

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ANAHTARLI RELÜKTANS MAKİNASININ SİMÜLASYONU VE  
DİNAMİK DAVRANIŞI**

**YÜKSEK LİSANS**

**Elektrik Müh. Murat ÜNLÜ**

**Anabilim Dalı: ELEKTRİK MÜH.**

**Danışman: Prof.Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU**

**KOCAELİ, 2006**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ANAHTARLI RELÜKTANS MAKİNASININ SİMÜLASYONU  
VE DİNAMİK DAVRANIŞI**

**YÜKSEK LİSANS**

**Elektrik Müh. Murat ÜNLÜ**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 26 Mayıs 2006**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 27 Haziran 2006**

**Danışman**

**Prof. Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU**

(.....  
)

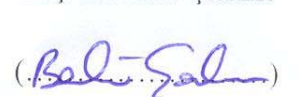
**Üye**

**Prof. Dr. Faik MERGEN**

(.....  
)

**Üye**

**Doç. Dr. Bekir ÇAKIR**

(.....  
)

**KOCAELİ, 2006**

## **ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR**

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, her geçen gün artan ihtiyaçlar doğrultusunda varolan makinaları iyileştirmek ve daha iyi nitelikli makinalar geliştirmek üzere bu alanda yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Ayrıca yarıiletken teknolojisinin ve mikrodenetleyicilerin gelişmesi bu makinaların daha kolay ve üstün denetim özelliği kazanmasını sağlamıştır. Endüstride ve günlük hayatta kullanılan elektrik makinalarına alternatif olarak görülen Anahtarlamalı Relüktans Makinaları, gün geçtikçe arttırılan performansı ile uygulama alanları genişlemektedir. Özellikle elektrikli otomobiller gibi uygulamalar için diğer elektrik makinalarına göre daha üstün performans göstermektedir.

Küçük güçteki bir anahtarlı relüktans motorunun incelendiği bu çalışmanın, ileride uygulamaya yönelik yapılacak çalışmalar için yol gösterici olması en büyük dileğimdir.

Tez çalışmam sırasında, çalışmalarına yön veren ve beni destekleyen tez danışmanım sayın Prof.Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU'ya, önerileri ile beni yönlendiren ve çalışmamda en az benim kadar pay sahibi olan sevgili dostlarım ve meslektaşlarım Arş.Gör. Mevlüt KARAÇOR ve Arş.Gör. Nasır ÇORUH'a, yardım ve desteklerinden dolayı sayın hocam Yrd.Doç.Dr. Tarık ERFİDAN ve Öğr.Gör. Satılmış ÜRGÜN'e, desteklerinden dolayı mesai arkadaşım Arş.Gör.Abdülvehhab KAZDALOĞLU, sevgili ailem ve tüm arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLOLAR DİZİNİ .....	vi
SİMGELER ve KISATLMALAR .....	vii
ÖZET .....	ix
İNGİLİZCE ÖZET .....	x
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2. ANAHTARLI RELÜKTANS MAKİNASI .....	6
2.1. Giriş.....	6
2.2. Anahtarlı Relüktans Makinasının Çalışması.....	7
2.3. Endüktans Değişimi .....	8
2.4. Akı – Akım Karakteristiği.....	11
2.5. Gerilim Eşitliği ve Momentin Üretilmesi .....	13
2.6. Anahtarlı Relüktans Makinasının Moment – Hız Karakteristiği .....	18
2.7. ARM'nın Tasarımı.....	21
2.7.1. ARM'nın tasarım aşamaları.....	22
2.7.1.1. Makina değerleri .....	22
2.7.1.2. ARM'nın boyutlarının seçimi.....	22
2.7.1.3. ARM kutup sayılarının seçimi .....	23
2.7.1.4. ARM stator ve rotor kutup açılarının seçimi.....	23
2.7.1.5. Hava aralığı kalınlığı (g).....	28
2.7.1.6. Motor derinliği, rotor dışçapı ( $D_r$ ) ve stator dışçapının ( $D_s$ ) belirlenmesi .....	29
BÖLÜM 3. ANAHTARLI RELÜKTANS MAKİNASININ ANALİZİ.....	30
3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY).....	30
3.2. Anahtarlı Relüktans Makinasının Analizi .....	31
3.2.1. Kullanılan ARM' nin özellikleri .....	32
3.2.2. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile modelin oluşturulması .....	34
3.2.2.1. Geometrinin modellenmesi .....	34
3.2.2.2. Kullanılan malzemenin tanımı .....	35
3.2.2.3. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması.....	36
3.2.2.4. Çözüm .....	38
3.2.2.5. Sonuçların değerlendirilmesi .....	39
3.2.3. ARM' un SEY ile çalışma karakteristiklerinin elde edilişi.....	39
3.2.3.1. Akı eğrilerinin elde edilişi.....	39
3.2.3.2. Statik moment eğrilerinin elde edilmesi .....	44
BÖLÜM 4. ARM'NUN DİNAMİK MODELİ .....	45
4.1. Giriş.....	45
4.2. Doğrusal Model.....	45

4.3. Doğrusal Olmayan Model .....	47
4.3.1. ARM'nin dinamik karakteristiği .....	47
4.3.2. Akım ve moment ön-değer tablolarının (look-up table) hazırlanması.....	48
4.3.3. Dinamik modelin elde edilmesi .....	50
4.3.4. ARM'nun sürücü sistemi .....	51
4.3.4.1. Histerezis akım denetleyici .....	52
4.4. Üç Fazlı ARM'nun Matlab\Simulink Modeli .....	53
BÖLÜM 5. ÜÇ FAZLI ARM SİMÜLASYON SONUÇLARI .....	58
BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	66
KAYNAKLAR .....	73
ÖZGEÇMİŞ.....	76

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. ARM'nun çalışma şekilleri (a) c fazı ile çakışık durum (b) a fazı ile çakışık durum .....	7
Şekil 2.2. ARM'nın rotor pozisyonu ve ideal endüktans ve moment değişimi .....	9
Şekil 2.3. ARM'nun akı-akım karakteristiği .....	12
Şekil 2.4. Çıkışa dönüşen manyetik alan enerjisinin gösterimi .....	15
Şekil 2.5. Manyetik ko-enerjinin gösterimi .....	16
Şekil 2.6. ARM'nun çeşitli çalışma bölgeleri .....	18
Şekil 2.7. Stator ve rotor kutup geçişlerinin gösterimleri(a),(b),(c) ve (d) .....	25
Şekil 2.7. Stator ve rotor kutup geçişlerinin gösterimleri(a),(b),(c) ve (d)(devamı) .....	26
Şekil 2.8. İdeal endüktans değişimi .....	27
Şekil 2.9. Kutup açısı seçiminde kullanılan 6/4 kutuplu ARM için uygun üçgen .....	28
Şekil 2.10. ARM'nun kesit görünüşü ve boyutları .....	29
Şekil 3.1. ARM'nun kesit görünüşü ve boyutları .....	32
Şekil 3.2. Motorda kullanılan malzeme için B-H eğrisi .....	34
Şekil 3.3. ARM'nun SEY ile modellenmiş hali .....	37
Şekil 3.4. Stator, rotor ve sargıda kullanılan elemanlar .....	37
Şekil 3.5. Hava aralığı ve kullanılan elemanlar .....	38
Şekil 3.6. ARM'nun halkalanma akısı- akım eğrisi .....	40
Şekil 3.7. $\theta=30^\circ$ için (a) Akı çizgileri dağılımı (Wb/m) (b) Akı yoğunluğu (B[T]) dağılımı .....	41
Şekil 3.8. $\theta=10^\circ$ için (a) Akı çizgileri dağılımı (Wb/m) (b) Akı yoğunluğu (B[T]) dağılımı .....	42
Şekil 3.9. $\theta=0^\circ$ için (a) Akı çizgileri dağılımı (wb/m) (b) Akı yoğunluğu (B[T]) dağılımı .....	43
Şekil 3.10. ARM'nun statik moment eğrileri .....	44
Şekil 4.1. Doğrusal model için endüktans değişimi .....	46
Şekil 4.2. Doğrusal olmayan model için endüktans değişimi .....	46
Şekil 4.3. Akım-akı-rotor konumu arasındaki ilişki .....	49
Şekil 4.4. Moment-rotor açısı-akım arasındaki ilişki .....	50
Şekil 4.5. ARM bir fazın dinamik modeli .....	51
Şekil 4.6. Üç fazlı ARM'nun dinamik modelinin blok diyagramı .....	51
Şekil 4.7. Histerezis akım denetleyici çalışması .....	52
Şekil 4.8. Üç fazlı ARM'un dinamik modeli ve sürücü sisteminin blok diyagramı .....	53
Şekil 4.9. ARM'nun dinamik modeli .....	54
Şekil 4.10. Gerilim ve açı bilgisinden akımın elde edilmesini gösteren dinamik modelin alt sistemi .....	54

Şekil 4.11. Akım ve açı bilgisinden moment bilgisinin elde edilmesini gösteren dinamik modelin alt sistemi .....	54
Şekil 4.12. Toplam momentin elde edilmesi .....	55
Şekil 4.13. Yük momenti ( $M_y$ ) ve toplam moment ( $M_{toplam}$ ) bilgisinden hız ve açı bilgisini elde eden mekanik blok.....	55
Şekil 4.14. Mekanik bloğun alt sistemi.....	55
Şekil 4.15. Sürücü ve hız kontrolcüsü blok diyagramı .....	56
Şekil 4.16. PID kontrolöründen akım referanslarının elde edilmesi.....	56
Şekil 4.17. Sürücü bloğunun alt sistemi.....	57
Şekil 5.1. Yüksek hızda, faz geriliminin (*10) ve akımının zamana bağlı değişimleri ....	59
Şekil 5.2. Yüksek hızda, faz geriliminin ( $V_a$ ) zamana bağlı değişimi.....	59
Şekil 5.3. Yüksek hızda, faz akımının ( $i_a$ ) zamana bağlı değişimi.....	60
Şekil 5.4. Yüksek hızda, üç faz akımının ( $i_a, i_b, i_c$ ) zamana bağlı değişimi .....	60
Şekil 5.5. Yüksek hızda, bir fazdaki momentin ( $Nm$ ) zamana bağlı değişimi .....	61
Şekil 5.6. Yüksek hızda, devir sayısının ( $n$ ) zamana bağlı değişimi.....	61
Şekil 5.7. Yüksek hızda, toplam momentin ( $Nm$ ) zamana bağlı değişimi.....	62
Şekil 5.8. Düşük hızda, faz geriliminin (*10) ve akımın zamana bağlı değişimleri .....	62
Şekil 5.9. Düşük hızda, faz geriliminin ( $V_a$ ) zamana bağlı değişimi .....	63
Şekil 5.10. Düşük hızda, faz akımının ( $i_a$ ) zamana bağlı değişimi .....	63
Şekil 5.11. Düşük hızda, üç faz akımının ( $i_a, i_b, i_c$ ) zamana bağlı değişimi .....	64
Şekil 5.12. Düşük hızda, bir fazdaki momentin ( $Nm$ ) zamana bağlı değişimi .....	64
Şekil 5.13. Düşük hızda, devir sayısının ( $n$ ) zamana bağlı değişimi .....	65
Şekil 5.14. Düşük hızda, toplam momentin ( $Nm$ ) zamana bağlı değişimi .....	65
Şekil 6.1. ARM'nun sabit hızda, $V_{DA}=22,53V$ için, boştaki faz geriliminin(üst) ( $10V/kare$ ) ve akımının(alt) ( $0.8A/kare$ ) zamana bağlı değişimleri.....	68
Şekil 6.2. ARM'nun sabit hızda, $V_{DA}=22,53V$ için, boştaki faz geriliminin(üst) (*5) ve akımının(alt) zamana bağlı değişimleri.....	68
Şekil 6.3. ARM'nun sabit hızda, $V_{DA} = 22,53V$ için, boştaki faz akımlarının zamana bağlı değişimleri.....	69
Şekil 6.4. ARM'nun sabit hızda, $V_{DA}=22,53V$ için, boştaki faz momentlerinin toplamının zamana bağlı değişimi.....	69
Şekil 6.5. ARM'nun sabit hızda, $V_{DA} = 60,75V$ için, $0.30Nm$ 'lik yük altında faz geriliminin(üst) ( $50V/kare$ ) ve akımının(alt) ( $2A/kare$ ) zamana bağlı değişimleri... ..	70
Şekil 6.6. ARM'nun sabit hızda, $V_{DA}=60,75V$ için, $0.30Nm$ 'lik yük altında faz geriliminin(üst) (*6) ve akımının(alt) zamana bağlı değişimleri.....	70
Şekil 6.7. ARM'nun sabit hızda, $V_{DA} = 60,75V$ için, $0.30Nm$ 'lik yük altında faz akımlarının zamana bağlı değişimleri.....	71
Şekil 6.8. ARM'nun sabit hızda, $V_{DA} = 60,75V$ için, $0.30Nm$ 'lik yük altında faz momentlerinin toplamının zamana bağlı değişimi.....	71

## **TABLULAR DİZİNİ**

Tablo 2.1. ARM'nun çeşitli çalışma bölgelerindeki dinamik davranışı .....	21
Tablo 3.1. ARM'nun boyutları ve değerleri .....	33



## SİMGELER VE KISALTMALAR

ARM :	Anahtarlı Relüktans Motoru
SEY :	Sonlu Elemanlar Yöntemi
AA :	Alternatif akım
V:	Faz gerilimi
i:	Faz akımı
$i_p$ :	İzin verilen maksimum akım
$\omega$ :	Açısal hız
n:	Devir sayısı
$P_{hp}$ :	Çıkış gücü
$\psi$ :	Toplam akı
$\phi$ :	Manyetik akı
B :	Manyetik akı yoğunluğu
s :	İletken yüzeyi
$N_s$ :	Stator kutup sayısı
$N_r$ :	Rotor kutup sayısı
$\theta$ :	Rotor adım açısı
q :	Faz sayısı
$r_1, r_2, r_1', r_2'$ :	Rotor kutupları
a, a', b, b', c, c' :	Stator kutupları
$\beta_s$ :	Stator kutup açısı
$\beta_r$ :	Rotor kutup açısı
$\alpha_r$ :	Rotor kutup adımı
$W_m$ :	Mekanik enerji
$W_f$ :	Manyetik alan enerjisi
$W_c$ :	Ko-enerji

N:	Sarım sayısı
$D_o$ :	Stator dış çapı
$D_r$ :	Rotor dış çapı
$\varepsilon$ :	Ateşleme açısı
g:	Hava aralığı
$L_d$ :	Motor derinliği

# ANAHTARLI RELÜKTANS MAKİNASININ SİMÜLASYONU VE DİNAMİK DAVRANIŞI

**Murat ÜNLÜ**

**Anahtar Kelimeler :** Anahtarlı Relüktans Makinası, Dinamik Model, Sonlu Elemanlar Yöntemi

**Özet :** Anahtarlı relüktans makinaları, son yıllarda yapılan araştırmalar ile özellikle yüksek hız gerektiren endüstriyel uygulamalarda klasik elektrik makinaları ile rekabet edebilecek düzeye gelmiştir. Ancak makinanın doğrusal olmayan bir manyetik yapı sergilemesi analiz açısından birçok zorluğu beraberinde getirmektedir.

Bu çalışmada, öncelikle anahtarlı relüktans makinaları (ARM) ve bu makinaların tasarımı hakkında genel bilgiler verilmiştir. Anahtarlı relüktans motorunun sonlu elemanlar yöntemi ile manyetik analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen manyetik analiz sonuçları anahtarlı relüktans motorunun karakteristik eğrilerini elde etmede ve dinamik modeli oluşturmak için kullanılmıştır. Simülasyon, anahtarlı relüktans motorunun klasik sürücü devresini de içermektedir. Anahtarlı relüktans motorunun simülasyonu sonucunda motorun akım, gerilim, moment dalga şekilleri farklı hızlar için incelenmiştir. Son olarak, aynı makinanın farklı yüklerdeki deneysel sonuçları ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır.

# **SIMULATION AND DYNAMIC CHARACTERISTICS of SWITCHED RELUCTANCE MACHINE**

**Murat ÜNLÜ**

**Keywords:** Switched Reluctance Machine(SRM), Dynamic Modeling, Finite Element Method

**Abstract:** Especially in the industrial applications which need high speed operation, Switched reluctance machine(SRM) has become one of the competitor of the classical electrical machines. However its complex and non-linear magnetic structure cause difficulties in the analysis of the machine.

First of all, the general knowledge of the Switched Reluctance Machine and its design has been given in this thesis work. Magnetic analysis of the machine has been achieved by using the finite element method. The results of this analysis has been used to obtain the magnetic characteristics and to constitute the dynamic model of the machine. Classical driver circuit of the switched reluctance machine has been included in the simulation. As a result of the simulation, current, voltage and torque wave shapes has been investigated for different speed values of the machine. For the same machine, the experimental results for different load values and the simulation results have been compared in the end of this thesis work.

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

Elektrik makinaları, moment üretme biçimi temel alındığında elektromanyetik ve değişken relüktans olmak üzere ana iki kategoride sınıflandırılabilir. Bilindiği üzere, klasik elektrik makinalarında hareket, stator ve rotor sargularından akım geçmesi ile oluşan iki manyetik alanın birbiri ile etkileşmesi ile üretilir. Klasik makinalar olarak adlandırabileceğimiz asenkron, doğru akım, senkron ve sargı yerine kalıcı mıknatıs kullanılan makinalar bu prensibe göre çalışmaktadır. İkinci kategoride ise hareket, rotoru ve statoru arasındaki hava aralığında oluşan değişken relüktans ile üretilir. Stator sargısı enerjilendirildiğinde tek bir manyetik alan üretilir. Relüktans momenti ise, üretilen bu manyetik alana bağlı olarak rotorun kendi minimum relüktans konumuna hareket etme eğilimi ile ortaya çıkar. Bu çalışma prensibine göre çalışan elektrik makinası Anahtarlı Relüktans Makinası (ARM)'dir.

Anahtarlı Relüktans Makinası kavramı oldukça eskiye dayanmaktadır. İlk olarak 1838'de İskoçya'da bir lokomotif tahriğinde kullanılmıştır [3]. Daha sonra 1920'de C.L Walker tarafından bu makinanın bazı özelliklerini taşıyan bir adım motorunun patenti alınmıştır [4]. İlk zamanlar yapısından dolayı Değişken Relüktanslı Motor "Variable Reluctance Motor" diye isimlendirilen bu motor daha sonra çalışma ilkesine uygunluk açısından Anahtarlı Relüktans Motor (ARM) olarak isimlendirilmiştir.

1969'dan bu yana çeşitli hız uygulamalarında kullanılması amacıyla bu makina bilinen adıyla anahtarlı relüktans makinası olarak W.F.Ray tarafından tekrar gündeme gelmiştir [1]. Bu makinada en göze çarpan özellik, maliyetinin düşük olmasıdır. Bu özelliğine rağmen, temeli 1838'de atılan bu makinanın tekrar gündeme gelmesi, yüksek güçte hızlı yarı iletken elemanlarının gelişimiyle birlikte olmuştur.

Yapısal olarak, ARM tüm elektrik makinalarının en basit yapıda olanıdır. Sadece statorunda sargı bulunmaktadır, rotorunda sargı veya sürekli mıknatıs bulunmadığından dolayı yapısı basittir. Son on yıldır üzerinde çok fazla sayıda araştırma yapılmasının sebebi olan maliyetinin düşük olması da yapısının basitliğinden ileri gelmektedir [2]. Bu avantajların yanı sıra ARM'u bazı kısıtlamalar getirmektedir. Bunlardan en önemli olanı, ARM'nun diğer çoğu makinalarda olduğu gibi, direkt olarak DA veya AA kaynaklarından beslenememesi, elektronik olarak anahtarlanmak zorunda olmasıdır. Ayrıca moment üretimi için gerekli olan, stator ve rotorun çıkıntılı yapıda olması, ARM'nun lineer olmayan bir karakteristik göstermesine, bununla birlikte makinanın analiz ve kontrolünü karmaşık hale gelmesine sebep olmaktadır.

Yapılan literatür çalışmaları sonucunda, ARM'nun tasarımı için gerekli olan işlemler [3], [10], [11], [12] ve [1]'de detaylı olarak araştırıldığı görülmüştür. [1]'de makinanın ilk numunesinin üretiminde hiçbir tecrübeye sahip olmayan makina üreticilerine için gerekli olan tasarım işlemleri anlatılmaktadır. Burada endüksiyon ve DA makinaları için kullanılmakta olan çıkış denklemine benzer bir çıkış denklemi geliştirilmiştir.

ARM'dan optimum çıkış elde etmek için stator kutup açısı ( $\beta_s$ ) ve rotor kutup açısının ( $\beta_r$ ) büyüklüklerine belirlenmesi ve bu kutup açısı değerlerinin kısıtlamaları, [3] ve [13]'de tanımlanmaktadır.

Elektrik makinalarının manyetik analizinde en fazla kullanılan sayısal yöntemlerden biri olan Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), fiziksel matematiğin sınır değer problemlerine yaklaşık çözümler üretmek için kullanılan bir sayısal yöntemdir. Yöntem yaklaşık kırk yıllık bir geçmişe sahiptir. İlk olarak 1940'lı yıllarda önerilmiş, 1950'li yıllarda uçak tasarımında kullanılmaya başlanmıştır. Bundan sonra, yöntem geliştirilmiş ve yapı analizi ile ilgili problemlere çok yaygın olarak uygulanmıştır. Günümüzde Sonlu Elemanlar Yöntemi, mühendislik ve matematik problemlerinin çözümünde geniş uygulama alanına sahip genel bir yöntem olarak tanınmaktadır. Yöntemin elektromanyetik alan problemlerine uygulanması ilk olarak 1968 yılında gerçekleştirilmiştir.

Sonlu Elemanlar Yönteminin (SEY) elektrik makinaları analizinde kullanılması ile ilk olarak transformatör, generatörler ve motorlar ile ilgili manyetik alana ilişkin büyüklükler hesap edilmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel çalışmalar ile gerçekleşmiştir. Bilgisayar alanında meydana gelen gelişmeler ile sayısal hesap tekniklerinde işlem fazlalığından kaynaklanan hesap hızı yavaşlığı giderilmiş ve SEY daha fazla uygulama sahası bulmuştur.[9]

SEY'nin Anahtarlı Relüktans Motorlarında uygulanması ile ilgili olarak, 2-boyutlu moment eğrisi çıkarılmış, ayrı bir çalışmada rotorun farklı konumları için akı halkalanması eğrisi elde edilmiştir [20], [14]. Yapılan çalışmalar sonucu, SEY'nin özellikle motorun manyetik devresine ve geometrisine yönelik çalışmalarda çok iyi sonuçlar verdiği görülmüştür [21].

ARM'nun klasik elektrik makinalarına göre başlıca avantajları ;

- Rotorunda sargı yerine sadece saç lameller bulunduğundan üretimi kolay ve ucuzdur.
- Rotorunda sargı bulunmadığından bakır kayıpları düşüktür.
- Verimi uygulamalara göre değişir. Rotorda sargı bulunmadığından dolayı verim aynı güçteki diğer makinalara göre yüksektir.
- Stator fazları birbirinden bağımsız olarak denetlenebilir. Fazlardan herhangi birinde sorun olduğunda makina diğer fazların yardımıyla daha düşük performansla çalışmasını sürdürebilir.
- Sargılardan geçen akımın yönü dolayısıyla kutup polarizasyonu önemli olmadığından sürücü devresi kolay ve daha sağlamdır. Aynı zamanda bu her bir fazın tek bir yarıiletken eleman ile denetlenebilmesine olanak sağlar.
- Çok yüksek hızlarda çalışabilir. Bu elektrikli otomobil gibi uygulamalarda kullanılabilirliğini arttıran bir avantajdır.
- Moment/Eylemsizlik oranı yüksek olduğundan başlangıç momenti yüksektir.

Avantajlarına rağmen ARM kullanımını günümüzde de çok yaygın değildir. Bunun sebebini öğrenmek için makinanın dezavantajlarını bilmemiz gerekir. Makinanın dezavantajları;

- Makinanın çalışabilmesi için hangi fazın iletme gireceğinin bilinmesi gerektiğinden rotor konum algılayıcı yada sensörsüz kontrol için mikrodenetleyici gibi ek donanımlar kullanılmalıdır. Bu hem maliyetin hem de karmaşıklılığın artmasına neden olur.
- Makinada üretilen moment sadece faz sargısından geçen akıma değil aynı zamanda rotor konumuna bağlı olduğundan denetimi karmaşıktır.
- Anahtarlama mantığı ile çalıştığından moment üretimi darbelidir. Bu da çalışma gürültüsünün yüksek olmasına ve moment dalgalanmasına neden olur.

Makinanın dezavantajlarını gidermek ve performansını geliştirebilmek için yapılan araştırmalar devam etmektedir. Rotor konum bilgisini elde edebilmek için literatürde birçok algılayıcısız denetim mantığı tanıtılmaktadır. Moment dalgalanması ve çalışma gürültüsünü azaltmak için yapay sinir ağları, genetik algoritma gibi modern denetim teknikleri kullanılmaktadır. Ancak bu tip teknikler sayısal işaret işleyici gibi ek cihazlar gerektirdiğinden maliyet artmaktadır.

ARM'nun Kullanım alanları ;

- Otomotiv endüstrisinde
- Havacılık endüstrisinde
- Demiryolu ve hafif raylı sistem araçlarının tahriğinde
- Ev aletlerinde (Süpürgeler,beyaz eşyalar...vb.)
- Genel amaçlı endüstriyel sürücüler
- Servo sistemlerde
- Robot uygulamaları
- Özellikle dış rotorlu yapısı ile kompresörler, fanlar, pompalar, santrifüj tahriği



Özelikle, otomotiv uygulamalarındaki araştırmalar her geçen gün artış göstermektedir. Dezavantajlarına rağmen yapısının basit, bakımının kolay olması ve yüksek hızda çalışabilmesi bu alanda kullanımını etkin hale getirmektedir.

Yapılan çalışmanın 1.bölümünde, Anahtarlı Relüktans Makinasının genel özellikleri, avantaj ve dezavantajlarına yer verilmektedir.

2. bölümde, ARM'nun yapısal özellikleri, tasarım kriterleri, çalışma prensibi ve manyetik karakteristikleri anlatılmaktadır.

3. bölümde, ARM için Maxwell 2D sonlu elemanlar analiz programı kullanarak sonlu elemanlar yöntemi (SEY) analiz sonuçları verilmektedir. Burada elde edilen sonuçlar daha sonra 4.bölümde verilen 3 fazlı ARM için gerçekleştirilmiş dinamik modelde kullanılmaktadır.

4. bölümde, 3.bölümde elde edilen SEY sonuçlarının Matlab analiz programına aktararak oluşturulmuş olan 6/4 kutuplu, üç fazlı ARM'nun dinamik modelinin oluşturulması anlatılmaktadır.

5. bölümde, 4. bölümde gerçekleştirilmiş olan 3 fazlı ARM sisteminin simulasyon sonuçları verilmektedir. Tezin 6. bölümünde, simulasyonu yapılmış olan aynı makinanın deneysel sonuçları ile karşılaştırma yapılmakta ve sonuçları irdelenmektedir.

## BÖLÜM 2. ANAHTARLI RELÜKTANS MAKİNASI

### 2.1. Giriş

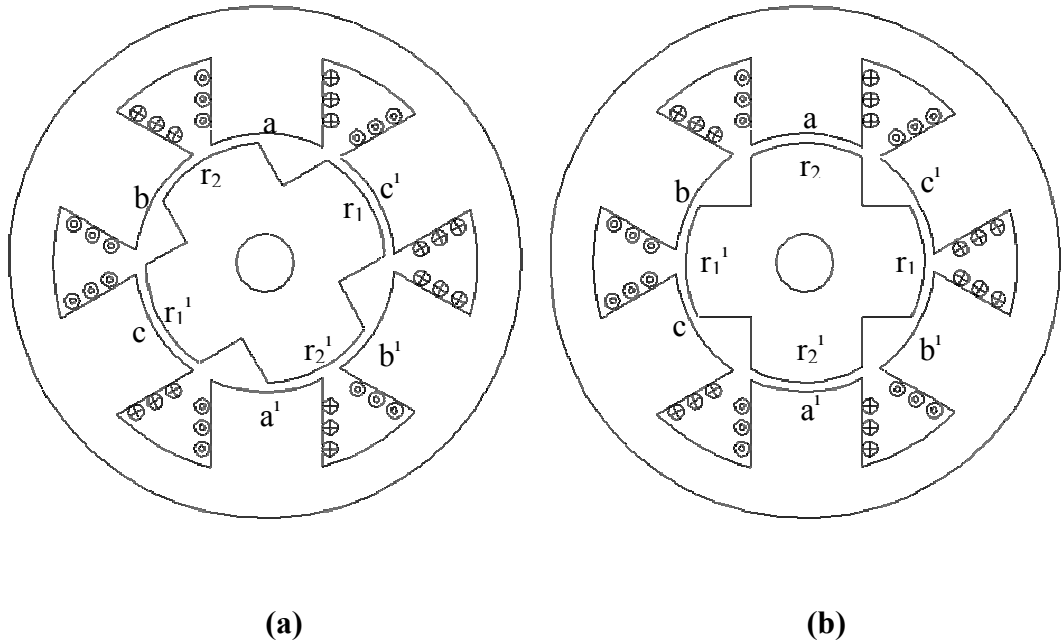
Klasik elektrik makinaları gibi Anahtarlı Relüktans Motoru (ARM) da stator ve rotordan oluşur. Temel farklılık olarak stator ve rotorunda çıkıntılara sahip olmasıdır. Stator ve rotordaki bu çıkıntılı yapı daha sonra inceleyeceğimiz kutupları oluşturmak için kullanılır. Rotor çekirdeği, zımbalanmış manyetik kalitesi yüksek çelik levhalar yerleştirilerek oluşturulur. Stator ise bir çekirdek üzerine zımbalanmış levhalardan ve her bir çıkıntısına yerleştirilmiş sargılardan imal edilir. Rotorunda da çıkıntı olmasına rağmen sargılar sadece stator kutuplarına yerleştirilmiştir. Aslında bu eksiklik ARM'nun çalışma mantığının temelidir ve diğer makinalardan farklı olmasına neden olan unsurlardan biridir. Rotorunda sargı bulunmaması makina konstrüksiyonunda daha az bakırın kullanıldığını ve dolayısıyla bakır kayıplarının diğer makinalara göre daha az olduğu gösterir.

Kutup sayısı her rotor konumunda moment üretebilme yeteneği ve dört bölgeli çalışma gibi bazı kıstaslara göre belirlenir. Bu nedenle, AR motorlarında stator ve rotor kutup sayıları birbirine eşit değildir. ARM'nun stator kutup sayısı  $N_s$ , rotor kutup sayısı  $N_r$  ile gösterilebilir. Kutup sayılarının seçimi uygulamaya göre değişebilmektedir. Örneğin, yüksek hız istenen ARM uygulamalarında stator kutup sayısının ( $N_s$ ) rotor kutup sayısına ( $N_r$ ) oranı ( $N_s/N_r$ ) büyük seçilmektedir. Yüksek moment istenen ARM uygulamalarında ise stator kutup sayısının rotor kutup sayısına oranı daha küçük seçilmektedir. Ayrıca bu oranın moment dalgalılığına etkisi de büyük olmaktadır. Genellikle stator kutup sayısı rotor kutup sayısından büyük olmaktadır ve birbirine yakın olmaktadır. Bunun nedeni, herhangi bir faz uyarıldığında oluşan manyetik alandan daha fazla yararlanmak ve sargılara daha geniş yer sağlamaktır. ARM'unda en çok kullanılan stator/rotor kutup sayısı oranları ( $N_s/N_r$ ) 6/2, 6/4, 8/6 şeklindedir.

ARM'nun faz sayısına ilişkin yaklaşımda bilinen makinaların faz sayılarından farklılıklar göstermesidir. Her stator kutbu bir uyarma sargısı taşır ve karşısındaki stator kutbu ile seri bağlıdır. Bu şekilde karşılıklı iki stator kutbu ile birlikte makinanın bir fazını oluşturur. Buna göre stator kutup sayısı arttıkça faz sayısı da artmaktadır.

## 2.2. Anahtarlı Relüktans Makinasının Çalışması

Anahtarlı relüktans makinalarında, uygun olan faz doğru gerilim ile uyarıldığı anda, hareketli olan rotor, manyetik devrenin relüktansını azaltacak yönde hareket etmek isteyecek ve dönmeye başlayacaktır. Uygun bir anahtarlama devresi ile fazlar sıra ile uyarılmaya devam edildiğinde hareket süreklilik kazanmaktadır. Şekil 2.1.'de gösterilen 6/4 kutuplu bir ARM üzerinde, makinanın basit çalışma biçimi aşağıdaki gibi incelenebilir.



Şekil 2.1: ARM'nun çalışma şekilleri (a) c fazı ile çakışık durum (b) a fazı ile çakışık durum

Anahtarlı relüktans motorunda stator ve rotor kutup sayısı farklı olduğundan dolayı her zaman hareket verebilecek uygun bir rotor kutbu vardır. Rotorun dönüş yönünün aksine, bir sonraki fazın uyarılması ile bulunduğu konumu değiştirmesi esnasında kat

ettiği açısal yer değiştirmesine adım açısı yada konum açısı adı verilmektedir. Konum açısı (adım açısı)  $\theta$ ;

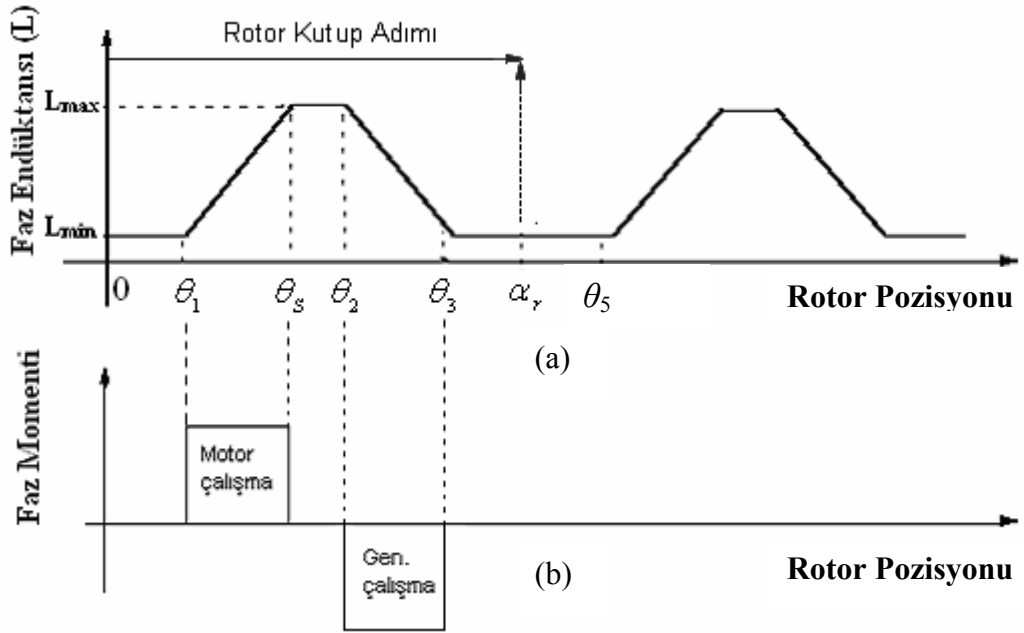
$$\theta = \frac{360}{N_r q} \quad (2.1)$$

Burada ;  $N_r$  rotor kutup sayısını,  $q$  faz sayısını,  $\theta$  ise adım açısını tanımlamaktadır.

Şekil 2.1.(a)'daki  $r_1$  ve  $r_1'$  rotor kutupları ve bir önceki adımda uyarılmış olan  $c$  ve  $c'$  stator kutupları çakışık durumdadır. Bu durumda, şekilde gösterilen  $a$  fazına bir gerilim uygulandığında, motorda oluşacak olan akı ( $\psi$ ),  $a$  ve  $a'$  stator kutupları ile  $r_2$  ve  $r_2'$  rotor kutupları üzerinden geçmektedir. Bu durumda,  $a$  ve  $a'$  stator kutupları kendilerine en yakın olan rotor kutubunu kendine doğru çekmek ister ve rotor şekil 2.1.(b)'de gösterilen konuma geçer. Bunun devamında,  $a$  fazı artık çakışık duruma geldiği için bu fazdaki akım kesilmekte ve sıradaki faz olan  $b$  fazı uyarılmaktadır. Bu fazın uyarılmasıyla bu sefer  $r_1$  ve  $r_1'$  rotor kutupları  $b$  ve  $b'$  kutuplarına doğru çekilir ve saat yönünde dönme hareketi sağlanmış olur. Aynı şekilde  $c$  faz sargısı tekrar uyarıldığında  $r_2$  ve  $r_2'$  rotor kutupları aynı hizaya geleceklerdir. Buradan anlaşılacağı üzere rotora  $90^\circ$  lik bir dönme hareketi sağlamak için sırasıyla üç fazın uyarılması gerekmektedir. Rotor dönme hareketinin tersine olması istenilirse şekil 2.1. (a)'daki rotor pozisyonuna göre  $b$ - $a$ - $c$  faz sırasıyla uyarılması gerekmektedir.

### 2.3. Endüktans Değişimi

Anahtarlı relüktans makinasının denetim olanakları ve kısıtlamaları için en önemli parametre olan moment karakteristiğinin, akı ve akımın bir fonksiyonu olan rotor konumunun arasındaki ilişkinin incelenmesi gerekmektedir. Şekil 2.2.'de sabit bir akım için faz endüktansının rotor konumuna göre ideal değişimi verilmektedir. Endüktans profilindeki değişimi stator ve rotor kutup sayıları ile kutup açıları belirlemektedir. Çoğunlukla ARM'nin tasarımında rotor kutup açısının, stator kutup açısından daha büyük olduğu için şekil 2.2.'deki gösterimde de böyle olduğu varsayılmaktadır. Şekil 2.2.'de gösterilen çeşitli açı değerlerinin eşitlikleri aşağıda verilmektedir.



Şekil 2.2: ARM'nın rotor pozisyonu ile ideal endüktans ve moment değişimi  
(a) Endüktans değişimi (b) Moment değişimi

$$\theta_1 = \frac{1}{2} \left[ \frac{2\pi}{Nr} - (\beta_s + \beta_r) \right] \quad (2.2)$$

$$\theta_2 = \theta_1 + \beta_s \quad (2.3)$$

$$\theta_3 = \theta_2 + (\beta_r - \beta_s)$$

(2.4)

$$\alpha_r = \theta_3 + \beta_s$$

(2.5)

$$\theta_5 = \alpha_r + \theta_1 = \frac{2\pi}{Nr}$$

(2.6)

Burada,  $\beta_s$  ve  $\beta_r$  sırasıyla stator ve rotor kutup açılarını,  $N_r$  Rotor kutup sayısını göstermektedir.

İdeal endüktans değişiminde dört farklı bölge vardır. Şekil 2.2.'ye göre bu dört bölge aşağıda açıklanmaktadır, Bu şekildeki  $L_{\min}$  ve  $L_{\max}$  sırasıyla minimum endüktans ve maksimum endüktansı göstermektedir.

- $\theta_1 - \theta_s$  bölgesi:

Bu bölgede rotor ve stator kutup kenarları karşılaşır ve endüktans dönme hareketi ile birlikte lineer olarak artmaya başlar ( $+dL/d\theta$ ) ve  $\theta_s$  konumunda kutuplar tamamen çakışmaya kadar sürer. Bu noktada endüktans ( $L_{\max}$ ) maksimum değerine ulaşır. Moment değeri pozitifdir. Makina motor olarak çalıştırılmak isteniyorsa faz bu bölgede uyarılmalıdır.

- $\theta_s - \theta_2$  bölgesi:

$\theta_s$  ve  $\theta_2$  konumları arasında endüktans, maksimum değerinde sabit kalır. Bu bölge rotor ve stator kutup ayaklarının en farkından oluşan 'Ölü bölge' olarak adlandırılır. Bu bölgede moment sıfırdır.

- $\theta_2 - \theta_3$  bölgesi:

$\theta_2$  konumundan  $\theta_3$ 'e kadar olan bu bölgede endüktans, minimum değerine kadar ( $-dL/d\theta$ ) değişimi ile lineer olarak azalır. Motor bu bölgede uyarılacak olursa generatör olarak çalışır.

- $0 - \theta_1$  ve  $\theta_3 - \alpha_r$  bölgesi:

$\theta_3$  konumundan  $\alpha_r$  konumuna kadar olan bu bölgede, stator ve rotor kutupları çakışmaz. Endüktans minimum değerinde ( $L_{\min}$ ) sabit kalır.

Şekil 2.2.'deki endüktans değişimini matematiksel olarak ifade edersek, i fazı için ;

$$L(\theta)_i = L_1(\theta) \cdot \left[ \theta - \frac{\alpha_r}{q} \cdot (i-1) \right] \quad (2.7)$$

Denklem (2.7), bir fazın ideal endüktans değişimini rotor konumunun bir stator kutup çiftine yani fazına göre fonksiyonu olarak göstermektedir. Her devir için endüktans değişim döngüsü rotor kutup çiftlerinin sayısı ile orantılıdır. Bu döngünün uzunluğu da rotor kutup adımına eşittir.

$$\text{Rotor kutup adımı } (\alpha_r) = \frac{2\pi}{N_r} \text{ rad.} \quad (2.8)$$

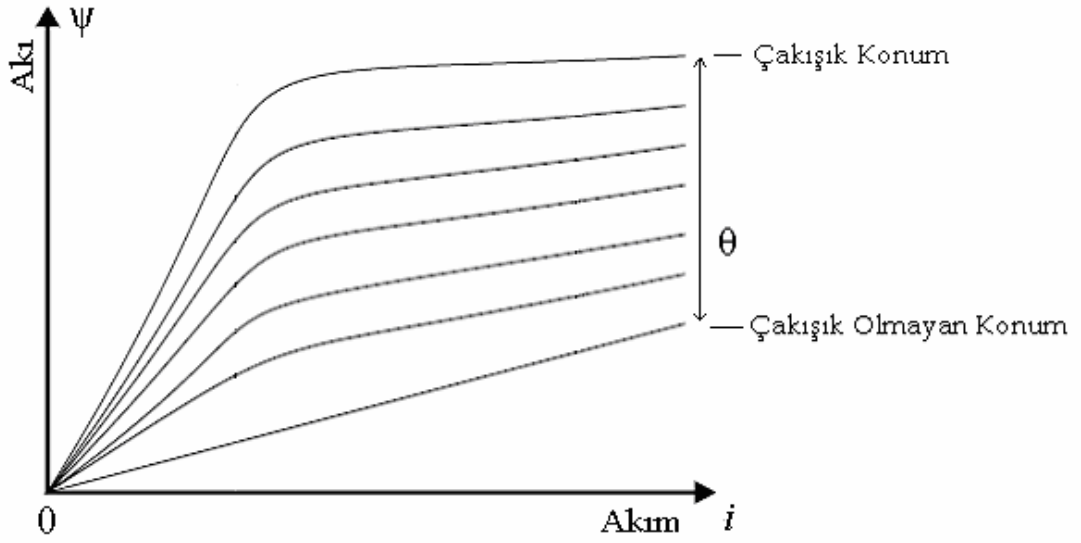
Rotor adım açısı ise mekanik olarak bir rotor kutup adımında her bir fazın ne kadar süre iletimde kalacağını belirlememizi sağlar.

$$\text{Rotor adım açısı } (\theta_s) = \frac{2\pi(N_s - N_r)}{N_s N_r} \text{ rad, [23]} \quad (2.9)$$

Buna göre 6/4 kutuplu bir ARM'nda endüktans değişimi 90° de bir tekrarlanır ve bir fazın iletimde kalma süresi 30° dir.

#### 2.4. Akı – Akım Karakteristiği

ARM'nun çift çıkıklı kutup yapısı makinanın doğrusal olmayan bir yapıya sahip olamamasının temel bir nedenidir. Bu yüzden diğer tip elektrik motorlarına göre daha karmaşık bir çalışma karakteristiği vardır. Üretilen elektriksel moment, yüksek dereceli polinomlar şeklindeki stator akımlarına göre yaklaşım yapılarak bulunur [8]. En basit bölge olan doğrusal akı bölgesinde de üretilen moment, stator akımının doğrusal bir fonksiyonu olarak ifade edilememektedir. Bu motorun denetiminin neden zor olduğunu açıklamaktadır. Şekil 2.3.'de verilen akı-akım karakteristiğinin incelenecek olunursa;



Şekil 2.3: ARM'nun akı-akım karakteristiği

ARM'nun akı bağıntısı ( $\psi$ ), stator akımı ( $i$ ) ve rotor konumunun ( $\theta$ ) bir fonksiyonudur. Herhangi bir sabit rotor konumu için, doyumun olmadığı doğrusal bölge için, akı tamamen stator akımını doğrusal fonksiyonu olarak ifade edilebilmektedir. Stator faz sargısından geçen akım arttıkça makina doyumuna ulaşacağı için akı artık stator akımının doğrusal bir fonksiyonu şeklinde ifade edilemez. Stator akımı arttıkça motorun sargılarında oluşan doyma artmaktadır.

Sabit stator akımı için motorun akı bağıntısı rotor konum açısı ile periyodik olarak değişmektedir. Bu periyot ( $T$ ) rotor kutup sayısına ( $N_r$ ) bağlıdır ve (2.10)'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$T = \frac{2\pi}{N_r} \quad (2.10)$$

Bu periyot içerisinde sabit doyma etkisinin seviyesi rotor konumuna göre değişmekte ve çakışık konuma yaklaşıldıkça doymaya daha keskin bir biçimde geçilir.



## 2.5. Gerilim Eşitliği ve Momentin Üretilmesi

ARM'nun yapısı matematiksel olarak ifade edilirse, neden doğrusal çalışmadığı anlaşılır. Bunun için moment ve faz akımı arasındaki bağıntının elde edilmesi yeterli olacaktır. Faraday yasasına göre ARM sargı uçlarındaki gerilim (2.11) ile ifade edilmektedir.

$$V = i.R_m + N.\frac{d\phi}{dt} \quad (2.11)$$

$$\psi = N.\phi \quad (2.12)$$

(2.12) gerilim denklemi olan (2.11)'de yerine yazıldığında, (2.13) denklemi elde edilir.

$$V = i.R_m + \frac{d\psi}{dt} \quad (2.13)$$

(2.13)'e göre sargı uçlarındaki gerilim, sargı endüktansı üzerindeki gerilim düşümü ve sargıda oluşan toplam akımın zamana bağlı olarak değişiminin toplamıdır. AR motorunun çift çıkık kutuplu yapısı ve manyetik doyma etkileri yüzünden faz sargısında oluşan akı, rotor konum açısı  $\theta$ , ve motor akımının  $i$ , fonksiyonu olarak değişir.

$$V = iR_m + \frac{\partial \psi}{\partial i} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (2.14)$$

(2.14)'ün sağ tarafı incelendiğinde,

$$\frac{\partial \psi}{\partial i} = L(\theta, i) \Rightarrow \text{Artan endüktans}$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial \theta} = K_b(\theta, i) \Rightarrow \text{Anlık zıt elektromotor kuvveti}$$

(2.14), elektriksel enerjinin ARM manyetik alanına aktarımını göstermektedir. (2.13)'ün her iki tarafı faz akımı ile çarpıldığında oluşan ifade ARM'nun anlık güç denklemidir.

$$Vi = i^2 R_m + i \cdot \frac{d\psi}{dt} \quad (2.15)$$

(2.15)'in sol tarafı ARM'na verilen anlık elektriksel gücü, sağ tarafındaki ilk terim ise sargılardaki bakır kayıplarını göstermektedir. Eğer güç korunmak zorunda ise, (2.15)'in sağ tarafındaki ikinci terim ARM'nun toplam mekanik güç çıkışını ve manyetik alanda biriken enerjii göstermek zorundadır. Bu sebepten,

$$i \cdot \frac{d\psi}{dt} = \frac{dW_m}{dt} + \frac{dW_f}{dt} \quad (2.16)$$

$\frac{dW_m}{dt}$ , anlık mekanik güç ve  $\frac{dW_f}{dt}$ , manyetik alanda depolanan anlık güçtür. Gücün tanımına bakıldığında, enerjinin zamana göre değişimi olduğu görülmektedir. Buna göre  $W_m$ , mekanik enerji ve  $W_f$ , manyetik alan enerjisidir. Bilindiği gibi, mekanik güç, moment ve hızın (milin dönme hızı) çarpımı olarak gösterilmektedir.

$$\frac{dW_m}{dt} = M \cdot \omega \quad (2.17)$$

olduğuna göre (2.17) denklemi;

$$\frac{dW_m}{dt} = M \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (2.18)$$

şekline dönüşür. (2.18) denklemini, (2.16)'da yerine yerleştirildiğinde;

$$i \cdot \frac{d\psi}{dt} = M \cdot \frac{d\theta}{dt} + \frac{dW_f}{dt} \quad (2.19)$$

ve (2.19) denklemi çözüldüğünde moment, (2.20)'deki gibi sağlanır;

$$M(\theta, \psi) = i(\theta, \psi) \frac{d\psi}{dt} - \frac{dW_f(\theta, \psi)}{dt} \quad (2.20)$$

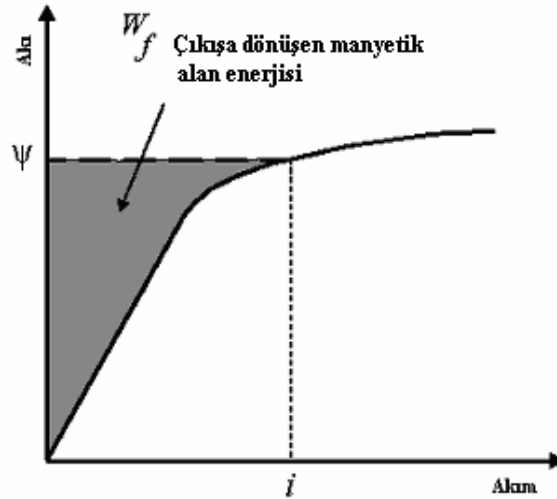
ve sabit akı için (2.20) ifadesi  $M = -\frac{dW_f}{dt}$  olarak basitleşecektir.

Genellikle momentin ko-enerji cinsinden ifade edilmesi beklenir. Ko-enerjiyi anlayabilmek için öncelikle, alan enerjisinin grafik olarak yorumlanması gereklidir.

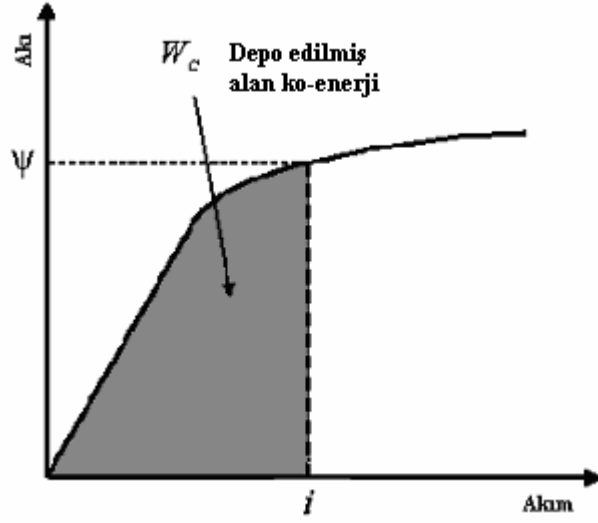
Sabit mil açısında, bir başka ifadeyle açısal hızın,  $\frac{d\theta}{dt} = 0$ , için (2.19) denklemindeki manyetik alan enerjisi (2.21) denklemi ile ifade edilir;

$$W_f = \int_0^{\psi} i(\theta, \psi) d\psi \Big|_{\theta=sbt} \quad (2.21)$$

Bu denklem grafik olarak ise şekil 2.4.'de gösterildiği gibidir.



Şekil 2.4: Çıkışa dönüşen manyetik alan enerjisinin gösterimi



Şekil 2.5: Manyetik ko-enerjinin gösterimi

Sabit rotor açısı  $\theta$  için, mıknatıslanma eğrisi, akıyı akımın bir fonksiyonu olarak tanımlar. Buna göre akı, akım değişimi ile elde edilir. Sabit  $\theta$  için, eğrinin altında kalan taralı alan ise manyetik alan ko-enerjisi olarak tanımlanır ve (2.22) ile gösterilir.

$$W_C = \int_0^i \psi(\theta, i) di \Big|_{\theta=sbt} \quad (2.22)$$

Şekil 2.4. ve şekil 2.5.'e göre,

$$W_C + W_f = i \cdot \psi \quad (2.23)$$

Her iki tarafın da diferansiyeli alındığında,

$$dW_C + dW_f = \psi di + i d\psi \quad (2.24)$$

(2.24) denkleminin diferansiyel çözümünü (2.20) denkleminde yerine konulduğunda;

$$M = \frac{id\psi - (\psi di + i d\psi - dW_C(\theta, i))}{d\theta} \quad (2.25)$$

(2.25)'deki genel moment ifadesi elde edilmektedir. Bu genel moment ifadesi genellikle sabit akım değerlerine göre sadeleştirilir. Diferansiyel ko-enerji kısmi türevlerine göre denklem (2.26)'daki gibi yazılır;

$$dW_c(\theta, i) = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} d\theta + \frac{\partial W_c}{\partial i} di \quad (2.26)$$

(2.25) ve (2.26) denklemlerinden gözlenen sabit akım için moment ifadesi (2.27)'deki gibidir.

$$M = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} \quad (2.27)$$

ARM'nun analizini gerçekleştirebilmek için, makinanın çalışması esnasında doymanın ihmal edildiği kabul edildiğinde akı ile akım arasındaki ilişki,

$$\psi = L(\theta) \cdot i \quad (2.28)$$

ile gösterilir. Buna göre akı motorun sargılarından geçen akıma ve rotor konum açısı ile değişen endüktansa bağlıdır. Denklem (2.28), (2.22)'de yerine yazılırsa,

$$W_c = \frac{i^2}{2} L(\theta) \quad (2.29)$$

Buradan elde edilen ko-enerji ifadesi (2.27) denkleminde yerine yazıldığında ARM moment ifadesinin basitleşmiş hali elde edilir.

$$M = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta} \quad (2.30)$$

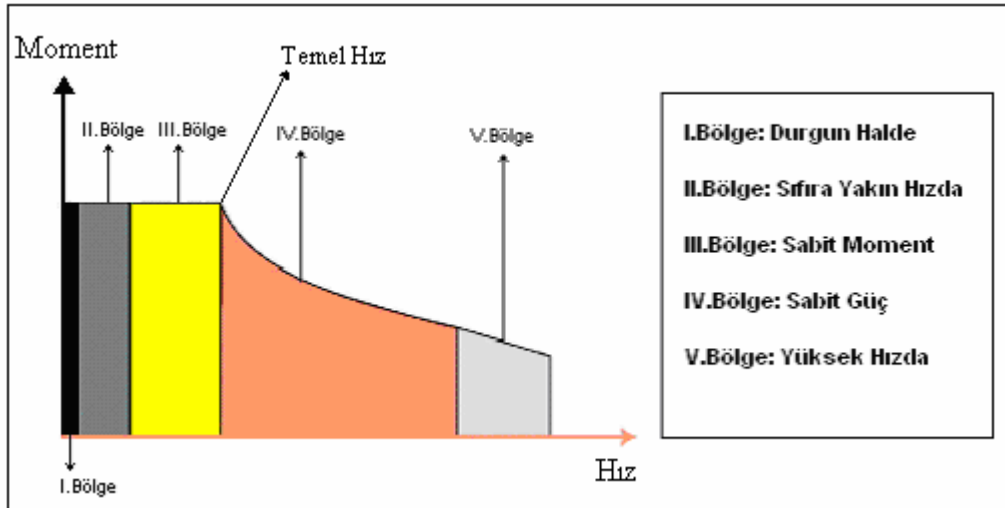
Denklem (2.30)'da görüldüğü üzere motorun momenti klasik tip makinalarda olduğu gibi sadece akıma bağlı değildir. Çünkü ARM'unda sargı endüktansı da değişkendir ve rotor konum açısına göre değişir.

## 2.6. Anahtarlı Relüktans Motorunun Moment-Hız Karakteristiği

ARM'nun moment-hız karakteristiğindeki her çalışma noktası için motorun dinamik davranışında önemli derecede farklılıklar gözlenmektedir. Motora uygulanacak olan tüm kontrol teknikleri için karakteristikteki her çalışma noktasının iyi bilinmesi gerekmektedir.

Moment-hız karakteristiğindeki motorun çalışma noktası tamamen kontrol birimi tarafından belirlenmektedir. Bu özellik ARM'nu cazibeli hale getirmektedir [6]. Çalışma karakteristiğinde elbette, besleme gerilimi ve motorun artan yük altında ki çalışma sıcaklığının izin verilen değeri geçmemesi gibi kısıtlamalar vardır. Fakat genel olarak karakteristik şekil 2.6.'daki gibidir. Diğer tüm motorlarda olduğu gibi moment, izin verilen maksimum akım, hız ve besleme gerilimi ile sınırlanmaktadır [6].

Şekil 2.6.'da motorun momentinin hıza göre değiştiği çeşitli çalışma bölgeleri gösterilmektedir.



Şekil 2.6: ARM'nun çeşitli çalışma bölgeleri

A-Hareketsiz halde (I. Bölge)

Faraday Kanununa göre, aşağıdaki durumlardan en az biri sağlanmış ise iletken üzerinde gerilim oluşmaktadır;

- İletken tarafından halkanlanmış olan akı yoğunluğu zamana bağlı olarak değişiyorsa,
- Üzerinde akı geçen bölgenin büyüklüğünün zamanla değişiyorsa,
- Manyetik alanın yönü ve iletken tarafından belirlenmiş olan yüzeyin birbirine göre durumlarının zaman göre farklılık göstermesi durumunda [5].

Bu matematiksel olarak şu şekilde tanımlanabilmektedir;

$$E = -N \frac{d\phi}{dt} = -N \frac{\partial}{\partial t} \int_{s(t)} \vec{B}(t) \cdot \vec{n}(t) ds \quad (2.31)$$

Burada,  $N$ ,  $\phi$ ,  $B(t)$ ,  $s(t)$  ve  $n(t)$  sırasıyla; sarım sayısı, manyetik akı, akı yoğunluğu, iletken yüzeyi, iletken yüzeyinin normal vektörüdür. Hareketsiz halde manyetik devrenin relüktansı değişmez. Bundan dolayı, sadece stator çekirdeğindeki manyetik akının yükselmesi ile ARM sargılarında gerilim endüklenir. Bu durumda ARM'nun öz-endüktansı, motor durağan olduğu için rotor pozisyonu ile değişmemesine rağmen akımın lineer olmayan doyum etkisinin seviyesine bağlı olarak değişim gösterebilmektedir.

B-Sıfıra yakın hızda (II. Bölge)

Rotor hareket etmeye başladığı için, öz-endüktans değeri rotor konumuna göre değişmeye başlayacaktır. Sıfıra yakın hız olarak tanımlanan, çok düşük devir sayılarında hareket geriliminin etkisi (zıt-EMK) çok küçük olur ve ihmal edilebilmektedir. Bu şekilde faz geriliminin eşitliği basit R-L biçimi olarak devam etmektedir. Hareket geriliminin çok az olması faz akımında kesin ayar yapmayı mümkün kılmaktadır. Bu sayede elektromanyetik momentin hassas kontrolü yapılabilmektedir.

### C-Sabit moment bölgesi (III. Bölge)

Bu bölgede, motorun hızı arttığı için, hareket gerilimi zıt-EMK, önemli ölçüde değer kazanmaktadır ve artık ihmal edilecek düzeyde değildir. Motorun faz gerilim eşitliğine hız ifadesi de dahil olmaktadır. Bu nedenle tüm sistemin doğrusal olmayan yapısına hız ifadesi de eklenmiş olmaktadır. Bu bölgede özellikle endüklenen gerilimin polaritesi ile hat geriliminin (besleme gerilimi) polaritesinin birbirine karşı olmasına (farklı yönde kutuplanmış olmasına) dikkat edilmesi gerekmektedir. Endüklenen gerilim hat geriliminden daha da küçüktür. Bu da etkin bir maksimum elektromanyetik momentin kontrolünün “sabit moment bölgesi” olarak adlandırılan bölgede elde edilebileceğini göstermektedir.

### D-Sabit güç bölgesi (IV. Bölge)

Bu bölgede, zıt-EMK zaman zaman besleme geriliminin seviyesine ulaştığı için, faz akımının tam olarak kontrol edilmesi mümkün olmamaktadır. Burada motorun moment, hızı ile ters orantılıdır. Motorun hızı arttıkça üretilen moment düşmektedir. Sabit güç bölgesinin başlangıcı, motorun fazlarından daha fazla akım çekilemeyen, dolayısıyla daha fazla moment üretilmeyen, temel hız olarak adlandırılan noktadır. Sabit güç bölgesi, motorun çıkış gücünün sabit kaldığı ve maksimum çıkış gücünün üretildiği çalışma bölgesidir.

### E-Yüksek hızda çalışma bölgesi (V. Bölge)

Burada, motorun moment, hızın karesi ile ters orantılıdır. Motor hızlandıkça üretilen moment artık çok daha hızlı bir şekilde düşmektedir. ARM sabit güç bölgesinde çok daha yüksek hızlarda çalışma kapasitesine sahiptir. Ancak bu, fazların iyi bir anahtarlama tekniği ile anahtarlanması ile başarılabilir [7]. ARM'nun fazlarının sürekli olarak iletimde tutulması ile yüksek hızda çalışması sağlanmaktadır. Yüksek hızda çalışma bölgesinde, faz akımları arasında önemli ölçüde örtüşme olmaktadır.



Tablo 2.1: ARM'nun çeşitli çalışma bölgelerindeki dinamik davranışı

Bölge	Faz Gerilim Eşitliği
I. Bölge	$V = Ri + (L^* + i \frac{dL^*}{di}) \frac{di}{dt}$
II. Bölge	$V = Ri + (L(i, \theta) + i \frac{dL}{di}) \frac{di}{dt}$
III. Bölge	$V = (R + \omega \frac{dL}{d\theta})i + (L(i, \theta) + i \frac{dL}{di}) \frac{di}{dt}$
IV. Bölge	$V = (R + \omega \frac{dL}{d\theta})i + L(\theta) \frac{di}{dt}$
V. Bölge	$V = \omega \frac{dL}{d\theta}i + L(\theta) \frac{di}{dt} + \sum M_j \frac{di_j}{dt}$

Buraya kadar anlatılan ARM'nun moment-hız karakteristiğinde ki tüm bölgeler, tablo 2.1.'de matematiksel biçimde özetlenmektedir. Bu tablodaki ifadelerde geçen,  $V$ ,  $i$ ,  $R$ ,  $L$ ,  $\theta$  ve  $\omega$  sırasıyla faz gerilimi, faz akımı, faz sargısı, faz endüktansı, rotor konum açısı ve açısal hızdır.

## 2.7. ARM'nun Tasarımı

Anahtarlı relüktans motorunun tasarımını yapabilmek için fazlasıyla tecrübe ve bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır. Tasarım işlemlerinde ilk olarak motorun geometrik boyutları belirlenmeli ve rotor konumuna göre endüktansın değişimi hesaplanmış olması gerekmektedir. Motorun tasarımında ayrıca önceden gövde büyüklüğüne karar verilmiş olunması ve ARM'undan optimum çıkış elde etmek için stator kutup açısı ( $\beta_s$ ) ve rotor kutup açısının ( $\beta_r$ ) büyüklüklerine belirlemede yardımcı olması amacıyla bazı değişkenlerinde hesaplanması gerekmektedir. Bu bölümde tasarım aşamasında kutup açılarının seçiminin yapılması bir örnek üzerinde anlatılmaktadır.

## 2.7.1. ARM'nun tasarım aşamaları

### 2.7.1.1. Motor değerleri

Bir sistem için ARM'u tasarlanacak olunursa, sistem için gerekli olan çıkış gücü h.p. olarak verilmiş  $P_{hp}$  çıkış gücüne sahip,  $n$  (d/dk) hızında, izin verilen maksimum akım değeri  $i_p$  (A) ve AA besleme gerilimi  $V_{aa}$  olarak verildiğinde, çıkış gücü ve hız bilgisinden faydalanarak ARM tarafından uygulanacak moment ( $M_{mil}$ ) (2.32)'deki denklem ile hesaplanabilmektedir.

$$M_{mil} = \frac{P_{hp} * 1000}{2\pi \left(\frac{n}{60}\right) * 745.6} = \frac{P_{kw}}{2\pi \left(\frac{n}{60}\right)} N.m \quad (2.32)$$

$P_{kw}$ , ARM'nun watt cinsinden çıkış gücünü göstermektedir.

### 2.7.1.2. ARM'nun boyutlarının seçimi

Anahtarlı relüktans motorunun tasarımına başlandığında, ilk olarak motorun boyutları baz alınarak eşdeğer olan bir asenkron motor ile karşılaştırılabilmesi açısından boyutlarının buna göre belirlenmesi başlangıç için iyi bir adımdır. ARM'nun boyutlarına, eşdeğer asenkron makinasına göre karar verilecektir. Bunun yapılmasındaki amaç, bir çok uygulamalarda ARM'nun diğer motor tiplerinin yerini alabileceği avantajını göstermek içindir. IEC (International Electrotechnical Commission) standartları uluslar arası tüm elektrik makinalarının boyutlarını ISO (International Standards Organization) standartları ve ABD'de yapılan makinalar için NEMA (National Electrical Manufacturers Association) standartlarına göre ayarlamaktadır. Tasarım aşamasında, eğer motor boyutları çok geniş veya çok küçük bulunursa, farklı gövde büyüklüğüne sahip motor kullanılabilir. Motorun gövde büyüklüğüne statorun dış çapına ( $D_o$ ) göre karar verilmektedir. Pratikte, statorun dış çapının büyüklüğü (2.33)'deki gibi belirlenmektedir.

$$D_o = (\text{Gövde uzunluğu} - 3) * 2 \quad (2.33)$$

(2.33)'deki makinanın gövde uzunluğu, IEC standardına göre belirlenen değerdir. Denklemdeki gövde uzunluğundan çıkarılan 3 mm, endüstride kullanılan motorun montajında gerekli olan motor ayağının hesaba katılarak bırakılan paydır.

### **2.7.1.3. ARM kutup sayılarının seçimi**

Çoğunlukla ARM'nun stator kutup sayısı ( $N_s$ ) ve Rotor kutup sayısı ( $N_r$ ) tasarımı yapan tarafından belirlenir. Ancak geri besleme aygıtlarının ve dönüştürücü biçiminin standart olabilmesi durumu gibi çok özel uygulamalarda, bunlara göre kutup seçimlerinin yapılması söz konusu olmaktadır. Kutup sayıları için çok sayıda çeşitli kombinasyonlar vardır. Her bir kombinasyonun farklı durumlara göre avantajı ve dezavantajı vardır [3]. Örneğin en popüler olan 8 stator kutbu ve 6 rotor kutbuna sahip olan (8/6) ARM'nun, 6 stator kutbu ve 4 rotor kutbuna sahip olan (6/4) ARM'na göre avantajı, daha az moment dalgalılığına sahip olmasıdır. Dezavantajı ise, motorun tahriği için gerekli olan dönüştürücü yapısında daha fazla anahtarlama elemanlarına ihtiyaç duymasıdır. Bu nedenle anahtarlama kayıpları ve kontrol elektroniği maliyeti artacaktır.

### **2.7.1.4. ARM stator ve rotor kutup açılarının seçimi**

Anahtarlı relüktans motoru tasarımında stator ve rotor kutup açılarının seçimi en önemli parametrelerden birisidir. Bu seçim sırasında takip edilmesi gereken belirli unsurlar vardır. Standart tasarımda stator kutup açısı, ( $\beta_s$ ) rotor kutup açısından ( $\beta_r$ ) daha küçük olmaktadır [3],[13]. Burada bu kısıtlamalar üç koşul halinde özetlenmektedir ve aşağıdaki gibidir;

A- Birinci koşul

Stator kutup açısı, rotor kutup açısından daha küçük olmalıdır, ( $\beta_s$ )<( $\beta_r$ ).

B- İkinci koşul

Etkin moment bölgesi, stator kutup açısından ( $\beta_s$ ) küçük olmalıdır. Fakat ateşleme açısından ( $\varepsilon$ ) daha büyük olmalıdır. Ateşleme açısı (2.34)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{\frac{N_s}{2} N_r} \quad (2.34)$$

6/4 ARM için ateşleme açısı,

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{\frac{6}{2} \cdot 4} = 0.5236 \text{ rad} = 30^\circ \text{ dir.}$$

Şayet stator kutup açısı, ateşleme açısından küçük ise ( $\beta_s < \varepsilon$ ), motor bazı konumlarda kalkış yapamayabilir. Şekil 2.8.'deki endüktans değişimine bakılarak bu durum daha rahat anlaşılabilir. Endüktans değişimi her faz için  $\frac{2\pi}{N_r}$  rad periyodunda

sürekli olarak tekrarlanmaktadır. Stator ve rotor kutupları örtüşmediği sürece faz endüktansı çakışık olmayan durumdaki endüktans ( $L_{\min}$ ) değerinde kalır. Bu bölge kutupların tamamen ayrık durumda olduğu kabul edilen 0 noktasından  $\theta_1$  noktasına kadar olan bölgedir. Bu bölge şekil 2.7.a.'da gösterilmektedir. Stator kutbu ile rotor kutbunun üst üste gelmeye başladığı nokta olan  $\theta_1$  konumu (2.35)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\theta_1 = \frac{\pi}{N_r} - \frac{\beta_s}{2} - \frac{\beta_r}{2} \text{ rad} \quad (2.35)$$

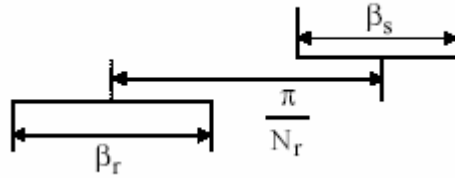
Stator kutbu ile rotor kutbunun örtüşmeye başladığı,  $\theta_1$  konumdan  $\theta_2$  konumuna kadar olan bu bölge endüktansın sabit arttığı bölgedir. Bu bölge şekil 2.7.1.b'de açık olarak gösterilmektedir.  $\theta_2$  konumu kutupların tamamen örtüştüğü konumdur, rotor

bu konuma kadar  $\theta_2 - \theta_1 = \beta_s$  kadar yol almaktadır. Bu noktada faz endüktansının değeri maksimum değere ( $L_{\max}$ ) ulaşmaktadır.

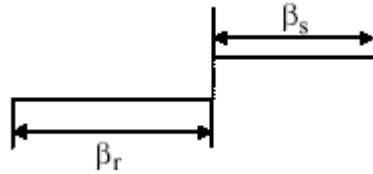
Şekil 2.7.c.'de gösterilen,  $\theta_2$  konumundan  $\theta_3$  konumuna kadar olan, kutupların tamamen örtüştüğü bu bölgede faz endüktansı maksimum değerinde sabit kalmaktadır. Bu bölge de rotorun aldığı yol,  $\theta_3 - \theta_2 = \beta_r - \beta_s$  dir.

Şekil 2.7.d.'de gösterilen,  $\theta_3$  konumundan  $\theta_4$  konumuna kadar olan, rotor kutbunun stator kutbundan ayrılmaya başladığı ve kutupların tamamen ayırık durumda olduğu konuma kadar olan bu bölgede, rotorun yer değiştirmesi,  $\theta_4 - \theta_3 = \beta_s$  kadardır.  $\theta_4$  konumunda kutuplar yine ayırık durumdadır ve faz endüktans değeri minimum ( $L_{\min}$ ) değerindedir. Bunun devamında rotor (2.36)'daki  $\theta_5 - \theta_4$  konumları arasında ki fark kadar yer değiştirir ve şekil 2.7.e.'deki gösterildiği gibi stator kutbu ile tamamen ayırık duruma gelir.

$$\theta_5 - \theta_4 = \frac{\pi}{N_r} - \frac{\beta_s}{2} - \frac{\beta_r}{2} \text{ rad} \quad (2.36)$$

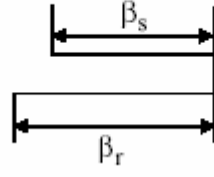


(a)

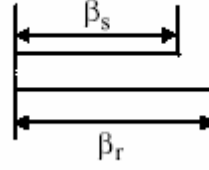


(b)

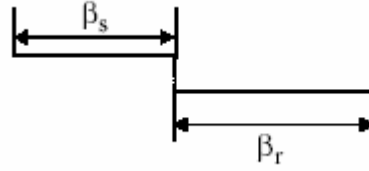
Şekil 2.7: (a),(b),(c),(d) ve (e) Stator ve rotor kutup geçişlerinin gösterimleri



(c)



(d)



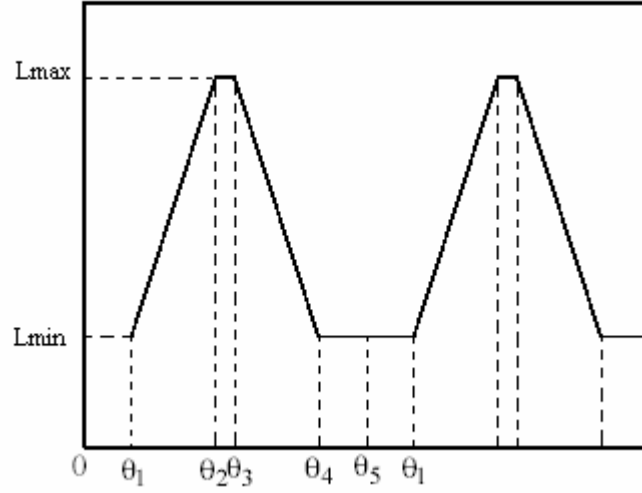
(e)

Şekil 2.7: (a),(b),(c),(d) ve (e) Stator ve rotor kutup geçişlerinin gösterimleri(devamı).

Şekil 2.7.'de gösterildiği gibi endüktans değişiminin doğrusal olduğu durum için moment ifadesi (2.37)'deki gibidir.

$$M = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (2.37)$$

(2.37) nolu eşitlikteki moment ifadesinden de anlaşılacağı üzere, endüktans değişiminin  $\left(\frac{dL}{d\theta}\right)$  oranı, momentin pozitif bölgede veya negatif bölgede olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.8: İdeal endüktans değişimi.

### C- Üçüncü koşul

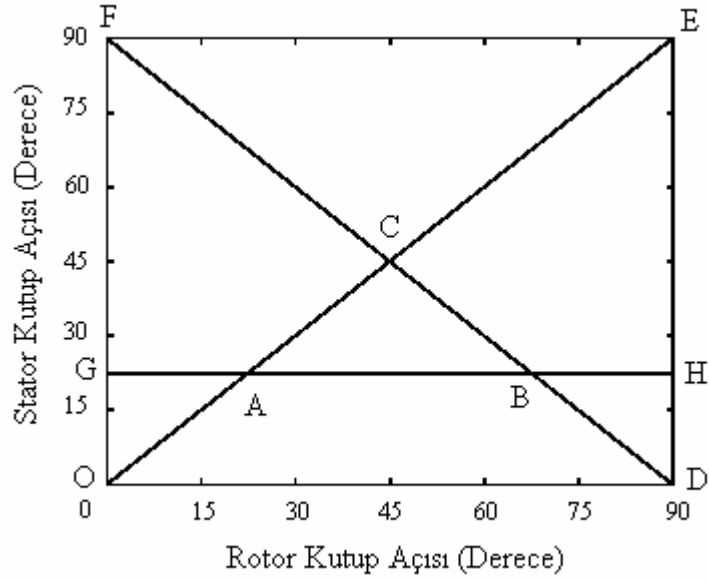
Bitişik rotor kutupları arasındaki açı, stator kutup açısından büyük olmalıdır. Bu kriter (2.38)' de ifade edilmektedir.

$$\frac{2\pi}{N_r} - \beta_r > \beta_s \quad (2.38)$$

Bu kriterin sağlanmaması durumunda, faz endüktansı minimum değere ulaşmadan önce, motorun pozitif endüktans bölgesinde kalkış yapabilecektir. Bu endüktansın çakışık olmayan durumda daha büyük değerler almasına ve daha az moment üretilmesine neden olur. 6/4 kutuplu bir ARM için stator ve rotor kutup açıları (2.39) ifadesini sağlamış olmalıdır.

$$\frac{2\pi}{4} > \beta_s + \beta_r \quad (2.39)$$

Kutup sayılarının seçimi için buraya kadar bahsedilen bu üç koşul, 6/4 ARM için çizilmiş olan şekil 2.9.'daki gibi uygun bir üçgen ile gösterilmektedir. Motorun stator ve rotor kutup açıları bu üçgenin içinde yer almaktadır.



Şekil 2.9. Kutup açısı seçiminde kullanılan 6/4 kutuplu ARM için uygun üçgen

Şekil 2.9’da OE doğrusu, 1. koşulu temsil etmektedir. GH doğrusu 2. koşulu göstermektedir. Son olarak, DF doğrusu 3. koşulu temsil etmektedir. Örnek olarak, 6/4 kutuplu ARM için stator kutup açısı,  $\beta_s=25^\circ$  verilmiş ise bu üç koşula göre rotor kutup açısının alacağı değerler (2.40)’daki gibidir.

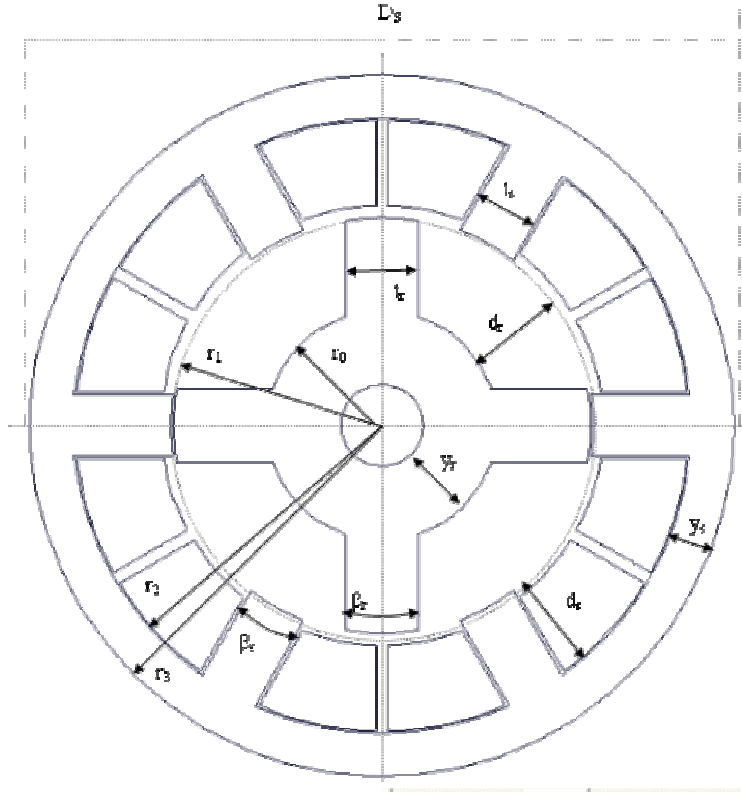
$$25^\circ < \beta_r < 65^\circ \quad (2.40)$$

Bu üçgen bize sadece stator ve rotor kutup açılarını sınırlandırmada yardımcı olmaktadır. Optimum kutup açısı seçimi tahmininde faydası yoktur [18].

#### 2.7.1.5. Hava aralığı kalınlığının belirlenmesi (g)

Etkin enerji dönüşümü için hava aralığı kalınlığı (g) mümkün olduğu kadar küçük olmalıdır. Hava aralığı değerinin büyüklüğünün ne kadar olacağına belirli tolerans ve maliyete göre üretici tarafından karar verilmektedir. Bu yüzden her özel uygulamada optimum performans elde edebilmek için hava aralığı büyüklüğünün uygulamaya göre belirlenmesi gerekmektedir [19].





Şekil 2.10: ARM'nun kesit görünüşü ve boyutları

### 2.7.1.6. Motor derinliği ( $L_d$ ), rotor dış çapı ( $D_r$ ) ve stator dış çapının ( $D_s$ ) belirlenmesi

Genellikle motor derinliğinin ( $L_d$ ), rotor dış çapına ( $D_r$ ) oranı ( $L_d/D_r$ ), 0.4-3.0 değerleri arasındadır. Rotor dış çapının değeri, hava aralığının maksimum değeri ( $G_{max}$ ) ve motorun maksimum momentine ( $M_{max}$ ) göre denklem (2.41)'deki gibi belirlenmektedir.

$$G_{max} = \frac{2M_{max}}{\pi D_r^2 L_d} \quad (2.41)$$

bu denkleme göre motorun maksimum momentini ve maksimum hava aralığı biliniyorsa rotorun dış çapının büyüklüğü belirlenebilmektedir. Motorun rotor dış çapı belirlendikten sonra rotorun dış çapının ( $D_r$ ) stator dış çapına ( $D_s$ ) oranı ( $D_r/D_s$ ), 0.5-0.55 olduğundan, statorun dış çapı bu orana göre belirlenmektedir.

### **BÖLÜM 3. ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORUNUN ANALİZİ**

Bu bölümde sırası ile, sonlu elemanlar yöntemi hakkında bilgi verilmekte, daha sonra iki boyutlu analiz yapabilen Maxwell 2D programının kullanılması, son olarak da kullanılan bu program ile üç fazlı 6/4 kutuplu bir anahtarlı relüktans motorunun analiz sonuçlarına yer verilmektedir.

#### **3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)**

Elektrik mühendisliğinde transformatör, motor, generatör gibi elektrik makinalarında manyetik alan dağılımının ve manyetik alana ilişkin büyüklüklerin belirlenmesi için analog veya sayısal yöntemler kullanılabilir. Analog yöntemlerin zorlukları ve yetersizlikleri sayısal yöntemlerle aşılabılır. Bilindiği gibi, Manyetik alan problemlerinin çözümünde farklı sayısal yöntemlerden yararlanılmaktadır. Bunlardan bazıları; Sonlu Farklar Yöntemi, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Monte Carlo Yöntemi, Sınır Elemanları Yöntemi, Yük Benzetim Yöntemi'dir. Bunlardan en fazla kullanılan sayısal yöntemlerden birisi de Sonlu Elemanlar Yöntemidir (SEY) [9]. Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak makinanın analizi gerçekleştirilmektedir.

Elektrik makinalarının tasarım ve üretim aşamasında deneysel çalışmaların fazla olması, prototiplerin üretim maliyeti ve zaman kaybı açısından vermiş olduğu zararlar önemli bir sıkıntı olarak karşımıza çıkmaktadır. SEY ile gerçek motor parametreleri kullanılarak oluşturulan modeller üzerinde analizlerin gerçekleştirilmesi sonucunda, motorun davranışı ve karakteristikleri elde edilebilmektedir. Motorun belirli performans karakteristiklerini iyileştirme yolunda SEY ile oluşturulan modelde belirli parametreler değiştirilerek sonuca ulaşılabilir. Böylelikle, prototip oluşturma olayı büyük ölçüde azaltılmış olmaktadır. Bu durum üretim safhasına da olumlu yansyarak maliyetin düşmesi sağlanmaktadır.

Sonlu Elemanlar Yönteminin (SEY) elektrik makinaları analizinde kullanılması ile ilk olarak transformatör, generatörler ve motorlar ile ilgili manyetik alana ilişkin büyüklükler hesap edilmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel çalışmalar ile gerçekleşmiştir. Bilgisayar alanında meydana gelen gelişmeler ile sayısal hesap tekniklerinde işlem fazlalığından kaynaklanan hesap hızı yavaşlığı giderilmiş ve SEY daha fazla uygulama sahası bulmuştur [9].

### 3.2. Anahtarlı Relüktans Makinasının Analizi

SEY'nin Anahtarlı Relüktans Motorlarında uygulanması ile ilgili olarak, 2-boyutlu olarak moment eğrisi çıkarılmış, ayrı bir çalışmada rotorun farklı konumları için akı halkalanması eğrisi elde edilmiştir [20], [14]. Yapılan çalışmalar sonucu, SEY'nin özellikle motorun manyetik devresine ve geometrisine yönelik çalışmalarda çok iyi sonuçlar verdiği görülmektedir [21]. Bu çalışma boyunca SEY, gerçekleştirilen statik analizlerde sayısal hesap yöntemi olarak kullanılmıştır.

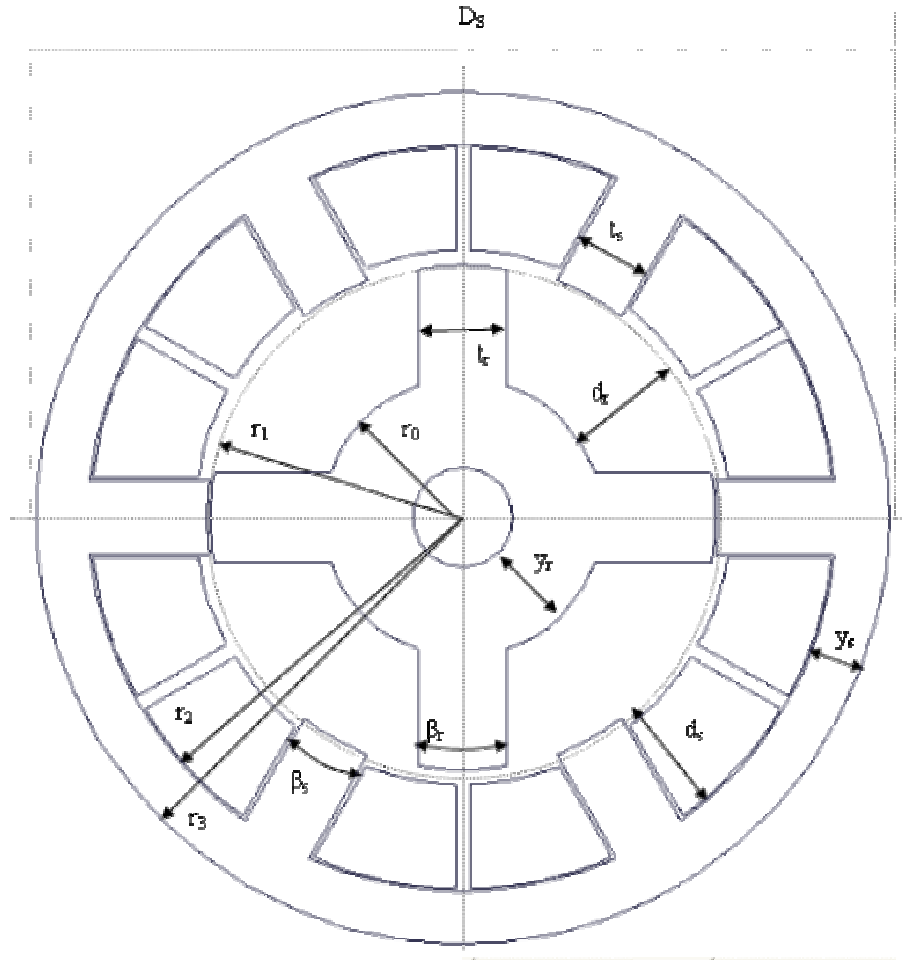
Bu bölümde sonlu elemanlar yöntemi ile üç fazlı ARM'nun çalışma karakteristikleri çıkartılmaktadır. Sonlu Elemanlar Yöntemini ARM'na uygulamak amacıyla Maxwell 2D sonlu elemanlar analiz programı kullanılmaktadır. Bu manyetik analiz programı iki boyutlu manyetostatik analiz yapmakta ve doğrudan sargının halkaladığı akıyı hesaplayabilmektedir. Her bir konum ve farklı akım değerlerindeki akı değişimini ( $\psi(i,\theta)$ ) elde edebilmek için rotor pozitif moment bölgesi içerisinde, karşılıklı konumdan ortalanmış konuma kadar istenilen hassasiyette göre farklı ara konumlarda sabit tutulmaktadır.

Bu çalışmada, 6 stator 4 rotor kutup yapısına sahip ARM incelenmekte, ( $0^\circ \dots 45^\circ$ ) aralığında 20 adet farklı rotor konumu ve ( $0 \dots 6A$ ) aralığında 20 adet farklı akım değeri için toplam 441 adet analiz yapılarak motora ilişkin  $\psi(i,\theta)$  değişimi ve  $M(i,\theta)$  değişimi belirlenmektedir. Motora ilişkin  $\psi(i,\theta)$  değişimine bakılarak laminasyon üzerindeki akı yoğunluğunu belirlemek üzere bilgi sağlamak ve gerektiğinde tasarım aşamasında laminasyonun iyileştirilmesine yönelik çalışmalara izin vermektedir. Daha önce de belirtildiği üzere, yapılan analizler iki boyutludur ve gerçek motorda sargı başlarında oluşan kaçak akıları hesaba katmaktadır. Dolayısıyla

iki boyutlu alan analiziyle elde edilen halkalanma akısı sonuçlarıyla gerçek motordaki halkalanma akısı arasında fark olacağını bilmesi gerekmektedir [10],[13]. Bugüne kadar yapılan çalışmalardan, stator çapına göre yeterince uzun paket boyuna sahip motorlar için, iki boyutlu analizin tatmin edici sonuçlar verdiği bilinmektedir. Bu farkın belirlenmesi ancak deneysel çalışmayla mümkündür [14].

### 3.2.1. Kullanılan ARM'nun özellikleri

Bu çalışmada kullanılan 6 stator 4 rotor kutup yapısına sahip klasik ARM'na ait boyutlar ve motorun kesit görünüşü şekil 3.1'de gösterilmektedir [3].



Şekil 3.1: ARM'nun kesit görünüşü ve boyutları

Bu çalışmada kullanılan ARM'nun geometrik boyutları ve değerleri tablo 3.1'de verilmektedir. Birim sistemi olarak SI sistemi kullanılmış ve boyut değerleri de buna

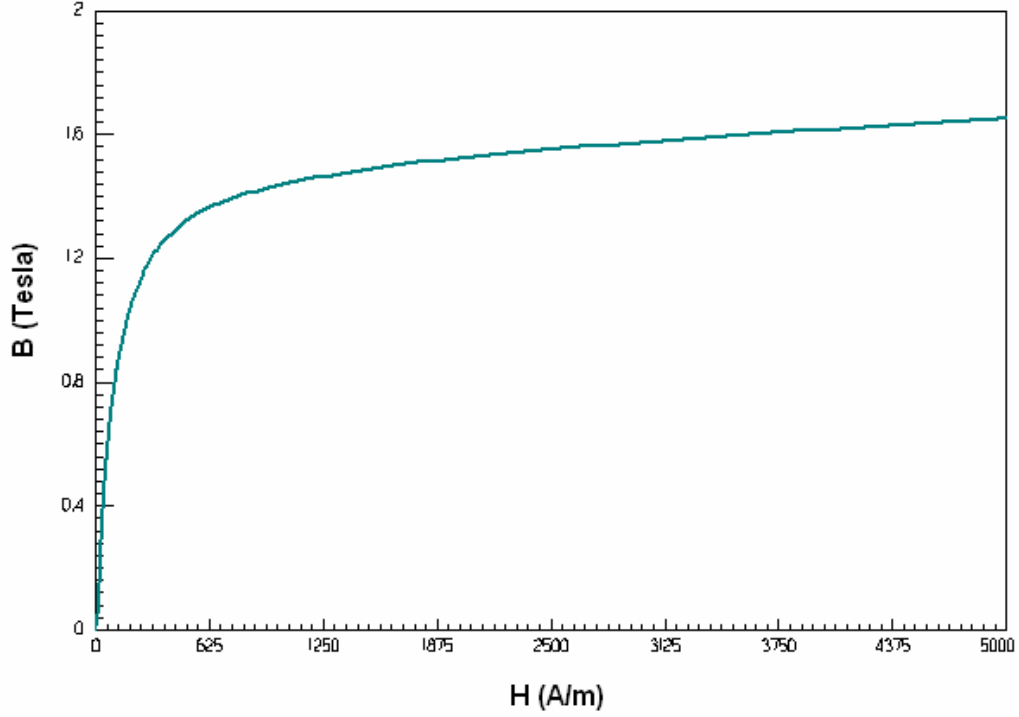
göre belirlenmiştir. Boyutlara bakıldığında hacim olarak küçük nitelendirilebilecek bir yapıya sahiptir.

Tablo 3.1: ARM'nun boyutları ve değerleri

Parametrenin Adı	Sempolü	Değeri
Stator Çapı	$D_s$	117.3 mm
Rotor Çapı	$D_r$	66.03 mm
Motor Derinliği	$L_d$	20.5 mm
Hava Aralığı	$g$	0.2 mm
Stator Kutup Genişliği	$t_s$	12.44 mm
Rotor Kutup Genişliği	$t_r$	14.2 mm
Stator Kutup Yüksekliği	$d_s$	15.8 mm
Rotor Kutup Yüksekliği	$d_r$	15.1 mm
Stator Boyunduruk Kalınlığı	$y_s$	9.5 mm
Rotor Boyunduruk Kalınlığı	$y_r$	13.4 mm
Rotor Boyunduruk Yarıçapı	$r_0$	18.4 mm
Rotor Kutup Yarıçapı	$r_1$	33.4 mm
Stator İç Boyunduruk Yarıçapı	$r_2$	50.3 mm
Stator Dış Boyunduruk Yarıçapı	$r_3$	57.4 mm
Motor Mil Yarıçapı	$r_{sh}$	6.75 mm
Stator Kutup Açısı	$\beta_s$	21.5°
Rotor Kutup Açısı	$\beta_r$	24.8°

Rotor ve stator gövdesi saç malzemeden yapılmıştır ve malzemenin manyetik özellikleri şekil 3.2.'de gösterilmektedir. Eğri incelendiğinde ARM'nun doğrusal olmayan bir malzeme karakteristiğine sahip olduğu görülmektedir. Bu karakteristiğin hatasız olarak tanımlanması, ilerleyen kısımlarda motorun davranışlarını doğru bir şekilde elde etmek için son derece önemli bir konudur. Motorun geometrik ve manyetik özelliklerinin verilmesiyle bundan sonraki bölümde ARM'nun SEY ile modellenmesi gerçekleştirilmektedir. Bu modellemeye ait işlem aşamaları ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

### M19 için B-H EĞRİSİ



Şekil 3.2: Motorda kullanılan malzeme için B-H eğrisi.

### 3.2.2. Sonlu elemanlar yöntemi ile modelin oluşturulması

Elektromanyetik alan problemlerinin SEY ile çözülmesi esnasında sorun farklı aşamalardan geçirilerek bir bütün halinde model oluşturulur. Bu aşamalar aşağıdaki gibidir;

1. Geometrinin oluşturulması
2. Kullanılan malzemenin tanımı
3. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması
4. Çözüm
5. Sonuçların değerlendirilmesi

#### 3.2.2.1. Geometrinin modellenmesi

Analizin ilk aşaması olan geometrinin modellenmesi bölümünde, motorun geometrisi boyutlarına uygun olarak oluşturulmalıdır. Çizim sonlu elemanlar programı

tarafından gerçekleştirilebileceği gibi, herhangi bir CAD programı tarafından da çizilebilir ve IGES/DXF formatında transfer edilebilir. Ancak bu durumda toleranslara dikkat edilmelidir. Fakat sonlu eleman programları tam anlamı ile çizim programı olmadıkları için herhangi bir CAD programını kullanmak, çizimde kolaylık sağlamaktadır. Bu çalışmada SolidWorks programında makinanın geometrisi çizilmiştir ve DXF formatında sonlu elemanlar analiz programı Maxwell 2D'ye transfer edilmiştir.

### 3.2.2.2. Kullanılan malzemenin tanımı

Sonlu elemanlarda doğru analiz yapabilmek için modelde kullanılan malzeme özelliklerinin çok iyi bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Motorda kullanılan, demirin mıknatıslanma eğrisi, bakır ve alimünyumun iletkenliği gibi doğrusal karakteristiğe sahip özellikleri tanımlamak oldukça kolaydır. Ancak doğrusal olmayan karakteristikteki malzemeyi tanımlamak oldukça zordur ve zaman alır. Histerisiz ve anizotropi ihmal edilecek olursa genel olarak kullanılan üç yöntem vardır [15].

- Relüktivitenin akı yoğunluğunun karesinin işlevi olarak,  $v=v(B^2)$
- Manyetik alan şiddetinin akı yoğunluğunun işlevi olarak,  $B=B(H)$
- Permeabilitenin manyetik alan şiddetinin işlevi olarak,  $\mu=\mu(H^2)$

Motorun rotor ve statorundaki saç malzemenin mıknatıslanma eğrisi doğrusal değildir. Doyma özelliğine sahip bu eğri şekil 3.2.'de gösterilmiştir. Bu eğrinin yapısına uygun olarak, yapılan çalışmada hem doğrusal hemde doğrusal olmayan bölgelere ait değerler alınmıştır.

Doğrusal bölgedeki çalışma şartları iki şekilde gerçekleştirilebilir. Bunlardan ilki belirli bir  $\mu_{rx}$  manyetik geçirgenlik değeri tanımlamak, diğeri ise doymanın olduğu bölgede kullanılan  $B=B(H)$  eğrisinde anma akımının altındaki bölgede çalışmaktır. Bu çalışmada ikinci seçenek gerçekleştirilmiştir. Motorun statorundaki sargıların özgül direnci  $\rho = 1.922 \cdot 10^{-8} [\Omega\text{-m}]$ 'dir.

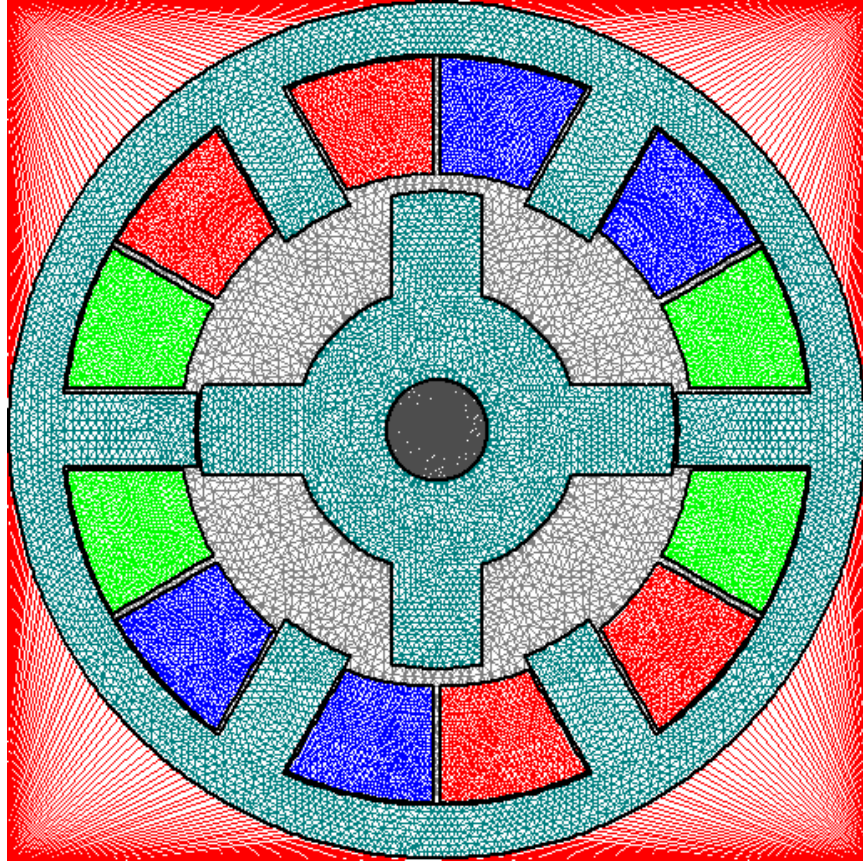
### 3.2.2.3. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması

Modelin geometrisi çizildikten ve malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra sıra sonlu elemanlar modelini oluşturmaya gelmiştir. Dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, sonlu elemanları oluştururken uygun eleman türünün seçilmesidir. Yapılan çalışmada iki tür eleman kullanılmıştır. Bunlar PLANE53 ve CIRCU124 elemanlarıdır. PLANE53 elemanı 8 düğüme sahip 2-boyutlu manyetik analizler için kullanılmaktadır. Bu eleman için 3 ayrı serbestlik derecesi tanımlanmıştır. Serbestlik derecelerinden ikisi sargılar içindir ki bunlar elektrik akımı (CURR) ve elektromotor kuvveti (EMF) dir. Vektör potansiyeli (AZ) ise stator ve rotor hava aralığı içindir.

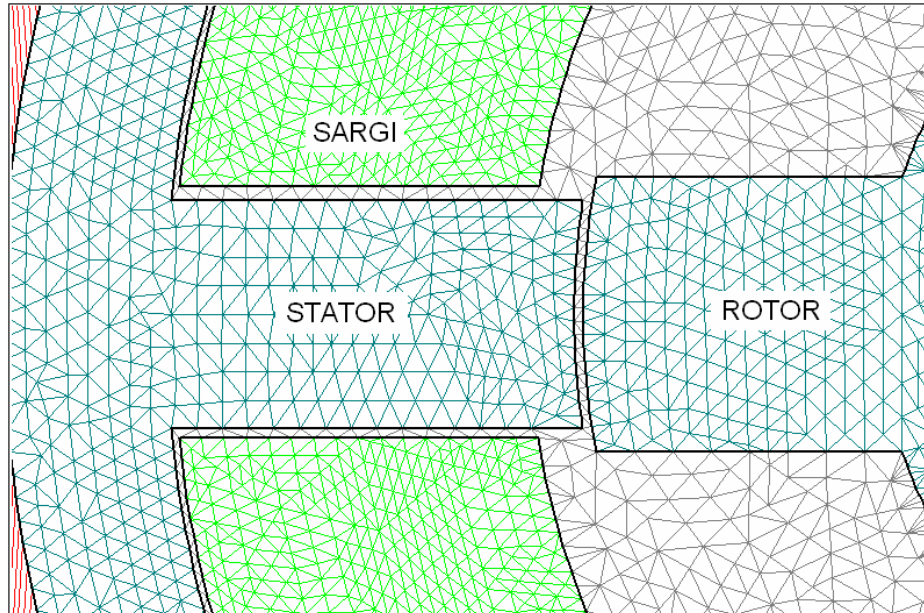
CIRCU124 elemanı ise bir devre elemanıdır. Bu eleman hem elektrik devrelerinde hem de elektrik devrelerinin manyetik devrelere bağlanmasında kullanılmaktadır. CIRCU124 elemanı EMF ve CURR olmak üzere iki serbetlik derecesine sahiptir. Bu devre elemanı ile bağımlı veya bağımsız gerilim kaynağı, akım kaynağı, direnç, bobin ve kondansatör tanımlanabilmektedir. Sonlu elemanlar ile model oluşturulurken yaklaşık 5000 devre elemanı ve 12000 düğüm kullanılmıştır. ARM 'nun sonlu elemanlar ile modellenmiş hali şekil 3.3.'de gösterilmektedir. Karşılıklı sargılar motorun bir fazını oluşturmaktadır. Model oluşturulurken sargı sonu etkileri ihmal edilmektedir. Sargı sonu etkisinden dolayı önceki çalışmalara uygun direncin %60 arttığı kabul edilmiştir [16], [17].

Modelin oluşturulmasında iken göz önünde bulundurulacak en önemli husus, sonuçların en iyi şekilde elde edilmesi için akı çizgilerinin yoğun olduğu bölgelerin çok iyi modellenmiş olması gerekmektedir. Bu nedenle, şekil 3.4.'de görüldüğü gibi gerek sargılarda gerekse stator ve rotor kutuplarında ve hava aralığında çok sayıda eleman kullanılmıştır. Çok sayıda eleman kullanımı ile modelin hassasiyeti artmaktadır ve gerçek sonuçlara daha yakın değerler elde edilmektedir.





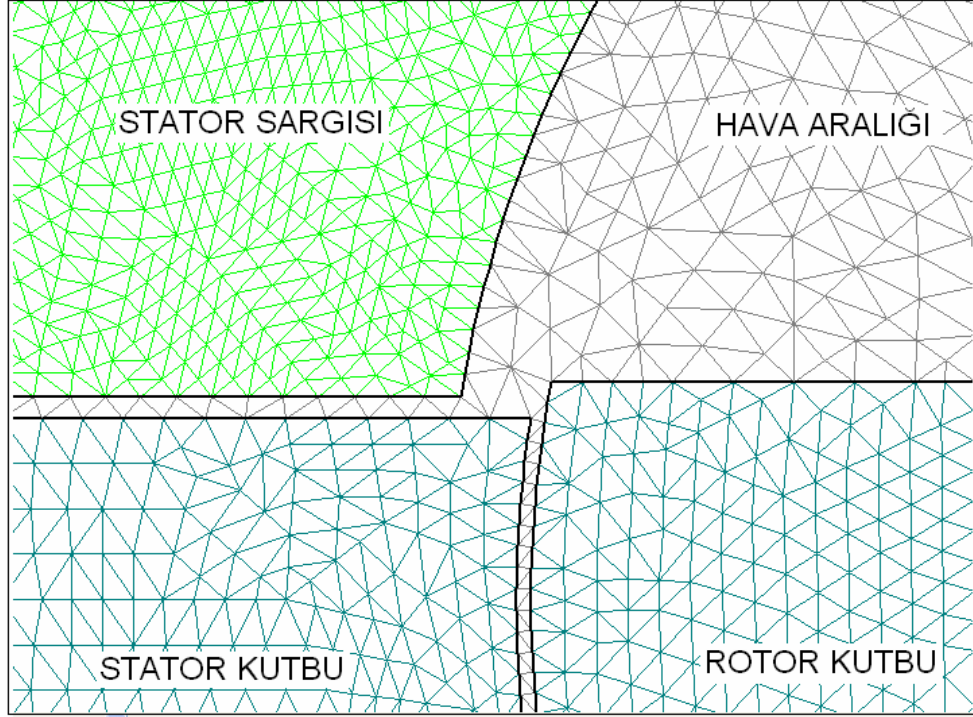
Şekil 3.3: ARM'nun SEY ile modellenmiş hali



Şekil 3.4: Stator, rotor ve sargıda kullanılan elemanlar

Rotor ve stator kutupları arasındaki hava aralığı, depo edilen enerjinin hava aralığında çok büyük olması sebebi ile model oluşturulurken en dikkat edilen bölge

olmuştur. Bu aralıkta gösterilen hassasiyet oranında sonuçların doğruluğu artmaktadır. Bu nedenle hava aralığında kullanılan eleman sayısı artırılmıştır ve çok küçük elemanlar bu bölgeye yerleştirilmiştir. Şekil 3.5. hava aralığını ve kullanılan elemanları göstermektedir. Böylece hava aralığında meydana gelen olayları hassasiyetle tespit etmek mümkün olmaktadır.



Şekil 3.5: Hava aralığı ve kullanılan elemanlar

#### 3.2.2.4. Çözüm

Oluşturulan modelin çözümü esnasında model bir bütün olarak ele alınmış yani simetri özelliğinden yararlanılmamıştır. Model gerek manyetik özelliği gerekse elektrik özelliği içerdiğinden birleşik model olarak da tanımlanabilir (Maxwell 2D 2000). Rotorun 2,25'er derecelik her konumuna karşılık gelen çözümler, sabit akım uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

### **3.2.2.5. Sonuçların değerlendirilmesi**

Sonlu elemanlar tabanlı manyetik analiz programları, her düğümde manyetik vektör potansiyelini çözümlenmektedir. Elde edilen çözümlerin bir ara birim vasıtası ile değerlendirilmesiyle istenilen sonuçlara ulaşılır. Manyetik alan çözümlerinden genel olarak, kuvvet, moment, kayıplar, endüktans, direnç, akı v.b. büyüklükleri hesaplamak mümkündür. Bunların dışında akı yoğunlukları, akı çizgileri, manyetik alan şiddeti, v.b. gibi dağılımlar da model üzerinde görülebilmektedir [15]. Burada, motorun manyetik devresinden geçen akı çizgileri ve akı yoğunlukları rotorun üç farklı konumu için gösterilmektedir.

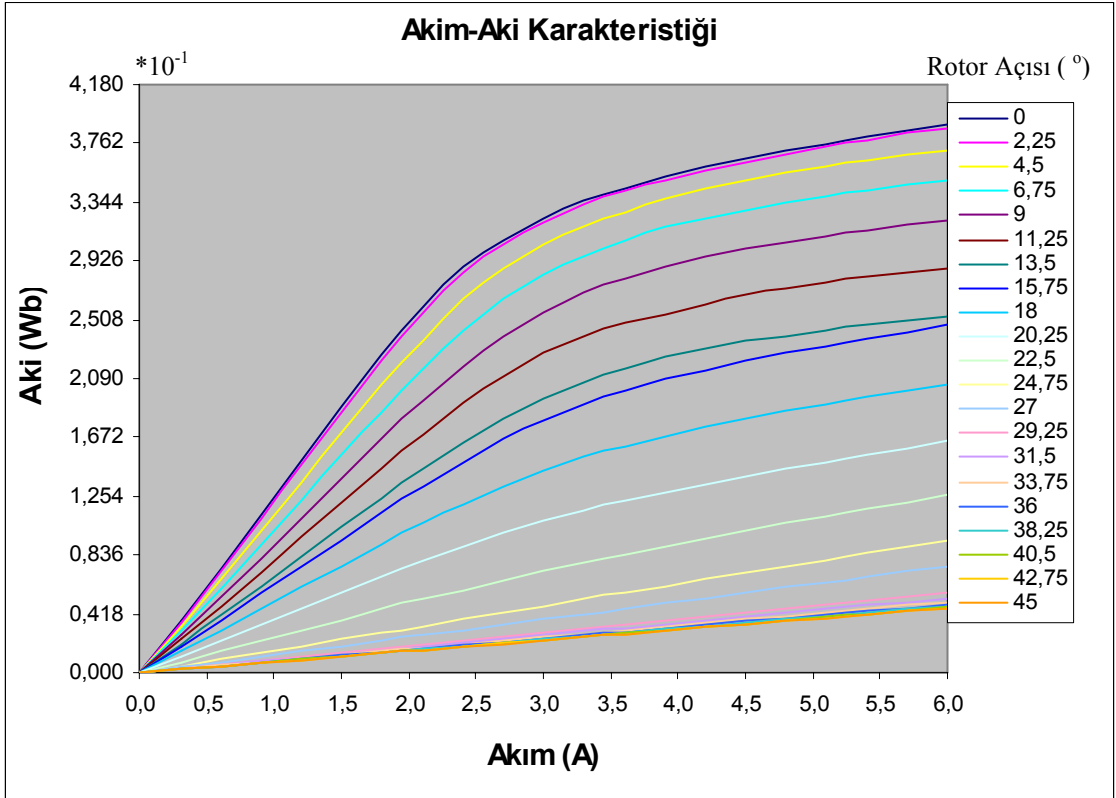
### **3.2.3. ARM'nun SEY ile çalışma karakteristiklerinin elde edilmesi**

ARM'nun çalışma eğrilerini çıkartmak amacı ile anma akım değerinin altında ve üstünde değerlerin alınması ile, doğrusal olan ve olmayan bölgelerin özelliklerini belirlemek mümkün olmaktadır. Çalışma karakteristiklerinden ilk olarak akı eğrisi incelemektir. Bunun devamında motorun modelinde yine gerekli olan moment eğrilerinin elde edilmesi gerekmektedir.

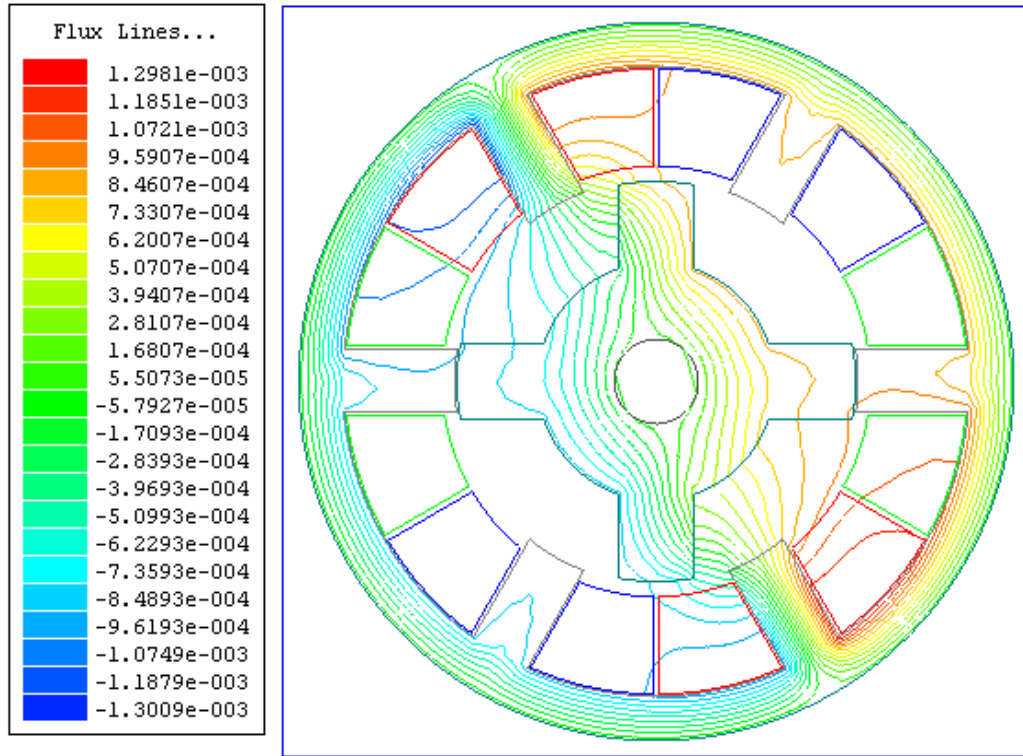
#### **3.2.3.1. Akı eğrilerinin çıkartılması**

Şekil 3.6.'da anahtarlı relüktans motoruna ait halkalanma akısı-akım değişimi verilmektedir. Burada gösterilen akı eğrileri dikkatle incelendiğinde 2,5A civarında doymanın başladığı görülmektedir. Bu değer altındaki değerler doğrusal bölgeye, üstündeki değerler ise doğrusal olmayan bölgeye aittir. Akı karşılıklı konumda en büyük değerine ulaşmaktadır.

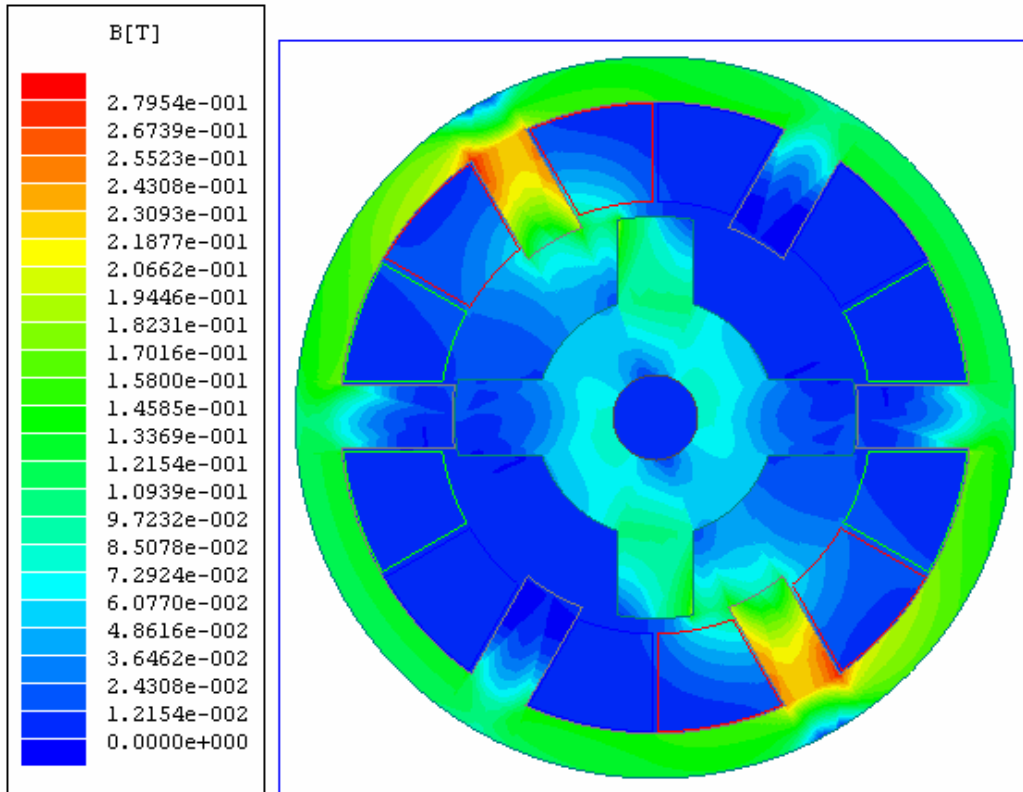
Şekil 3.7...3.9.'da üç fazlı ARM'nun manyetik analiz sonuçlarında örnek olarak seçilen, rotorun  $\theta=0^\circ$ ,  $\theta=10^\circ$  ve  $\theta=30^\circ$  konumlarındaki akı çizgileri dağılımları ve akı yoğunlukları (B[T]) dağılımına yer verilmektedir.



Şekil 3.6: ARM'nun halkalanma akısı- akım eğrisi



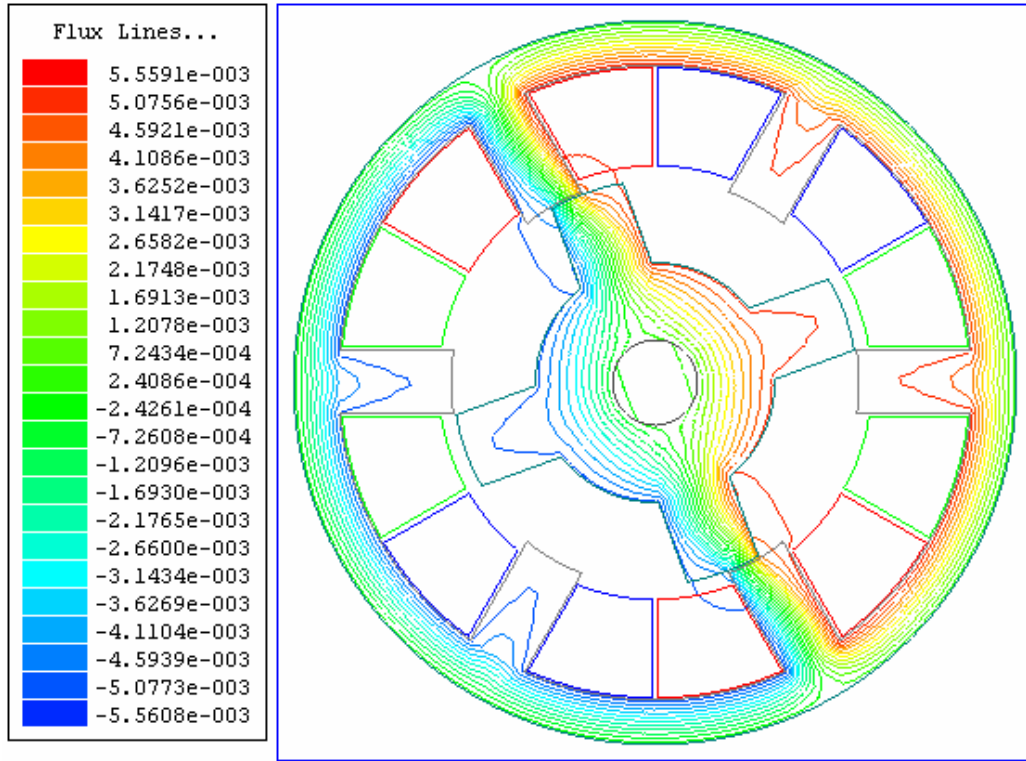
(a)



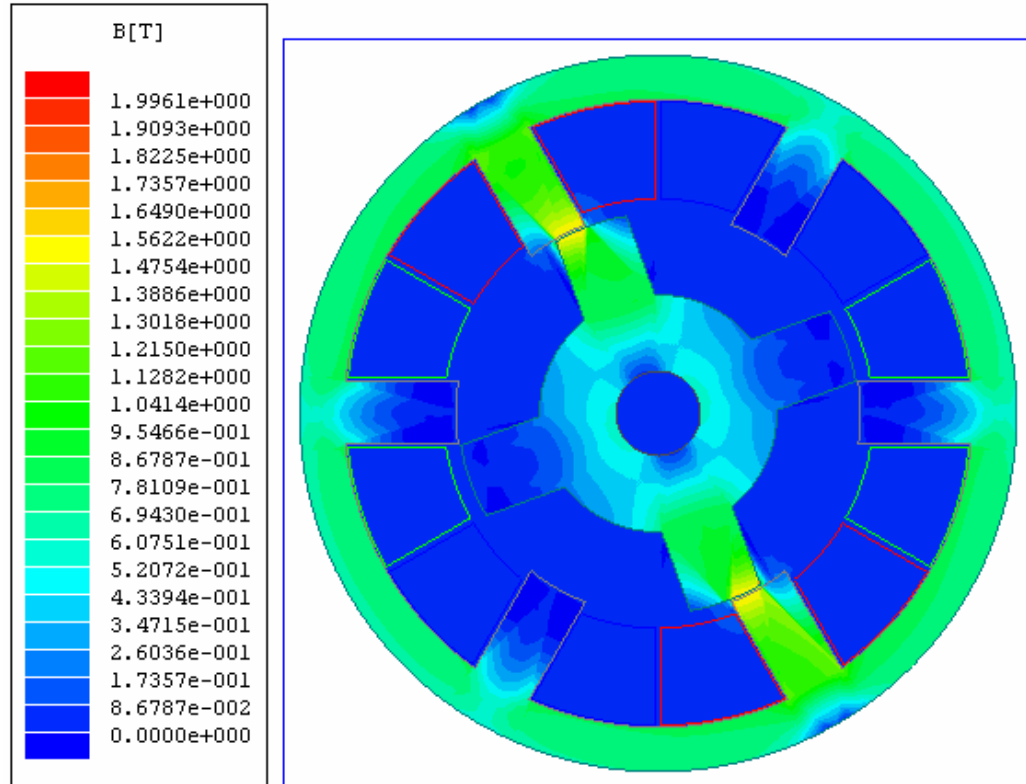
(b)

Şekil 3.7:  $\theta=30^\circ$  için (a) Akı çizgileri dağılımı (Wb/m) (b) Akı yoğunluğu (B[T]) dağılımı.



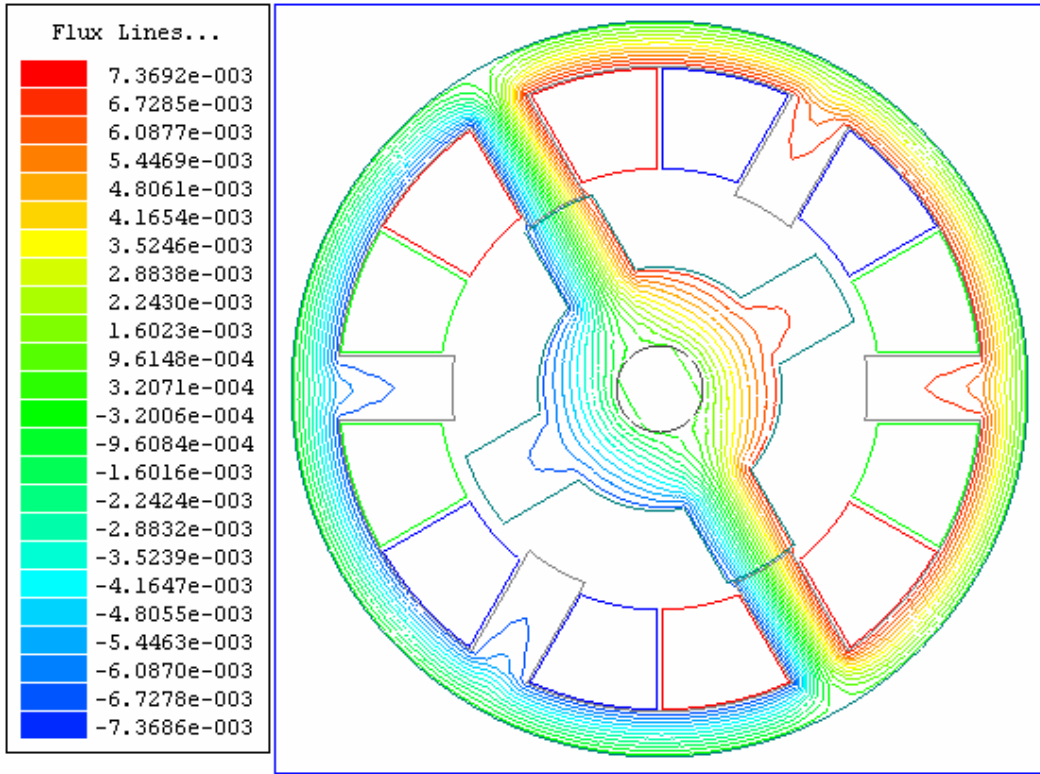


(a)

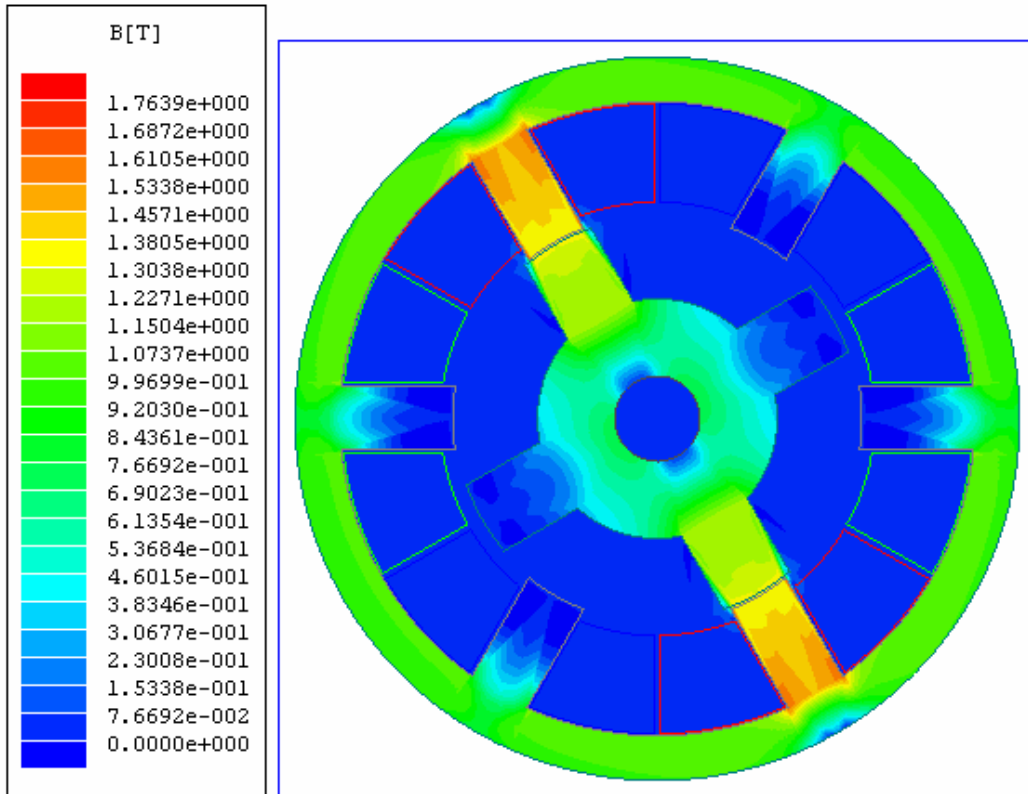


(b)

Şekil 3.8:  $\theta=10^\circ$  için (a) Akı çizgileri dağılımı (Wb/m) (b) Akı yoğunluğu (B[T]) dağılımı.



(a)

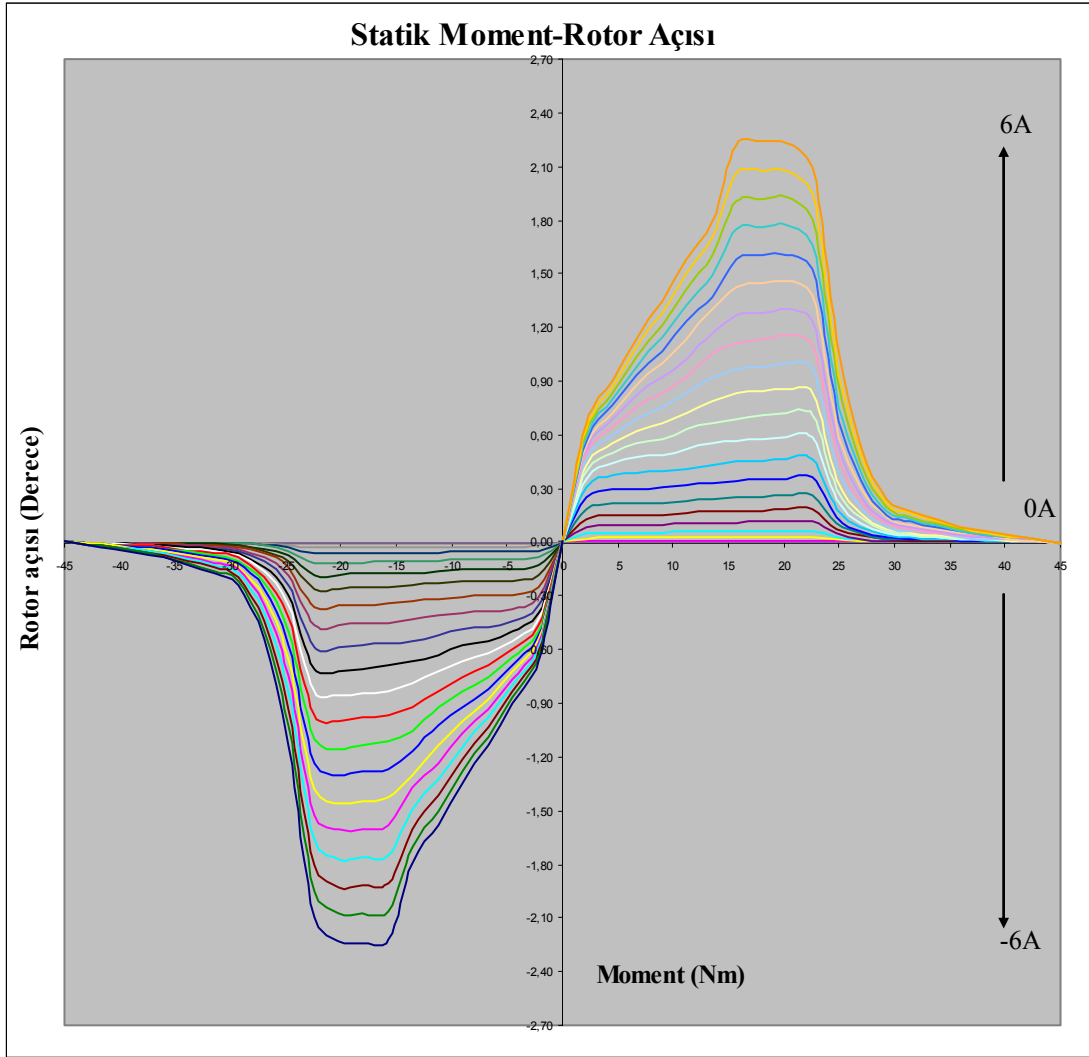


(b)

Şekil 3.9:  $\theta=0^\circ$  için (a) Akı çizgileri dağılımı (wb/m) (b) Akı yoğunluğu (B[T]) dağılımı.

### 3.2.3.2. Statik moment eğrilerinin elde edilmesi

Çalışma karakteristiklerinin en önemlilerinden birisi moment eğrisidir. Moment ifadesi, daha önce de belirtildiği üzere doğrusal durum için öz endüktansın rotor konumuna göre değişim oranı ve akımın karesi bileşenlerinden oluşmaktadır. Moment sadece öz endüktansın rotor konumuna göre değişim oranından elde edilmekte ve karşıt endüktanslar ihmal edilebilecek seviyededir. Manyetostatik analiz sonuçlarından elde edilen statik moment eğrileri şekil 3.10.'da verilmektedir. Moment eğrileri makinanın farklı akım değerlerindeki momentin rotor konumuna göre değişimini vermektedir. Ayrıca maksimum ve minimum momentin veya herhangi bir konumdaki moment değerinin rotor konumunda ne kadar moment elde edileceğini açıkça göstermektedir.



Şekil 3.10: ARM'nun statik moment eğrileri



## **BÖLÜM 4. ARM'NUN DİNAMİK MODELİ**

### **4.1. Giriş**

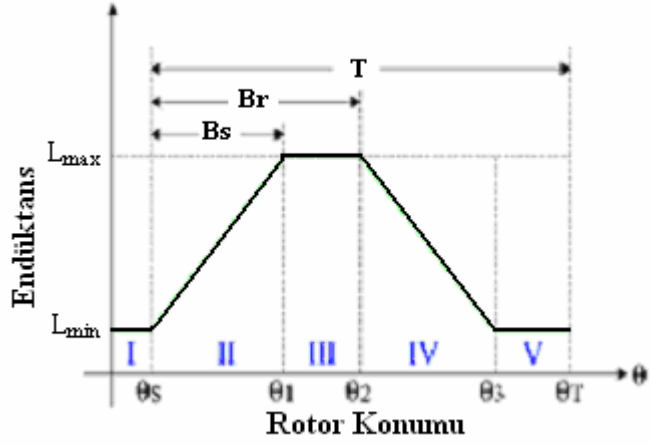
Anahtarlı relüktans motorunun denetim algoritmasını oluşturabilmek için etkin bir dinamik modeline ihtiyaç vardır. Diğer makinalarda de olduğu gibi anahtarlı relüktans motorunun iki çeşit modeli vardır. Bunlar:

1. Doğrusal Model
2. Doğrusal olmayan Model

### **4.2. Doğrusal Model**

Doğrusal modelde endüktansın doğrusal olmayan değişimi ihmal edilerek endüktansın rotor konumuna bağlı değişimi doğrusal kabul edilmektedir. Şekil 4.1.'de endüktansın rotor konumuna bağlı doğrusal değişimi gösterilmektedir. Endüktansın rotor konumuna bağlı değişimi de (4.1...4.5) denklemlerinde ifade edilmektedir.

Doğrusal model, denetim algoritmaları gerçekleştirilebilecek kadar etkin bir model değildir. Çünkü endüktansın rotor konumuna bağlı olarak doğrusal değiştiğine dair yapılan kabulden dolayı, modelden alınacak sonuçlarda hata olma olasılığı oldukça yüksektir. Bu yüzden bu çalışmada doğrusal model tercih edilmemektedir. Gerçek sistemin deneysel sonuçlarına daha yakın ve farklı denetim algoritmalarını uygulamak amacıyla doğrusal olmayan model tercih edilmektedir. Bu modelde esas alınan endüktans değişimi şekil 4.2.'de gösterildiği gibi olmaktadır.



Şekil 4.1: Doğrusal model için endüktans değişimi

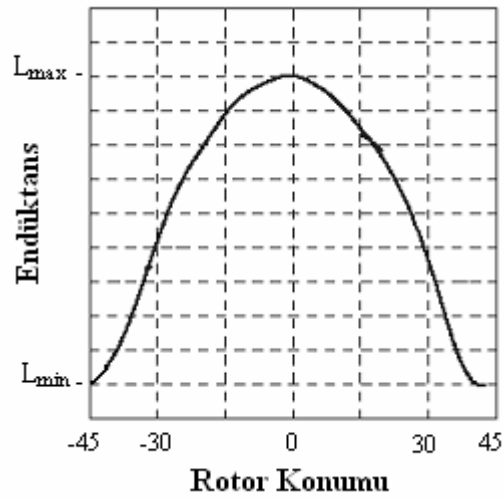
$$0 - \theta_s : L(\theta) = L_{\min} \quad (4.1)$$

$$\theta_s - \theta_1 : L(\theta) = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{\theta_1 - \theta_s} \theta + \frac{L_{\min} \theta_1 - L_{\max} \theta_s}{\theta_1 - \theta_s} \quad (4.2)$$

$$\theta_1 - \theta_2 : L(\theta) = L_{\max} \quad (4.3)$$

$$\theta_2 - \theta_3 : L(\theta) = \frac{L_{\min} - L_{\max}}{\theta_3 - \theta_2} \theta + \frac{L_{\max} \theta_3 - L_{\min} \theta_2}{\theta_3 - \theta_2} \quad (4.4)$$

$$\theta_3 - \theta_T : L(\theta) = L_{\min} \quad (4.5)$$



Şekil 4.2: Doğrusal olmayan model için endüktans değişimi

### 4.3. Doğrusal Olmayan Model

Anahtarlı relüktans motorun doğrusal olmayan dinamik modelinin elde edilebilmesi için moment-akım-rotor konumu ve akı-akım-rotor konumu ilişkilerini içeren grafikleri kullanmak gerekmektedir. Bu grafikleri elde etmek için iki yöntem vardır. Bunlar, sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel yöntemdir. Bu modelde sonlu elemanlar yöntemi kullanarak elde edilmiş olan grafikler kullanılmaktadır. Bu değerler Matlab\Simulink fonksiyonu olan S-Function içerisinde hazırlanan ön-değer tablolarına (Look-up table) aktarılarak dinamik model elde edilmektedir.

#### 4.3.1 ARM'nun dinamik karakteristiği

Bir anahtarlamalı relüktans motorun dinamik modeli, her faz için elektriksel eşitliklerin ve mekaniksel sistem eşitlerin düzenlenmesiyle elde edilmektedir. Herhangi bir m fazlı anahtarlamalı relüktans motorunun bir faz gerilim eşitliği (4.6)'deki gibidir.

$$V_j = R_j \cdot i_j + \frac{d\psi_j(i_j, \theta_j)}{dt}, \quad j = 1, \dots, m. \quad (4.6)$$

Burada,  $V_j$  faz gerilimi,  $i_j$  faz akımı,  $R_j$  faz sargısının direnci ve  $\theta_j$  ise belirli faz için tanımlanan rotor konumudur. Bununla birlikte akı, akım ve rotor konumunun bir fonksiyonudur. Bundan dolayı gerilim eşitliği tekrar (4.7)'deki gibi yazılabilmektedir.

$$V_j = R_j \cdot i_j + \frac{\partial \psi_j}{\partial i_j} \cdot \frac{di_j}{dt} + \frac{\partial \psi_j}{\partial \theta_j} \cdot \frac{d\theta_j}{dt} \quad (4.7)$$

Bu eşitlikten de faz akımı denklem (4.8)'deki gibi çıkarılmaktadır.

$$\frac{di_j}{dt} = \left( \frac{\partial \psi_j}{\partial i_j} \right)^{-1} \cdot \left( v_j - R_j \cdot i_j - \frac{\partial \psi_j}{\partial \theta_j} \omega \right) \quad (4.8)$$

Burada,  $\omega$  rotorun açısal hızıdır.

Mekanik bölümde ise eşitlikler denklem (4.9) ve (4.10)'daki gibi çıkarılmaktadır.

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (4.9)$$

$$\sum_{j=1}^m M_j(i_j, \theta_j) - M_y = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \omega \quad (4.10)$$

Burada,  $\theta$  rotor konum açısı,  $M_j$  faz momenti,  $M_y$  ise yük momentidir.  $J$  ve  $B$  sırası ile eylemsizlik momenti ve sürtünme katsayısıdır. Denklem (4.10) mekanik kısmın moment eşitliğini ifade etmektedir. Bu eşitlikten hız tekrar düzenlenirse denklem (4.11) elde edilmektedir.

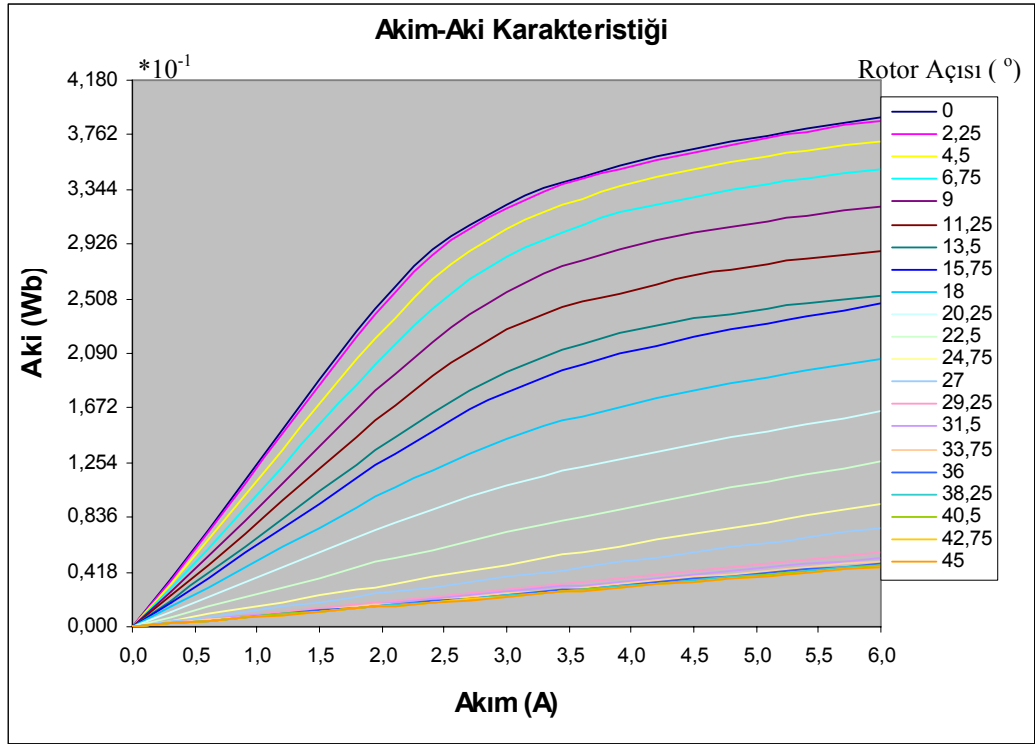
$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot \left( \sum_{j=1}^m M_j(i_j, \theta_j) - M_y - B \cdot \omega \right) \quad (4.11)$$

#### 4.3.2. Akım ve moment ön-değer tablolarının (look-up table) hazırlanması

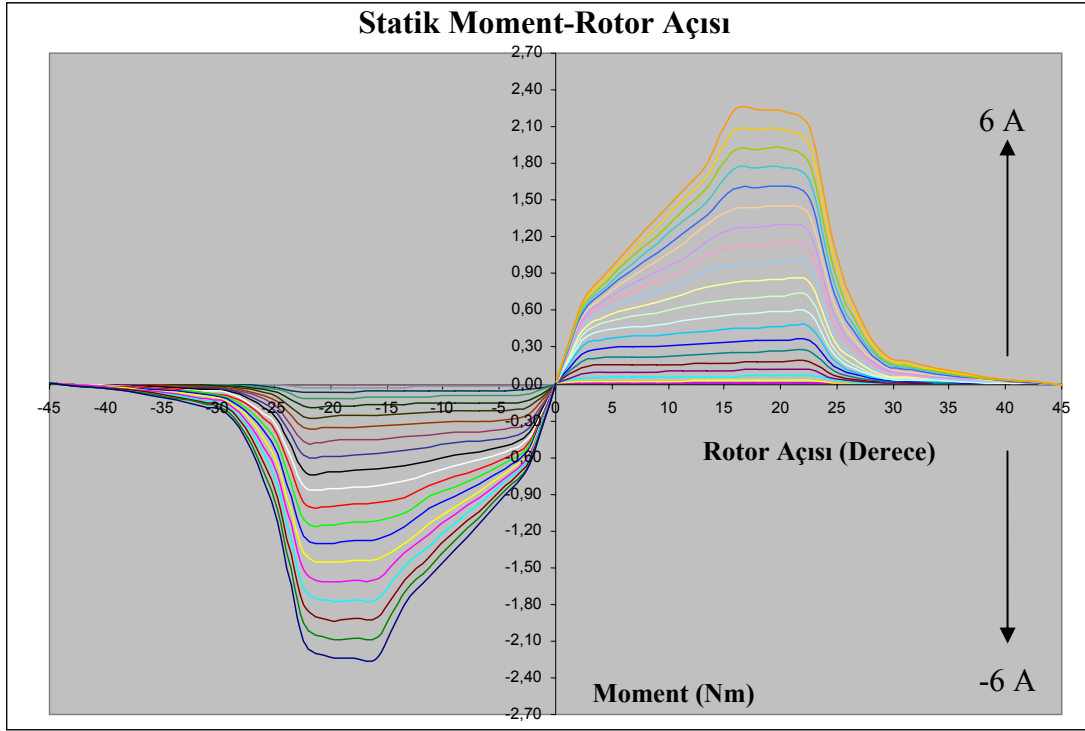
Anahtarlı relüktans motorunun dinamik modeli için gerekli olan makinaya ait akı ve moment karakteristikleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 4.4.'de moment-akım-rotor konumu ilişkisini, şekil 4.3.'de ise akı-akım-rotor konumu ilişkisini içeren grafikler gösterilmektedir. Daha sonra dinamik modelde kullanmak üzere şekil 4.3.'deki akım-akı-rotor konumu ilişkisi akım ön-değer tablosuna (akım look-up table) ve aynı şekilde şekil 4.4.'deki moment-rotor konumu-akım ilişkisi moment ön-değer tablosuna (moment look-up table) aktarılmaktadır.

Şekil 4.4.'deki grafikte 0-45° aralığında 45 farklı rotor konumu ve 0-6A aralığındaki 21 farklı akım değeri (45 rotor konumu\* 21 akım) kullanılmaktadır. Şekil 4.3.'deki akı karakteristiğini gösteren grafikte ise 0-45° aralığında 45 farklı rotor konumu ve 21 farklı akı değeri (45 rotor konumu\*21 akı) kullanılmaktadır.

Burada daha hassas bir model elde etmek amacıyla, rotor konumu, akım ve akının ara değerleri de göz önüne alınmakta ve bunlar için fonksiyon oluşturulmaktadır. Akım ön-değerler tablosunu oluştururken tabloya göre ardışık olan iki rotor konumu ve iki akı değerleri arasındaki değişimin doğrusal olduğu varsayılmakta ve bir önceki değer ve bir sonraki değere doğrusal bir fonksiyon oluşturulmaktadır. Moment ön-değerler tablosunda ise, ardışık olan iki rotor konumu arasında, şekil 4.4.'deki grafiklerin Matlab\Curve Fitting Tool'da eğri uydurma yöntemi kullanarak elde edilen fonksiyonlar, momentin akıma göre değişim fonksiyonu olmakta ve bu şekilde akımın ara değerleri de hesaba katılmış olmaktadır.



Şekil 4.3: Akım-akı-rotor konumu arasındaki ilişki



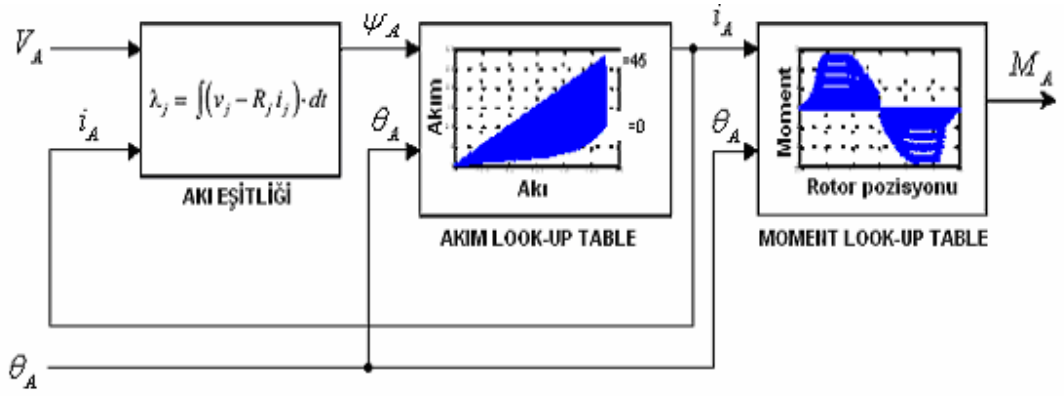
Şekil 4.4: Moment-rotor açısı-akım arasındaki ilişki

### 4.3.3. Dinamik modelin elde edilmesi

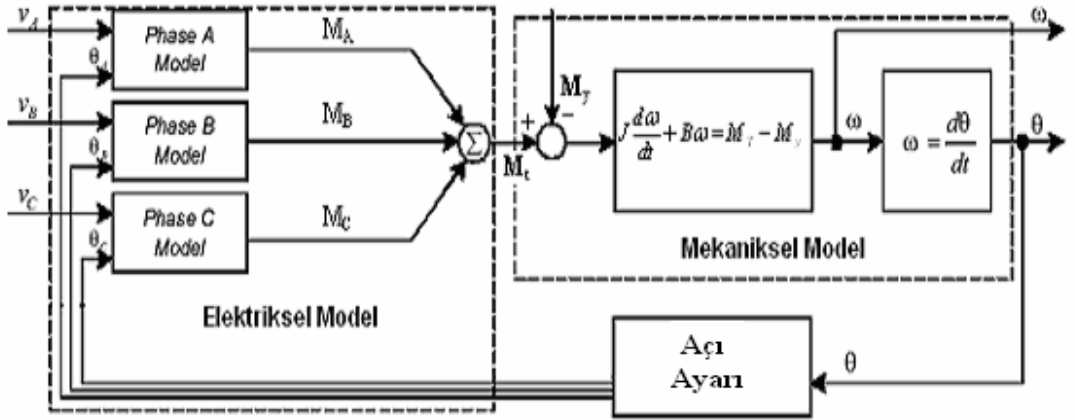
Doğrusal olmayan dinamik model oluşturulurken, giriş gerilimi ve rotor konumu biliniyor ise, faz akımını ve faz momentini elde etmek için bölüm (4.2)'de bahsedilen akım ve moment ön-değer tabloları (look-up table) kullanılmaktadır. Şekil 4.5.'de bir fazın dinamik modeli blok diyagramı olarak gösterilmektedir. Bu şekilde ARM'nun bir fazından momentin ( $M_A$ ) elde edilmesi özetlenmektedir.

Burada  $V_A$  giriş geriliminden, denklem (4.3.7)'de gösterilen eşitlikten akı ( $\psi_A$ ) hesaplanmakta ve akım ön-değerler tablosu bloğuna birinci giriş olarak verilmektedir. Şekil 4.6.'da gösterilen üç-fazlı ARM'nun tüm fazların dinamik modellerinin ve mekanik alt sistemin de içinde bulunduğu genel blok diyagramının çıkışından elde edilen rotor pozisyonu ( $\theta_A$ ) değeri de, akım ön-değerler tablosu bloğunun ve şekil 4.5.'deki moment ön-değerler tablosu bloğunun ikinci girişi olmaktadır. Moment ön-değerler tablosunun birinci girişi olan akım değeri ( $i_A$ ) bir önceki blok olan akım ön-değerler tablosu bloğunda hesaplanmaktadır.

$$\psi_j = \int (v_j - R_j \cdot i_j) \cdot dt \quad (4.3.7)$$



Şekil 4.5: ARM bir fazın dinamik modeli



Şekil 4.6: Üç fazlı ARM'nun dinamik modelinin blok diyagramı

#### 4.3.4. ARM'nun sürücü sistemi

Anahtarlı relüktans motorunun denetimi tek yönlü faz akımıyla gerçekleştirilebilmektedir. Denetim kısmı başlıca iki aralıktan oluşmaktadır. Bunlar kıyılma ve tek darbe aralığı ile söndürme aralıklarıdır. Denetim işlemi, ARM fazının iletme girdiği andan kesime girdiği ana kadar olan kısımda olmaktadır. Denetim işleminde referans olarak faz akımı alınmaktadır. Bu akımın denetimi, kapalı çevrim olarak gerçekleştirilen sistemde DGA (Darbe Genişlik Ayarı) veya histerezis denetimi kullanılarak akımın kıyılması ile başarılmaktadır. Bu çalışmada histerezis akım kıyıcı ile akım kontrolü yapılmaktadır.

- Kıyılma ve tek darbe aralığı

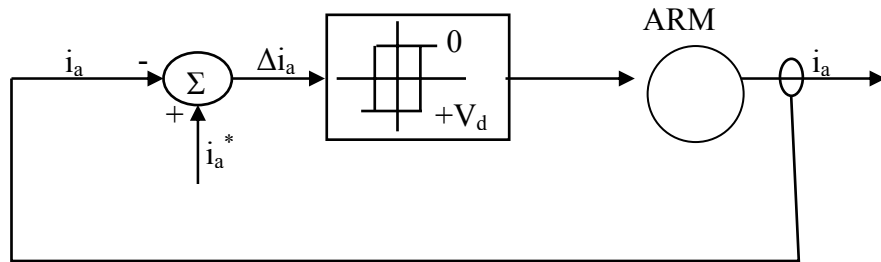
Bu aralık, fazın iletim açısı ( $\theta_{on}$ ) ile kesim açısı ( $\theta_{off}$ ) arasındaki bölümü kapsamaktadır. Bu aralıkta gerçekleşen kıyılma süresi boyunca, faz akımının denetimi histerezis akım kısıyıcı ile dolayısıyla akım, besleme gerilimi tarafından denetlenmektedir. Aynı şekilde yine bu aralıkta gerçekleştirilen tek darbe modunda çalışmada ise, faza iletim süresi boyunca kesintisiz besleme gerilimi ( $V_d$ ) uygulanmaktadır.

- Söndürme aralığı

ARM fazının kesime girdiği  $\theta_{off}$  açısından faz akımının sıfıra düştüğü söndürme açısına ( $\theta_{sönd}$ ) kadar devam eden bu aralıkta, faza tamamen ters gerilim ( $-V_d$ ) uygulanmaktadır.

#### 4.3.4.1. Histerezis akım denetleyici

Histerezis akım denetimi yaparken ilk olarak, endüktansın pozitif olduğu bölümde sargıdan geçmesi gereken genliği  $I_{ref}$  olan bir akım belirlenmektedir. Bu referans akımına göre, faz referans akım ( $i_a^*$ ) üretmektedir. Daha sonra şekil 4.7.'de gösterildiği gibi bu fazın akımı kapalı çevrim kullanılarak uygulanır. Burada, referans akım ile gerçek faz akımı karşılaştırılır. Elde edilen akım hatası bir histerezis denetleyici ile işlenir. Histerezis denetleyici için bir hata bandı ( $\Delta i_a$ ) seçilmektedir. Karşılaştırma sonucundaki akım hatası ( $i_a^* - i_a$ ) negatif hata toleransını ( $-\Delta i_a$ ) aşarsa, faza uygulanan gerilim kesilir. Şayet akım hatası ( $i_a^* - i_a$ ) pozitif hata toleransını ( $\Delta i_a$ ) aşarsa, faza gerilim ( $V_d$ ) uygulanır.

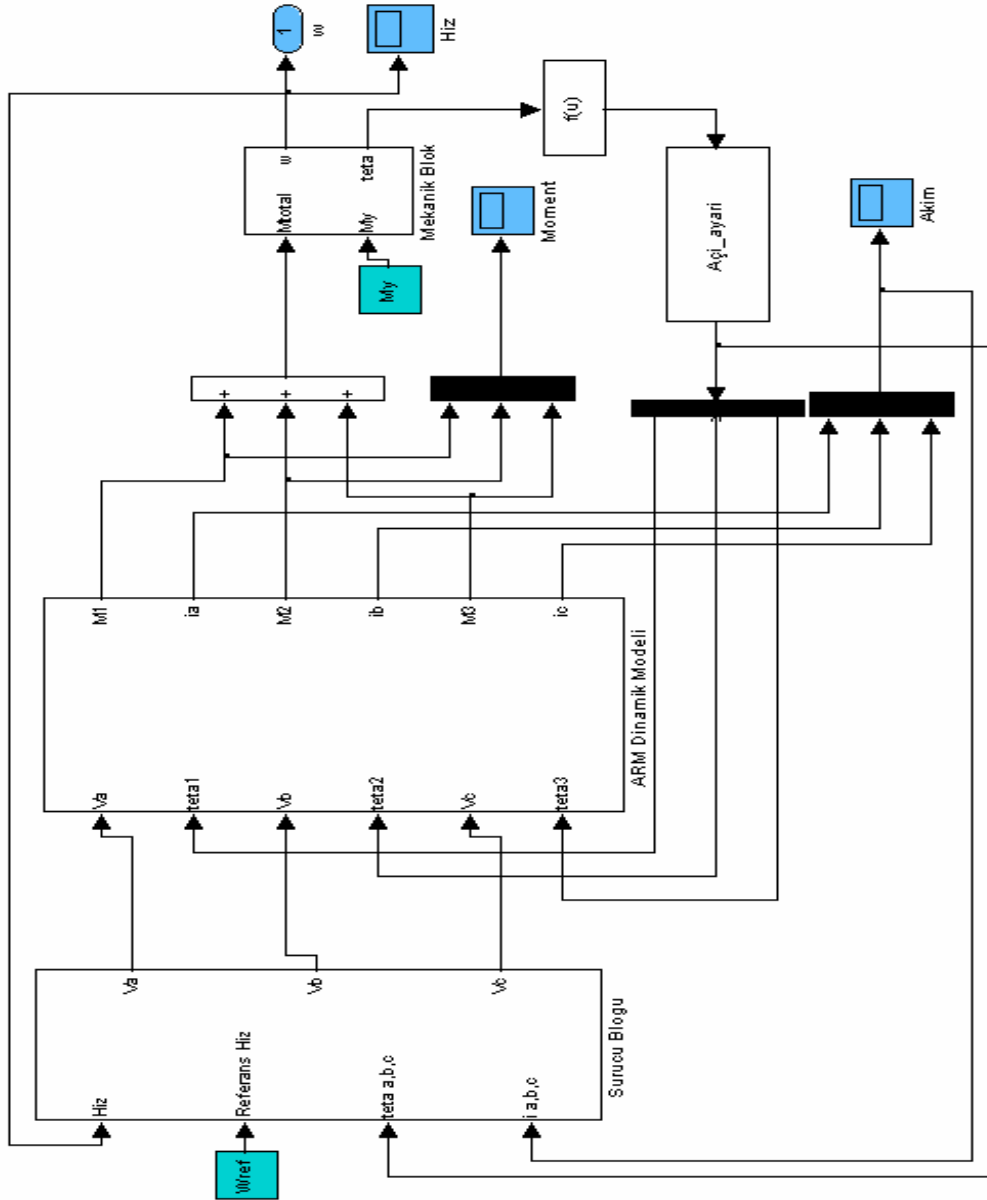


Şekil 4.7: Histerezis akım denetleyici çalışması

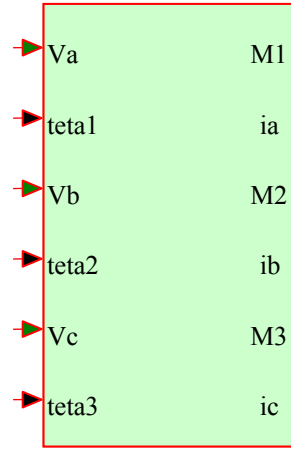


#### 4.4. Üç Fazlı ARM'nun Matlab\Simulink Modeli

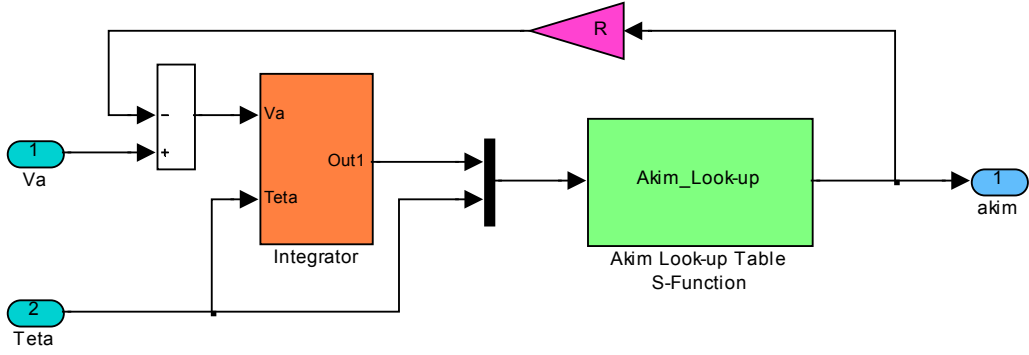
Şekil 4.8.'de üç fazlı ARM'nun dinamik modelinin ve sürücü sisteminin Matlab\Simulink modeli gösterilmektedir. ARM'nun dinamik modelinin blok şeması şekil 4.9.'da gösterilmektedir. Şekil 4.9.'daki ARM'nun dinamik modelinin alt sistemleri olan şekil 4.10. ve şekil 4.11.'de sırasıyla, gerilim ve açı bilgisinden akımın elde edilmesi ile akım ve açı bilgisinden moment bilgisinin elde edilmesi gösterilmektedir.



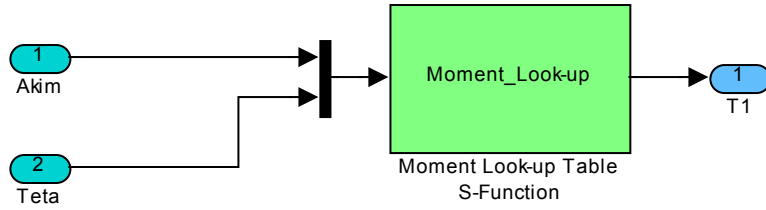
Şekil 4.8: Üç fazlı ARM'nun dinamik modeli ve sürücü sisteminin blok diyagramı



Şekil 4.9: ARM'ın dinamik modeli



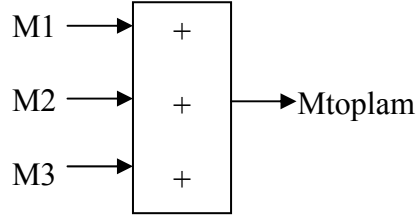
Şekil 4.10: Gerilim ve açı bilgisinden akımın elde edilmesini gösteren dinamik modelin alt sistemi



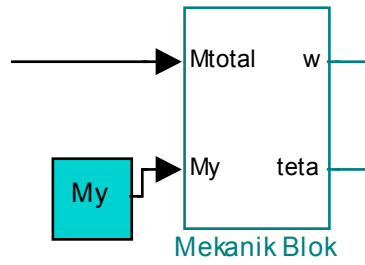
Şekil 4.11: Akım ve açı bilgisinden moment bilgisinin elde edilmesini gösteren dinamik modelin alt sistemi

Şekil 4.12.'de dinamik modelde her bir fazdan elde edilen momentlerin toplanması ile toplam momentin ( $M_{\text{toplam}}$ ) elde edilmesini gösterilmektedir. Yük momenti ( $M_y$ ) ve toplam moment ( $M_{\text{toplam}}$ ) bilgisinden hız ve açı bilgisinin elde edilmesini sağlayan

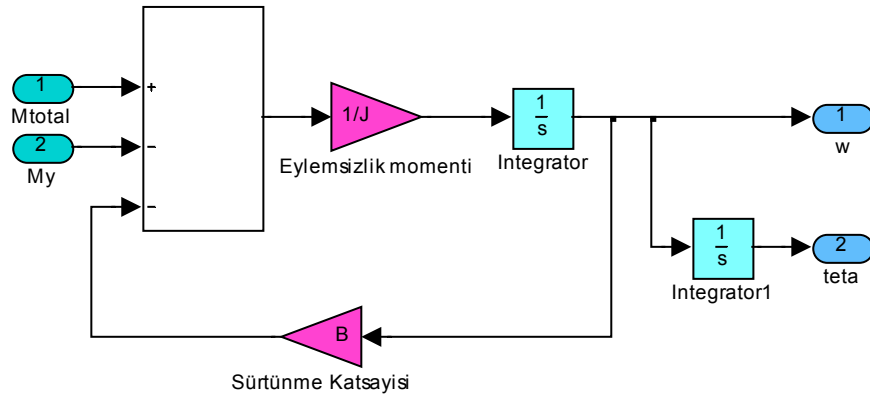
mekanik blok ve bunun alt sistemi sırasıyla, şekil 4.13. ve şekil 4.14'de gösterilmektedir.



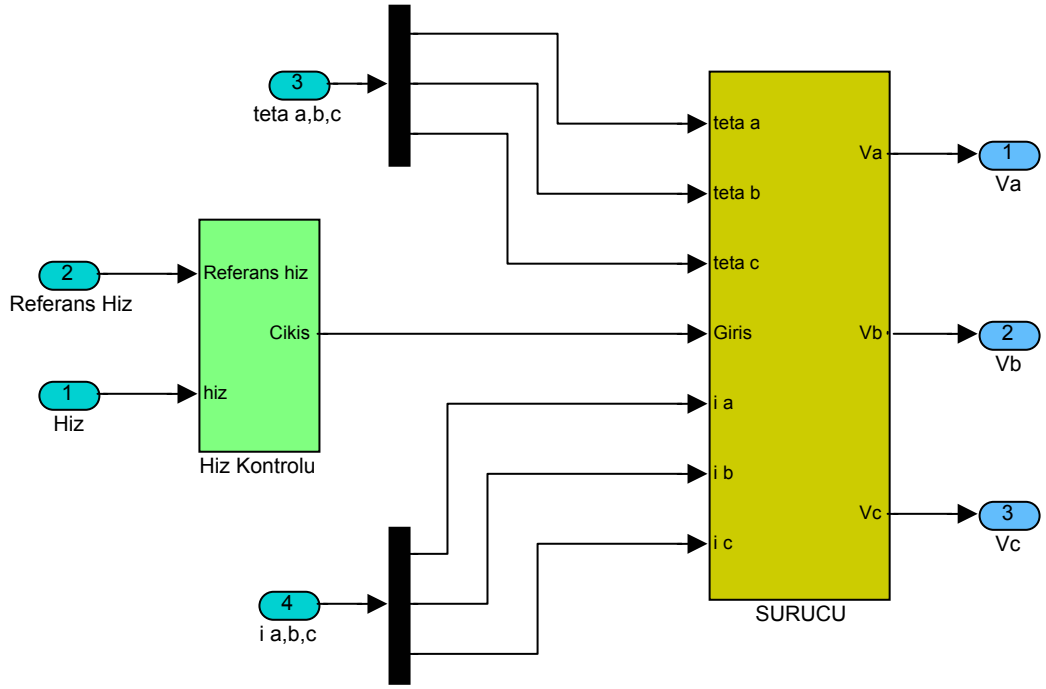
Şekil 4.12: Toplam momentin elde edişi



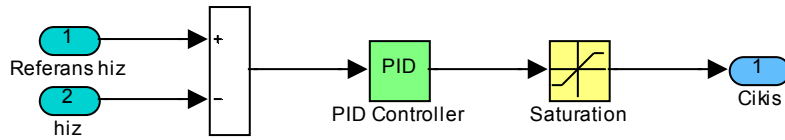
Şekil 4.13: Yük momenti ( $M_y$ ) ve toplam moment ( $M_{\text{toplam}}$ ) bilgisinden hız ve açı bilgisini elde eden mekanik blok



Şekil 4.14: Mekanik bloğun alt sistemi

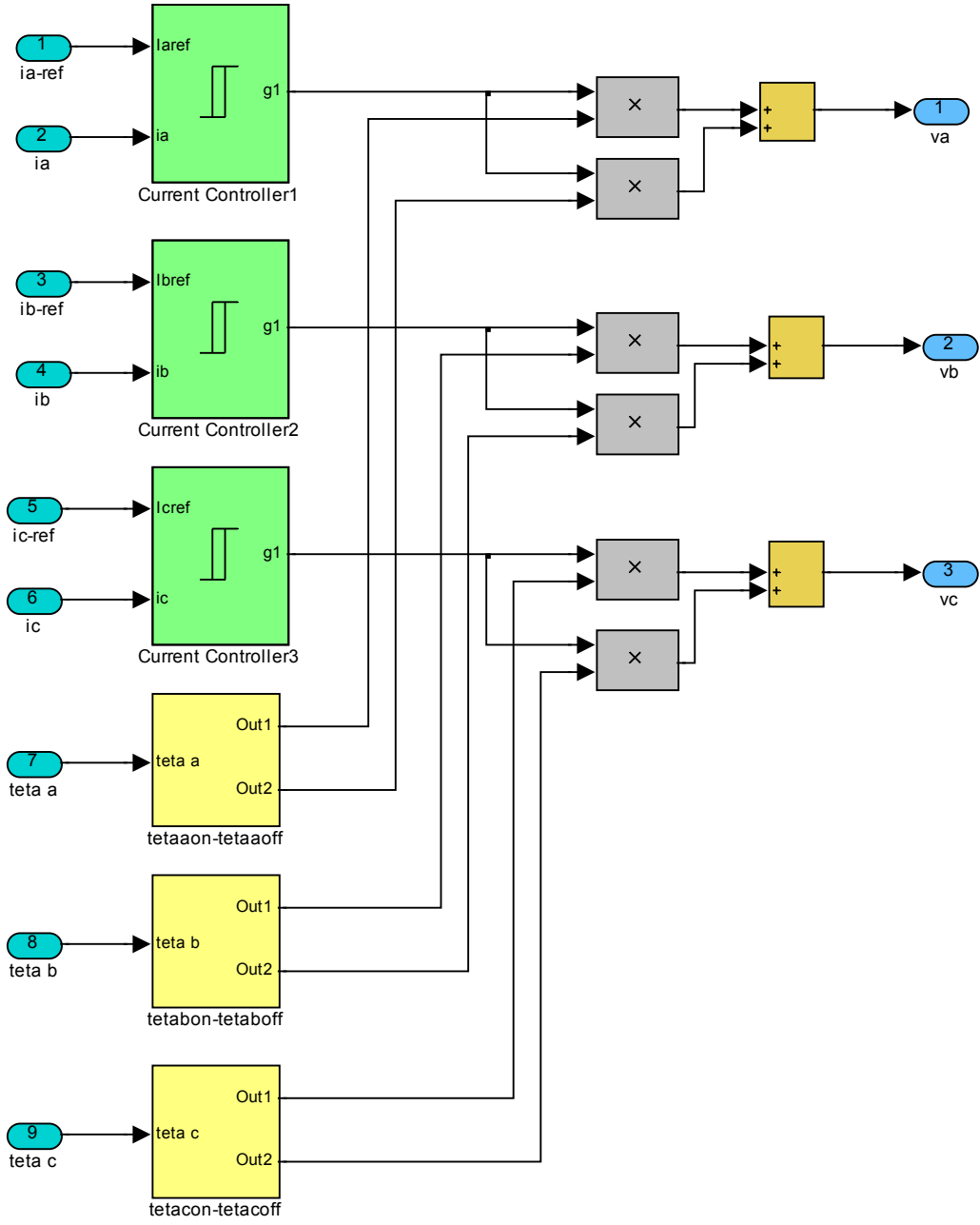


Şekil 4.15: Sürücü ve hız kontrolcüsü blok diyagramı



Şekil 4.16: PID kontrolöründen akım referanslarının elde edilişi

ARM'nun sürücü bloğu ve hız kontrol bloğu şekil 4.15.'de verilmektedir. Şekil 4.16.'da PID denetleyicisinden akım referanslarının elde edilmesini sağlayan hız kontrol bloğunun alt sistemi gösterilmektedir. Şekil 4.17.'de ise, sürücü bloğunun alt sistemi verilmektedir.



Şekil 4.17: Sürücü bloğunun alt sistemi

## BÖLÜM 5. ÜÇ FAZLI ARM SİMÜLASYON SONUÇLARI

Bu bölümde, Bölüm 4'te anlatılan 6/4 kutuplu üç fazlı ARM sisteminin farklı hızlarda simülasyonu gerçekleştirilmekte ve sonuçları verilmektedir. Aşağıda ARM'una ait çeşitli parametreler, iletim ve kesim açıları değerleri görülmektedir.

$$R=2.2\Omega$$

$$J=0.0004 \text{ kg.m}^2$$

$$B=0.001 \text{ Nm.s/rad}$$

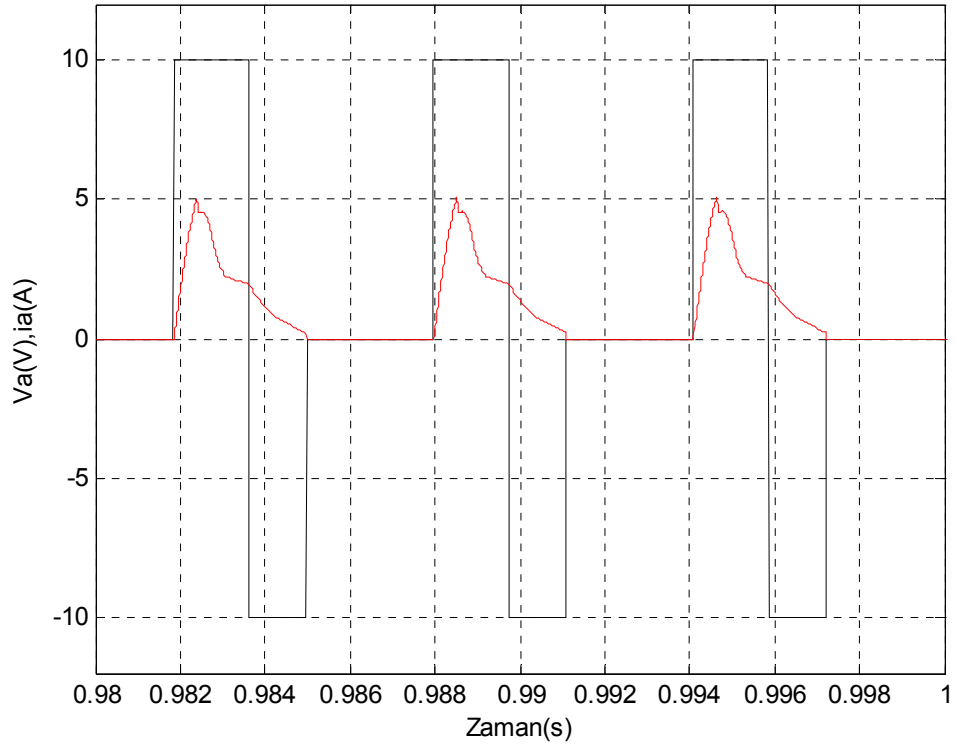
$$\theta_{\text{on}} (\text{iletime girme açısı}) = 36^\circ$$

$$\theta_{\text{off}} (\text{kesime girme açısı}) = 10^\circ$$

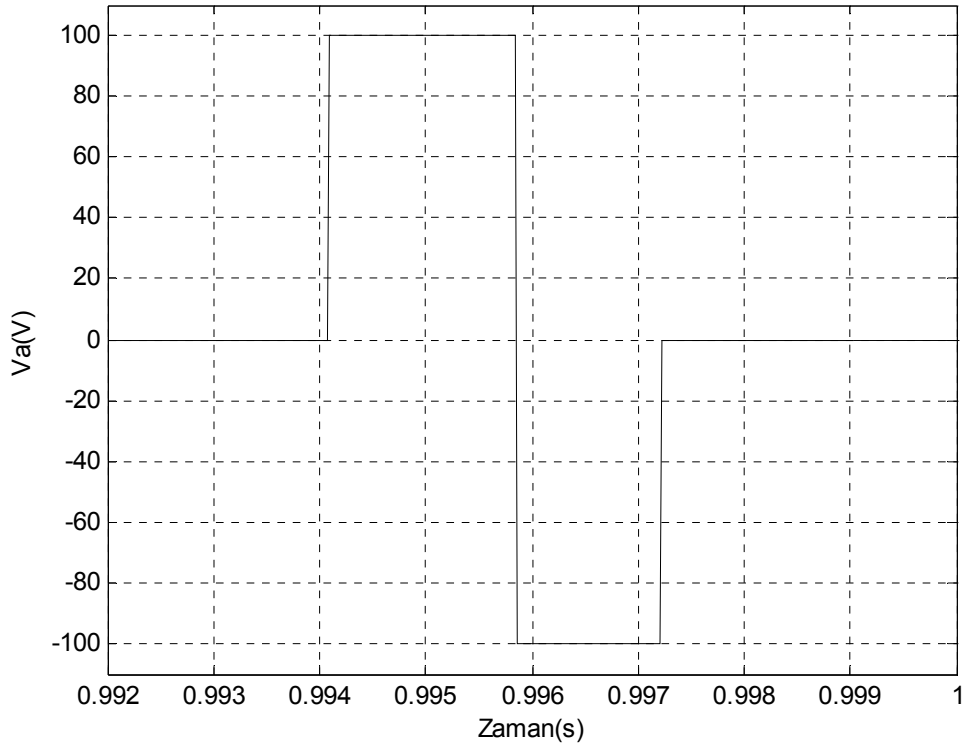
Yapılan simülasyonlarda, ARM'nun düşük ve yüksek hızdaki akım, gerilim ve moment çıkışları verilmektedir. Düşük hızda, ARM kıyılma modunda çalışmaktadır. Bu çalışma modunda faz akımı, fazın iletim süresi boyunca histerezis akım kısıyıcı ile referans akım seviyesinde tutulmaya çalışılmaktadır. Yüksek hızda, ARM'u tek darbe modunda çalışmaktadır. Burada motora tek darbe gerilimi uygulanmakta ve motorun bu darbeye karşı dinamik davranışı gözlenmektedir. Bu çalışma modunda histerezis akım kısıyıcı devre dışıdır.

Şekil 5.1-5.7.'de ARM'nun yüksek hızda, tek darbe modunda, 100V besleme geriliminde ( $V_{DA}$ ) ve yük momentinin  $M_y=0.3\text{Nm}$  değeri için sırasıyla, tek faz gerilim-akım ( $V_a-i_a$ ), gerilim ( $V_a$ ), akım ( $i_a$ ), üç faz akımı ( $i_a,i_b,i_c$ ), tek faz momenti ( $M_a$ ), devir sayısı ( $n$ ) ve toplam momentin simülasyon sonuçları verilmektedir.

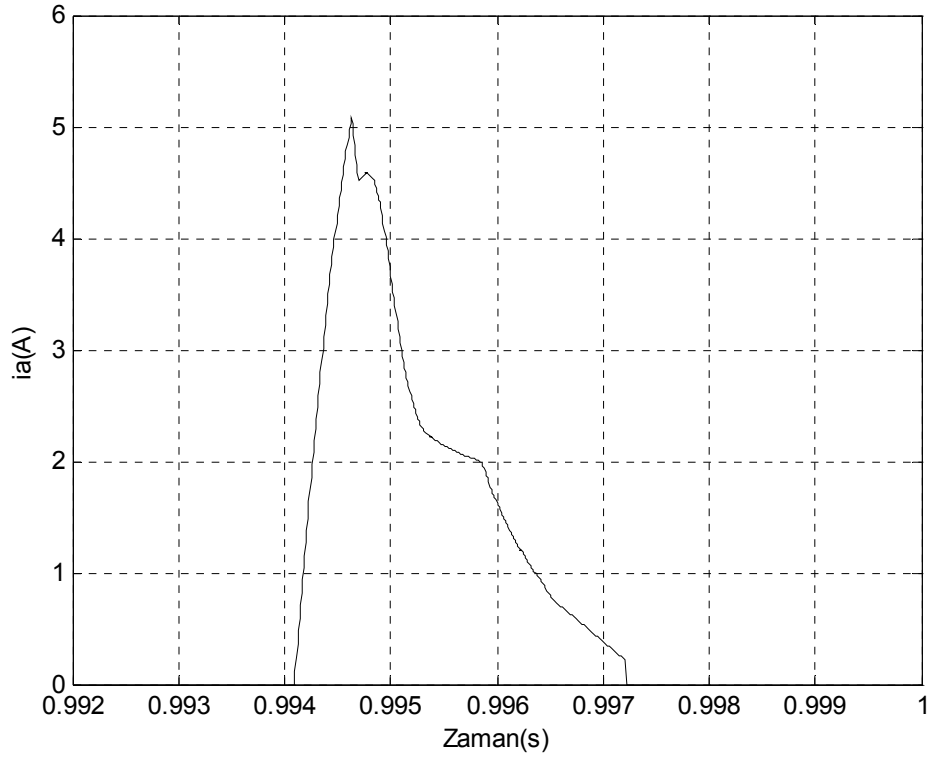
Şekil 5.8-5.14.'de ARM'nun düşük hızda, kıyılma modunda, 100V besleme geriliminde ( $V_{DA}$ ) ve yük momentinin  $M_y=0.8\text{Nm}$  değeri için sırasıyla, tek faz gerilim-akım ( $V_a-i_a$ ), gerilim ( $V_a$ ), akım( $i_a$ ), üç faz akımı ( $i_a,i_b,i_c$ ), tek faz momenti ( $M_a$ ), devir sayısı ( $n$ ) ve toplam momentin simülasyon sonuçları verilmektedir.



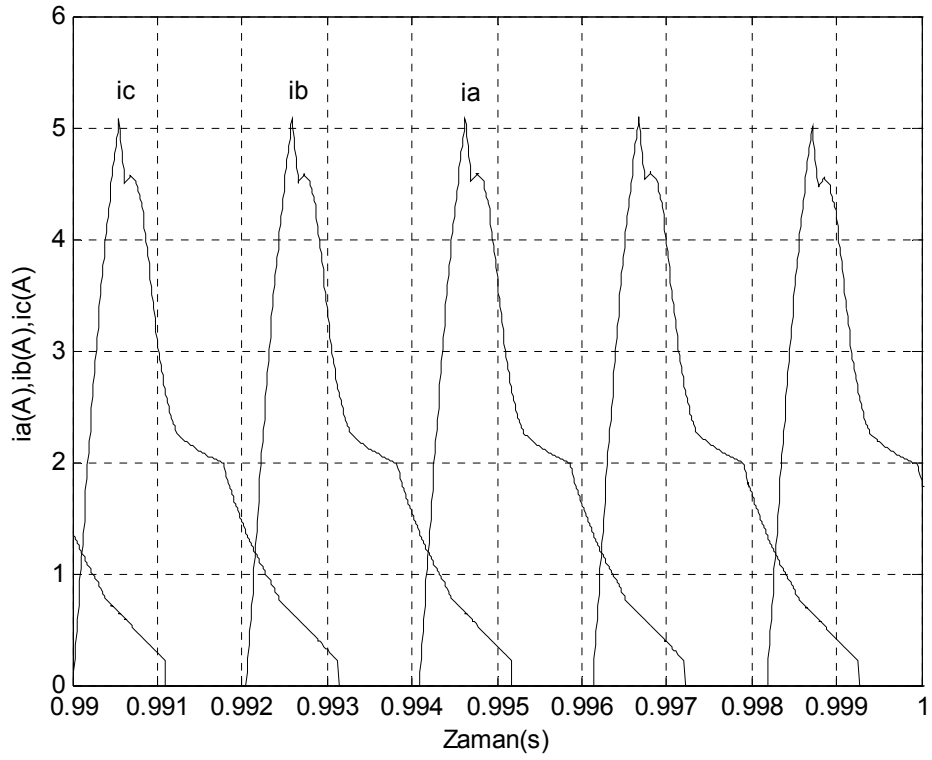
Şekil 5.1: Yüksek hızda, faz geriliminin (\*10) ve akımının zamana bağlı değişimleri



Şekil 5.2: Yüksek hızda, faz geriliminin ( $V_a$ ) zamana bağlı değişimi

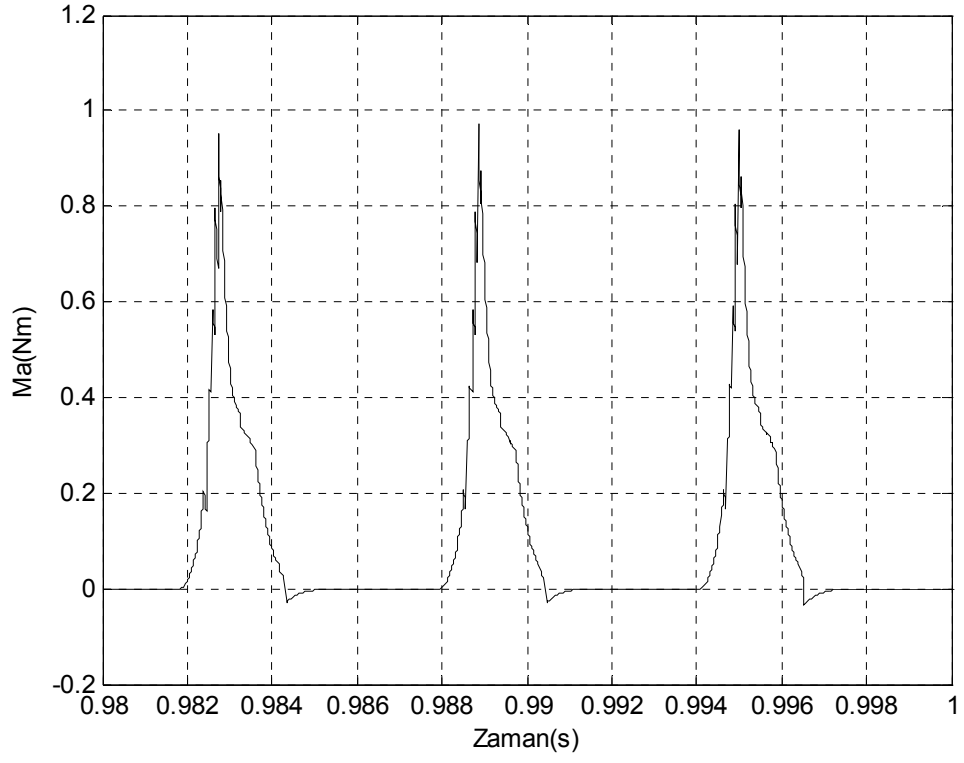


Şekil 5.3: Yüksek hızda, faz akımının ( $i_a$ ) zamana bağlı değişimi

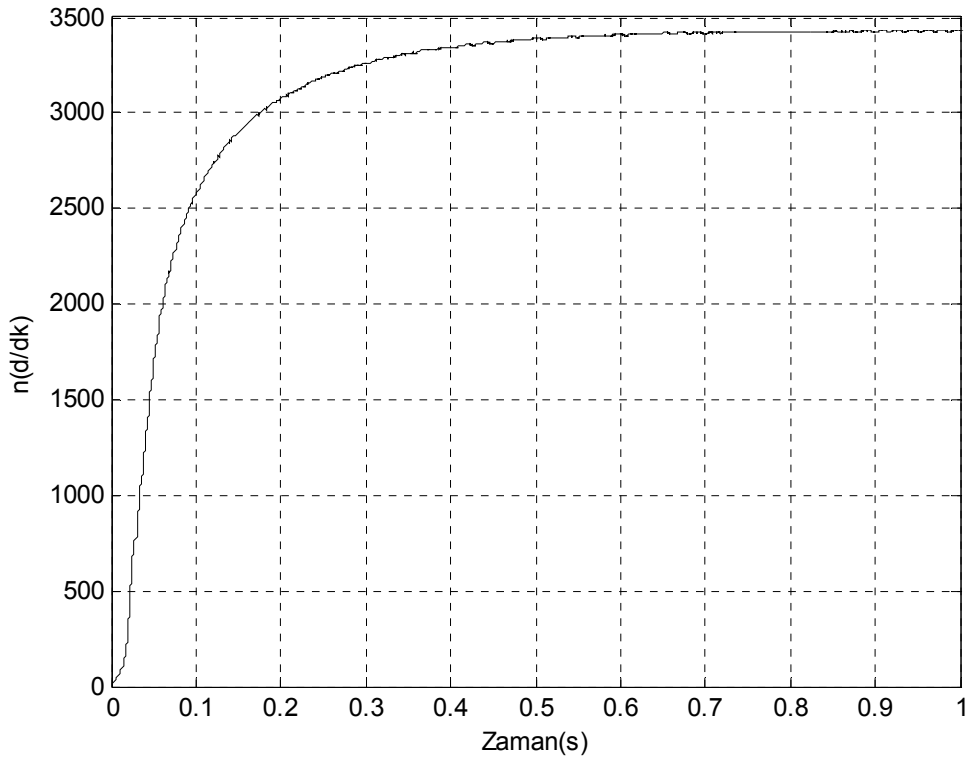


Şekil 5.4: Yüksek hızda, üç faz akımının ( $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ ) zamana bağlı değişimi

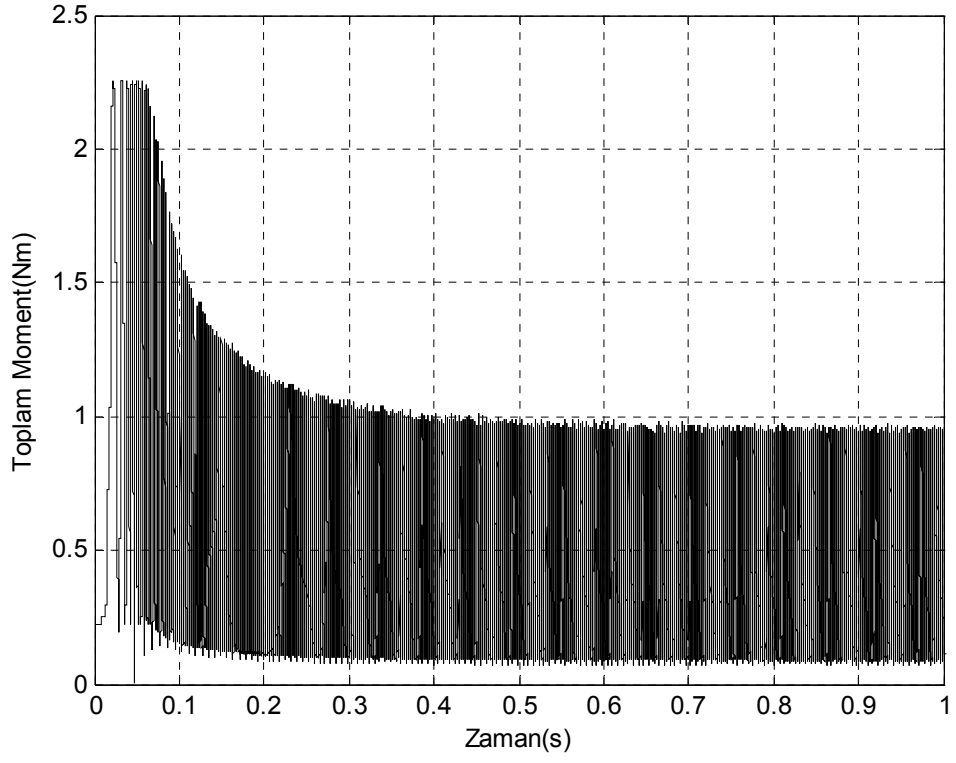




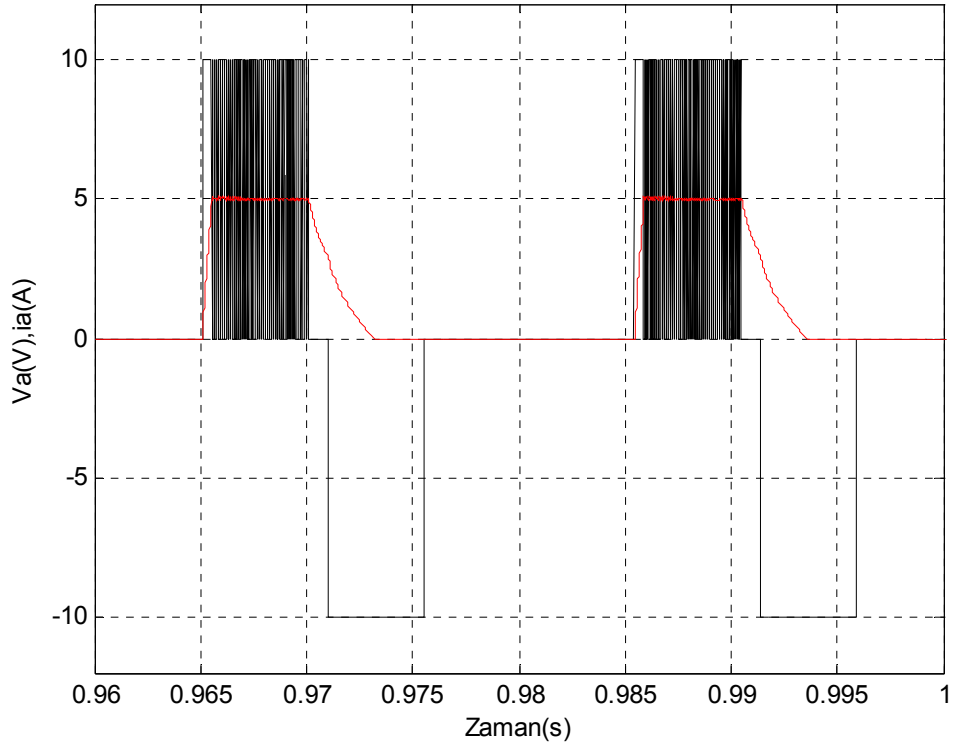
Şekil 5.5: Yüksek hızda, bir fazdaki momentin (Nm) zamana bağlı değişimi



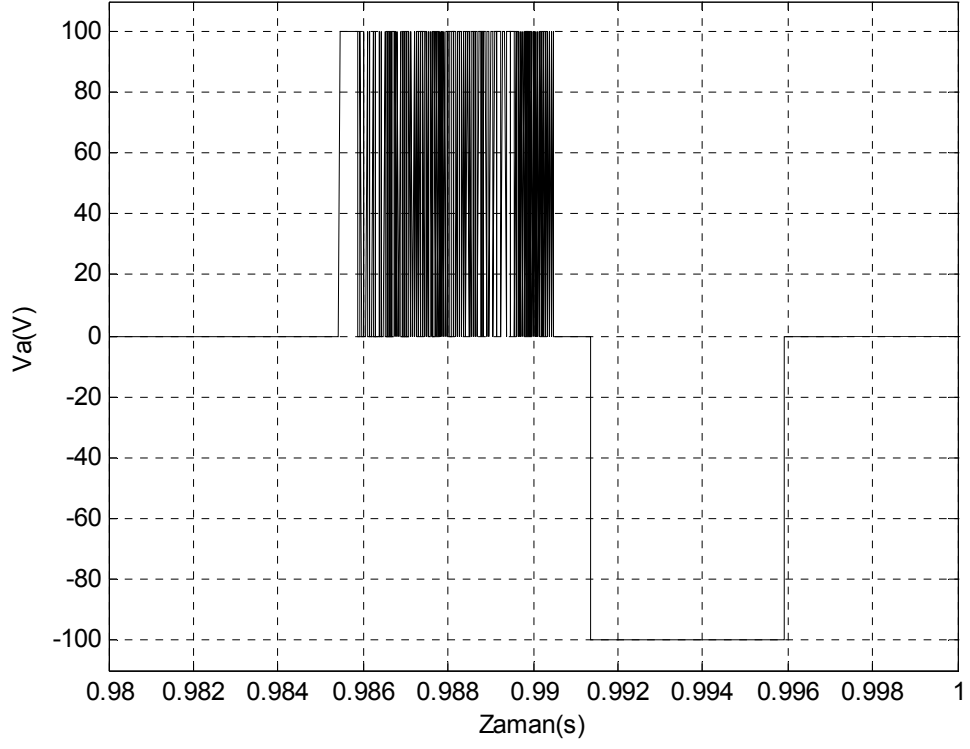
Şekil 5.6: Yüksek hızda, devir sayısının (n) zamana bağlı değişimi



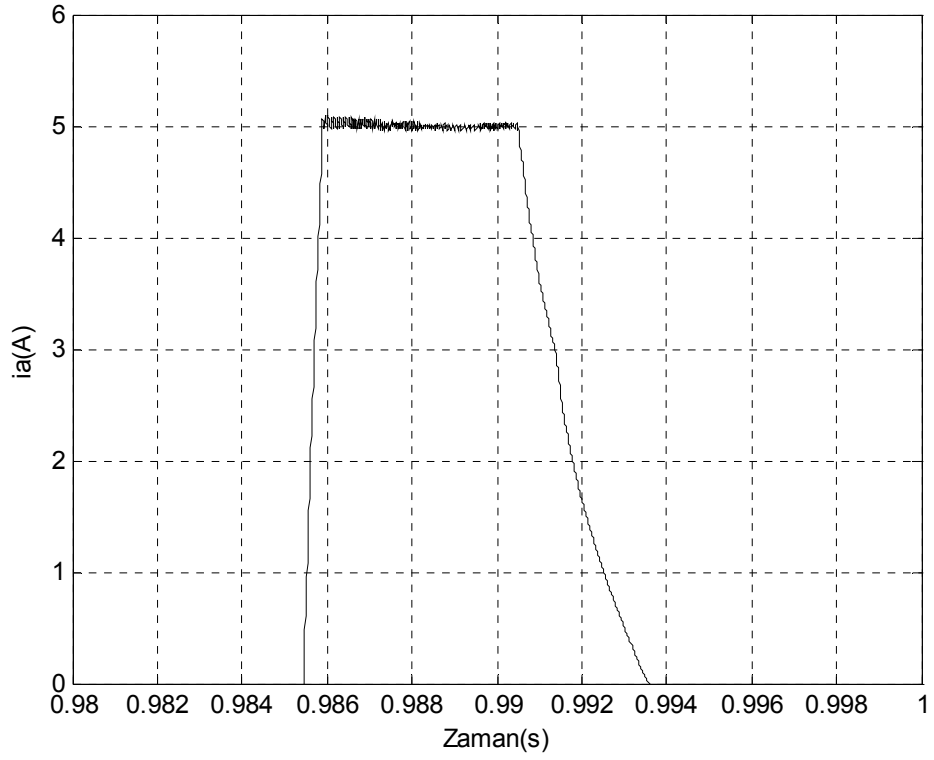
Şekil 5.7: Yüksek hızda, toplam momentin (Nm) zamana bağlı değişimi



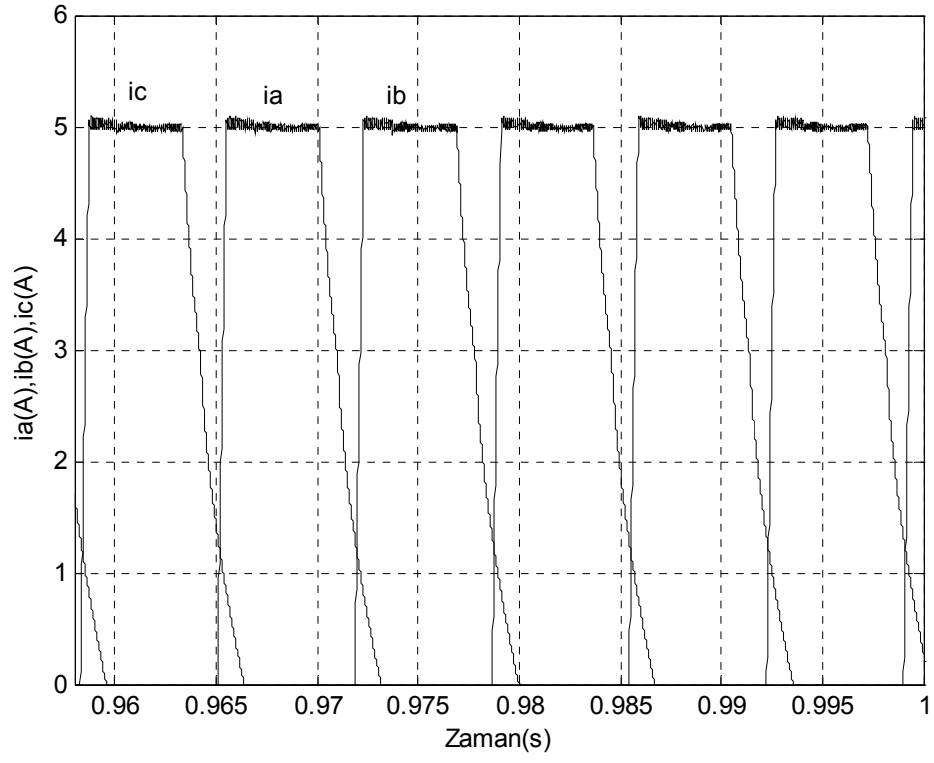
Şekil 5.8: Düşük hızda, faz geriliminin (\*10) ve akımının zamana bağlı değişimleri



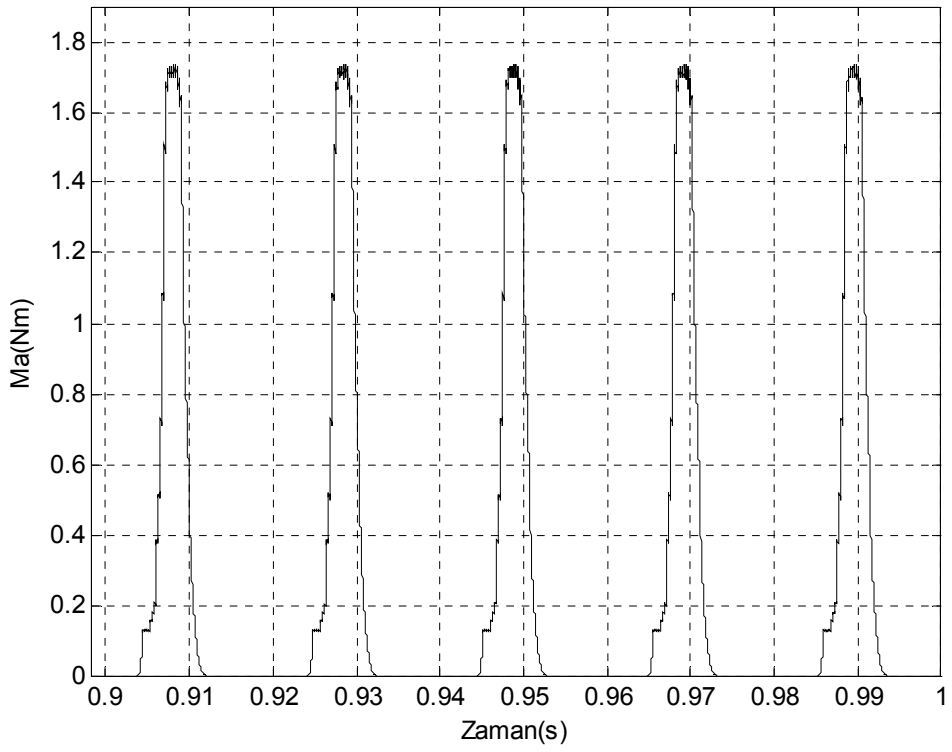
Şekil 5.9: Düşük hızda, faz geriliminin ( $V_a$ ) zamana bağlı değişimi



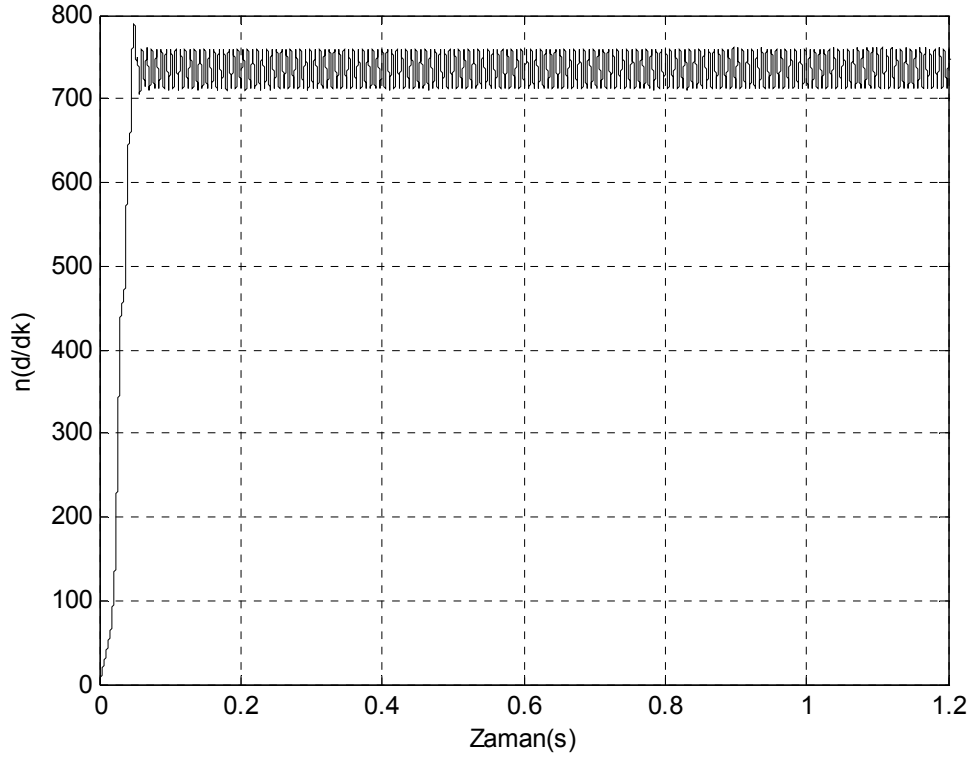
Şekil 5.10: Düşük hızda, faz akımının ( $i_a$ ) zamana bağlı değişimi



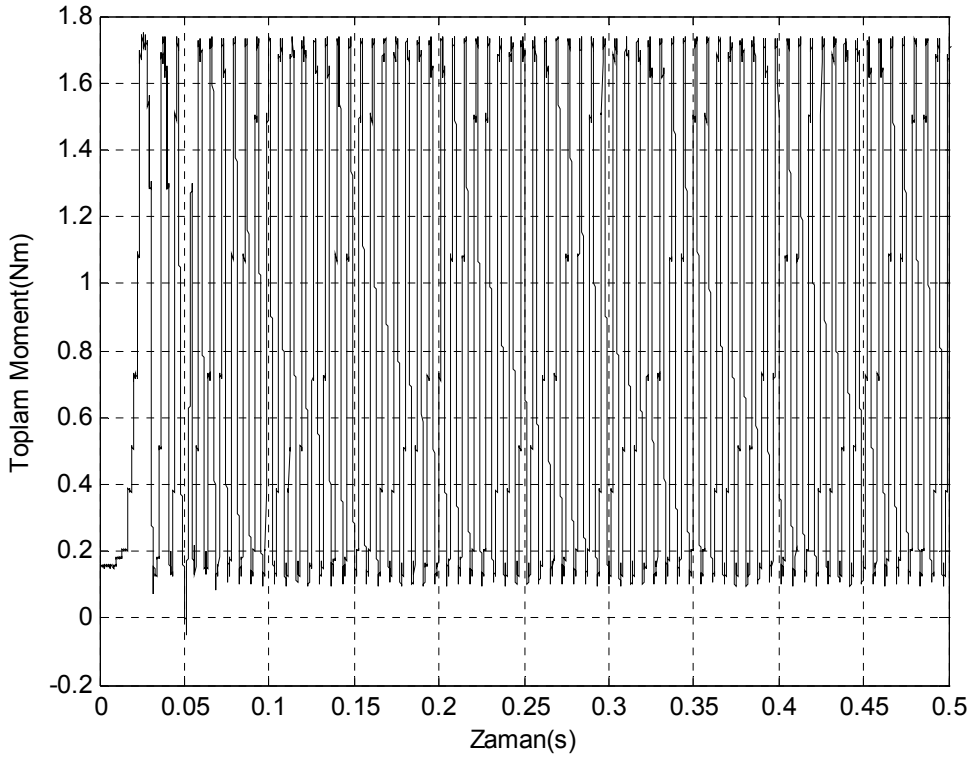
Şekil 5.11: Düşük hızda, üç faz akımının ( $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ ) zamana bağlı değişimi



Şekil 5.12: Düşük hızda, bir fazdaki momentin (Nm) zamana bağlı değişimi



Şekil 5.13: Düşük hızda, devir sayısının (n) zamana bağlı değişimi



Şekil 5.14: Düşük hızda, toplam momentin (Nm) zamana bağlı değişimi

## BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, küçük güçlü 6/4 kutuplu bir anahtarlı relüktans motorunun dinamik modeli oluşturulmuş ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Daha sonra elde edilen simülasyon sonuçları ile aynı makineye ait deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve oluşturulan dinamik modelin doğruluğu ispatlanmıştır.

Dinamik modelin oluşturulabilmesi için ilk olarak, motora ait bazı parametrelerin bilinmesi gerekmektedir. Bunlar akı-akım-rotor konumu ve moment-akım-rotor konumu ilişkileridir. Bu parametreler deneysel olarak yada sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenebilmektedir.

Akı-akım-rotor konumu ve moment-akım-rotor konumu parametrelerinin belirlenmesinde, birinci yöntem olan deneysel yöntem, ölçüm metotlarına dayanmaktadır. Bu yöntem motorun farklı rotor pozisyonlarında, motorun fazlarına gerilim uygulayarak, faz akımının artışıyla birlikte motorda oluşan akı ve moment değerlerinin elde edilmesi esasına dayanmaktadır. Bunun için yüksek hassasiyette akı ölçüm cihazı ve moment ölçüm cihazına gerek duyulmaktadır. Deneysel yöntemin zorluğu nedeniyle motora ait parametrelerin belirlenmesinde ikinci yöntem olan, sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır.

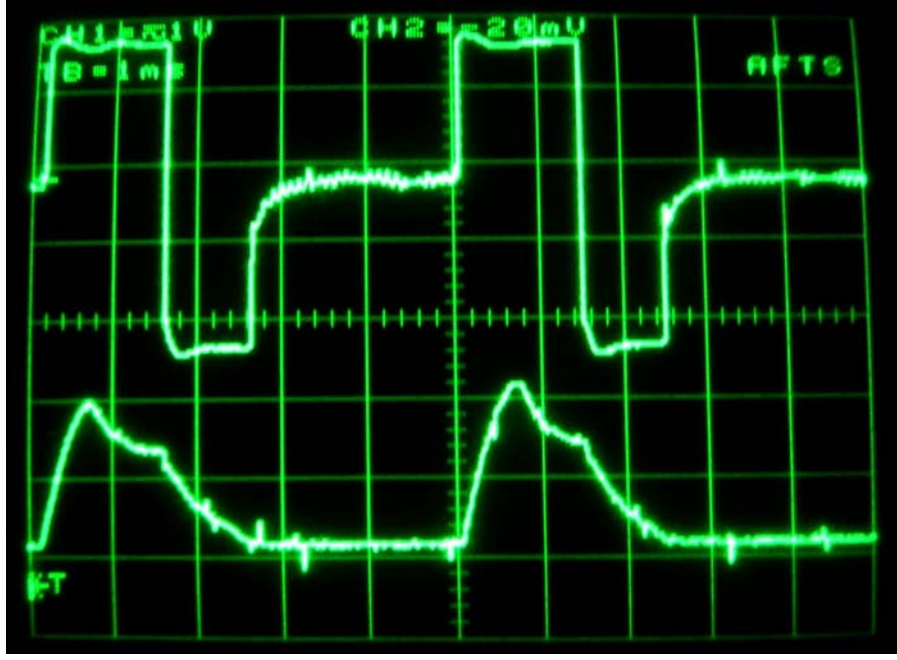
Sonlu elemanlar yönteminin (SEY) ARM'na uygulamak amacıyla Maxwell 2D sonlu elemanlar analiz programı kullanılmıştır. Burada ilk olarak motorun boyutları ölçülmüş ve bu ölçülen değerler esas alınarak SolidWorks çizim programında motorun geometrisi oluşturulmuştur. Motorun geometrisinin sonlu elemanlar analiz programı olan Maxwell 2D programında oluşturulmamasının nedeni, bu tip programların tam anlamıyla çizim programı olmaması ve bu nedenle burada çizim yapmanın zorluğundandır. Motorun geometrisi oluşturulduktan sonra, motorda kullanılan malzeminin tanımı yapılmıştır. Son olarak rotor konumunun  $-45^{\circ}$  ve  $+45^{\circ}$

aralığında analizi yapılmış ve dinamik model için gerekli olan akı-akım-rotor konumu ve moment-akım-rotor konumu ilişkileri belirlenmiştir.

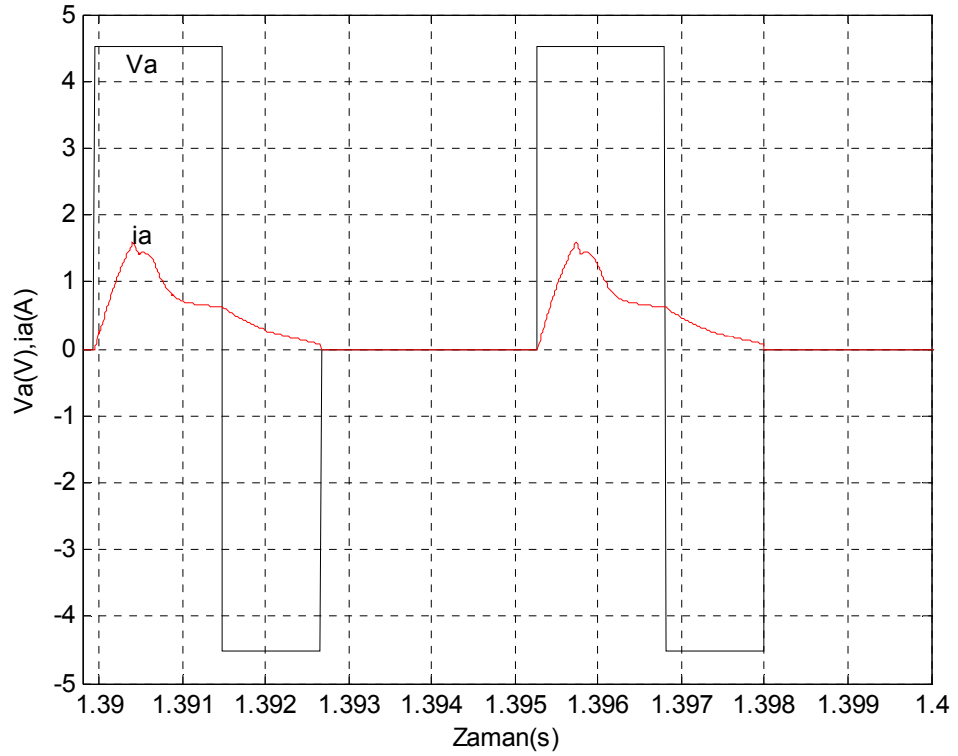
Sonlu elemanlar analizi yapılarak gerekli parametreler elde edildikten sonra 6/4 kutuplu ARM'nun Matlab/simulink ortamında dinamik modeli oluşturulmuştur. Dinamik modeli oluştururken, modelin akı-rotor konumu bilgisinden akım bilgisinin elde edilmesi ile akım-rotor konumu bilgisinden moment bilgisinin elde edilmesini sağlayan kısımlarında ön-değer tabloları (look-up table) kullanılmıştır. Bu ön-değer tabloları Matlab/Simulink ortamında bulunan S-Function bloğunda oluşturulmuştur. Daha hassas bir model elde edebilmek için rotor konumunun, akımın ve akının ara değerleri hesaba katılmıştır. Bu ara değerler için S-function içinde fonksiyonlar tanımlanmıştır. Yapılan çalışmalarda S-fuction için yazılan M-file dosyaları çok satır içerdiğinden simulasyonu yavaşlatmakta olduğu gözlenmiştir. Bunun yerine motora ait bu parametrelerin yapay sinir ağları (YSA) kullanarak işlenmesi modelin karmaşıklığını azaltacaktır.

Elde edilen 6/4 kutuplu ARM'nun dinamik modeline denetim bloğu eklenmiştir. Denetim bloğunda hız kontrolü ve histeresiz akım kıyıcı kontrolü yapılmaktadır. Denetim bloğunda ayrıca ARM'nun iletim açısı ( $\theta_{on}$ ) ve kesim açısının ( $\theta_{off}$ ) değerlerinin girişi yapılmaktadır. Yapılan simulasyonlarda, iletim açısının ( $\theta_{on}$ )  $45^\circ$ 'ye yakın olduğu durumlarda moment üretiminin çok küçük olmasından dolayı en optimum  $36^\circ$  olarak belirlenmiştir. Kesim açısını belirlenmesinde dikkat edilmesi gereken en önemli husus, iletimde olan faz akımının bir sonraki faz iletime geçtiğinde, çok fazla negatif moment üretmemesi için büyük değerler olmaması gerekmektedir. Dolayısıyla bu fazdaki akımın erkenden kesime girmesi sağlanmıştır. Bu çalışmada, yapılan simulasyonlarda kesim açısı ( $\theta_{off}$ )  $10^\circ$  olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak ARM'nun herhangi bir fazı  $36^\circ$ 'de pozitif gerilim verilerek iletime geçmekte ve  $10^\circ$ 'de ters gerilim verilerek söndürme işlemine geçilmektedir.

Şekil 6.1 ve şekil 6.5.'de farklı yük momentleri altındaki davranışlarını gösteren osiloskop görüntüleri verilmiştir. Bu şekillerin hemen altında şekil 6.2. ve şekil 6.6.'da aynı yükteki motorun simulasyon sonuçları verilmiştir.

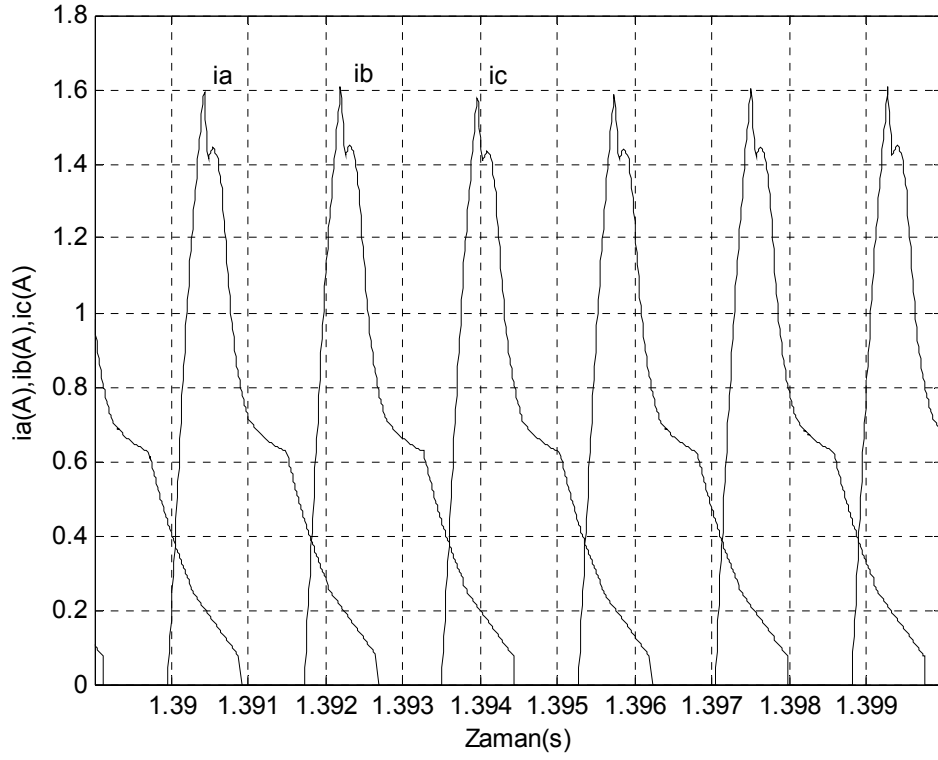


Şekil 6.1: ARM'nun sabit hızda,  $V_{DA}=22,53V$  için, boştaki faz geriliminin(üst) (10V/kare) ve akımının(alt) (0.8A/kare) zamana bağlı değişimleri

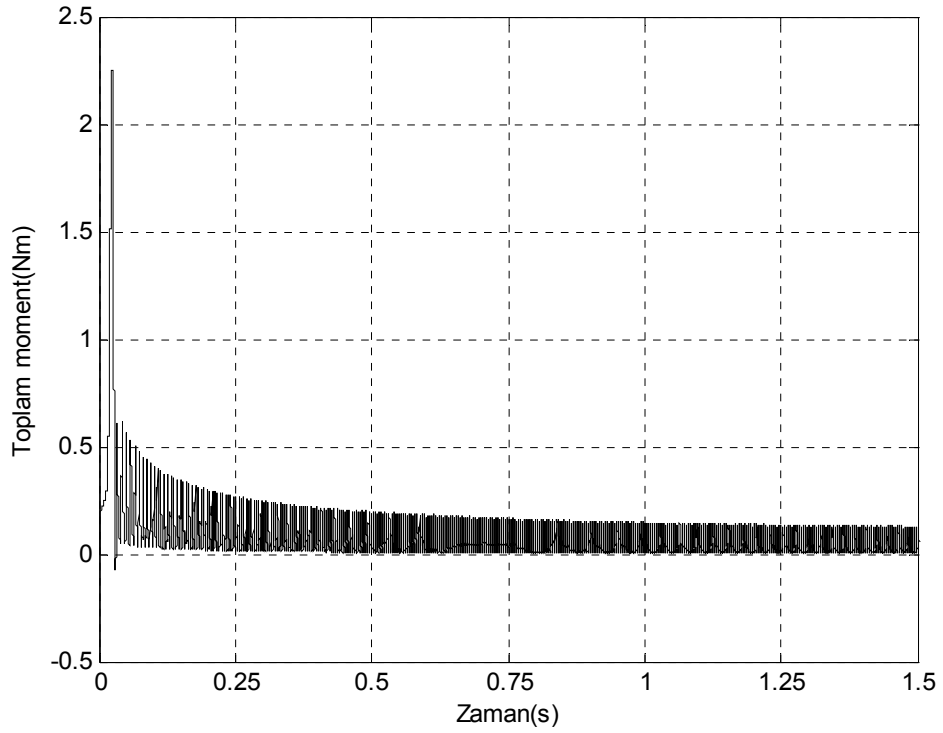


Şekil 6.2: ARM'nun sabit hızda,  $V_{DA}=22,53V$  için, boştaki faz geriliminin(üst) (\*5) ve akımının(alt) zamana bağlı değişimleri

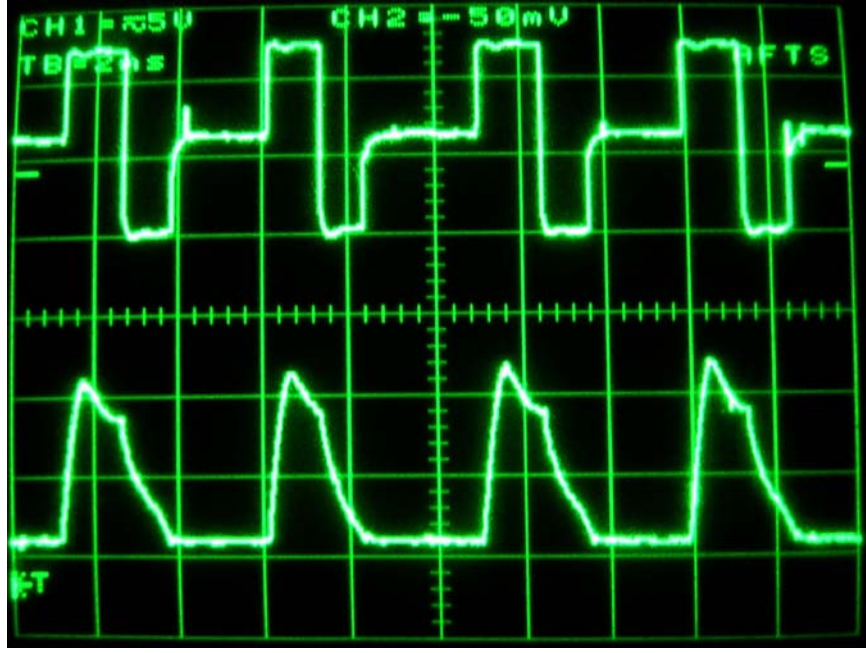




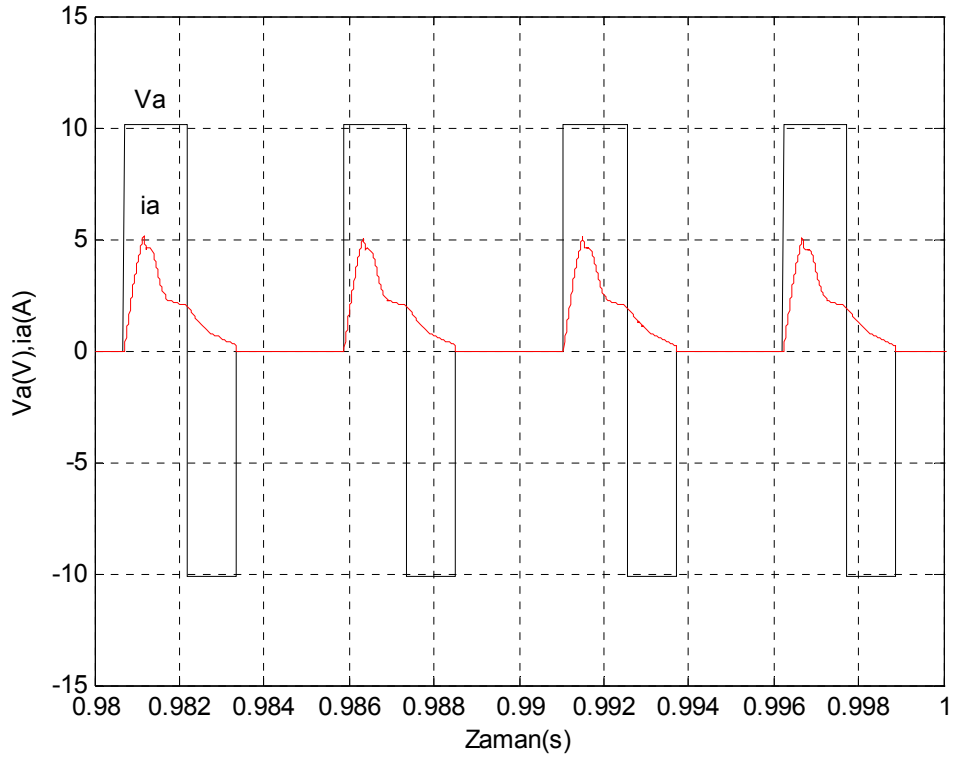
Şekil 6.3: ARM'nun sabit hızda,  $V_{DA} = 22,53V$  için, boştaki faz akımlarının zamana bağlı değişimleri



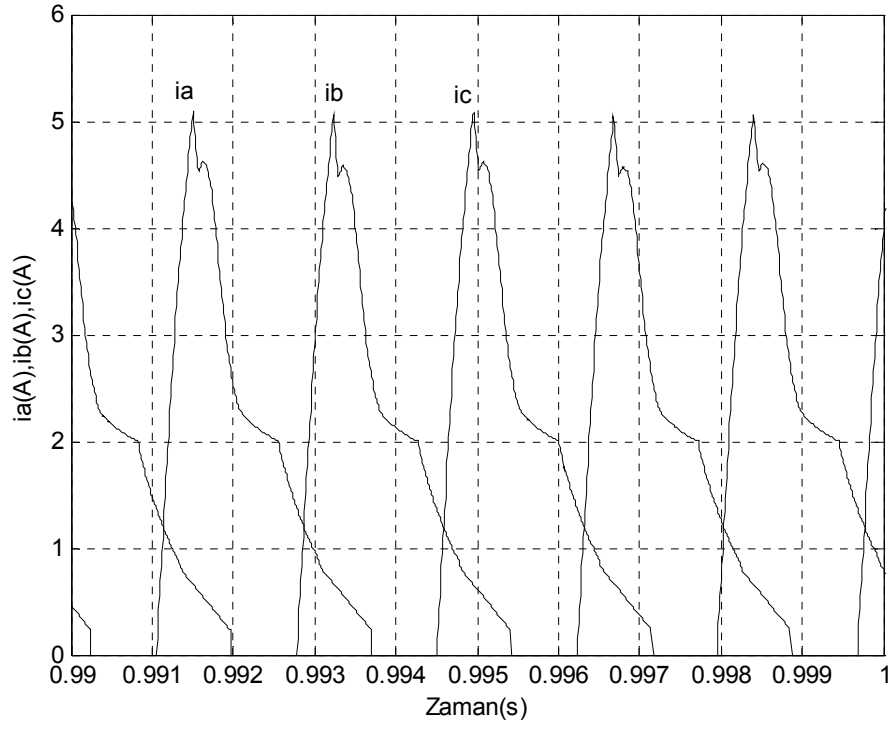
Şekil 6.4: ARM'nun sabit hızda,  $V_{DA}=22,53V$  için, boştaki faz momentlerinin toplamının zamana bağlı değişimi



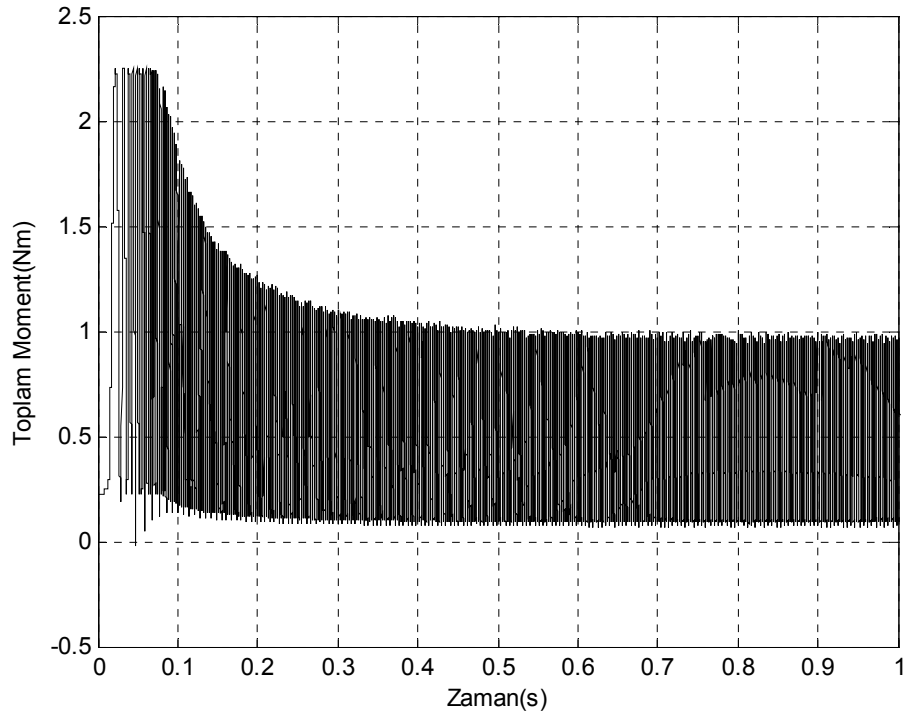
Şekil 6.5: ARM'nun sabit hızda,  $V_{DA} = 60,75V$  için,  $0.30Nm$ 'lik yük altında faz geriliminin(üst) ( $50V/kare$ ) ve akımının(alt) ( $2A/kare$ ) zamana bağlı değişimleri



Şekil 6.6: ARM'nun sabit hızda,  $V_{DA}=60,75V$  için,  $0.30Nm$ 'lik yük altında faz geriliminin(üst) (\*6) ve akımının(alt) zamana bağlı değişimleri



Şekil 6.7: ARM'nun sabit hızda,  $V_{DA} = 60,75V$  için,  $0.30Nm$ 'lik yük altında faz akımlarının zamana bağlı değişimleri



Şekil 6.8: ARM'nun sabit hızda,  $V_{DA} = 60,75V$  için,  $0.30Nm$ 'lik yük altında faz momentlerinin toplamının zamana bağlı değişimi

Osiloskop görüntüleri ve simulasyon sonuçları irdelenirse, birbirine yakın sonuçlar elde edildiği gözükmemektedir. Burada faz sargısına gerilim uygulanması ile akım yükselmeye başlamış, endüktansın artmaya başlaması ile birlikte akımın yükselmesi durmuştur ve azalmaya başlamıştır. Gerilimin negatif alternansa geçişi ile de akım hızlı bir şekilde sıfıra inmektedir.

Simülasyon sonuçları, gerçek sistemin deneysel sonuçları ile karşılaştırıldığında yapılan yaklaşımların uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada analiz ve modelleme anlamında amacına ulaştığı düşünülmektedir.

İleriye yönelik çalışmalarda, (anahtarlı relüktans motor sisteminin konum algılayıcısız kontrol edilmesi, akım kontrolü ve konum kontrolü gibi uygulamalar) önce bu çalışmada oluşturulan model kullanılarak elde edilecek sonuçların kestirimini yapmak mümkün olabilecektir. Bu model aynı zamanda farklı güçteki ve boyutlardaki ARM'lar için de kullanılabilir.

## KAYNAKLAR

1. Krishnan, R., “Switched Reluctance Motor Drives”, **CRC Press**,( 2001).
2. Dizenzo, M.T., “Switched Reluctance Motor Control-Basic Operation and Example Using the TMS320F240”, **Texas Instruments Application Report**,(2000).
3. Miller, T.J.E.,. “Switched Reluctance Motors and Their Control”. **Magna Physics Publishing and Clarendon Press.**, Oxford,(1993).
4. Vijayraghavan, P., “Design of Switched Reluctance Motors and Development of a Universal Controller for Switched Reluctance and Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives”, **Doktora Tezi, The Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University**, Virginia, (2001).
5. Fahimi, B., Emadi, A., Raymond, B., “Position Sensorless Control”. **IEEE Transactions on Industry Applications**, January, pp.40-47,(2004).
6. Fedigan, S.J., Cole, C.P., “A Variable-Speed Sensorless Drive System for Switched Reluctance Motors”, **Texas Instruments Application Report**,(1999).
7. Giuseppe S.B., Maria I.V., “Control characteristics of the SRM drives—Part I: operation in the linear region”, **IEEE Transactions on Industry Electronics.**, vol. 38, no.5, October, pp. 313–321,(1991).
8. GAO, Y., “Speed Control of Switched Reluctance Motors”, Yüksek Lisans Tezi,**The Hong Kong University of Science and Technology**,(2000).
9. Garip, M., “Kutup Başları Şekillendirilmiş Anahtarlamalı Relüktans Motorunda Tam Kutup Adımlı Sargının Moment Dalgalılığının İyileştirilmesine Katkısı”, Doktora Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi**,(2002).
10. Krishnan, R., Arumugam, R. and Lindsay, J.F., “Design Procedure for Switched Reluctance Motors”, **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 24, No. 3, May/June, pp. 456-461,(1998).
11. Radun, A.V., “Design Considerations for the Switched Reluctance Motor”, **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 31, No. 5, Sept./Oct., pp. 1079-1087,(1994).
12. Radun, A., “Analytically Computing the Flux Linked by a Switched Reluctance Motor Phase When the Stator and Rotor Poles Overlap”, **IEEE, Transactions on Magnetics**, Vol. MAG-36, No. 4, pt. 2, July, pp. 1996-2003,(2000).

13. Lawrenson, P.J., Stephenson, J.M., Blenkinsop, P.T., Corda, J. and Fulton, N.N., "Variable-Speed Switched Reluctance Motors", *IEE Proceedings*, Vol. 127, Pt B, No. 4, July, pp. 253-265,(1980).
14. Moallem, M., Ong, C.M., "Predicting the Torque of Switched Reluctance Machine from Its Finite Element Field Solution", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 5, No. 4, pp. 733-739,(1990).
15. Açıkgöz H., "Üç Fazlı Sincap kafesli Asenkron Motorun ANSYS ve Flux2D Hazır Paket Programları ile Performanslarının İncelenmesi",Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi*,(1998).
16. Mecrow, B. C., Barrass, P. G., Clothier, A.C., Weiner, C., "Drive Configurations for Fully-Pitched Winding Switched Reluctance Machines", *IAS Annual Meeting*, Vol. 1, pp.563-570, St. Louis, MO, USA,(1998).
17. Clothier, A.C.,Mecrow, B. C., "Inverter Topologies and Current Sensing Methods for Short Pitched and Fully Pitched Winding SR Motors". *APEC 14th Annual Conference*, Vol.1, pp. 416-423, Dallas, TX, USA,(1999).
18. Arumugam, R., Lindsay, J.F. and Krishnan, R., "Sensitivity of Pole Arc/Pole Pitch Ratio on Switched Reluctance Motor Performance", *IEEE Proceedings IAS Ann. Mtg.*, Pittsburgh,(1998).
19. Leong, J.H., "Design Consideration and Implementation of Switched Reluctance Motor Drive", *Proceedings on Research and Development*, Shah Alam, Malaysia,(2002).
20. Arumugam, R., Lowther, D.A., Krishnan, R. and Lindsay, J.F., "Magnetic Field Analysis of a Switched Reluctance Motor Using a Two Dimensional Finite Element Model", *IEEE Tran. on Magnetics*, Vol.Mag-21, March, pp. 1883-1885,(1997).
21. Dawson, G. E., Easstham, A. R., and Mizia, J., "Switched Reluctance Motor Torque Characteristics:Finite Element Method and Test Results", *IEEE IAS Annual Meeting, Part I*, 86 CH 2272-3, pp. 864-869,(1986).
22. Soares, F. and Costa, B.P.J., "Simulation of a 6/4 Switched Reluctance Motor Based on Matlab/Simulink Environment", Application Report, *Instituto Superior Técnico*, Portugal.
23. Liptak, M., "Principle of Design of Four-Phase Low-Power Switched Reluctance Machine Aimed to the Maximum Torque Production", *Electrical Engineering Transactions*, Vol. 55, No. 5-6, pp. 138-143,(2004).
24. Anwar, M.N., Husain, I., Radun, A.V., "A Comprehensive Design Methodology for Switched Reluctance Machines", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 7, No. 6, November/December, pp. 1684-1692,(2001).

25. Cui, L.Y., Yu, C.X., Fan, L.H., Fan, B.J., "The Simulation Study for Switched Reluctance Motor Drives Based on Matlab6.5", *Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, August, China,(2005).
26. "Maxwell 2D Ver.9 Theory Manual", *Ansoft Corp.*, (2000)..
27. "Maxwell 2D Getting Started, Magnetostatic Problem", *Ansoft Corp.*, (2002).
28. "Maxwell 2D Ver.10 Online Help System", *Ansoft Corp.*, (2004).
29. Cox, J.T., "A Simulation Model for the Four Phase Switched-Reluctance Motor. The University of Tennessee", Yüksek Lisans Tezi, *The University of Tennessee*, Knoxville, (2003).
30. Wang, X., "Modeling and Implementation of Controller for Switched Reluctance Motor with AC Small Signal Model", Yüksek Lisans Tezi, *The Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University*, Virginia,(2001).
31. Lu, Y., "Instantaneous Torque Control of Switched Reluctance Motors", *The University of Tennessee*, Yüksek Lisans Tezi, Knoxville,(2002).
32. Yadlapalli, N., "Implementation of a Novel Soft-Switching Inverter for Switched Reluctance Motor Drives", *The Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University*, Yüksek Lisans Tezi, Virginia,(1999).
33. Chancharoensook, P., Rahman, M.F., "Dynamic Modelling of a Four-Phase 8/6 Switched Reluctance Motor Using Current and Torque Look-Up Tables", *IEEE*, pp. 491-496,(2002).
34. Kim, C.C., Hur, J., hyun, D.S., "Simulation of a Switched Reluctance Motors Using Matlab/M-File", *IEEE*, pp. 1066-1071,(2002).
35. Sirinivas, K.N., Arumugam, R., "Circuit Simulation of Dynamic Performances of the Switched Reluctance Motor", *IEEE*, No. 47, pp. 592-594,(2001).
36. Islam, M.S., Sliding Mode Observer for Sensorless Control of Switched Reluctance Drives, Doktora Tezi, *The Graduate Faculty of the University of Akron*,(2001).
37. CSIRO Telecommunications & Industrial Physics. Modelling of Electrical Machines by Using a Circuit-Coupled Finite Element Method, Australia.

38. Bal, G., “Özel Elektrik Makinaları”, *Seçkin yayıncılık San. ve Tic. A.Ş.* Ankara,(2006).
39. Gürdal, O., “Elektrik Makinalarının Tasarımı”, *Nobel Yayın Dağıtım Ltd. Şti.*, Ankara,(2000).



## **ÖZGEÇMİŞ**

1981 yılında Ordu'da doğdu. İlkokul ve ortaokulu Ordu'da okudu. 1998 yılında Ordu Atatürk Lisesi'nden mezun oldu. Aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 2002 yılında bu bölümden mezun oldu. Mezun olduğu yıl Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Elektrik Mühendisliği anabilim dalında yüksek lisans programına başladı. Yine aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Halen bu görevini sürdürmektedir.