

# ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLARDA FAZ ENDÜKTANSINA ETKİ EDEN FAKTÖRLERİN İNCELENMESİ

\*Ahmet FENERCİOĞLU, \*\*İlhan TARIMER

\*Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Turhal Meslek Yüksekokulu, Elk. ve Mekatronik Prog. Turhal/Tokat  
\*\*Muğla Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik ve Bilgisayar Eğt. Bölümü, Kötekli/Muğla

Geliş Tarihi : 03.07.2006

## ÖZET

Bu çalışmada bir anahtarlamalı relüktans motorda, (ARM) faz endüktansının değişimine neden olan faktörler incelenmiştir. AR motorunun faz endüktansı, uyarım akımı ve hareket eden rotor pozisyonunun bir fonksiyonudur. ARM'nin doğrusal olmayışı bağ akılarını, ko-enerji değişimini ve her rotor pozisyonundaki endüktansını tahmin etmek için bir analitik yöntem geliştirmeyi zorlaştırır. Ayrıca faz endüktansının değişimi motor geometrisine, ortamın bağıl geçirgenliğine, doyuma, saçaklanma ve uç-sargı alanlarına bağlıdır. Bu çalışmada, 6/4 bir ARM'de geometrik yapı, geçirgenlik, doyum, saçaklanma ve uç-sargı alanları etkileri analitik ve 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle (Ansoft RMxprt, Ansoft Maxwell 3D kullanarak) incelenmek istenmiştir. Yapılan simülasyon ve analitik çözümlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler :** ARM, ARM faz endüktansı, ARM relüktansı.

## INVESTIGATION OF THE FACTORS AFFECT PHASE INDUCTANCE IN SWITCHED RELUCTANCE MOTORS

### ABSTRACT

In this study, the factors affecting change of the phase inductance in a switched reluctance motor (SRM) have been investigated. The motor inductance is a function of both excitation current and rotor position and it depends on motor geometry, relative permeability, saturation and fringing and end-turn field. Non-linearity of SRM leads to difficulties for the development of analytical methods for predicting the flux linkages, co-energy change and inductance at all rotor positions these effects in the 6/4 SRM obtained from analytical way and predicted by 3D finite element method (Ansoft RMxprt, Ansoft Maxwell 3D) have been investigated. Results of simulations and analytical solutions have been relatively compared.

**Key Words :** SRM, SRM phase inductance, SRM reluctance.

## 1. GİRİŞ

Değişken relüktanslı motor kuramı uzun zamandır bilinmesine rağmen ancak 1980'li yıllardan itibaren değişken veya ayarlı hız uygulaması için kullanılmaya başlamıştır. Son yıllarda bu motorların, mühendislik uygulamalarında yaygınlaştığı görülmektedir. Ucuz ve yüksek güçlü anahtarlama

elemanlarının getirdiği avantajlar bu motorun yeniden keşfini sağlamıştır. ARM yapı olarak çok basittir. Ancak denetimi karmaşıktır. Örneğin, tork üretimi için faz sargılarının uygun sırada tetiklenmesi işlemi rotorun konum bilgisinin teminini gerektirmektedir. Bununla birlikte son yıllarda, yaygın ve düşük maliyetli mikroişlemci ve güç elektroniği elemanlarının elde edilebilmesiyle, AR motorların diğer DA ve AA motorları ile rekabet

edebilmesi sağlanmıştır (Gürdal, 2001; Krishnan, 2001).

Bu çalışmada faz endüktansının tork üretimindeki etkisi analiz edilmiştir. Endüktans tahmini yapabilmek için endüktansa etki eden boyutlar, sargı ucu ve saçaklama alanları ile malzemedeki akı yoğunluğunun anlık durumu, örnek bir 6/4 anahtarlamalı relüktans motor için değerlendirilmiştir.

## 2. AR MOTOR ENDÜKTANS MODELİ

AR motorda manyetik devrenin parametrik özellikleri, rotor konumuna göre değişmektedir. Bu nedenle sarım endüktansının tahmin edilmesi oldukça güçtür. Yapılan çalışmalar AR motorunun maksimum ve minimum endüktansının tahmin edilmesi, çeşitli kabullerle manyetik akı yolları endüktanslarının varsayımına dayandırılmıştır. Bu endüktansların toplamları faz endüktanslarını vermektedir.

AR motorunun ara rotor konumlarındaki faz endüktanslarını bulmak için maksimum ve minimum endüktans değerlerini kullanarak kosinüs bağıntıları halinde elde edilen bir Fourier serisi, Eş.1'de verilmiştir (Lu, 2002).

$$L(\theta, i) = \sum_{k=0}^m L_k(i) \cos(kn_R \theta) \quad (1)$$

Burada  $\lambda(\theta, i) = L(\theta, i)$  'dir.  $\lambda(\theta, i)$ , bağ akısı olarak Eş.2'de verilmiştir.

$$\lambda(\theta, i) = \sum_{k=0}^m L_k(i) \cos(kn_R \theta) \quad (2)$$

ARM, düşük enerji oranına sahip olduğundan bunu ifade etmek için bir enerji dönüşüm döngüsü doğrusal manyetik olarak hesaplanmıştır. AR motoru rotor konumuna göre endüktansın Fourier Serisinin birinci harmoniğinde doğrusal bir model davranışındadır. AR motorunun endüktans Eş. 3'de, bağ akısı ise Eş.4'de verilmiştir.

$$L(\theta, i) = [a_0 - a_1 \cos(n_R \theta)] \quad (3)$$

$$\lambda(\theta, i) = [a_0 - a_1 \cos(n_R \theta)]i \quad (4)$$

Burada  $a_0$  ve  $a_1$  katsayıları Eş.5'den elde edilebilir [3].

$$a_0 = \frac{1}{2}(L_a + L_u) \quad , \quad a_1 = \frac{1}{2}(L_a - L_u) \quad (5)$$

ARM için verilen bu eşitliklerde;  $n_R$  rotor kutup sayısını,  $L_a$  bir faz için maksimum endüktansı,  $L_u$  da minimum endüktansı belirtir.

ARM'nin stator ve rotor kutuplarının karşılıklı örtüştüğü konumlarda endüktans değişimi daha fazladır. Örtüşmenin bittiği örtüşmeyen konumlarda hava aralığı daha fazla olduğu için endüktans değişimi örtüşen pozisyonlardaki kadar değişim göstermemektedir. Hatta ideal bir ARM'de örtüşmeyen pozisyonlarda endüktans hiçbir değişim göstermemektedir. Bu nedenle uygulamalarda, ARM örtüşmeyen bölgede çalıştırılmamaktadır. Motorun çalışma bölgesi rotorla stator kutbunun örtüşmeye başladığı konum ile tam örtüşmenin gerçekleştiği konum arasındadır. Bu konumdan sonra 2. faz için de aynı durum söz konusudur ve 1.faz örtüştüğü anda uyarımı kesilerek 2. faz uyarılır (Gürdal ve Fenercioğlu, 2006).

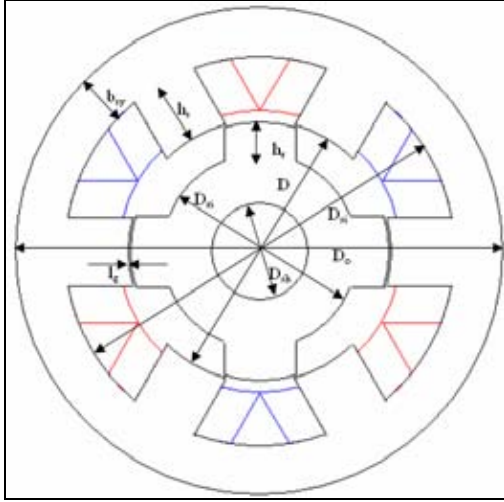
## 3. HAREKETLİ BİR ARM'İNİN MİKNATISLAMA ANALİZİ

Analizleri yapılan ARM'nin fiziksel boyutları Tablo 1'de verilmiştir (Gürdal ve Fenercioğlu, 2006). Tablo 1'de verilen fiziksel özelliklerdeki AR motoru, öncelikle 2 B olarak tasarlanmıştır.

Tablo 1. 6/4 ARM'nin Fiziksel Boyutları.

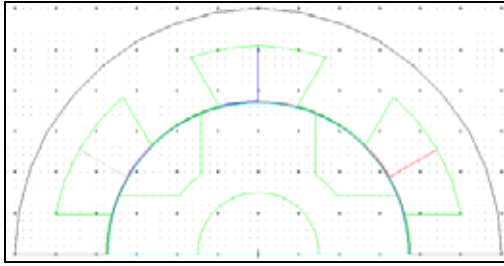
Mil çapı ( $D_{sh}$ )	:	0.03 m
Rotor iç çapı ( $D_{ri}$ )	:	0.06 m
Rotor dış çapı ( $D_{ro}$ )	:	0.08 m
Stator kutup çapı ( $D$ )	:	0.081 m
Stator (boyunduruk) iç çapı ( $D_{si}$ )	:	0.12 m
Stator (boyunduruk) dış çapı ( $D_o$ )	:	0.15 m
Paket uzunluğu ( $L_{stk}$ )	:	0.15 m
Stator kutup yayı ( $\beta_s$ )	:	30°
Rotor kutup yayı ( $\beta_r$ )	:	32°
Hava aralığı ( $l_g$ )	:	0.0005 m
Rotor kutup yüksekliği ( $h_r$ )	:	0.010 m
Stator boyunduruk kalınlığı ( $b_{sv}$ )	:	0.015 m
Stator kutup yüksekliği ( $h_s$ )	:	0.0195 m

Tablo 1'de verilen motorun yapılan tasarımdan sonraki fiziksel boyutlandırması ve elde edilen 2 B geometrik modeli (Tarimer, 2003) ise Şekil 1' ve Şekil 2'de gösterilmiştir.



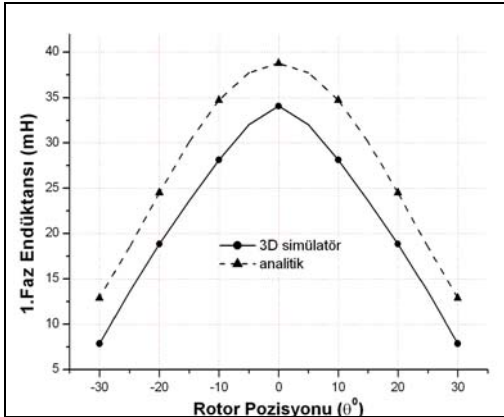
Şekil 1. 6/4 model ARM'nin boyutlandırması.

Şekil 1 ve 2'de 6/4 ARM'nin Ansoft RMxprt V5 (Anon., 2006) ile yapılmış tasarım ve analizinden elde edilen laminasyon (sac paket) görünümünü ve 2 B geometrik modelini vermektedir.



Şekil 2. 6/4 ARM'nin 2 B geometrik modeli.

Bu motorun faz endüktansı profilinin 3B simülator çözümü sonuçlarına göre ve analitik çözüm sonuçlarına göre değişim grafikleri ayrı eğriler şeklinde Şekil 3'de verilmiştir. Yapılan çözümlerden 0°'lik rotor konumunda elde edilen maksimum endüktans değerleri arasında 5 mH'lik bir fark olduğu görülmektedir.

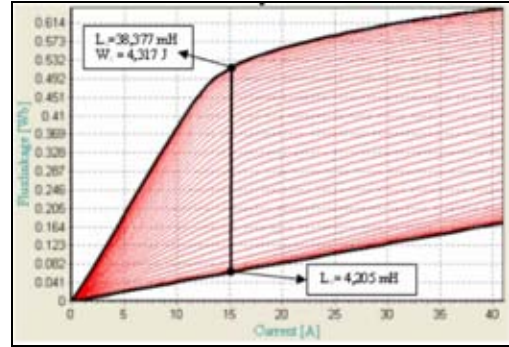


Şekil 3. Faz endüktansı profili.

Burada rotorun 0 derece konumu örtüşen konumu ve -30° ve 30° konumları da örtüşmenin başlangıç ile bitiş konumlarıdır. ARM'nin motor çalışma durumu, rotorun -30° ile 0° arası konumlarında gerçekleşir. 0° ile 30° arası konumlar, ARM'nin generatör çalışma bölgesidir. ARM'nin endüktans profilini her iki bölgede de görebilmek için bu şekilde verilmiştir.

Şekil 3'den görüldüğü gibi sonlu elemanlar yöntemini (SEY) kullanarak statik manyetik çözüm yapan 3 B simülator sonuçları ile analitik sonuçlar arasında yaklaşık 4 mH'lik bir fark vardır. Buna rağmen endüktansın, rotor konumuna göre değişimi her iki durumda da yaklaşık aynıdır (Gürdal ve Fenercioğlu, 2006).

Bağ (halka) akısı karakteristiği analitik ARM modelinin ve karakteristiklerinin belirlenmesinde en önemli etkidir. Bu karakteristik makinanın davranışını ve parametrelerini belirler. Mıknatıslanma grafiği eğrisel görünümü, Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4. Mıknatıslanma eğrileri.

Bu eğri örtüşmeyen ve örtüşen konumlar arasındaki halkalanma akılarını vermektedir. Malzemenin doyum başlangıcı olan diz değeri bir fazın yaklaşık 15 A uyarımı ile gerçekleşmiştir. Bu noktada, örtüşen konum için endüktans 38.377 mH, ko-enerji 4.317 J, örtüşmeyen konum için endüktans 4.205 mH değerleri analitik olarak ele edilmiştir.

#### 4. SARGI UCU VE SAÇAKLANMA ALANLARININ ENDÜKTANSA ETKİLERİ

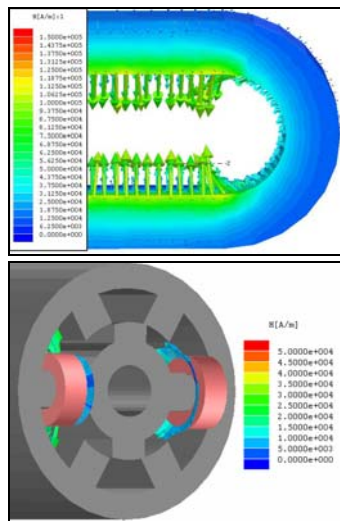
Uç-sargı etkisi, sargıların dairesel uç kısımlarının nüveye olan yayıf kuplaj etkilerinden dolayı oluşmaktadır. 2 boyutlu simülasyon ve analitik çözümlerde genellikle modelin uç alanları ve saçaklanma etkileri ihmal edilmiştir. 3 boyutlu analizde ise sargıların uç kısımlarındaki ko-enerji ve saçaklanmalar çözüme katılmıştır. Eğer uç sargılardaki alanlar çözüme dahil edilirse ko-enerjideki toplam değişimin azalmasına neden

olacaktır. Aynı nedenden dolayı 2 boyutlu ve analitik çözümlerle hesaplanan tork ile karşılaştırıldığında, uç sargı alanları gerçek torkun düşmesine neden olacaktır (Materu and Krishnan, 1990; Tang, 1997). Sargıların uç etkisi, endüktansı artırmaktadır (Krishnan, 2001). Bu artış 3 B simülasyon sonuçlarına dahildir. Fakat analitik ve 2 B çözümlerde uç etkisi dahil değildir. Bununla ilgili literatürde yapılan çalışmalarda uç alanlarının endüktansa ve torka etkisi belirtildiği görülmüştür. Burada endüktansın uç etkisi ve saçaklanma etkisi ile arttığı Eş. 6 ve Eş. 7 ile belirtilmektedir (Tang, 1997; Husain and et al, 2000).

$$L_u = \frac{\pi(W_{ps} + W_{coil})}{2l_{core}} k_{end} L_{u0} + \frac{k_{fringe}(2l_{gap} + l_{ps}) + l_{core}}{l_{core}} L_{a0} \quad (6)$$

$$L_a = \frac{\pi(W_{ps} + W_{coil})}{2l_{core}} k_{end} L_{a0} + \frac{2k_{fringe} l_{gap} + l_{core}}{l_{core}} L_{a0} \quad (7)$$

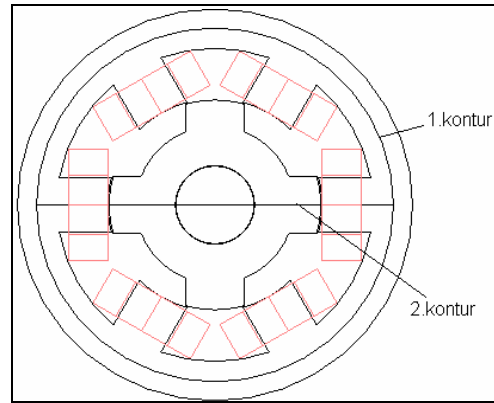
Burada;  $W_{coil}$  sargı genişliği,  $W_{ps}$  stator kutup genişliği,  $l_{core}$  nüve uzunluğu  $L_{a0}$  ve  $L_{u0}$  uç ve saçaklanma etkisi dahil edilmemiş endüktans değerleridir.  $k_{end}$  uç etkisi katsayısıdır ve ampirik olarak yaklaşık 0.2 dir. Ayrıca saçaklanma faktörü  $k_{fringe}$  ampirik olarak yaklaşık 1.05 olarak alınır. Simülasyon çalışmalarında bir faz sargısı doyum başlangıç değeri olan 15 A akımla uyarılmıştır. Sargı uçlarında meydana gelen alanlar Şekil 5’de gösterilmiştir. Bu alanlar endüktansın artmasına ve gerçek torkun azalmasına neden olmaktadır. Bu etkinin nedeni, eksenel akının hava aralığı üzerinden nüveye geçtiği bölgelerde saçaklanmasıdır. Bu etkileri gösteren eşitlikler, örtüşen ve örtüşmeyen konumlar için Eş. 6-7’de verilmiştir (Materu and Krishnan, 1990; Tang, 1997; Husain and et al., 2000).



Şekil 5. Sargı ucu alanları

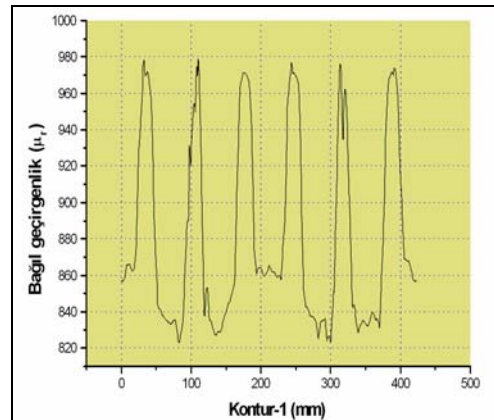
## 5. BAĞIL GEÇİRGENLİĞİN ENDÜKTANSA ETKİSİ

Analitik sonuçlarda bağıl manyetik geçirgenlik ( $\mu_r$ ) değeri genellikle sabit alınmaktadır. Fakat B-H karakteristiğindeki değişim manyetik geçirgenliğin ve relüktansın değişmesine neden olmaktadır. Bu değişim endüktans sonucunu etkilemektedir. Endüktansın analitik ve 3D analiz sonucu ile arasındaki farkın bir sebebi de budur. Bunun için simülasyonda stator boyunduruğunun tam ortasına yerleştirilen çember şeklindeki 1.kontur üzerinde  $B$  ve  $H$  değerleri alınmıştır. Ayrıca bu değerler mili ve kutupları ortadan kesen eksen üzerindeki doğru şeklindeki 2. kontur üzerinde de alınarak manyetik geçirgenlik ve bağıl geçirgenlik hesaplanmıştır. Bu konturların konumu Şekil 6’da görülmektedir (Materu and Krishnan, 1990).

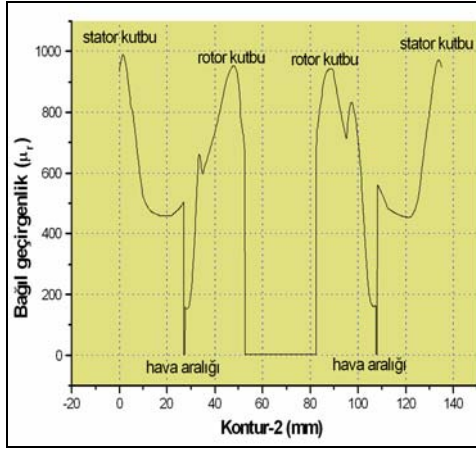


Şekil 6.  $\mu_r$  hesaplamasında esas alınan konturlar.

Konturlar üzerindeki B/H oranıyla hesaplanan  $\mu$  değerleri boşluğun geçirgenliğine ( $\mu_0=4\pi 10^{-7}$ ) bölünerek bağıl geçirgenlik ( $\mu_r$ ) değerleri hesaplanmış ve bu değerlerin değişimi Şekil 7’de verilmiştir.



(a) 1. kontur.



(b) 2. kontur.

Şekil 7. ARM'ye yerleştirilen konturlarda 3D simülâtörden alınan  $\mu_r$  sonuçları.

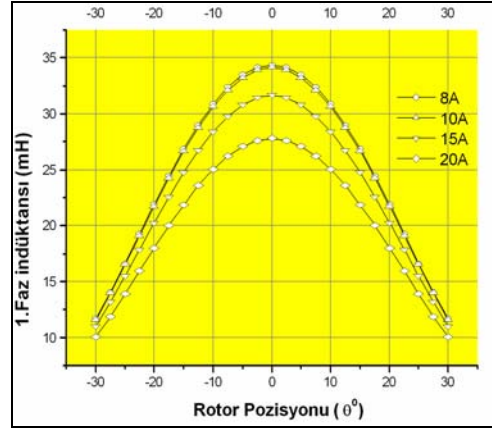
Şekil 7 (a) stator boyunduruğuna yerleştirilen 1.kontur üzerindeki  $\mu_r$  değişimini vermektedir. Burada stator kutuplarına denk gelen bölgelerde bağıl geçirgenlik artış göstermiştir.  $\mu_r$  nin artması bu bölgelerde relüktansın azalmasına endüktansın artmasına neden olmaktadır.

Şekil 7 (b)'de 2. konturdaki  $\mu_r$  değişimi verilmiştir. Bu değişim mil ve hava aralığı bölgelerinde  $\mu_r$  nin azalması rotor ve stator kutup bölgelerinde  $\mu_r$  nin artması şeklinde ortaya çıkar ve bu değişim endüktans sonucunu etkiler.

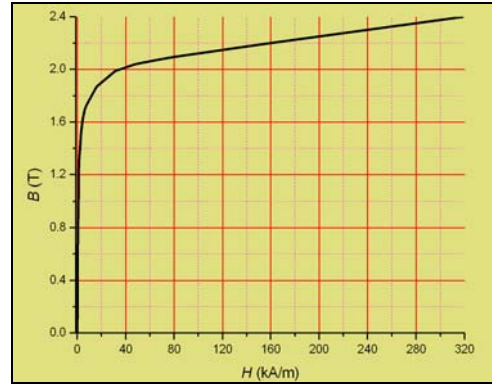
## 6. DOYUMUN ENDÜKTANSA ETKİSİ

Şekil 8'de ARM'de örtüşmenin başlangıcı ile bitiş arasındaki (-30°, 30°) endüktansın akıma ve rotor konumuna göre değişimi verilmiştir. Burada akım arttıkça endüktansın azaldığı görülmektedir. Bu durum malzemenin BH karakteristiğine bağlı olarak değişmektedir. Doyum başlangıcı olan 15A değerine kadar endüktans değişimi az değişiklik göstermiştir. Bunun nedeni B-H karakteristiğindeki manyetik geçirgenliğin ( $\mu$ ) değişimidir. Bu aralıkta genelde doyum başlangıcına kadar doymamış endüktans söz konusudur. Doyum başlangıcından sonra doymuş endüktans başlamıştır ve doymuş bölgede B-H karakteristiğinin eğiminin azalması, matematiksel olarak endüktansın azalacağını ifade etmektedir. Bu değişimler tamamen malzemenin manyetik özelliklerine bağlıdır Modelde kullanılan "steel 1010" isimli malzemenin B-H karakteristiği Şekil 9'da verilmiştir (Gürdal ve Fenercioğlu, 2006; Vujičić and Vukosević, 2000). Bu malzeme doymamış bölgede doğrusala yakın bir artış

göstermesi ve doyum noktasının yüksek olması nedeniyle seçilmiştir.

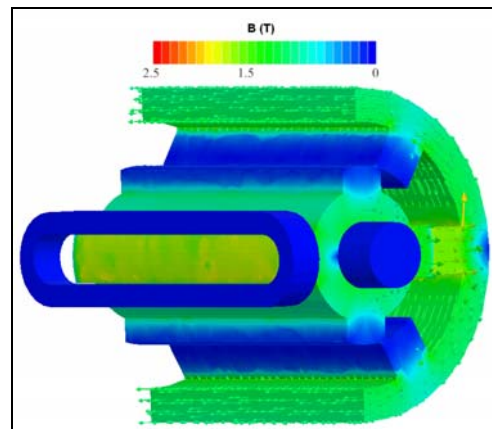


Şekil 8. Endüktansın akıma göre değişimi.

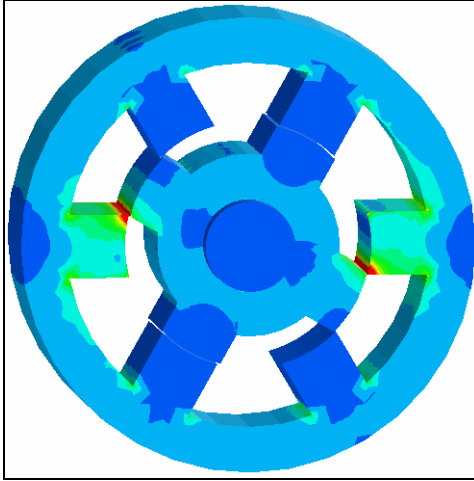


Şekil 9. Steel 1010 malzemesinin B-H eğrisi.

Örtüşen ve örtüşmeyen konumda ARM gövdesindeki manyetik akı yoğunluğunun genlik ve vektör dağılımı Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10 (a). Örtüşen konum.



Şekil 10 (b). Örtüşmeyen konum.

Şekil 10. ARM gövdesinde manyetik akı yoğunluğunun genlik ve vektör olarak dağılımı

B-H karakteristiğinden de anlaşıldığı üzere malzeme için diz değeri yaklaşık 1.9 Tesla'dır. Bu değer bir fazın 15 A uyarımı ile elde edilmektedir. Dolayısıyla 15 A den sonra stator boyunduruğunda doyum başlamaktadır. Örtüşmeyen pozisyonda ise kutup köşelerinde bölgesel doyum daha etkilidir ve bu durum Şekil 10 (b)'de kutup köşelerinde gösterilmiştir. Üstelik 6/4 bir ARM'de rotorun bir turunda 12 kez bu doyum oluşmaktadır. Böylece dinamik çalışma şartlarında motor gövdesinde sürekli değişen bir manyetik akı ve doyum etkisi söz konusu olmakta ve bu durum endüktans değerini değiştirmektedir (Vujičić and Vukosević, 2000; Gürdal ve Fenercioğlu, 2006). Bu değişim akımın karesiyle doğru orantılı olarak ko-enerji, tork ve güç değerlerini değiştirmektedir. Bu nedenle motorun verimine doğrudan etki etmektedir.

## 7. SONUÇ

ARM'de çıkış parametrelerini etkileyen en önemli faktör örtüşen (maksimum) ve örtüşmeyen (minimum) endüktans oranıdır. ARM için yapılan 2 boyutlu sonlu elemanlar analizi ve analitik çözümlerde genellikle endüktans değeri doğru tahmin edilememektedir.

Oysa 3 boyutlu analizlerde bölgesel doyum etkileri, saçaklanma, sargı ucu alanları ve doğrusal olmayan değişimlerin etkilerinin ve endüktansa katkısı tahmin edilebilmektedir. ARM'de motor gövdesinde akı yoğunluğunun dağılımına göre değişken bir bağıl geçirgenlik söz konusudur. Bunun yanı sıra gövde malzemesinin B-H eğrisinin doğrusal olmaması endüktansı etkilemiştir. Bağıl geçirgenliğin artması

relüktansın azalmasına, endüktansın artmasına sebep olmaktadır. Doymamış bölgede BH eğrisinin eğiminin büyük olmasından dolayı endüktans doymamış bölgeye göre daha büyüktür. Doymamış bölgede akıya göre B artışı azaldığı için endüktans azalmaktadır. Ayrıca sargıların uç kısımlarındaki manyetik alanlar endüktansı artırmaya rağmen üretilen mil torkunu olumsuz etkilemektedir. Çünkü rotora paralel sargılar mil ekseninde pozitif ve negatif tork üretmektedir. Uç sargıları mile paralel olmadığından buradaki alanlar mil dışındaki eksenlerde tork üretirken rulmanlarda zorlanmalara neden olan elektromanyetik kuvvetler üretir.

## 8. KAYNAKLAR

- Anonymous, 2006. Ansoft Rmxprt V5, <http://www.ansoft.com/products/em/rmxprt/> 26.06.2006.
- Gürdal, O. 2001. Elektrik Makinalarının Tasarımı, s. 201-240, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul..
- Gürdal, O., Fenercioğlu, A. 2006. **Helisel Yapılı Anahtarlamalı Relüktans Motorun (HY-ARM) Bilgisayar Destekli 3 Boyutlu Statik Manyetik Analizi**, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Ankara.
- Husain, I., Radun, A. Narius, J., 2000, **Unbalanced Force Calculation in Switched-Reluctance Machines**, IEEE Transactions on Magnetics, 36 (1):330-338.
- Krishnan, R. 2001. Switched Reluctance Motor Drives”, pp. 1-169, CRC Press, Florida.
- Lu, Y. 2002. Instantaneous Torque Control of Switched Reluctance Motors, Yüksek Lisans Tezi, pp. 1-65, University of Tennessee, Knoxville.
- Materu, P., Krishnan, R. 1990. **Analytical Prediction of SRM Inductance Profile and Steady-State Average Torque**, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Cat.No. 90CH2935, Seattle, 1:214-223.
- Tang, Y. 1997. **Characterization, Numerical Analysis, and Design of Switched Reluctance Motors**, IEEE Transactions on Industry Applications, 33 (6) : 1544-1552.
- Tarimer İ. 2003. Redüktörsüz Mekanik Sistemler İçin Düşük Devirli Ve Yüksek Torklu Elektrik Motor Tasarımları, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Vujičić, V., Vukosević, S.N. 2000. **A Simple Nonlinear Model of the Switched Reluctance Motor**, IEEE Transactions on Energy Conversion, 15 (4) : 395-400.