

AC FREKANS KONVERTÖRLERİNİN OLUŞTURDUĞU HARMONİKLER VE HARMONİK AZALTIMI YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Uğur Yaşa

Aktif Kompanzasyon ve Harmonik Filtre Sistemleri Sanayi ve Ticaret A.Ş.

ugur.yasa@aktif.net

Özet

Güç elektroniği temelli cihazlar tarafından üretilen harmonik akımları, tesislerde ciddi güç kalitesi problemleri oluşturmaktadır. Özellikle motor kontrolü için yaygın olarak kullanılan 3 faz AC frekans konvertörleri, topolojik yapısında bulunan doğrultucu katı nedeniyle çalışma esnasında harmonik akımları üretir. Bu çalışmada, bir 3 faz AC frekans konvertörünün oluşturduğu harmoniklerin frekans konvertörü yapısına ve filtreleme tipine göre nasıl değiştiği incelenmiştir. Farklı yük ve uygulama tiplerine göre, akım harmonik bozulması (%THDI) değerleri karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: AC frekans konvertörü, AC sürücü, Harmonikler, Güç kalitesi, Harmonik filtreler

1. Giriş

Bu makalede harmonik distorsiyonu, harmonik kaynakları, harmoniklerin neden olduğu arızalar ve hesaplamalara yer verilmiştir. AC frekans konvertörleri tarafından üretilen harmoniklerin çözüm yöntemleri

burada,

$I'_1 = \text{toplam RMS akım}$

$I_d = \text{doğrultucunun çıkış akımı}$

Buna göre temel bileşen akımı,

$$I_1 = I'_1 * \frac{3}{\pi}$$

Teorik olarak doğrultucunun çıkış akımı temiz DC akım olarak düşünülebilir. 6 darbeli 3 fazlı doğrultucunun harmonik akım frekansları ile temel şebeke frekansının n tam katlarıdır [1,2]. Aşağıdaki bilgi, hat endüktans değerinin DC reaktör endüktansına göre ihmal edilebilir olması halinde geçerlidir.

değerlendirilmiştir. Çözüm yöntemlerinin birbirlerine karşı üstünlükleri ve dezavantajları ele alınmıştır.

2. Harmonikler hakkında genel bilgiler

Harmonik akım ve gerilimleri, şebekeye bağlı yarı-iletkenler içeren yükler tarafından oluşturulurlar [1,2]. Bir tesiste harmonik akımlarının belirli sınır değerleri aşması ile harmonik bozulması çeşitli problemler oluşturmaya başlar.

Farklı elektronik sistemlerde kullanılan güç elektroniği dönüştürücüleri, direkt olarak şebekeye harmonik akımları enjekte ederek şebekede bozucu etki yaratır. Bir güç elektroniği dönüştürücüsünün şebekeden çekeceği akım (is) içerisindeki temel bileşen (i1) ve harmonik (ih) akımları aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$i_s(t) = i_1(t) + \sum i_h(t)$$

Bir 3 fazlı 6 darbeli doğrultucunun giriş akımı, çıkış akımı üzerinden aşağıdaki gibi hesaplanır [3].

$$I'_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} * I_d$$

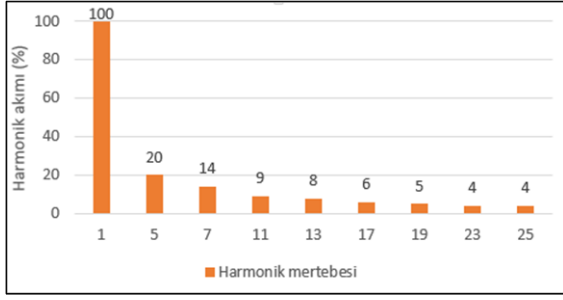
Harmonik mertebeleri aşağıdaki formüle göre hesaplanır.

$n = 6k \pm 1$, burada $k = 1,2,3, \dots$

Harmonik bileşenlerin RMS değeri:

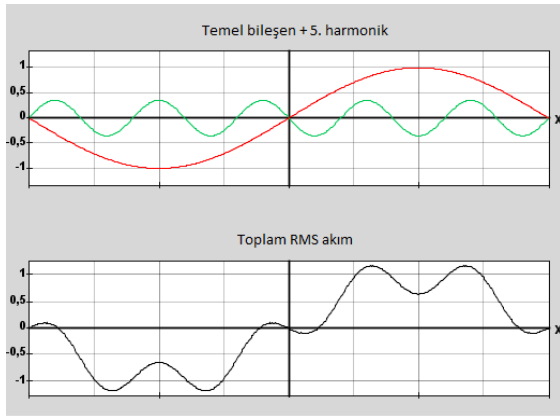
$$I_{ni} = \frac{I_1}{n}$$

olup, harmonik bileşenler Şekil.1'de gösterilmiştir.



Şekil.1 6 darbeleri doğrultucunun teorik kare dalga akımının harmonik akımı içeriği

Harmonik akımlarının temel bileşen akımına eklenmesi ile oluşan dalga şeklinin değişimi Şekil.2’de gösterilmektedir. Temel bileşene sadece 5. Harmonik akımı eklenmiştir.



Şekil.2 Temel bileşen ve 5. harmonik bileşeninin oluşturduğu toplam akım

3. Harmonik Kaynakları ve Şebekeye Etkileri

Endüstriyel ve ticari işletmelerde yaygın olarak kullanılan ve yapısında yarı-iletkenler içeren motor yol vericileri, frekans konvertörleri, bilgisayarlar ve diğer elektronik ofis donanımları, elektronik balastlı lambalar ve LED’ler, kesintisiz güç kaynakları, kaynak makinaları ve ark ocakları gibi cihazlar harmonik akımlarını üretirler [2].

Harmonikler, transformatör, motor, kablo ve diğer iletken aksamda aşırı ısınma ve yanmalara, güç kondansatörlerinde patlama ve arızalara neden olur. Aynı zamanda, elektronik kart arızalarına, şalter ve diğer koruma ekipmanında hatalı çalışmalara sebebiyet verir. Hassas ekipmanlarda ölçüm ve okuma hataları da harmonikler tarafından kaynaklanan arızalar olarak sıralanabilir. Aynı zamanda, RMS akımdaki artış sebebiyle, harmoniklerin kayıplara neden olduğu da söylenebilir.

Yukarıdaki belirtilerden biri veya birkaçı tesiste görülüyorsa, tesisin elektrik altyapısındaki harmonik

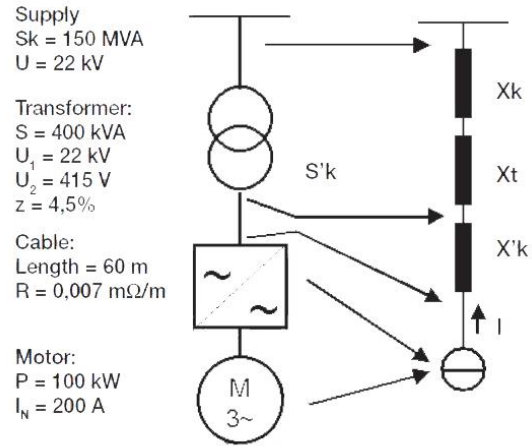
kaynaklarını analiz etmek gerekecektir. Tesisteki harmonik kaynakları nedeniyle oluşan harmonikler, yalnızca tesis içerisinde değil, bağlı buldukları şebekeye de bozucu etkiler yapacaktır. Bir tesis harmonikler bakımından incelenirken, buna da dikkat etmek gerekir.

Bu çalışmada temel olarak 3 faz 6 darbeleri frekans konvertörlerinin harmonik etkileri üzerinde durulacaktır.

4. 3 faz 6 darbeleri frekans konvertörünün yapısı ve boyutlandırılması

Harmonik akımları, bara geriliminde bozulmaya yol açar. Şebeke empedansları ve harmonik akımları biliniyorsa, teorik olarak şebeke üzerindeki herhangi bir noktanın gerilim harmonikleri hesaplanabilir. Şekil.3’te gösterilen devre şeması şebekeden beslenen frekans konvertörü ve diğer bileşenleri göstermektedir. Frekans konvertörü harmonik bozulması hesaplamaları esnasında ABB DriveSize yazılımı kullanılmıştır.

Takip eden şekillerde, modelleme esnasında kullanılan verilere ve bu verilere göre oluşan harmonik bozulma miktarlarına yer verilecektir.



Şekil.3 Frekans konvertörü ve motor bilgilerini gösteren devre şeması. Teknik veriler sol taraftaki sütunda gösterilmektedir.

Motor load

Load type: Const. torque/power

Overload type: One overload

	min	base	max
Speed [rpm]	0	1450	1500
Power [kW]	0	100	100
Overload [%]		100	100

Overload time [s]: 60 every [s]: 600

Şekil.4 Motor yükü verisi. Harmonik hesaplaması için gereken en önemli motor verisi kW cinsinden motor yükü verisidir.

Selected motor data
M2BA 315 SMC 6

Selection	DriveSize
Voltage [V]	415
Connection	D
Frequency [Hz]	50
Power [kW]	110
Poles	6
Speed [rpm]	992
Max mech.speed [rpm]	2300
Current [A]	197
Torque [Nm]	1060
T max/Tn	3,2
Power factor	0,82
Efficiency [%]	95,6
Insulation class	F

Şekil.5 Seçilen motor teknik verileri.

Selected inverter data
ACS607-0140-3

Selection	User
Selection method	Current (normal)
Voltage [V]	400
Drive power [kVA]	140
Pn [kW]	110
Normal Icont [A]	216
Normal Imax [A]	238
Phd [kW]	90
Heavyduty Icont [A]	178
Heavyduty Imax [A]	267
Pulse	6
Frame type	R8
P&F 12Nsq [A]	260

Şekil.6 Inverter seçimi

Supply unit data

Pulse #: 6

Lv [µH]: 110

Cdc [mF]: 4,95

Udc [V]: 560

Idc [A]: 191

Şekil.7 Inverter besleme ünitesi verisi. Inverter seçimine bağlı olarak değerler modelleme programı tarafından belirlenmiştir.

Primary voltage [V]: 22000 Secondary voltage [V]: 415

Frequency [Hz]: 50

Network Sk [MVA]: 150 unknow

Transformer Sn [kVA]: 400

Transformer Pk [kW]: 3,0

Transformer Zk [%]: 3,8

Supply cable type: Cable Busbar

Cable quantity: 3 Impedance [µΩ]: 70

Cable length [m]: 60

Şekil.8 Şebeke ve transformatör verileri.

THD

	Current	Voltage	n	f [Hz]	Current [A]	In/I1	Voltage [V]
Result	47,1%	0,2%	1	50	2,8	100,0%	21996,6
IEEE Calc	0,2%/	0,2%/	5	250	1,2	41,2%	32,9
IEEE Limit	15,0%	0,5%	7	350	0,6	19,5%	21,7
			11	550	0,2	8,6%	15,1
			13	650	0,2	5,6%	11,7
			17	850	0,1	4,2%	11,3
			19	950	0,1	2,7%	8,1
			23	1150	0,1	2,3%	8,2
			25	1250	0,0	1,4%	5,5
			29	1450	0,0	1,2%	5,3
			31	1550	0,0	0,8%	3,7
			35	1750	0,0	0,5%	3,0
			37	1850	0,0	0,6%	3,3

Data

Primary side Secondary

Show Mode

Table Graph

Şekil.9 Hesaplanan akım ve gerilim harmonikleri

Modelleme programı, girilen motor, trafo ve inverter bilgilerine göre frekans konvertörü giriş akımı için Fourier analizi gerçekleştirerek harmonik akımlarının genliklerini hesaplamaktadır [6]. Hesaplanan harmonik gerilimleri ise, harmonik akımlarının şebeke, trafo ve inverter besleme ünitesi empedansları üzerinden geçerek endüklemediği gerilimlerdir.

Modellemede 6 darbeli doğrultucu topolojisine sahip 100 kW gücündeki motor için seçilen frekans konvertörünün akım harmonik bozulması (%THDI) miktarı %47,1 olarak bulunmuştur.

5. Akım harmonikleri ile ilgili limit değerler

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan standart frekans konvertörleri, IEEE519-2014 standardı tarafından belirlenen akım harmonikleri sınırlarına genel olarak

uyamamaktadır. Tablo.1’de, IEEE519 standardında bahsedilen akım harmonikleri sınır değerleri bulunmaktadır [6].

Tablo.1 IEEE519 akım harmonikleri sınır değerleri

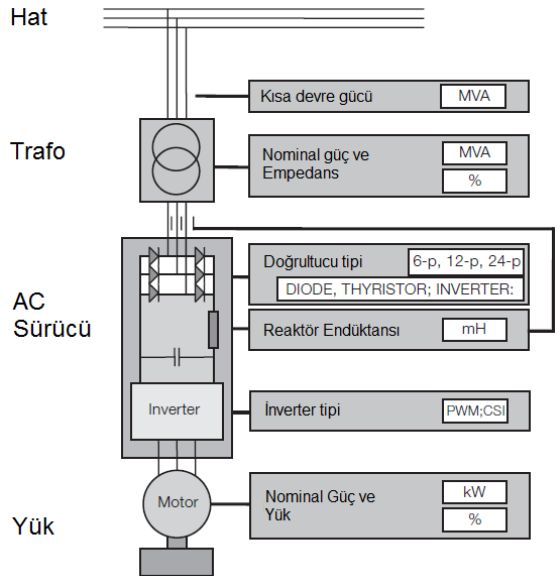
I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 < h < 35$	$35 < h$	THDi (%)
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Bu tabloda belirtilen I_{sc}/I_L oranı, şebeke ortak bağlantı noktasındaki (PCC) kısa devre akımının tesis yük akımına oranını ifade eder.

6. Harmoniklerin AC frekans konvertöründe yapılacak yapısal değişikliklerle azaltımı

Harmonikler frekans konvertöründe yapısal değişikliklere gidilerek veya harici bir filtrasyon yapılarak azaltılabilir. Frekans konvertöründeki yapısal değişiklikler kaynağı güçlendirme, 12 veya daha fazla darbeleri yapı kullanma, kontrollü doğrultucu kullanma veya konvertör içi dahili filtrelemeyi arttırmak olabilir [7].

Şekil.10’de bir frekans konvertöründeki harmoniklere etkisi olan parametreler görülebilir. Frekans konvertörünün akım harmonikleri sürücü konfigürasyonuna, gerilim harmonikleri ise şebeke empedansının akım harmonikleriyle çarpılmasına bağlıdır.



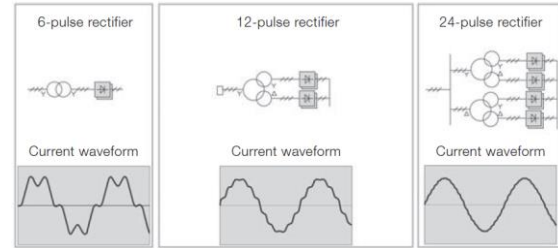
Şekil.10 Sürücüde harmonikleri etkileyen faktörler

Tablo.2 Harmonik bozulmayı etkileyen faktörler ve bunların etkileri

Faktör	Etki
Daha büyük motor	Daha yüksek akım harmoniği
Daha yüksek motor yükü	Daha yüksek akım harmoniği
Daha yüksek DC ya da AC endüktans	Daha düşük akım harmoniği
Daha yüksek darbeleri doğrultucu	Daha düşük akım harmoniği
Daha büyük transformatör	Daha düşük gerilim harmoniği
Daha düşük transformatör empedansı	Daha düşük gerilim harmoniği
Daha büyük şebeke kısa devre gücü	Daha düşük gerilim harmoniği

6.1. 6 darbeleri doğrultucu kullanımı

Farklı darbe sayısına sahip doğrultucu bağlantıları Şekil.11’de gösterilmiştir. En çok kullanılan 3 fazlı AC frekans konvertörü doğrultucusu 6 darbeleri modeldir. Bu yapı 6 adet kontrolsüz diyot ve DC akımı düzenlemeye yarayan DC kondansatörlerle beraber bir endüktans içerir. Bobin AC veya DC tarafta olabilir veya tamamen dışarıda tutulabilir. 6 darbeleri doğrultucu basit ve ucuz bir çözüm olmasına rağmen, özellikle düşük endüktanslı bobin ile kullanıldığında 5., 7. ve 11. harmonikleri yüksek miktarlarda üretmektedir[6,7].



Şekil.11 Farklı doğrultucu konfigürasyonlarına göre giriş akımı harmonikleri

6.2. 12 darbeleri veya 24 darbeleri diyot doğrultucu kullanımı

12 darbeleri doğrultucu, 2 adet 6 darbeleri doğrultucunun ortak DC barayı besleyecek şekilde paralellenmesi ile oluşturulur. Doğrultucuların girişi için bir adet çift sekonderli transformatör veya 2 adet tek sekonderli ancak bağlantı grupları farklı transformatör kullanılır. Her iki doğrultucuyu besleyecek trafo sekonderleri arasında 30° faz kayması vardır. Bu konfigürasyonun faydası, transformatörlerin şebeke besleme tarafından bazı harmoniklerin açığı nedeniyle ortadan kalkmasıdır. Teoride, çift sekonderli transformatörün

şebeke besleme tarafında görülecek en küçük mertebeli harmonik 11. 'dir.

Bu yapının temel dezavantajı ise 6 darbelye göre yüksek maliyetli özel transformatör kullanılması gereğidir.

24 darbelye doğrultucunun prensip şeması da figür y'de görülmektedir. Bu yapıda 2 adet paralel ve aralarında 15° faz kayması bulunan çift sekonderli transformatör bulunur. Neredeyse tüm düşük mertebeli harmonikleri ortalan kaldırmasına rağmen maliyet yüksekliği ciddi bir dezavantajdır. Buna rağmen 24 darbelye doğrultucu, çok büyük güçlü frekans konvertörü uygulamalarında düşük harmonik bozulması için en uygun maliyetli çözüm olabilir [3].

6.3. Faz kontrollü tristörlü doğrultucu kullanımı

Faz kontrollü doğrultucu, 6 darbelye diyot doğrultucuda bulunan diyotların tristörler ile değiştirilmesi ile oluşturulur. Tristörün kesimden iletme geçmesi için bir tetikleme ihtiyacı duyması sayesinde, tristörün iletme geçmesi için gereken faz açısı gecikmesi ayarlanabilmektedir. Ateşleme açısını 90°'nin üzerinde geciktirmek, DC bara gerilimini negatif tarafa geçirir. Bu da, rejeneratif enerjinin DC baradan şebekeye doğru akışına izin verir.

Standart DC bara ve inverter konfigürasyonları DC bara gerilimi üzerinde polarite değişimine izin vermez. Bunun yerine yaygın olarak ikinci bir tristör köprü birinciye ters-paralel bağlanır ve akım polarite değişimini mümkün kılınır. Bu konfigürasyonda ilk köprü doğrultma modunda, ikinci köprü ise rejenerasyon modunda çalışır.

Faz kontrollü doğrultucular ayrıca şebeke gerilimi üzerinde komütasyon çentikleri de oluştururlar. Çentikler özellikle şebeke kısa devre gücü düşük sistemlerde ciddi anahtarlama hatalarına neden olurlar. Çentiğin açılma pozisyonu, sürücünün anahtarlama açısı ile ilgili değişir.

Şekil.12'de,

$R_{sc} = \text{Kısa devre oranı (PCC noktasındaki kısa devre gücü / tesis toplam gücü)}$

Doğrultucu Tipi	Akım THD (%)	Gerilim THD (%) Rsc=20	Gerilim THD (%) Rsc=100	Akım dalga şekli
6 darbelye doğrultucu	30	10	2	
12 darbelye doğrultucu	10	6	1,2	
IGBT tipi	4	8	1,8	

Şekil.12 Farklı doğrultucu tiplerine göre bozulma miktarları. Bozulmalar RMS değere göre % olarak verilmiştir. Değerler uygulamaya bağlı değişebilir.

6.4. IGBT köprü kullanımı

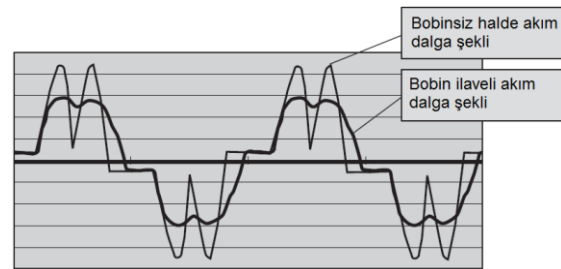
Doğrultucu köprü topolojisinde, faz kontrollü veya kontrolsüz güç elektroniği elemanları yerine kendinden kontrollü elemanları kullanmanın birçok avantajı bulunur. Faz kontrollü doğrultucularda olduğu gibi, IGBT doğrultucularda da rejeneratif çalışma mümkündür, ayrıca yük akış yönünden bağımsız olarak DC bara gerilimi ve güç faktörü de ayarlanabilmektedir.

IGBT doğrultucularda şebekeden çekilen akım dalga şekli neredeyse sinüsoidaldir. Düşük mertebeli harmonikleri çok düşük üretmesine rağmen bazı durumlarda yüksek mertebeli harmonikleri görece yüksek üretebilir. IGBT doğrultucu ile reaktif güç üretebilme imkanı da vardır.

IGBT doğrultucunun temel dezavantajı IGBT köprüden kaynaklanan yüksek maliyetidir.

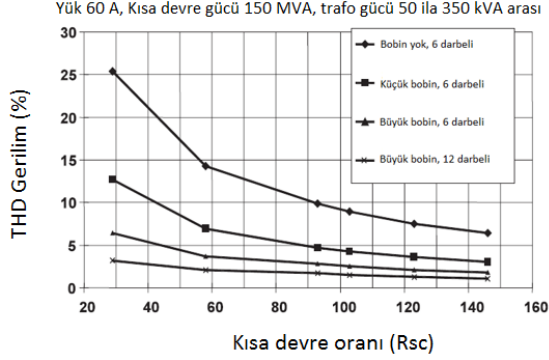
6.5. Daha büyük endüktansa sahip DC veya AC bobin kullanımı

Frekans konvertörünün AC girişine veya DC barası üzerine yeterince büyük bir bobin bağlamak frekans konvertörünün harmonik bozulmasını ciddi oranda azaltacaktır. Şekil.13'de bobinin koyulduğu ve koyulmadığı uygulamadaki dalga şekli değişimi görülmektedir.



Şekil.13 Bobin eklenmesinin hat akımına etkisi

Akım harmoniğine bağlı olarak gerilim harmoniğinin miktarı, şebeke kısa devre oranına (Rsc) bağlı olarak değişecektir. Oranın yüksek olması, daha düşük gerilim distorsiyonunu ifade eder. Şekil.14’te şebeke kısa devre oranına göre oluşacak gerilim harmonik bozulması miktarları görülmektedir.



Şekil.14 Sürücü tipi ve trafo boyutuna göre THD gerilimler

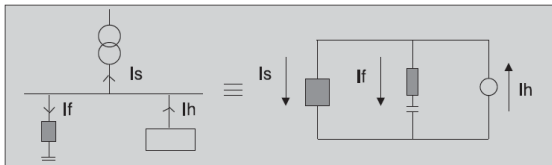
Sürücüde AC veya DC tarafa koyulan bobinin endüktansı ne kadar artarsa, frekans konvertörü girişindeki akım harmonikleri o kadar azalacaktır. Akım harmoniklerinin azalmasıyla, akım harmonikleri tarafından endüklenen gerilim harmonikleri de aynı şekilde azalacaktır.

7. Harmonikleri azaltmak için diğer yöntemler

Endüstriyel ve ticari işletmelerde filtreleme harmonik azaltımı için uygulanan en temel yöntemdir. Filtreleme yöntemleri, temel olarak aktif ve pasif filtreler olarak ikiye ayrılabilir.

7.1. Tek kol ayarlı pasif filtreler

Tek kol ayarlı (tuned single arm) pasif filtre için prensip şeması Şekil.15’te gösterilmektedir. Tek kol ayarlı filtreler, sistemde harmonik bozulmasının belirgin olduğu düşük mertebeli bir harmonik frekansına akort edilirler [5]. Endüstriyel uygulamalardaki yüklerden kaynaklanan bu harmonik genellikle 5. ve 7. harmonik frekansları olan 250 Hz ve 350 Hz’dir.



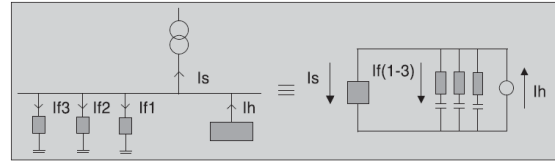
Şekil.15 Tek kol ayarlı pasif filtre prensip şeması

Tuned filtreler, şebeke eşdeğer empedansı sürekli değişmeyen veya görece sınırlı değişen uygulamalarda

daha yüksek başarı gösterir. Filtrenin harmonik süzme performansı, sisteme şebeke frekansında eklenebilecek kondansatör miktarı ve şebekenin kendi bozulma miktarı ile yakından ilgilidir. Alçak gerilim uygulamalarında çok çeşitli harmonik kaynağı yük farklı zamanlarda devreye girip çıktığı için, tek kol ayarlı filtrenin tasarımına bağlı olarak aşırı yüklenmesi söz konusu olabilir. Yüksek gerilim uygulamalarında ise daha az yük ve daha az değişken şebeke empedansı nedeniyle filtreleme performansı daha yüksektir.

7.2. Çoklu kol ayarlı pasif filtreler

Çoklu kol ayarlı (tuned multiple arm) pasif filtre için prensip şeması Şekil.16’da gösterilmektedir. Çoklu kol ayarlı pasif filtreler, sistemde harmonik bozulmasının belirgin olduğu düşük mertebeli birden fazla harmonik frekansına akort edilir [5]. Tek kol ayarlı filtreye göre filtreleme performansı daha yüksektir.

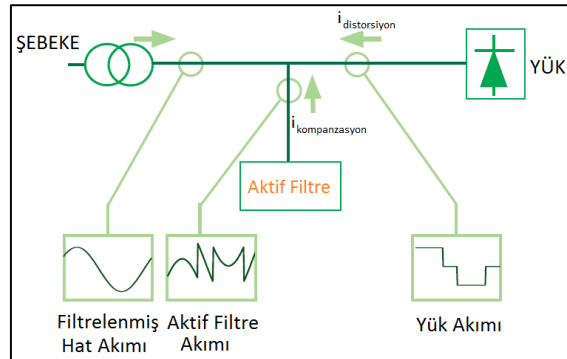


Şekil.16 Çoklu kol ayarlı pasif filtre prensip şeması

Çoklu kol tuned pasif filtreler, özellikle büyük güçlü DC frekans konvertörlerinin olduğu tesislerde kullanılırlar. Filtrelerin devreye girişi küçük frekanslı koldan büyük frekanslı kola doğru olacak şekilde yapılmalıdır. Aynı şekilde filtrelerin devreden çıkışı da büyük frekanslı koldan küçük frekanslı kola doğru olacak şekilde gerçekleştirilmelidir.

7.3. Aktif Filtreler

Pasif filtreler oluşturdukları yeni rezonans devreleri nedeniyle yeni harmonik problemlerine de sebep olabilirler. Gelişen güç elektroniği sistemleri sayesinde harmonik akımları aktif kontrol elemanları ile sınırlandırabilmektedir. Şekil.17’de aktif filtrenin temel çalışma prensibine yer verilmiştir.



Şekil.17 Aktif filtre çalışma prensibi

Aktif filtreler, kirletici yüke paralel bağlanan güç elektroniği temelli bir sistemdir. Aktif filtre, kirletici yük tarafından çekilen kirli akımı ölçer ve bu akımdaki harmonikleri frekanslarına göre analiz eder, daha sonra bu harmonik akımlarıyla aynı genlik ve frekansta ama ters fazdaki akımı üreterek şebekeye basar. Bu sayede, aktif filtrenin bağlandığı noktadan şebekeye kadar uzanan kısım, harmoniklerden arındırılmış olur.

Aktif filtreler özellikle çok sayıda sürücünün farklı zamanlarda ve farklı yüklerde çalıştığı uygulamalar için uygun bir çözümdür. Diğer çözümlerle karşılaştırıldığında maliyet açısından görece dezavantajlıdır.

8. Harmonik azaltımı ile ilgili yöntemlerin karşılaştırılması

Frekans konvertörüne dahili veya harici birçok harmonik filtreleme yöntemi mevcuttur. Bu yöntemlerin birbirlerine göre avantajlar ve dezavantajları vardır. Yöntemler ardından frekans konvertörünün şebekeye yaydığı akım harmoniklerinin harmonik mertebelerine göre değişimi Tablo 3'te gösterilmektedir. Tablo 3'ün son sütununda, yöntemlerin ilk yatırım maliyetlerinin yaklaşık karşılaştırması da bulunmaktadır.

9. Sonuç

Günümüzde neredeyse her uygulamadaki motor kontrolü için kullanılan AC frekans konvertörleri, yapısında bulunan yarı-iletken bileşenler nedeniyle çalışmaları esnasında şebekeye harmonik akımları yayarlar. Yayılan harmonik akımlarının genlik ve frekansları, kullanılan topolojiye ve filtrasyon yöntemine göre değişiklik gösterir. Frekans

konvertörleri tarafından yayılan akım harmonikleri, şebeke ve sistem empedansları ile çarpılarak harmonik gerilimlerine neden olurlar. Endüklenen bu gerilimler ise harmoniklere bağlı arızaları ortaya çıkarır.

Ulusal yönetmelikler ve uluslararası standartlar, güç elektroniği cihazları tarafından şebekeye yayılabilecek harmonik akımları için sınır değerleri belirlemiştir. Problem yaşanan tesislerde gerek sınır değerlere uyabilmek gerekse yaşanabilecek harmonik kaynaklı problemleri azaltabilmek için çeşitli düzenleme ve filtrelemeler yapılmalıdır.

Bu çalışmada frekans konvertörü içerisinde yapılan yapısal düzenlemelerin ve frekans konvertörüne harici bağlanan filtrasyon sistemlerinin harmonik bozulmalara olan etkileri değerlendirilmiştir. Hangi yöntemin uygulanacağını belirlemenin, tesis tipine, tesis yerleşimine, ihtiyaç duyulan motor kontrol yöntemine ve izin verilen harmonik limitlerine göre değişiklik gösterir. Tesisin yeni yapılacak bir tesis olması veya hâlihazırda çalışan bir tesis olması da uygulamanın tipini belirlemede önemli rol oynayacaktır.

Tablo.3 Yöntemlerin harmonik performanslarının ve ilk yatırım maliyetlerinin karşılaştırılması

Konfigürasyon	Temel bileşen	5. harmonik	7. harmonik	11. harmonik	13. harmonik	17. harmonik	19. harmonik	Yatırım Maliyeti
6 darbeli doğrultucu - bobin yok	100%	63%	54%	10%	6,1%	6,7%	4,8%	100%
6 darbeli doğrultucu - AC/DC bobin ilaveli	100%	30%	12%	8,9%	5,6%	4,4%	4,1%	120%
12 darbeli doğrultucu - policon trafo	100%	11%	5,8%	6,2%	4,7%	1,7%	1,4%	200%
12 darbeli doğrultucu - çift sargılı trafo	100%	3,6%	2,6%	7,5%	5,2%	1,2%	1,3%	210%
24 darbeli doğrultucu - 2 paralel çift sargılı trafo	100%	4,0%	2,7%	1,0%	0,7%	1,4%	1,4%	250%
IGBT doğrultucu	100%	2,6%	3,4%	3%	0%	2%	2%	250%
6 darbeli doğrultucu + Aktif Filtre	100%	1,5%	1,5%	1%	1%	1%	1%	250%

10. Kaynakça

- [1] C.Kocatepe, M.Uzunoglu, R.Yumurtaci, A.Karakaş, O.Arıkan, Elektrik Tesislerinde Harmonikler, İstanbul: Birsen Yayınevi, 2003.
- [2] R.C.Dugan, M.F.McGranaghan,S. Santoso,H.W. Beaty “Electrical Power Systems Quality, Second Edition”, McGraw-Hill, 2004
- [3] The ABB Group - Automation and Power Technologies, Guide to Harmonics with AC Drives, 2002.
[http://www08.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/cedba3af94239d90c1257b0f004712c4/\\$file/ABB_Technical_guide_No_6_REVD.pdf](http://www08.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/cedba3af94239d90c1257b0f004712c4/$file/ABB_Technical_guide_No_6_REVD.pdf)
- [4] C.Kocatepe, “Sinüzoidal Olmayan Yükleri İçeren Enerji sistemlerinde Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simülasyonu” , Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, İstanbul, 1995.
- [5] M.Bilge, “Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Pasif Filtrelerle Eliminasyonu”, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş, 2008.
- [6] IEEE519-2014 Standardı, “IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems”
- [7] IEC 61800-3 Standardı, “Adjustable speed electrical power drive systems”