

# Anahtarlama relüktans motor tasarımlarında farklı rotor geometrilerinin motor güç ve tork üretimine etkilerinin incelenmesi

**Ahmet FENERCİOĞLU, İlhan TARIMER\***

*Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Turhal Meslek Yüksekokulu, Mekatronik Programı, Turhal/TOKAT  
Muğla Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik Ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü, Muğla*

## Özet

*Bu çalışmada, 6/4 geleneksel bir anahtarlama relüktans motorun (ARM) rotor geometrisi değiştirilerek endüktans, üretilen ani ve ortalama tork ile hava aralığı gücü gibi elektrik ve manyetik büyüklükleri analitik metotla elde edilmiş; bulunan sonuçlar sonlu elemanlar yöntemiyle tahmin edilerek karşılaştırılmıştır. Rotorun kutup köşelerinin kesik olduğu, rotorun çarpıtıldığı, kutup yayı genişliğinin statorunkinden büyük ve küçük olduğu, hava aralığının değişken olduğu beş farklı rotor yapısındaki modeller geliştirilerek AR motoru tasarlanmıştır. Bu makale, farklı rotor geometrili olarak tasarlanan bu modellerdeki standart rotor profilinde yapılan basit değişimlerin, endüktans, üretilen ani mil torku, ortalama tork ve hava aralığı gücü ile ilişkisi incelenmektedir.*

**Anahtar Sözcükler:** *ARM tasarımı, ARM rotor geometrisi, ARM rotor profili.*

## Abstract

*In this study, rotor geometries of traditional switched reluctance motor (SRM) have been modified and electrical and magnetic quantities (inductance, generated instantaneous and average torques, air gap power) of the 6/4 SRM's obtained from analytical and predicted by finite element method (Ansoft Maxwell 3D) have been compared. Different rotor pole geometry like chamfering and skewing of the rotor pole and air gapping between the tooth have been caused to obtain five type of designing models. This paper examines effects on the rotor torque that simple variations of the standard pole face profile could have, basically from an elementary viewpoint of how the modified profiles affect the phase inductance and produced instantaneous shaft torque, relationship of average torque and air-gap power.*

**Key words:** *SRM design, SRM rotor geometry, SRM rotor profile.*

---

\*İlhan TARIMER, itarimer@mu.edu.tr

## 1. Giriş

AR motorlar çıkıntılı kutuplu olarak farklı rotor ve stator kombinasyonlarında tasarlanan, basit bir geometrik yapıya sahip olan, rotor pozisyon bilgisi ve sürücü devresi kullanımını gerektiren bir motordur. Motorun geometrik yapısı çalışma karakteristiklerini ve çıkış parametrelerini doğrudan etkilemektedir. Rotorun kutup yayı genişliği, hava aralığı mesafesi, rotorun veya statorun çarpık yapılması ve kutup köşelerinin kesik olması gibi geometrik etkiler çalışma şartlarını etkileyen yapısal faktörlerdir. AR motorlarda rotor profilinde yapılan değişiklikler halkalanma akısının, akı yolu uzunluğunun ve kesitinin değişimine sebep olmaktadır. Bu değişim ise relüktansın ve endüktansın değişmesine de yol açarak, akımın karesi ile doğru orantılı olarak ko-enerji, tork, güç ve kuvvet büyüklüklerini etkilemektedir (1, 2, 3, 11, 12, 13).

Maxwell 2D/3D programlarının karmaşık makina yapılarındaki statik, frekans-domenli, ve zamanla değişen elektro manyetik alanları elde etmede kullanılabileceği Rosu tarafından bildirilmektedir (14). Bu nedenle başlangıçta 6/4, 3 fazlı, 2 kW'lık bir AR motoru boyutlandırılarak tasarlanmıştır. Daha sonra bu modelin stator, sargı ve paket boyutları sabit tutularak farklı rotor geometrilerinde çalışması için 3 boyutlu statik manyetik analiz ve simülasyonlar yapılmış; elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

Yapılan literatür incelemelerinde Moallem (7), Davis (9) ve Rasmussen (12) tarafından yapılan çalışmalarda anahtarlamalı relüktans motorun rotor profilinde yapılan bazı geometrik değişimlerin etkileri incelenmiştir. Adı geçen çalışmalardaki analizlerin genellikle 2 boyutlu olarak yapıldığı görülmüştür. 2 boyutlu analizlerde bölgesel doyma, saçaklanma akıları, sargı uç alanları, çarpık (skewing) rotor yapıları doğru analiz edilememektedir. Bu makalede ise statik manyetik analizler 3 boyutlu olarak yapıldığından daha etkin bir simülasyon olacağı ön görülmektedir. Bu çalışmadaki simülasyon, tasarım ve analizler, Ansoft Maxwell 3D statik manyetik çözücüsü ile sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilmiştir.

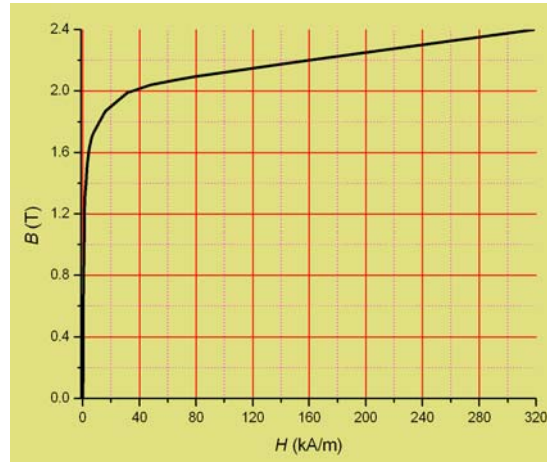
## 2. Materyal ve yöntem

### 2.1. Kabuller

Seçilen motor 6/4 kutuplu ve 3 fazlıdır. Yapılan tasarımlardaki motorların tamamı, farklı rotor geometrilerinde olup bu modellerin hepsi aynı fiziksel boyutlara sahiptir. Yalnızca rotor geometrilerinde çeşitli değişiklikler yapılmıştır. Bu çalışmada Maxwell 3D alan simülatörü ile AR motor manyetik olarak tasarlanmıştır; bilgisayar destekli 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle statik manyetik analizleri yapılmıştır. Rotor örtüşen pozisyonla, tam örtüşmeyen pozisyon ( $0^\circ - 45^\circ$ ) arasında beşer derece derecelik açılarla mil ekseninde saat yönünün tersine (CCW) döndürülerek her pozisyonda ani tork, endüktans, manyetik akı yoğunluğu değerleri tahmin edilmiştir. Simülasyon çözümlerinde motorun dinamik çalışma şartları, kontrol stratejisi ve sürücü devresinin etkileri dikkate alınmamıştır. Motor tasarımında stator ve rotor bütün olarak alınmıştır, laminasyon yapılmamıştır. Bir faz 2 sargıdan oluşmaktadır ve her sargı, tek sarımlı olarak tasarlanmıştır. Bu nedenle de faz uyartım değeri magnetomotor kuvvet ( $mmk$ ) olarak verilmiştir. Bir faza 1500 Ampertur ( $mmk$ ) uygulanmıştır (1500 A. tur=15A x 100 sarım kabul edilebilir). Simülasyonda kullanılan steel 1010 isimli malzemenin manyetik  $BH$  eğrisi Şekil 1'de verilmiştir. Malzemenin doyma başlangıç değeri, diz

noktası (knee point) yaklaşık olarak 1. 85 T dir ve motorun stator nüvesi her faz için uyarılan  $mmk$  (1500 At) değerinde olup doyma başlangıcında çalışmaktadır.

Analitik sonuçlar, doğrusal çalışma şartlarına göre verilen eşitliklerden hesap edilmiştir. ARM simülasyon ve gerçek çalışma şartlarında doğrusal değildir. Simülasyon ve analitik yöntemle tahmin edilen tork, ko-enerjiye göre hesaplandığından elektromanyetik torkdur. Bu nedenle tahmin edilen güç değerleri hava aralığı gücüdür ve kayıplar dikkate alınmamıştır. Simülasyonlar 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi ile yapıldığı için parametrelere etki edebilecek doyma, kaçak akılar, saçaklanma ve bağıl geçirgenliğin değişken olmasının etkileri dikkate alınmıştır. 2500 devir/dakika hız değeri için hava aralığı gücü, ortalama tork ( $Güç = Tork \times Açısal \text{ hız}$ ) değerinden hesaplanmıştır (8, 10).



Şekil 1. Rotor ve stator nüvesinde kullanılan malzemenin (steel 1010) B-H eğrisi

## 2.2. Analitik çalışmalar

Bu çalışma kapsamında öncelikle bir AR motordaki tork oluşumu ve tork eşitlikleri ele alınmaktadır. AR motorun bir faz sargısından akım geçtiğinde rotor, endüktansın maksimum değerinde olacağı bir konuma ulaşınca kadar motorda bir tork meydana gelir. Oluşan bu tork, endüktansı arttıracak yönde olup rotörü döndürme eğilimindedir. Kullanılan laminasyon (sac paket) malzemesinin çelik olması halinde ve çelikte kalıcı mıknatıslanma olmaması şartıyla faz sargısından geçen akımın yönü önemsizdir. Üretilen torkun yönü ise daima en yakın örtüşen konuma doğrudur. Bundan dolayı pozitif tork (örneğin motor çalışması torku) üretimi, sadece rotor ileri yönde örtüşmeyen konum ve sonraki örtüşen konum arasında meydana gelir (1, 2, 3). Başka bir ifadeyle motor çalışması torku sadece artan endüktans yönünde üretilebilir. Eğer rotor ve stator kutupları simetrik ise her faz sadece rotor kutup adımının yarısı üzerinde tek yönlü tork üretebilir. Bu nedenle bütün rotor konumlarında tek yönlü torkun üretilmesi için en azından iki faza ihtiyaç vardır. Eğer rotor dönüş yönünde ve endüktansın azaldığı bir konumda iken sargıdan akım geçirilirse negatif bir tork üretilir (frenleme veya generatör torku). Gerçekte üç fazlı AR motorlarda tork dalgalanması fazladır. Daha düzgün tork için dört fazlı motorlar tercih edilir. Genel çalışma torkunun düşük değerleri için üç fazlı motordaki tork iniş çıkışı akım profili ile azaltılabilir. Gerçekte faz akımı tork inişinin olduğu bölgelerde takviye edilir. Rotorun her konumunda bir fazın meydana getirdiği tork ifadesinin en genel yazılış şekli, Eş. 2. 1'de verildiği gibidir (1, 2, 3, 4).

$$T = \left[ \frac{\partial}{\partial \theta} \int_0^i \lambda(\theta, i) di \right] = \left[ \frac{\partial W'}{\partial \theta} \right]_{i=\text{sabit}} \quad [2. 1]$$

Bir doğrusal akı modeli için  $\lambda(\theta, i) = L(\theta)i$  ifadesi, Eş. 2. 2'de tekrar yazılmıştır (5 – 9).

$$T = \int_0^i \frac{\partial \lambda(\theta, i)}{\partial \theta} di = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad [2. 2]$$

Eş. 2. 2, AR motorun tork karakteristiğinin endüktansın rotor konumuna göre türevi ve faz akımının karesiyle değişimini vermektedir. AR motorunun mekanik denklemi, Eş. 2. 3'de verilmiştir (4, 5, 8).

$$J_r \frac{d\omega}{dt} + K\omega = T(n_R \theta, i_a, i_b, i_c) - T_L \quad [2. 3]$$

Burada  $J_r$  rotor ataleti,  $K$  katsayı ve  $T_L$  yük torkudur. Fazlara ait torklar ayrı olarak Eş. 2. 4'de verilmiştir (5, 6, 7).

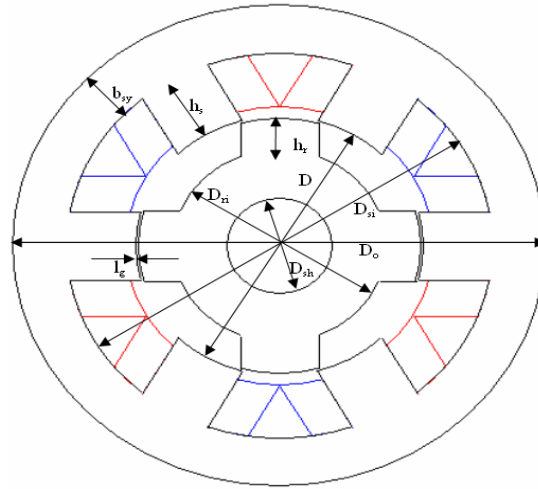
$$\begin{aligned} T_a(\theta, i_a) &= \frac{\partial}{\partial \theta} \int_0^{i_a} \lambda(n_R \theta, i_a) di_a \\ T_b(n_R \theta, i_b) &= \frac{\partial}{\partial \theta} \int_0^{i_b} \lambda(n_R(\theta - \beta_s), i_b) di_b \\ T_c(n_R \theta, i_c) &= \frac{\partial}{\partial \theta} \int_0^{i_c} \lambda(n_R(\theta - 2\beta_s), i_c) di_c \end{aligned} \quad [2. 4]$$

AR motorda üretilen tork, Eş. 2. 4'de verilen 3 faz torkunun bir süperpozisyonudur. Bu eşitlikten her bir faza ait torkun, stator kutup açısı ( $\square_s$ ) kadar sonra başladığı anlaşılmaktadır.  $\square_s$  açısı aynı zamanda fazlar arasındaki anahtarlama açısını da ifade etmektedir.

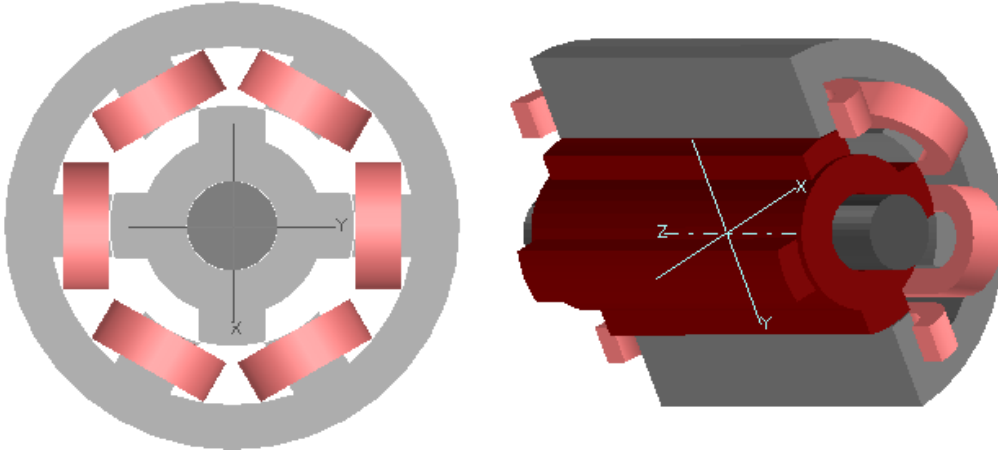
Burada, 6/4 bir ARM'de stator geometrisi aynı kalmak şartıyla ve rotor geometrisinde çeşitli değişiklikler yapılarak farklı rotor geometrilerinde yeni AR motor modelleri tasarlanmıştır. Bu modellerin 3 boyutlu statik manyetik analizleri ve simülasyonları yapılarak rotor konumuna göre elde edilen endüktans, ani ve ortalama tork ve güç değerleri incelenmiştir (7 – 9). İncelenen AR motorların rotor geometrileri farklıdır. Şekil 2'de 6/4 kutup sayısında, fakat farklı rotor geometrik yapılarda tasarlanan AR motorunun boyut değişkenleri ve değerleri görülmektedir (10). Burada incelenen çeşitli geometrik yapıdaki AR motoru rotor yapıları da Şekil 3 – 7'de verilmiştir. Tasarlanan AR motorunun fiziksel boyutları ise Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. AR Motor modellerinin boyutları

Geometrik Boyutlar ve		Uzunluğu /	Geometrik Boyutlar ve		Uzunluğu
Mil çapı	$(D_{sh})$	0,03 m	Stator (boyunduruk) iç	$(D_{si})$	0,12
Rotor iç çapı	$(D_{ri})$	0,06 m	Stator (boyunduruk) dış	$(D_o)$	0,15
Rotor dış çapı	$(D_{ro})$	0,08 m	Paket uzunluğu	$(L_{stk})$	0,15
Stator kutup çapı	$(D)$	0,081 m	Hava aralığı	$(l_g)$	0,0005
Stator kutup yayı	$(\square_s)$	0,5233 rad = 29,9°	Rotor kutup yüksekliği	$(h_r)$	0,01
Stator kutup	$(h_s)$	0,01975 m	Stator boyunduruk	$(b_{sy})$	0,015



(a)

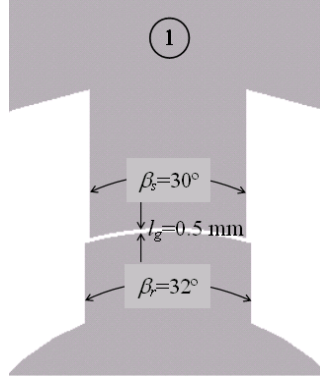


(b)

Şekil 2. a)6/4 AR Motor laminasyonunun fiziksel boyutları ve boyutlandırma değişkenleri

b)6/4 AR Motorun 3 boyutlu simülatör modeli

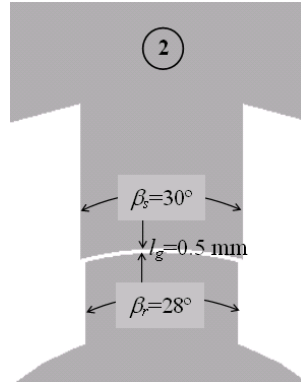
1. Rotor kutup açısının stator kutup açısından büyük olduğu durum ( $\alpha_r > \alpha_s$ )



Şekil 3.  $\alpha_r > \alpha_s$  olduğu durum.

Bu durumda rotor kutup yayı stator kutup yayından  $2^\circ$  büyüktür. Elde edilen fiziksel yapının görünümü, Şekil 3’de verilmiştir.

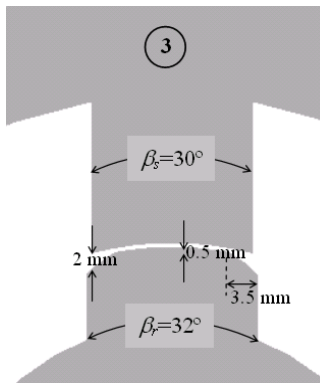
2. Stator kutup açısının rotor kutup açısından büyük olduğu durum ( $\alpha_r < \alpha_s$ )



Şekil 4.  $\alpha_r < \alpha_s$  olduğu durum.

Bu durumda rotor kutup yayı stator kutup yayından  $2^\circ$  küçüktür. Elde edilen fiziksel yapının görünümü, Şekil 4’de gösterilmiştir.

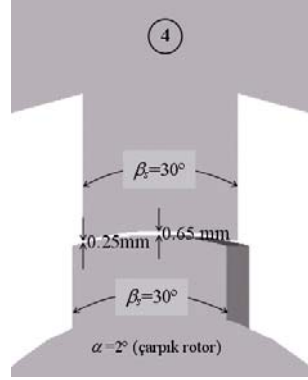
3. Rotor kutup köşelerinin kesik olduğu durum



Şekil 5. Rotor kutup köşesinin kesik olduğu durum

Bu durumda rotor kutup köşelerindeki bölgesel doyumu azaltmak düşüncesiyle köşeler kesilerek yuvarlatılmıştır. Elde edilen fiziksel yapının görünümü, Şekil 5’de verilmiştir.

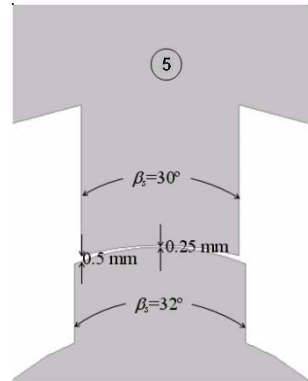
#### 4. Rotorun çarpık olduğu durum



Şekil 6. Rotorun 2° çarpık olduğu durum

Bu durumda tork vuruntularını ve akustik gürültünün azaltılması düşüncesiyle rotor 2° saat yönünde çarpık yapılmıştır. Elde edilen fiziksel yapının görünümü, Şekil 6’da verilmiştir.

#### 5. Hava aralığının rotor kutup ortasına doğru daraldığı durum



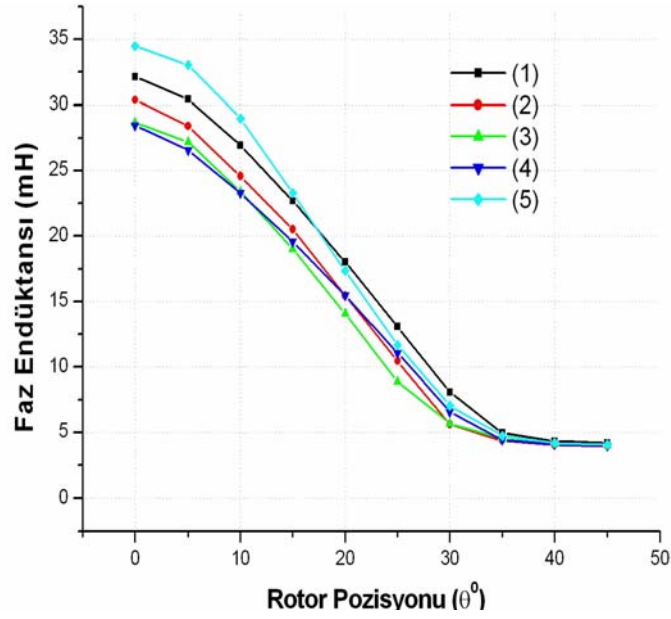
Şekil 7. Hava aralığının daraldığı durum

Bu durumda hava aralığı rotor kutup ortasına doğru aşamalı olarak azalmaktadır. Kutup köşelerinde 0,5 mm olan hava aralığı kutup ortasında 0,25 mm ye düşmektedir. Elde edilen fiziksel yapının görünümü, Şekil 7’de verilmiştir.

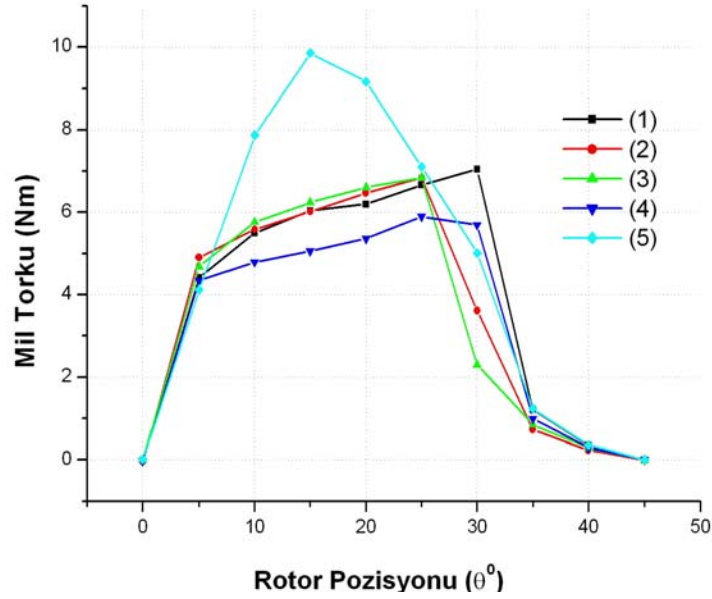
### 3. Bulgular

Bu kısımda Şekil 1’de tasarımı yapılarak laminasyonu elde edilen 6/4 ARM’nin, Şekil 2 – 6’daki rotor geometrilerine ait tasarım sonuçları Ansoft Maxwell 3D programında elde edilmiştir. Böylelikle tork ve güç ilişkisi bulunmak istenmiştir. Bu tasarımların statik manyetik simülasyon çözümleri ise üç boyutlu sonlu elemanlar analizi kullanılarak gerçekleştirilmiş; endüktans, ani ve ortalama tork ve hava aralığı gücü değerleri tahmin edilmiştir (7, 8, 9, 11). Birbirinden farklı rotor profillerinden alınan

faz endüktansı, ani tork, ortalama tork ve hava aralığı gücünün simülasyon sonuçlarına göre değişim grafikleri de sırasıyla Şekil 7 – 8 – 9 – 10’ da verilmiştir.

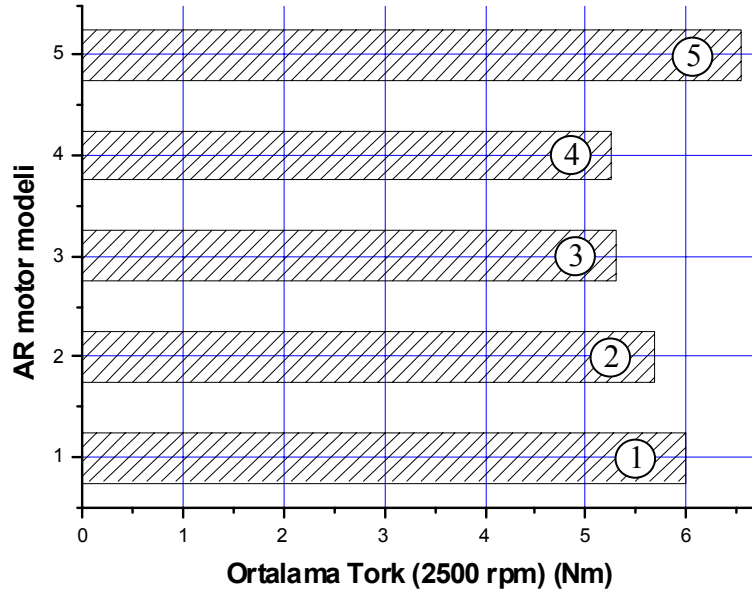


Şekil 7. Faz endüktansının rotor pozisyonu (□) ile değişimi



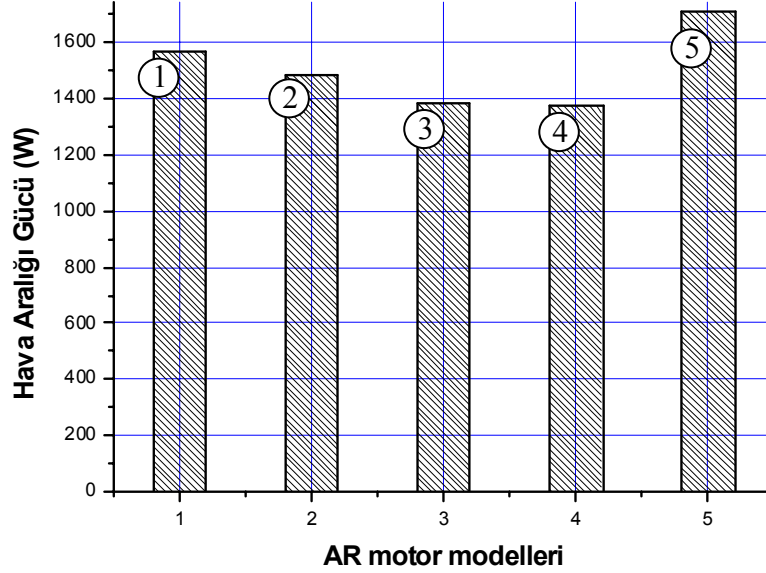
Şekil 8. Mil torkunun rotor konumuna göre değişimi





Şekil 9. AR motor modellerine göre ortalama tork

Şekil 7 – 10’da verilen grafikler, rotor konumuna göre faz endüktansı, ani mil torku, ortalama tork ve hava aralığı gücünü belirtmektedir. Burada 0° rotor ve stator kutbunun örtüşen (aligned), 30° örtüşmenin başladığı (overlap), 45° ise örtüşmeyen (unaligned) konumlarını verir. Analizler sonucunda elde edilen ortalama tork ve hava aralığı gücü değerleri Çizelge 2’de verilmiştir.



Şekil 10. AR motor modellerinde hava aralığı gücü

Çizelge 2. AR Motor modellerinin analizinde tahmin edilen ortalama tork ve güç değerleri

Model No	Ortalama Tork (Nm)	Hava Aralığı Gücü (Watt)
1	6,0061	1571,6
2	5,6840	1487,3
3	5,3026	1387,5
4	5,2568	1375,5
5	6,5369	1710,5

1. modelde hava aralığı 0,5 mm'dir. Rotor kutup yayı 32° olup stator kutup yayından büyük olduğu için rotor konumuna bağlı kararsız denge konumu oluşmaz. Fazın biri örtüşen konumda, diğer faz da örtüşmeye başlama konumundadır. Rotor yayının büyük olmasından dolayı akı yolu kesiti büyüceği için relüktans azalmış; faz endüktansı artmıştır. Endüktansa bağlı olarak bağ akıları, ko-enerji, tork ve hava aralığı gücünde artış söz konusu olmuştur.

2. modelde hava aralığı 0,5 mm'dir. Rotor kutup yayı 28° olup stator kutup yayından küçüktür. Bu nedenle rotor konumuna bağlı olarak rotorda kararsız denge konumu oluşabilmektedir. Yani fazlardan biri tam örtüşen konumda iken diğer faz örtüşmeye başlamamıştır. Rotor yayının küçük olması akı yolu kesitini küçültmektedir. Bu nedenle 1. modele göre relüktans artacak faz endüktansı azalacaktır. Buna bağlı olarak bağ akıları, ko-enerji, tork ve hava aralığı gücünde 1. modele göre azalma meydana gelir.

3. modelde hava aralığı 0,5 mm'dir. Fakat kutup köşelerindeki hava aralığı artırılmıştır. Örtüşmenin başladığı konumda kutup köşelerinde oluşan bölgesel doyumu azaltmak için rotor kutup köşeleri kesik yapılmıştır. Bu bölgede hava aralığının artması manyetik devrenin toplam relüktansını artırarak endüktansı azaltmaktadır. Bu durum 2. modelde olduğu gibi bağ akılarını, ko-enerjiyi, torku, ve hava aralığı gücünü 1. ve 2. modele oranla daha da azaltmaktadır.

4. modelde rotorun 2° çarpık olmasından dolayı hava aralığı örtüşen pozisyonda sabit kalmamıştır. Ortada 0,65 mm olan hava aralığı kutup köşelerinde 0,25 mm'ye düşmüştür. Elektrik makinalarında rotor, çarpık yapılarak tork vurunularını ve akustik gürültüyü azaltmak istenir. Burada rotorun ve statorun kutup yayı aynı olup 30° dir. Bununla birlikte rotorun çarpık olması ara rotor konumlarında manyetik akı yolu kesitini diğer modellere göre artıracığından endüktans ara konumlarda artmaktadır (9). Fakat örtüşen konumda çarpık rotor kutup dışına kaydığından bu konumda endüktans 1. 2. ve 3. modellere göre daha azdır. Radyal kuvvetlerde örtüşen konumda azalma, ara rotor konumlarında artış olmaktadır. Çarpıklıktan dolayı kuplajın azalması milde üretilen torkun düşmesine neden olmuştur.

5. modelde hava aralığı kutup köşelerinde 0,5 mm'den başlayarak kutup ortasına doğru 0,25 mm'ye düşmüştür. Hava aralığının az olması diğer bütün elektrik makinalarında olduğu gibi çıkış parametreleri açısından olumlu sonuçlar doğurmuştur. Bu durumda manyetik devrenin toplam relüktansı azalmış ve faz endüktansı artmıştır. Hava aralığının değişken olması relüktansı etkileyeceğinden ara rotor pozisyonlarında 0°-15° arası endüktansta artma 15°-30° arası endüktansta azalma meydana gelmiştir. Diğer modellere göre en yüksek tork ve güç bu modelde tahmin edilmiştir. Diğerleri ile

karşılaştırıldığında önemli bir fark maksimum tork pozisyonunun olduğu açının  $15^\circ$  olmasıdır. Fakat diğerlerinde örtüşmenin başladığı pozisyon olan rotor kutup yayı açısı ( $\alpha_r$ ) maksimum torkun olduğu konumdur ve genellikle 6/4 ARM'de  $28^\circ$ - $32^\circ$  arasındadır.

#### 4. Sonuç

Anahtarlamalı relüktans motorlarda rotor geometrisi doğrudan elektriksel ve manyetik parametreleri etkilemektedir. Manyetomotor kuvvet sabit tutulduğunda rotor profilindeki yapısal değişiklikler manyetik devrenin toplam relüktansını değiştirmektedir. Bunun sonucunda bağ akıları, endüktans, ko-enerji, tork-güç ve elektromanyetik kuvvetlerde değişim meydana gelmektedir. Elektrik makinalarının genelinde olduğu gibi hava aralığının küçülmesi endüktansın, torkun ve gücün artmasını sağlamaktadır.

AR Motorunda rotor kutup yayı, stator kutup yayından büyük olmalıdır. Küçük veya eşit olduğu durumlarda kararsız denge konumu ve daha dar bir bölgede etkin tork oluşması söz konusudur. Bu nedenle bir fazın anahtarlama süresi örtüşen pozisyonda bittiğinde diğer faz henüz örtüşmediği için sıfır-tork pozisyonu söz konusu olacaktır. Fakat rotorun ataleti ve hızı motora bu ölü bölgeyi atlatacaktır. Buna karşın torkta daha fazla dalgalanma meydana gelecektir.

AR Motorunda rotorun çarpık yapılması statorda ovalleşmeye sebep olan kuvvetleri azaltarak akustik gürültüyü ve tork dalgalanmasını düşürecektir. Rotor köşelerinin kesik olması örtüşmenin başladığı pozisyonda bu bölgelerde meydana gelen bölgesel doyumu azaltacaktır, fakat buna bağlı olarak üretilen tork ve güçte azalma eğilimi göstermektedir. Bu durumda hava aralığının azalarak daraldığı ve rotor yayının stator yayından büyük olduğu 5. model, mil torku ve çıkış gücü değerleri açısından diğer modellerden daha avantajlıdır.

#### Kaynaklar

- (1) Gürdal, O. , “Elektrik Makinalarının Tasarımı”, *Atlas Yayın Dağıtım*, İstanbul, 201-240, (2001).
- (2) Bal, G. , “Özel Elektrik Makinaları”, *Seçkin Yayıncılık*, Ankara, 155-175, (2004).
- (3) Miller, T. J. E. , “Switched Reluctance Motors and Their Control”, *Magna Physics Publishing*, Oxford, (1993)
- (4) Dursun, M. ,”Anahtarlamalı Relüktans Motorla Su Pompası Tahriki”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi*, Ankara, 42–68, (2002).
- (5) Lu, Y. , “Instantaneous Torque Control of Switched Reluctance Motors”, Yüksek Lisans Tezi, *University of Tennessee*, Knoxville, 1-65 (2002).
- (6) Krishnan, R. “Switched Reluctance Motor Drives”, *CRC Press*, Florida, 1-169 (2001).
- (7) Moallem, M. , Ong, C. M. , Unnewehr, L. E. , “Effect of Rotor Profiles on the Torque of a Switched Reluctance Motor”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28(2):364-369 (1992).
- (8) Gürdal, O. , Fenercioğlu, A. , “Computer Aided Three Dimensional Magnetostatic Analysis of Helically Structured Switched Reluctance Motor (HS-SRM)”, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, (2006)

- (9) Davis, R. M. , “A Comparison Of Switched Reluctance Rotor Structures”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 35(4):524–529 (1988).
- (10) Tarimer İ. , “Redüktörsüz Mekanik Sistemler İçin Düşük Devirli Ve Yüksek Torklu Elektrik Motor Tasarımları“, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi*, (2003).
- (11) Gabsi, M. , Camus, F. , Loyau, T. , Barbry, J. L. , “Noise Reduction of Switched Reluctance Machine”, *Electric Machines and Drives International Conference IMD'99*, Cedex, France, 263-265 (1999).
- (12) Rasmussen, P. O. , Blaabjerg, F. , Pedersen, J. K. and Jensen, F. , “Switched Reluctance-Shark Machines - More torque and less acoustic noise”, *Industry Applications Conference*, Rome, 1. 93–98 (2000).
- (13) Lee, J. W. , Kim, H. S. , Kwon, B. , Kim, B. T. , “New Rotor Shape Design for Minimum Torque Ripple of SRM using FEM”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 40(2):754-757 (2004).
- (14) Rosu, M. , Shigematsu, K. and Ravenstahl M. , 27. 12. 2006, <http://www.machinedesign.com/ASP/viewSelectedArticle.asp?strArticleId=61561&strSite=MDSite&Screen=CURRENTISSUE&CatID=3> , Ansoft Corp. Pittsburgh, Pa. , USA, (2006).

## EKLER

Makale içinde kullanılan simgeler ve anlamları

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$i_a$	1. faz akımı (ani değer) ( $A$ )
$i_b$	2. faz akımı (ani değer) ( $A$ )
$i_c$	3. faz akımı (ani değer) ( $A$ )
$J_r$	Atalet momenti ( $Nm$ )
$L$	Endüktans ( $H$ )
$N_r$	Rotor hızı ( $rpm$ )
$n_r$	Rotor kutup sayısı
$n_s$	Stator kutup sayısı
$T$	Tork ( $Nm$ )
$T_a$	1. fazın ürettiği tork ( $Nm$ )
$T_b$	2. fazın ürettiği tork ( $Nm$ )
$T_c$	3. fazın ürettiği tork ( $Nm$ )
$T_L$	Yük torku (momenti) ( $Nm$ )*
$W$	Enerji ( $J$ )
$W'$	Ko-enerji ( $J$ )
$\square$	Çarpıklık açısı (radyan, derece)
$\beta_r$	Rotor kutup yayı (radyan, derece)
$\beta_s$	Stator kutup yayı (radyan, derece)
$\square$	Manyetik akı ( $Wb$ )
$\lambda$	Sargı bağ (halka) akısı ( $Wb$ )
$\theta$	Rotorun açısal pozisyonu (radyan, derece)