



EMO



KTÜ



TÜBİTAK

ÖNSÖZ

Giderek gelenekselleşen Elektrik Mühendisliği Ulusal Kongrelerinin beşincisinde Trabzon'da buluşuyoruz. EMO ile KTÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nün işbirliği ve TÜBİTAK'ın katkısıyla gerçekleşmekte olan Kongremizin başarılı ve verimli geçmesi umundayız. Kongre sonuçlarından kıvanç duymak istiyoruz.

Kongre'de, bugüne kadar yapılmış çalışmalar ve yayınlanmış duyurulardan da anlaşılacağı gibi, bilinen yöntemlerin yanı sıra gelecek yıllara deneyim aktarabilecek yeni yaklaşımlar uygulanmaya çalışılmıştır. Bildiri özetlerinin değerlendirilmesine katılan uzman sayısının sistematik olarak artırılması, değerlendirme biçiminin daha da nesnelleştirilmesi, bildiri kitabında yeni yazım ve sunuş biçimlerinin oluşturulması gibi teknik gelişmelerin dışında ilginç olacağı sanılan panellerle güncel sorunların irdelenmesi ve yöresel öğelerle sosyal etkinliklere renk katılması amaçlanmıştır.

Kongrenin hazırlık ve düzenleme çalışmalarında bazı aksaklıklar olmuştur. Öncelikle kongre kararının olması gerekenden daha geç alınabilmiş olması, özet değerlendirme sürecinin posta trafiğinin çok yoğun olduğu bayram dönemlerine rastlaması hem Yürütme Kurulu'nu hem de Kongre'ye katılmak isteyenleri zor durumda bırakmıştır.

Kongrenin düzenlenmesi sırasında edinilen deneyimler ışığında sorunları çözücü ilkesel önerilerin ortaya konması yararlı olacaktır. Bunları kısaca sıralayabiliriz. Örneğin 6. Kongre'nin ya da kısaca EMUK'95'in nerede ve ne zaman yapılacağını şimdiden kararlaştırmak gerekmektedir. Bundan sonra Konferans olarak adlandırılması daha uygun olacak Kongre için sürekli ya da uzun süre görevli bir 'Ulusal Düzenleme Kurulu'nun oluşturulması ve bu Kurul'un temel ilkesel karar ve yöntemleri üretmesi daha elverişli olacaktır. Kongre'nin yapılacağı konumdaki işleri ise 'Yerel Düzenleme Kurulu' üstlenmelidir. 'Bilimsel Değerlendirme Kurulu'nun da ayrıntılı bir sınıflandırma ve nitelik belirlenmesi ile bir kere oluşturulması, yalnızca gelişen koşullara göre güncelleştirilmesi düşünülebilir.

EMUK, böylesi bir yapılaşma ile daha sağlıklı, zaman planlaması daha verimli bir konferansa dönüşecektir kanısındayız. Örneğin bu durumda bildiri tam metinlerinin de değerlendirme ve denetim sürecine girmeleri olanaklı kılınacak, şu ana kadar ancak Yürütme Kurulları'nın ayrıntılı olarak bilincine varabildiği teknik sorunlar ortadan kalkacaktır. Konferansda da içerik ve düzey açısından belirli bir iyileştirme sağlanabilecektir. Bunu en yakında, EMUK'95'de gerçekleşmiş olarak görmek dileğindedyiz.

Bilindiği gibi Kongremiz Elektrik, Elektronik-Haberleşme, Kontrol ve Bilgisayar Sistemleri alanlarında bilimsel-teknolojik özgün katkıların tartışılıp değerlendirilmesi ile araştırma, geliştirme, uygulama ve eğitim süreçlerindeki kişi ve kuruluşların birbirleriyle doğrudan iletişimini sağlamayı amaçlamaktadır. Ayrıca sosyal yaklaşma ve dayanışmaya da

katkıda bulunmaktadır. Ancak Kongre ve onunla birlikte oluşturulan sergi/fuarın çok değerli bir 'Mesleki Eğitim ve Geliştirme' aracı olduğu bilincinin kişi ve kurumlarda daha çok yerleşmesi için çaba gösterme gereği de ortaya çıkmaktadır.

Kongrenin gerçekleşmesini sağlayan, hazırlık ve düzenlemeleri üstlenen KTÜ, EMO ve TÜBİTAK'a, oluşturulmuş olan kurulların üyelerine, ayrıca burada adlarını saymakla bitmeyecek kişi ve kamu - özel - akademik nitelikli kuruluşlara, yardım ve katkıları nedeniyle, Kongre'nin yararlı sonuçlarını paylaşacak olan topluluğumuz adına teşekkürlerimizi sunmak isteriz.

Kongremizin başarılı ve verimli bir biçimde gerçekleşmesi, ülkemiz için bilimsel - teknolojik kazanımlar üretmesi dileğiyle Yürütme Kurulu olarak saygılarımızı iletiriz.

Doç. Dr. Güven ÖNBİLGİN
Yürütme Kurulu Başkanı

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ 5. ULUSAL KONGRESİ

YÜRÜTME KURULU

Güven ÖNBİLGİN (KLU)
Yakup AYDIN (EMO) Sefa AKPINAR (KTU)
Canan TOKER (ODLÜ) Kaya BOZOKLAR (EMO)
Hasan DINCER (KTU) A.Oğuz SOYSAL (IU)
Abdullah SEZGİN (KTU) İrfan SENLİK (EMO)
Kenan SOYKAN (EMO) Y.Nuri SEVGEN (EMO)

DANIŞMA KURULU

Rasim ALDEMİR (BARMEK) Mehmet KESİM (Anadolu U)
Teoman ALPTURK (TMMOB) Macit MUTAF (EMO)
Ahmet ALTINEL (TEK) Erdiñç ÖZKAN (PTT)
İbrahim ATALI (EMO) Kamil SOGUKPINAR (TETSAN)
Malik AVİRAL (ELİMKO) Sedat SİSBOT (METRONİK)
Emir BİRGUN (EMO) Atıf URAL (Kocaeli U.)
Sıtkı ÇİÇDEM (EMO) I. Ata YİĞİT (EMO)
R. Can ERKÖK (ABB) Fikret YÜCEL (TELETAS)
Bülent ERTAN (ODTÜ) Hamit SERBEST (CU)
Uğur ERTAN (BARMEK) Canan TOKER (ODTÜ)
İsa GÜNGÖR (EMO) Nusret YUKSELER (İTU)
Ersin KAYA (Kaynak) Kemal ÖZMEHMET (DEU)
Okyay KAYNAK (Boğaziçi U)

SOSYAL ETKİNLİKLER KURULU

Y. Nuri SEVGEN (EMO)
Necla ÇORUH (PTT) Hatice SEZGİN (KTU)
Esen ÖNKİBAR (TEK) Yusuf TANDOGAN (PTT)
Abdullah SEZGİN (KTU) Ömer K. YALCIN (TELSER)

SEKRETERLİK HİZMETLERİ

Necmi İKİNCİ (EMO) Elmas SARI (EMO)

BİLİMSEL DEĞERLENDİRME KURULU

Cevdet ACAR (İTU)
İnci AKKAYA (İTU)
A.Sefa AKPINAR (KTU)
Ayhan ALTINTAŞ (Bil.U)
Fuat ANDAY (İTU)
Fahrettin ARSLAN (IU)
Murat ASKAR (ODTÜ)
Abdullah ATALAR (BiI.U)
Selim AY (YTU)
Umit AYGÖLU (İTU)
Atalay BARKANA (Anadolu U)
Mehmet BAYRAK (Selçuk U)
Atilla BİR (İTU)
Galip CANSEVER (YTU)
Kenan DANIŞMAN (Erciyes U)
Ahmet DERVISOGLU (İTU)
Hasan DİNCER (KTU)
M.Sezai DİNCER (Gazi U)
Günsel DURUSOY (İTU)
Nadia ERDOĞAN (İTU)
Aydan ERKMEN (ODTÜ)
İsmet ERKMEN (ODTÜ)
H.Bülent ERTAN (ODTÜ)
Selçuk GEÇİM (Hacettepe U)
Cem GÖKNAR (İTU)
Remzi GULGUN (YTU)
Filiz GUNES (YTU)
İrfan GÜNEY (Marmara U)
Fikret GÜRGEN (Boğaziçi U)
Fuat GURLEYEN (İTU)
Cemil GURUNLU (KTU)
Nurdan GUZELBEYOGLU (İTU)
Emre HARMANCI (İTU)
Altuğ İFTAR (Anadolu U)
Kemal İNAN (ODTÜ)
Asım KASAPOGLU (YTU)
Adnan KAYPMAS (İTU)
Ahmet H. KAYRAN (İTU)
Mehmet KESİM (Anadolu U)
Erol KOCAOGLAN (ODTÜ)
Muhammet KOKSAL (İnönü U)
Hayrettin KÖYMEN (Bil. U)
Hakan KUNTMAN (İTU)
Tamer KUTMAN (İTU)
Duran LEBLEBİCİ (İTU)
Kevork MARDİKİYAN (İTU)
A.Faik MERGEN (İTU)
Avni MORGUL (Boğaziçi U)
Güven ÖNBİLGİN (KTU)
Bülent ÖRENCİK (İTU)
Bülent ÖZGUC (BiI.U)
A.Bülent ÖZGÜLER (BiI.U)
Yiğmez ÖZKAN (İTU)
Muzaffer ÖZKAYA (İTU)
Kemal ÖZMEHMET (DEU)
Osman PALAMUTCUOĞLU (İTU)
Erdal PANAYIRCI (İTU)
Halit PASTACI (YTU)
Ahmet RUMELİ (ODTÜ)
Bülent SANKUR (Boğaziçi U)
M.Kemal SARIOGLU (İTU)
Müzeyyen SARI TAS (Gazi U)
A.Hamit SERBEST (CU)
Osman SEVAİOGLU (ODTÜ)
A.Oğuz SOYSAL (IU)
Taner SENGÖR (YTU)
Emin TACER (İTU)
Nesrin TARKAN (İTU)
Mehmet TOLUN (ODTÜ)
Osman TONYALI (KTU)
Ersin TULUNAY (ODTÜ)
Nejat TUNCAY (İTU)
Atıf URAL (Kocaeli U)
Alper URAZ (Hacettepe U)
Gökhan UZGÖREN (IU)
Yıldırım UCTUG (ODTÜ)
Asaf VAROL (Fırat U)
Siddik B. YARMAN (IU)
Mümtaz YILMAZ (KTU)
Melek YÜCEL (ODTÜ)
Nusret YUKSELER (İTU)
Selma YUNCU (Gazi U)

AR MOTORUNUN ARTAN ENDÜKTANS DEĞİŞİMİNİN DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ VE SONUÇLARIN FARKLI İKİ YÖNTEM İLE KARŞILAŞTIRILMASI

F.ERFAN, A.URAL

(Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fak. Elektrik Müh.Böl., KOCAELİ)

ÖZET

Bu çalışmada, 10BG değerinde, 4 fazlı Oulton tipi Anahtarlı Relüktans Motorunun artan endüktans değişimleri sabit rotor açılan için deneysel olarak elde edilmektedir. Rotoru sabitlenen test motorunun statorunun bir faz sargısına Dahington tipi tranzistör yardımı ile önceden belirlenen akım ile birlikte, değişik frekanslarda alternatif işaretler uygulayarak artan endüktans belirlenmektedir. Deneyde rotor açısı bir kez sabitlendikten sonra *İM* no'lu referansta tanımlanan yöntem ile akı değerleri bu kez 5'er Amperlik akım artışları ile elde edilmektedir. Bu değerler Matlab paket programı ile Polinomlar ve Kübik Ara Enterpolasyon yöntemleri kullanılarak non-lineer olan değişimler fonksiyonlara yaklaştırmaktadır. Bu şekilde analitik olarak hesaplanan artan endüktans, bir kez de, tanımlanan deneysel düzenek ile, sabit rotor yer değiştirme açılan için tesbit edilmektedir. Bu makalede, yöntemin nasıl uygulandığı detaylı olarak açıklanmakta ve her iki farklı metod ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılmaktadır.

1. GİRİŞ

Genel olarak yapısı bakımından Asenkron Motorlar ile Anahtarlı Relüktans Motorları karşılaştırıldığında, daha basit ve boyutunun daha ufak olduğu gözlenebilir. Bir faz için oluşturulan gerilim eşitliğine bakıldığında, akı, iki parametreye de bağlı olduğundan AR Motorunun eşdeğer devresinde sabit parametreleri kurmak mümkün değildir. Bu da, AR Motorunu konvansiyonel elektrik makinelerinden farklı kılmaktadır. Ancak, bu makinenin non-lineer olduğu ve magnetik çeliğin doyma

karakteristiğinin de etkisinin dikkate alındığı durumdur. AR Motorunda doymanın etkisi iki durumda incelenebilir. İlki, kutupların tümüyle çakışık olduğu durumda magnetik devre üzerindeki etkisi, diğeri ise, rotor ve stator kutuplarının birbirine yaklaştığı konumda oluşan bölgesel doyma etkisidir. Kutupların birbirine yaklaştığı konumda, enerjilenen hareketli kısmı maksimum endüktans konumuna çekecek şekilde kuvvet oluşturur. Kutupların çakışık olduğu konumda ise hava aralığı çok küçük olduğundan doyma bölgesinde çalışmada motor daha büyük moment üretmektedir. AR Motorunun çıkış gücü ve momentini, doyma noktasının üzerinde motorun uyarılması arttığı sürece, pratik olarak sürekli artar. Ancak, bilindiği gibi, bu artış, magnetik devredeki doyma ile sınırlı olduğundan sürekli değildir. Doymamış bir AR Motorunda giriş elektrik enerjisinin yansından daha azı mekanik enerjiye dönüşür, oysa, doymuş bir AR Motorunda mekanik enerjiye dönüşen elektrik enerjisinin oranı artar. Böylelikle, kontrol devresi girişinde, daha az elektrik enerjisine gereksinim duyulur. AR Motorunun verimliliği artar ve kayıptan azalır. Kontrol sistemi ile AR Motoru iyi kontrol edildiğinde, yukandaki açıklamanın ışığında doymanın işletim açısından olumsuz etkisi elimine edilebilir /2,3,4/. Ancak, AR Motorunda gerek enerji akışının incelenmesi, gerekse motor ve kontrol devresinin, kısacası, sistemin doğru modellenebilmesi için, öncelikle, motorun non-lineer değişiminin bilinmesi, bilhassa, çıkık kutup yapısında olan AR Motorian için bir gerekliliktir.

Bu çalışmanın 2.nci kısmında, motorda artan endüktansın neden belirlenmesi gerektiği, 3.ncü kısmında ise deneysel

düzeneğin nasıl kurulduğu ve çalışma şekli, 4ncü kısımda da IM no'lu referansta elde edilen magnetik akı değerlerinin bu çalışmada tümüyle farklı bir yöntemle bulunan sonuçların detaylı bir karşılaştırılması yapılmaktadır.

2. ARTAN ENDÜKTANSIN TANIMI

Test için, 4 fazlı, 8/6 kutuplu Oulton tipinde Anahtarlı Relüktans Motoru kullanılmaktadır. Motorun mili skala ile sabit durumdayken bir faz için, istenilen konumda ayarlanabilmektedir. AR Motorunda artan endüktans değişimini tanımlayabilmek için öncelikle, motorun bir faz sargısının gerilim eşitliğini tanımlamak gereklidir.

$$V(t) = R \cdot i(t) + \frac{d\Psi(\theta, i)}{dt} \quad d)$$

Magnetik alan akısının her iki parametreye bağlı olarak kısmi diferansiyeli alınırsa, bağıntı (2)'deki şekilde olur.

$$V(t) = R \cdot i(t) + \frac{d\Psi(\theta, i)}{dt} + \frac{d\Psi(\theta, i)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$

Motorun akınının, akıma ve rotor konumuna bağlı ifadelerinin katsayı olarak değil de değişken olarak alınması, motor eşdeğer devresi kullanılarak ko-enerjinin, dolayısı ile

momentin hesaplanmasını zorlaştırmaktadır. (2) no'lu denklemde eşitliğin ikinci kısmında tanımlanan gerilim eşitlikleri sırası ile, stator faz sargı direncinin oluşturduğu gerilim düşümü, artan endüktans ile oluşan gerilim ve ters elektromotor kuvveti olarak tanımlanmaktadır. Buradan motorun stator faz sargısının endüktansı ile artan endüktans sırası ile (3) ve (4) no'lu ifadelerde gösterilmektedir.

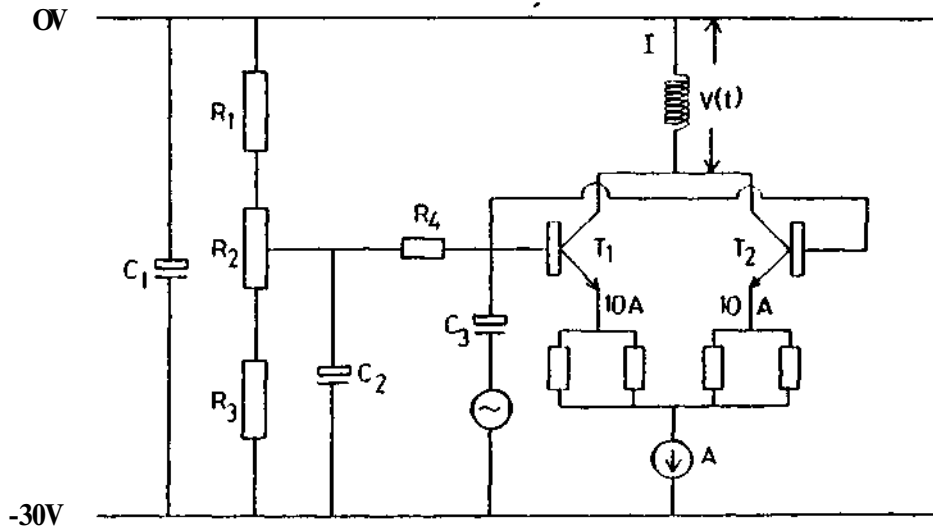
$$L(\theta, i) = \frac{\Psi(\theta, i)}{i} = \frac{\int_0^i L_a(\theta, i) di}{i} \quad (3)$$

$$L_a(\theta, i) = \left. \frac{d\Psi}{di} \right|_{\theta=\text{sabit}} \quad (4)$$

Sabit rotor açılan için, akı fonksiyonunun akıma göre diferansiyeli artan endüktans (L_a) olarak tanımlanmaktadır. Kısacası, eğrinin o noktaya göre eğimidir.

3. ARTAN END. (L_a)'NİN ÖLÇÜLMESİ İÇİN KULLANILAN DEVRE VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

Test motorunun stator bir faz sargısına, değeri önceden belirlenen doğru akım, şekil 1'de gösterilen devre ile uygulanmaktadır.



Şekil 1. AR Motorunun artan endüktansının ölçülmesi için hazırlanan test devresi.

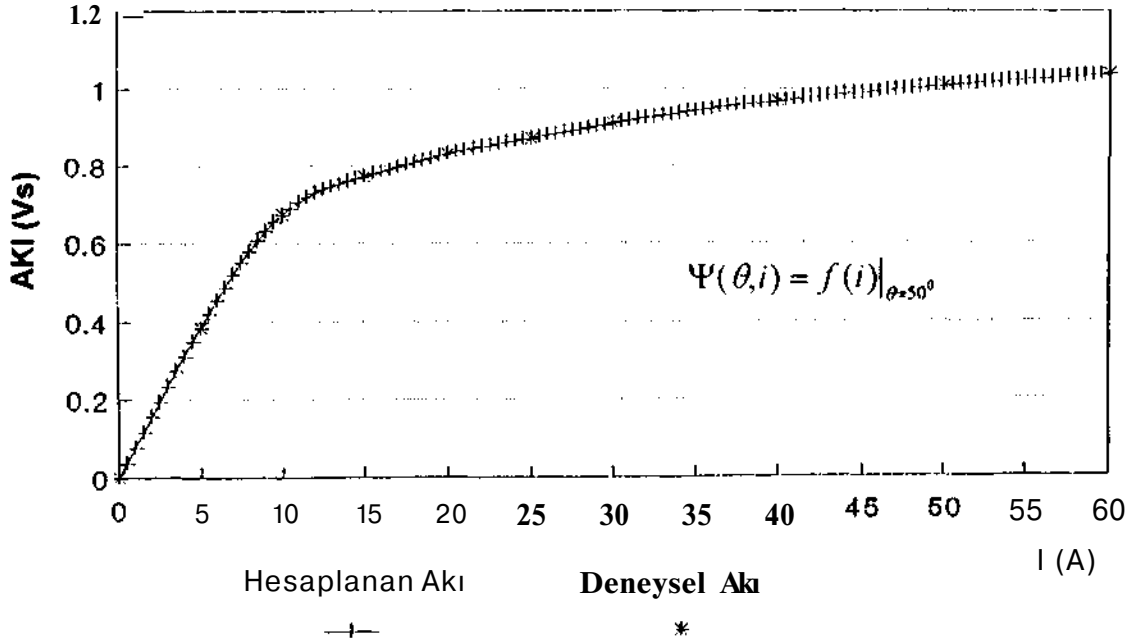
Devrede besleme kaynağı olarak 0-30V'luk doğru gerilim şebekesi kullanılmaktadır. Motorda magnetik doymayı sağlayabilmek için akım değeri 5A'den 20A'e kadar 5'er Amperlik artışları sağlayacak şekilde tranzistörler yardımı ile uygulanmaktadır. Her iki tranzistörün bazı ortak sürülecek şekilde, küçük genlikli, değişik frekanslarda alternatif işaret ile, sabit rotor açıları için artan endüktans elde edilmektedir. Uygulanan alternatif işaretin farklı frekans değerleri için, motorun stator faz sargısının uçlarındaki gerilim ve akım çok hassas bir şekilde ölçülmektedir. (5) no'lu denklemde tanımlandığı gibi, ölçülen akım ve gerilime bağlı olarak, L_a hesaplanmaktadır.

$$L_a = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left[\frac{v(t)}{i(t)} \right]^2 - R^2} \quad (5)$$

Eşitlikte, ω , işaretin açısal frekansı, R ise faz sargısının direnci olarak tanımlanmaktadır. Direnç değeri, ayrıca ölçülerek elde edilen data kullanılmaktadır. Bilindiği gibi, ifadede kullanılan L_a da artan endüktansı tanımlamaktadır. Ölçme işlemi, kutupların çakışık olduğu minimum relüktans konumuna yakın olan $6 \sim 50^\circ$ de, bir kez de, maksimum relüktansa karşılık gelen $\theta = 30^\circ$ için gerçekleştirilmektedir.

4. ARTAN END. (/J'NIN MATEMATİKSEL OLARAK BULUNMASI

Yaklaşık olarak kutupların çakışık olduğu konuma karşılık gelen konumda rotor sabitlenmektedir. Daha sonra \dot{M} no'lu referansta tanımlanan test devresi kullanılarak 5'er Amperlik artışlarla 60A'e kadar darbe akımları uygulamak sureti ile, her bir akım değeri için en az 20 kez sonuç alınmaktadır. Okunan her bir akım değerindeki magnetik akı için standart sapma hesaplanarak, $a \approx 0.3 \cdot 10^{-4}$ gibi çok ufak bir değerde olduğu gözlenmektedir. Daha sonra, alınan datalar Matlab paket programı kullanılarak $6 \sim 50^\circ$ için mıknatıslanma eğrisi, 5.dereceden polinomlar ile Kübik Ara Enterpolasyon (Cubic Spline Method) yöntemleri kullanılarak uydurulmaktadır. Şekil 2'de Kübik Ara Enterpolasyon yöntemi kullanılarak sabit rotor açısı için akımın akıma göre değişimi gösterilmektedir. Eğride, akımın 1'er Amperlik artışları için hesaplanan noktalar tanımlanmaktadır. Akımın artışları, istenilen hassasiyette elde edilebilir. Buradan tanımlanan fonksiyonun akıma göre türevi alınarak, artan endüktansın akıma göre değişimi her iki fonksiyon için verilebilir. Eğriyi en iyi tanımlayan her iki fonksiyonun, bazı akım değerleri için, bulunan artan end. Tablo 1, (a) ve (b)' de özetlenmektedir. Gözlendiği gibi düşük akım değerle-



Şekil 2. KAE Metodu ile sabit rotor açısında elde edilen mıknatıslanma eğrisi.

Tablo 1- Matematiksel yöntemler ile ($\theta \geq 50^\circ$) için akıma karşılık akı ve L_a değerleri,
a) Kübik Ara Enterpolasyon ile, b) 5. dereceden Polinomlar ile,

Kullanılan Yöntem	Alan Akısı $V(Vs)$	Akım (A)	Artan End.
KÜbik Ara Enterpolasyon Metodu	0.3849	5	72.44
	0.6719	10	36.73
	0.8295	20	10.11
	0.9085	30	7.30
	0.9668	40	4.72
	1.0069	50	3.37
	1.0353	60	2.38

(a)

Kullanılan Yöntem	Alan Akısı $4'(tt)$	Akım (A)	Artan End.
5. Dereceden Polinomlar	0.4094	5	62.49
	0.645	10	34.22
	0.837	20	9.60
	0.905	30	5.71
	0.963	40	5.68
	1.009	50	3.29
	1.035	60	2.87

(b)

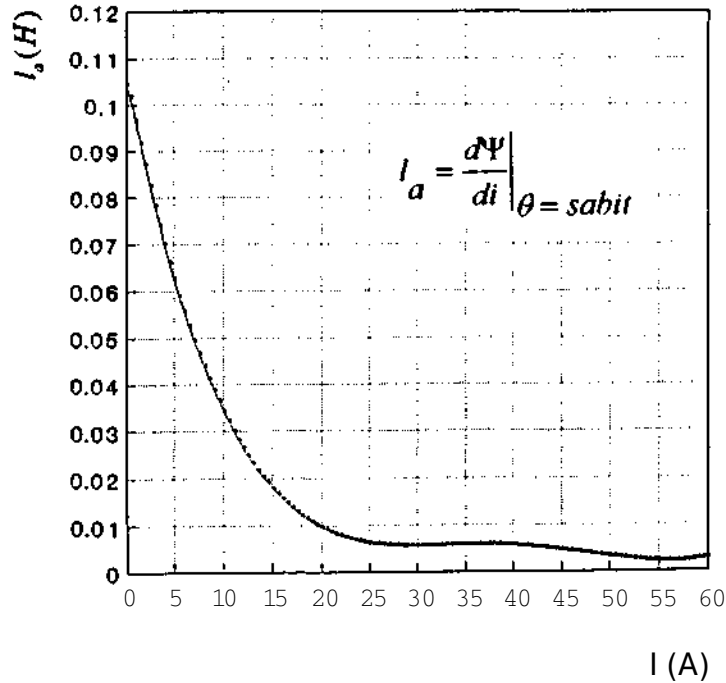
rinde değişim oldukça fazladır. Şekil 3'te ise polinomlar yardımı ile tanımlanan fonksiyonun akıma göre diferansiyeli verilmektedir. Aynı işlem bir kez de, minimum end. konumu için yapılmaktadır.

5. KARŞILAŞTIRMA

Deneysel olarak doymanın olduğu bölge

için, $I=20A$ akım değerinde, artan end. $L_a = 10.01 mH$ olarak bulunmaktadır. Tablo 1'de de gösterildiği gibi, KAE ile, 10.11mH, polinomlarla ise, 9.6mH olarak bulunmaktadır. Bu da, doymanın yüksek olduğu konum için, farklı metodlar ile karşılaştırıldığında, ölçme devrelerinin analog olduğu dikkate alınır, hata fazla değildir.

Minimum relüktans konumu için de, aynı



— Artan Endüktans

Şekil 3. Sabit rotor konumu için artan endüktansın akıma bağlı değişimi.

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ 5. ULUSAL KONGRESİ

işlemler yapılarak artan endüktans bulunmak-
tadır. Burada ise, doyma olmadığı için IM
no'lu referansta tanımlanan yöntem ile elde
edilen akı fonksiyonunun lineer olarak
değiştirdiği kabul edilebilir. Klasik doğrunun
eğimi tanımı ile de hesap yapılabilir. Burada,
 $d=30^\circ$ için akı fonksiyonu lineer bir denkleme
yaklaştırarak eğimi, aşağıdaki gibi tanımlan-
maktadır.

$$\Psi = y \left\{ \begin{array}{l} 7(0 \ x) \\ \Psi \ y \end{array} \right\} \text{ dönüşümüyle, } y = mx + c \quad (5)$$

bilinen klasik eğri denklemi ife tanımlanabilir.

$$S = \sum y^2 + m^2 \sum x^2 + nc^2 - 2m \sum xy - 2c \sum y + 2mc \sum x$$

$$\frac{dS}{dm} = 2m \sum x^2 - 2 \sum xy + 2c \sum x = 0 \quad (6)$$

$$\frac{dc}{dc} = 2cn - 2 \sum y + 2m \sum x = 0$$

$$\begin{bmatrix} \sum x^2 & \sum x \\ \sum x & n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum xy \\ \sum y \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$m = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} = 9.681 \quad (8)$$

$$c = \frac{\sum y - m \sum x}{n} = 0.017 \quad (9)$$

Çözümünden de anlaşılacağı gibi, akı verileriyle
klasik doğrunun eğimi yardımı ile bulunan
artan endüktans $I_a = 9M/mH$, deneysel

yöntemle direk olarak ölçmek sureti ile de
20A, aynı akım için, $I_a = 9.63mH$ 'dir. Tablo
2'de bu karşılaştırma detaylı olarak
gösterilmektedir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, doymanın yüksek olduğu
konum ile, minimum olduğu durumlarda
Anahtarlı Relüktans Motorunun artan
endüktans parametresinin deneysel olarak
belirlenmesi tanımlanmaktadır. Burada ayrıca,
 IM no'lu referansta belirtilen alan akısı
yöntemi ile elde edilen sonuçlar, bu
çalışmada bulunan değerlerle karşılaştırıl-
maktadır. Her iki ölçme işlemi aynı test
motorunun, aynı rotor açısında sabit
durumdayken gerçekleştirilmiştir. Bilhassa,
minimum endüktans konumu için artan
endüktans farkı % 0.5 olarak bulunmaktadır.
Bu değer, birbirinden tümüyle farklı yöntemler
ile ve analog olarak elde edildiği dikkate
alınırca, alan analizinin deneysel olarak
minimum hata ile elde edilmesi mümkündür.

TEŞEKKÜR

Nottingham Üniversitesi Elektrik &
Elektronik Mühendisliği Bölümünde deneysel
olarak gerçekleştirilen bu çalışmada,
Laboratuvar olanaklarından faydalanabil-
diğimiz için Üniversite yetkililerine ve bilhassa
olumlu katkıları olan Mr. W. F. RAY'e teşekkür
ederiz.

REFERANSLAR

1. F.ERFAN, F.MERGEN "Anahtarlı Relük-
tans Motorunun magnetik alan akısı değişi-

Tablo 2- Minimum endüktans konumunda farklı yöntemler ile bulunan I_a 'nin karşılaştırılması.

UYGULANAN YÖNTEM (($\theta = 30^\circ, I_a = 20A$))		$I_a (mH)$	% değişim
Alan Akısı Verileri ile sayısal Yöntemler Kullanılarak	Doğrunun Eğimi Kullanılarak	9.681	«0.5
	Bilgisayar Yardımı ile 5. Dereceden Polinomlar	9.675	
Deneysel Olarak Doğrudan Ölçerek		9.63	

mininin güç elektroniği devresi ile deneysel olarak elde edilmesi", Elektrik Müh. 5. Ulusal Kongresi. 13-18 Eylül, 1993, Trabzon.

2. P.,LAWRENSON, "Switched Reluctance Motor Drives", Electronics & Power, pp.144-147, February, 1983.

3. P.,LAWRENSON, "Switched Reluctance Drives-Applications and Potential", Seminar on Electrical Industrial Drives, pp.B1-B7, Coventry, May, 1989.

4. W.,F.,RAY, "Iron meets silicon in new motor", Engineering, pp.271-273, April, 1983.

5. F.,ERFAN, "Anahtarlı Relüktans Motorunun Statik ve Dinamik Davranışı ile Ulaşımında Kullanılabilirliğinin Analizi", Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 1992.

Yrd. Doç.Dr. Feriha ERFAN (AMIEE) : 1984 yılında İ.T.Ü. Sakarya Müh. Fak. Elektrik ve Elektronik Müh. Böl.'den Müh., Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'nden Y.Müh., ve 1992 yılında Doktor oldu. 1985 yılında Y.T.Ü. Kocaeli Müh. Fak.'de Elektrik Böl.'nde Ar.Gör., 1989 yılında Öğr.Gör., 1993 yılının başından itibaren atandığı Yrd.Doç.'lik görevini halen sürdürmektedir. 90-91 yılları arasında Nottingham Üniv.'de misafir araştırmacı olarak ARM konusunda çalıştı. Haziran 1993'ten itibaren B.C. bursu ile Leicester Üniversitesinde yeni bir AR Motor dizaynı ve kontrol devresinin tasarlanması konusunda çalışmak üzere, misafir öğretim üyesi olarak bulunmaktadır.

ANAHTARLI RELUKTANS MOTORUNUN MAGNETİK ALAN AKISI DEĞİŞİMİNİN GÜÇ ELEKTRONİĞİ DEVRESİ İLE DENEYSEL OLARAK ELDE EDİLMESİ

F.ERFAN, F.MERGEN

(K.Ü. Mühendislik Fak. Elektrik Müh. Bölümü, KOCAELİ)
(İ.T.Ü. Elektrik ve Elektronik Fak., Gümüşsüyü, İSTANBUL)

ÖZET

Anahtarlı Relüktans Motorunun tasarım özelliklerine bağlı olarak çift taraflı çıkık kutup yapısından dolayı, hava aralığı sabit değildir. Bu nedenle motor, non-lineer bir yapıya sahiptir. Motorun magnetik alan akısı, akımın yanısıra rotor açısına da bağlı olarak değişmektedir. Konstrüksiyonu basit olmasına rağmen, AR Motorunun magnetik olarak değişimini belirlemek oldukça zordur. Genel amaçlı kullanım için tasarlanan 4 fazlı Oulton tipi AR Motorunun statik değişimi, rotor mili ile orantılı olarak hazırlanan bir skala üzerinde rotoru sabitlenerek elde edilmektedir. Test ünitesi, besleme devresi, güç katını oluşturan anahtarlama elemanı ve geri beslemeli tetikleme devresi ile integratör katından oluşmaktadır. Bu çalışmada, devrenin boyutlandırılması, doğruluk analizi ve sonuçları detaylı olarak sunulmaktadır.

1. GİRİŞ

Anahtarlı Relüktans Motorunun çalışma prensibi, uzun yıllardan beri bilinmesine rağmen uygun anahtarlama elemanlarının olmayışı ve mekanik olarak tasarımından dolayı kullanışlı değildi. Güç elektroniği elemanlarındaki ilk gelişmelerden bu yana relüktans motorlarına da ilgi giderek artmaktadır. Bu alanda yapılan araştırmalara ışık tutan ve endüstride kullanılabilir duruma getiren çalışmalar /1,2,3/ no'lu referanslardan izlenebilir. Yayınlarda, motorun tasarım stratejileri belirlenmekte ve motoru evirici kontrollü asenkron makineler ile karşılaştırma yapabilecek kontrol devreleri tasarlanmaktadır. 1980'li yılların ikinci yarısından itibaren, AR Motorları endüstride, ticari olarak kullanıma sunulmakta ve 50kW'a kadar olan güçlerde de üretilmektedir.

Pozitif gelişmelerin başlıca nedenleri;

i) kontrol devresinde kullanılan güç elektroniği elemanlarının çalışma sınırlarının genişlemesiyle kontrolünün optimum şekilde yapılabilmesi,

ii) gelişmiş bilgisayarlar yardımıyla, sonlu eleman analizi metodu kullanılarak iki veya üç boyutlu alan dağılımlarının elde edilmesi ve bu yolla karmaşık non-lineer analizlerin yapılabilir olması (ki bu şekilde motor ve kontrol devresinin boyutlandırılmasında çok kullanışlı olan parametreler önceden hesaplanabilmektedir),

iii) malzeme tekniğindeki gelişmelere bağlı olarak elektromagnetik malzemelerin teknik özelliklerinin iyileşmesi şeklinde kısaca özetlenebilir.

AR Makinaları yüzeysel olarak konvansiyonel makinalardan oldukça basittir, ancak bu görünüşteki basitlik aldatıcıdır. Tasarım özelliklerine bağlı olarak, motorun çift taraflı çıkık kutup yapısından dolayı, kutupların üst üste çakışık olduğu (aligned) ve ayrı olduğu (unaligned) konumları arasındaki hava aralığı değişimi oldukça fazladır. Depo edilen magnetik alan enerjisi rotor ile stator arasında kalan küçük hava aralığında büyüktür. Magnetik yapısından dolayı motorda doyma oldukça fazladır. AR Makinasının magnetik alan değişimini incelemek, konvansiyonel makinalarda olduğu gibi, bazı ihmaller ile yapılabilmesi mümkün değildir. Tasarımından da anlaşılacağı gibi, makinada, magnetik alan akısı sadece akım ile değil, G olarak tanımlanan motorun yer değiştirme açısına da bağlı olarak değişmektedir. Doyma etkisi de dikkate alınarak yapılan çalışmalar /4,..,8/ no'lu referanslarda incelenmektedir.

Bu çalışmanın asıl amacı, motorda, non-lineer olarak değişen magnetik alan akısını, güç elektroniği devresi yardımı ile deneysel şekilde belirlemektir. Bu aşamada, analog olarak hazırlanan test devresinin doğruluğu, değerlerin hatasız olarak elde edilmesi açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle, çalışmada devrenin kalibre edilmesi için yapılan işlemler de detaylı bir biçimde sunulmaktadır.

2. SİSTEMİ GERÇEKLEŞTİRME

Bu çalışmada, ilk kez tanımlanan deneysel bir düzencele 10BG değerinde olan bir AR test motorunun statik davranışı rotoru hareketsiz durumda iken belirlenmektedir. /9/ no'lu yayında Krishnan ve Materu tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada 2.7kW değerindeki motor için 1A ve 10A akım değerlerinde, akı ve artan endüktans belirlenmekte, ancak, alternatif yöntemler ile yapılan karşılaştırmada hata yüzdesinin bir hayli büyük olduğu gözlenmektedir. Konunun araştırması sırasında çok geniş bir yayın taraması yapılmış, ancak benzer yöntemle magnetik akı belirlenmediğinden, AR Motorunun statik davranışını sağlıklı bir biçimde elde edilmesi konusunda yapılan bu çalışmanın, önemli bir boşluğu dolduracağı sanılmaktadır.

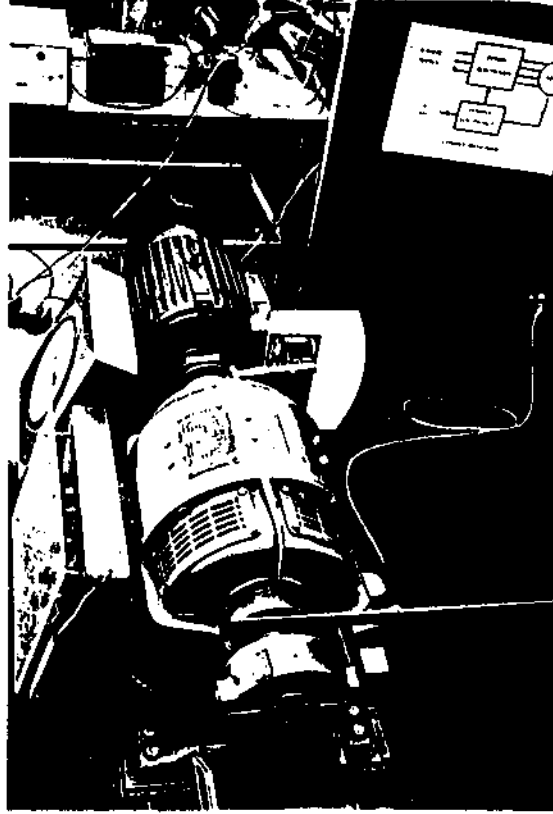
2.1. TEST DEVRESİNİN TASARLANMASI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

Motor performans karakteristiklerinin elde edilmesinde oldukça önemli bir parametre olan magnetik alan akısının belirlenmesi için test motoru olarak dört fazlı, Oulton tipinde, 10BG değerinde 8/6 kutuplu Anahtarlı Relüktans Motoru kullanılmaktadır. Motorun bir tek fazına ilişkin gerilim eşitliğinden, magnetik alan akısı aşağıdaki biçimde tanımlanabilir.

$$\Psi(\theta, i) = \int_0^i [V(t) - R \cdot i(t)] dt \quad (1)$$

AR Motorunda magnetik alan akısı, faz sargısının uyarma akımı ve rotorun yer değiştirme açısına bağlı olarak değişmektedir. Motorun stator faz sargısına uygulanan gerilim $V(t)$, faz sargısından geçen akım $i(t)$ ve sargı direnci de R olarak tanımlanmaktadır. Rotorun yer değiştirme açısını belirleyebilmek

için, motorun bir tek fazına ait kutuplar öncelikle minimum relüktans konumuna getirilmektedir, daha sonra mil çapı ile orantılı olarak hazırlanan ve 1'er derecelik artışları gözleyebilecek şekilde bir skala, şekil 1'de gösterildiği gibi rotor miline yerleştirilmektedir.



Şekil 1- Motor mili skala üzerinde sabitlenen AR Motorunun görünüşü.

Test devresinde kullanılan elemanların seçimi ve devrenin boyutlandırılması için öncelikle magnetik devrede depolanan enerji miktarı dikkate alınmaktadır. (2) no'lu tanımdan da bilindiği gibi, minimum endüktans bölgesinde, yani motorun kutuplarının ayrık olduğu konumda en fazla enerji depolanmaktadır.

$$W = \frac{1}{2} \cdot L_{min} \cdot i^2 \quad (2)$$

2 no'lu şekilden de anlaşılacağı gibi, stator ve rotor kutuplarının tümüyle çakışık olduğu (91) maksimum endüktans bölgesinde taralı alan, ayrık olduğu konuma (62) nazaran küçüktür. Bu nedenle, hazırlanan test devresinde, devrenin çekebileceği maksimum akım

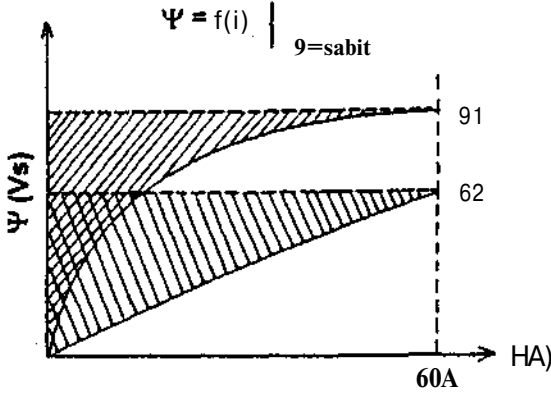
endüktansın minimum olduğu değerle sınırlanmaktadır. Devrenin basit bir modeli Şekil 3'te gösterilmektedir. Akımın değerini yaklaşık olarak belirlemek için, (3) no'lu bağıntıda gösterildiği gibi s domeninde çözüm yapılabilir.

$$I(s) = \frac{VJL}{s^2 + (R/L).s + (1/LC)} \quad (3)$$

Buradan t domeninde çözümü ise, bilindiği gibi, aşağıdaki şekildedir.

$$I(t) = I.e^{-\alpha t}. \sin(W.t) \quad (4)$$

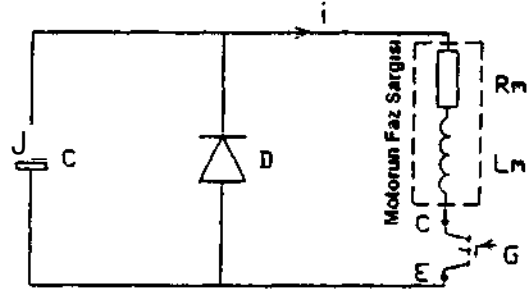
(3) ve (4) no'lu bağıntılar kullanılarak, akımın test devresinde maksimum 70A civarında ve geçiş zamanının da yaklaşık 10ms mertebesinde olabileceği hesaplanmaktadır.



Şekil 2- Akımın min ve mak. değişim bölgeleri.

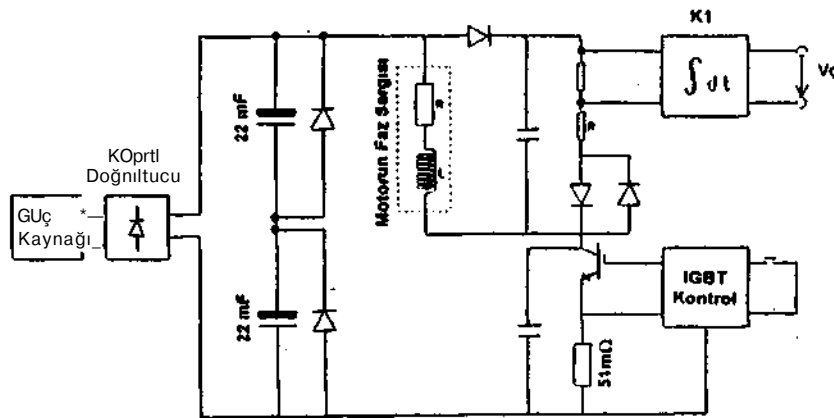
Buradan hareketle, maksimum darbe akımının

artan endüktans bölgesinde oluşturabileceği momentin etkisi de dikkate alınarak, devrenin uygulayacağı maksimum darbe akımının değeri 60A olarak sınırlandırılmaktadır. Tasarımda dikkat edilmesi gereken bir başka unsur da, akıyı belirlemek üzere kurulan integral atan devrenin zaman sabitinin, sargıya uygulanan akım darbesinin yükselme zamanından mutlaka daha büyük seçilmesi



Şekil 3- Devrenin basitleştirilmiş modeli.

gerektiğidir. Şekil 4'de motor parametrelerine göre boyutlandırılan analog devrenin blok diyagramı gösterilmektedir. Test devresinin besleme düzeni ile kontrol ve tetikleme devresi için kullanılan besleme devresi orta frekans olarak düzenlenmektedir. Ayrıca, motorun magnetik alan akısını minimum hata ile ölçebilmek için, test edilen faz sargısının direncinde oluşabilecek gerilim düşümü de tasarımda dikkate alınmaktadır. Faz sargısının direncine eşdeğer direnç değeri, sargının bağlantı uçlarına paralel olarak yerleştirilmektedir. Böylelikle integratör çıkışından elde edilen gerilimde direncin yaratacağı gerilim



Şekil 4- Anahtarlı Relüktans Motorunun bir fazına ait magnetik alan akısını belirlemek için tasarlanan test devresi /107.

farkı da elimine edilmektedir. Güç elektroniği elemanını, bobindeki akımın etkisinden korumak için diyot kullanılmaktadır. Devreden gözlenebileceği gibi, diyot elemanı üzerindeki gerilim düşümü etkisi de ters paralel ba^olı aynı özellikte ikinci bir diyot kullanılarak minimum kılınmaktadır.

Devrede motor sargısına darbe akımları uygulamak için, jonksiyon bölgesinde akım darbesinin yaratabileceği sıcaklık artışı da dikkate alınarak IGBT elemanı seçilmektedir. Bu amaçla, çalışma koşullarına uygun olarak sürekli akım değeri 55A, gerilim değeri de 600V olan kontrol elemanı kullanılmaktadır.

2.1.1.DEVRENİN DOĞRULUK ANALİZİ

Test devresinde dikkat edilmesi gereken en önemli unsur magnetik alan akısını belirleyen akım değerlerinin öngörülen akım büyüklüklerine yaklaşmasıdır. Bu amaçla, tetikleme devresinde kullanılan elemanların seçimine de dikkat edilmektedir. Devrenin belirlenen darbe akımlarını verebilmesi için, tetikleme devresinin besleme gerilimini sabit kılacak şekilde sıcaklık kompanzasyonlu zener kullanılmaktadır. Ayrıca, devrede lojik devre elemanına bilgi veren gerilim karşılaştıncı olarak giriş empedansı yüksek MOSFET, çıkışı da CMOS olan islemsel kuvvetlendirici bulunmaktadır. Böylelikle, elemanın doymaya girerek lojiğe yanlış bilgi vermesi ve öngörülen akım değerinin dışında anahtarı kesime götürmesi önlenmektedir/11/.

Integral alan devrenin çıkışında ise, magnetik alan akısının değeri Volt-sn olarak tanımlanmaktadır. Bu değer, kuvvetlendiricinin kazancı ile orantılı olarak değişmektedir. Çıkış geriliminin akıya bağılı değişimi (5) ve (6) no'lu bağıntılarda gösterilmektedir.

$$V_c = k_r \int_0^{\infty} [V'(t) + R_i i(t)] dt, \quad (5)$$

$$i; r, 10 | cH' - 10. T., , (*, = -1 0) (6)$$

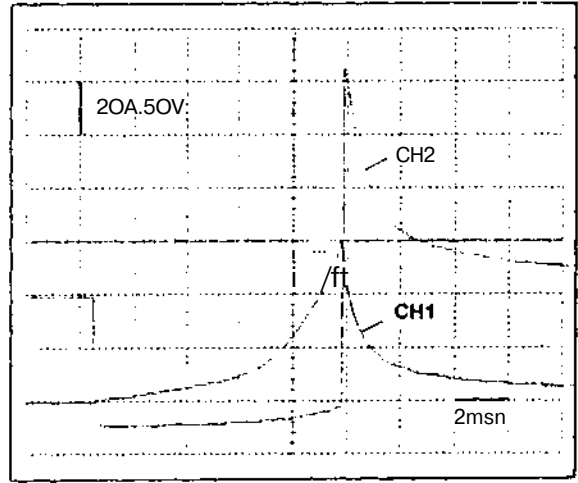
Burada islemsel kuvvetlendiricinin kazancı k_r , akı da M'_r olarak tanımlanmaktadır. Çıkış geriliminin kazancı ve zaman sabiti, devrenin frekans analizi yapılarak kalibre edilmektedir. Kazancı da, yukarıda gözleendiği gibi -10 değerine ayarlanmaktadır. Çıkış geriliminin

magnetik akıya bağılı değişimi, integral sabitlerine bağılı olarak aşağıdaki biçimde tanımlanabilir.

$$\Delta V_c = - \int_0^{\infty} \frac{V_c}{C.R} dt \quad (7)$$

Böylece, integral alan devrenin zaman sabitinin seçimi ile, çıkış geriliminin değeri sınırlanmaktadır.

Motor faz sargısı üzerinde oluşan akım ve gerilim dalga şekilleri Sekil 5'te gösterilmektedir. Osiloskop çıkışında gözlenen durum, çıkış kutupları çakışık olduğu konuma yakın bir bölgede ($0 = 50^\circ$) ve darbe akımı da $I=60A$ değerinde olup CH1 kanalında gösterilmektedir.



CH1 : f(I), CH2 : f(V), $9 = 50^\circ$

Şekil 5 - Motorun faz sargısı üzerinde oluşan darbe akımı ve geriliminin zamana bağılı değişimi.

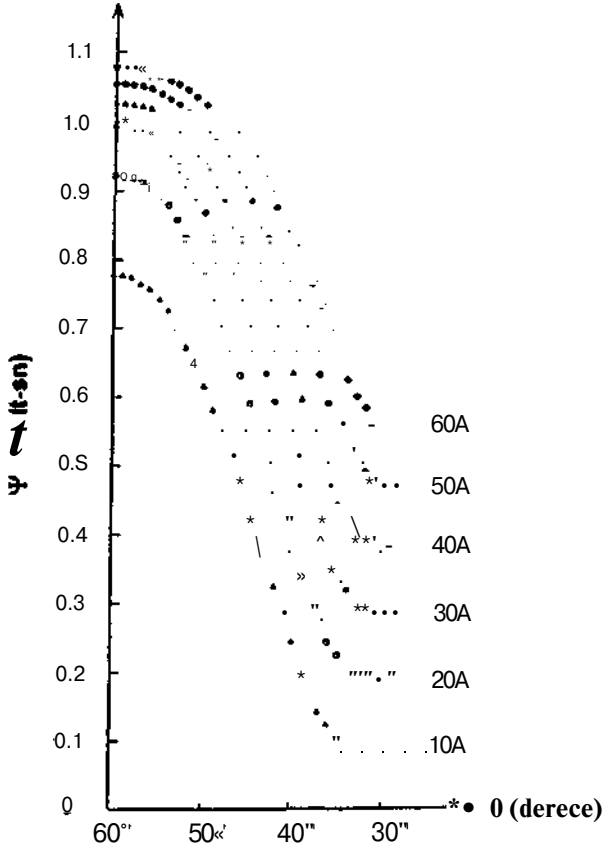
Dört fazlı, 8/6 kutuplu olan AR Motorunda toplam momentin oluştuğu bölge, endüktansın tam çevrimi $360/Nr = 60^\circ$ olarak hesaplanmaktadır. Magnetik alan akısı endüktans çevriminin yarısı olan 30° lik bölge için ölçülmektedir.

3. TEST SONUÇLARI

Rotor yer değiştirme açılarının 1'er derecelik artıştan ile toplam 30° lik bölge için, motorun magnetik alan akısı tesbit edilmektedir. Akım değişkenleri ise, 10A, 20A, ..., 60A sınırları içinde önceden belirlenen ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ 5. ULUSAL KONGRESİ

değerlerde uygulanmaktadır. Bu arada, magnetik alan akısı ile orantılı değişen integratör çıkış gerilimini hassas bir biçimde

elde edebilmek için, altı dijital, oldukça duyarlı ölçü aleti kullanılmaktadır. Akımın öngörülen değerlerde olduğunu kontrol edebilmek için de, osiloskoptan darbe akımının dalga şekli sürekli gözlenmektedir.



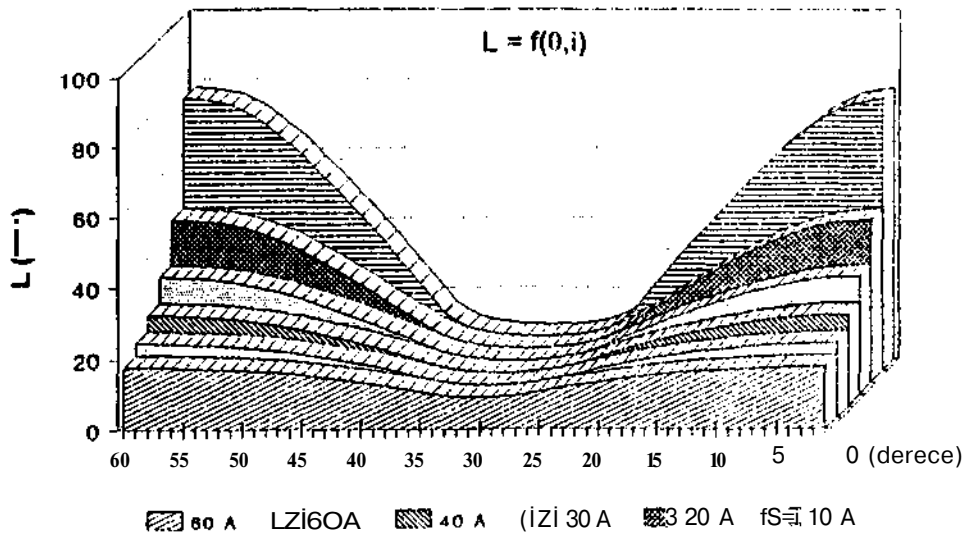
Şekil 6 - AR Motorunun bir fazının magnetik alan akısının akım ve rotor açısına bağlı deneysel olarak elde edilen değişimi.

Aynı yöntem ile motorun diğer fazlarındaki akı değerleri de belirlenmekte, ancak, beklendiği gibi birbirine çok yakın veriler bulunmaktadır. 6 no'lu şekilden de gözlendiği gibi akımın değişimi sabit akım değerlerinde rotor yer değişimine açısı değişken alınarak sunulmaktadır. Karakteristiğinin orta kısmında ekstra bir lineerlik gözlenmektedir. Bu da, bilindiği gibi, motorda momentin oluştuğu bölgedir. Akımın minimum ve maksimum olduğu bölgelerde, stator ve rotor kutup enleri farkından oluşan ve "ölü bölge" olarak tanımlanan bölgede birkaç derecelik kısımlarda akı değişmemektedir.

AR Motorunun faz sargısının rotor yer değiştirme açısına bağlı olarak non-lineer değişimi, $L = T/i$ tanımından elde edilmektedir. Şekil 7'den de gözlenebildiği gibi, motorun kutuplarının aynı olduğu konumda, her akım değeri için minimum endüktans değerleri birbirine çok yakındır. Akımın yüksek değerleri için de, minimum ve maksimum endüktans değerleri arasındaki AL değişimi azalmaktadır.

4. SONUÇLAR

Yapısından dolayı magnetik olarak yüksek bir doymaya sahip olan Anahtarlı Relüktans Motorunun statik karakteristiklerini



Şekil 7- Motorun sargı endüktansının sabit akım değerinde rotor açısına bağlı değişimi.

elde etmek oldukça güçtür. Bu nedenle araştırmacılar farklı modelleme tekniklerinden yararlanmaktadırlar. Sunulan bu çalışmada, motorun hava aralığı akısı, iki değişkene bağlı olarak deneysel olarak elde edilmektedir. Bu büyüklük, bilindiği gibi, motorun performans karakteristiklerinde kullanılan önemli bir parametredir. Deneysel olarak hazırlanan analog devre yardımı ile, motorun faz sargısına değeri önceden belirlenen darbe akımları uygulanmaktadır. Akımların öngörülen değerlerde olması sonuçların doğruluğu bakımından önemlidir. Sonuç olarak, karakteristiklerin düzgün bir biçimde değişmesinin yanısıra, farklı metodlarla da karşılaştırılması yapılmıştır.

REFERANSLAR

1. P.J. LAWRENSON, J.M. STEPHENSON, P. T. BLENKINSOP, J. ÇORDA, N. N. FULTON, "Variable-speed switched reluctance motors", Proc. Inst. Elec. Eng., Pt.B, vol.127, pp.253-265, July 1980.
2. W.F.,RAY, R.M.DAVIS, "Inverter drive for doubly salient reluctance motor. Its fundamental behaviour, linear analysis and cost implications", Proc.Inst.Elec.Eng., Pt.B, Elec. Power Appl., vol.2,pp.185-193, 1979.
3. R. M. DAVIS, W. F. RAY, R. J. BLAKE, "Inverter drive for switched reluctance motor. Circuit and component ratings", Proc. Inst. Elec. Eng., Pt.B, vol.128, pp. 126-136, March, 1981.
4. W.H. KOCH, "On Leakage Inductances and Current Limit of DC Supplied Thyristor Controlled Reluctance Motors", Conf. on ICEM, 1979.
5. J. M. STEPHENSON, M. A. EL-KHAZENDAR, "Saturation in Doubly Salient Reluctance Motors", IEE Proc., vol.136, pp.50-58, January, 1989.
6. J.V. BYRNE, J.G. LACY, "Characteristics of Saturable Stepper and Reluctance Motors", IEE Conf. on Small Electrical Machines, pp.93-96, 30-31 March 1976.
7. J.V. BYRNE, J.B. O'DWYER, "Saturable Variable Reluctance Machine Simulation Using Exponential Functions", Proc. Int. Conf.on Stepping Motors & Systems, pp.11-16, 1976.
8. J.CORDA, J.M.STEPHENSON, "Analytical Estimation of the minimum and maximum Inductances of a Double-Salient Motor", Proc. Int. Conf.on Stepping Motors & Systems, pp.50-59, September 1979, Leeds.
9. R.KRISHNAN, P.MATERU, "Measurement and Instrumentation of a Switched Reluctance Motor", IEEE, Proc. IAS Conference, San Diego, pp.116-121, October 1989.
10. F. ERFAN, "Anahtarlı Relüktans Motorunun Statik ve Dinamik Davranışı ile Ulaşımında kullanılabilirliğinin analizi", Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enst., Doktora Tezi, İstanbul, 1992.
11. P., HOROWITZ, W., HILL, "The Art of Electronics", Cambridge University Press, Second Edition, 1990.

Yrd. Doç. Dr. Feriha ERFAN (AMİEE) : 1984 yılında İTÜ. Sakarya Müh. Fak. Elektrik ve Elektronik Müh. Böl.'den Müh., Y.T.Ü. Fen Bilimleri Ens.'de 1987'de Y.Müh., ye 1992 yılında Doktor oldu. 1985 yılında YTÜ Kocaeli Müh. Fak'de Elek. Böl.'de Ar. Gör, 1989 yılında ögr.Gör, 1993 yılının başından itibaren atandığı Yrd. Doç.'lik görevini halen sürdürmektedir. 90-91 yılları arasında Nottingham Üniv.'de misafir araştırmacı olarak ARM konusunda çalıştı. Haziran 93'ten itibaren B.C. bursu ile Leicester Üniv.de yeni bir AR Motor dizaynı ve kontrol devresinin tasarlanması konusunda çalışmak üzere misafir öğretim üyesi olarak bulunmaktadır.

Prof.Dr. Faik MERGEN : 1970 yılında I.T.Ü. T.O. Elektrik Mühendisliği Bölümünü bitirdi. 1973 yılında, İngiltere, Birmingham'da, University of Aston'dan MSc ve 1977 yılında Loughborough University of Technology'den PhD aldı. 1981 yılında I.T.Ü. Elektrik ve Elektronik Fakültesinde, Elektrik Makinaları Ana Bilim dalında Doçent ve 1991 yılında Profesör oldu. Halen aynı Fakültenin öğretim Üyesidir.

GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNDE E.ROTU ve FLD11'E GÖRE
AYAR BOBİNLERİNİN KUVVETLER BAKIMINDAN İNCELENMESİ

Prof .Dr.Nurdan GİJZELBEYOĞLU

Y.Müh. Burak ÇETİNER

İ.T.D. Elektrik - Elektronik Fakültesi
Elektrik Makinaları Arıabilim Dalı
80191 Gümüşsüyü / İSTANBUL

Özet

Bu çalışmada, güç transformatörlerinde ayar bobinlerinin devrede olmaması halinde sargı kuvvetleri hesaplanmıştır. Ayar bobininin sarımlarının devreden çıkarılmasında olduğu gibi ampersarım dengesizliği olursa, bu durumda meydana gelen bir kısadevrede sargılara etki eden kuvvetler, dengeli ampersarımlılarınki ile aynı olabilir. Dengesiz ampersarımın varlığı sebebiyle bu kuvvetlerin radyal bileşenlerinde dikkate değer bir değişime görülmezken, eksenel bileşenler son derece yüksek değerlere varabilir. Dolayısıyla ayar bobininin yerleştirilme şekli, kuvvetlerin eksenel bileşenleri tarafından belirlenmektedir. Örnek alınan bir transformatörün plaka değerleri sabit kalmak şartı ile çeşitli ayar bobini düzenlemeleri için radyal ve eksenel kuvvetler anma akımında E.Roth Metodu'na ve FLD11 Sonlu Elemanlar Programı'na göre hesaplanmış ve karşılaştırmalı bir tablo elde edilmiştir.

1.Giriş

Trans-formatörlerde alt ve üst gerilim bobinleri aynı yükseklikte ise, boştaki akımın ihmal edilmesi durumunda kaçak alan nedeniyle oluşan kuvvetlerin eksenel ve radyal bileşenleri, sargı konstrüksiyonunda alınan önlemlerle en düşük seviyededir /I/. Ayar bobininin üst gerilim sargısı üzerinde alınması durumunda bu kuvvetler özellikle eksenel bileşenler- en büyük değerine ulaşır. Ayar bobininin devre dışı olması halinde kısadevrede alt ve üst. gerilim sargısı üzerindeki bu kuvvetler simetrik bir sargı sistemi üzerindeki çok katıdır. Ampere yasasına göre oluşan bu kuvvetler akımın karesiyle orantılıdır. Darbe kısadevre akımı,

$$\hat{i} = \sqrt{2} \frac{I}{u_k} (1 + e^{-\pi u_R / u_x}) \quad (1)$$
$$\hat{i} = k y \sqrt{2} I_r$$

ile verilir /2/. Burada

$$k = U + e^{-\pi u_R / u_x}$$

dir. u_x yüzde empedans gerilimi, I [A] olarak anma akımı, u_R bağıl omik gerilim düşümü, u_x bağıl reaktif gerilim düşümüdür. Büyük transformatörler için $u_R \ll u_x$ varsayımı kullanılırsa, yapılan ihmal emniyet yönünde olur:

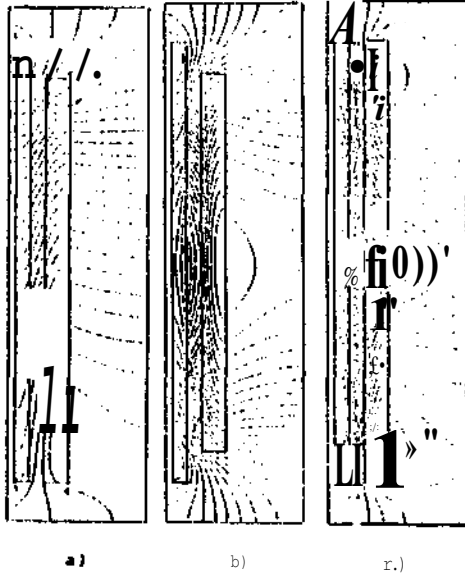
$$\hat{i} = \frac{2\sqrt{2} I}{u_k} \quad (2)$$

Sargılara etki eden kuvvetler, radyal ve eksenel bileşenlere ayrılabilir. Sargının sarımlarında akan akımın etkileşiminden ve magnetik akı çizgilerinin eksenel bileşenlerinden sonuçlanan kuvvetler radyal doğrultuda çalışırken, radyal akı bileşenleri de eksenel kısadevre kuvvetlerine sebep olur. Eksenel akı bileşenleri en büyük olduğunda radyal kuvvetlerin genliği maksimum olur. Bu nokta sargının merkez kısmıdır. Sargı uçlarına doğru gidildikçe radyal olarak saçılan akı çizgileri sebebiyle radyal kuvvetler azalır ve sargı ortasındaki değerinin yalnızca %50-60'mı alır.

Şekil la'da 1,2,3 ve 4 nolu noktalarda eksenel kuvvetler en büyük değerini almaktadır.

Radyal kuvvetler tarafından iç sargı çekirdeğe doğru sıkıştırılırken, dış sargı dışa doğru patlamaya çalışır. Eksenel kuvvetler- simetrik düzenlenmiş bir

sargı sisteminin bobinlerini sıkıştır-
maya meyillidir, bu yüzden her bir sarı-
ma etki eden kuvvetlerin bileşkesi sı-
fırdır. Asimetrik bir sargı sisteminde
eksenel kuvvetler de bobini sıkıştır-
maya meyillidir, fakat sarımlara etki
eden kuvvetlerin bileşkesi vardır ve
simetrisizlikten sonuçlanan doğrultulu
kuvvetler, simetrisizliğin daha fazla
artmasına yol açacak şekildedir.



Şekil 1 t. Çeşitli ayar bobini düzlen-
mel eri iv i i kaçak alanın
dağılışı (FU) 11).

- Ayar bobini Y.(i. sargısı üst ucunda
ve devrede doğu 11,
- Ayar bobini Y.(J. sargısı üst ve alt
ucunda ve devrede doğu 11,
- Ayar bobini Y.(C). sargısı ortasında
ve devrede doğu 11.

Şekil 1a'da radyal akı bileşenlerinin
Y.fl. sargısını eksene l yönde itmeye çalı-
şması açıkça görülüyor, (b)'de ise
radyal akı bileşenleri Y.ti. sargısının
üst ve alt kısmında sargı ortasına doğu
itmeye çalışmaktadır ve sargı uçları-
ndan sargı ortasına doğru toplanarak
gelen eksene l kuvvetlerin bileşkesi sı-
fırdır, (c)'de i t e aynı sargının üstte
kalan kısmı. üstte, altta kalan kısmı al-
ta eksene l olarak itilmektedir. Radyal
kuvvetlerin her üç durum için de fazla
değişmediği belirtilmelidir.

Yaklaşık bağıntılar kullanılacaksa,
radyal kuvvetler ya Ampere yasasından
($\vec{F} = L \int \vec{d} \times \vec{B}$) ya da depolanan magnetik
enerjinin sargıların radyal yöre

(1) için doğru. I tuşunda türot ilmosiyle
elddo cdilir. Örnek:

$$F = \frac{J_s}{2} (W_i)^2 \frac{1}{J_s g} \quad (3)$$

$H_0 = 10^7$ H/m,
 w - sarım sayısı,
 i - dörb? kıs/ıdevre akımı [A],
(= kaçak ;ıkı çizgilerinin ortalama
çevresi [m],
 l_0 = kaçakakı çizgilerinin uzunluğu [m],
 g = magnetik olarak dengeli gurupların
sayısıdır.

2. K.Rot.h Metoduyla Radyal ve EkseneL Kuvvetlerin Hesabı

Rot.lı metodu, magnetik vektör imtansiyel
için yazılan Poisson denkleminin iki
boyutlu halde seri çözüme dayanır'.

$$-\nabla^2 A = \mu_0 \delta \quad (4)$$

δ (tol)lam akı yoğunluğu [A/m^2], A vektör
potansiyel [Kb/mJ, $i_0 = 4\pi \cdot 10^7$ H/m ola-
rak boşluğun permeabilitesidir.

Vektör potansiyel A'n.ın seri çözümü (1)
de sınır l;oşulları dikkate alınarak
yerleştirilir ve serinin bilinmeyen
katsayıları hesaplanır. Bu motoda sar-
gının z ekseni boyunca ->'dan +<>'a
uzandığı kabul edildiğinden, A'nın yal-
nızca z bileşeni vardır, yani $A_x = A_y = 0$
dır. Seri çözüm olan bu bileşen

$$A_z = \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{j,k} \cos(m_j x) \sin(n_k y) \quad (5)$$

ile verilir. $R = \text{rot}.A$ denklemleri kullanı-
lır-, ($\nabla \times \vec{A} = \vec{J}$) de gerekli yerleştirmel-
er yapılırsa, integrasyon somum şu
ifadeler bulunur.

$$F_{xj} = \int_{b_j}^{a_j} \int_{b_j}^{a_j} -\delta_j \frac{\partial A_z}{\partial x} dx dy, \quad (6)$$

$$F_{yj} = \int_{b_j}^{a_j} \int_{b_j}^{a_j} \delta_j \frac{\partial A_z}{\partial y} dx dy$$

[N/m]

a_j, b_j j. sargının çekirdeğe uzaklığı;
 b_j, b_j ise sargıların alt boyunduruğa

eksenel uzaklıklarıdır. 6j yönüyle birlikle .j.bobinin [A/m²] olarak akım yoğunluğudur. Programda sori çö'üm için i = 20 ve k = 20 alınması yeleri i doğruluğu sağbu` /2/, /!/.

3. Sonlu Kirmanlar Yöntemiyle liudy.il ve Ekserini Kuvvet..lerin Hesabı ./!/

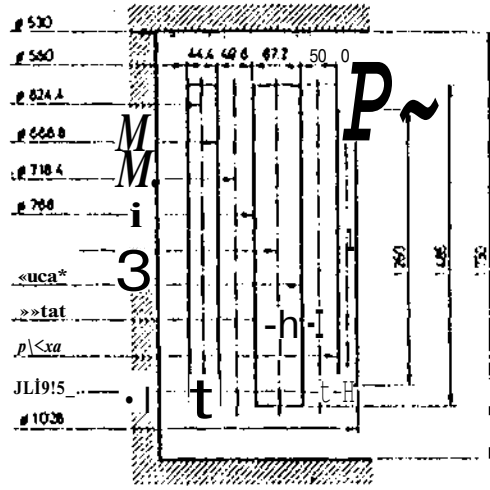
Transformatör kaçak alanının hesabında, nkseiol. simetrikli sonlu elemanlar analizi uygundur. Sonlu eleman analizinde çözüm bölgesi küçük üçgen elemanlara ayrılılı- ve niagnetik vektör potansiyel A, düğüm noktalarında hesaplanır, llerbir üçgen eleman içinde A'nın lineer bir değışiminin olduğı düşünülür. A'nın düğümsel değerlerinin bulunması varyasyonel hesabın bir problemidir. (1)'e karşı düşün enerji fonksiyoneli silindirlik koordinatlarda şöyle verilir:

$$W[A] = \int_R \int_D \int_D \left(\frac{1}{2} \mu \nabla^2 A - j \cdot \nabla A \right) dz dr dz \quad (7)$$

Bu problem için bölge Şekil la, Şekil lb ve Şekil lc'de gösterilen yarımc pencere açıklığıdır. Kullanılan FLDJ1 ınket programı bölgeyi IM9G bölgeye ayırır. Pıogtam herbir sargı için radyal ve eksenel kuvvetleri, maksimum magnetik indüksiyonu ve problem için depolanan toplam magnetik enerjiyi verir.

4. Çeşitli Ayur Bobibi Düzenlemeleri İçin Anma Akımında Radyal ve Eksenel Kuvvetlerin E.Hoth ve FLD11'0 (Jöre Değerleri /2/, /M

7 farklı ayar bobini düzenlemesi için ayar bobininin devrede olmaması durumunda anma akımında radyal. ve eksenel kuvvetler, Rotlı metoduna ve Sonlu Elemanlar Yöntemine göre hesaplanmıştır. Kısadevre kuvvetlerinin hesabı için tablodaki değerler (k/u_k)² ile çarpı İmalı. Transformatör verileri için (1) denkleminde k/2 =2.6 bulunur.



25 MVA Yd11; 120± %15/11 kV;
120/1:f10 A; U_k=0.09;
w, =1000 Y.G. ; K ^ ITO A.Rob. ;
w₂=1.5!> A. (i. ; kv'2 =2.6

fj'kil 2. (.eşitli sargı düzenlemeleri için Örnek alman 25 MVA'lık transformal örün değerleri ve VıoyutlaiM /5/.

Tablo 1

Sargı Durumu	Bu k M> mju	Var. Tut. E>010' (M>...	U ₀ /T. (V)
II	22702.11	Ut/1.15	12220
	20006	-15423	-16 Ovt.
	120> 5	-1.1100.3	-2 IV'10
	20004.6	11114	22280
I	111007.2	-1.5	-2.1.00
	20670.7	-0.3	solu
	111011.11	-1.5	-3.1.00
	111010.5	1111.10	11.111
I'	111010.5	-11.17.2	-1.1.111
	111010.11	1110.1	1110.10
	111010.5	1110.6	-1.1.1
	7.4.50	1110.1	1110.10
II	22606.3	-1.11	-2.1.10
	111011	1110.6	1110.10
	111011	1110.6	1110.10
	111011	1110.6	1110.10
II'	22606.3	-1.11	-2.1.10
	111011	1110.6	1110.10
	111011	1110.6	1110.10
	111011	1110.6	1110.10

* Tablodaki değerler VI. 1_N için hesaplanmıştır. Kısadevre kuvvetlerini bulmak için bu değerler (k/u_k)² ile çarpı İmalıdır.

Transferimlelerde fi. -ir bobininin Y.G. S. litiisi Üst Uçlilida Vaya ali !'MII'.' ulil- şırua 'incili küyük l.ransforinilürlerde i/, in Veri lrl.-i lir. Hu yerleştirmiş şekli "ir kökü keşnidur ve his- kısıadevi" senri- eu sarı!) Jar bil.'i/.' yer dejişl iritse si- metrisizlik eksene! l;u\ \.'*t lo i '...! .»rl ar.

Ayar bellini sarsıtı iisl ve ali. ürına \or- leşikse, j'yar bobininin bul uıtlıitii" V.(i. s: "kıl. İ. In Jilsarımlarınis: rı lı: .: l ilü' l' : \; a- lısjarı eksene! ktı\ ve l leri w ';<> i i i < j l; .- r. aplanmaiı, buna l^'MC kar'ın' \iv iline J i- dir. Ayar bobininin Y.G. sargısı orla- sııda oluşu aza lmi*-., ckl-f. fıo i. kuvvet J'r verir ve l'U kuvve! l.-M- l.(llayca (Jest. f< ! .- yiri yar. ııyyla l;ar<;ı l.; *nabi l i r. P. iijjl; t; i i d- il'i L f i n s f o r m a l . ö t - l i T i l e ' a y a r b o b i n i n i n Y . G . R a r g ı s ı u r l a t : : i n d . n i d . i v i i ' p a r t a - l ı o l m a s ı h a l i s n ı ' l c r e c r a z a l m ı ş o k s ' - i i c l k ı v \ (M , l ' T \ o r - i i . S a f - i i d i i - c i , l > m < . l r - c i n i n l i ' M u i ' i n h f n r ı n l ; > j < m i j c i a r e d y . - i l ; o r - l a n ı m a l a r ı n l a / 4 . ' ; < l ' - ; i ş n i ' - J i ü i ' < > H i j i l y o r . (i y l e y s o ; \ a r b o b i n i n i n k j ' a d e v r e l u v - s e l l e r i n e i j ü r e y e r l e j l i r i l m e ş i : : t . e - f i n . l k ı v v M l f i i n t l e - v - l e r j y l e l v l i r l e n i r . Y ü k s e k < ; f . i . i i m d e v ; i < i m y ü z d e n i n i n ' i s -) e n < l i t i \ e r l e r d ' ' a v ; s > - b u b i n i a r ı b i r s a r ı i i h a l i m l e d i ! .

Ali. ve iisl. gerilim sai' fı^'ı 'iir-l.s i / l i l l e r i n i n l ' i r b i r i n i k ' i r ş - l i n u r ' s ı e k - s e n e l k u v v e t l e r i a y a l l i r . A y a r l ı b o b i n ' k a r ş ı d i i ^ e n a l l . y j o r i l i m s a r g ı s ı b ö l i n i ü - n i n i n e e l l i l i m e s i d e o k s e n e l k u v v e t l e r i a z a l t m a k i c - i n k u l l a n ı l a n b i r y o l d u r .

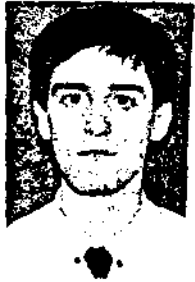
Kaynak lar

- /1./ Çetiner, A.R. , Güç Transformatörle- rinde Ayar bobinlefinin Yerleşti- rilmesinin Sargı Kuvvetleri Bakı- mından İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, 1993.
- /2/ Güzelbeyoglu.N. , Elektrik Makina- larında Aşırı Zorlanmalar (İTİ' Elektrik-Elektronik Fakültesi), 1980.
- /3/ Say.M.G., Alternating (Jtrienl. Machines, İtman, Fifthı Kd. , 1083.
- /4/ Aıderseu,(.W. , Poissonian Magnel i< Fields, İİLM User's Manual, 19!1 (Projrının İTÜ Elektrik Müh. Kolumü

Klektirik Makinaları \nabili-i Pa lı Tarafından !..nii edilmiştir.

/;"/ İ\ai'dı.'ii, K. , Kerenyi, !), , Ki'-s, !, ., l a i ' e J ' o w e r T l . ' U ' e r i ' e i - s , (S t i l d i e v i M F l e c t . f j j - a l a n d K i " e l r < > n i e K u > ; ' i n e e r i n s i L T J) , K l s e v i e r , ! !) H 7 .

Özgeçmiş



Y.Vürlü. A. Hurak (,"! in'-r 1070'de Adana'da do^du. İJl.'i'de Yıldız üniversi- lı'şiden mii'li'-nd is,)'Vvt.\>- İTO Ten Mi l i m l e r i K n s t i t i i - s i i n d e > ü k s e l . m i i l e n d i ; o l a r a k i n o z u m o l d u .



Prof. Dr. Nurhan Güzel- b->oi:lu ÜİUR'de Ankar..da (ofidı. İJfi) da İTf'İO'dan Klekt.rik Miih-nd i ri o l a r a k m e z u n o l u . İTÜ F l e k t r i k F a k ü l e ş i ' u d e K l e k t . r i k M a k i n a l a r - l K ü r s ü s ü n d e ç a l ı m a a b a ş l a d ı . İ k i l m e İ U M M A K ' k l . r i l , İ l t i s a s < > l i i n ü n d e n Y ü k s e k ^ l ü l e n d i s , 1970'dn İTİ' l - l e k t r i k F a k ü l l e s i E l e k t r i k M a l i m a l a r ı K ü r s ü s ü n d e D o k t o r a s ı n ı t a m a m l a d ı . A y n ı F . - k ü l i e r] , - ! !) W d , . !) . - e ' i t , ! !) H 9 ' d a P r - - l e l - - , r o l d u . H a l e n İTİ' F l e k > . r i k - F l e k i r o n - n i k F a k ü l t e s i E l e k t r i k M ü h e n d i s l i ğ i l i ü - l ü m i i , E l e k t r i k M a k i n a l a r ı A n a b i L i m D a - l ı r u d a ö ü r e t i m ü y e s i o l a r a k ç a l ı ş m a k t a - d ı r .

SENKRON GENERATÖRÜN AKI DAĞILIMININ

FLD11 PROGRAMI İLE İNCELENMESİ

Prof. Dr. Nurdan Güzelbeyoğlu

Y. Müh. Yeşim Şireli

1. T. Ü. Elektrik-F. Elektronik Fakültesi
• Elektrik Mühendisliği Bölümü
(Jümüşsuyu-İSTANBUL)

ÖZET

Bu çalışmada, sonlu elemanlar yöntemini esas alarak işlem yapan ve elektrik makinalarının akı dağılımlarının incelenmesinde kullanılan FLÜI I paket programı tanıtılmıştır. Program, çıkık kutuplu bir senkron generatöre uygulanarak jrtagnetik alan dağılımı ekle edilmiş, ayrıca dış başındaki endüksiyonun konvansiyonel hesapla ve FLDI I programı ile bulunan değerleri karşılaştırılmıştır.

1. GİRİŞ

İki boyutlu elektromagnetik alan problemlerinin çözümünde sonlu elemanlar yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Yöntem, çözüm bölgesi için bir potansiyel fonksiyonu bulunmanın mümkün olmadığı durumlarda, bölgenin sonlu sayıda küçük elemanlara bölünmesi esasına dayanır. Geometrik yapıya uyumları nedeniyle genellikle üçgen elemanlar tercih edilir.

Herhangi bir problemin sonlu elemanlar yöntemiyle çözümü dört temel adımdan oluşur:

- Çözüm bölgesinin sonlu sayıda alt elemanlara bölünmesi,
- Bir elemana ait temel denklemlerin oluşturulması,
- Çözüm bölgesindeki tüm elemanların birleştirilmesi,
- Elde edilen denklemlerin çözülmesi.

Bu çalışmada, plaka değerleri verilmiş olan çıkık kutuplu bir senkron generatörün konvansiyonel yöntemle hesapları yapılmış ve daha sonra sonlu elemanlar yöntemini kullanarak işlem yapan FLDM programı ile akı dağılımı bulunarak,

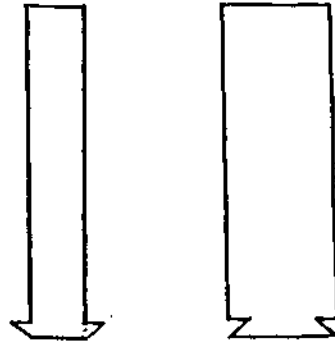
her iki yöntemle elde edilen dış endüksiyonları karşılaştırılmıştır [1],[2].

2. SENKRON GENERATÖRÜN KONVANSİYONEL HESAP YÖNTEMİ İLE BULUNAN DIŞ ENDÜKSİYONLARI

Sanal gücü $S=2.2H$ MVA, güç faktörü $\cos\phi=0.8$, uç gerilimi $U_n = 6400$ V, frekansı $f=50$ Hz, devir sayısı $n_s=150$ dev/dak olan üç fazlı çıkık kutuplu senkron generatörün tasarımı, ana boyut denklemlerinden yola çıkılarak yapılmıştır.

Çeşitli hesaplar sonucunda, endüvi çapı $D_a=360$ cm, oluk sayısı $IN=240$, oluk yüksekliği $h=93$ mm ve oluk genişliği $b=6$ mm olan dikdörtgen oluk seçilmiştir. Şekil 2.1'de makinenin bir oluğu ve dışı görülmektedir. Ayrıca endüvi dişlerinin çeşitli kısımlarındaki endüksiyonlar aşağıdaki gibi bulunmuştur:

- Diş başındaki endüksiyon $B_j=1.562$ T
- Diş başından itibaren dışın %40'lık yerindeki endüksiyon $B_j' \sim 1.513$ T
- Diş ortasındaki endüksiyon $B_j'' \sim 1.5$ T



Şekil 2.1. Senkron generatörün bir oluk ve dışı.

i. FLDİİ PROGRAMI VE SENKRON GENERATÜRE UYGULANMASI [3j

Sonlu elemanlar töülemine esas alan Fİ,DII paket programından, elektrik makinnlntmm akı dağılımlarının incelenmesinde yararlanılmaktadır. Program, ana boyutları belli olan tüm makinalara uygulanabilir.

Programa islenen çizimin yaptırılabilmesi için kartezyen veya polar koordinatlar kullanılabilir. Kartezyen koordinatlarla, yatay, düşey ve diagonal düz çizgilere sahip şekiller, polar koordinatlarla ise dairesel yaylar ve radyal çizgilerden oluşmuş şekiller çizdirilebilir. Bununla birlikte, kartezyen koordinatlarda çalışırken, özel bir kod (9000 mm kodu) kullanılarak, dairesel yaylar da çizime eklenebilir. Söz konusu senkron generatötün akı dağılımının elde edilmesinde de bundan yararlanılmıştır.

Programda ilkönce, üzerine ana şeklin çizdirilebilmesi için bir ızgara oluşturulur. Bunu meydana getiren çizgilerin yoğunluğu, şeklin içiçdiği alt bölgelere göre değişir. Izgara gözleri program tarafından üçgen elemanlara bölünerek, sonlu elemanlar yönteminin adımları uygulanır. Dış endüksiyonlarının daha hassas olarak elde edilebilmesi için bu bölgede üçgen elemanlar sıklaştırılmıştır.

Programa girilmesi gereken temel bilgiler şunlardır:

1. İzgara yoğunluğunun değiştiği düşey çizgilerin numaraları ve x eksenini üzerindeki koordinatları.

2. İzgara yoğunluğunun değiştiği yatay çizgilerin numaraları ve y eksenini üzerindeki koordinatları.

3. Ana şekil üzerinde görölmek istenen akı çizgisi sayısı.

4. Çevre çizgisi sayısı:

Üzerine akı dağılımının çizileceği ana şekil bütün olarak değil, çevre çizgisi adı verilen parçalara ayrılarak programa girilir. Bu çizgilerin bazıları kapalı bölgeler de oluşturabilir.

Burada, inak inanın yanın kutup, uyarma sargısı, endüvinin bir parçası ve oluklardan oluşan kısmı ele alınmıştır. Buna göic, ana şekilde dokuz adet çevre çizgisi bulunmaktadıdır:

- i. Şekil çerçevesinin alt sınını,
- ii. Şekil çerçevesinin sol sınını ve buna bağlı olarak endüvinin dış yüzeyini belirleyen yay,
- iii. Kutup,
- iv. Oluklar hat iç olmak üzere endüvi,
- v. Oluklar (dörl adet).
- vi. Uyarma sargısı.

5. Her bir çevre çizgisi için nokta sayısı, koordinatları, rölatif geçirgenlik ve iletkenlik, akım ve kodlar:

Burada söz konusu olan nokta sayısı, her bir çevre çizgisini oluşturan noktaların sayısıdır. Bu çizgilerden biri kapalı bir bölge meydana getirdiğinde, başlangıç ve son noktaları çakışacağından, bu nokta tekrarlanacaktır. Örneğin bir beşgen için altı adet nokta girilecektir.

Noktaların koordinatlarının, çevre çizgilerinin rölatif geçirgenliklerinin, iletkenliklerinin, akımlarının ve akı çizgilerinin alması gereken şekli belirleyen kodların da programa verilmesi zorunludur. Burada sözü edilen kodlar şunlardır:

i. '0' kodu: Normal alan bölgesini tanımlar.

ii. T kodu: O çevre çizgisinin hesapların dışında tutulacağı ve akı çizgilerinin dik açılar yaparak gireceklerini gösterir.

iii. '2' kodu: Çizgi boyunca (kapalı bir bölge ise içinde de) vektör potansiyelin sıfır ve sabit olacağını belirtir. Bu, program için bir referans potansiyel demektir. Programa bu şekilde en az bir adet akı çizgisi girilmelidir.

Bu temel bilgiler verilip program çalıştırıldığında, senkron generatörün akı dağılımı şekil 3. l'deki gibi elde edilir.



Prof. Dr. Nurdan C. Jir. elbeyoglu, 1938de Ankara'da doğdu. 1959'da İT.Ü.T.O.'da Elektrik Mühendisi olarak mezun olup İ.T.Ü. Elektrik Fakültesinde Elektrik Mühendisliği Bölümünde çalışmaya başladı. 1961'de İ.D.M.M.A. Elektrik Mühendisliği Bölümünde Yüksek Mühendis olmak için mezun oldu. 1976'da İ.T.Ü. Elektrik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde doktora teziyle doktora teziyle mezun oldu. Aynı zamanda 1980'de Doçent, 1989'da Profesör oldu. Halen İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümünde Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda öğretim üyesi olarak çalışmaktadır.

İKİ BOYUTLU SONLU ELEMAN ANALİZİ YAPAN BİR PROGRAMIN CAD TABANLI BİR PROGRAM İLE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Ali İhsan ÇANAKOĞLU

Ferit ATTAR

Y.T.Ü. Elektrik - Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü
Beşiktaş / İSTANBUL

ÖZET

Bu çalışmada Sonlu Eleman Yöntemi için otomatik ağ iş/emini gerçekleştiren bir program tanıtılmıştır. Protraui, AutoCAD R.10 paket programı ile gerçekleştirilmiştir. Ağ işlemini yapan program LISP (List Programming) diliyle yazılmıştır. Çalışılan bölge birinci dereceden üçgen elemanlara bölünmektedir. Sonuçta oluşan ağ düzenlidir. Ağın düzenli olması sebebiyle ağ iş/emini için herhangi bir özel algoritma kullanmaya ihtiyaç duyulmamıştır. Ağın düğüm noktalarına ait koordinatları, çizimin DXF kütüğü oluşturularak bir BASIC programına okutulmaktadır ve sonuçta eleman matrisleri hesaplanmaktadır. Program, iki boyutlu eksene/simetrik lineer magnetosta/ik alanlar için yazılmış olup nonlineer analiz için aynı prosedür/e ve gerekli eklemelerle geliştirilebilir.

1. GİRİŞ

Sonlu Eleman, son yıllarda özellikle elektrik makinalarının analizinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Yöntemin sağladığı en büyük avantaj, karmaşık fiziki şekillerin ve nonlineer malzemelerin modellenmesine imkan vermesidir. En büyük dezavantajı ise bilgisayarlarda büyük harddisk ve belleğe ihtiyaç

göstermesidir [1-3]. Yöntem entegro-diferansiyel denklemlerin nümerik yolla çözümüdür. Yöntemin elektrik mühendisliğine ait ilk uygulamaları 1960'lı yıllarda görülmeye başlamıştır [4]. 1970'lerde yarıiletken elemanlara uygulanan yöntem [5], aynı yıllarda elektrik makinalarının analizinde kullanılmaya başlanmıştır [6]. Bilgisayar yazılımındaki gelişmelere paralel olarak son on yılda geliştirilen Sonlu Eleman paket programları ile, endüstride yaygın kullanım alanı bulan yöntem günümüzde en güvenilir nümerik yöntem olmuştur. Bu tür paket programlarla yapılan araştırmalara dayalı birçok makale yayınlanmıştır [7-8-9], Son yıllarda yapılan analitik çözümlerden elde edilen sonuçların, Sonlu Eleman analizi yapan paket programlardan alınan sonuçlarla karşılaştırılması yöntemin güvenilirliğini göstermektedir [10-11-12-13].

Sonlu Eleman Yöntemiyle bir problemin çözümü aşağıdaki işlem sırasıyla yapılmaktadır:

- (i) Çalışılan bölgenin elemanlara bölünmesi, yani sonlu eleman ağının oluşturulması,
- (ii) Her bir elemanın katsayı matrisinin hesaplanması,
- (iii) Probleme ait kaynakların ve sınır değerlerinin belirlenmesi,
- (iv) Eleman katsayı matrislerinin gruplanması ve sınır şartlarının verilmesi,
- (v) Sonuçta oluşan matris sisteminin çözülmesi,
- (vi) Sonuçların görüntülenmesi.

(i) ve (ii) safhaları sonucun doğruluğuna en çok etki eden safhalardır. Çalışılan bölgenin uygun elemanlara en iyi şekil faktörüyle bölünmesi yöntemin en önemli adımudur. Problemin yapısına uygun elemanların seçilmesi ve kaba ağ işleminden sonra uygulanması gereken ağın incellilmesi işlemi (refinement), düzensiz ağ kullanılması durumunda belirli bir algoritmanın izlenmesini gerektirir (üçgen elemanlar için Delauney Algoritması gibi).

Bu makalede, iki boyutlu Sonlu Eleman Yöntemi için, çalışılan bölgenin, yöntemi kullanan tarafından görerek alt bölgelere ayrılması işleminin bir çizim paket programıyla gerçekleştirilmesi anlatılmıştır. Bölge birinci dereceden üçgen elemanlara bölünmektedir. Sonuçta oluşan ağ düzenlidir. Problemdeki farklı bölgeler ayrı ayrı tanımlanmakta ve bir önce tanımlanan bölgeye göre ağ işlemi yapılmaktadır.

2. İKİ BOYUTLU PROBLEMLER İÇİN MATRİS FORMÜLASYONU

Elektrik makinalarında elektromagnetik alan problemlerinin genel bir formülasyonu referanslar [1-4]'de verilmiştir. Bir transformatörü ele alacak olursak, nonlinear malzemenin imal edilen bu makinaya ait magnetik alan analizi, belirli sınır şartlarıyla birlikte Poisson veya Laplace denklemleri yardımıyla yapılmaktadır. İki boyutlu kartezyen koordinat sisteminde elektromagnetik alanla ilgili formül aşağıdaki gibidir.

$$\nabla(uWf) = -\bar{J} \quad (1)$$

Formülde, \bar{A} kompleks magnetik vektör potansiyeli, σ relüktiviteyi, J akım yoğunluğunu göstermektedir. (1) fonksiyonunun fonksiyonu ya da fonksiyoneli varyasyonel yöntem kullanılarak, aşağıdaki gibi elde edilir.

$$F = \int_V [(uB^2/2) - 2\bar{J} \cdot \bar{A}] dv \quad (2)$$

v analiz edilen bölgenin hacmidir. \bar{A} magnetik vektör potansiyeli (2) fonksiyoneli minimum yapmalıdır. Bunun için,

1024

$$\frac{\partial F}{\partial A} = 0 \quad (3)$$

yapılarak, iki boyutlu problemler için sonlu eleman eşitliği.

$$u[S][A] = [J] \quad (4)$$

olarak elde edilir. $[S]$ Sonlu Eleman ağındaki elemanlara ait katsayılar matrisi, $[A]$ düğümlerdeki magnetik vektör potansiyel değerleri matrisi, $[J]$ akım yoğunluğu matrisidir. N ağıdaki global düğüm sayısı ise, katsayılar matrisi $N \times N$, magnetik vektör potansiyel ve akım yoğunluğu matrisleri $N \times 1$ boyutlu olurlar. $[A]$ ve $[J]$ kompleks vektörlerdir. Problem lineer ise, yani o lineer ise (4) direkt olarak çözülebilir. Eğer o nonlinear ise A magnetik vektör potansiyel değerlerini bulmak için Nevvton-Raphson iterasyon yöntemini kullanmak gerekir. i ve $i+1$ iterasyon değerleri için (5) eşitliğini yazmak mümkündür.

$$[A]_{i+1} = [A]_i - \frac{u[S][A]_i - [J]}{\frac{\partial}{\partial A}(u[S][A]_i - [J])} \quad (5)$$

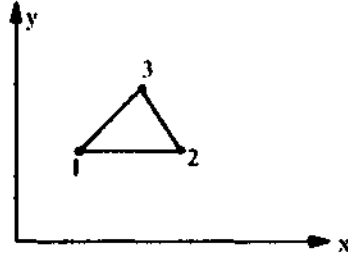
(5) eşitliği için u -B karakteristikleri B-Splinej veya en küçük kareler metodlarından biri kullanılarak modellenebilir [14]. Ağ için lineer üçgen elemanlar kullanılırsa, bir elemana ait toplam magnetik vektör potansiyeli değeri,

$$A^{(i)}(x, y) = \sum_{i=1}^3 A_i \cdot \Psi_i(x, y) \quad (6)$$

şeklinde bir yaklaşımla hesaplanır. A_i i düğümdeki magnetik vektör potansiyeli değeri, Ψ_i eleman enterpolasyon fonksiyonudur. (4) ve (5) matris denklemleri Gauss eliminasyon metodu ile çözülebilir [15].

3. LİNEER ÜÇ DÜĞÜMLÜ ÜÇGEN ELEMAN İÇİN ENTERPOLASYON FONKSİYONLARI

Şekil.1'de Sonlu Eleman analizinde kullanılan tipik bir üçgen eleman görülmektedir.



Şekil. 1 Kartezyen koordinatlarda üçgen eleman.

Bir üçgen elemanda A vektör potansiyelinin aşağıdaki formülle yaklaşık olarak bulunacağını düşünelim.

$$A(x, y) = c_1 + c_2 x + c_3 y \quad (7)$$

(7)'ye göre örneğin 1. düğümdeki A değeri.

$$A_1 = A(x_1, y_1) = c_1 + c_2 x_1 + c_3 y_1 \quad (8)$$

olacaktır. Üçgen elemanların lokal düğümlerinin saat ibresinin dönüşünün tersi yönünde numaralandırdığımızı kabul edersek, (8) eşitliklerinden c katsayıları çözümlerse, bir elemandaki toplam magnetik vektör potansiyelinin değeri için (6) eşitliği elde edilmiş olur [16]. Eşitlikte (e) elemanı göstermektedir. (6) eşitliğindeki $*F$, enterpolasyon fonksiyonları c katsayıları (8) denklemlerinde yerine konup gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra.

$$X^j = \sum_{i=1}^3 A_i^j(x, y) \quad i = 1, 2, 3 \quad (9)$$

olarak bulunur, A_i üçgenin alanıdır, a_i , b_i ve c_i sabit olup aşağıdaki şekilde hesaplanır.

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ 5. ULUSAL KONGRESİ

$$\left. \begin{aligned} \alpha_i &= x_j y_k - x_k y_j \\ \beta_i &= y_j - y_k \\ \gamma_i &= x_k - x_j \end{aligned} \right\} i \neq j \neq k \quad (10)$$

Elemanlara ait katsayı matrisi ise yine referans [16]'da gösterildiği gibi bulunur.

$$L^{-1} = \frac{1}{4J_e} (\beta_i^{(e)} \beta_j^{(e)} + \gamma_i^{(e)} \gamma_j^{(e)}) \quad (ii)$$

Akım yoğunluğu vektörü ise,

$$[J_i^{(e)}] = \frac{JA_i}{3} \quad (12)$$

olarak bulunur. Akım yoğunluğu vektörüne problemin sınır şartları eklenerek (4) eşitliği çözülür. Seçilen eleman lineer olduğundan, her bir elemandaki B akı yoğunluğu sabit olacaktır. Bir elemanda herhangi bir (x, y) noktasındaki B akı yoğunluğunun bileşenleri.

$$B_x(x, y) = \frac{\partial A}{\partial c} = \sum_{i=1}^3 A_i^{(e)} \frac{\partial \Psi_i^{(e)}}{\partial x} \quad (13a)$$

$$B_y(x, y) = \frac{\partial A}{\partial y} = \sum_{i=1}^3 A_i^{(e)} \frac{\partial \Psi_i^{(e)}}{\partial y} \quad (13.b)$$

olarak bulunur.

4. AUTOCAD PAKET PROGRAMI İLE OTOMATİK AĞ ÜRETİMİ

AutoCAD paket programı bugün en çok kullanılan çizim programıdır. Üç boyutlu çizim özellikleri ve son versiyonlarındaki katı cisim modelleyebilme yeteneğiyle daha da popüler hale gelmiştir. AutoCAD altında derlenebilen LISP (List Programming) programlama dili bu programa ayrı bir özellik katmaktadır. LISP ile kullanıcı bu programa otomatik çizim yaptırabilmekte hatta yeni komutlar ekleyebilmektedir [17].

Ağ işlemi için LİSP diliyle bir program yazılmıştır. Önce çalışılan bölge birkaç alt bölgeye ayrılmakta, bu bölgeler sırasıyla tanımlanıp her bölge adım adım sonlu elemanlara bölünmektedir. Ağ işleminin sonunda, yapılan çizimin bir DXF kütüğü oluşturulmaktadır. Bu DXF kütüğü AutoCAD'de yapılan çizimle ilgili bütün bilgileri içermektedir. Yazılan bir BASIC programı ile DXF kütüğünden bu bilgiler okunup, problemdeki toplam düğüm sayısı, toplam eleman sayısı ve global koordinat noktaları elde edilmektedir. Aynı BASIC programı ile eleman matrisleri hesaplanmaktadır.

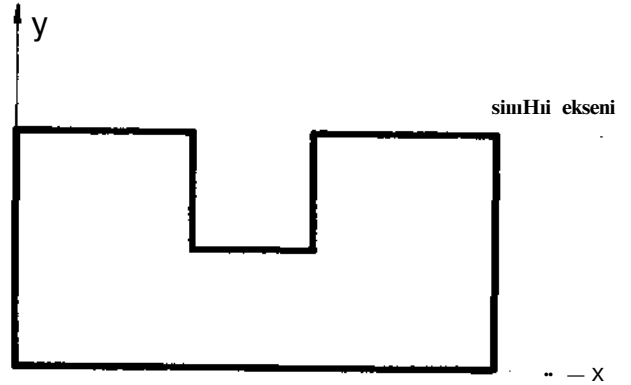
LİSP programındaki ana komut, AutoCAD'in "EDGESURF" komutudur. Bu komut belli bir bölgeyi alt bölgelere ayırarak ağ işlemini yapmaktadır. Burada LİSP dilinin bir avantajı ortaya çıkmaktadır ki o da yazılan program içinde AutoCAD komutlarının işletilebilmesidir. Ağ işlemi için gerekli hesaplamalar LİSP'in kendi komutları ile yapılmıştır[18]. Aşağıda çizim editöründe bir dörtgen çizdiren programın listesi verilmiştir.

```
(defun c:dortgen (/ k1 k2 k3 k4 u1 u2)
  (setq k1 (getpoint "alt sol köseyi gir:"))
  (setq u1 (getdist "ilk kenar?:"))
  (setq u2 (getdist "ikinci kenar?:"))
  (setq k2 (polar k1 1.5707 u2))
  (setq k3 (polar k2 0.0 u1))
  (setq k4 (polar k3 -1.5707 u1))
  (command "line" k1 k2 k3 k4 c)
)
```

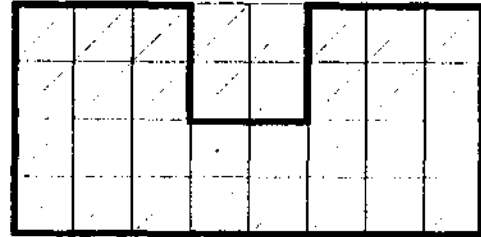
Şekil.2'de bir transformatörün iki boyutlu şekli verilmiştir. Simetriden dolayı Sonlu Eleman yöntemi için transformatörün yarısını modellemek yeterlidir. Simetri x eksenine göre alınmıştır.

Şekil. 3'te ise şekil. 2'de verilen transformatörün yazılan programla gerçekleştirilen sonlu eleman ağı gösterilmiştir. Elemanlar sadece yönlendirme farkıyla birbirinin aynıdır. Elemanların lokal düğümleri diagonal şekilde numaralandırıldığında, bütün elemanların katsayı matrisleri aynı olur. Dolayısıyla sadece bir eleman için katsayı matrisinin hesaplanması yeterli olacaktır. Bu şekilde numaralandırma şekil 4'te Gösterilmiştir

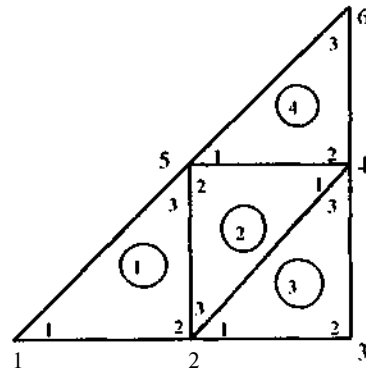
1026



Şekil.2 Çekirdek tipi transformatörün iki boyutlu modeli.



Şekil.3 AutoCAD paket programı (arafından makalede verilen yöntemle şekil.2'de verilen trafo-nun oluşturulan sonlu eleman modeli.



Şekil.4 Elemanların lokal düğümlerinin diagonal numaralandırılması.

Aşağıda BASIC programından alınan ve şekil 3'te verilen sonlu eleman modeline ait olan sonuçlar verilmiştir.

```

ELEMEN SAYISI= 64
DUGUM SAYISI= 45
ELEMEN ALANI= .125
S( 1 , 1 )= .5
S( 1 , 2 )= -.5
S( 1 , 3 )= 0
S( 2 , 1 )= -.5
S( 2 , 2 )= 1
S( 2 , 3 )= -.5
S( 3 , 1 )= 0
S( 3 , 2 )= -.5
S( 3 , 3 )= .5

```

5. SONUÇ

Bu çalışmada. Sonlu Eleman Yöntemi için bir çizim paket programı kullanılarak otomatik ağ üretme işleminin basit olarak nasıl yapılacağı açıklanmıştır. Düzensiz ağ işlemi için programın geliştirilmesi mümkündür. Sadece düzenli ağ üretmesi programın dezavantajıdır. AutoCAD paket programı çizimin DXF kütüğünü oluşturduğu gibi verilen bir DXF kütüğünden çizim oluşturabilmektedir. Bu özelliğinden faydalanarak, programa örneğin akı çizgilerini çizdirmek mümkündür. Bunun için BASIC programına, ilgili DXF kütüğünü oluşturacak ilaveleri yapmak gerekecektir.

REFERANSLAR

- [1] P. P. Silvester and R. L. Ferrari, *Finite Elements for Electrical Engineers*, 2nd Edition. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 1990.
- [2] M. J. Robinson, *Finite Element Calculation of Equivalent-Circuit Parameters For Induction Motors*, PhD. Thesis, London University, Nov. 1988.
- [3] S. Williamson, L. H. Lim, M. J. Robinson, *Finite-Element Models for Induction Motor Analysis*, IEEE Trans. on Industry Appl., Vol.26, No.6, pp. 1007-1017, Nov./Dec. 1990.
- [4] M. V. K. Chari, G. Bedrosian, J. D'Angelo, A. Konrad, *Finite Element Applications in Electrical Engineering*, IEEE Trans. on Mag., Vol.29, No.2, pp. 1306-1314, Mar. 1993.

[5] J. J. Barnes, R. J. Comax, *Finite-Element Methods in Semiconductor Device Simulation*, IEEE Trans. on Electron Devices, Vol.Ed-24, No 8, pp. 1082-1089, Aug. 1977.

[6] O. W. Anderson, *Transformer Leakage Flux Program Based on the Finite Element Method*, IEEE Trans. on PAS, pp. 682-689, 1973.

[7] T. Dreher, G. Meunier, *3D Modeling of Electromagnets Fed by Alternating Voltage Sources*, IEEE Trans. on Mag., Vol.29, No.2, pp. 1341-1344, Mar. 1993.

[8] C. H. Yu, A. Başak, *Optimum Design of Transformer (cores) by Analysing Flux and Iron Loss with the Aid of a Novel Software*, IEEE Trans on Mag, Vol.29, No.2, pp. 1446-1449, Mar. 1993.

[9] A. G. Jack, J. W. Finch, J. P. Wright, *Adaptive Mesh Generation Applied to Switched-Reluctance Motor Design*, IEEE Trans. on Industry Appl., Vol.28, No.2, April 1992.

[10] Z. Q. Zhu, D. Howe, E. Bolle, B. Ackermann, *Instantaneous Magnetic Field Distribution in Brushless Permanent Magnet Motors, Part I: Open-Circuit Field*, IEEE Trans. on Mag. Vol.29, No. I, pp. 124-135, Jan. 1993.

[11] Z. Q. Zhu, D. Uowe, *Instantaneous Magnetic Field Distribution in Brushless Permanent Magnet Motors, Part II: Armature-Reaction Field*, IEEE Trans. on Mag. Vol.29, No. I, pp. 136-142, Jan. 1993.

[12] Z. Q. Zhu, D. Howe, *Instantaneous Magnetic Field Distribution in Brushless Permanent Magnet Motors, Part III: Effect of Stator Slotting*, IEEE Trans. on Mag. Vol.29, No. I, pp. 143-151, Jan. 1993.

[13] Z. Q. Zhu, D. Howe, *Instantaneous Magnetic Field Distribution in Brushless Permanent Magnet Motors, Part IV: Magnetic Field on Load*, IEEE Trans. on Mag. Vol.29, No. I, pp. 152-158, Jan. 1993.

[14] N. Guangzheng, X. Xiaoming, C. Veiyang, L. Gangru, J. Baidun, F. Zhenghu, L. Xianghua, X. Jitai, *3D-EM Analysis of Transformer Leakage Field and Eddy Current Loss in the Windings*, IEEE Trans. on Mag, Vol.28, No.2, pp. 1382-1385, Mar. 1992.

[15] J. R. Brauer, "Finite Element Analysis of Electric and Magnetic Fields," Proceedings of Chautauqua Conference on Finite Element Modeling, Sep. 1980.

[16] J. N. Reddy, *An Introduction to the Finite Element Method*, McGraw-Hill, 1984.

[17] A & S Ajangs, *AutoCAD 10*, Bela, Nisan 1991.

[18] P. H. Winston, B. K. P. Horu, *I/SP*, McGraw-Hill, 1986.



A. İhsan ÇANAKOĞLU. 1965 yılında Kütahya'da doğdu." 1989 yılında Yıldız Üniversitesi. Mühendislik Fakültesi. Elektrik Mühendisliği Bölümünden Müh., 1991'de aynı Üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü, Elk. Müh. Programından

Y.Müh. olarak mezun oldu. 1991'den bu yana Y.T.Ü. FBE Elk. Müh. Programında doktora çalışmalarını sürdürmekle ve 1990'dan beri Y.T.Ü. Elk.-Elo. Fak. Elk. Müh. Bölümü Elektrik Makinaları Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. Çalışma alanları, elektrik makinaları tasarımı ve CAÜ/CAE üzerinedir.



Ferit ATTAR. 1959 yılında İstanbul'da doğdu. 1984 yılında Yıldız Üniv. Elk. Müh. Bölümünden mezun oldu. Aynı yıl İskenderun Demir-Çelik Fab.'da kontrol müh. olarak çalıştı. 1987 yılında Yıldız Üniv. FBE'den V. Müh. unvanını aldı. 1986

yılından beri Y.T.Ü. Elk-Elo. Fak. Elk. Müh. Bölümü Elektrik Makinaları Anabilim Araştırma Görevlisi olarak çalışmakta olup 1987 yılında doktora çalışmalarına başladı. Çalışma alanları Elckt.- Elektronik ölçmeleri, sayısal sistemler, güç sistem harmonikleridir.

İÇİCAP KAFESLİ ASENKRON MOTORLARDA HARMONİK MOMENTLERİNİN BELLENMESİ

Doç. Dr. A. Faik MERGEN
F. Yük. M. U. H. Mustafa KİYİ
SANKIRI TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
Elektrik-Elektronik Fakültesi
Mühürsuyu/İST.

ÖZET: Bu çalışmada, DGM (darbe genişlik modülü-
sü) gerilim dalgalan ile beslenen asenkron moto-
runda harmonik akımları ile etkilerini incelemek için
çalışılmıştır.

DGM evirici ile beslenen asenkron motordaki
harmonik momentleri, doyma olmayan çalışma da-
laları tanımlanmıştır. Farklı iki asenkron motorda, önce-
ce seçilen çalışma şartlarını sağlamak için, temel
parametrelerin üzerine etki eden harmonik momentleri
tanımlanmıştır.

Asenkron motorun aşdöğör devresi, zaman harmo-
nikleri için dO'ünlük eşit süreli 2,4 ve 8 DGM'li
dalga dalgalan motor terminallerine uygulandı,
çalışan asenkron motorlar, aynı gÜç, gerilim, frekans
kutup sayısını, sahip olmasına rağmen, farklı fir-
malar tarafından üretilmişlerdir v* aynı kayma değe-
ri için farklı momentler üretilmektedir. Motorlar aynı
malzemesine rağmen, harmonik momentleri yada
çalışma gurünlüğünün eşitliği (moment-kayma)
kayma, kilitli Olabilir «açılan DGM'li dalgalarla belirli kayma
anlamının sonucu olarak darbe genişlik terimle-
meyle ilgili eşdöğör devre parametrelerinin fonksiyon
verilen moment ve kayma değeri için elde
edilmiştir.

ÖZET: Makina endüstrisinde pedansı tarafından süzülme-
ye düşük inerans harmonikler yok etmek için
Asenkron eviriciler ve dalga şekillerinin yapısı üze-
ründe birçok bilimsel çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada
başlangıçlı olmuş ve pratik uygulamalar bulunmuş-
tur. Aynı temel büyüklükler için makina parametre-
leri ve devir süreleri yarı ve tam hızla bağlı olarak farklı-
dır. Bu yüzden makinada oluşan harmonikler v* d*mir
parametreleri, aynı tamlanma değeri için sahip makinelerde
farklıdır ve farklıdır.

Sistemin moment süresi, toplam kayıplar ve
momentin büyüklüğü dayandırılmıştır. Darbe-
nin toplam süresi ve süresi, harmonik içeriğinin
tanımlanması için önümüzdeki çalışmalardır.

Bu çalışmada asenkron motor kayıpları ve moment-
leri için II* «da edürlük gerilim dalgalanları arasında
çalışan momentlerdir. Genel olarak, özel bir har-
moniklerin hesaplanması için çalışılmıştır. İlave
çalışmalar, süzülme ve harmonik kayıpları hakkında
çalışılmaktadır.

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ 5. ULUSAL KONGRESİ

toplam kayıplar, doyma olmayışın çalışma için süzülme-
pozisyon metodu kullanılarak elde edilmiştir.

İmalatçılar farklı tasarım kriterleri kullandıktan sonra
aynı temel değerlere sahip motorların eşdöğör devre
parametreleri farklı değerlerde olabilir. Motorların
moment kayma eğrileri aynı olmayacaktır. Bu yüzden
DGM'li gerilim dalga şekilleri tarafından bellenen
motorların verileri için, farklı kaymalar-
da çalıştırılabilir. Bu motorların aynı çalışma şartları
da çalıştırılabilmesi için, eşdöğör devre parametrele-
rinin moment üzerindeki etkilerinin bilinmesi
zorunludur. İkinci olarak, gerilim harmonikleri tara-
fından üretilen harmonik momentleri toplam mo-
mentin değiştirilmesi için kullanılmalıdır. Kaydırma
açılan olarak adlandırılan ve darbelerin yarı-
lanmasını sağlayan açılar değiştirilerek her iki mo-
tora uygulanan DGM'li dalgalar sayesinde belirli
kayma değerleri arasında ortak çalışma alanları bu-
lunmuştur. Her iki motorun birbirleriyle çalışabilmesi
için, evirici beslemeli asenkron motorun çalışma
kriterlerini değiştirmenin zorunlu olduğu gösterilmiştir.

2. EVİRİCİ ASENKRON MOTORDAKİ HARMONİK MOMENTİ VE HARMONİK KAYIPLARI

Bilindiği gibi periyodik DGM'li dalga -
fourier serisi yardımıyla analiz edildiğinde, sinüs
dalga serisinin harmonik içerikli kısmı «der. 2, 4 ve
8 DGM'li dalga şekillerinin genel eşitliği harmoniklerin
komütasyon zamanını kapsayacak şekilde gösterilmiştir.

İki harmonik davranışında farklıdır, harmonik
merkezi ve frekansı gibi iki önemli faktör tarafından
belirlenir. Harmonik frekansı artarken harmonik mer-
tebesi artmakta dolayısıyla harmonik gerilim büyü-
lüğü azalmaktadır. Makinanın harmonik «der. 5»
devresi frekansın değişimine bağlı olarak değişir.
2.1. Hesaplamalarda kullanılan metod: Uygulan-
mış harmonik kayıp ve harmonik moment
kayıpları 15, 16 ve 47 de gösterilmiştir. DGM'li dalga;
9'dur. Darbe serileri ile oluşturulduğundan, harmonik
momentlerin «der. 2 ve 4» için fourier serisi yardımıyla
hesaplanabilir. Eviricinin bozulma doğru gidişinde
değişmediği harmonik kayıpları ve momentler.
İlk harmonik darbe süreleri değişiklikleri ile
belirlenir. Bu nedenle, harmonik kayıplar
ve darbe süresi arasında bir ilişki bulmak
olacaktır.

Eşit devre süresine sahip 2 DG'li motorların
çalışma şartları aynı olsun, etkiyi temel
olarak belirlemek için. Üst devre süresi için
belirli bir frekansla DC besleme gerilimi ve harmonik
merkezi ile çalışılır.

$$V_n = \frac{4V_{dc}}{\pi \sqrt{2n}} \{ \cos n(\theta) - \cos n(\theta + P_H) \}$$

$$- \cos n(\theta + P_H) \} \quad (2)$$

15 16 17 de verilen eşitlikler kullanılarak, harmonik bağıntı «d» edilir.

$$M_n = \frac{2JL^2 I_n}{V_n^2 r_m' / s_n} \quad (2)$$

$$[(r_s + r_m' / s_n)^2 + (x_s + x_m')^2 n^2]$$

(1) bağıntısı (2) de yerine konularak, darbe süresi ve moment arasındaki ilişki kolaylıkla bulunabilir.

$$K_0 = \frac{4V_{dc}}{\pi \sqrt{2}} \quad (3)$$

ve $\sin(nP_w/2)$ yerine $(nP_w/2)$ nin argümanı kullanılarak

$$V_n = K_0 \sin(nP_w/2) \quad (4)$$

bulunur. Bundan dolayı toplam kayıplar

$$W_n = m \left(\frac{r_s}{z_{sen}} + \frac{r_m'}{z_{ren}} \right) K_0^2 P_w^2 \sin^2(nP_w/2)$$

$$(\theta + P_w/2) + K_{fe} K_o P_w \sin^2(nP_w/2) \quad (5)$$

Benzer şekilde harmonik moment bağıntısında elde edilir.

$$M_n = \frac{m \cdot p}{2f_t n}$$

$$K_0^2 P_w^2 \sin^2(nP_w/2) r_m' / s_n$$

$$((r_s + r_m' / s_n)^2 + (x_s + x_m')^2 n^2)$$

Moment ve kayıplara sebep olan en önemli harmonikler Mer 1.5.7.11.13 olarak bilinir. Daha yüksek mertebftli harmonikler düşük gerilim değerlerine sahip olduklarından ihmal edilirler.

Açı eksenli boyuna darbelerin poadsyonu, dalg olmayaoaöi kaçınılmardır, fakat güç devlr sayısı şeklinin simetrisini ve tris. irilerin komütasyon limit-

leirni bozmaksızın herhangi bir yönde c<xve c*y açılan kullanılarak değiştirilir. Şekil. 1 2.4 ve 8 DGM'li gerilim dalga f ekkUrindoki ^x ve • Vy açılarının pozitif artış yönlerini göstermektedir. Yukarıda v*rilen açılata n«gatil değerleri darbeleri bir birine yaklaştırır.

T1 ve T2, trl»törlerin "on" ve "oT zamanlarının toplamryta belirienir. T1 ve T2 evirici köprüsünün kısa devre olmasını önlemek için verilen limitlerden daha küçük olmamalıdır. Burada DGM'li dalga şekli eşit darbe sürelerine sahip ve her biri o(/vso/y değerleri için simetrisi bozulmayacak şekilde düşünülmüştür. Yarı periyot 30° ve 150° arasına yerle ştfirmlştir. T1 ve T2 değerleri dereoe oinsinden

$$T_1 = \frac{60^\circ}{NP} - O_y - \frac{P_{tvo}}{2} \quad (7)$$

ve

$$T_2 = \frac{60^\circ}{NP} + P_x - \frac{P_{>vo}}{2} \quad (8)$$

bağıntıları yardımıyla hesaplandı. Burada NP bir yarı periyotkl darbe «ayıdır Açılarının belirlenmesinden sonra, gerçek darbe süresi ve o^x ve. *%açılarının oebirsel toplamı alınarak hesaplandı. Bundan dolayı gerçek darbe süresi

$$P_n = P + \mu m \cdot V \quad f \hat{a} 1$$

Eviricinin besleme gerilimi Vdo değişmediğinden harmoniklerin gerilim bUyUMUklal (1) eşitliğinin cotsinüs terirlerinin farklarıyla buliilenir. (1) eşitliği yeniden düzenlenirse

$$V_n = \frac{K_0}{n} (\cos n A_{cb} - \cos n A_{cs}) \quad (10.)$$

elde edilir.

Eşdeğer devre parametrelerinin birbirine eşit ye moment ihtiyacını karşılamak için yaklaşık değerlere sahip olacaklardır.

Endüstrideki bazı uygulamalar .motorların ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ 5. ULUSAL KONGRESİ

yedeklenmesi durumunda bile kayma ve moment değerlerinin değişmemesi istenir. Bu kofullar &lbnda.eviriol çıkış dalga seklinin tekrar ayarlanması soruna yardımcı olacaktır. İM farkk asenkron motorun eşdeğer devre parametreleri veri olarak alınıp bilgisayar programı sayesinde moment-kayma eşitliği gerçeklenebilir. Darbe süresindeki, $\omega(x$ ve $U^$ açı değİlimleri, yeni bir dalga s, ekli ve harmonikler üretilir. Hesaplanan toplam harmonik momenti diğer motorunkiyle karşılaştırılır. Eşitlik önoeden belirlenen hata «mutan içinde kalırsa. hesaplama seçilen kaymada durdurulur. Toplam momente. Sve 11 harmonikler frevleme etkisi yaparken; 1, 7 ve 13 harmonikleri birbirini desteklemektedir.

2.2.1. Sayısal analizler:

2.2.1.1. Harmonik momentleri:

Bu bölümde laikli firmalar tarafından üretilen iki özdeş motor yedekleme için düşünülmüştür. Bu yüzden motorların birbirleriyle yedeklenmesi gerektiğinde ve yapıldığında. moment ve kayma olarak bilinen çalınma koşulları. motor parametreleri değiştiğinden dolayı önceki çalışma şartlarını sağlayamayacaklardır.

Harmonikler tarafından üretilen momentler (2) eşitliği kullanılarak hesaplanır. Üretilen toplam harmonik momenti

$$M_N = M_1 + M_5 + M_7 \quad (11.)$$

Şekil :3 farklı firmalar tarafından üretilmiş M özdeş asenkron motorun kaydırma açılan **cif.** =Ove $\omega(y$ -O{ temel bileşen gerilimi 300V ta sabit) olduğunda toplam moment ile kayma arasındaki ilişkiyi vermektedir. A motorundaki harmonik momentlerin. darbe süresi P_w ile değişimi Şekil:4 de gösterilmiştir. Parklı kayma değerlerinde. örnek olarak alınan A ve B motorlarında. darbe süresi P_w ile toplam moment değişimi bulunmuştur. Bu toplam moment değişimi bulunurken temel bileşen besleme gerilimi 360 V ta sabit tutulmuş ve dolayısıyla temel bileşen momentini M_1 değişmemiştir. (1) ve (2) eşitlikleri yardımıyla $s=0,05$ den $s=0,5$ e kadar $V_{dc}=750$ Volt ve $V_{dc}<1000$ Voltta A motorundaki toplam moment değerleri bulunarak Şekil:5 de gösterilmiştir.

Kayma arttıkça harmonik moment değeri artmasına rağmen toplam momentte bu harmonik momentlerinin toplamı dikkat alındığından bütün kayma değerlerinde de-

ğişim farklı olarak aynı olmaktadır.

Harmonik momentlerinin temel bileşen momenti üzerindeki etkileri dikkate alınarak A ve B motorlarının moment değişim aralığından $s=0$ dan $s=0,5$ e kadar olan kayma değerlerinde çizilmiştir.

$X/$ ve dy açılan değiştirilerek darbelerin farklı noktalarda pozisyonlanmasıyla A ve B motorları için $s=0$ dan $s=0,04$ kadar olan kayma aralığında ve $s=0,38$ ile $s=0,5$ aralığında eşit moment değerleri sağlanabilmektedir. Ancak bu eşitlikte sırasında motorların dövrülme momentlerine dikkat edilmelidir.

2.2.1.2. Eşdeğer devre parametrelerinin değişimi:

Darbe süresiyle ilgili olarak eşdeğer devre parametrelerinin değişimini elde etmede. toplam moment ve kaymanın değişmediği kabul edilmektedir. Şekil.7 ve 8 $V_{do}-7GU$ Volt ve $V_{dc}=1000$ Voltta $s=0,05$ ve $s=0,1$ kayma noktalarında 2,4 ve 8 DGM'li uygulamalarda eşdeğer devre parametrelerinin değişimlerini göstermektedir.

Bu şekiller/V veya B motorunun herhangi birinin yedeklenmesi durumunda. hangi eşdeğer devre parametrelerine sahip motorların kullanılabilmesi hakkında da fikir vermektedir.

3. SONUÇ:

Bu çalışmada DGM'li gerilim dalgalanını üreten asenkron motorları beslemekte ve harmonik kayıptan ve harmonik momentleri darbe süresi ile ilgili olarak analiz edilmektedir.

1) Şekil.5, sabit kayma değerinde. darbe pozisyonunun değişimiyle toplam momentin arttığını veya azaldığını göstermektedir. 2) $s=0$ ile $s=0,04$ kayma değeri arasında ve $s=0,38$ ile $s=0,5$ kayma değerleri arasında A ve B motorlarının birbirleriyle yedeklenmesi durumunda önceki çalışma şartları sağlanabilmektedir.

3) Momentlerin birbirine eşitlenmesinde kullanılması gereken r_{1A} ve r_{1B} direnç değerlerinin değişimi diğer eşdeğer devre parametrelerine göre daha büyüktür.

4) Kaçak reaktansların darbe süresiyle değişimi oldukça küçüktür ve sabit kalıyor denebilir.

6) Uygulanan darbe sayısı arttıkça, darbelerin pozisyonlarının değişim aralığı azaldığından harmonik momentlerinin etkileri gerektiği gibi kullanılmaktadır. 8 DGM'de darbe

«Ürelerinin değişimi oldukça küçüktür.
6)Aym kaymada temel bileşen moment değeri büyük olan motor da.hai mor»k momentlerinin etkisi daha azdır .Bu durum tablo: 1'den de açıkça gözükmektedir.
7)r1A ve r1B nin darbe süresiyle değişimi çalifma sarflarını korumak için r1 azalırken, harmonik içeriğinin tultığını gösterir.

Şekii.7 ve 8 eşdeğer devie parametrelerinin değıtim metodunu göstermektedir .Belirli kaymalar da,motortwin yedekienmesi halinde dalga şeklinin bir çöşidini üreten evirici kullanılabilir.

8)A motorunun sahip olduğı momonti.B motonda sağlayabilmek için x1B vo r1B nin değışim arslığı.küçük kaymsdnıda.büyük kaymalara göre artmaktadır.

9)Statora indirgenmiş rotor reiüJrritlr.n.knytna değışiminden etkilenmemektedir.

10)r2A" ve r2B" nin darbe süresiyle değışimi oldukça detbrgün olduğundan .harmonik momentlerinin değışiminde derin oluk etkisi çok gUçiU değıldir.

11)Darbe sayısı arttıkça harmonik içeriğı azalmakta dolayısıyla harmonik momentlerinin etkisi küçölmektedir .Buradan dalga sayısını arttırarak sinüs formuna daha çok yalüaşıldığı görölmektedir.

12)Her iki asenkron motordaki toplam moment değışim eğrileri incelendiğinde verilen bir s kayma değeri için daibe süresi Pw gerektiğı gibi değıif Ullerek istenilen momont değerinin sağlanabileceğı görölmektedir.

KAYNAKLAR:

- [1]BOWES SR.MIDOUN A.Subopümal Switching Strategies for Microprocessor- Controlled PWM Inverter Drtves.IEE Proo. B, 132.133-148.May<1985)
[2]BUJA G.S..Optlmum Output Waveforms İn PVVMInverters.IEEE Trans.Ind.App.IA-16.6. 830-836.Nov.(1980)
[3]PUMAN H.Elektrik Mavnalarının kayıpları ve Teorisi j.T.Ü.Kütüphanes330.Cffl 1
[4]KOSTENKO M..PIOTROVSKY L..Eleotriol Machines Vol.2. Mir Publisher\$.Mo\$cow(1974)
[6]Mergen A.F. A Method of Calculation on Optimisaüon and Ellmination of PWM Voltage Wave(orm Harmonics Exist in an Induction Motor Drive.Bulletin of the Teohnloal Unlv.of İstanbul
[6}MERGEN A.F..Contributions to the Methods of PWM Voltaae Wwaveforms.BulletJn of the 1032

Teohnloal Unlv.of İstanbul 42.2,201-214(1989)
[7]Mergen A.F.Etfects of Supply VoHage Waveoims upon Ion Losses in an Induction Motor.Bulletin of the Teohnloal Univ.of İstanbul 42.4.(1880)

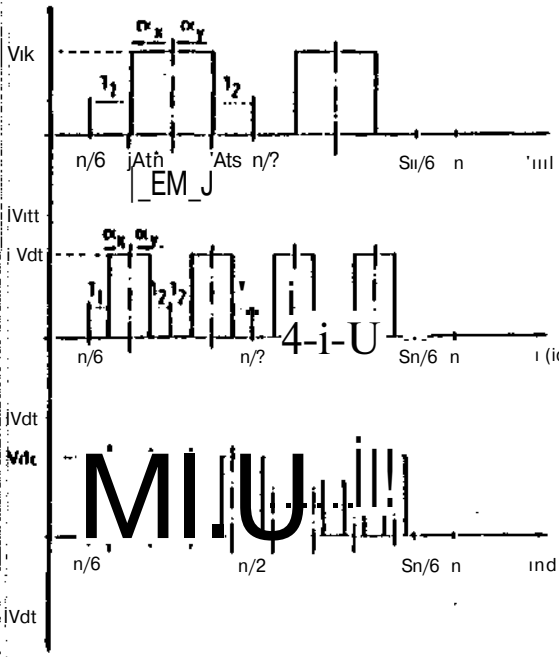
A.Faik MERGEN

1970 yılında İ.T.Ü. Elekük Müh.Bölümünü bitirdi. 1873 yılında University of Aston İn B'ham'dan M.So. ve 1977 yılında Loughbrougl» UnK/orsity of Technolog/den Rı.D. aldı. 1981 yılında İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesinde Elektrik Makinaları ana Bilim dalında Doçent ve 1991 yılında Profesör oldu. Halen aynı Fakültenin öğretim üyesidir.

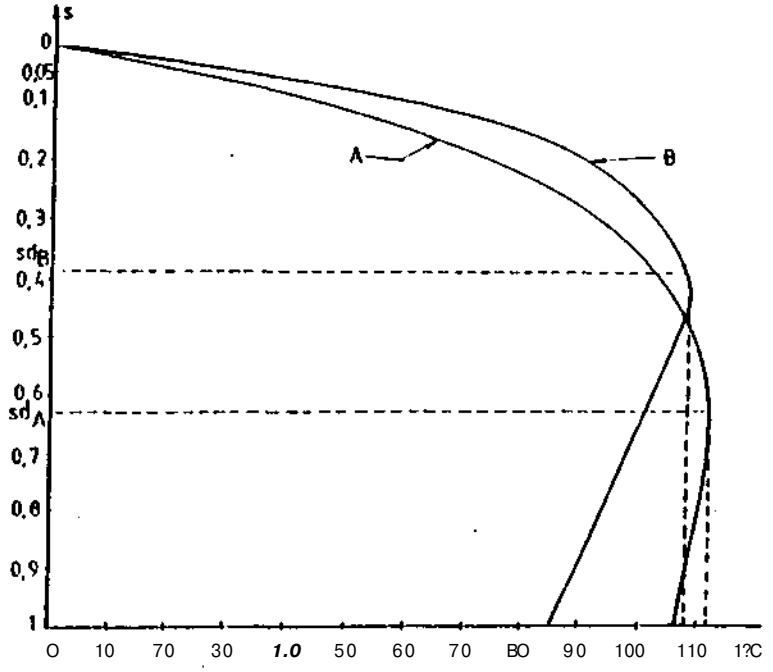
Mustafa KİM



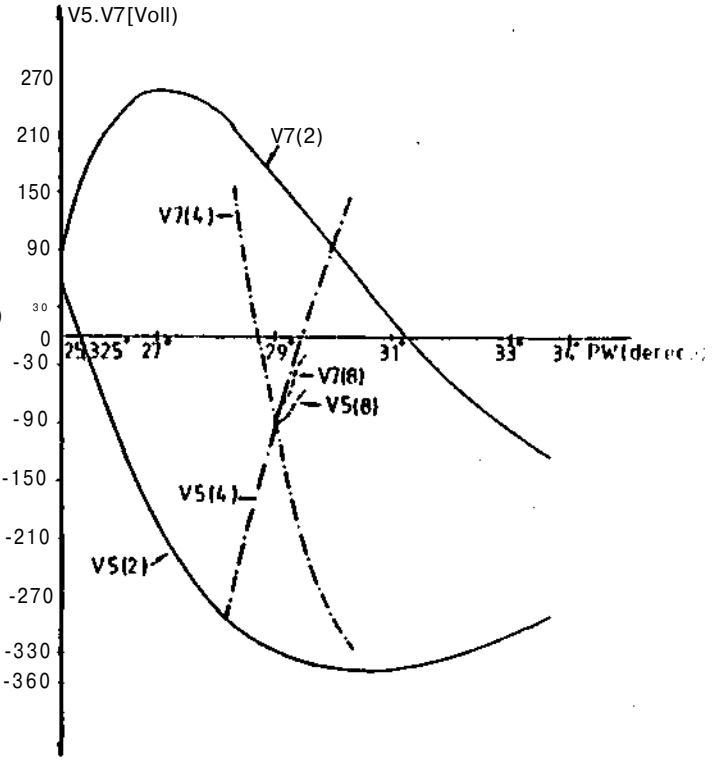
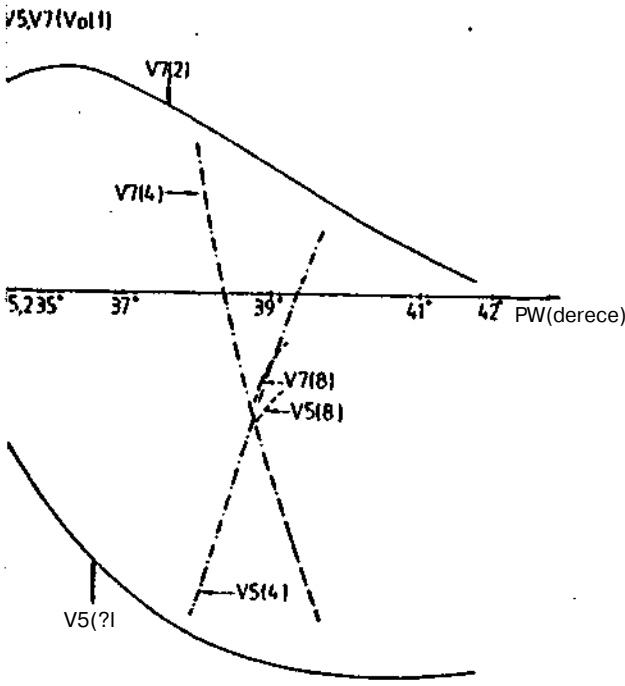
1989 yılında İ.T.Ü.den Elektrik Müh. olarak mez oldu. 1992 yılında aynı Üniversiteden Yüksek Lisans derecesi aldı.Hal aynı üniversitede Doktor çalışmalarına devam etmektedir Ayrıca Üç yıl< buyana özöl bir şirkotto çalışmaktadır.



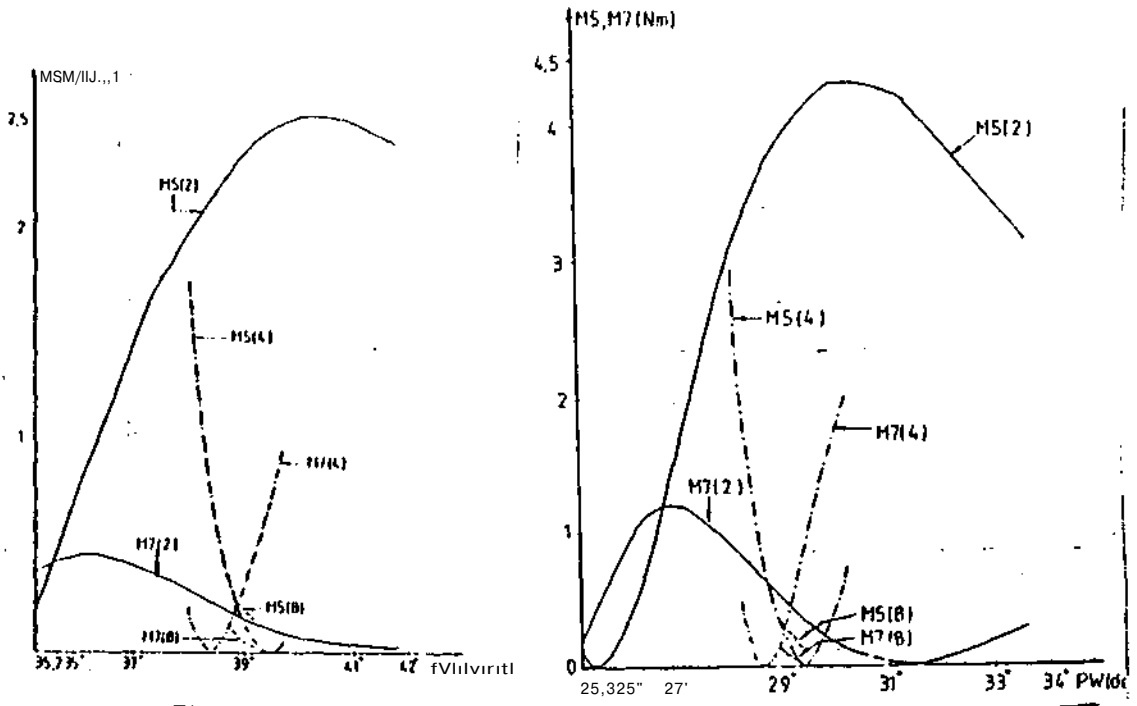
Şekil 1: 2, 4 ve 8 DGM'li dalga şekilleri



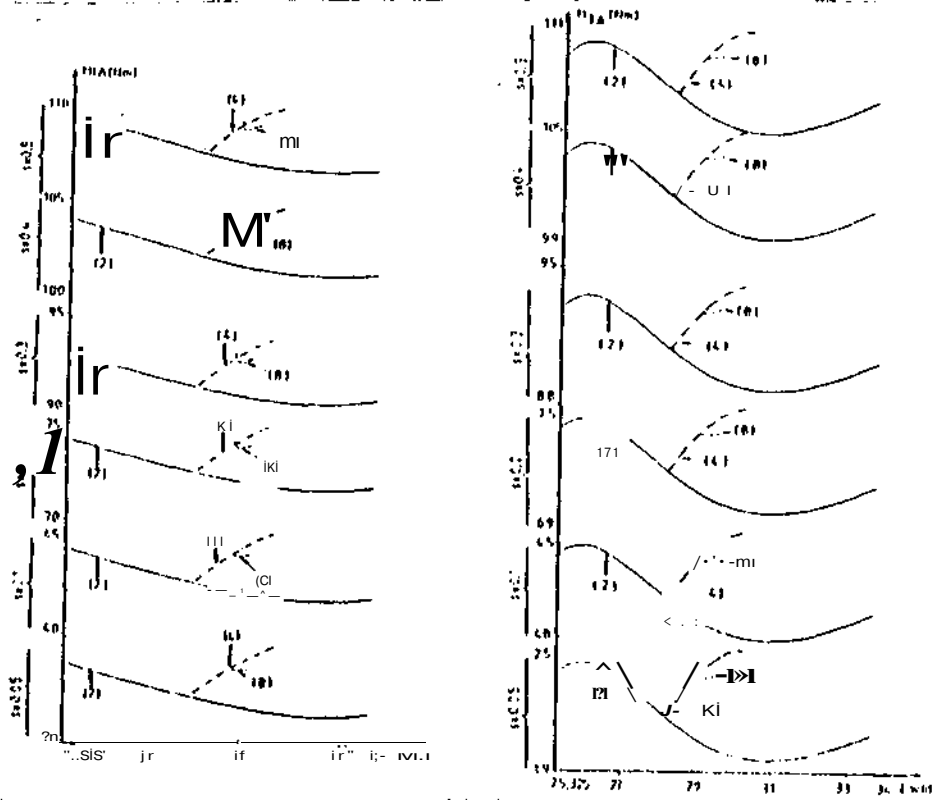
Şekil 3: Aye B mε)toru için momen t-kayına eğrileri



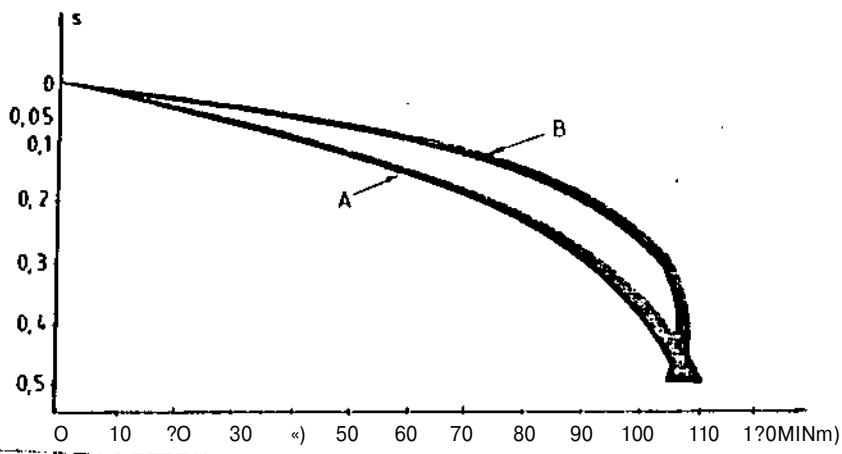
Şekil 2: 2, 4 ve 8 DGM'li dalgalarda harmonik gerilimleri a) $V_{dc} = 750$ Volt
b) $V_{dc} = 1000$ Volt



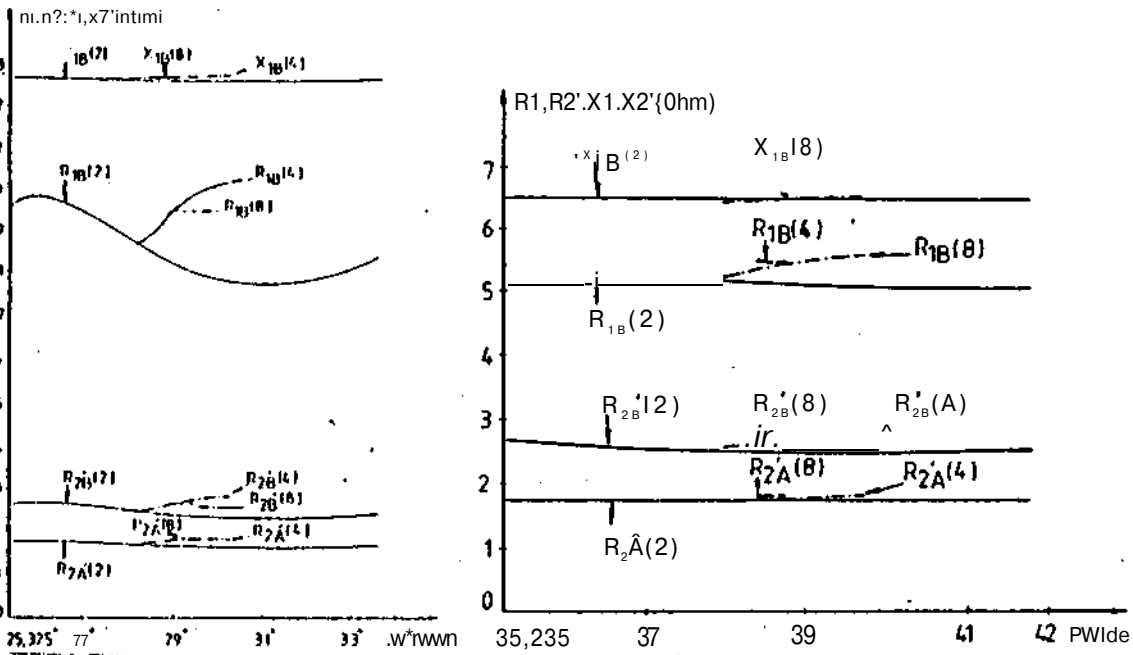
Şekil.4: A motorundaki harmonik momentlerinin değişimi a) $V_{dc} = 750$ Volt b) $V_{dc} = 1000$ Volt



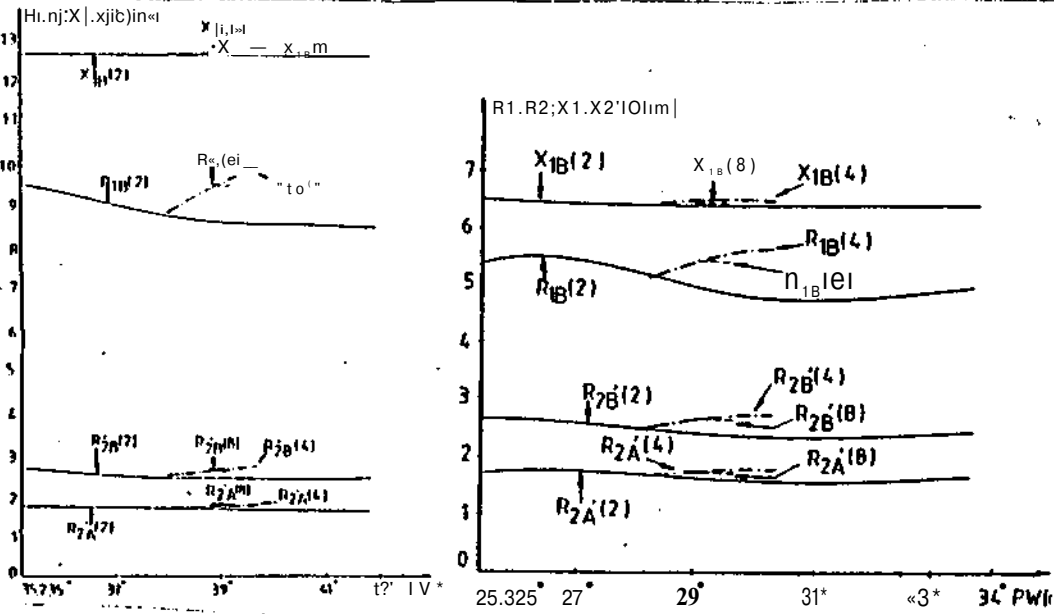
Çekil.5: A motorundaki toplam moment defnimi a) $V_{dc} = 750$ V b) $V_{dc} = 1000$ V



Şekil.6: A ve B motorları için toplam harmonik moment aralığının kaymavta değişimi



Şekil.7: $V_{dc}=750$ Volt için eşdeğer devre parametrelerinin değişimi a) $s=0,05$ b) $s=0,1$



Şekil.8: $V_{dc}=1000$ Volt için eşdeğer devre parametrelerinin değişimi a) $s=0,05$

**BAŞLIĞI GERİLİM DÖLEĞİNİN SINIRLARI ÜZERİNDE
KONULAN YATIRICI ELEMANIN İNCELENİŞİ**

Prof. LV-.A. Fsi! NEFRETİ.' av'rf Maj.id Noli^Jdçs

3.7.0. E3t-I t'vvl.-F:PI tı-Dr.ii!-. Fakültesi
E3e>iril ^L''renfis1içi frö! II'P.Ü

Ysrj=îmf Adresi: îet^<r, t'. •?. Tçlr-ii.ür, •). .çrç. j+F.SI
Gürr<ü=5'. .u 80:91 I?,tar-bu1 - TürI- iye

Özet:

Bu çalışmada farHı lirnslsr tarafından üretilen synı güçte iki asenkron makina görçnüne alınmıştır. Ma.kinalardan birisi herhangi bir arıza durumunda, c?1ısıtanın devamı için yedek olarak düşünülmüş-tür. Motorlar synı kayma değerlerinde 2, 3 ve 4 basamaklı gerilimlerle beslenmektedir. Amaç harmcnik gerilimlerin makinada olu&tui- duQu harmonik momentleri kullanılarak, belirli kayma değerlerinde iki makinenin cıka.ş momentlerinin eşitlenmesini sağlamak. Basamaklı dslga, makina için zararlı olan aşırı akıma yol ecmyacak =-eki İde Diüşturulduğunda, toplam harmonik momentleri toplam moment ürerinde ancak '/. 0.2 civarında etkili olacaktır. Bu nedenle P makinesinin çıkış momentine A makinasının çıkış momentine eşitlenmesi için harT'^nik momentlerinin bir =-iK>si c-îm^riûn ve doley?.sıy la da . pl!.enr:ççi ger Ek er» per.f, et . e ler int et i l e me açısından etkilenmediği !.ab'.l edi f. T>I=tir. MA=MB t c?u1unu sağlamak için B makinasının esde'er ds»resine eilenmesi şcreken direne ve rEektanslar:>in kayma ile demişimi vcskir», güc iftsa>ısı vt' .erim ünereindeki etkileri ineele n r,, i r. tır.

1. B3.üiJP:

...f.r3ii1Etisn T: 1 pnsnİfrı
anahtar çibi çs1js11kl&rındfn
bunların \Ü]3c-nridiçi
eviricilerde cılıç dalgasının
sinüs biçimli olması için darb»
fiödü3asyon tel-r<ik. 1 erinden
yararlanmıştır.
Bu tekniklerden yjrjr'İsnsrai'.
gelistirilen eviriciler bugür<
başlıca iki grupta, Darbe
genişlik ve Darbe geni İV
modülasyonlu eviriciler olarak
toplanabilir.

L1] de Pwrl beslemeli as-enkron i
motor büyük bir hin srsılıç1 •
için dikkate alınmıştır. Pwtt \
dalgasının sayısal bir şekilde \
üretilmesi için yeni bir metod <
geliştirilmiştir VE harmoni t: ler
-in meydana getirdikleri
kayıpların azaltılması amacıyla
40 İVA 'îık evirici ünereinde
şenis bir çalışma yapılmıştır.

F'WM r- vit. ;; risi yi r b-vs 3 ?:-nen ve i
değişik hırlarda. çalışan :
ar-eri ı cer, r,? ! ir. a3 ar In; n>-frp<on il:
k?>ıpiaf [2] ve [33 d=> \
irc: r3 fe-cıa'i=tir ve q?r.(3 ir* iB.^r-^- !
û;ran ürettikleri harı'.oniklerin <
bir sseiv rc-n iiaf.i'ifAtı demir
i-aypî =r1 ünereinde l i eti ileri \
dprıFylerİe teptan^i-s1ir . i

L-5] de Sinurcid=1 cîmayan
t'tıı (7d.1;w1 İe tçs.] f-tierr. bir
?İf;n! ren makinadaki histereris
ve gi' df.p a! I.T.Isrınm
olu&t'rtııO'J kayıpların darbe
&eT.;.EiiÇiyİe de?i=tigi göste-
r i } Tistir . Bu değısi»*
":İtffffX?r i.ay 2 p3 ar l r.da pek'.

faalla olmasına karşın çözümlerinin
 1.2. 'ipi'-'di' çözümleri CH frtl.ii.1
 olduğu gösterilmiştir.

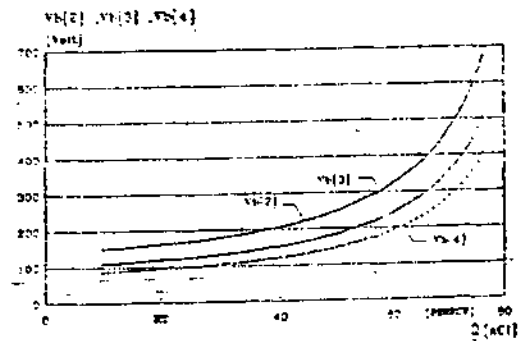
FUM dalj?;?1-;yla be=le--.en 4
 ?)!• "c--e'U'" on fi;kinan3n topl??"a
 iay-ıpları [Ş] c'Q ir.re1e-u...! =,• i,-
 !K• iris3 arıfir, esdEğsr de--re
 paramctreierivc-rimür. erinde
 oldukça etkili olduğu
 çösteril."İstir.fı»tupsayı=ır.e
 I adar huyük ve parf-metreleri ne
 kadar tükük içe daha düşük ka-
 yıpların o3.ıtu.Çij göslerimiştir.
 L6] de, basamaklı dalgalarının
 üretilmesi için, (12ii) inci
 harmonikleri içeren yeni bir
 metod bulur.-ıT,ustur. Uygur» bir
 kssiAdeviricisitasarlanmışve
 ateşleme seması geliştiril-
 miştir. Böyle bir sistenin,
 motorgü.cün»n:(IVA) 0-3 I.a11
 kadar bir Y-Y transformatöre
 ihtiyac duymaktadır.

Pu çalışmada basamaklı
 gerilim dalgalarının, asenkron
 makinada meydana getirdikleri,
 harmonik akımları ve bunların
 toplam moment üzerindeki
 etkileri incelenmiştir. Ayrıca
 genlikleri ve genişlikleri
 birbirine eşit olan 2, 3 ve 4
 basamaklı çıkışlarının
 harrionik gerilimleri mak.ına
 terminallerine uygulanmıştır.
 Seçilen asenkron motorları aynı
 güç, gerilim, frekans ve kutup
 sayısına sahip olmalarına
 rağmen farklı firmalar
 t^t;-flr• ū=rtü>'etilmisoldukia-
 rınd?n aynı İayma değerlerinde
 farklı niome'11]erüretmek.tedir-
 ler, Amaç motorların
 y-ede! lenn>esi du.rurrlımda, aynı;
 çalışTia sarllarının sağlanması
 için, yedek makinariir»
 terminallerine uygulanan çıkış
 çeri3imin yapısı deQıştiri-
 İerel, bu sertlsrı sağlayan
 6vt et x!. 1 emeaç11 arını
 araştırmaktır. Harmonik moment-
 leri, herl".aııği birdalçs şekli
 için 5 ve 7 harmonik mertebel-
 leri için hesaplanmıştır.

2. HARMONİKLERİN ÇÖZÜMLERİNİN İZLENİMLERİ

İy=>Sf...» İİ rS; .ıq^1. arıL de'f'br
 =<=>ri(er;-;yJe olMÇ.t...ru]d.. 'Şt"ıdf-ı
 b... fı...ri11e-ir... K(A tıf ve t'pe
 dt'Çtrıtr: fo.ırl/rı çf;ı-ıç| yr-1' o1-
 :-ı>3? İi6:ıip^r;f;.]Jİr.
 Deri
 ti1r,v;:1 çt>-iİi vezt.-<*s-n
 l...ıfi-cr, .i1.1r-riiçin L tipi
 çıdfıQer cıe\ı-ç-si dilişte
 almarak *r r mor'ı l rıx-ne^;^t Jeri
 buLMffıiç-^:ur [^]. E- * = a^M
 gtfii=• 1il1eri f;=..1 t ı] 1r-an
 dalganın ^^^r;=;^ ik gerilinleri
 lJ! tã:r.r.ı?ijçin tet.il3erE- f-çıçı
 Öli-in O CinsideTe-Ti h'ı1urmuStır.

Harmonik e}jJİ3 r-j-syor,-u ve>a bu
 çalışır.ada olduğu gibi harmo-
 niklerin etkin olduğu durumları
 VB onların etkilerini
 araştırırken, İerhangi bir 6
 tetil İTme açısı için basamak
 Qırrilimi, temF.l bilecen
 geriliminin 220 voltta sabit
 kalacak şekilde ayarlanmalıdır.
 Eu değışim 2, 3 ve 4 basamaklı
 dalgaları için sekil 1' da
 verilmiştir. Kö=eli peranter
 içirifJeki rakamlar basamak
 sayısını ve 6 ilk basamağın
 tetikleme açısını gösterir.
 Genlikleri ve penisiikleri
 birbirine eşit olan 2, 3 ve A
 basamaklı da1 ga1 arının
 harmonik gerilimleri aseÇdaki
 gibi elde ecJi1mistir.



Sekil 1: $V_m = 220$ v olması için 2, 3 ve A basamaklı dalgaların basamak gerilimlerinin tetikleme açısı ile değışimi

değişkenli harmonik momentlerin toplam moment üzerindeki etkisi $5=0.01$ dır. 14 ile $\epsilon=0.40$ da 7.1 civarındadır. Asenkron makinaların 10 ka/masama kadar $Ca1st.1k$ lerinden harmonik momentin toplam moment üzerindeki etkisi yüksektir; olduğu için 1 Enebilir.

Sıra No	Sınırlar		Etki	
	Alt	Üst	Alt	Üst
1	0.01	0.40	0.01	0.40
2	0.02	0.40	0.02	0.40
3	0.03	0.40	0.03	0.40
4	0.04	0.40	0.04	0.40

E-Basamaklı genelde 1, 2, 3 ve 4 basamaklıdır. (y) sınırlarında, A ve B: K, kinaşınım kaynağına göre nDüent deQi = imiciri SE?kil?, Selil 6 ve Şekil 7 de verilmiştir.

Harmonik momentlerinin toplam moment üzerindeki etkisi $5=0.01$ dır. 14 ile $\epsilon=0.40$ da 7.1 civarındadır. Asenkron makinaların 10 ka/masama kadar $Ca1st.1k$ lerinden harmonik momentin toplam moment üzerindeki etkisi yüksektir; olduğu için 1 Enebilir.

Harmonik momentlerinin toplam moment üzerindeki etkisi $5=0.01$ dır. 14 ile $\epsilon=0.40$ da 7.1 civarındadır. Asenkron makinaların 10 ka/masama kadar $Ca1st.1k$ lerinden harmonik momentin toplam moment üzerindeki etkisi yüksektir; olduğu için 1 Enebilir.

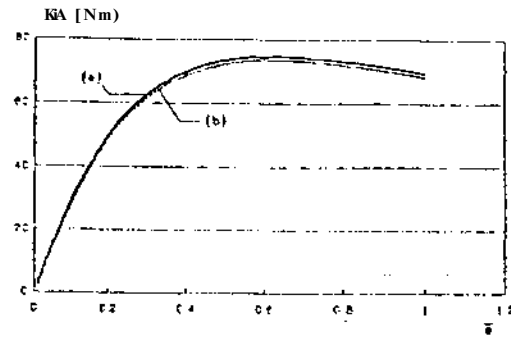


Fig.6 : B (TS:inasınan toplam Timentinin kayma ile deQi = imi (a), sinüroidal gerilim ile beslenen, (b) 2, 3 ve 4 basamaklı gerilim ile beslenen esenkron motor ($\theta=80^\circ$).

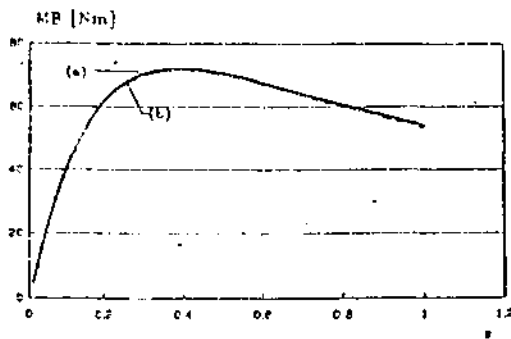


Fig.6 : B (TS:inasınan toplam Timentinin kayma ile deQi = imi (a), sinüroidal gerilim ile beslenen, (b) 2, 3 ve 4 basamaklı gerilim ile beslenen esenkron motor ($\theta=80^\circ$).

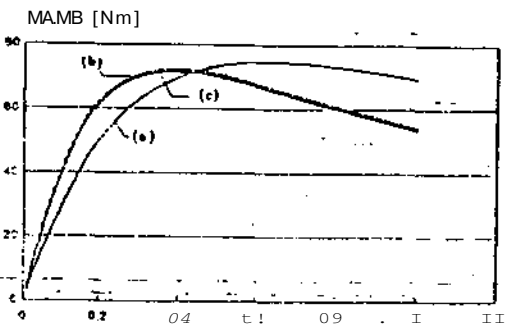


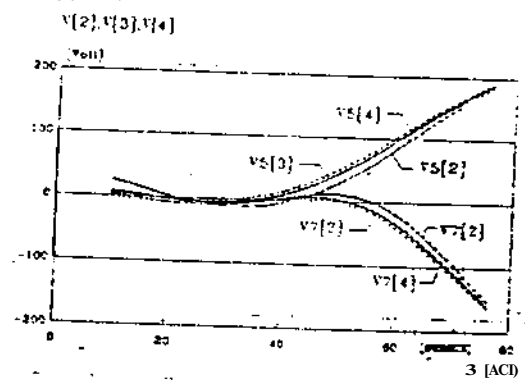
Fig.7: A -e B malina 3 ermin l 'c-p-lai', fTOffientlerinin kayma ile rfÇıS'i, (a) sinüroidal gerilim ile beslenen A malinaçıriri çıkış momenti, (b) Sinüzoidal gerilim ile beslenen B naki- naşının çıkış momenti, (c) 2, 3 ve 4 basamaklı gerilim ile beslenen B makir. asın. nıkis memenli i ($\theta=80^\circ$).

$$I_{n1} = \frac{4 \cdot V_{max}}{2\pi \cdot n \cdot Z} \left[\cos n\theta + \cos n\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta}{2}\right) \right] \quad (1)$$

$$I_{n2} = \frac{4 \cdot V_{max}}{2\pi \cdot n \cdot Z} \left[\cos n\theta + \cos n\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta}{2}\right) + \frac{1}{2} + \cos n\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\theta}{2}\right) \right] \quad (2)$$

$$\cos n\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\theta}{2}\right) \quad (3)$$

Temel gerilim sabit i len 2, 3 i ve 4 b - 5 a mak) 1, Ö a 3 ç < 2 a r m i n j har i Ton i k ç e r i l i - I f . r i n j n 0 i 3 F ! de ğ i ŝ i m i ŝ e k i l 7 d e g ö ŝ e r i l - i ŝ t i r ' .

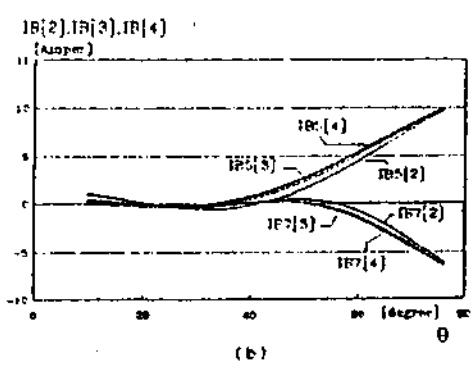
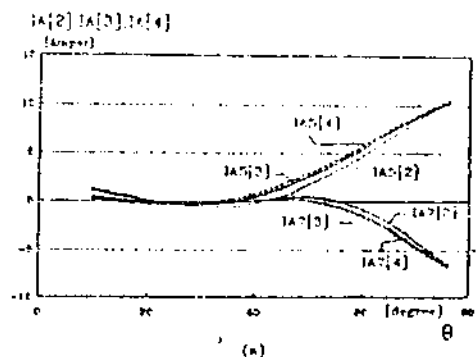


Selil 2 : Tefit? gerilim sabit i ten 2, 3 ve 4 basamadı harmonik gerilimlerinin 9 ile de ğ i ŝ i m i

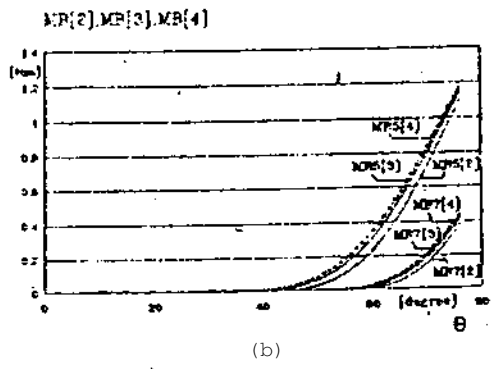
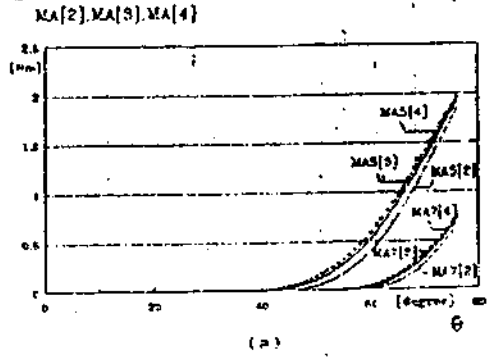
Harmonik akımları ve harmonik momentleri, herhangi bir dalga I sekli için (1), (2) veya (3) j ba ğ i n t ı s ı (4) ve (2) ba ğ i n t ı l a r ı n d a yer le ŝ t i r i l e r e k e l d e " e d i l i r . Bur ^ Ö B . n harmonik mertebesi m ise basamak sayısına g ö ŝ e r i r . Har T - o n i k a k i m i a r ı v e i 2 . - > h - o n i \ . - z - - - - K r i l e . > ' i 5 ve 7 S r i n o n i i n . g r t f - h e l e r i r c : n i t - v s r f i r r . m e = t i r . f ı ve 7 j i n c : , h r m o n i k a k ı m ve ^ a r m o n i k m o m e n t l e r i n i n 0 i l e d e ğ i ŝ i m i ŝ e k i l 3 ve ŝ e k i l 4 d e ç e ŝ e r i l m i ŝ t i r .

$$I_n = \frac{V_{max}}{Z} \left[\cos n\theta + \cos n\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta}{2}\right) + \frac{1}{2} + \cos n\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\theta}{2}\right) \right] \quad (4)$$

$$M_n = \frac{V_{max}}{2\pi \cdot n} \left[\sin n\theta + \sin n\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta}{2}\right) + \frac{\theta}{2} + \sin n\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\theta}{2}\right) \right] \quad (5)$$



ŝ e k i l 3 : 2, 3 ve 4 basamaklı dalgalarının meydana getirdikleri harmonik akımlarının & • ile de ğ i ŝ i m i a) fi motorun harmonik akımları b) B motorun harmonik



3. i . hAE-ür. 3 K ^ OIENTLER 1
 ÜİİJİLİLİİ I- LILLANIMI

Bu r_f)_{1,5p} - ds farili firir: cİr tarafından üreti 3 en, fakat aynı temel hu-yük lü! lere (güc, gerilim) sahip olan iki asenkron malina gözönün;? al 1. rı m ı ş 11 r, Eşdeğer devre parametrelerinin birbirine eşit olmayac? Q1 ' acmı İmardır, fakat güç, devir sayısı v e m o m e n t ihtiyacını karşılamak için yaklaşık ö&Qerlere sahip olacaktır. Asenkron motorda herhangi bir arıza Dİduğunda aynı çalışma şartlarını saçlayan başka bir motor kullanılmalıdır. Basamaklı kare dalga ile beslenen her iki motorda benzer etkileri görülür. Arıza durumunda birinci motor çalışmanın devamı için yedeçle değiştirilir. Motorun yedek lenmesinden sonra eviricinin çıkış dalga şekli, yeni bir dalga. şekline dönüştürülmezse ikinci motor, birinci motor tarafından elde edilen aynı r? h = ma şartlarını sağlayamayacaktır. İayma, moment ve ^erim farklı d = 3e - r1 r = - de olacaktır.

Devir sayısının hfssas olar? a yar ? afime s - i " / n q e r e - k m e c 1 Q i bazı uygulamalarda, ot - j n c e ç i ş t i . - r i 3 r . e . i ç o r u n y a r a t m a y a c a k t ı r . Fakat endüstrideki bav:: uygrl amal arda , noter 3 ar 1 n y e d e ç l e n e c e s i d u r u m u n d a İ a y m a v e r o i " f r , t t i e ç e r l e " i n i n d e i ş m e m e s i i s t e n i r . Bu t o s u - 1 1 a r f . 1 1 1 r ı d a , e . . i r i c i ç ı k ı ş d a l g a E & k . l i n i n t e k . r a r a y a r l a n p ' a s ı b a r ı d u r u m l a r d a s o r u n a / B . r d ı m c 1 o I a b i 3 e r . e k t i r .

Burada basama ki arın geniFl i '] Erinin tekrar a > arlan- ması s e e y a f a r k l ı b a r - a m a k sayılı yeni bir dalga şet ' 1 I P İ

...irerinde frenleme stki si yaparlar, 7 ve 13 üncü hermonilleri temel momenti desteklemektedir. Bundan dolayı verilen k a y m a d s y e d e l m o t o ^ u n momenti , a f i a motor ' j - k i n d e n d a h a t ü y ü ! " o l u r s a f r e n l e m e e t k i s i n e s a h i p m o m e n t l e r i , t o p l a n h e r m o n i k m o r r e n t i n i a z a l t a c a k y ö n d e o l m a l a r ı g e r e k i r . Y e d e ! m o t o r m o m e n t i a n a m o t o r u n k i n d e n d a h a k ü ç ü k o l u r s a , h e s a p ! a m a i ş l e m i t o p l a m h a r m o n i ! , m o m e n t i n i a r t t ı r m a k i ç i n k u l l a n ı l m a l ı d ı r .

Bu çalışmada kullanılan a sen I ron motorlar aş a . Q ı d a v e r i l e n t t ^ m e l b i n ü k l ü k l e r e v e e s d e ş e r d e v r e p a r a m e t r e l e r e s a h i p t i r .

A motoru: 3k.W<p=2, ?OHZ , 380volt , yıldırbaQ 11

$R_1 = 1.97 \text{ohm} / \text{faz}$, $R_2 = 2.656 \text{ohm} / \text{faz}$
 $X_1 = 1.867 \text{ohm} / \text{faz}$, $V_2 = 1.567 \text{ohm} / \text{faz}$
 $R_f = 3.2 \text{ohm} / \text{faz}$, $X_h = 82.36 \text{ohm} / \text{faz}$

B motoru: Z' , M , p=2 , 50Hz , 380vo11 , yıldızbaûlı

$R_1 = 1.59 \text{ohm} / \text{faz}$, $R_2 = 1.77 \text{ohm} / \text{faz}$
 $X_1 = 2.0 \text{ohm} / \text{faz}$, $X_2 = 2.0 \text{ohm} / \text{faz}$
 $R/e = -133 \text{ohm} / \text{faz}$, $h = 73. \text{ohm} / \text{faz}$

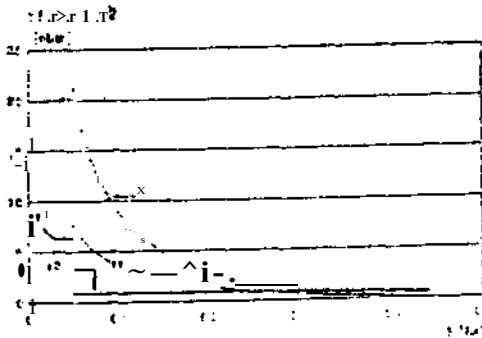
Harmonik momentleri (?)
 b = o i n t a s > . j . u 1 1 a r . a r a k l i E ' i j p i r i l i r v e t o p l a m m o m e n t ş i ^ t i c i ; k i n i b i

$$M_{Top} = M_1 + M_5 + M_7 \quad (6)$$

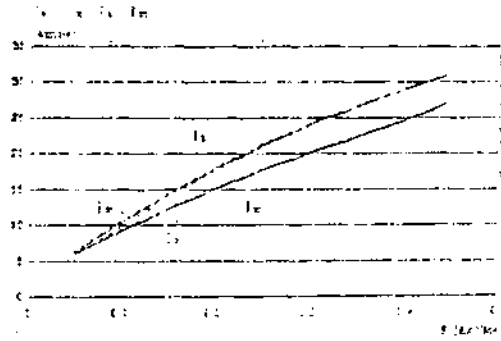
temel r-oment bileşeni ile diOer harmoni! 1 erin toplamlıyla elde edilir. Bu çalışmada asenkron motorlar 2, 3 ve 4 basamaklı; n ^ - r i j i m r i a 3 D E 1 s r - y 3 a b e s l e n m i ş - t i r , b a s a m a k p o z i s y o n l a r ı n ı n

3. E. iU_ rA-KIIP:~P~! çIiIig
 üfi'l^j-lllElill: EŞİTLEMESİ İÇİN
 DEĞİŞİMİ

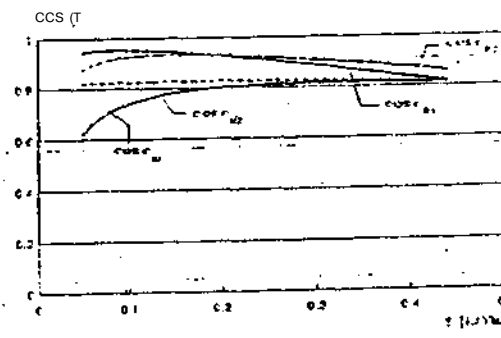
Şekil 8 de $M_B = M_A$ ve $I_1 = I_2$ malinafarminçii-ismo "e, tleri birbirine eşit olmadığı .-e bu farkın, mal. ina terminallerine uçulanan dalga çel linin y; pısı değiştirilerek' azalmasına rağmen tam olarak. sıfıra eş i ll enmesi müml ün oîTiadıÇı bölüm 3.1 de- göçte-r ll-id st ir . Pcs-amai llı dalgayı oluşturan Bv acıları makina için r.ararlı olan aşın akıma yol acmıyacak sel ilde oluşturulduğunda, toplam harmonik momentleri toplam moment ürerinde ancak % 0.2 civarında etkili .olacaktır. Bu nedenle B mal. inasının çıkış momentinin A makinesinin çıkış momentine eşitlenmesi için harmopik momentlerinin bir etkisi olmadığı ve dolayısıyla da eklenmesi gereken par*a, metre-lerin tetikleme seısından etkilenmediği kabul edilmiştir. Şekil 8 de 0-0.45 kayma değerleri arasında, iki mskinanın çıkış momentlerinin birbirine eşitlenmesi için B makinasının eşdeğer devresine eklenmesi gereken direnç ve reaktanslarının kayma ile değışimi gösterilmiştir.



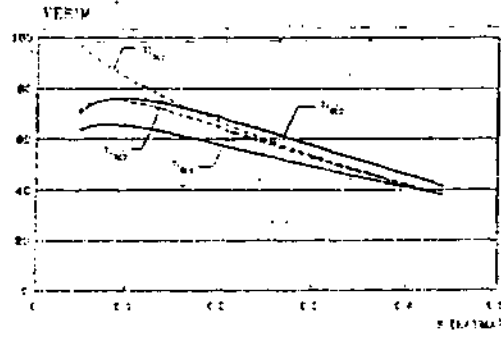
Şekil 8 : $M_B = M_A$ I.ostulunu s-açlamak için B makinesinin eşdeğer devresine eklenmesi gereken direne ve rçektens- larının kayma ile değışimi.



Şekil 9 : $I_1 = I_2 = I_3$ ve $T_1 = T_2 = T_3$ için B makinesinin eşdeğer devresine eklenmesi gereken direnç ve reaktanslarının kayma ile değışimi



Şekil 10 : $R_1 = R_2, X_1 = X_2$ ve $T_1 = T_2$ değerlerinin değışimiyle her bit- parametre için güç kat?ayısının kayma ile değışimi



Şekil 11 : $T_1 = T_2, X_1 = X_2$ ve $R_1 = R_2$ deüerlerinin değışimiyle (-10, tır para. metre için mafina verin. inin k? ym.« ile değışimi

Sel.!! S' tiFr, or₂ti } dl'ğü Oİbj
 rotora E!]E!·!!;·Ei çrt! jvn dirç-r,--
 cin öiûEr p; r r~le-lrf-] çri va'-:.. *İÇ!A
 layma j3e pçjl 'Arla deljs -crfiÇA
 görü.1L>r. F'ir-ia i...- ç=... ştitörj
 *! le'-mr-si Qfi- =I sn direncin
 i,-,madan col eü'üer.diği e
 ISyü,F-iri f.'-tİjî,i5 f351diÇI
 pötulur. ;it?tûfa ve rotora
 E' lenmesi çe-reter-n re?l t.anslarj.-
 rnn de-Şişimi aynı ve la/r,anın
 ?""*f?iyİsüst.e?1 bir bici m d e
 ?;s] 78 ktadır.

P i r a = pr,l r o n r r i £... l i n a n i n
 ç&b&lE-den çeltiği alim kayma
 deÜerinden etki 1 enmek teriir.
 Ejdeüer devre te'-nan? 1 erinden
 içe doOru bakı 1 d: Q.ir.da görülen Z
 esdeüer erapedansı kaymenir
 artasıy1a kücu1düğünden,
 şebekeden çekilen akın
 kaynısın artıcıyla artmaktadır.
 5ek.il 9 , B rTifil-:ins=ınır
 şebekeden çektiği atımın kaymē
 ile değişimi, eşdeüer devre
 parfiEtre1erinden nasıl etkilen-
 diğini gösterir. Bu eğrileri
 elde etmek için herhangi bir =
 kayması için MB=MA losulunu
 5sQ1ayan R₁, R₂, X₁ ve X₁
 direne ve reaktansları bulunarak
 aynı kayma değerlerinde her bir
 parametre için akım değerlerinin
 kayma ile değişimi bulunmuştur.

Güc katsayısı asenkron
 mekinasında önemli bir rol
 oynama k tadır. Bu b ü y ü k 1 ü k.
 malifian 1 na 1 d 101 görünürgücün
 hangi oranda enerji dönüşümüne
 l.atıldığını gösterir.Güc
 katsayısının b₂yük delerleri
 df.in.a ar> erİlir, ;:ira tepkin
 g.lç yar &,r.1 1 püce katkıda
 bulunncir, anca l baOla-ıtı
 ha 11 arınıyü /ler - éta > 1 p 1 a "" 1
 arttırır. Sekil 10, !!B=MA
 şartını saklayan R₁, R₂, X₁ ve
 X₂ değerlerinin deçisimiyla her
 bir pe.rametre için güç
 katsayısının kayma ile değişin.i
 gösterilmiştir. S&* ilden
 görüldüğü gibi eşdeğer
 devresifie rea>tar.s
 bağlanmasıyla makinanın- güç
 katsayısı düşmektedir ve? bu
 ds. belirli kayma değerlerimde
 aynı çıkış gücü elde etmek
 için şebeJeden daha fazla
 1042

abımın rcıtlı k E?..i = f'İç*.:na
 ç e 3 i r v e a > r i c a a y r ; = F'İ ç | ö e r,
 c-r,ç.,] düğü.İ gibi aynı la>r.₅
 de Çerinde a > n i ç j l i s o ü c . . i ç 3 d =
 Ftmsk irin. Pj, F2. \ı ve 2
 eşdeğer rtt.re p~ rf . :- e t > e 3 e r i
 arasında, f2 seh.eled&n en a?
 ai;,"İjnçe" i 3 . F E S i n i s a ? 3 a y a n
 e i e - m a n d ır .

Asenlron makina set?'-den F<
 gücü alır ve milinden F2 qırü
 İftir. E:jr malinan111 verimi
 milden .f-rejiQi jılcın aldığı
 elektrik çı.ıcüne oranıdır. KB=^A
 koşulunu sağlayan her FedeŞer
 ön-vra paramçtrr-si için P
 malir:fçir,ın vei"iminin l?yc-a ile
 değişimi s.-kil 11 'de
 gösteri 1 mi=t.ir. Şet i 1 deki
 eğri]er inreJ enirse dLişük
 kaymalarda eri yüksek verimin Xı
 in değişimi ile elde edilir,
 fakat ister maliyet açısından
 ister küçük güc
 katsayısı açısından seçiln»esi
 uygun değildir. Xı den sonra en
 büyük verim R2 için elde edilir
 ve Xı' öen sonra bütün kayma
 değerleri için diğer
 parametrelere nazaran daha
 yüksek bir verim sağlar.
 Dolayısıyla ister şebekeden
 çektiği akım ister güc
 katsayısı ve verim açısından, B
 makin-asının çıkış momentinin A
 makinasımın çıkış momentine
 eşitlenmesi için bilerikii
 makinalarının rotor devresine
 direnç eklenmesi en uygun
 cörumdur.

4. SONUÇ

F-v c a l i = m a d a b a s z m a k 1 1 d a l g a
 ile beslenen asenkron makinanın
 harmonik nC'ientleri E b.-inların
 toplam moment ü:çrindç!i
 et'ileri incelenmiş ve
 ç.ç. Q1daka sonuc 1 =. elde
 çö:İbr-İT\ r .

r.İçan.rk. gerilimlerinin
 pozisyonu d=Çiştiri1erek, kayma
 değiştirme! sir.in, toplam çıkış
 momenti değiştirelebi 1 ir.

lic'rcfi,--! pr.r.i-T>,on 1.;?-1njn P??cimi ile s.T.r.j.3en l s;-h-nç:i bir k^ym^da top 3--m moment djv; > r. 3 eti 3 ir. 2, 3 ve- 4 b?s-?m.?k]ı dalganın harffir-,jl- irpril]ç:-j hi b; rindcvn r-r.V f;|-1-1ı ö k^djîl JÇİN.A ve B r-fâ iriftjfrinjf ç1de f^öi 3 ET< (Hr; ve Min momentleri arasında moment fari 3 f. rınınyürç- de-Çerl&ri, bir Pril ir,=, için pratik olarak: E a bitir. Hr. ruc dalgatipi için b u farkın y ür d G d e Ç eri A mr4ina=1 için '•'. ~>.4 ilen B •Tisi ina=1 için 7, 3.1 dir. Bu dpÇe-r di'sük kay-alarda deha I farladır örneçin =0.01 de y.14 c?.vsrındadır. B a r m or i i I gerilimlerinin toplam moment ürerin[i? "farla etki 3 i o3 mamasıns karsın toplam alım ürerinde son d e r e c r- et I i l i d i r s=0 .05 kaym?e,ında jher üç dalga şekli için, A mak.irteç Jnın alım deşisiminin yüzde deçerleri '/. 140 3 arda ikerı bu cieÇer B makinaşı için 7. 70 lerdedir. Dolayısıyla harmonik akımları A makinasmda daha etkilidir. Harmoni E akımları ve harmonik momentleri sadece & tetikleme acılarına be.giı deQil, aynı zamanda bu büyük }ük 3 erma. kinanın eşdeÇer devre parametrelerinden de etkilenmekte ve farklı firmalar tarafından üretilen ve aynı ten>Fİ büyüklüklere sahip o3 an iki makinadan, resktenları daha küçük olan makinada harmonik akımları ve harmonik momentleri daha etkilidir. A ve B mat •• i nalf.r in jn cıkıs momentlerinin esit Jenme-si için E' niş! inasının F?de5er devresine et:ler,en F^2 d; şardF, i pr-ramet- : t.jfr, e. ı f, r, r, ç mc'f,n çrl etki: G-nmel te ve istertie.Or.r istE-r vtriffi ve çoç katçayıEi acısından; kİB=İA şartını ça.Çlamada R'2 nun deQiçtiriilmesi er, uygun çözümü vermektedir.

LAYUHLAR

[1] BOYS J.T. , WAL1ON S.J. , A Loss llinimised PWM inverter, 5EE PVÖC. B, 132, 260-268.Sep (.1985) .

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ 5. ULUSAL KONGRESİ

[T] MF.Ç.E! , A.F..A Melberi d f C'rki.'lftir-n on Optj H. = ^ t. i o". ;-,d El.i^or.ation nf P\ -i<, -\ ' . 'oltage (-'aveform Hjr fv.or.Ks E i et in an Iriddition Kotcr Dri\ e, hv11. 7 f:C H. İr. i v.) et t a n b u 1. 4 2, 4 . 557-574 (1985).

[3J k:i..T(JGSI-;IRN E. A. . JO^DAİU H.E. , F-ol > phase İnduction Motor F'formance arıd L.05=ir= on NonEinusoidal V' c-11 a g e Source=, IEEE Tran=. Pow. App-Sys. 624-631 March (1968).

[4] KERGEN A.F. , Effects of S'upply Voİtage U'a-eforms Uporı Iron Losses in an İndurction Motor , Bull. Tech. Univ. İstanbul Vo.1.43, 1, pp 9-21, (1990).

m MERGEN A.F. , The Ef-fects of Equivalent - Circuit Parameters in FWM controİled İnduction motors IEEE A"İ. Mee-ting İnd. App. Sur. vol I, PP 40-46 (1991).

[6] BASHİR A. < FRADHAN B.D. , REVANKAR G.N. , An Improved Stepped Kfive Current Bource Inverter, International Journal of Electronics, Vol.54, Iss 5, pp 595-613, (1983).

ÖZGEÇMİŞİ:

1970 yılında J.T.ü.T.O. Elektrik Müh. bölümünü bitirdi. 1973 yılında L'riversity of Aston in B'han, ' dan MSC ve 1977 >11ında Lo-j.ghborough Un.i \&r=it ,• of TechnoJ'Oyy ' deri Ph. D. aİdi. 1^81 yi 1 m d a . i .T.ü. F. lektrik-E İe> lİ onik Fal:ül tesinde E]e İtrik Makir. a1ar1A- f bilim dalında doçent ve 1991 yalında profesör oldu. Halen aşm fel ül te'-in öşretim üyesidir.