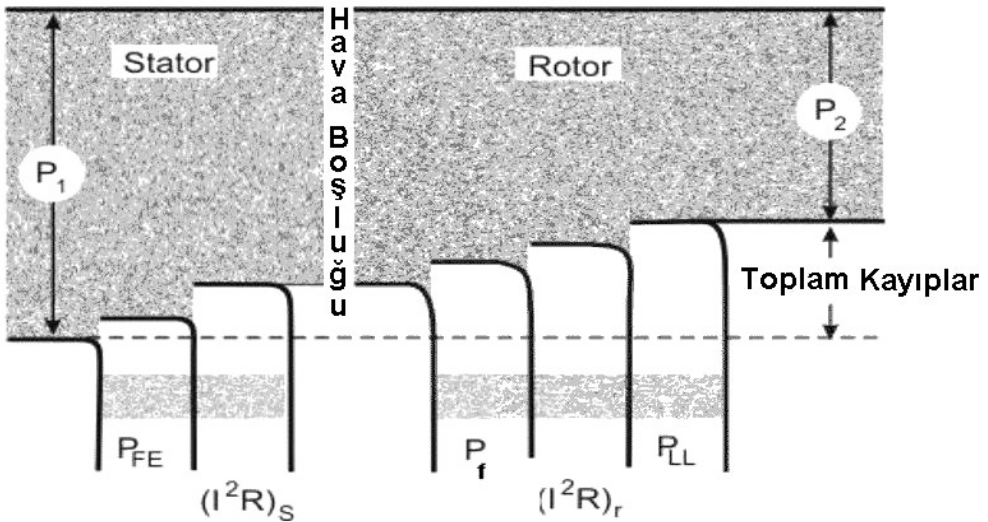
f frekanstır.

τ levhanın kalınlığıdır.

K_e sabittir.

Bu nedenle, bu kayıpların beyan gerilim ve frekans şartlarında ölçülmesi ve bu şartların, düzenlenmiş gerilim ve frekansla ayrı bir test kaynağı kullanılarak elde edilmesi gereklidir.

- Dönmeden kaynaklanan sürtünme kayıpları (rulmanlardaki ve mekanik kontak noktalarındaki)
- Dönen kısımlarda havanın etkisinden dolayı oluşan rüzgar kayıpları. Hesaba katılmayan diğer kayıplara ilâve olarak, rotora monte edilen fanlar da enerji absorbe eder. Genel olarak, tamamen kapalı motorlar, stator ve rotordaki hava yollarından soğutucu havanın dolaşması için bir iç fana ve motorun dış kısmındaki soğutma yüzgeçlerinden hava geçiren bir dış fana sahiptir.



Şekil E.1 – Kayıpların dağılımı (Referans: AS/NZS 1359.102.3:2000)

Değişken kayıp, sargılardaki ve diğer iletken kısımlardaki bakır kaybıdır (ya da I^2R kaybı ya da yük kaybıdır) ve genelde bu kayıp değerinin aşağıdakilerden oluştuğu belirtilir:

- Stator bakır kaybı (burada stator sargı kaybı olarak adlandırılır)
- Rotor bakır kaybı (burada rotor sargı kaybı olarak adlandırılır) ve
- Motorun diğer metal kısımlarında indüklenen akımlardan dolayı kaçak yük kaybı (ya da ilâve yük kaybı) oluşur, bunun nedeni, motor sargılarından geçen yük akımıdır.

Bunlardan, demir kaybı ve stator sargı kaybının statorda meydana geldiği, gücün geri kalanının motorun hava boşluğundan geçtiği varsayılmaktadır. Rotorda gerçekleşen kayıplar, rotor sargı kaybı, sürtünme kaybı ve ilâve yük kaybıdır, denge gücü, motor shaftında mekanik çıkış şeklinde mevcuttur. Şekil E.1'de bu işlem gösterilmektedir.

Kayıpların ve verimin hesaplanmasına ve ölçülmesine ilişkin deneyler

Çeşitli kayıp tiplerinin ölçülmesi, belirlenmesi ve verimin hesaplanması için gerçekleştirilmesi gereken deney dizisine ilişkin şartlar, AS/NZS.1359.102.3:2000 standardında aşağıdaki gibi belirtilmiştir.

- Beyan yük termal deneyi
- Yük deneyi
- Yüksüz-durum deneyi

Bu deneyler esas alınarak farklı kayıp kategorileri belirlenebilir ve böylece, farklı yüklerdeki verim hesaplanır. Yük deneyi, torkun ölçümünü kapsayabilir (Metot 1) ya da sadece elektriksel ölçümlere dayandırılabilir (Metot 2). İlk metotta, hem yük kaybının hem de ilâve yük kaybının hesaplanması mümkündür, ikinci metotta, ilâve yük kaybına belirli bir değer atanmaktadır.

Gerçekleştirilen deneylerin ayrıntıları, aşağıdaki paragraflarda belirtilmektedir. Ancak şunların özellikle belirtilmesi gereklidir.

- Aksi belirtilmedikçe, farklı fazlar arasında ölçülen hat akımlarının, hat gerilimlerinin ve hattan-hata dirençlerin aritmetik ortalamalarının kullanılması gereklidir.
- Deney sırası, belirtildiği gibi olmalıdır. Deneyler arasında herhangi bir gecikme varsa, sargı sıcaklığı, yük deneyi sırasında elde edilen değere mümkün olduğunca yakın bir değere getirilmelidir.
- Sargılardaki sıcaklık artışı, direnç metodu kullanılarak gerçekleştirilmelidir.
- Deneyler, beyan gerilimde ve beyan frekansın $\pm$ % 0,3'üyle sınırlı bir frekans değişimiyle gerçekleştirilmelidir.

Beyan yük termal deneyi

Bu deney, IEC 60034-1 Madde 7'ye göre beyan yükte yapılır ve son parametreler olan θ_a , θ_N ve R_N 'nin kararlı değerleri kaydedilmelidir. Böylece, ölçülen sargı sıcaklığı (θ_N) ve direnci (R_N), diğer deneyler için referans değer oluşturmaktadır.

Yük deneyi

Metot 1:

Stator sargısının sıcaklığı, yük termal deneyi sırasında ölçülen sıcaklık değerinin 5°K dahilinde olmalıdır. Beyan yükün % 25'i ilâ % 150'si arasında altı tane yük noktası seçilir, noktalardan biri % 100'de ve diğer ikisi beyan değer üstünde olmalıdır. Noktalar, yaklaşık olarak eşit aralıklara sahip

olabilir. Yük, torku ölçebilen bir dinamometre kullanılarak uygulanır ve değiştirilir.

Not:

Dinamometre ve dinamometreyi bağlamak için kullanılan rulmanlar, yüksüz durumda bile ilâve torka neden olacaktır ve bunun düzeltilmesi gereklidir. Referans AS standardı Ek A'da tork düzeltilmesi için kullanılan metot açıklanmaktadır. Gerçek motor torkunu elde etmek için tork düzeltme değerinin ölçülen tork değerine eklenmesi gereklidir. Gerçek motor torku, aşağıdaki ilişki kullanılarak elde edilebilir:

$$T = T_d + k_d$$

Burada k_d tork düzeltme değeridir.

Yük deneyi, en yüksek noktadan en düşük noktaya gidilerek gerçekleştirilmelidir. Deneyden önceki ve sonraki R değeri ölçülmeli ve diğer deneylerde kullanılmak üzere aritmetik ortalama hesaplanmalıdır. Her bir yük noktasında aşağıdaki değerler ölçülmelidir: U, I, P_1 , T_d , $\cos \phi$, f ve n.

Not:

R değeri, stator sargı kaybının ölçülmesi için kullanılır.

Metot 2:

Tork ölçümünün yapılmaması hariç, bu metot, Metot 1'e benzerdir. Bu metotta, spesifik olarak birçok noktada verimin belirlenmesi istenmiyorsa, beyan yük termal deneyindeki değerlerin kaydedilmesi mümkündür. Ancak birçok noktada deney yapılması isteniyorsa, ölçümler, beyan yük için ve diğer yük noktaları için tekrarlanacaktır.

Yüksüz durum deneyi

Yüksüz durum deneyi, farklı gerilimlerde gerçekleştirilir ve her bir gerilim değerinde gerilim, yüksüz-durum akımı ve yüksüz-durum güç girişi (U, I_0 ve P_0) ölçülür. Üçü, % 100 ilâ % 125 arasında, üçü, % 20 ilâ % 50 arasında olmak üzere altı ölçüm gerçekleştirilmelidir. İki ardışık 30 dakikalık aralıkta, yüksüz giriş gücü değeri P_0 kararlı hale gelene kadar (değişim < % 3 olana kadar) yüksüz durumdaki makine beyan gerilim ve frekansta (motor, ayrılmış durumda olacak şekilde) çalıştırıldıktan sonra, deneylerin gerilim azalacak şekilde gerçekleştirilmesi gereklidir. Deneyden önceki ve sonraki R değerleri ölçülmeli ve aritmetik ortalama hesaplanmalıdır.

Kayıpların hesaplanmasıÇekirdek kaybının, sürtünme ve rüzgar kaybının hesaplanması

Yüksüz durum deneyindeki güç girişi aşağıdaki bileşenlere sahiptir.

- Çekirdek kaybı
- Sürtünme ve rüzgar kaybı
- Yüksüz durumdaki stator sargı kayıpları

Bu, aşağıdaki denklemle ifade edilebilir:

$$P_0 = P_{FE} + P_f + (I^2 R)_0$$

$$P_0 = P_K + (I^2 R)_0 \quad (\text{Denklem:4})$$

burada P_K sabit kaybı gösterir.

Not:

Yüksüz durumdaki rotor sargı kaybı ihmal edilebilir çünkü kayma değeri sıfıra yakın olacak ve rotordaki akım akışı ve sonuç olarak rotor kafes sargısındaki kayıp ihmal edilebilir seviyede olacaktır.

Yüksüz durum stator sargı kaybı, aşağıdaki ifade kullanılarak hesaplanabilir:

$$(I^2R)_0 = 1,5 (I_0^2 \cdot R_0)$$

(Denklem:5)

Not:

İlişki, hem yıldız hem de üçgen bağlantılı makinelerle uygulanabilir. Yıldız bağlı bir makine söz konusu olduğunda, aşağıdakiler uygulanabilir:

R'nin değeri = 2 . faz başına direnç değeri

Faz akımı, hat akımına eşittir.

Bu nedenle üç fazın tümünde yüksüz-durumdaki toplam stator sargı kaybı şu şekildedir:

$$\begin{aligned} &= 3 \cdot I_0^2 \cdot (R_0 / 2) \\ &= 1,5 (I_0^2 \cdot R_0) \end{aligned}$$

Üçgen bağlantılı motor söz konusu olduğunda, aşağıdakiler geçerlidir.

İki hat terminali arasındaki direnç değeri, bir faz sargısı ile seri bağlı başka iki sargının paralel bir kombinasyonudur. Bir faz sargısının direnci, 1,5 R₀'a eşittir, R₀, ölçülen hattan-hata dirençtir.

Faz akımının değeri = Hat akımı/(Kare kök 3)

Bu nedenle üç fazın tümünde yüksüz durumdaki toplam stator sargısı şu şekilde hesaplanır:

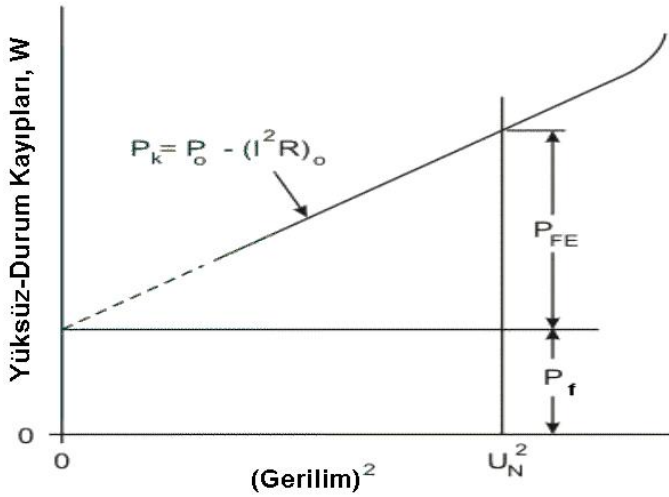
$$\begin{aligned} &= 3 \cdot (I_0^2 / 3) \cdot (1,5 R_0) \\ &= 1,5 (I_0^2 \cdot R_0) \end{aligned}$$

Sabit kayıp P_K, Denklem:4 ve Denklem:5 kullanılarak hesaplanabilir çünkü Denklem:4'ün diğer iki terimi zaten bilinmektedir. Farklı gerilimlerde okunan değer grubu için P_K değeri hesaplanmalıdır.

P_f değerini hesaplamak için, X-ekseninde U² değerleri olacak şekilde P_K değerleri çizilmelidir. Y eksenindeki kesişim noktası, P_f değerini verecektir. Gösterim için Şekil E.2'ye bakılmalıdır.

Not:

Gerilim 0 olduğunda çekirdek kaybı da 0 olduğu için, kalan tek bileşen sürtünme kaybı ve rüzgar kaybı olacaktır.



Şekil E.2 – Sürtünmenin ve rüzgar kaybının hesaplanması (Referans: AS/NZS 1359.102.3:2000)

Çekirdek kaybını hesaplamak için aşağıdakilerin gerçekleştirilmesi gereklidir. Şekil 3'teki grafikte, P_K , $U_N \geq \% 60$ geriliminde okunan değerler kullanılarak çizilmiştir. $U = U_N$ olduğunda P_K için elde edilen değerden P_f 'yi çıkarın. Sonuçtaki değer, U_N 'deki çekirdek kaybını (P_{FE}) temsil edecektir. Beyan çalışma şartlarındaki doğru P_{FE} hesaplaması, stator sargısında bu duruma karşılık gelen gerilim düşüşünü de hesaba katabilir ve U_N yerine, sonuçta oluşan gerilimi temel olarak kullanabilir. Bu gerilimin elde edilmesi için gerekli hesaplama, referans standartta belirtilmiştir.

Sargı kayıplarının hesaplanması

Aşağıdaki gösterildiği gibi, stator sargı kaybı, Denklem:5'tekine benzer bir ilişki kullanılarak hesaplanabilir.

$$(I^2R)_s = 1.5 (I^2 \cdot R) \quad (\text{Denklem:6})$$

Burada I ve R , yük eğrisinde farklı noktalardaki yük deneyi sırasında okunan değerlere karşılık gelir. Rotor sargısının direnci ölçülemediği için, rotor sargı kaybı, aşağıdaki denklemler kullanılarak doğrudan olmayan bir şekilde hesaplanır.

$$(I^2R)_r = \{P_1 - (I^2R)_s - P_{FE}\} \cdot s$$

burada s , birim başına kayma değeridir. Her bir yükte elde edilen P_1 , stator sargı kaybı ve kayma değerleri ve beyan çalışma şartları için daha önceden elde edilen çekirdek kaybı değeri yerlerine konularak farklı yük değerlerindeki rotor sargı kaybı hesaplanır.

İlave yük kayıplarının hesaplanması

İlave yük kayıpları (P_L), sonraki kısımlarda hesaplamış olduğumuz gibi toplam kayıplar ve diğer kayıp bileşenleri esas alınarak hesaplanabilir. Bu nedenle, hesaplanan değer, işlenmemiş ilave kayıp değeri olarak kabul edilir.

Bildiğimiz gibi:

$$\begin{aligned}\text{Toplam Kayıp} &= \text{Giriş} - \text{çıkış} \\ &= P_1 - P_2\end{aligned}$$

$$\text{Toplam Kayıp} = P_f + P_{FE} + (I^2R)_S + (I^2R)_r + P_L$$

Bu da şu değere eşittir:

$$P_L = P_1 - P_2 - \{P_f + P_{FE} + (I^2R)_S + (I^2R)_r\} \quad (\text{Denklem:8})$$

Yukarıdaki formülün hesaplanabilmesi için P_2 'nin bilinmesi gerektiği için, bu formül sadece deneyin, mekanik çıkışın ölçülmesini gerektirdiği durumda faydalıdır. Başka bir deyişle, P_L değerinin hesaplanması amacıyla Denklem:8'in uygulanması için Metot 1'e göre yük deneyi gerçekleştirilmelidir.

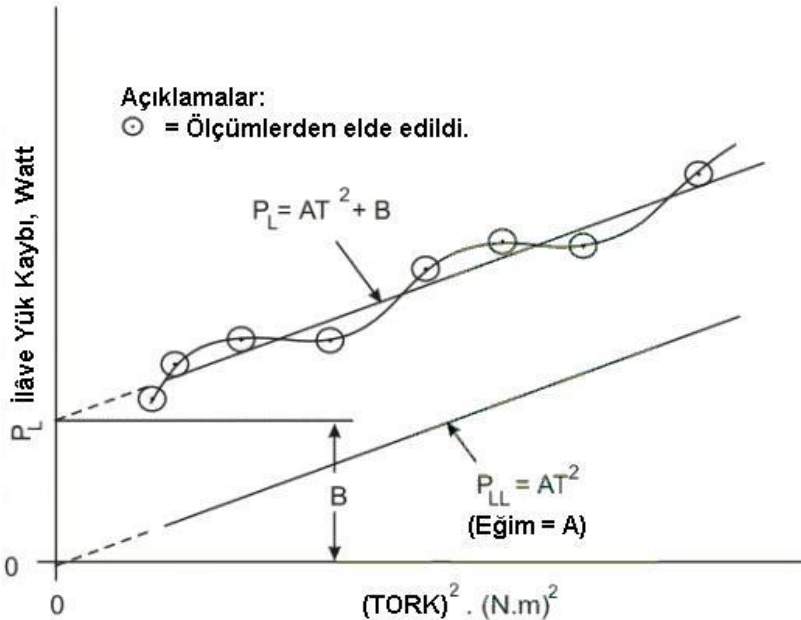
Çıkış şaft gücü, aşağıdaki bağlantı kullanılarak hesaplanabilir:

$$P_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot T \cdot n}{60 \times 1000}$$

bu bağlantı daha da basitleştirilebilir:

$$P_2 = \frac{T \cdot n}{9550} \quad (\text{Denklem:9})$$

P_2 , kW cinsinden, T , Nm cinsinden ve n , devir/dakika (RPM) cinsindendir.



Şekil E.3 – İlâve Yük Kaybının Hesaplanması (Referans: AS/NZS 1359.102.3:2000)

P_L değeri, her bir yük noktası için hesaplanmalı ve torkun karesine göre (T^2) çizilmelidir. Eğri sadece yaklaşık olarak lineer olabilir ve düzeltilmesi

gereklidir. Standart, düzgünleştirilmiş bir çizginin elde edilmesi için regresyon analizinin kullanılmasını önerir. Ayrıca, yukarıda elde edilen düz çizgi, orijinden geçmeyecektir (ilâve yük değeri, yüksüz durumda sıfıra eşit olmalıdır çünkü yüksüz durumdaki giriş, zaten diğer kayıplara paylaştırılmıştır). Şekil E.3'te, yukarıdaki düzeltmeler yapıldıktan sonra farklı yüklerdeki ilâve kaybın (P_{LL}) son değeri gösterilmektedir.

Yük deneyinin, mekanik torkun ölçümünü içermeyen Metot 2'ye göre yapılması durumunda, ilâve yük kaybına ilişkin yukarıdaki hesaplamanın gerçekleştirilmesi mümkün değildir. Bu nedenle, standart, ilâve yük kaybının giriş gücünün yüzdesi olarak belirtilmesini önerir. Çizelge E.2'de, farklı standart beyan değerlere sahip motorlar için kullanılacak yüzde değerleri gösterilmektedir.

Beyan yükteki ilâve yük kaybı, aşağıdaki ilişki vasıtasıyla hesaplanabilir:

$$P_{LL} = \frac{P_1 \cdot (\text{Şekil 4'teki gibi \% motor beyan değeri})}{100} \quad (\text{Denklem:10})$$

P_{LL} 'nin yukarıdaki değeri, beyan yükte uygulanabilir. Diğer kısmî yük değerleri için, aşağıdaki denklem uygulanabilir.

$$P_{LX} = P_{LL} \cdot \frac{(I_X^2 - I_0^2)}{(I_N^2 - I_0^2)} \quad (\text{Denklem:11})$$

Çizelge E.2

İlâve Yük Kaybı Yüzdeleri (Referans: AS/NZS 1359.102.3:2000)

Motor Beyan Değeri < 10 kW		Motor Beyan Değeri < 100 kW		Motor Beyan Değeri < 200 kW	
kW	Yüzde	kW	Yüzde	kW	Yüzde
< 1	3,00	11	2,32	110	1,67
1,1	2,97	15	2,23	132	1,62
1,5	2,89	18,5	2,17	150	1,58
2,2	2,78	22	2,12	160	1,56
3,0	2,69	30	2,04	185	1,52
4,0	2,61	37	1,98	200	1,50
5,5	2,52	45	1,91		
7,5	2,43	55	1,87		
		75	1,78		
		90	1,73		

burada P_{LX} yük akımına (I_X) karşılık gelen ilâve yük kaybıdır, burada I_N ve I_0 sırasıyla tam yük akımı ve yüksüz durum akımıdır.

Verimin Hesaplanması

Tüm kayıplar yukarıdaki gibi ayrı ayrı hesaplanır, toplam kayıp, beyan yük için şu formül kullanılarak hesaplanabilir.

$$P_{\text{kayıp}} = P_f + P_{FE} + (I^2 R)_s + (I^2 R)_r + P_{LL} \quad (\text{Denklem:12})$$

Verim, uygulanabilir olduğu kadarıyla Denklem:2'de ve Denklem:3'te verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanabilir. Diğer yük noktaları için, kayıpların, söz konusu yük için münferit olarak belirlenmesi ve verimin yeniden-hesaplanması gereklidir.

E.3 Dinamometreler

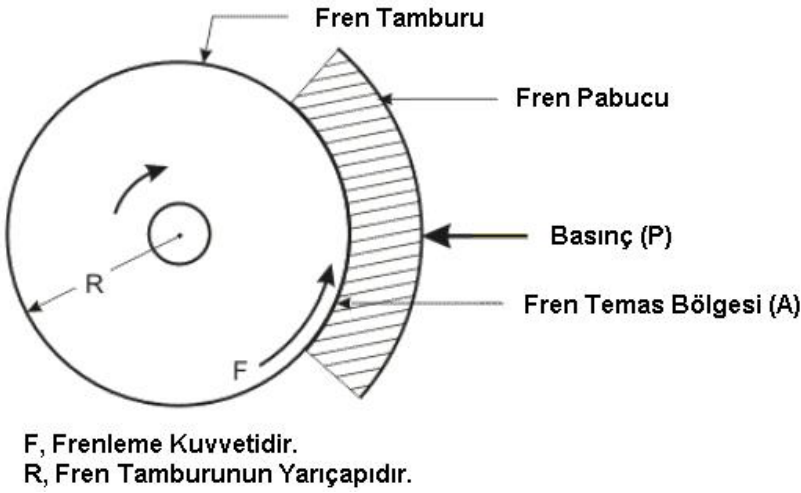
Bir motordaki farklı kayıpların belirlenmesi ve verimin elde edilmesi için kullanılan ve önceki bölümde açıklanmış olan deneyler, motorun, beyan çıkışın % 150'sine kadar mekanik şaft yüküne tâbi tutulmasını gerektirir. Bunun gerçekleştirilmesi için en yaygın metotlardan biri dinamometre kullanmaktır. Dinamometre, bir deney motorunu, çeşitli mekanik tork ve hız kombinasyonlarında deneyden geçirmemizi sağlayan bir cihazdır. Tipik bir dinamometre deney hücresinde, deney makinesinin şaftı, bağlantı parçaları ve sürücü şaftı vasıtasıyla dinamometreye bağlanır. Makine çalışırken, dinamometre, makine üzerinde bir frenleme kuvveti uygulayabilir. Dinamometre üzerindeki algılayıcılar, makine hızını ve torkunu ölçer. Bu değerler bilinirse, deney makinesinin çıkış gücü hesaplanabilir. Hız ölçümü doğru bir şekilde yapılmalı ve piyasada mevcut dinamometreler, hassas hız ölçümü için şafta monteli sayısal enkoderleri kullanmalıdır.

Dinamometreler, kontrollü şartlar altında deneyden geçirilmekte olan makine hız-tork karakteristiğindeki istenen bir noktanın yeniden oluşturulmasını sağlar. Dinamometrenin fonksiyonu, motorun dönüşüne ters yönde frenleme torku oluşturmaktır. Bazı cihazlar, durağan durumda da tork üretebilir (sıfır RPM). Diğerleri, motorun dönme hızının bir fonksiyonu olan ancak herhangi bir noktada ayarlanabilen bir tork uygular.

Bir yük uygulamanın dışında, bir tork ölçüm metodunun da uygulanması gereklidir, böylece motorun çıkış gücü, bu ölçüm kullanılarak doğrudan belirlenebilir. Önceki bölümdeki motor yük deneyi Metot-1'e bakılmalıdır. Bu ölçümün mevcut olmaması durumunda, motor verimini hesaplamak için başka varsayımların yapılması gerekli hale gelir (daha önce belirtilmiş olan ilâve yük kayıplarının tahsis edilmesi gibi). Bu bölümde, motorların ayrıntılı olarak yük deneyinden geçirilmesi için kullanılan çeşitli dinamometre tiplerini inceleyeceğiz. Dinamometrelerin nasıl çalıştığını anlamak için, ilk olarak, basit bir mekanik frenin bir motoru yüklemek için nasıl kullanılabildiğini açıklayacağız.

Fren ile yükleme

En basit fren biçimi, fren tamburunu, benzer bir eğrilik derecesine sahip bir dış kuvvetle bastıran sektör şeklindeki bir fren-pabucunun kullanılmasıdır. Uyumlu bir eğrilik derecesine sahip bir fren pabucunun kullanılmasının nedeni, tambur yüzeyi ile temas eden yüzeyin en yüksek seviyeye çıkarılmak istenmesidir, böylece yük torku mümkün olduğunca yüksek seviyede olabilir. Fren pabucuna uygulanan basıncın değiştirilmesi, yük torkunun değişmesine neden olacaktır. Bu ilkeyi açıklayan Şekil E.4'e bakılmalıdır.



Şekil E.4 – Frenin çalışma ilkesi

Tamburla temas alanı A olan fren tarafından P basıncının uygulandığı varsayılarak, frenleme kuvveti, aşağıdaki denklemle elde edilecektir:

$$F = \mu \cdot P \cdot A$$

Burada, μ , sürtünme kat sayısı olarak adlandırılan bir sabittir ve eşleşen yüzeylerin yapıldığı malzemelerin özelliklerine bağlıdır. Frenin neden olduğu tork aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$T = F \cdot R$$

Burada

T tork,

R fren tamburunun yarıçapı ve

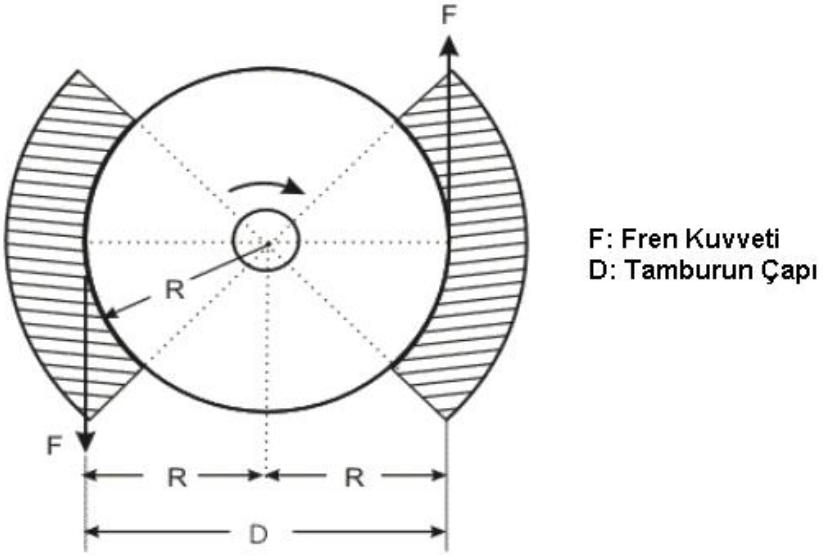
F frenleme kuvvetidir.

Frenleme kuvvetinin ve torkun yönü, motorun dönüşüne ters yönde olacaktır. Bu nedenle motor, dengesini korumak için (başka bir deyişle, bu durumda sabit dönüş hızını korumak için) dönüş yönünde frenin torkuna eşit seviyede tork üretmelidir.

Tambura ve bu nedenle motor şaftına uygulanan enine kuvveti önlemek için, birbirinin tam karşısına yerleştirilmiş iki fren pabucunun kullanılması yaygındır. Şekil E.5'e bakılmalıdır.

Pabuçların frenleme kuvvetinin eşit olduğunu varsayarsak, frenleme sistemi, aralarında D uzaklığı olan (fren tamburunun çapına eşit) zıt bir kuvvet (F) çifti üretmektedir ve tork, aşağıdaki şekildedir:

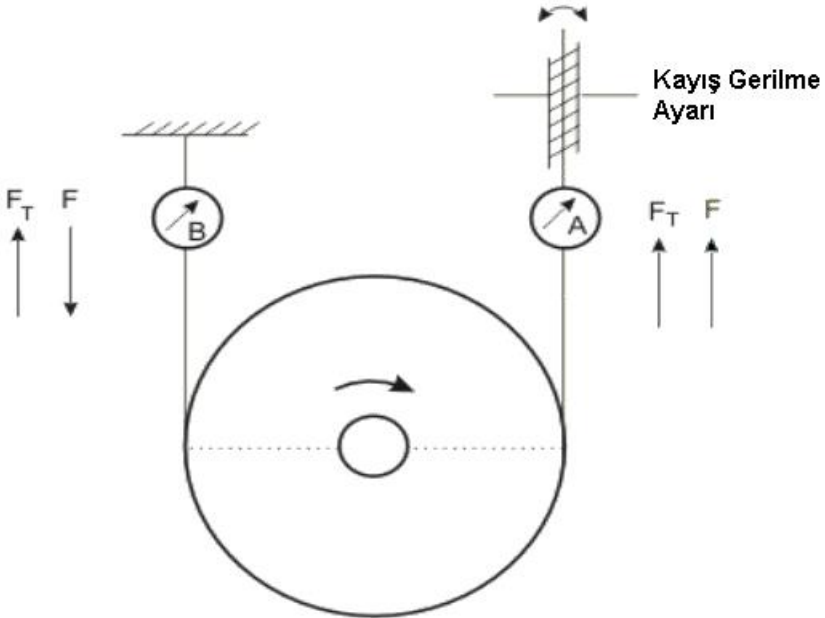
$$T = F \cdot D$$



Şekil E.5 – Bir fren tamburunda çalışan fren pabucu çifti

Torku ölçümü yapabilen basit bir dinamometre

Yukarıda açıklanan düzenlemeler, frenleme kuvvetinin ya da motor çıkış torkunun ölçülmesi için kolay bir yöntem sağlamaz. Bu değerlerin ölçülmesi için kullanılan basit bir düzen, Şekil E.6'da gösterilmiştir, buna göre fren pabucunun yerine, tamburla temas halinde olan bir kayış kullanılır.



Şekil E.6 – Bir fren tamburu etrafında kayışın kullanılması

Kayış, her iki ucu birer kuvvet ölçere sabitlenmiş olacak şekilde tambur yüzeyiyle temas halindedir. Fren kayışı, bir gerilme düzeni kullanılarak başlangıç kuvvetine tâbi tutulur. Motor hareketsiz durumdayken, gerilme ölçerler tarafından kaydedilen kuvvetler eşittir. Ancak motor çalışırken, kayış boyunca oluşan frenleme kuvveti, gerilme ölçerlere uygulanan kuvvetin değişmesine neden olur. Gerilme ölçerlerin okuduğu değerler arasındaki fark, frenleme kuvvetinin bir ölçüsüdür. Ayrıntılı olarak açıklayacak olursak:

FT'nin Gerilme Ölçer A ve Gerilme Ölçer B tarafından kaydedilen başlangıç kuvveti olduğunu varsayın. Frenleme işlemi, F kuvvetini oluşturur. Şimdi Gerilim Ölçer B ve Gerilim Ölçer B sırasıyla şu değerlere sahip olacaktır:

$$FA = FT + F$$

$$FB = FT - F$$

Gerilme ölçerlerin okuduğu değerler arasındaki fark şu şekildedir:

$$FA - FB = 2 \cdot F$$

Frenleme sistemi tarafından üretilen tork şu şekildedir:

$$T = R \cdot (FA - FB) \\ = 2 \cdot F \cdot R$$

R, fren tamburunun yarıçapıdır. Bu nedenle, T, frenleme çifti tarafından üretilen torka eşittir. Başlangıç frenleme gerilme değeri, frenleme, gerilme ölçer B tarafındaki kayışta bir gevşeklik oluşturmayacak şekilde ayarlanmalıdır.

Bu, motor torkunun ölçülmesi için çok basit bir metotken, düzenleme belli dezavantajlara sahiptir. Temel sorunlar şunlardır:

- Motorun çıkış gücü, fren tamburu tarafından absorbe edilmektedir. Freni soğutmak için uygun bir düzen kullanılmazsa, o zaman fren aşırı ısınabilir ve yanabilir.
- Bu metot hatasız değildir ve yüksüz durumda, fren tamburunun kendisi tarafından üretilen torku hesaba katamaz ve doğru sonuçlar vermez (yüksüz durumda fren tamburunun ürettiği torkun belirlenmesi, kayışların doğru bir şekilde belirlenmesi için gereklidir).
- Manuel tork ölçümleri ve diğer parametrelerle ilişkileri, okunan mekanik ve elektriksel değerlerin kaydedilmesi için gerekli olan periyot boyunca, motorun kararlı yükte çalıştırılmasını gerektirir. Bu durum, aşırı ısınmaya neden olabilir.
- Motorun, dalgalanan yük şartlarındaki davranışı kolay bir şekilde belirlenemez.

Daha gelişmiş dinamometreler, bazı özellikleri kullanarak bu dezavantajları çözmeye çalışır ve aşağıda bu gibi dinamometreler açıklanacaktır. Ancak, bundan önce, bağlanan bir elektrik jeneratörü vasıtasıyla yüklerin motorlara nasıl uygulanabildiği açıklanacaktır.

Jeneratör vasıtasıyla yükleme

Bir makineye mekanik yük uygulamanın yollarından biri, jeneratör kullanmaktır. Jeneratör AC makine ya da DC makine olabilir ve jeneratöre bağlanan elektriksel yük (jeneratör kayışlarıyla birlikte) motorun çıkış şaftında mekanik bir yük gibi görünecektir.

Bu metodun kullanılmasının avantajlarından biri, yükün tamamen elektriksel olmasından dolayı fren tamburu ya da diğer ısı harcama metotlarındaki gibi kapsamlı soğutma düzenlemelerinin gerekli olmamasıdır. Yük, lamba ya da su reostası olabilir ve gerilim kontrolüyle, yük, hızlı bir şekilde değiştirilebilir. Başka bir avantajı, jeneratörün çıkış gücünün elektrik sistemine geri

iletilebilmesidir. Bu nedenle, net enerji kaybı düşüktür, sadece motor-jeneratör kombinasyonunun kayıplarıyla sınırlıdır. Gerçekte, daha sonra göreceğimiz gibi bazı dinamometreler, bu ilkeyi esas alır.

Bu düzenek tipinde mekanik torkun doğrudan ölçülmesi, hatta tork, kontaksız tip tork ölçme cihazları gibi daha gelişmiş tekniklerin kullanılmasını ve dönen algılayıcı ile durağan cihaz arasında kablosuz veri haberleşmesinin kullanılmasını gerektirecektir. Alternatif olarak, mekanik çıkış, jeneratörün elektriksel çıkışına ve verim eğrilerine bağlı olarak hesaplanabilir. Ancak bu, test jeneratörünün çeşitli yüklerde verimli çalışmasını gerektirir. Aksi halde, önceki bölümdeki Metot 2 yük deneyi yaklaşımının benimsenmesi gerekecektir.

Uygulamadaki Dinamometreler

Genelde tam bir deney sistemi olarak kullanılabilen dinamometreler, aşağıdaki sınıflara ayrılabilir:

- Bir yük torku elde etmek için mekanik metotları kullanan cihazlar
- Bir yük torku elde etmek için elektriksel özellikleri kullanan cihazlar

İlk kategoride, pompa tipi dinamometreler mevcuttur. İkinci kategoride, burgaç akım tipi, histerez tipi, toz tipi, AC ve DC tipi dinamometreler gibi çeşitli dinamometre tipleri mevcuttur. Bu kategorilerin her ikisi de, yük eğrisinde çeşitli noktalardaki kararlı durum yük şartları altında bir makineyi deneyden geçirmek için kullanılabilir.

Ancak deney için inerşia yükünü kullanan başka bir dinamometre tipi mevcuttur. Bu kategori, biraz farklıdır çünkü burada yük, gerçekte volan dişlisi gibi inerşialı bir kütleyi ivmelendirmek için gerekli olan torktur. Ancak bu, motorların deneyden geçirilmesi için özellikle kullanılan bir faktör değildir. Sonuç olarak, mevcut dinamometrelerin çoğu, sadece motor testi için kullanılmaz ancak özellikle motor-yarışlarında kullanılan Dizel makineler ve otomobil sürücü cihazları gibi mekanik güç sağlayıcıların deneyden geçirilmesi için kullanılmaz. Son bahsedilen uygulama dinamometre tasarımında ve ölçüm ve kontrole ilişkin gelişmiş çevresel sistemlerde kapsamlı gelişmeler sağlamıştır çünkü gerçek yol şartlarını simüle etmek için çok hızlı bir şekilde değişen yük şartlarının mevcut olması gereklidir. Bu gibi tasarımlar, bilgisayar-tabanlı veri edinimini ve kontrolünü kapsar. Kontrol devreleri, yük şartlarını simüle eder ve bir veri edinim sistemi, daha sonradan analiz etmek üzere tüm makine ve yük parametrelerini hızlı bir şekilde (manüel kayıt mümkün değildir) dinamik olarak kaydeder. Güç elektroniği, yük kontrolü için PLC'lerle rejeneratif tip yükleme için, çalışma izleme ve koruma için ve algılayıcıların veri edinim sistemlerine bağlanması ve kontrol komutlarının dinamometreye iletilmesine ilişkin veri haberleşmesi için kullanılmaktadır.

Farklı dinamometre tipleri farklı şekilde davranır ve bu dinamometre tipleri, kendi tipik avantajlarına sahiptir. Uygulamadaki sistemler, genelde ortak bir şafta bağlanan çok sayıda dinamometre tipini kullanmaktadır, böylece simülasyon için tüm olası yükleme şartları elde edilebilir.

Aşağıda farklı dinamometre tiplerini kısaca açıklayacağız.

Pompalı dinamometre

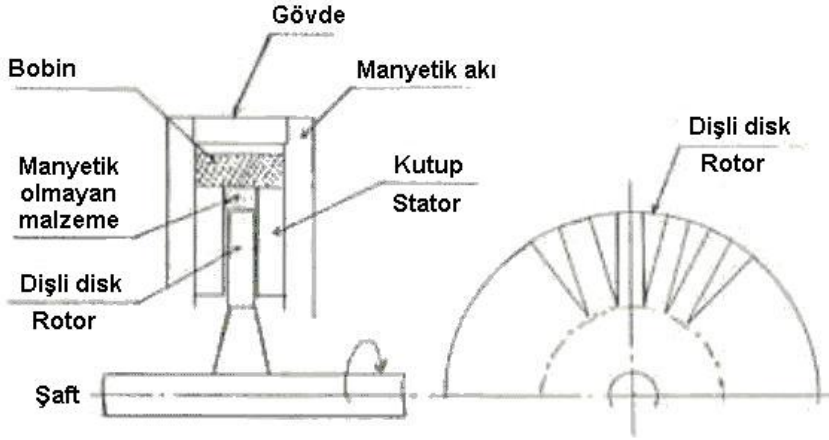
Bu, mekanik bir dinamometre tipidir. Bu **[Pump dynamometer]** dinamometre tipi, frenleme torku oluşturmak için su ya da hidrolik bir sıvı kullanır, bu su ya da hidrolik sıvı aynı zamanda soğutma aracı olarak da

kullanılır. Her iki durumda da çalışma ilkesi aynıdır. Sıvı, dinamometre mahfazasında bulunan kanatçıklı bir rotor tarafından çalkalanır ve merkezden dış mahfazaya doğru bir merkezkaç kuvveti tarafından radyal olarak itilir ve kısma valfi tarafından kontrol edilebilir. İçerideki sıvı miktarı ne kadar çoksa, deneye tâbi tutulan makineye uygulanan frenleme kuvveti o kadar büyüktür. Makine kararlı hızda çalıştırılıp deneyden geçirilirken, motor torku, belirli bir kısma valfi konumunda bu hızı sağlayacak şekilde pompa tarafından yük uygulanır. Bu noktada, pompa mahfazasına uygulanan dönme kuvveti ya da “tork” ölçülür ve “standart” okuma değerlerine dönüştürülür. Sonuçlar, bir yük hücresinden elde edilen değerler ile ya da basitçe pompa basıncı dönüştürülerek hesaplanır. Genelde dinamometre, çeşitli bölmelere sahip olabilir ve bu bölmelerin bir kombinasyonunu kullanarak, yük değişimi sağlanır.

Dinamometre aracı olarak yağ kullanıldığında, yağ, çok çabuk ısınır ve akışkanlığı kaybolur. Bu durumda, yağı pompalamak için gerekli olan güç büyük ölçüde değişir ve dinamometre tarafından çekilen güç değişir. Su için de benzer bir durum (yağ için olduğundan daha iyi olsa da) söz konusudur. Su ve yağ pompaları, ayrıca sıvılara hava karıştırabilir, bu nedenle, sıvılar içine hava karışmış ya da “köpüklü” hale gelebilir, bu da akışkanlığı ve çekilen güç miktarını değiştirir. Bu dinamometre tipi ucuz bir dinamometredir ancak kontrol edilmesi zordur ve daha çok bakım gerektirir. Bundan başka, deneyden geçirilen motorun toplam gücü, sıvı tarafından absorbe edilmelidir ve bu, bir sınırlama haline gelebilir.

Burgaç Akımlı Dinamometreler

Burgaç akımlı dinamometreler [*Eddy Current dynamometer*], elektriksel olarak iletken bir tambur, çevresinde oluşan tek-biçimli olmayan ve durağan bir akıya karşı dönmeye zorlandığında meydana gelen kayma kayıplarını esas alarak çalışır. Dönen tamburla durağan akı arasındaki nispi hız, tamburda, elektromanyetik indüksiyon kanunları tarafından belirlenen burgaç akımlarının akmasına neden olur. İndüklenen akımlardan kaynaklanan reaktif manyetik alan, birim tarafından frenleme torku üretilmesini sağlar. Bu nedenle, motor gücü iletken tamburun ısınmasına neden olacaktır ve ısının, hava ya da su gibi bir soğutma aracı vasıtasıyla atılması gerekli olacaktır. Bu nedenle, bu dinamometre tipi, frenleme torku oluşturmak için elektriksel bir özelliği kullanır. Şekil E.7’de, tipik burgaç akımlı dinamometrenin çalışma ilkesi gösterilmektedir. Statordaki manyetik kutuplar tarafından akı üretilir ve dişli disk biçiminde olan rotor kısmında burgaç akımlarının oluşmasına neden olur. Dişler, akı yolunda da değişikliğe neden olur ve sonuç olarak, rotor döndükçe akı yoğunluğu değişir, bu nedenle, frenleme etkisi değişir.

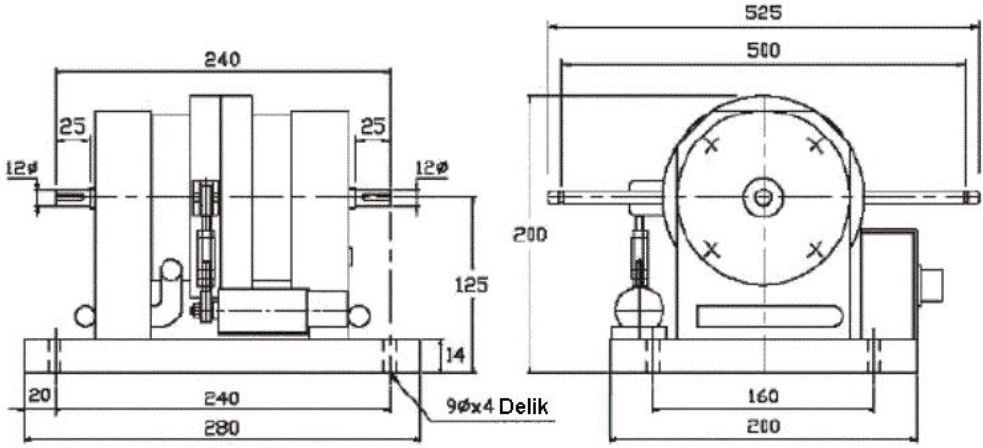


Şekil E.7 – Burgaç akımlı dinamometrenin çalışma ilkesi

Su soğutmalı ya da hava soğutmalı burgaç akımlı dinamometre tipleri piyasada mevcuttur. Piyasada mevcut su soğutmalı tipte burgaç-akımlı dinamometre özellikleri ve genel düzenleme, aşağıda Çizelge E.3'te ve Şekil E.8'de gösterilmektedir.

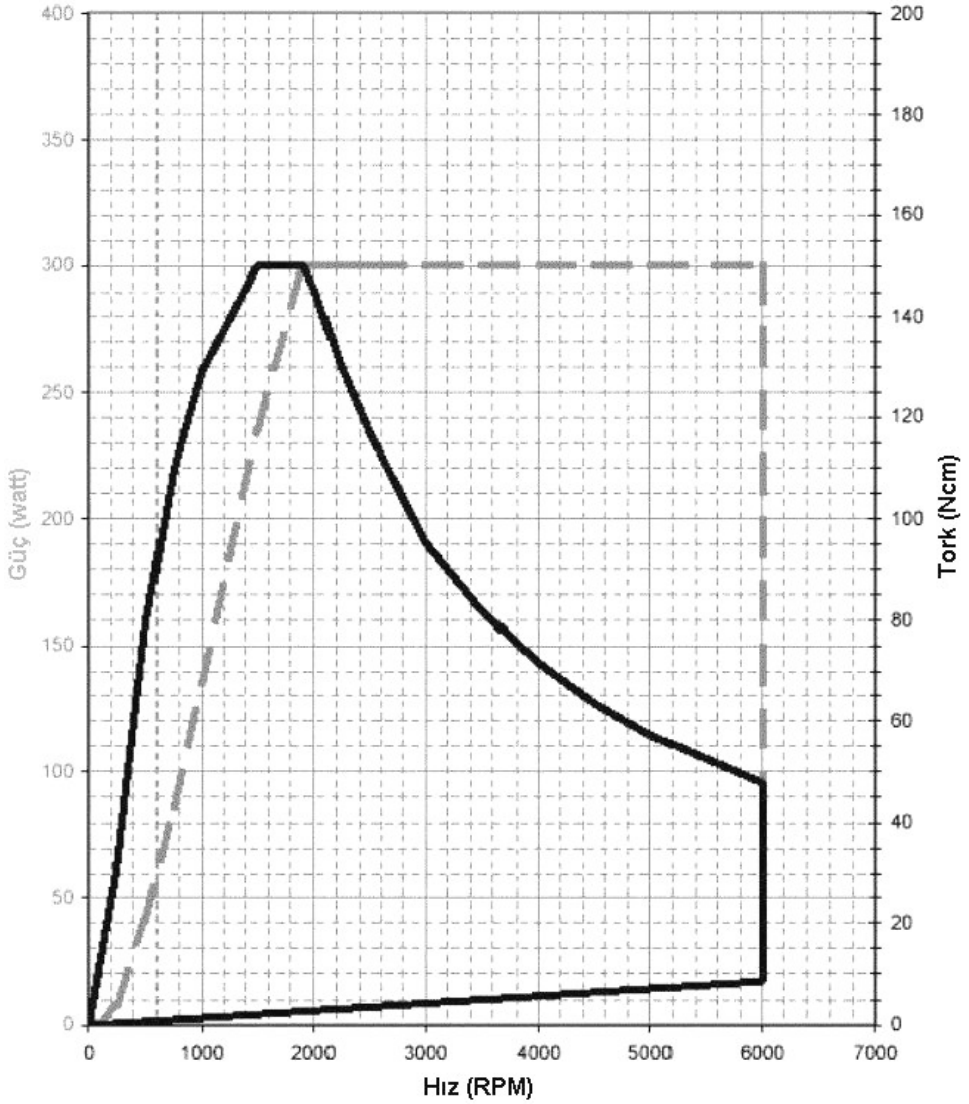
Çizelge E.3 – Burgaç Akımlı Dinamometrenin Tipik Özellikleri

Parametreler	Özellik
Dinamometre biçimi	Hava soğutmalı, sıkıştırılmış hava
Frenleme torku-Anma değer N.cm	150
Beyan Hız RPM	1800
Tepe Hız RPM	6000
Güç harcaması (beyan) Watt	300
Uyarma gerilimi V DC	90 V DC
Uyarma akımı (maksimum) A	2,5
Tork algılayıcısı	Reaksiyon tipi-kuvvet algılayıcısı
Yük hücresi	Tambur köprülü, zorlamaya karşı hassas
Yük hücresi uyarımı (maksimum)	10 V DC
Duyarlılık (anma)	1 mV/V
Yük hücresi köprü direnci	350 Ohm
Yük hücresi doğruluk sınıfı	0,2
Hız algılama	Dişli tekerlek/indüktif yakınlık algılayıcısı
Hava akışı anma lpm	7
Girişteki basınç	3 bar
Ağırlık (kg)	48



Şekil E.8 – Burgaç akımlı dinamometrenin genel düzenlemesi

Tipik burgaç akımlı dinamometrenin Tork/Güç-Hız karakteristiği, Şekil E.9'da gösterilmektedir. Gösterilen karakteristik, birçok dinamometre tipi için tipiktir. Sıfır hızdaki tork ve güç sıfıra eşittir. Dinamometrenin tork ve güç kapasitesi, beyan hıza kadar neredeyse lineer olarak artar. Bu hızdaki güç, dinamometrenin kaldırabileceği maksimum güçtür. Bu noktanın üstünde, hızın artırılması gerekirse, frenleme torku, güç sınır değeri (hız ile torkun çarpımıyla orantılıdır) aşılmayacak şekilde düşer. Hız sınır değeri, dinamometrenin güvenli bir şekilde dayanabildiği maksimum hız değerini temsil eder. Düşük tork değeri, dinamometrenin belirli bir hızda kararlı hale gelebildiği minimum tork değeridir.



Şekil E.9 - Burgaç akımlı bir dinamometrenin tipik karakteristikleri

Not: Yukarıdaki şekilde kesikli çizgi, Gücü ve sürekli çizgi, Torku gösterir.

Histerezli Dinamometre

Histerezli dinamometre[*Hysteresis Dynamometer*], frenleme işlemini gerçekleştirmek için elektromanyetik maddelerin histerez etkisini kullanır. Dinamometre, enerjili bobinlere sahip sürücü silindire çevrelenen yekpare bir motordan oluşur. Rotor döndüğünde, rotor malzemesindeki bobinler tarafından üretilen mıknatıslanma akısının histerez etkisi, bir frenleme torku oluşturur. Saf histerez dinamometreleri, manyetik parçacıklar ya da sürtünme bileşenleri kullanmaksızın manyetik hava boşluğunda tork üretir ve bu dinamometrelerin, daha

düzgün tork, daha uzun ömür, daha iyi tekrarlanabilme özelliği, yüksek seviyede kontrol edilebilme özelliği, daha düşük bakım gereksinimleri ve daha kısa arıza süresi gibi çeşitli avantajlara sahip oldukları belirtilir. Güç kapasitesi, rotorda aşırı ısınma olmaksızın rotorda üretilen ısının harcanabilme özelliği ile sınırlanacaktır. Bu dinamometre tipi, sıfır hızda tam tork üretecek şekilde tasarımılanabilir.

Toz Tipi Dinamometre

Adından da anlaşıldığı gibi, Toz Frenli Dinamometreler[*Powder Type Dynamometer*], manyetik bir toz içerir. Bir bobinden geçen elektrik akımı, manyetik bir alan üretir, bu da tozun özelliğini değiştirir, bu nedenle, sürtünme sayesinde düzgün bir frenleme torku üretilir. Bu gibi dinamometreler, düşük ilâ orta hız aralığında ya da orta ilâ yüksek tork aralığında çalışan uygulamalar için idealdir. Bu nedenle, burgaç akımlı ve histerez tipi dinamometrelere çok benzeyen bu tipte, çalışma ilkesi olarak elektromanyetizma esas alınır. Bu dinamometreler, durağan durumda tam tork oluşturacak şekilde de tasarımılanabilir.

DC ve AC Dinamometreler

Bu dinamometreler, gerekli yük torkunu sağlamak için deneye tâbi tutulan motora bağlanan elektrik makinelerini kullanmaktadır. Dinamometre, değişken torklu bir yük gibi davranır. Dinamometrenin gerektirdiği giriş gücü (bu güç değeri, deney makinesinin çıkışıdır) aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

Dinamometre Girişi = Elektriksel Çıkış + Dinamometredeki Kayıplar

Güç değerinin yerine Dinamometre Girişi konarak Denklem 9'dan çıkış torku hesaplanabilir. Yukarıdaki hesaplama, değişken şartlar altında dinamometre kayıp değerine ihtiyaç duyacaktır. Bu nedenle, şafta-monte edilen bir tork algılayıcısı kullanılarak doğrudan ölçümle dinamometre torkunun elde edilmesi yaygındır.

Daha önce açıklanmış olduğu gibi, hem AC hem de DC makineler dinamometre olarak kullanılabilir. Bu dinamometre tipi, geçici performans göz önünde tutularak otomobil motorlarının deneyden geçirilmesi için çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Deneye tâbi tutulan motora çok hızlı yük değişiklikleri uygulanabilir ve önceden-programlanabilir. Ayrıca, dinamometre, çok kolay bir şekilde jeneratif (frenleme) mod ve motor modu arasında anahtarlama yapabilir. Deney makinesinin dönen kısımlarının dış araçlar tarafından döndürülmesi gerekli ise, motor modu faydalıdır. (örneğin, herhangi belirli bir hızda mekanik kaybı hesaplamak için). Hem AC dinamometre hem de DC dinamometre, rejeneratif ve rejeneratif-olmayan konfigürasyonlarda çalışacak şekilde tasarımılanabilir. Şartlar, aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Hızlı, önceden-programlanmış yük değişiklikleri
- Bağımsız tork değişimi ile belirli bir hız aralığında çalışma
- Düşük inersiyalı dönen kütle
- Frenleme durumunda rejenerasyonun mümkün olması
- Frenleme modunda ve motor modunda çalışma

Rejenerasyon hakkında kaydedilmesi gereken önemli nokta, gücün, güç kaynağına geri döndürülmesi gerekli ise, üretilen gücün frekansının elektrik şebeke frekansına tam olarak eşit ve geriliminin, elektrik şebeke gerilimine hemen hemen eşit olmasının gerekli oluşudur. Makinenin geniş bir hız aralığında deneyden geçirilmesi gerekli olabildiği için, rejenerasyon, invertör kullanılarak gerçekleştirilir, böylece yukarıdaki şart sağlanabilir. DC dinamometre söz konusu olduğunda, DC çıkışı, invertör girişi olarak doğrudan kullanılır. AC dinamometre söz konusu olduğunda, çıkış farklı

frekanslarda olabilir (deney motorunun hızına karşılık gelir), önce DC'ye ve daha sonra AC'ye çevrilir. Bu fonksiyonelliği sağlamak için, darbe-genişlik modülasyonlu invertörlerde çalışan sayısal kontroller kullanılır.

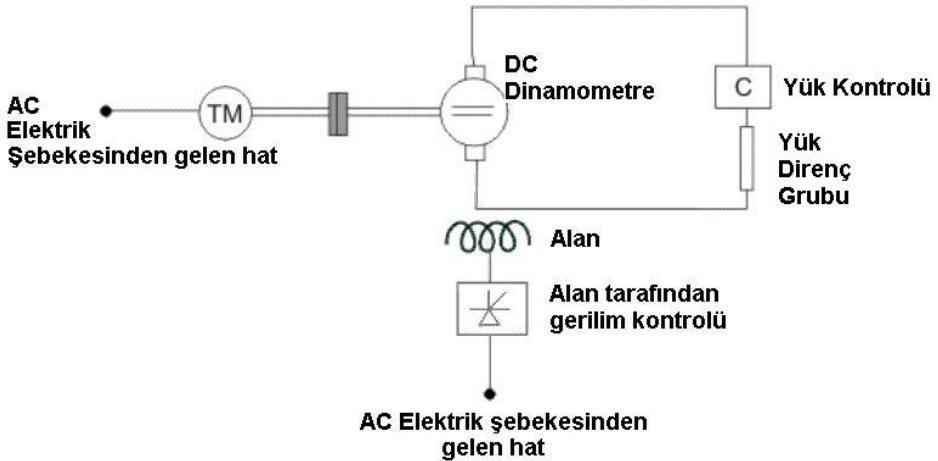
Rejeneratif-olmayan mod söz konusu olduğunda, şartlar daha basittir. DC dinamometre söz konusu olduğunda, makine ayrı-uyarımli bir jeneratör gibi davranır ve rezistif bir yüke verilen çıkışı kontrol etmek için alan gerilimi kontrol edilir. AC makine söz konusu olduğunda, benzer bir metod kullanılır, tek fark, değişken DC çıkışı elde etmek için tristör kontrollü bir doğrultucunun kullanılmasıdır. Dinamometrenin çıkış gerilimi, ayrıca hızın da bir fonksiyonudur ve bu nedenle, çıkış gücü, düşük hızlarda sınırlı olacaktır.

Motor modunda çalışma, dinamometrenin dışarıdan gelen gücü kullanarak hız düzenlemesiyle çalıştırılmasını gerektirecektir. Bu, DC dinamometrenin, elektrik şebekesinden çalıştırılan tristörlü doğrultucu vasıtasıyla kontrollü bir armatür beslemesi gerektirdiği anlamına gelir. AC dinamometrenin, elektrik şebekesinden de beslenen invertörlü bir sürücü vasıtasıyla değişken hızlı bir motor olarak çalıştırılması gerekli olacaktır.

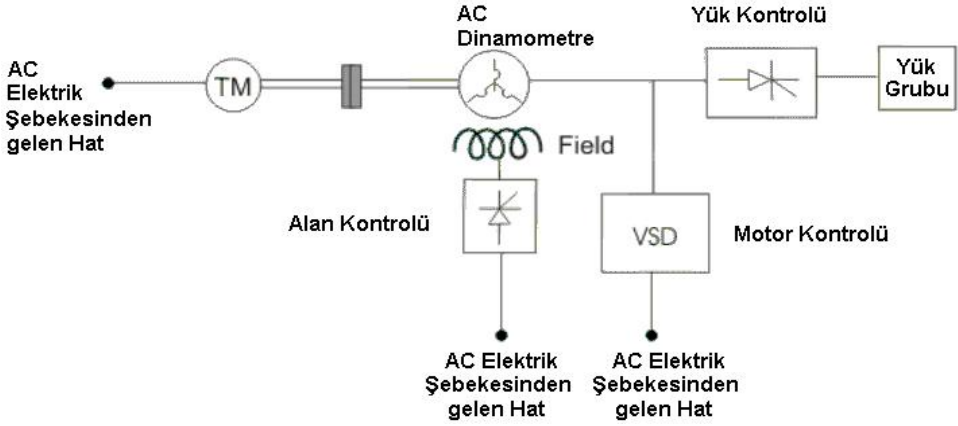
Hem DC hem de AC dinamometrelerin deney grubunun bir parçası olarak mevcut olmasına rağmen, AC dinamometreler, inerşiaları düşük olduğu ve bunun sonucu olarak daha iyi yük tepkisine sahip oldukları için ve ayrıca komütatörleri/fırçaları olmadığı ve böylece bakımları daha kolay olduğu için daha üstün olarak kabul edilir.

Şekil E.10 ilâ Şekil E.13'te, yukarıda açıklanan farklı dinamometre tiplerinin çalışma ilkeleri gösterilmektedir. Bunların amacı, sadece bu makinelerde benimsenen yaklaşımı belirtmektir. Gerçek dinamometre tasarımlarının ayrıntıları farklı olabilir, ayrıca bu tasarımlar, imalâtçıdan imalâtçıya değişecektir.

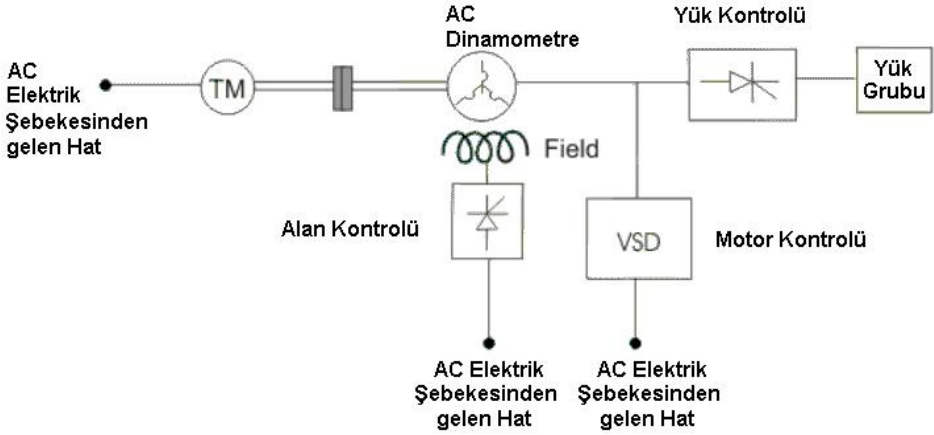
Not – Aşağıdaki diyagramlarda, TM, deneyden geçirilen makineyi temsil etmektedir.



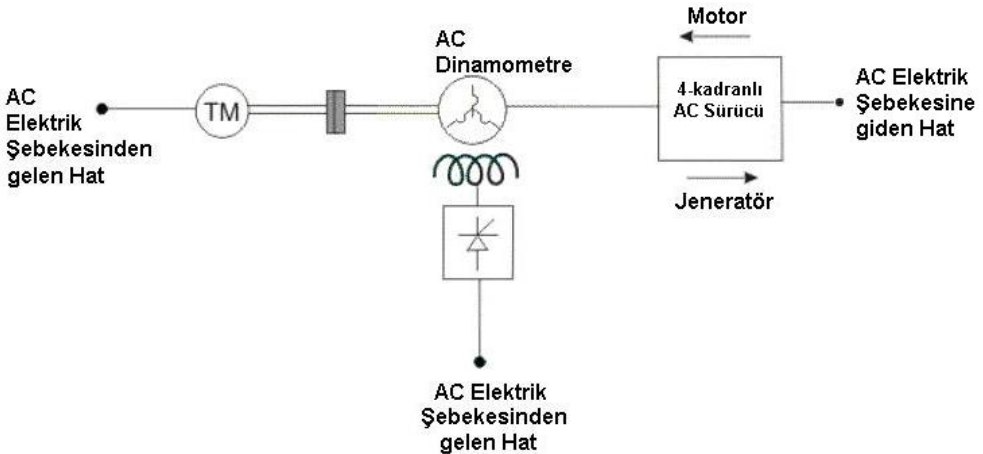
Şekil E.10 – Blok diyagram – Rejeneratif-olmayan DC dinamometre



Şekil E.11 – Blok diyagram – Rejeneratif DC dinamometre



Şekil E.12 – Blok diyagram – Rejeneratif-olmayan AC dinamometre



Şekil E.13 – Blok diyagram – Rejeneratif AC dinamometre

E.4 Daha Büyük Motorların Veriminin Belirlenmesi

Yukarıdaki açıklamalar çoğunlukla daha düşük beyan değerlere sahip ve temelde LV (alçak gerilim) bölgesinde çalışan motorlar için geçerlidir. Ancak HV bölgesindeki makinelerin kayıplarının ve veriminin belirlenmesi, bu gibi makinelerin beyan yük şartlarında deneyden geçirilmesi zor olduğu için temel olarak farklı bir yaklaşım gerektirebilir. Sınırlama, tam yük deneyini desteklemek için yeterli kapasiteye sahip bir elektrik sisteminin ya da yeterli beyan değerlere sahip bir dinamometrenin kullanılması olabilir. Deney için, iki özdeş makine mevcutsa, arka-arkaya deney metodu benimsenebilir.

Makineler, ortak bir mekanik sistemde birleşebilir ve ortak elektrik kaynağına bağlanabilir. Makinelerden biri motor olarak, diğeri de motordaki yük gibi davranan bir jeneratör olarak çalışacaktır. İndüksiyon makinesinin, jeneratör olarak çalışmak için senkron hızın üstündeki bir hızda çalışmasının gerekli olmasından dolayı, dişli kutusu (çıkış yükünü değiştirmek için değişken bir dişli oranına sahiptir) mekanik bir bağlantının yapılması gerekli olacaktır.

Yukarıdaki sistemden dışarı mekanik güç akışı olmadığı için, makine kombinasyonuna net elektrik girişi, makinelerin toplam kaybına ve iki makine arasında yer alan dişli kutusundaki kayba eşittir. Elektrik şebekesi, bu kayıpları ve ilâve olarak her iki makinenin de mıknaatıslanma akımını sağlamalıdır. Daha fazla ayrıntılı bilgi için IEC 60034-2'ye bakılmalıdır.

E.2 Özet

Döner AC makinelerdeki kayıplar ve çeşitli yüklerde makinenin veriminin hesaplanması hususu, önemli bir husustur çünkü bu değerler, imalâtçıya ilişkin spesifik performans garantilerinin bir parçasını oluşturmaktadır. Motor kayıplarının ve verimin belirlenmesi için kullanılan deneyler, çeşitli ulusal ve uluslar arası (IEC) standartlar tarafından ele alınmıştır. Kayıplar genelde iki kategoriye ayrılır: sabit kayıplar ve değişken kayıplar. Sabit kayıplar, çekirdek kayıplarından, sürtünme kayıplarından ve rüzgar kayıplarından oluşurken, değişken kayıplar, stator bakır kaybından, rotor bakır kaybından ve ilâve yük kaybından (kaçak kayıp olarak da adlandırılır) oluşur. Kayıpların ve verimin belirlenmesi için gerçekleştirilen deneyler, beyan yük termal deneyini, yük deneyini ve yüksüz-durum deneyini kapsar. Yük deneyi iki farklı metot kullanılarak gerçekleştirilebilir, metotlardan biri çıkış torkunun ölçülmesini gerektirir ve diğeri, tork ölçümünün yapılmasını gerektirmez. Deney değerleri kullanılarak her bir kayıp bileşeninin belirlenmesi ve söz konusu yükteki kayıp değerleri esas alınarak herhangi bir yükteki verimin hesaplanması için bazı metotlar belirtilmiştir.

Deneyden geçirilen motorların yüklenmesi dinamometreler vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Dinamometreler, kontrollü şartlar altında deneyden geçirilen makinenin hız-tork karakteristiğinde istenen bir noktanın yeniden oluşturulmasını sağlar. Dinamometrelerin fonksiyonu, motorun dönüşüne ters yönde bir frenleme torku oluşturmaktadır. Frenleme torku, sürtünme ya da sıvıların bir mahfazada çalkalanması gibi doğrudan mekanik yöntemlerle ya da burgaç akımı, histerez gibi elektromanyetik özellikler ya da manyetik toz kullanılarak elde edilebilir. Doğrudan olmayan başka bir metot, jeneratör gibi davranan ve deney makinesi tarafından sürülen DC ya da AC makinelerin kullanılmasıdır. Jeneratörler bir yük grubuna bağlanır ve yük, çeşitli araçlarla kontrol edilebilir. Bu yükler, deney makinesinin çıkış şaftında mekanik tork gibi görünür. Bu dinamometre tipinin kullanılması, çok-modlu çalışmaya imkân verir (dinamometre, fren gibi ya da deney makinesini süren



bir motor gibi çalışır) ve ayrıca rejeneratif frenlemeyi mümkün kılar, frenleme modunda, güç, elektrik sistemine geri döndürülebilir, böylece enerji tasarrufu sağlanmış olur.

Beyan yükün uygulanmasının mümkün olmadığı daha büyük beyan değerlere sahip motorlar söz konusu olduğunda, kayıpların ve verimin belirlenmesi için doğrudan olmayan başka metotlar kullanılır.

EK F Değişken Hızlı AC Sürücülerle İlgili Ortak Terimler Sözlüğü

AC	Alternatif Akım , gerilimin ve ilgili akımın alternatif olarak pozitif ve negatif polaritede değiştiği (tipik olarak saniyede 50 çevrim) elektriksel iletim sistemi.
A/D Konvertör	Analog sinyalleri sayısal biçime dönüştürmek için kullanılan cihaz.
Algoritma	Algoritma, bir problemin çözülmesi için bilgisayarda ya da işlemcide kullanılan prosedür ya da adımlar kümesidir.
Analog	Bir gerilimi, akımı ya da sürekli olarak değişen başka bir değeri temsil edebilen, sürekli değişen dalga biçimidir.
ANSI	Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü , Amerika'daki temel standart kurumudur.
ASCII	Bilgi Alışverişi için Amerikan Standart Kodu , alfabetik ve nümerik karakterlerin kodlanması için genelde veri haberleşmesinde kullanılan 7 bit kod. İlk olarak ANSI tarafından tanımlanmıştır, günümüzde ISO-646 Uluslar Arası Standardı ve CCITT Alfabe No 5 olarak da tanımlanmaktadır.
ASIC	Uygulamaya Özgü Entegre Devre
Asenkron	Herhangi bir anda karakterlerin (bit grubu) iletilebildiği ve iletilen karakterler arasındaki zaman aralıklarının değişken boylarda olabildiği veri haberleşmesi tekniğidir. Bir karakter iletilirken, karakterin başında başlama biti vardır, bu bit, alıcının senkron hale getirilmesini sağlar ve karakter, durma biti ile sonlandırılır. Bit grubunun iletilmesi sırasında senkronizasyonun çok iyi olması gereklidir.
AS	Avustralya Standartlar Birliğinin (SAA) Avustralya Standardı , Avustralya'daki temel standart kurumudur.
Zayıflatma	Bir sinyalin, sesin ya da geriliminin büyüklüğünün azalması. Genelde dB (desibel) cinsinden ifade edilir.
Bant genişliği	En düşük ve en yüksek frekanslar arasındaki, bir iletim ortamı üzerinden önemli ölçüde zayıflama olmaksızın iletilebilen Hz cinsinden frekans aralığı.
Bant Geçiren Filtre	Sınırlı bir frekans aralığının geçmesine izin veren bir filtre. Bu aralığın dışındaki frekanslar keskin bir şekilde zayıflatılır.
BCD	İkiye Kodlanmış Onlu , her bir karakteri 4-bit kodlu onlu bir sayı ile gösteren bir kod.
Bit	İkili Basamak , lojik 1 ya da lojik 0 ile gösterilir.
BJT	Bipolar Jonksiyonlu Transistör (GTR'ye de bakılmalıdır), Emitör ile Kollektör terminalleri arasında çok yüksek seviyede akımlara sahip 3-terminalli güç transistörü, genelde üçlü Darlington bağlantı çiftinden oluşur, baz terminaline uygulanan bir akım vasıtasıyla faal ve faal olmayan hale getirilebilir.



Baud	Sinyal hızı ölçme birimi, Saniye başına olay sayısından (genelde saniye başına bit) türetilen sinyalleşme hızı birimidir. Ancak, her bir olay, kendisiyle ilgili birden fazla bite sahipse, baud hızı ve saniye başına bit eşit değildir. <i>Baud</i> ismi, Maurice Emile Baudot adlı ünlü Fransız telegrafçının adından gelmektedir.
bps	Saniye başına bit , bit iletim hızı.
BRC	Blok Artıklık Kontrolü , veri haberleşmesinde kullanılan bir hata kontrol tekniği.
Köprü	İki benzer devreyi bağlamak ve devreleri genişletmek için kullanılan ara yüz cihazı. Genelde “tekrarlayıcı” olarak adlandırılır.
BS	İngiltere’deki temel standartlar organizasyonu olan İngiliz Standartları Enstitüsünün (BSI) İngiliz Standartları .
Tampon	Alıcı uçtaki cihazda geçici veri saklama bölgesi (FIFO). Alıcı cihaz ile verici cihaz arasında veri akış hızları arasındaki farkı telafi etmek için kullanılan ara seviye geçici bellek cihazıdır.
Bayt	Genelde karakter kodu olan sekiz bitten oluşur.
Kapasitans	AC elektrik devresinin, gerilim uygulandığında elektrik enerjisini depolayabilme özelliği. Kapasitans normalde, iki plâkayı kapsar. Kapasitans, plâkaların yüzeyiyle doğru orantılı ve aralarındaki uzaklıkla ters orantılıdır. Alternatif gerilim uygulandığında, oluşan akım tepesi, gerilim tepesinin 90° önünde olacaktır. Kapasitans birimleri Farad cinsinden ölçülür.
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım , bilgisayar tabanlı bir tasarım programıdır.
CAE	Bilgisayar Destekli Mühendislik , bilgisayar tabanlı bir mühendislik programıdır.
CAM	Bilgisayar Destekli İmalât , bilgisayar tabanlı bir imalât programıdır.
CENELEC	Comite European de Normalisation Electrotechnique , standartları genelde Avrupa ülkeleri tarafından uygulanan bir kurumdur.
Karakter	Veri iletiminde kullanılabilen harf, sayı, noktalama işareti ya da diğer simgeler.
Sağlama Toplamı [;Checksum]	Veri mesajındaki karakterleri temsil eden, hata tespiti için kullanılan bitlerin ikili olarak eklenmesinin sonucu.
CNC	Bilgisayar Nümerik Kontrolü , bilgisayar kontrollü bir makine.
CPU	Merkezi İşlem Birimi , sayısal cihazın akıllı kısmı.
CRC	Çevrimli Artıklık Kontrolü [<i>Cyclic redundancy check</i>], veri haberleşmesinde kullanılan ve 2 bayt uzunluğunda (16 bit) bir hata mesajını kullanan çok etkin bir hata kontrol tekniği. İki versiyon yaygın olarak kullanılmaktadır, bunlar, CRC-16 ve

	CRC-CCITT'dir.
CSA	Kanada Standartlar Birliği , Kanada'daki temel standart kurumu.
CSI	Akım Kaynağı İnvertörü , invertörün arkasındaki akım değişim hızının (di/dt) DC linke seri olarak bağlanan büyük bir şok bobini tarafından sınırlandırıldığı bir frekans konvertör konfigürasyonu.
Darlington Bağlantısı	Kontrol devresinden istenen Baz akımını azaltmak için, bir güç transistör modülünün yükseltme faktörünü artırmak amacıyla transistörlerin "ard-arda" bağlanması. Güç konvertörlerinde genelde ikili ya da Üçlü Darlington bağlantıları kullanılır.
D/A	Sayısal sinyalleri analog biçime dönüştürmek için kullanılan cihaz.
dB	Desibel , bir sinyaldeki zayıflamanın ölçüsüdür ve iki uçtaki V_1 ve V_2 sinyal büyüklüklerinin logaritmik oranına bağlıdır. Oran, $dB = 20 \log_{10} V_1/V_2$ olarak ifade edilir.
DC	Doğru Akım , Gerilimin ve Akımın sabit bir polaritede (pozitif ya da negatif) kaldığı elektriksel bir iletim sistemidir.
DCE	Veri Devresi-sonlandırma Cihazı , belirli bir haberleşme portu konfigürasyonuna uygulanan EIA/TIA standartlarına ilişkin bir tanım.
DCS	Dağıtılmış Kontrol Sistemi [Distributed Control System] , genelde süreç kontrol uygulamaları için kullanılan endüstriyel bir kontrol sistemidir.
DEC	Onlu
Sayısal	İki ya da daha fazla kesin duruma sahip bir sinyal tipi. İkili sayısal sinyal, sadece lojik 1 ve lojik 0 ile gösterilen iki değere sahip özel bir durumdur.
DIN	Alman Standartları Enstitüsü , Almanya'daki temel standart kurumudur.
DIP	Çift Sıra Paket [Dual In-line Package] , genelde PCB'de kullanılan bir anahtar grubu.
DOL	Doğrudan-hatta Başlatma , kontaktör vasıtasıyla AC indüksiyon motorlarını doğrudan güç kaynağına anahlayarak çalıştırma metodu.
EIA	Elektronik Endüstrileri Birliği , veri haberleşmesindeki ara yüz bağlantılarının teknik ayrıntılarını tanımlayan, Amerika'da yer alan bir standart kurumudur. EIA'nın adı, TIA (Telekomünikasyon Endüstrileri Birliği) olarak değiştirilmiştir.
EMI	Elektromanyetik Enterferans , bir kablonun yakınındaki elektromanyetik alanlar tarafından indüklenen elektriksel bir enterferans tipidir.
EPROM	Silinebilir Programlanabilir Sadece Okunan Bellek , program verisini saklamak için yaygın olarak mikroişlemcilerle kullanılan

	uçucu-olmayan bellek. Bellekteki veri genelde ultra viyole ışığı ile silinebilir. Enerji kesildiğinde, veri kaybolmaz.
EEPROM	Elektriksel Olarak Silinebilen Programlanabilen Sadece Okunabilir Bellek , genelde program verisini saklamak için mikroişlemcilerle birlikte kullanılan uçucu-olmayan bellek. Bellekteki veri, elektronik olarak silinebilir ve güncellenebilir. Enerji kesildiğinde, veri kaybolmaz.
Farad	Metrik sistemdeki kapasitans ölçüm birimi.
FCT	Alan Kontrollü Tristör , kapaıya uygulanan gerilim tarafından faal ve faal olmayan hale getirilebilen bir tristör.
FDM	Frekans Bölme Çoğullama , mevcut frekans bant genişliğini, çeşitli eş zamanlı haberleşme kanalları elde etmek için daha küçük ayrı bantlara bölme tekniğı.
Fieldbus	Alan cihazlarını ve süreç kontrolörlerini bir kontrol sisteminde birleştirmek için fiziksel şartları ve yazılım şartlarını tanımlayan herhangi bir standart sistemine verilen genel isim.
FIP	Fabrika Bilgi Protokolü , protokolü içeren fieldbus standardına verilen isim. Bu protokol, Fransız firmaları tarafından geliştirilmiştir.
FET	Alan Etkili Transistör , kapaı terminaline uygulanan gerilim vasıtasıyla faal ve faal olmayan hale getirilebilen bir transistör.
FSK	Frekans Kaydırmalı Modülasyon , iki ya da fazla belirli frekans arasında kaydırma yaparak veri iletme tekniğı.
G	Ciga , metrik sistem öntakısı $\dots \times 10^9$
GTO	Kapaı Sinyalli Tristör , kapaıya uygulanan akım vasıtasıyla faal ve faal olmayan hale getirilebilen bir tristör.
GTR	Dev Transistör , Bipolar Jonksiyonlu Transistör (BJT) olarak da adlandırılır, baza uygulanan akım vasıtasıyla faal ve faal olmayan hale getirilebilen, yüksek akımla çalışan bir güç transistörü.
Henry	Metrik sistemde indüktans ölçüm birimi.
HEX	Onaltılı , 16 tabanındaki bir sayma sistemi.
Hz	Hertz , metrik sistemdeki frekans ölçme birimi, 1 Hertz = saniye başına çevrim.
IC	Entegre Devre , belirli bir şekilde çalışacak biçimde tasarılanmış, küçük elektronik bileşenleri içeren mahfazalı bir elektronik devre.
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu , elektrik standartları konusunda uzmanlaşmış uluslar arası bir standart kurumu.
IEAust	Avustralya Mühendisler Enstitüsü , Avustralya'daki

	mühendisler için profesyonel bir kurum.
IEE	Elektrik Mühendisleri Enstitüsü , İngiltere'deki mühendisler için profesyonel bir kurum.
IEEE	Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü , Amerika'daki mühendisler için profesyonel bir kurum.
IGBT	Yalıtımlı Kapılı Bipolar Transistör , MOSFET'e benzeyen gerilim kontrollü elektronik anahtarlama cihazı.
Empedans	Bir devrenin akıma karşı gösterdiği toplam direnç. Ohm cinsinden ölçülen R direncinin ve X reaktansının bir birleşimidir.
İndüktans	Bir devrenin akıma karşı koyma özelliği. İndüktans, akım tepesinin gerilim tepesinin 90° arkasında kalmasına sebep olur. Birimler, Henry cinsinden ölçülür.
Ara Yüz	İki ayrı cihaz arasındaki ortak elektriksel sınır. Bu sınırdan, veri sinyalleri ya da diğer elektrik sinyalleri geçebilir.
I/O	Girişler ve Çıkışlar , PLC, DCS, RTU, vb. gibi bir kontrol cihazına giren ya da cihazdan çıkan bağlantılar.
ISA	Amerika Cihazlar Birliği
ISO	Uluslararası Standartlar Organizasyonu , standartları uluslar arası olarak koordine eden bir kurum.
ISP	Birlikte Çalışabilen Sistemler Projesi [Interoperable Systems Project] , standart Fieldbus sisteminde sona ulaşmayı hedefleyen projenin adı, bu proje, Profibus ile IEC-SP50 arasında bir orta yoldur. Çeşitli imalatçılara ait veri haberleşme cihazlarının aynı ağda <i>birbiriyle</i> haberleşebildiği bir projedir.
K	Kilo , metrik sistem öntakısıx 10 ³ .
KVA	KiloVolt-Ampere , Volt x Amp x 10 ³ ölçümü.
KW	KiloWatt , Watt x 10 ³ ölçümü.
LAN	Yerel Alan Ağı , haberleşme kablolarının paylaşıldığı çeşitli haberleşme düğümlerini bağlayan veri haberleşme sistemi. LAN, genelde küçük coğrafi bir alanla kısıtlanmıştır.
LCD	Sıvı Kristal Ekran [Liquid Crystal Display] , sıvı kristalleri kullanan, operatör görüntü sistemi.
LCI	Yük Anahtarlama İnvertör , tristörlerin yük cihazının elektriksel davranışı ile faal olmayan hale getirildiği bir invertör.
LED	Işık Yayan Diyot , üzerinden akım geçerken ışık yayan bir diyot.
m	Metre , metrik sistemdeki uzunluk birimi
M	Mega , metrik sistem öntakısıx 10 ⁶
mho	Metrik sistemdeki iletkenlik ölçüm birimi.



min	Dakika , zaman ölçümü = 60 saniye.
MODEM	MODülatör-DEModülatör , sayısal gerilim verisini, telefon ya da radyo kanalı gibi analog bir haberleşme sistemi üzerinden iletilmek üzere uygun frekanslara dönüştüren bir cihaz.
MOS	Metal Oksit Yarıiletken , spesifik bir yapı tipini kullanan yarı iletken bir cihaz.
MOSFET	Metal Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör , MOS yapısını kullanan bir FET. Gerilim kontrollü bir elektronik anahtarlama cihazıdır.
MOV	Metal Oksit Varistör , aşırı gerilim koruması için kullanılan lineer-olmayan yarıiletken bir cihaz.
µP	Mikroişlemci , sayısal devrenin kontrol edilmesi için kullanılan mahfazalı, "akıllı", küçük bir işlemci.
MTBF	Arızalar Arasındaki Ortalama Süre [Mean Time Between Failures] , bir cihazın herhangi bir bileşenin arızaları arasındaki ortalama süresinin istatistiksel ölçüsü.
MTTR	Ortalama Tamir Süresi , bir cihaz arızalandıktan sonra, cihazın etkin bir şekilde tekrar çalışmaya başlayabilmesinden önce, ortalama arızanın istatistiksel ölçüsü.
Çok prizli ağ	Üç veya daha fazla benzer cihazın bağlandığı bir haberleşme ağı.
NVROM	Uçucu-olmayan Sadece Okunan Programlanabilir Bellek , program verisini saklamak için yaygın biçimde mikroişlemcilerle birlikte kullanılan, nispeten hızlı erişimi olan uçucu-olmayan mikroişlemci belleği. Bellekteki veri elektronik olarak silinebilir ve güncellenebilir. Enerji kesildiğinde, veri kaybolmaz.
Nm	Newton metre , metrik sistemdeki Tork ölçme birimi.
NEMA	Ulusal Elektrik İmalâtçıları Birliği [National Electrical Manufacturing Association] , elektrik gücü, yapılış ve deney kodları için Amerika'da standart yayınlayan bir birlik.
Ağ	Çok sayıda cihazın aynı haberleşme kanalını paylaştığı bir haberleşme sistemi.
Düğüm [Node]	Bir haberleşme cihazının ağa bağlanma noktası.
Gürültü	Yüksek gerilime ya da yüksek akıma sahip diğer komşu elektrikli cihazlardan dolayı haberleşme ağına indüklenen istenmeyen elektrik sinyalleri. Gürültü, genelde sinyal ya da veri hatalarının bozulmasına neden olur.
Ohm	Metrik sistemde Direnç & Empedans ölçme birimi.
Optik Ayrım	Bir ışık yolu vasıtasıyla iki elektronik devrenin galvanik olarak ayrılması tekniği. Sinyal, LED gibi ışık yayan bir kaynak ve transistör gibi ışık alıcı bir cihaz tarafından izolasyon

bariyerinden iletilir.

PAM	Darbe Genişlik Modülasyonu , çıkış AC geriliminin büyüklüğünü kontrol etmek için Değişken Hızlı AC Sürücülerin daha eski modellerinin invertöründe yaygın olarak kullanılan bir modülasyon tekniği.
Parite	Bir karakteri oluşturan bitlerdeki hata kontrol sistemi.
Çift Parite	1 bitlerinin sayısı çift olacak şekilde ayarlanan parite biti.
Tek Parite	1 bitlerinin sayısı tek olacak şekilde ayarlanan parite biti.
PC	Kişisel Bilgisayar , 286, 386 ya da 486 mikroişlemciye sahip PC-AT gibi kişisel kullanım, ofis kullanımı ve endüstriyel kullanım için tasarlanmış mikroişlemciye dayalı bilgisayar.
PC	Programlanabilir Kontrolör , endüstriyel kontrol için kullanılan ve belirli bir kontrol dizisini gerçekleştirmek için kullanıcı tarafından programlanabilen bir bilgisayar.
PCB	Baskılı Devre Kartı [<i>Printed Circuit Board</i>] , belli sayıda elektronik bileşeni destekleyen ve üzerine fotoğrafik araçlarla bir elektrik devresinin işlendiği düz bir yalıtım malzemesi.
PLC	Programlanabilir Lojik Kontrolör , orijinal olarak endüstriyel uygulamalardaki sayısal dizi kontrolü için tasarlanmış bir bilgisayar. Modern PLC'ler de hesaplama yapabilir ve analog girişleri izleyebilir ya da analog çıkışları kontrol edebilir. PLC, belirli bir kontrol dizisini gerçekleştirecek şekilde programlanabilir.
Port	Haberleşme cihazlarının, sayısal ya da analog sinyallerin giriş ve çıkışı için kullanılan terminalleri.
Profibus	Süreç Alan Yolu [<i>Process Field Bus</i>] , temelde Almanya ve diğer Avrupa ülkeleri tarafından geliştirilen, protokol dahil olmak üzere standartlaştırılmış bir alan ağ sistemine verilen isim.
PROM	Sadece Okunan Programlanabilir Bellek , nispeten yavaş erişime özelliğine sahip uçucu-olmayan mikroişlemci belleği, bu bellekte genelde kontrol cihazının çalışma sırasını kontrol eden bir program saklanır. Bu program, kullanıcı tarafından <i>bir kere</i> programlanabilir, sonradan değiştirilemez. Enerji kesildiğinde program kaybolmaz.
Protokol	Ağdaki iki haberleşme cihazı arasında mesaj alışverişi için zamanlama şartlarını, hata tespitini, akış kontrolünü ve tüm yazılımı belirten resmi kurallar kümesi.
PWM	Darbe Genlik Modülasyonu , çıkış AC geriliminin büyüklüğünü kontrol etmek ve akım dalga biçiminin şeklini iyileştirmek için birçok modern Değişken Hızlı AC Sürücünün invertöründe kullanılan modülasyon tekniği.
QA	Kalite Güvencesi [<i>Quality Assurance</i>] , herhangi bir cihazın ya da tesisin tasarımının, imalatının, deneyden geçirilmesinin ve kurulumunun tüm yönlerinin yakından denetlenmesini

hedefleyen bir yönetim ve dokümantasyon prosedürü.

QC

Kalite Kontrol, Kalite Güvencesinin denetim prosedürleri.

RAM

Rastgele Erişilen Bellek [Random Access Memory], bir mikroişlemciye hızlı bir şekilde erişilmesine imkân veren, okunabilen/yazılabilen uçucu bellek. Hesaplama ve/veya implementasyon sırasında geçici verinin tutulması için kullanılan bellek. Enerji kesilirse, yedek batarya yoksa RAM'deki veri kaybolur.

Reaktans

Elektrik devresine alternatif gerilim uygulandığında, devrenin indüktansının ($X_L = j\omega L$ ohm) ya da devrenin kapasitansının ($X_C = 1/j\omega C$ ohm) akıma karşı koyması.

Direnç

Bir elektrik devresine gerilim uygulandığında akıma karşı koyma derecesi, ohm cinsinden ölçülür. $Direnç = Gerilim/Akım$.

RF

Radyo Frekansı, duyulabilir aralığın üstündeki yüksek frekanslı dalga biçimlerine atıf yapar.

RFI

Radyo Frekansı Enterferansı, frekansları Radyo Frekans aralığında yer alan gürültü.

ROM

Sadece Okunabilir Bellek, nispeten yavaş erişme özelliğine sahip uçucu-olmayan mikroişlemci belleği, bu bellekte genelde kontrol cihazının çalışma sırasını kontrol eden bir program yer alır. Bu program, imalat sırasında ROM'da saklanır ve kullanıcı tarafından değiştirilemez. Enerji kesildiğinde program kaybolmaz.

RS-232

Bu standart, günümüzde EIA-232 ya da TIA-232 olarak da adlandırılır. DTE ve DCE ile gösterilen iki cihaz arasındaki fiziksel ara yüzün elektriksel ve mekanik ayrıntılarını tanımlayan bir standarttır. Bu standart, dengeli olmayan bakır tel ara yüzünden seri ikili veri alışverişini gerçekleştirir.

RS-422

Bu standart, günümüzde EIA-422 ya da TIA-422 olarak da adlandırılır. İki ya da daha çok sayıda cihaz arasındaki fiziksel ara yüzün elektriksel ayrıntılarını tanımlayan bir standarttır. Bu standart, dengeli diferansiyel bakır tel ara yüzünden seri ikili veri alışverişini gerçekleştirir.

RS-485

Bu standart, günümüzde EIA-485 ya da TIA-485 olarak da adlandırılır. İki ya da daha çok sayıda cihaz arasındaki fiziksel ara yüzün elektriksel ayrıntılarını tanımlayan bir standarttır. Bu standart, dengeli diferansiyel bakır tel ara yüzünden seri ikili veri alışverişini gerçekleştirir. Bu standart, ağ üzerinde 32 taneye kadar vericiye ve 32 taneye kadar alıcıya imkân veren uygun çıkışlara sahip Üç-Durumlu çalışma özelliğine sahip vericileri tanımlar.

RTD

Direnç Sıcaklık Cihazı, sıcaklığın dirençle doğru orantılı olduğu termometre algılayıcı tipi.

RTU

Uzak Terminal Birimi, programlanabilir bir kontrolörden (oldukça) uzağa monte edilebilen giriş/çıkış terminal birimi. Aralarındaki haberleşme, tel, fiber, radyo, modem, taşıyıcı ya

da başka uygun bir araçla gerçekleştirilebilir.

SAA	Avustralya Standartlar Birliği, Avustralya'daki temel standart kurumudur.
SCIM	Sincap Kafesli İndüksiyon Motoru , endüstride yaygın olarak kullanılan bir indüksiyon motoru tasarımı.
SCR	Silikon Kontrollü Doğrultucu , Tristörün diğer ismi.
SEC	Devlet Enerji Komisyonu [State Energy Commission] , Avustralya'daki güç besleme sistemlerini çalıştıran kurumun adı.
Sec	Saniye , zaman ölçüm birimi.
Seri Haberleşme	Bilgi bitlerinin tek bir veri kanalı üzerinden ardışık olarak gönderildiği veri iletim modu.
SI	Système Internationale , Uluslararası metrik birim sistemi, ISO Tavsiye Kararı R1000 olarak 1969'da kabul edilmiştir.
SMT	Yüzey Montaj Teknolojisi , elektronik bileşenleri PC kartının yüzeyine monte etmek için kullanılan teknik.
STP	Siperli Bükümlü Çift , genelde indüklenen gürültünün etkisini azaltmak için birbirine bükümlü olarak bağlanan yalıtımlı bakır tel çiftinden oluşur. Bükümlü çift etrafında sadece tek bir uçta topraklanan iletken siper, kapasitif olarak eşleşen gürültüye karşı ekranlama sağlar. 20 Mbps'ye kadar olan hızlarla, STP, veri iletimi için kullanılabilir.
TDM	Zaman Bölmeli Çoğullama , çok sayıda haberleşme kanalının aynı linki kullanmasını sağlamak için mevcut iletim süresini dar zaman bloklarına bölme tekniği. Farklı mesajları çözmek için, alıcı uçta bir çoğullama çözümü kullanılır.
Tristör	Tristör, Anot, Katot ve Kapı olarak adlandırılan üç terminale sahip yarı iletken bir "anahtardır". Anot-Katot terminallerinde ileri yönde bir gerilim mevcutsa ve Kapıya (G) bir akım uygulanırsa, Anoda (A) doğru ve Katottan (K) dışarı akım akacaktır. Anot akımı azaltıldığında ($\leq$ sıfır) tristör faal olmayan hale gelir.
TEFC	Tamamen Kapalı Fan Soğutmalı , elektrik motoru soğutma metodu.
TO/L	Termal Aşırı Yük (Röle) , elektrik motoru gibi, elektrik yükünün termal karakteristiklerini simüle etmek için bimetal bir şerit kullanan ve akımı izleyen bir cihaz.
TPR	Termistör Koruma Rölesi , direnç önceden ayarlanmış bir seviyeyi aştığında, bir röle kontağını kapatan ve termistör direncini izleyen elektronik bir cihaz.
TPU	Termistör Koruma Birimi , Terminal Koruma Rölesi için kullanılan başka bir isim (yukarıya bakılmalıdır).



TTL	Transistör-Transistör Lojiği , + 5 volt = Lojik 1 ve 0 volt = Lojik 0 olacak şekilde pozitif DC lojiğini kullanır.
UTP	Sipersiz Bükümlü Çift , genelde, indüklenen gürültünün etkisini azaltmak için birlikte bükülen yalıtımlı bir bakır çiftinden oluşur. İletken ekran yoktur. UTP, 20 Mbps'ye kadar olan hızlardaki veri iletimi için kullanılabilir.
UL	Underwriters Laboratory Inc , Amerika'daki kamuya ait deney Enstitüsü.
VDE	Verband Deutcher Elektrotechniker , genelde eş değer IEC standartlarıyla uyumlu Alman Standartları (DIN).
VSD	Değişken Hızlı Sürücü , mekanik olarak ya da elektronik bir kontrol devresi vasıtasıyla, motorun ya da motora bağlanan mekanik cihazın hızını kontrol eder.
VSI	Gerilim Kaynağı İnvertörü , invertörün arkasındaki gerilim değişim hızının (dV/dt), DC linke paralel bağlanan büyük bir kondansatör tarafından sınırlandırıldığı bir frekans konvertör konfigürasyonu.
VVVF	Değişken Gerilimli Değişken Frekanslı (Konvertör) , bu sistemde, AC motordaki akıyı sınırlandırmak ve hızı kontrol etmek için konvertörün gerilim ve frekans çıkışı kontrol edilir.
WAN	Geniş Alan Ağı , haberleşme kanallarının paylaşıldığı çok sayıda akıllı cihazı bağlayan bir veri haberleşme sistemidir. WAN genelde geniş bir coğrafi bölgede kullanılır.

SONSÖZ

Hem AC ve hem de DC motorlara dönük olarak biraraya getirilen bu notlar, Moreton'un Brushless Servomotors, IDC Technologies'in Elektrik Motorları ve Sürücüler, Dönen Makinalar Bakım ve Onarım ile Endüstriyel DC Motorlar kurs notları ve Leroy Somer Moteurs, Rockwell Allen-Bradley, Sprecher+Schuh, Electro-Craft Servomotors, Control Techniques, Allen-Bradley, Odendal EJ, Schaffner Elektronik AG, Servo System vb gibi imalatçı firmaların el kitapları ve uluslararası standart kurumlarının tanımlarından yararlanılarak derlenmiştir.

Bu notların 1. cildinde, AC Motorları ve sürücülerine yer verilmiştir. İlk cilt, toplam 11 bölümden ve 375 sayfadan oluşmaktadır. İlk bölümde elektrikli makinalar ve AC güç sistemleri gibi motor teknolojilerinin temelleri anlatılmaktadır. 2. bölüm AC Motor teorisine, motorun yapısı ve bakımına ayrılmıştır. Tekfaz ve üç faz motorların çalışması, mahfazalar, motor beyan değerleri, motorun başlatılması, hızlandırılması ve durdurulması, ileri geri çalıştırma, motor ölçümleri, motor kontrol, motor arızaları yer almaktadır. 3. bölüm üç fazlı endüksiyon motorlarının çalışma ilkeleri, elektrik ve mekanik performansları, endüksiyon jeneratörünün performansı, soğutma-havalandırma, motorun görev çevrimleri vb anlatılmaktadır. 4. bölüm motor koruma röleleri, 5. bölüm güç elektroniği üzerine detaylandırılmıştır. 6. bölümde AC konvertörlerin ve motorların korunması, akım ve sıcaklık algılayıcıları vb anlatılmaktadır. 7. bölümdeğişken hızlı AC sürücülere ilişkin kontrol teknikleri detaylandırılmaktadır. 8. bölüm değişken hızlı sürücü uygulamaları için AC konvertör seçimi, sincap kafesli motorların yüklenmesi, makina yükünün yapısı, hız, tork ve doğruluk kontrolleri vb anlatılır. 9. bölüm değişken hızlı AC sürücülerin kurulması ve işletmeye alınması, çevre şartları, bağlantılar ve topraklama, koruma şartları da anlatılarak verilmektedir. 10. bölüm özel başlıklar ve AC motorlarla ilgili yeniliklere ayrılmıştır. 11. bölümde akım ve hız ölçme transdüserleri, motor koruma değerleri, standartlar, kafesli motorların verimi ve AC motorlar için bir terimler sözlüğüne yer verilmiştir.

İkinci cilt toplamı 170 sayfa kadardır ve DC motorlara ayrılmıştır. 2. cildin ilk bölümünde fırçalı, kalıcı mıknatıslı motorla ilgili kısa bir bilgi verilmektedir. Bu, daha tanıdık bir makinanın kullanılarak bazı temel bilgilerin verilmesine ve ayrıca daha sonra fırçasız tiple daha açık bir karşılaştırma yapılmasına olanak vermektedir. İkinci bölümde fırçasız makinalara giriş yapılmış ve fırçasız motorların endüstride yaygın kullanımı dolayısıyla bu bölümden sonrası fırçasız servo motorlara ayrılmıştır. Sürekli mıknatıslama ve manyetik alanlar, üç sargılı fırçasız motorlar anlaşıldıktan sonra 3. bölümde fırçasız komutatorler, güç elektroniği de anlatılarak ve algılayıcılara da giriş yapılarak anlatılmıştır. 4. bölümde motor ve yük dinamikleri anlatılmaktadır. Son bölümde motor beyan değerleri ve motor seçimi anlatılmıştır. Notların bu ikinci cildi servo mekanizmalarda fırçasız motorlar kullananlar kadar elektrik ve mekanik özelliklerini incelemekte olanlara da yardımcı olacaktır.

Elektrik motorları ile ilgili okuduğunuz bu notların EMO kanalı ile yayınlanması için başından beri desteğini esirgemeyen Orhan (Örücü) Ağabeyimize, derlemenin hazırlanmasında katkılarından dolayı Emre (Metin) ve Hakkı (Ünlü) kardeşlerimize teşekkür ederiz. Ayrıca bu tür mesleki yayınların e-kitap olarak çok düşük bedeller ile meslektaşlarına kazandırmak için bu yayın portalını oluşturma kararı alan 42. Dönem EMO Yönetimine bu öncü rolünden dolayı teşekkür ederiz.

E-Kitabı Derleyen ve Yayına Hazırlayan
İbrahim Aydın Bodur

Sağda kalacak boş sayfa

DERLEYEN: AYDIN BODUR ELEKTRİK MOTORLARI (1) AC MOTORLAR VE SÜRÜCÜLERİ



e-kitap

EMO Yönetim Kurulu 42. Dönem'de(Kasım 2010) bir yayın portalı oluşturdu. Bu yayın portalı üzerinde,daha önce de sürdürmekte olduğumuz, basılı dergilerimizin İnternet sürümleri, basılı kitaplarımızın tanıtımları ve çevrim içi satın alma olanakları ile doğrudan İnternet üzerinden bilgisayarınıza indirebileceğiniz e-kitapları çok düşük bedellerle edinebilme olanağına sahip olacaksınız.

İnternet sitemiz üzerinden e-kitap dağıtım hizmetini, yakında hizmete girecek olan EMO Yayın Portalı'nın öncülü olan, sitemizin yayın bölümünde yer alan e-kitaplarla uzunca bir süredir veriyorduk. Yayınlarımızı izleyenler hatırlayacaktır, ilk e-kitabımız, EMO üyesi Arif Künar'ın "Neden Nükleer Santrallere Hayır" kitabının PDF baskısıydı. Hükümetin Akkuyu'da nükleer santral kurma inadı maalesef hala kırlamadı. Dört yıl önce baştığımız bu kitap hala güncel!....

EMO'nun İnternet sitesi üzerinden hizmete giren bu yeni sitemizde yeni e-kitaplarla hizmete açıldı. Sizlerde varsa yayınlamak istediğiniz kitaplarınızı, notlarınızı bize iletebilirsiniz. Bu yayınlar yayın komسیونumuzun değerlendirmesinden sonra uygun bulunursa yayınlanacak ve eser sahibine EMO ücret tarifesine göre ücret ödenecektir. E-Kitaplar tarafımızdan yayımlandıkça üyelerimize ayrıca eposta ile iletilecektir.

Saygılarımızla

Elektrik Mühendisleri Odası
42. Dönem Yönetim Kurulu

TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası

İhlamur Sokak No:10 Kat:2 Kızılay/Ankara

Tel: (312) 425 32 72 Faks: (312) 417 38 18

<http://www.emo.org.tr> E-Posta: emo@emo.org.tr

EMO YAYIN NO: EK/2010/2