

T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YENİ BİR ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORUN  
TASARIMI VE AKIM KONTROLÜ**

ZEKİ OMAÇ

DOKTORA TEZİ

ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2006

T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

## YENİ BİR ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORUN TASARIMI VE AKIM KONTROLÜ

ZEKİ OMAÇ

DOKTORA TEZİ  
ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

Bu tez, ..... tarihinde, aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Hasan KÜRÜM  
Üye : Prof. Dr. Sefa AKPINAR  
Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÖZDEMİR

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ...../...../..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

## TEŞEKKÜR

Doktora tez çalıőmamda tezin her aőamasında derin bilgi birikimi ve engin tecrübeleri ile her zaman bana yardımcı olan, tezin tamamlanmasında büyük katkıda bulunan **Danıőmanım Sayın Prof. Dr. Hasan KÜRÜM** 'e en içten teşekkür ederim.

**Fırat Üniversitesi Bilimsel Araőtırma Projeleri Yönetim Birimi**'ne(FÜBAP) proje dâhilinde yaptığı desteklerden dolayı teşekkür ederim.

EMSAŞ Elektrik Motorları ve pompa Limited Şirketi adına **Elektrik Mühendisi İbrahim DÜŐKÜN**'e motorun imalatı hususunda katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca doktora döneminde gösterdikleri sabır ve anlayıőtan dolayı çok kıymetli eőime, sevgili kızlarım **Ayőegül** ve **Fatma Betül** ile oğlum **Muhammed Taha**'ya teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	
İÇİNDEKİLER.....	I
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	III
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	IX
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	X
ÖZET.....	XI
ABSTRACT.....	XII
1. BÖLÜM.....	1
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Anahtarlı Relüktans Motorun Tarihi Gelişmesi.....	2
1.2 Anahtarlı Relüktans Motorlar Üzerine Yapılmış Çalışmalar.....	3
1.3 Tezin Amacı.....	8
1.4 Tezin İçeriği.....	8
2. BÖLÜM.....	9
2. ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORUN YAPISI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ.....	10
2.1 Giriş.....	10
2.2 Anahtarlı Relüktans Motorun Yapısı.....	10
2.3 Anahtarlı Relüktans Motorun Çalışma İlkesi.....	13
2.4 Anahtarlı Relüktans Motorda Endüktans Değişimi.....	16
2.5 Anahtarlı Relüktans Motorda Moment Üretimi.....	18
2.6 Anahtarlı Relüktans Motorun Besleme Devreleri.....	21
2.6.1 Klasik İki Anahtarlı Besleme Devresi.....	22
2.6.2 İki Sargılı Besleme Devresi.....	22
2.6.3 Boşalma Dirençli Besleme Devresi.....	23
2.6.4 Orta Nokta Bağlantılı İki DC Kaynaklı Besleme Devresi.....	24
2.6.5 Kondansatör Boşalmalı ( C- Dump) Besleme Devresi.....	24
2.6.6 Miller Besleme Devresi.....	26
2.7 Anahtarlı Relüktans Motorda Titreşim ve Akustik Gürültü.....	26
2.8 Anahtarlı Relüktans Motorun Üstünlükleri.....	28
2.9 Anahtarlı Relüktans Motorun Sakıncaları.....	29
2.10 Anahtarlı Relüktans Motorda Oluşan Kayıplar.....	29
2.11 Anahtarlı Relüktans Motorun Sürülmesi.....	30
2.12 Anahtarlı Relüktans Motorun Moment -Hız Karakteristiği.....	31
3. BÖLÜM.....	33
3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORUN İNCELENMESİ.....	33
3.1 Giriş.....	33
3.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	33
3.2.1 Sınır Koşulları.....	34
3.2.2 Sonlu Elemanlar ve Rayleigh-Ritz Yöntemi.....	35

3.2.3 Üçgen Elemanların Birleştirilmesi.....	38
3.3 ANSYS Programı.....	39
3.4 Newton Raphson Yöntemi.....	40
3.5 Maxwell Stress Tensor Yöntemi.....	41
3.6 Tasarlanan Anahtarlı Relüktans Motorun Ölçüleri.....	42
3.7 ARM'nin Alan Dağılımının Elde Edilmesi.....	45
3.8 Faz Endüktansları ve Ortak Endüktansların Deneysel Olarak Belirlenmesi.....	50
3.9 Üretilen Momentin Hesaplanması.....	55
3.10 Yarıçap Yönünde Oluşan Kuvvetler Bakımından İncelenen ARM'nin Diğer ARM Modelleri ile Karşılaştırılması.....	56
<b>4. BÖLÜM.....</b>	<b>62</b>
<b>4. ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORUN KONTROLÜ.....</b>	<b>62</b>
4.1 Giriş.....	62
4.2 Kontrol Prensibi.....	63
4.3 ARM'nin Doğrusal Çalışma Modeli.....	64
4.4 ARM'nin Doğrusal Çalışma Lineer Modeline Ortak Endüktansların Dahil Edilmesi.....	67
4.5 ARM Sürücünün Kapalı Çevrim Hız Kontrolü.....	68
4.6 ARM Sürücünün Kapalı Çevrim Akım Kontrolü.....	68
4.7 ARM Sürücünün Moment Kontrolü.....	70
4.8 Anahtarlı Relüktans Motorun Matlab/Simulink ile Benzetimi.....	71
4.9 Anahtarlı Relüktans Motorun Kontrolünde Kullanılan Donanım ve Yazılım.....	74
4.9.1 Güç Devresi.....	74
4.9.2 IGBT Sürücü Devresi.....	78
4.9.3 Konum Okuyucu.....	79
4.9.3.1 Artımlı Konum Kodlayıcılar.....	79
4.9.3.2 Mutlak Konum Kodlayıcılar.....	80
4.9.4 Denetleyici Teknolojisi Seçimi.....	81
4.9.5 TMS320LF2407A EVM Kartı.....	82
4.9.6 Yazılım.....	84
<b>5. BÖLÜM.....</b>	<b>88</b>
<b>5. ANAHTARLI RELÜKTANS MOTOR SÜRÜCÜNÜN KONTROLÜNE İLİŞKİN SONUÇLAR.....</b>	<b>88</b>
5.1 Giriş.....	88
5.2 ARM Sürücünün Yüksüz Açık Çevrim ve Kapalı Çevrim Hız Kontrol Sonuçları.....	89
5.2.1 Yüksüz Durum için ARM Sürücünün Açık Çevrim Hız Kontrol Sonuçları.....	89
5.2.2 Yüksüz Durum için ARM Sürücünün Kapalı Çevrim Hız Kontrol Sonuçları.....	96
5.2.3 Generatörün ARM Sürücüyeye Bağlı Bulunduğu Yüksüz Durum için Açık Çevrim Hız Kontrol Sonuçları.....	103
5.3 ARM Sürücünün Yüklü Açık Çevrim ve Kapalı Çevrim Hız Kontrol Sonuçları 5.3.1 ARM Sürücünün Yüklü Durum Açık Çevrim Hız Kontrol Sonuçları.....	107
5.3.2 ARM Sürücünün Yüklü Durumu için Kapalı Çevrim Hız Kontrol Sonuçları.....	113
5.4 ARM Sürücünün Yüklü Durumu için Kapalı Çevrim Hız ve Akım Kontrol Sonuçları.....	119

5.5 Anahtarlı Relüktans Motorda Düzgün Moment Üretiminin Sağlanması.....	126
<b>6. BÖLÜM</b> .....	129
<b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER</b> .....	129
6.1 Sonuçlar.....	129
6.2 Sonraki Çalışmalar İçin Öneriler.....	131
<b>KAYNAKLAR</b> .....	132
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	138
<b>EKLER</b> .....	139

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 12/ 8 kutuplu bir ARM'nin ön kesit görünüşü.....	11
Şekil 2.2 Stator kutup sayısı ve rotor kutup sayısına göre ARM çeşitleri.....	13
Şekil 2.3 8/6 kutuplu bir ARM'ye ilişkin bazı büyüklükler ve bir faz sargısının gösterilişi.....	14
Şekil 2.4 8/6 kutuplu dört fazlı ARM'nin besleme devresi.....	15
Şekil 2.5 8/6 kutuplu dört fazlı bir ARM'de bir fazın iletimi ile kesimi arasında akımın akış yolu.....	15
Şekil 2.6 ARM'nin bir faz endüktansının rotor konumuna bağlı değişim grafiği.....	16
Şekil 2.7 8/6 kutuplu bir ARM'de lineer magnetik şartlarda dört faz endüktansının konuma bağlı değişim grafiği.....	17
Şekil 2.8 8/6 kutuplu bir ARM'de kosinüs bağıntısından elde edilen dört faz endüktansının rotor konuma bağlı değişim grafiği.....	18
Şekil 2.9 ARM'de bir fazın endüktansına bağlı olarak üretilen momentin değişim grafiği. ....	19
Şekil 2.10 ARM'de akıma bağlı akımın değişim grafiği.....	21
Şekil 2.11 Faz başına iki anahtarlı klasik ARM sürücü devresi.....	22
Şekil 2.12 Faz başına tek anahtarlı ve iki sargılı (bifilar) ARM sürücü devresi .....	23
Şekil 2.13 Boşalma dirençli ARM sürücü devresi.....	23
Şekil 2.14 Orta nokta bağlantılı iki DC kaynaklı ARM sürücü devresi.....	24
Şekil 2.15 Kondansatör boşalmalı (C- dump) ARM sürücü devresi.....	25
Şekil 2.16 Üç fazlı ARM için Miller besleme devresi.....	26
Şekil 2.17 Çakışık konumdan önce ve çakışık konumda radyal kuvvetin büyüklüğü.....	27
Şekil 2.18 Radyal kuvvetlerin etkisi altında stator kutuplarında meydana gelen deformasyon.....	28
Şekil 2.19 Anahtarlı relüktans motor sürücü devresi.....	31
Şekil 2.20 ARM moment –hız karakteristiği.....	32
Şekil 3.1 Bir üçgen eleman.....	35
Şekil 3.2 İki üçgen eleman.....	38
Şekil 3.3 ANSYS program penceresi.....	39
Şekil 3.4 Newton Raphson Yönteminin geometrik anlamı.....	41
Şekil 3.5 Maxwell Stress Tensor Yönteminde kapalı bir çizginin seçilmesi.....	41
Şekil 3.6 Magnetik alan diyagramı, yerel stress ve diğer bileşenleri.....	42
Şekil 3.7 18/12 kutuplu ARM'nin ön görünüşü.....	43
Şekil 3.8 A fazı sargısının bağlantısı.....	43
Şekil 3.9 18/12 kutuplu ARM'nin $\theta=3^0$ için bölmelenmiş hali.....	45
Şekil 3.10 ARM'nin stator ve rotorunun imalatında kullanılan saclarının deneysel elde edilen B-H grafiği.....	46
Şekil 3.11 Hava aralığı şeklindeki gibi küçük elemanlara bölünmüştür.....	47
Şekil 3.12 18/12 kutuplu ARM'nin $\theta=0^0$ için alan dağılımı.....	48
Şekil 3.13 18/12 kutuplu ARM'nin $\theta=3^0$ için alan dağılımı.....	49
Şekil 3.14 18/12 kutuplu ARM'nin $\theta=8^0$ için alan dağılımı.....	49
Şekil 3.15 18/12 kutuplu ARM'nin $\theta=12^0$ için alan dağılımı.....	50
Şekil 3.16 ARM'nin bir faz indüktansının tespitinde kullanılan devrenin bağlantı şeması.....	51
Şekil 3.17 İncelenen ARM'nin A fazı endüktansının deneysel ölçülen değerleri ile kosinüs yaklaşımı endüktans değerleri birlikte grafikte gösterilmiştir.....	53
Şekil 3.18 $L_{aa}$ , $L_{bb}$ ve $L_{cc}$ faz endüktanslarının rotor konumuna bağlı değişim grafiği.....	53
Şekil 3.19 İncelenen ARM'nin $M_{ab}$ ve $M_{ac}$ ortak endüktanslarına ait deneysel ölçülen değerleri ile matematiksel hesaplanan endüktans değerleri birlikte grafikte	

gösterilmiştir.....	54
Şekil 3.20 18/12 kutuplu ARM'nin SEY'den hesaplanan momentin konuma bağlı değişim grafiği.....	55
Şekil 3.21 $N_s/N_r=6/4$ kutuplu ARM'nin ön kesit görünüşü.....	56
Şekil 3.22 $N_s/N_r=12/8$ kutuplu ARM'nin ön kesit görünüşü.....	57
Şekil 3.23 $N_s/N_r=6/4$ kutuplu ARM'nin $\theta=18^0$ için alan dağılımı.....	58
Şekil 3.24 $N_s/N_r=12/8$ kutuplu ARM'nin $\theta=12^0$ için alan dağılımı.....	58
Şekil 3.25 $N_s/N_r=6/4$ ARM'nin rotor konumuna bağlı moment değişim grafiği.....	59
Şekil 3.26 $N_s/N_r=12/8$ ARM'nin rotor konumuna bağlı moment değişim grafiği.....	59
Şekil 3.27 $N_s/N_r=18/12$ ARM'nin rotor konumuna moment değişim grafiği.....	59
Şekil 3.28 $N_s/N_r=6/4$ ARM'nin rotor konumuna bağlı radyal kuvvetin değişim grafiği..	60
Şekil 3.29 $N_s/N_r=12/8$ ARM'nin rotor konumuna bağlı radyal kuvvetin değişim grafiği	60
Şekil 3.30 $N_s/N_r=18/12$ ARM'nin rotor konumuna bağlı radyal kuvvetin değişim grafiği.....	60
Şekil 4.1 Akım kontrollü ARM sürücüsü.....	64
Şekil 4.2 18/12 kutuplu ARM'nin ön görünüşü. 1-1', 4-4' ve 6-6' kutupları üzerindeki sargıların seri bağlanması ile A fazı oluşmuştur.....	65
Şekil 4.3 ARM'nin bir fazına ilişkin eşdeğer devresi.....	65
Şekil 4.4 ARM sürücünün kapalı çevrim hız kontrol şeması .....	68
Şekil 4.5 ARM sürücünün kapalı çevrim akım kontrol blok diyagramı .....	69
Şekil 4.6 PWM işaretin elde edilişi.....	69
Şekil 4.7 Momentte büyük dalgalanmanın olduğu komutasyon aralığında A ve B fazları akım ve moment grafikleri ile motorun toplam momentinin değişim grafiği.....	71
Şekil 4.8 Matlab/Simulink'te hazırlanan ARM sürücünün simülasyon şeması.....	72
Şekil 4.9 A fazının akım kontrol blok şeması.....	73
Şekil 4.10 A fazı indüktansı blok şemasının içeriği.....	73
Şekil 4.11 Fazlara göre iletim ve kesim açılarının tespit edildiği bloğun ayrıntıları .....	74
Şekil 4.12 Güç elektroniği elemanlarının anahtarlama yapabildiği akım, gerilim ve frekans değerleri.....	75
Şekil 4.13 Bir faz için iki anahtar kullanarak gerçekleştirilen ARM güç devresi.....	76
Şekil 4.14 LTS 25-NP akım algılayıcısının akım -gerilim grafiği.....	77
Şekil 4.15 Alternatif gerilimin doğrultularak doğru gerilimin elde edilmesi.....	78
Şekil 4.16 A fazı IGBT sürücüsü.....	78
Şekil 4.17 Konum okuyucunun A, B ve Z çıkışlarının dalga şekilleri.....	80
Şekil 4.18 Mutlak konum kodlayıcısının dönen diski.....	81
Şekil 4.19 TMS320LF2407A EVM kartının blok şeması.....	82
Şekil 4.20 TMS320LF2407A EVM kartı üzerinde elemanların yerleşiminin üstten görünüşü.....	83
Şekil 4.21 XDS510PP emulatr.....	83
Şekil 4.22 Code Composer Studio yazılımı program penceresi.....	84
Şekil 4.23 Anahtarlı relüktans motorun kontrolü için hazırlanan programın bloklar halinde gösterilişi.....	85
Şekil 4.24 DSP'nin yaptığı ARM kontrol işlemleri.....	86
Şekil 4.25 Anahtarlı relüktans motorun deney bağlantı şeması.....	87
Şekil 5.1 Açık çevrim hız kontrol simülasyon şeması.....	89
Şekil 5.2 ARM sürücünün yüksüz $n=3065$ d/dak hızda deneysel ölçülen A fazı akımının değişim grafiği.....	90
Şekil 5.3 ARM sürücünün yüksüz $n=3065$ d/dak hızda benzetim sonucunda elde edilen A fazı akımının değişim grafiği.....	90
Şekil 5.4 ARM sürücünün yüksüz $n=3065$ d/dak hızda deneysel ölçülen B fazı akımının değişim grafiği.....	91

Şekil 5.5 ARM sürücünün yüksüz $n = 3065$ d/dak hızda benzetim sonucunda elde edilen B fazı akımının değişim grafiği.....	91
Şekil 5.6 ARM'nin yüksüz $n = 3065$ d/dak hızda deneysel ölçülen C fazı akımının değişim grafiği.....	92
Şekil 5.7 ARM'nin yüksüz $n = 3065$ d/dak hızda benzetim sonucunda elde edilen C fazı akımının değişim grafiği.....	92
Şekil 5.8 ARM sürücünün yüksüz durumda deneysel ölçülen hız grafiği.....	93
Şekil 5.9 ARM sürücünün yüksüz durumda benzetim sonucunda elde edilen hız grafiği.....	93
Şekil 5.10 ARM'nin $V = 34$ V besleme geriliminde yüksüz durumda açık çevrim hız kontrolünde motor tarafından üretilen toplam momentin $T_e$ değişim grafiği...	94
Şekil 5.11 ARM sürücünün yüksüz durumda açık çevrim hız kontrol benzetim sonucunda elde edilen $V_a$ , faz gerilimi $i_a$ , faz akımı $L_a$ , faz endüktansının değişim grafiği. Burada akım $k_1 = 15$ ve indüktans $k_2 = 3500$ katsayıları ile çarpılmıştır.....	94
Şekil 5.12 ARM sürücünün $n = 3065$ d/dak hızda yüksüz durumda açık çevrim hız kontrol benzetim sonucu elde edilen $i_a$ , $i_b$ , $i_c$ , faz akımlarının değişim grafiği..	95
Şekil 5.13 Deneysel elde edilen ARM sürücünün kosinüs şeklinde değişen $L_a$ , $L_b$ , $L_c$ faz indüktanslarının değişim grafiği.....	95
Şekil 5.14 ARM'nin yüksüz kapalı çevrim hız kontrol benzetim şeması.....	96
Şekil 5.15 ARM sürücünün $n = 1200$ d/dak referans hız $V = 34$ V besleme geriliminde yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde ölçülen $i_a$ , faz akımının değişim grafiği.....	97
Şekil 5.16 ARM sürücünün $n = 1200$ d/dak hızda $V = 34$ V besleme geriliminde yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen $i_a$ , faz akımının değişim grafiği.....	97
Şekil 5.17 ARM sürücünün $n = 1200$ d/dak referans hız $V = 34$ V besleme geriliminde yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde ölçülen $i_b$ , faz akımının değişim grafiği.....	98
Şekil 5.18 ARM sürücünün $n = 1200$ d/dak hızda $V = 34$ V besleme geriliminde yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen $i_b$ , faz akımının değişim grafiği.....	98
Şekil 5.19 ARM sürücünün $n = 1200$ d/dak referans hız $V = 34$ V besleme geriliminde yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde ölçülen $i_c$ , faz akımının değişim grafiği.....	99
Şekil 5.20 ARM sürücünün $n = 1200$ d/dak hızda $V = 34$ V besleme geriliminde yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen $i_c$ , faz akımının değişim grafiği.....	99
Şekil 5.21 ARM sürücünün $n = 1200$ d/dak referans hız $V = 34$ V besleme geriliminde yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde ölçülen hızın değişim grafiği.....	100
Şekil 5.22 ARM sürücünün $n = 1200$ d/dak referans hız $V = 34$ V besleme geriliminde yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde benzetim elde edilen hızın değişim grafiği.....	100
Şekil 5.23 ARM sürücünün $n = 1200$ d/dak hızda $V = 34$ V besleme geriliminde yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen $i_a$ , $i_b$ , $i_c$ , faz akımlarının değişim grafiği.....	101
Şekil 5.24 ARM sürücünün $n = 1200$ d/dak hızda $V = 34$ V besleme geriliminde yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen $V_a$ , faz gerilimi $i_a$ , faz akımı $L_a$ , faz endüktansının değişim grafiği. Burada akım $k_1 = 15$ ve indüktans $k_2 = 3500$ katsayıları ile çarpılmıştır.....	101
Şekil 5.25 ARM sürücünün $n = 1200$ d/dak hızda $V = 34$ V besleme geriliminde yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde motor tarafından üretilen toplam	

momentin $T_e$ değişim grafiği.....	102
Şekil 5.26 ARM sürücünün $n=1200$ d/dak hızda $V=34$ V besleme geriliminde yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde motor tarafından üretilen toplam momentin $T_e$ değişim grafiği.....	102
Şekil 5.27 ARM sürücünün $n=1375$ d/dak hızda generatörün yüksüz bağlı olduğu durumda ölçülen $i_a$ , faz akımının değişim grafiği.....	103
Şekil 5.28 ARM sürücünün $n=1375$ d/dak hızda generatörün yüksüz bağlı iken benzetim sonucunda elde edilen $i_a$ , faz akımının değişim grafiği.....	103
Şekil 5.29 ARM sürücünün generatöre yüksüz bağlı olduğu durumda açık çevrim hız kontrolü sonucu $n=1375$ d/dak hızda deneysel ölçülen $i_b$ , faz akımının değişim grafiği.....	104
Şekil 5.30 ARM sürücünün generatöre yüksüz bağlı olduğu durumda açık çevrim hız kontrolü sonucu $n=1375$ d/dak hızda benzetim sonucunda elde edilen $i_b$ , faz akımının değişim grafiği.....	104
Şekil 5.31 ARM sürücünün generatöre yüksüz bağlı olduğu durumda açık çevrim hız kontrolü sonucu $n=1375$ d/dak hızda deneysel ölçülen $i_c$ , faz akımının değişim grafiği.....	105
Şekil 5.32 ARM sürücünün generatöre yüksüz bağlı olduğu durumda açık çevrim hız kontrolü sonucu $n=1375$ d/dak hızda benzetim sonucunda elde edilen $i_c$ , faz akımının değişim grafiği.....	105
Şekil 5.33 ARM sürücünün $V=34$ V besleme geriliminde generatörün yüksüz bağlı olduğu durum için deneysel elde edilen açık çevrim hız grafiği.....	106
Şekil 5.34 ARM sürücünün $V=34$ V besleme geriliminde generatörün yüksüz bağlı olduğu durum için benzetim sonucunda elde edilen açık çevrim hız grafiği...	106
Şekil 5.35 ARM sürücünün $n=797$ d/dak hızda $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda açık çevrim hız kontrolünde ölçülen $i_a$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.35$ Nm).....	107
Şekil 5.36 ARM sürücünün $n=797$ d/dak hızda $V=34$ V besleme geriliminde yüksüz durumda açık çevrim hız kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen $i_a$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.35$ Nm).....	107
Şekil 5.37 ARM sürücünün $n=797$ d/dak hızda $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda açık çevrim hız kontrolünde deneysel ölçülen $i_b$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.35$ Nm).....	108
Şekil 5.38 ARM'nin $n=797$ d/dak hızda $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda açık çevrim hız kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen $i_b$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.35$ Nm).....	108
Şekil 5.39 ARM sürücünün $n=797$ d/dak hızda $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda açık çevrim hız kontrolünde ölçülen $i_c$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.35$ Nm).....	109
Şekil 5.40 ARM sürücünün $n=797$ d/dak hızda $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda açık çevrim hız kontrolünde benzetim sonucu elde edilen $i_c$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.35$ Nm).....	109
Şekil 5.41 ARM sürücünün $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda açık çevrim hız kontrolünde deneysel elde edilen hız grafiği ( $T_y=0.35$ Nm).....	110
Şekil 5.42 ARM sürücünün $V=34$ V besleme geriliminde yüksüz durumda açık çevrim hız kontrolünde benzetim ile elde edilen hız grafiği ( $T_y=0.35$ Nm).....	110
Şekil 5.43 ARM sürücünün $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda açık çevrim hız kontrolünde motor tarafından üretilen toplam momentin $T_e$ değişim grafiği ( $T_y=0.35$ Nm).....	111
Şekil 5.44 ARM sürücünün $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda açık çevrim hız kontrolünde motor tarafından üretilen toplam momentin $T_e$ değişim grafiği ( $T_y=0.35$ Nm).....	111
Şekil 5.45 ARM sürücünün $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda açık çevrim	

hız kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen $V_a$ faz gerilimi, $i_a$ faz akımı ve $L_a$ faz endüktansının değişim grafiği. Burada akım $k_1=6$ ve endüktans $k_2=4000$ katsayıları ile çarpılmıştır ( $T_y=0.35$ Nm).....	112
Şekil 5.46 ARM sürücünün $n=797$ d/dak hızda $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda açık çevrim hız kontrol benzetim sonucunda elde edilen $i_a$ , $i_b$ , $i_c$ faz akımlarının değişim grafiği ( $T_y=0.35$ Nm).....	112
Şekil 5.47 ARM sürücünün $n=600$ d/dak referans hız $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız kontrolünde deneysel ölçülen $i_a$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.46$ Nm).....	113
Şekil 5.48 ARM sürücünün $n=600$ d/dak hızda $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen $i_a$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.46$ Nm).....	113
Şekil 5.49 ARM sürücünün $n=600$ d/dak referans hız $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız kontrolünde ölçülen $i_b$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.46$ Nm).....	114
Şekil 5.50 ARM'nin $n=600$ d/dak hızda $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen $i_b$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.46$ Nm).....	114
Şekil 5.51 ARM sürücünün $n=600$ d/dak referans hız $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız kontrolünde deneysel ölçülen $i_c$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.46$ Nm).....	115
Şekil 5.52 ARM'nin $n=600$ d/dak hızda $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız kontrolünde simülasyon sonucunda elde edilen $i_c$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.46$ Nm).....	115
Şekil 5.53 ARM sürücünün $n=600$ d/dak referans hız $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız kontrolünde ölçülen hızın değişim grafiği ( $T_y=0.46$ Nm).....	116
Şekil 5.54 ARM'nin $n=600$ d/dak referans hız $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız kontrolünde benzetim elde edilen hızın değişim grafiği ( $T_y=0.46$ Nm).....	116
Şekil 5.55 ARM sürücünün $n=600$ d/dak hızda $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız kontrolünde simülasyon sonucunda elde edilen $i_a$ , $i_b$ , $i_c$ , faz akımlarının değişim grafiği.....	117
Şekil 5.56 ARM'nin $n=600$ d/dak hızda $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen $V_a$ , faz gerilimi $i_a$ , faz akımı $L_a$ , faz endüktansının değişim grafiği. Burada akım $k_1=6$ ve indüktans $k_2=3500$ katsayıları ile çarpılmıştır ( $T_y=0.46$ Nm).....	117
Şekil 5.57 ARM sürücünün $n=600$ d/dak hızda yüklü durumda kapalı çevrim hız kontrol sonucu motor tarafından üretilen toplam momentin $T_e$ değişim grafiği ( $T_y=0.46$ Nm).....	118
Şekil 5.58 ARM sürücünün $n=600$ d/dak hızda yüklü durumda kapalı çevrim hız kontrolünde motor tarafından üretilen toplam momentin $T_e$ değişim grafiği ( $T_y=0.46$ Nm).....	118
Şekil 5.59 ARM'nin yüklü kapalı çevrim hız ve akım kontrol simülasyon şeması.....	119
Şekil 5.60 ARM sürücünün $n=600$ d/dak referans hız $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız ve akım kontrolünde deneysel ölçülen $i_a$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.46$ Nm).....	120
Şekil 5.61 ARM sürücünün $n=600$ d/dak referans hız ve $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız ve akım kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen $i_a$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.46$ Nm).....	120
Şekil 5.62 ARM sürücünün $n=600$ d/dak referans hız $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız ve akım kontrolünde deneysel ölçülen $i_b$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.46$ Nm).....	121

Şekil 5.63 ARM sürücünün $n = 600$ d/dak hızda $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız ve akım kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen $i_b$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.46$ Nm).....	121
Şekil 5.64 ARM sürücünün $n = 600$ d/dak referans hız, $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız ve akım kontrolünde ölçülen $i_c$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.46$ Nm).....	122
Şekil 5.65 ARM sürücünün $n = 600$ d/dak referans hız, $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız ve akım kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen $i_c$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.46$ Nm).....	122
Şekil 5.66 ARM sürücünün $n = 600$ d/dak referans hız $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız ve akım kontrolünde ölçülen hızın değişim grafiği ( $T_y=0.46$ Nm).....	123
Şekil 5.67 ARM sürücünün $n = 600$ d/dak referans hız $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız ve akım kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen hızın değişim grafiği ( $T_y=0.46$ Nm).....	123
Şekil 5.68 ARM sürücünün $n = 600$ d/dak hızda $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız ve akım kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen $i_a$ , $i_b$ , $i_c$ , faz akımlarının değişim grafiği ( $T_y=0.46$ Nm).....	124
Şekil 5.69 ARM'nin $n = 600$ d/dak hızda $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen $V_a$ , faz gerilimi $i_a$ , faz akımı $L_a$ , faz endüktansının değişim grafiği. Burada akım $k_1=6$ ve endüktans $k_2=3500$ katsayıları ile çarpılmıştır.....	124
Şekil 5.70 ARM sürücünün $n = 600$ d/dak hızda $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız ve akım kontrolünde motor tarafından üretilen toplam momentin $T_e$ değişim grafiği ( $T_y=0.46$ Nm).....	125
Şekil 5.71 ARM sürücünün $n = 600$ d/dak hızda $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız ve akım kontrolünde motor tarafından üretilen toplam momentin $T_e$ değişim grafiği ( $T_y=0.46$ Nm).....	125
Şekil 5.72 ARM'nin yüklü kapalı çevrim akımın karesi kontrol benzetim şeması.....	126
Şekil 5.73 ARM sürücünün $n = 600$ d/dak referans hız $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim akımın karesi kontrolünde benzetim elde edilen hızın değişim grafiği ( $T_y=0.46$ Nm).....	127
Şekil 5.74 ARM sürücünün $n = 600$ d/dak hızda $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim akımın karesi kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen $i_a$ , $i_b$ , $i_c$ , faz akımlarının değişim grafiği ( $T_y=0.46$ Nm).....	127
Şekil 5.75 ARM sürücünün $n = 600$ d/dak hızda $V=34$ V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim akımın karesi kontrolünde motor tarafından üretilen toplam momentin $T_e$ değişim grafiği ( $T_y=0.46$ Nm).....	128
Şekil 1 Anahtarlı relüktans motor, DA şönt generatörün ve ARM sürücü devresinin tümünün fotoğrafı.....	139
Şekil 2 Anahtarlı relüktans motor ve DA şönt generatörün yakın çekim fotoğrafı.....	139
Şekil 3 ARM sürücü devresinin fotoğrafı.....	140
Şekil 4 ARM sürücü devresinin kablo bağlantılarının olduğu taraftan görünüş fotoğrafı.....	140
Şekil 5 ARM'nin saat yönünde $30^0$ 'lik mekaniksel dönüşü üç adımda a), b), c), d) şıklarında gösterilmiştir.....	141

## ÇİZELGELER LİSTESİ

Tablo 3.1 İncelenen ARM'nin büyüklükleri.....	44
Tablo 3.2 A,B ve C fazı sargıları gerilimleri.....	51
Tablo 3.3 A fazı indüktansı, B ve C fazı ortak indüktansları değerleri.....	52
Tablo 3.4 $N_s/N_r=6/4$ kutuplu ARM'nin ölçüleri.....	56
Tablo 3.5 $N_s/N_r=12/8$ kutuplu ARM'nin ölçüleri.....	57
Tablo 5.1 $N_s/N_r= 18/12$ olan ARM'nin motor parametreleri.....	88

## SİMGELER VE KISALTMALAR

$\alpha_r$  = Rotor kutup adımını,  
 $\beta_s$  = Stator kutup yayı uzunluğu,  
 $\beta_r$  = Rotor kutup yayı uzunluğu,  
 $B_m$  = Akı yoğunluğunun maksimum değeri,  
 $f$  = Uyarma akımı frekansı,  
 $f_s$  = Anahtarlama frekansı  
 $i$  = Faz akımı,  
 $K$  = İndüktansın artığı bölgede indüktansın eğimi,  
 $L_{max}$  = Çakışık konum faz indüktansı,  
 $L_{min}$  = Çakışık olmayan konum faz indüktansı,  
 $N_r$  = Rotor kutup sayısını,  
 $N_s$  = Stator kutup sayısı,  
 $P_{cu}$  = Bakır kayıpları,  
 $P_{Fe}$  = Toplam demir kaybı,  
 $P_h$  = Histerezis demir kayıpları,  
 $P_g$  = Girdap akımı demir kayıpları,  
 $P_k$  = Toplam kayıp güç,  
 $P_{stm}$  = Sürtünme ve rüzgar kayıpları,  
 $q$  = Faz sayısı,  
 $\theta$  = Rotor konumu (radyan),  
 $R$  = Faz direnci,  
 $\Psi$  = Faz akısı,  
 $T_e$  = Üretilen toplam moment,  
 $V$  = Şebeke gerilimi,  
 $W_{mek}$  = Motorun milinden alınan mekanik enerji,  
 $W_{elek}$  = Sargıya uygulanan elektriksel enerji,  
 $W_f$  = Depolanan magnetik enerji,  
ARM = Anahtarlı Relüktans Motor,  
BJT = Çift kutuplu jonksiyonlu transistor (Bipolar Junction Transistor),  
GTO = Kapıdan söndürmeli tristör (Gate Turn – Off Thyristor),  
IGBT = Yalıtılmış kapılı çift kutuplu transistor (Isulated Gate Bipolar Transistor),  
MCT = MOS kontrollü tristör (MOS Controlled Thyristor),  
MOSFET = Metal oksit yarıiletken alan etkili transistor (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor),  
SCR = Tristör (Thyristor = Silicon Controlled Rectifier),  
 $J$  = Eylemsizlik momenti,  
 $B$  = Sürtünme katsayısı,  
 $\omega$  = Açısal hız,  
 $T_y$  = Yük momenti.  
DA = Doğru Akım  
AA = Alternatif Akım

## ÖZET

Doktora Tezi

### YENİ BİR ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORUN TASARIMI VE AKIM KONTROLÜ

Zeki OMAÇ

Fırat Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

2006, Sayfa: 141

Bu çalışmada gürültüye neden olan radyal kuvveti azaltmak amacıyla statorunda 18 kutup, rotorunda ise 12 kutup bulunan yeni bir anahtarlı relüktans motor (ARM) tasarlanıp üretilmiştir.

İncelenen ARM modelinin manyetik alan dağılımını görmek ve üretilebilecek en büyük momenti tespit edebilmek amacıyla Sonlu Elemanlar Yönteminde incelenmiştir. Bu incelemenin sonucu ARM'nin alan dağılımı ve rotor konumuna bağlı olarak ürettiği momentin değişimi hesaplanmıştır. Ayrıca incelenen  $N_s/N_r=18/12$  kutuplu ARM modeli ile beraber  $N_s/N_r=6/4$  ve  $N_s/N_r=12/8$  kutuplu üç fazlı iki ayrı ARM modellerinin radyal kuvvetleri hesaplanmıştır. Üç ARM modelinin hava aralığı, stator dış çapı ve rotor dış çapı gibi fiziksel boyutları aynı alınmıştır. Farklı stator ve rotor kutup sayılarında aynı tepe değer moment üretimi için bir rotor kutbuna etki eden radyal kuvvet bakımında söz konusu üç ARM modeli karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak,  $N_s/N_r=18/12$  kutuplu ARM'nin bir kutbuna etki eden radyal kuvvetin en az olduğu tespit edilmiştir. Radyal kuvvet sonucu oluşan titreşim ve gürültü  $N_s/N_r=18/12$  kutuplu ARM'de dört kat azaltılmıştır.

İncelenen ARM sürücünün performansını belirlemek amacıyla TMS320LF2407A sayısal sinyal işlemcisini kullanarak ARM sürücünün kapalı çevrim hız ve akım kontrolü yapılmıştır. Ayrıca, bilgisayarda incelenen ARM sürücünün modeli oluşturularak benzetim sonuçları elde edilmiştir. Tasarlanıp üretilen yeni ARM sürücünün üstün davranışı benzetim sonucunda elde edilen sonuçlar, deneysel ölçülen sonuçlar ile karşılaştırılarak ortaya konmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Anahtarlı Relüktans Motor, Akım Kontrol, Sayısal Sinyal İşlemci.

## ABSTRACT

PhD Thesis

### DESIGN OF A NEW SWITCHED RELUCTANCE MOTOR AND ITS CURRENT CONTROL

Zeki OMAÇ

Firat University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Electrical and Electronics Engineering

2006, Page: 141

In this study, a new switched reluctance motor (SRM) is designed and produced, with 18 poles in stator and 12 poles in rotor, in order to reduce the radial forces causing noise.

To illustrate the magnetic field distribution and to determine the greatest torque it can produce, SRM model under investigation is analyzed by Finite Element Method. The field distribution of SRM and the torque depending on the rotor position is calculated as the results of the analysis. Also radial forces of  $N_s/N_r=6/4$  and  $N_s/N_r=12/8$  poles three phase SRM models are calculated together with  $N_s/N_r=18/12$  poles SRM model.

The physical parameters and dimensions such as air gap width, outer diameter of stator and outer diameter of rotor are taken as the same for three different SRM models. The radial forces acting on a rotor pole for the same peak value of torque are compared for different stator and rotor pole numbers of SRM models under consideration. As the result, it is shown that the radial force acting on one rotor pole in  $N_s/N_r=18/12$  poles SRM model is the lowest one. The vibration and acoustic noise caused by radial force is reduced four times in  $N_s/N_r=18/12$  SRM.

In order to determine the performance of analyzed SRM driver, closed loop speed and current control of SRM driver is performed by using TMS320LF2407A digital signal processor. Simulation results are also obtained by constructing the model of SRM driver under investigation in computer. The high performance of new designed and produced SRM driver is shown by comparing the results obtained from simulations and experiments.

**Keywords:** Switched Reluctance Motor, Current Control, Digital Signal Processor.

# 1. BÖLÜM

## 1. GİRİŞ

Anahtarlı relüktans motorun (ARM) çalışma prensibi 1838 yılında ortaya atılmasına rağmen motorun uzun yıllar uygulaması mümkün olmamıştır. Çünkü anahtarlı relüktans motorun konumunu okuyacak ve ona göre fazlardan akım akıtacak anahtar elemanlar yoktu. Ancak 1960'lı yılların başında güç elektroniğindeki gelişme ile beraber bu motorun sürülmesi mümkün olmuştur. Bilinen en eski motor olmasına rağmen anahtarlı relüktans motorun incelenmesi ve araştırılması yenidir. Özellikle 1980 yılından sonra bu motor üzerinde yapılan çalışmalar yoğunlaşmıştır.

Anahtarlı relüktans motorun gündeme gelmesi sadece elektronikteki gelişmelere bağlı değildir. Teknolojideki gelişmeler bu motorun önünü açmıştır. Anahtarlı relüktans motorun yapısının basit olması, üretim maliyetinin düşük olması ve bakım-onarım masrafının az olması kendisine olan ilginin diğer bir kaynağıdır [1], [2]. Kolay hız ayarı ve çok yüksek hızlarda dönebilmek bu motorların diğer üstünlüklerindedir.

Anahtarlı relüktans motorlar üzerine yapılan ilk çalışmalar İngiltere'de başlamıştır. Ancak takip eden yıllarda diğer Avrupa ülkelerinde, Amerika Birleşik Devletlerinde ve Uzakdoğu ülkelerinde anahtarlı relüktans motorlar incelenmeye ve araştırılmaya başlanmıştır. Bugün itibarıyla yukarıda adı geçen ülkelerde bazı şirketler anahtarlı relüktans motorları ticari olarak imal etmekte ve dünya çapında pazarlamaktadır. Ülkemizde ise bu motorlar üniversitelerin katkıları ile tanınmaya ve az da olsa endüstride kullanılmaya başlanmıştır.

Anahtarlı relüktans motorlarda iki temel sorun ile karşılaşılır. Sorunlardan biri ARM çalışırken oluşan gürültüdür. Diğeri ise motorun ürettiği momentteki salınımlardır. Aslında bu iki sorunun kaynağı motorun yapısıdır.

Anahtarlı relüktans motorun statoru ve rotoru çıkık kutuplu yapıya sahiptir. Stator kutupları üzerindeki sargılardan akım akınca elektromıknatis prensibine göre stator kutbu rotor kutbunu kendine doğru çeker. Rotor kutupları arasındaki boşluk stator ile rotor arasındaki hava aralığı mesafesinin değişken olmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla rotor dönerken rotor kutbuna etki eden radyal ve aksel kuvvetler sürekli değişir. Gürültüyü oluşturan magnetik sebeplerin başında rotora etki eden radyal kuvvetler gelir. Rotor kutuplarına etki eden yarıçap yönünde oluşan kuvvetler rulmanlarda titreşimlere neden olmaktadır. Bu titreşimler statorda akustik gürültü olarak algılanır. Rulmanlara gelen bu titreşimler bir süre sonra rulmanları bozmaktadır. Motorun tasarımında yapılacak değişiklikler ile titreşimi ve gürültüyü azaltmak mümkündür.

Anahtarlı relüktans motorda üretilen toplam moment fazların bağımsız ürettiği momentlerin toplamına eşittir. Her bir fazın ürettiği moment akımın karesi ve indüktansın değişimine bağlıdır. Doymanın olmadığı, akıma bağlı akının değişiminin doğrusal kabul edildiği doğrusal çalışma durumunda akım sabit tutulursa üretilen moment de düzgün olacaktır. Ancak akımın bir fazdan diğer faza geçtiği komütasyon aralığında akımı sabit tutmak mümkün olmamaktadır. Moment eğrilerindeki çökmeler çoğunlukla komütasyon aralığında meydana gelir.

Bu çalışmada üzerinde durulan konulardan biri titreşim ve gürültünün kaynağı olan radyal kuvveti azaltmak olmuştur. Bu amaçla  $N_s/N_r=6/4$  veya  $N_s/N_r=12/8$  kutuplu ARM sürücüler yerine daha çok kutuplu ( $N_s/N_r=18/12$ ) bir ARM modeli tasarlanmıştır. Tasarlanan ARM modelinin Sonlu Elemanlar Yönteminde incelenmiştir. İncelenen ARM modelinin alan dağılımı elde edilmiş ve üretebileceği moment hesaplanmıştır. Bir rotor kutbuna etki eden radyal kuvvet hesaplanmıştır.

İkinci olarak ARM sürücünün düzgün moment üretimi sağlanmaya çalışılmıştır. Bunun için incelenen ARM sürücünün TMS320LF2407A sayısal sinyal işlemcisi ile kapalı çevrim hız ve akım kontrolü yapılmıştır.

TMS320LF2407A EVM kartı motor kontrol amaçlı üretilmiştir. Temelde TMS320LF2407A sayısal sinyal işlemcisini içerir. Hazır PWM çıkışları mevcuttur. Faz akımları gibi analog verileri doğrudan dijitale çevirme birimi, enkoder darbelerini sayan QEP ünitesi sahip olduğu özelliklerden bazılarıdır.

ARM sürücünün kapalı çevrim hız ve akım kontrol benzetim sonuçları Matlab/Simulink programında hazırlanan ARM benzetim şemasından elde edilmiştir.

### **1.1 Anahtarlı Relüktans Motorun Tarihi Gelişmesi**

Anahtarlı relüktans motorlarla ilgi ayrıntılı çalışmalar İngiltere’de 1967 yılında Leeds Üniversitesinde ve daha sonra 1973 yılında Nottingham Üniversitesinde başlamıştır. 1976 yılına kadar ARM’lerle ilgili dünya çapında 67 patent, 1976 ile 1999 yılları arasında ise 1755 patent alınmıştır. Yine 1976 yılına kadar ARM ile ilgili 11 makalenin, 1976 ile 1999 yılları arasında 1847 makalenin yayınlandığı tespit edilmiştir [3].

Cruickshank, Anderson ve Menzies 1966 ile 1968 yılları arasında geliştirdikleri alan anahtarlama relüktans motor, ARM’lerle ilgili önemli bir örnek olmuştur. Modern relüktans motorların ve sürücülerinin bazı özelliklerini bu çalışmada bulmak mümkündür.

General Elektrik şirketinde 1972 yılında Bedford vd., modern anahtarlı relüktans motorun tüm özelliklerini tanımlayan iki patent almıştır. General elektrik anahtarlı relüktans motor ve adım motorlarla beraber birçok özel motor üretmiştir.

Lawrenson ve Stephenson Leeds Üniversitesinde anahtarlı relüktans motorlar üzerine birlikte çalışmaya başlamış, kurdukları Switched Reluctance Drivers Ltd. şirketi ile ARM'leri ticari noktaya taşımıştır ve sonra bu şirket 1994 yılında Emerson şirketi ile birleşmiştir. ARM sürücünün volt-amper ihtiyacı, kontrolü, konum okuyucu ihtiyacı ve gürültü seviyesi gibi konular üzerinde durulmuştur.

1970'lı yılların başından itibaren teknolojiadaki gelişmelere paralel olarak anahtarlı relüktans motorlarda yeni gelişmeler meydana gelmiştir. Örneğin güç transistörü, güç MOSFETi ve IGBT anahtarlama elemanları tristörden sonra icat edilmiştir ve tristörden farklı olarak çok yüksek frekanslarda anahtarlama imkânı vermiştir. Bu hızlı anahtarlama elemanları ARM sürücü devrelerinde kullanılmaya başlanmıştır. 1980 ile 2005 yılları arasında ARM'ler ile ilgili yapılan çalışmalar takip eden başlıkta anlatılmıştır.

## **1.2 Anahtarlı Relüktans Motorlar Üzerine Yapılmış Çalışmalar**

Anahtarlı relüktans motorlar üzerine yapılan çalışmalar yeni olduğu için 1970 ile 1980 yılları arasında anahtarlı relüktans motorlarla ilgili sınırlı sayıda yayın çıkmıştır. Bu yıllarda yapılmış çalışmalardan birini Ray ve Davis [4] yapmıştır. Bu çalışmada Ray ve Davis, 6/4 kutuplu bir ARM'nin sürücü devresini tristör kullanarak tasarlamış ve bu sürücü devresini incelerken ARM'nin doğrusal modelini kullanarak yapmıştır.

1980 yılında Lawrenson vd. yaptıkları çalışma anahtarlı relüktans motor üzerine yapılan en kapsamlı çalışma olmuştur. Bu çalışmada anahtarlı relüktans motorların yapısı ve çalışması ayrıntılı incelenmiş, aynı güçte ARM ile asenkron motorun verimleri karşılaştırılmıştır [2].

Arumugam vd. Sonlu Elemanlar Metodunu kullanarak değişik uyarma akımları ve farklı rotor konumları için ARM'nin magnetik alan dağılımını sunmuştur [5].

ARM'nin doğrusal olmayan modelinin analitik olarak incelendiği çalışmada Miller, konverterlerin güç gereksinimlerinin hesaplanması üzerinde durmuş, ARM ve asenkron motor konverterlerinin güç gereksinimlerini karşılaştırmıştır [6].

Bose vd. Intel 8751 mikroişlemcisini kullanarak 5 BG gücünde bir ARM sürücünün kapalı çevrim hız ve moment kontrollünü gerçekleştirmiştir [7].

Lindsay vd. iki boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemini kullanarak bir stator kutbunda iki dış olan bir ARM'nin bir faz indüktans ve akısını farklı rotor konumları ve uyarma akımları için hesaplamıştır[8].

Harris vd. üç farklı güçte ARM ile eşdeğer güçte asenkron motoru birim hacimdeki moment, verim, konverterin kVA gereksinimi ve moment/eylemsizlik oranı büyüklükleri yönünde karşılaştırmıştır. ARM'nin moment/eylemsizlik oranının daha büyük olduğu belirtilmiştir [9].

Ray vd. yüksek performanslı ARM tahrik sistemlerini incelemiş ve 7.85 KW gücünde bir ARM'yi aynı güçte asenkron motor ile kVA gereksinimi açısından karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu çalışmada 50 KW gücünde bir ARM'nin farklı hızlarda verimleri sunulmuştur [1].

Ray vd. yaptığı çalışmada GTO ve BJT ile gerçekleştirilen iki değişik ARM konverter devresi incelenmiştir [10].

Dawson vd. 7.5 KW gücünde bir ARM'nin ürettiği momenti Sonlu Elemanlar Yönteminde hesaplamış ve elde edilen teorik sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır [11].

Ehsani vd. tarafından C-boşalma (C-dump) kondansatörlü ARM konverter devresi ayrıntılı incelenmiştir [12].

Ilic'-Spong vd. nonlinear kontrolün en son tekniklerini kullanarak ARM'nin geri beslemeli lineer kontrolünü ortak indüktansın etkilerini içerecek şekilde geliştirmiştir [13].

Fauchez, ARM'nin iki boyutlu magnetik analizini sınır eleman ve sonlu eleman metodlarını birlikte kullanarak yapmıştır. Doymanın etkilerinin meydana geldiği demir bölgesi sonlu eleman; hava aralığı, stator sargıları gibi motorun magnetik olmayan kısımları için sınır eleman metodu kullanarak ARM'nin konuma bağlı indüktans ve momentini hesaplamıştır [14].

Mizia vd. ARM ve lineer asenkron motor için moment ve itme kuvvetini Sonlu Elemanlar Yönteminde üç farklı metotta hesaplayarak sonuçları karşılaştırmıştır [15].

Petrovic ve Mandic Sonlu Elemanlar Yönteminden (SEY) elde edilen alan dağılımından ARM'nin faz indüktanslarını hesaplamıştır [16].

Krishnan vd. anahtarlı relüktans motorun tasarımı için Sonlu Elemanlar Yönteminde hazırladıkları bir bilgisayar programını tanıtmıştır [17].

Harris ve Lang inverter sürücülü 6/4 kutuplu bir ARM için basit bir hareket tahmin ediciyi Intel 8031 mikroişlemcisini kullanarak tasarlamıştır [18].

Krishnan vd. Siemens SAB 80535 mikro denetleyicisini kullanarak 6/4 kutuplu bir ARM'nin kapalı çevrim hız ve akım kontrolünü gerçekleştirmiştir [19].

Moghbelli vd. 10 BG'de 8/6 kutuplu bir ARM'nin davranışını Sonlu Elemanlar Yönteminde hesaplamış ve aynı güçte asenkron motorların davranışı ile karşılaştırmıştır. Bu çalışmada, asenkron motorlara göre 10 BG'de ARM'nin veriminin daha yüksek, kayıplarının ve sargıların ısınmasının daha az olduğu belirtilmiştir [20].

Preston ve Lyons herhangi bir uyarmada aynı anda birden fazla fazı uyarılan ARM'ye ilişkin ortak indüktansın etkilerini içeren magnetik eşdeğer devre modelini tanımlamıştır. ARM'nin magnetik eşdeğer devre modeli sonuçları ile SEY sonuçları karşılaştırılmıştır [21].

Moallem ve Ong 8/6 kutuplu, 4 KW gücünde bir ARM'nin kararlı hal çalışma karakteristiğini geniş bir moment-hız aralığında incelemiştir [22].

Moghbelli vd. Tasc Drive Ltd. şirketi tarafından üretilen 8/6 kutuplu bir ARM'nin Sonlu Elemanlar Yönteminde anlık akım ve moment dalga şekillerini hesaplayarak deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır [23].

Konum sensörü ve akım sensörü kullanılmayan bu çalışmada MacMinn vd. 6/4 kutuplu, 5.5 A ve 450 W gücünde bir ARM'yi mikroişlemci kullanarak kontrol etmiştir. Bu çalışmada, rotor konumu faz indüktansı ölçümlerinden belirlenmiş, güç MOSFET'leri üzerindeki pilot elemanlarla faz akımı algılanmıştır [24].

Jack vd. ARM'nin tasarımında gerek duyulan uyarma akımı ve konuma bağlı motorun faz akısının hesaplanmasını Sonlu Elemanlar Yönteminde yapan yeni bir metod tanımlanmıştır. Bölmeleme, sınır değerleri, malzeme bilgileri, denklem çözümü, çözümden sonra makine bilgilerinin çıkarılması işlemlerini otomatik yapan bir bilgisayar programı tanıtılmıştır [25].

Wallace ve Taylor ARM'nin momentindeki dalgalanmayı azaltan yeni bir metod sunmuştur. Referans akımının tepe değerini azaltmayı ve değişimini ayarlamayı esas alan bu yeni yöntemin davranışı üç farklı motor modeli üzerinde analitik, sayısal ve deneysel olarak gözlenmiştir [26].

Becerra vd. Anahtarlı relüktans motorların çok yaygın tipleri için komutasyon şemaları sunmuştur. Bu çalışmada, yarıklı diskle rotor konumu tespit edilen ve basit lojik kontrolle kontrol edilen ARM sürücünün dört bölgede çalışması incelenmiştir [27].

Faiz ve Finch, ARM'nin performansını optimize eden  $t/\lambda$  (diş genişliği/diş adımı) için geliştirdikleri bir bilgisayar programı statorunda kutup başına tek diş olan bir ARM'nin tasarımına uygulamıştır [28].

Krishnan ve Materu, ARM için faz başına tek bir anahtarı olan düşük maliyetli bir konverteri tasarlayarak incelemiştir. Bilinen bir konverter olduğu ancak ayrıntılı incelemenin daha önce yapılmadığı ifade edilmiştir [29].

Arkadan ve Kielgas, elektromagnetik elemanlarda kullanılan çelik alaşımın magnetik özelliklerine sıkıştırmanın etkilerini incelemiştir. Sıkıştırmanın ARM sargı indüktansı dalga şeklini dolayısıyla motorun davranış karakteristiklerini etkilediği ispat edilmiştir [30].

Bolognani vd. C boşalma (C-Dump) kondansatörlü sürücü devresinden beslenen bir ARM'de kırıyıcı akımının genliğini ve kondansatör geriliminin denetimini kayan kip kontrol kullanarak gerçekleştirmiştir [31].

Buja vd. tarafından bir anahtarlı relüktans motor sürücünün değişken yapılı sistem (Variable Structure System=VSS) kontrolü sunulmuştur. Bu çalışmada, VSS kontrol ile ARM'nin momentindeki dalgalanma azaltılmıştır [32].

Michaelides ve Pollock, dört fazlı, 8/6 kutuplu bir ARM'nin akıma bağlı akımın değişimini ve konuma bağlı momentin değişimini Sonlu Elemanlar Yönteminde ARM'nin iki

boyutlu ve üç boyutlu modellerini kullanarak hesaplamıştır. İki boyutlu model sonuçlarına göre üç boyutlu modelin sonuçlarının deneysel sonuçlara daha uyumlu görülmüştür [33].

Buja ve Valla, magnetik doyumda ARM'nin kontrolünü yapmıştır. Bu çalışmada, motor momenti ile kontrol değişkenleri arasındaki ilişkiler akım ve gerilim kontrollü ARM sürücüsü için ayrı ayrı tanımlanmıştır [34].

Iqbal ve Ehsani ARM'nin dolaylı rotor konum algılayıcı şemalarında oluşan hataların analizinde yeni bir metot sunmuştur [35].

Iqbal ve Ehsani, enerjilenen bir ARM fazına komşu veya karşısında duran aktif olmayan bir fazda ortak indüktans gerilimini ölçmeye dayanan yeni bir dolaylı rotor konum algılama yöntemini tanımlamıştır. [36].

Arkadan ve Kielgas, bir faz sargısında meydana gelen kısmi kısa devrede ve konverter devresindeki bir transistörün arızalanmasında ARM sürücü sisteminin dinamik davranışını belirleyen yinelemeli (iteratif) bir yaklaşım sundular [37].

Ehsani vd., iletişim sistemlerinde yaygın kullanılan modülasyon tekniklerine dayanan ARM'in dolaylı rotor konumunu algılayan iki yeni metot sunmuştur [38].

Kjaer vd., gerilim kontrollü bir ARM'de elektrik enerjisi tüketimini azaltan ve verimi %8 arttıran bir iletim açısı kontrol algoritması geliştirmiştir. Uygulamada 6/4 kutuplu bir ARM ve 8 bitlik SAB 80C517A mikroişlemcisi kullanılmıştır [39].

Iqbal ve Ehsani, düşük hızlarda ARM'nin momentindeki dalgalanmayı azaltan yeni bir PWM akım kontrol tekniğini sundular [40].

Panda ve Dash, ARM'nin doğrusal olmayan kontrolü için doğrusal geri beslemeli bir denetleyici tasarladılar. Bu çalışmada, ARM'nin matematiksel modelinde magnetik doyum hesaba katılmıştır [41].

Bolognani ve Zigliotto, ARM sürücüsünün hızını bulanık mantık hız kontrolör ile kontrol etmiştir [42].

Kjaer vd., dört çalışma bölgesinde, geniş bir hız aralığında yüksek verim, momentte az dalgalanma sağlayacak şekilde ARM'nin moment kontrolünü yapmıştır. Bu çalışmada, 3 BG gücünde 8/6 kutuplu bir ARM'nin kontrolünde 32 bitlik Motorola MC68332 mikroişlemcisi kullanılmıştır [43].

Heno vd., düşük ve yüksek hızlarda ARM'de akım kontrolü için üç farklı PWM akım kontrol tekniği sunmuştur [44].

Mir vd., ARM'nin nonlinear modeline ilişkin parametreleri kapalı çevrim faz akımı ve gerilimi bilgilerinden belirleyen bir yinelemeli tanımlama sunmuştur. Pratik uygulama TMS320C30 sayısal sinyal işlemcisi ile gerçekleştirilmiştir [45].

Russa vd., geniş bir hız aralığında çalışma gerektiren uygulamalar için ARM momentinde dalgalanmayı azaltan bir teknik sunmuştur [46].

Sahoo vd., ARM'de momentte dalgalanmayı azaltmak amacıyla bulanık mantık tabanlı bir akım modülatör tasarladılar [47].

Pillay ve Cai, ARM'de statorun dışının yuvarlak ve çıkıntılı olması durumu için statorda oluşan titreşim hareketlerini incelediler. Çıkıntılı statorda titreşimlerin daha fazla olduğunu kanıtladılar [48].

Mir vd., ARM'nin momentindeki dalgalanmayı azaltmak için ARM'ye adaptif bulanık kontrol uygulayıp, bu çalışmada, bulanık kontrol parametrelerini başlangıçta rasgele seçtiler. Ancak daha sonra bu parametreler ayarlanarak en iyi değere getirilmiştir [49].

Choi vd., yüksek hız uygulamalarında ARM'nin moment davranışını iyileştiren yeni bir tasarım yöntemi sunmuştur. Bu yöntemde yüksek hızlarda moment eğrisi birkaç bölgeye bölünerek sonlu elemanlar yöntemi ile birlikte bulanık optimizasyon algoritması kullanılarak motor optimum olarak tasarlanmıştır [50].

Rahman vd., elektrikli taşıtlar ve hibrit elektrikli taşıt uygulamalarında ARM'nin üstünlüklerini sunmuştur. ARM'nin SEY'den hesaplanan statik karakteristikleri motorun dinamik davranışını belirlemek için geliştirilen nonlineer modelde kullanılmıştır. Elektrikli taşıtlarda ARM'nin davranışını indüksiyon motor ve fırçasız DA motor performansları ile karşılaştırılmıştır [51].

Anwar ve Iqbal, ARM'de oluşan akustik gürültünün şiddetini belirlemek ve radyal kuvveti hesaplanmak için analitik bir yöntem sundular. Analitik model kullanarak hesaplanan radyal kuvvetin doğruluğu, sonlu elemanlar yönteminde hesaplanan sonuçlar ile ispatlamıştır [52].

Bu ve Xu, konum algılayıcısız ARM'de dururken ve dönerken rotor konumunu doğru belirleyen yeni bir yöntem sunmuştur. Bu çalışmada geliştirilen algoritmada, kısa bir süre (0.5 ms) stator faz sargılarına DA bir darbe gerilim uygulayarak rotor başlangıç konumu tespit edilmiştir [53].

Rahman vd., yapay sinir ağlarına dayanan optimal moment kontrol şeması sunmuştur. Biri düşük hızlar için ve diğeri de yüksek hızlar için olmak üzere iki ayrı yapay sinir ağı eğitilmiştir [54].

Bouji vd., yaptığı çalışmada, ARM sürücü sistemi normal şartlarda ve arıza durumlarında bulanık mantık kontrol ile kontrol edilmiştir [55].

### 1.3 Tezin Amacı

Anahatarlı relüktans motorun iki temel sorunu vardır:

- 1- Gürültü,
- 2- Momentte meydana gelen salınımlar.

ARM'de rotor kutuplarına etki eden magnetik kuvvet iki bileşene ayrılır. Birinci kuvvet bileşeni teğet kuvvet bileşenidir. Diğeri kuvvet bileşeni ise yarıçap yönünde oluşan kuvvet bileşenidir. ARM'de oluşan gürültünün birçok nedenleri arasından en etkilisi motorun kutuplarına etki ederek titreşimlere sebep olan yarıçap yönünde oluşan kuvvetlerdir. ARM'de yarıçap yönünde oluşan kuvvetler rulmanlara etki ederek titreşimler sebep olur. Bu titreşimler statorda gürültü meydana getirir. Özellikle stator ve rotor kutuplarının birbirine yakın oldukları çakışık konumda yarıçap yönünde oluşan kuvvetler en büyük değeri almaktadır.

Bu çalışmanın bir hedefi, kutuplara etki eden yarıçap yönünde oluşan kuvvetleri azaltarak gürültüyü önlemektir.

ARM'de momentteki dalgalanma motor hızında değişmelere yol açtığı gibi gürültüye de neden olmaktadır. Momentteki dalgalanma ise ARM'nin moment üretim ilkesinden kaynaklanmaktadır. ARM'de bir fazın ürettiği moment rotor konumu ve faz akımına bağlı olarak değişmekte ve toplam moment, fazların bağımsız ürettiği momentlerin toplamına eşit olmaktadır. Akımın bir fazdan diğer faza geçtiği zaman aralığı komütasyon aralığı olarak adlandırılır. Bu komütasyon aralığında kesime giren fazın akımı kontrolsüzdür. ARM'nin momentinde salınımların çoğu bu bölgelerde meydana gelir.

Bu çalışmanın diğer amacı komütasyon aralığında momentte meydana gelen salınımları azaltan ve düzgün bir moment üretimi sağlayan yeni bir akım kontrol algoritması geliştirmektir.

### 1.4 Tezin İçeriği

1. Bölümde ARM'nin kısa bir tarihi geçmişi özetlendi. Tezin üzerinde durduğu konular kısaca değinildi. ARM üzerine yapılmış çalışmalar özetlendi. Tezin amacı açıklandı.

2. Bölümde ARM'nin yapısı, çalışma prensibi, indüktans değişimi, moment üretimi ve besleme devreleri anlatıldı. Ayrıca bu bölümde ARM'de akustik gürültü oluşumunun nedenleri üzerinde duruldu.

3. Bölümde tasarlanan ARM Sonlu Elemanlar Yönteminde incelendi. Farklı rotor konumları için alan dağılımları elde edildi. ARM'nin üretebileceği moment hesaplandı. Yarıçap yönünde oluşan kuvvetler bakımından diğer motor tipleri ile karşılaştırıldı.

4. Bölümde anahtarlı relüktans motorun kontrol prensibi anlatıldı. ARM'nin kapalı çevrim hız ve akım kontrolü açıklandı. Matlab/Simulink programı ile ARM'nin benzetim şeması verildi. ARM sürücü devresinin ayrıntıları üzerinde duruldu.

5. Bölümde kapalı çevrim hız kontrol ve kapalı çevrim akım kontrol bilgisayar benzetim sonuçları ve deneysel sonuçlar gösterildi.

6. Bölümde tezin sonuçları açıklandı ve bundan sonra yapılacak çalışmalara yönelik öneriler sunuldu.

## 2. BÖLÜM

### 2. ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORUN YAPISI VE ÇALIŞMA İLKESİ

#### 2.1 Giriş

Anahtarlı relüktans motorlar (ARM) stator ve rotor yapısı bakımından doğru akım motorları ve asenkron motorlara göre daha basit ve dayanıklı, üretim maliyeti daha düşüktür. Ayrıca sadece stator kutupları üzerinde sargılar vardır ve bu sargılar oldukça basit sarılmış sargılardır. ARM stator ve rotordaki çıkık kutup yapısı ve manyetik devresi ile klasik motorlardan oldukça farklıdır. Örneğin asenkron motorda stator ile rotor arasındaki hava aralığı sabittir. Fakat ARM’de stator ile rotor arasındaki hava aralığı sabit değildir ve bundan dolayı rotor kutbu, rotor adımı kadar yol alırken stator kutbu ile oluşturduğu manyetik direnç sürekli değişir.

Sadece stator kutupları üzerinde sargı olduğu ve rotorunda sargı olmadığı için ARM’lerde, fırça ve kollektör düzeneği kullanmaya gerek olmamaktadır. Hâlbuki yapısında yer alan fırça ve kollektör düzeneğinden dolayı doğru akım motorları çalışırken kıvılcım meydana getirir. Fırça ve kollektör düzeneğinden dolayı doğru akım motorlarında bakım ve onarım masrafı daha fazladır. Buna karşılık ARM’lerde bakım ve onarım masrafı daha azdır ve ARM’ler bundan dolayı daha uzun ömürlüdür [37].

ARM sürücüler günümüzde diğer üstünlükleri yanında yüksek verimleri yönünden de doğru akım ve asenkron motorlara tahrik sistemlerinde rakip olmuştur. Güç elektroniği anahtarlama elemanlarının anahtarlama hızının artması, anahtarlama ve iletim kaybının azalması, kontrol büyüklüklerinin işlenmesinde yüksek hızlı mikro denetleyiciler üretilmesi, ARM sürücülerin davranışının iyileşmesinde etkili olmuştur. Gelişen bilgisayar teknolojisi, Sonlu Elemanlar Yönteminde ARM geometrisinin optimum tasarımına imkan tanımıştır.

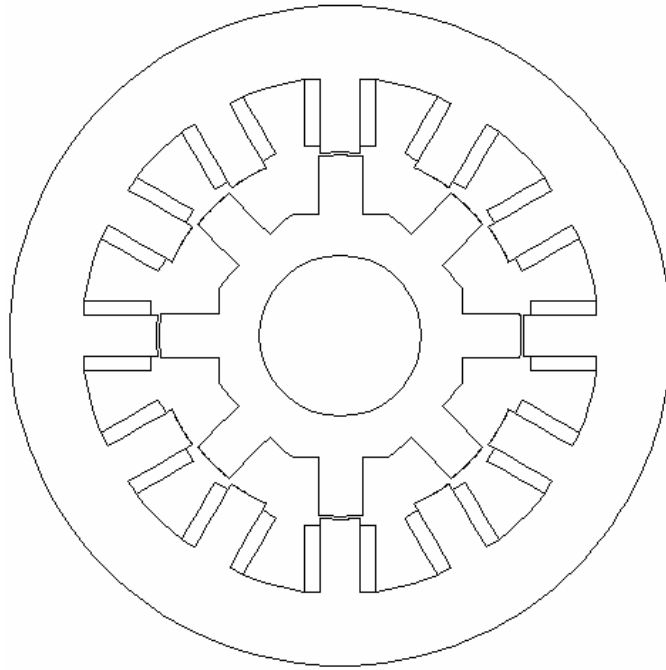
Asenkron motorların hız denetiminde kullanılan konverter devresindeki anahtarların denetimi daha karmaşık ve arıza yapma ihtimali daha yüksektir. Buna karşılık ARM’ye güç sağlayan konverter, çok az güç elemanına ihtiyaç duyar ve böylece çok ekonomik, güvenilir, denetimi daha kolay ve arıza yapma olasılığı daha azdır.

#### 2.2 Anahtarlı Relüktans Motorun Yapısı

Anahtarlı relüktans motorlar (ARM) diğer elektrik makinaları gibi duran ve dönen olmak üzere iki kısımdan oluşur. Stator ve rotor dinamo saclarından yapılır. Tüm elektrik makinalarında olduğu gibi demir kayıplarını azaltmak amacı ile stator ve rotorun yapımında kullanılan sacların bir yüzü yalıtkan lak malzemesi ile yalıtılmıştır. Dinamo sacları kesilip

paketlenerek stator ve rotor oluşturulur. Şekil 2.1’de görüleceği üzere anahtarlı relüktans motorun rotor kutupları arasında büyük hava boşlukları vardır. Bu durum, tipik çıkık kutuplu senkron makinalarda görülür.

ARM’lerde statorda bulunan kutuplar üzerinde sadece sargılar vardır. Rotorda ise herhangi bir sargı yoktur. Statordaki kutuplar üzerinde bulunan sargılardan tek yönlü doğru akımlar akıtılır. Statorda karşılıklı kutuplar üzerinde bulunan sargılar seri bağlanmak suretiyle fazlar oluşturulur. Motorun dönüş yönü fazların enerjilenme sırasına bağlıdır. Örneğin saat yönünde fazlardan sırayla akımlar akıtılırsa rotor saat yönünün tam tersine döner.



**Şekil 2.1** 12/ 8 kutuplu bir ARM’in ön kesit görünüşü.

Eğer saat yönünün tam tersine bir sırayla fazlardan akım akıtılırsa motor saat yönünde dönecektir. Faz sargısı akım yönü, motorun dönüş yönünden bağımsızdır.

Anahtarlı relüktans motorun rotor konumu algılayıcı ile tespit edilir. Rotorun mili üzerine monte edilen optik kodlayıcılar ile ARM’in rotor konum bilgisi alınır ve ona göre akım akıtılacak faz belirlenir. Konum algılayıcı olmadan ARM’in sürülmesi için çalışmalar yapılmıştır. Fakat bu çalışmalar hala yeterli değildir.

Anahtarlı relüktans motorların geçmişi 150 yıl önceye dayanır ve bilinen en eski elektrik makinalardandır. İlk defa 1838 yılında Davidson tarafından icat edilmiştir. Fakat 1960’lara kadar gelişimi için beklemiştir. Yapısı basit olmasına rağmen rotor konumunu tespit edip ona göre sargılardan akım akıtacak anahtar elemanlar olmadığından dolayı ilgi

görmemiştir. Yarıiletken transistör 1948 yılında icat edildikten sonra elektronik sahasında çok hızlı gelişmeler olmuştur. Elektronikteki gelişmeler dikkatleri ARM'lere çekmiştir. Gelişen elektronik ile ARM'nin konumunu tespit etmek kolaylaşmıştır. Güç elektroniği elemanlarının anahtarlama hızındaki artış ARM'nin fazlarından sırayla akım akıtmak mümkün kılmıştır. Çok fonksiyonlu mikroişlemcilerle ARM sürücülerin denetimini yapmak kolaylaşmıştır.

Anahtarlı relüktans motor (switched reluctance motor) tanımı ilk defa 1969'da Nasar tarafından kullanılmıştır. İlk başlarda değişken relüktanslı motor (variable reluctance motor) ismi kullanılmıştır. ARM'ler üzerine ilk çalışmalar, motorun stator ve rotor kutup büyüklüklerinin geometrik tasarımı ve analizi üzerine olmuştur. 1980 yılında Lawrenson tarafından yayınlanan makale ARM'ler üzerine yapılan çalışmalarda bir devrim olmuştur. Son yirmi yılda bu motorlar, çok sayıda doktora tez konusu olmuş ve motorlarla ilgili literatürde çok sayıda yayın çıkmıştır.

Günümüzde ARM'ler ticari olarak imal edilmekte ve satılmaktadır. ARM sürücülerin, değişken hız sürücülerini, taşıtlar, mutfak robotu, dokuma makineleri, çamaşır makinası gibi birçok uygulamasının lisansı alınmıştır. Trenlerin tahrikinde, uçakların benzin pompalarında, bilgisayarların hard disklerinin sürülmesinde, yazıcılarda anahtarlı relüktans motorlar kullanılmaya başlanmıştır.

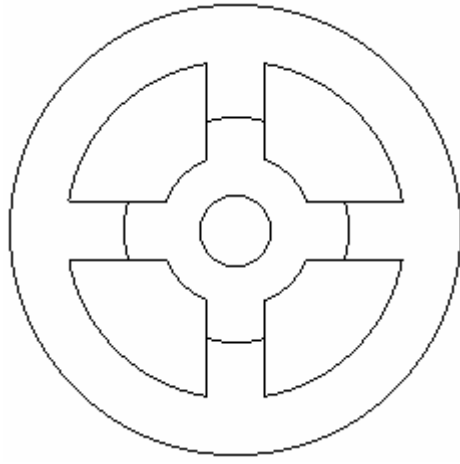
Anahtarlı relüktans motorlar birkaç wattan başlayan çok küçük güçlerden 300 KW gibi çok büyük güçlere kadar imal edilmiştir. Çok düşük hızlardan çok yüksek hızlara (90.000 d/dak) kadar çalışabilmektedir. Kolay değişken hız elde etme ARM'lerin belirgin üstünlüğüdür.

ARM'ler stator ve rotor kutup sayısına göre sırasıyla 4/4, 4/2, 6/4, 8/6, 10/8, 12/8, 18/12 kutup sayılarında yapılabilmektedir. Fakat uygulamada motorun kendiliğinden yol almasını ve sürekli moment üretilmesini sağlamak için rotor kutup sayısı stator kutup sayısından az yapılır.

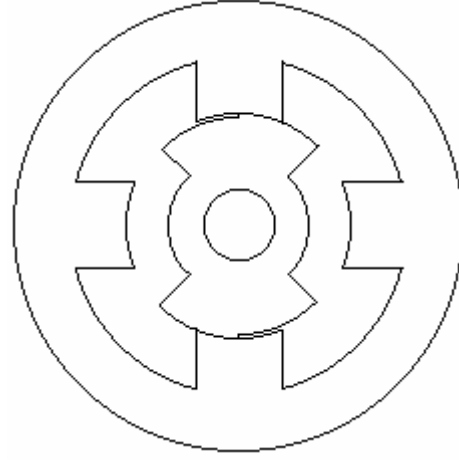
Anahtarlı relüktans motorlarını bir, iki, üç ve dört fazlı çeşitleri vardır. Bir fazlı ARM'lerin yapısı çok basittir, elektronik beslemesi ile makine arasında en az bağlantısı olan makinadır (şekil 2.2). Çok yüksek hızlı uygulamalar için cazip olabilir, fakat bu motorlar kendiliğinden yol alamazlar, ayrıca girdap kayıpları fazladır. 2/2 ve 4/4 kutuplu da yapılabilmektedir. Bu durumda ürettikleri moment çok dalgalıdır [56].

İki fazlı ARM'lerde yol alma problemi adımlı hava aralığı veya rotor kutuplarında asimetrik bir yapı ile aşılmıştır. Fakat momentteki dalgalanma hala yüksektir.

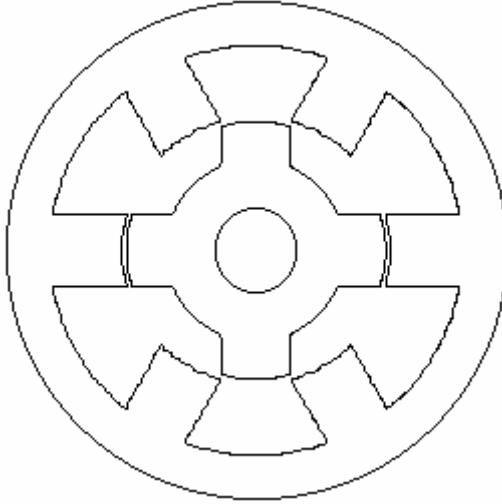
Üç fazlı ARM'ler 6/4 ve 12/8 kutuplu yapılıdır, yüksek yol alma momentine sahiptirler. İleri/geri çalıştırılabilir. Faz sayısı artmasına rağmen momentteki dalgalanma nispeten azalmakla beraber devam eder (şekil 2.2).



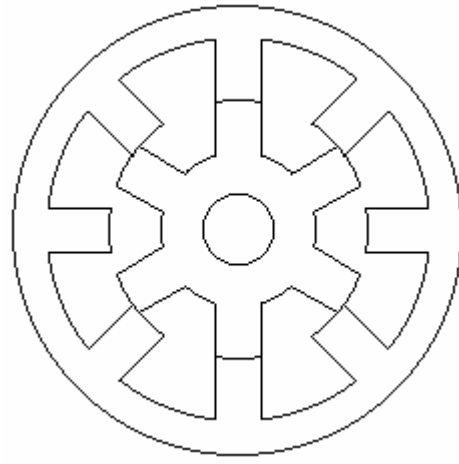
a) Bir fazlı ARM



b) İki fazlı ARM



c) Üç fazlı ARM



d) Dört fazlı ARM

**Şekil 2.2** Stator kutup sayısı ve rotor kutup sayısına göre ARM çeşitleri: a) Bir fazlı 4/4 kutuplu ARM, b) İki fazlı 4/2 kutuplu ARM, c) Üç fazlı 6/4 kutuplu ARM, d) Dört fazlı 8/6 kutuplu ARM.

Dört fazlı ARM'ler 8/6 kutuplu ve beş fazlı ARM'ler 10/8 kutuplu yapılırlar, moment dalgalanmasını azaltmak için gözde olabilirler, fakat çok sayıda güç elektroniği elemanı kullanımı ve çok sayıda bağlantı gerektirirler.

### 2.3 Anahtarlı Relüktans Motorun Çalışma İlkesi

Karşılıklı iki stator kutbu üzerine sarılan sargıların seri bağlanmasıyla ARM'nin bir faz sargısının oluşturulması şekil 2.3' de gösterilmiştir. Diğer kutuplar üzerinde benzer şekilde oluşturulmuş sargılar vardır. Örneğin A fazından bir I akımı akıtıldığında stator kutupları bir mıknatıslık özelliği kazanır ve stator kutupları bir elektromıknatıs gibi karşısındaki rotor kutuplarını çeker ve rotor hareket etmeye başlar. Rotor kutbu başlangıçta iki stator kutbu arasına

denk gelen konumda bulunur. Buna çakışık olmayan konum denir. Stator kutbunun rotor kutbunu çekmesiyle birlikte rotor kutbu hareket ederek bir stator kutbu yayı uzunluğu kadar yol aldıktan sonra stator kutbu ile aynı hizaya gelir. Buna çakışık konum adı verilir. Rotor çakışık olmayan konumda iken relüktans en büyük değerdedir. Ancak rotor dönüp stator ve rotor kutupları çakışık konuma gelince relüktans en küçük değere düşer. Diğer bir ifadeyle rotor kutbu, enerjilenen stator kutbu ile relüktansı minimum yapmak üzere döner. Buna relüktans prensibi denir. ARM, bu relüktans prensibine göre çalışır. Şekil 2.3 kullanılan sembollerden,

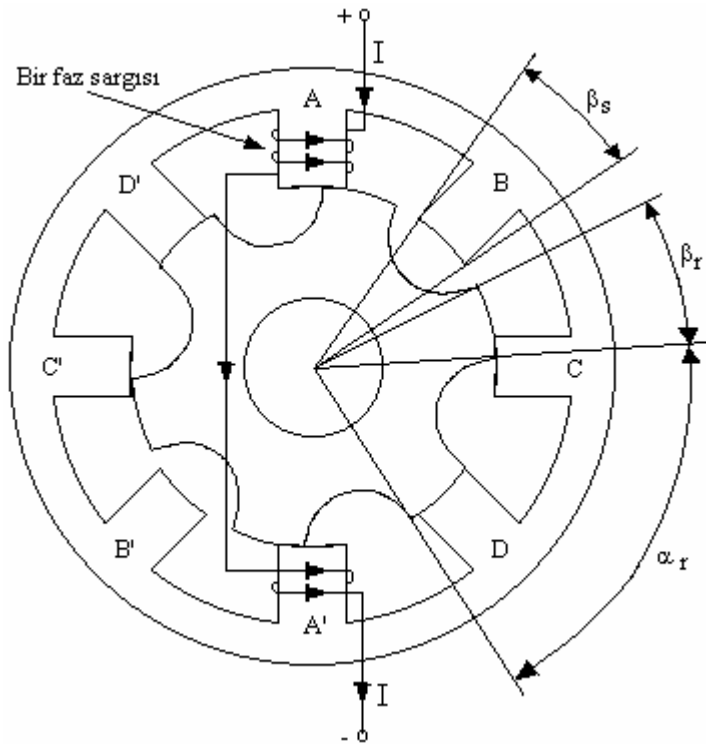
$\beta_s$  = Stator kutup yayı uzunluğu,

$\beta_r$  = Rotor kutup yayı uzunluğu,

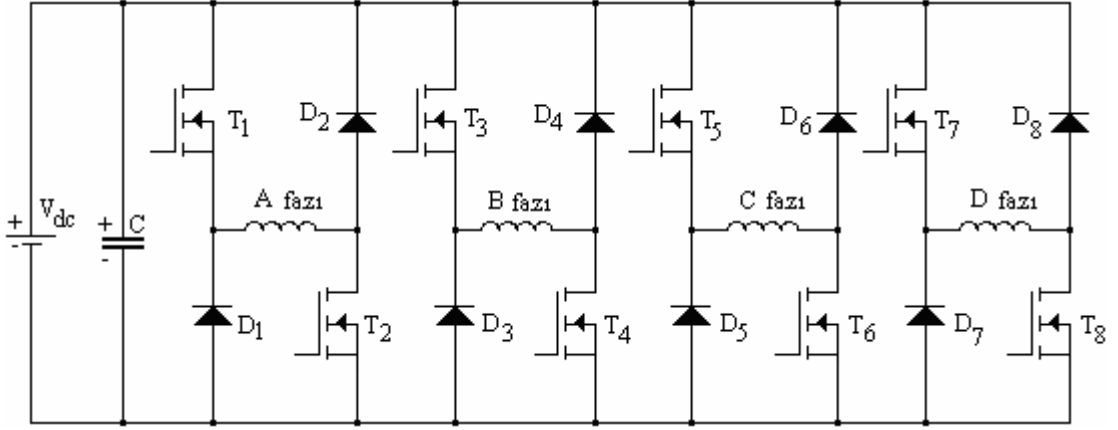
$\alpha_r$  = Rotor kutup adımını,

ifade etmektedir.

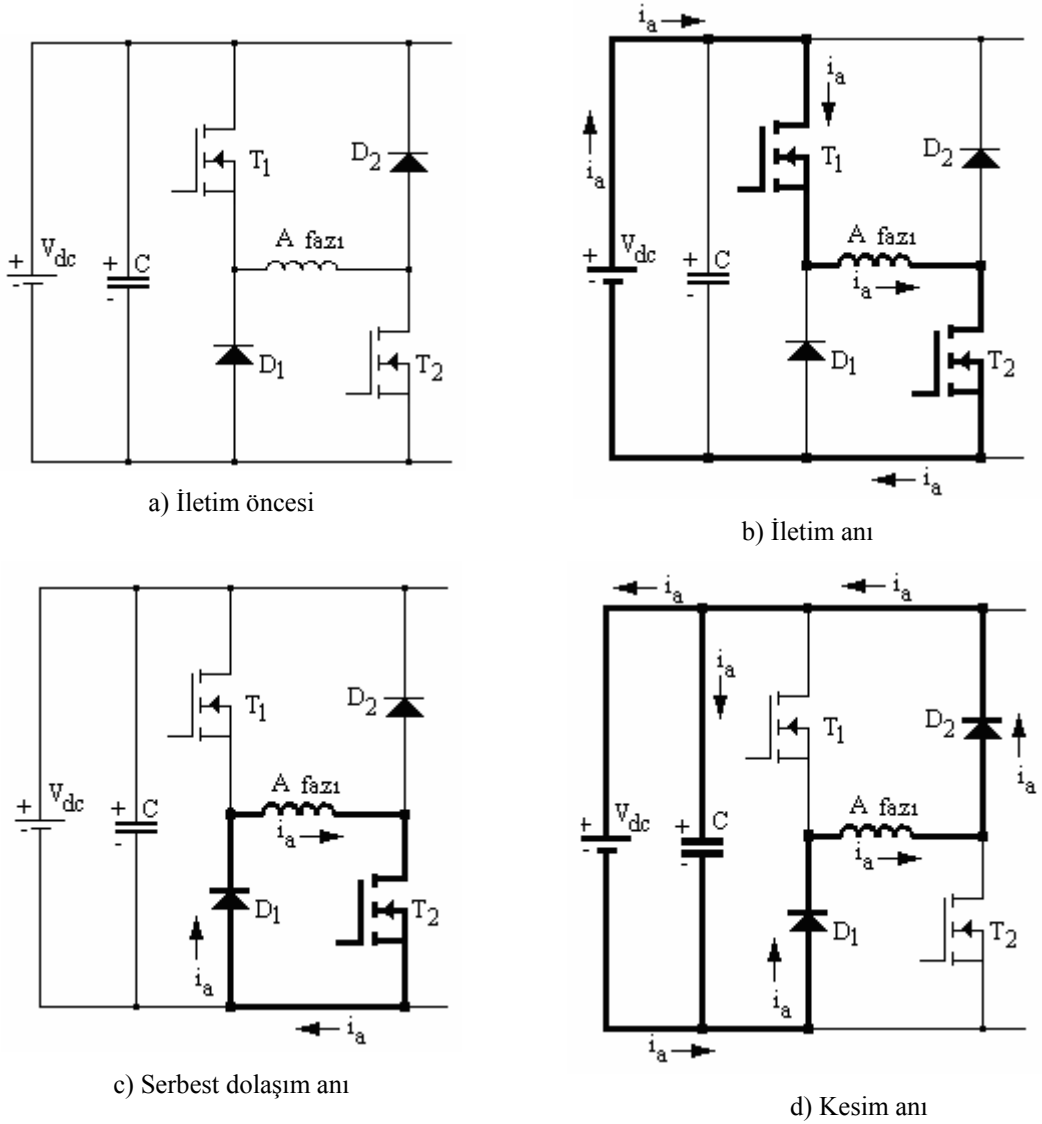
ARM'de sürekli bir hareket elde etmek için rotor konumuna bağlı olarak fazlardan sırayla akım akıtılması gerekir. Şekil 2.3'deki ARM'nin besleme devresi şekil 2.4'de verilmiştir. A faz sargısından akımın akıtılması ve akımın kesilmesi şekil 2.5'de ayrıntılı verilmiştir. Aynı işlemler sırayla diğer fazlarda da gerçekleşir. Şekil 2.5 b şıkında A faz sargısından akımın akıtılması gösterilmiştir.



Şekil 2.3 8/6 kutuplu bir ARM'ye ilişkin bazı büyüklükler ve bir faz sargısının gösterilişi.



Şekil 2.4 8/6 kutuplu dört fazlı ARM'nin besleme devresi.



Şekil 2.5 8/6 kutuplu dört fazlı bir ARM'de bir fazın iletimi ile kesimi arasında akımın akış yolu.

Bu durumda kaynaktan  $T_1$  ve  $T_2$  MOSFETleri üzerinden sargıdan bir  $i_a$  akımı akıtılır. c şıkında ise  $T_1$  anahtarı kesime girdiğinde,  $T_2$  ve  $D_1$  üzerinde akan serbest dolaşım akımı gösterilmiştir. d şıkında ise anahtarların ikisinin de kesime girmesiyle birlikte sargıda biriken enerjinin kaynağa ve kondansatöre geri dönüşü gösterilmiştir.

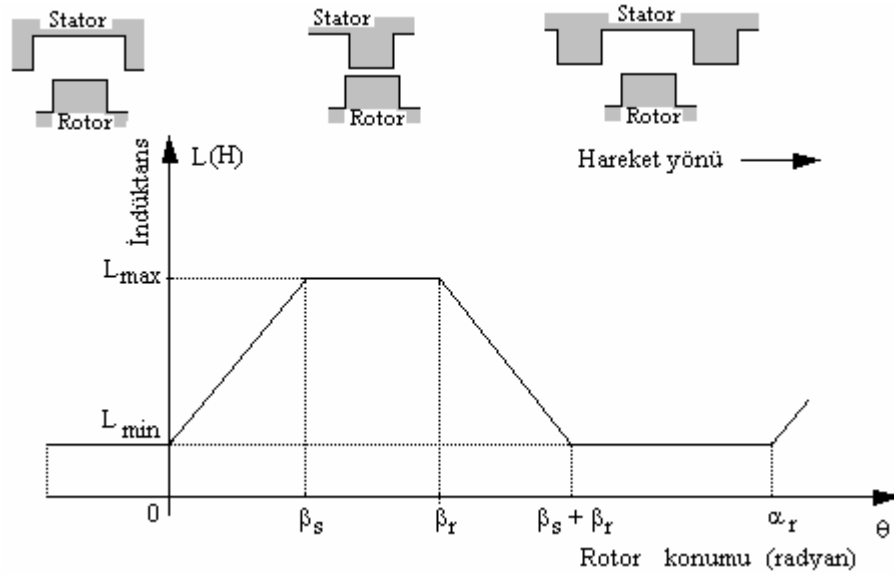
#### 2.4 Anahtarlı Relüktans Motorda Endüktans Değişimi

ARM'de önemli konuların başında konuma bağlı endüktansın değişimi gelir. Çünkü ARM'de üretilen moment indüktansa bağlıdır. Akım sabit alındığında ve magnetik doyumun olmadığı durumda ARM'nin bir faz endüktansı sadece rotor konumuna bağlı değişir. Endüktans çakışık olmayan konumda en küçük değerdedir. Rotor kutbu ile stator kutbunun çakıştığı konumda ise endüktans en büyük değerini alır.

Magnetik doyumun olmadığı, akıma bağlı akının değişiminin doğrusal kabul edildiği magnetik şartlarda, ARM'nin bir fazına ilişkin endüktansın değişimi şekil 2.6'da verilmiştir.

Şekil 2.6'da kullanılan sembollerin anlamı:

- $\theta$  = rotor konumu(radyan),
- $\beta_s$  = stator kutup yayı uzunluğu,
- $\beta_r$  = rotor kutup yayı uzunluğu ( $\beta_s < \beta_r$ ),
- $\alpha_r$  = rotor kutup adımı ( $\beta_s + \beta_r < \alpha_r$ ),
- $L_{max}$  = çakışık konum faz endüktansı ve
- $L_{min}$  = çakışık olmayan konum faz endüktansıdır.



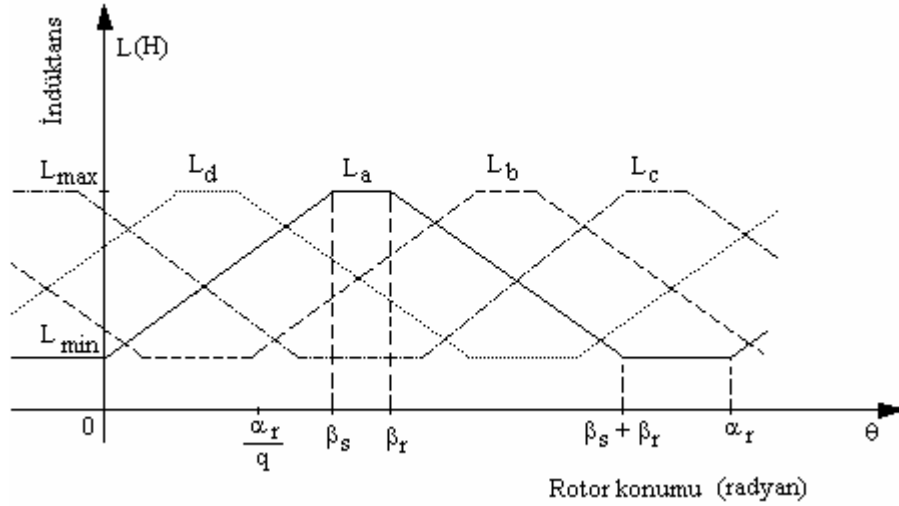
Şekil 2.6 ARM'nin bir faz endüktansının rotor konumuna bağlı değişim grafiği.

Şekil 2.6'daki endüktans grafiği matematiksel olarak aşağıdaki gibi tanımlanabilir [47]:

$$L(\theta) = \begin{cases} L_{\min} + K\theta & 0 \leq \theta \leq \beta_s \\ L_{\max} & \beta_s \leq \theta \leq \beta_r \\ L_{\min} - K(\theta - \beta_s - \beta_r) & \beta_r \leq \theta \leq \beta_s + \beta_r \\ L_{\min} & \beta_s + \beta_r \leq \theta \leq \alpha_r \end{cases} \quad (2.1)$$

Burada K, endüktansın arttığı bölgede endüktansın eğimidir.

$$K = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{\beta_s} \quad (2.2)$$



Şekil 2.7 8/6 kutuplu bir ARM'de lineer magnetik şartlarda dört faz endüktansının konuma bağlı değişim grafiği.

Magnetik doyum ve nonlineerite dikkate alındığında ARM'nin endüktans bağıntısı için denklem (2.3)'deki kosinüs formülü kullanılır [26]:

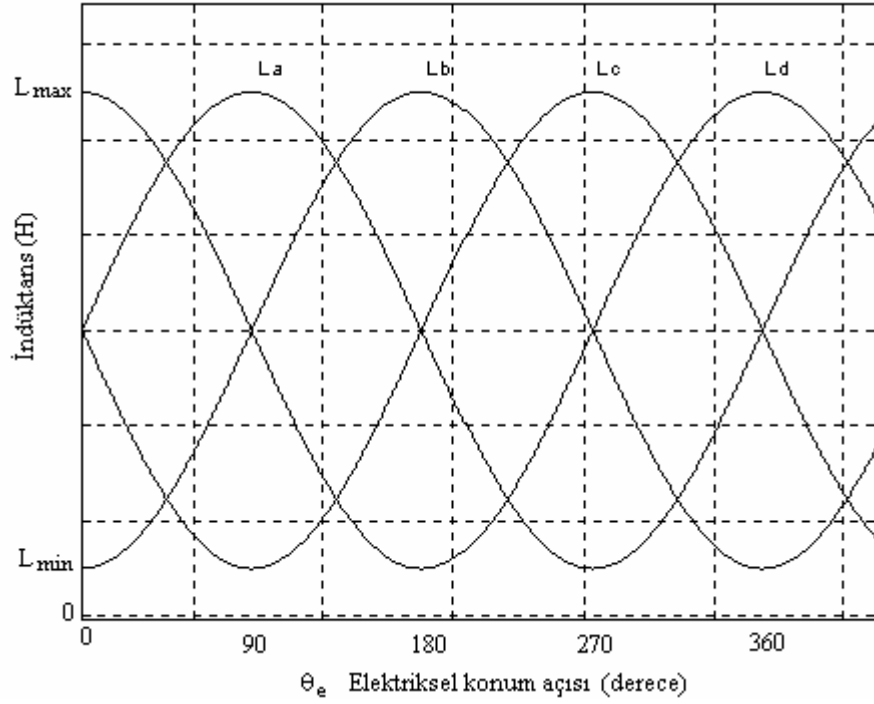
$$L_j = L_1 + L_2 \sum_{j=1}^3 \cos \left[ N_r \theta - (j-1) \frac{2\pi}{q} \right] \quad (2.3)$$

Bu bağıntıda  $L_1$  ve  $L_2$  için,

$$L_1 = \frac{L_{\max} + L_{\min}}{2} \quad (2.4)$$

$$L_2 = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{2} \quad (2.5)$$

eşitlikleri geçerlidir.



**Şekil 2.8** 8/6 kutuplu bir ARM’de kosinüs bağıntısından elde edilen dört faz endüktansının rotor konuma bağlı değişim grafiği.

Burada j indisi sırasıyla fazları, q faz sayısını ( $q=N_s/2$ ),  $N_r$  rotor kutup sayısını ve  $N_s$  stator kutup sayısını göstermektedir. (2.3) bağıntısı dört fazlı 8/6 kutuplu bir ARM için ayrı ayrı yazılırsa

$$L_a = L_1 + L_2 \cos(6\theta - \frac{\pi}{2}) \quad (2.6)$$

$$L_b = L_1 + L_2 \cos(6\theta + \pi) \quad (2.7)$$

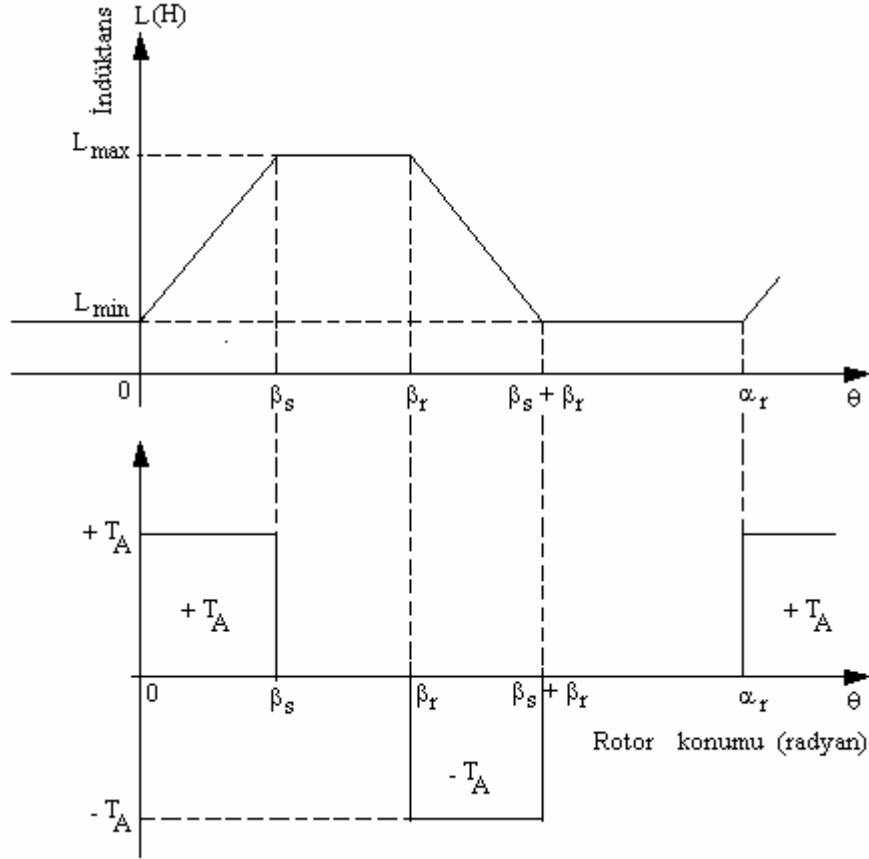
$$L_c = L_1 + L_2 \cos(6\theta + \frac{\pi}{2}) \quad (2.8)$$

$$L_d = L_1 + L_2 \cos(6\theta) \quad (2.9)$$

elde edilir.

## 2.5 Anahtarlı Relüktans Motorda Moment Üretimi

Anahtarlı relüktans motorda herhangi bir faz uyarıldığında endüktans eğiminin pozitif olduğu bölgede pozitif bir moment üretilir. Fakat faz endüktans eğiminin negatif olduğu bölgede ise negatif bir moment üretilir. Diğer durumlarda endüktans değişmediği için herhangi bir moment üretilmez. Şekil 2.9’de doğrusal değişen endüktansa bağlı bir fazın ürettiği moment gösterilmiştir.



Şekil 2.9 ARM’de bir fazın endüktansına bağlı olarak üretilen momentin değişim grafiği.

Herhangi bir j fazı tarafından üretilen ani moment

$$T_j = \frac{1}{2} i_j^2 \frac{\partial L_j(\theta)}{\partial \theta} \quad (2.10)$$

bağıntısından hesaplanabilir [32]. Burada  $L_j$  herhangi bir faz endüktansı,  $i_j$  herhangi bir faz akımı ve  $T_j$  ise j fazının ürettiği ani momentini ifade etmektedir. (2.1)’deki endüktans ifadelerinden faydalanarak A fazı için (2.11)’deki matematiksel moment bağıntıları çıkarılabilir:

$$T_a = \begin{cases} \frac{1}{2} K i_a^2 & 0 \leq \theta \leq \beta_s \\ 0 & \beta_s \leq \theta \leq \beta_r \\ -\frac{1}{2} K i_a^2 & \beta_r \leq \theta \leq \beta_s + \beta_r \\ 0 & \beta_s + \beta_r \leq \theta \leq \alpha_r \end{cases} \quad (2.11)$$

Motor tarafından üretilen toplam ani moment fazların bireysel ürettiği ani momentlerin toplamına eşittir.

$$T_e(\theta, i_a, i_b, i_c, i_d) = \sum_{j=1}^q T_j = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^q i_j^2 \frac{\partial L_j}{\partial \theta} \quad (2.12)$$

Burada q faz sayını ifade etmektedir ve  $q = N_s/2$  dir. Herhangi bir rotor konumunda ani motor momentinin sıfır olmamasını garantilemek için  $\beta_s$ 'in  $\alpha_r/q$ 'den daha büyük olması gerekir.

Motorun verimini yüksek tutmak ve büyük momentler elde etmek için anahtarlı relüktans motorlar aşırı doyumda çalıştırılır. ARM'lerin nonlinear moment ifadesi, enerjinin korunumu yasasından hareketle çıkarılabilir.

ARM'ye uygulanan elektriksel enerjinin büyük bir kısmı mekanik enerjiye dönüşür, diğer kalan kısmı ise magnetik enerji olarak saklanır. Mekanik enerjiye dönüşen enerji Ko-enerji ( $W_c$ ) diye de adlandırılır. Alanda depolanan magnetik enerji ( $W_f$ ) ise kaynağa geri döndürülür. Bu matematiksel

$$W_{\text{elek}} = W_{\text{mek}} + W_f \quad (2.13)$$

şeklinde verilir. Burada

$W_{\text{mek}}$  : Motorun milinden alınan mekanik enerjiyi,

$W_{\text{elek}}$  : Sargıya uygulanan elektriksel enerjiyi,

$W_f$  : Depolanan magnetik enerjiyi

ifade etmektedir.

Anahtarlı relüktans motorun bir fazına ilişkin eşdeğer devreden hat gerilimi için

$$V = Ri + \frac{d\Psi}{dt} \quad (2.14)$$

yazılabilir. Burada V şebeke gerilimi, i faz akımı, R faz direnci ve  $\Psi$  faz akısıdır. ARM'nin bir faz akısı  $\theta$  rotor konumu ve faz akımının bir fonksiyonudur. Akım ve konuma göre türev almak için birini sabit tutup diğerinin kısmi türevini alıp çarpmak ve toplamak gerekir.

$$V = Ri + \frac{\partial\Psi}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial\Psi}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (2.15)$$

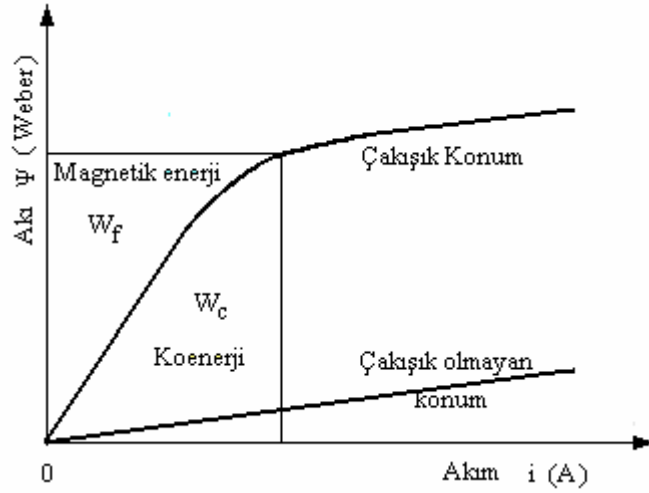
Sargıya uygulanan elektriksel güç eşitliğin her iki yanını akım ile çarpılırsa

$$dW_{\text{elek}} = Vi = Ri^2 + i \frac{d\Psi}{dt} \quad (2.16)$$

elde edilir. (2.16) eşitliğinde ARM'nin bir fazına uygulanan elektriksel güç, sargı direnci üzerindeki kayıp güç, mekanik güç ile depolanan magnetik gücün toplamıdır [57]. Mekanik güç;

$$dW_{\text{mek}} = i d\Psi - dW_f \quad (2.17)$$

olur.



Şekil 2.10 ARM'de akıma bağlı akının değişim grafiği.

Koenerji,

$$W_c = \int_0^i \Psi(\theta, i) di \quad (2.18)$$

bağıntısından hesaplanabilir. Moment ise sabit akım için

$$T(\theta, i) = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} \quad (2.19)$$

eşit olur. Doğrusal magnetik şartlarda akı akım ilişkisi

$$\Psi = L(\theta).i \quad (2.20)$$

şeklinde dir. (2.20) denklemi (2.18)'de yerine yazılır ve integral alınır

$$W_c = \frac{1}{2} i^2 L(\theta) \quad (2.21)$$

elde edilir. (2.21) ifadesi (2.19)'da yerine yazılırsa

$$T(\theta, i) = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (2.22)$$

elde edilir [40].

## 2.6 Anahtarlı Relüktans Motorun Besleme Devreleri

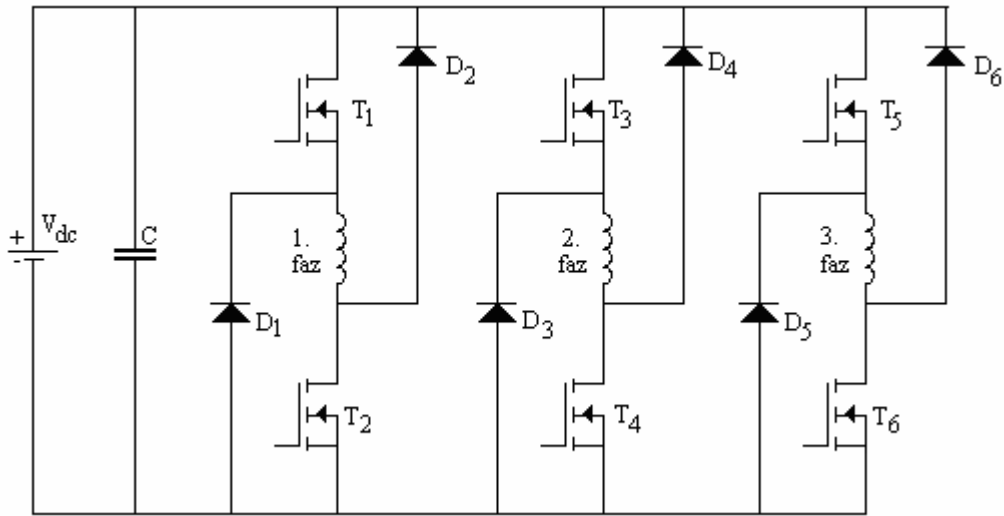
ARM sürücü devreleri klasik AA ve fırçasız DA sürücü ( sürekli mıknatıslı motor sürücüler) devrelerine göre üstünlüklere sahiptir. Birincisi, ARM'nin sürücü devresindeki anahtarların kısa devre tehlikesi imkânsızdır. Bu bütün ARM konverterleri için doğrudur. Çünkü bir ARM'de her bir faz sargısı bulunduğu koldaki ana anahtara daima seri bağlıdır. İkincisi, klasik AA veya fırçasız DA sürücülerden daha büyük ölçüde fazlar arasında bağımsızlık vardır. Dolayısıyla bir fazdaki arıza (motor ya da konverterde) genelde yalnızca o

fazı etkiler, diğer fazları etkilemez, diğer fazlar bağımsız çalışmaya devam eder. AA sürücülerde bir fazdaki bir arıza diğer iki fazı zayıflatır [12].

ARM'lerin sargılarından akan akım tek yönlüdür. Bu da AA veya fırçasız DA sürücülerin her bir faz bacağındaki iki seri anahtar yerine faz başına sadece bir anahtar elemanla çalışma imkânı verir. Böylece ARM devreleri AA sürücü devrelerinden daha az yarıiletken eleman kullanır ve sadece faz başına seri olarak ileri bir gerilim düşümü olmaktadır, böylece prensip olarak, güç kayıpları klasik konverterlerden daha düşük olabilmektedir. Diğer faktörler eşit olmaktadır. Bu faktörlerin ikisi konverterin fiziksel hacminde bir küçülmeye ve güvenilirlikte bir artışa izin verir.

### 2.6.1 Klasik İki Anahtarlı Besleme Devresi

Şekil 2.11 motor sargılarının faz anahtarları ile seri olmaları hariç klasik altı-adımlı AA eviriciye benzer bir ARM konverter devresini gösterir. Yukarıdaki ve aşağıdaki anahtarlar birlikte kapatılıp açılır ve pratikte AA evirici sürücülerine eşit gerilim ve akım oranlarına sahiptir. Faz sargısı anahtarların kısa devre olmasını önler.

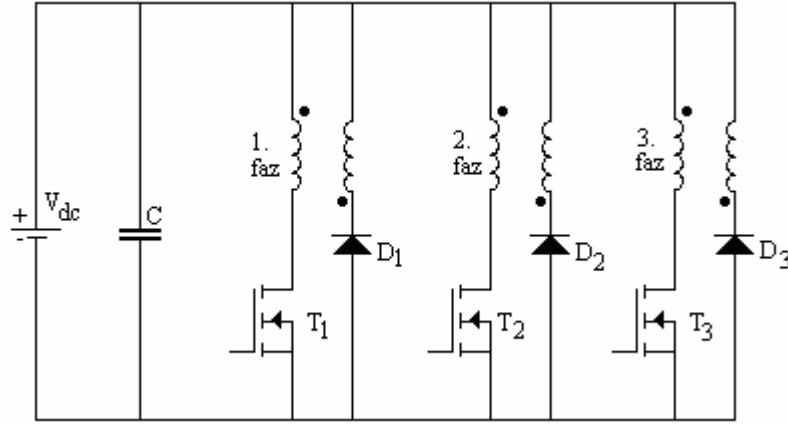


Şekil 2.11 Faz başına iki anahtarlı klasik ARM sürücü devresi.

### 2.6.2 İki Sargılı Besleme Devresi

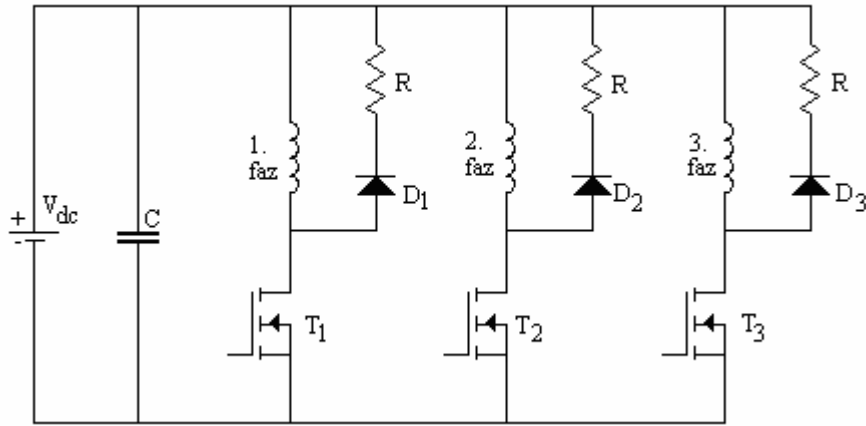
Faz başına sadece bir anahtarla tek kutuplu çalışmayı başarmak için teklif edilen devreler arasında en basiti şekil 2.12'de verilen iki sargılı devredir. Bu devre adım motoru sürücülerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak kesimde birinci sargıda biriken enerjinin ikinci sargı üzerinden kaynağa döndürülmesi problemlidir. Özellikle kuplaj hatalarında

sargılar arasında gerilim atlamasına sebep olmaktadır. Motor sargıları iki telli sarıldığı için kullanılan bakır tel miktarı artmaktadır ve motor ile konverter arasında bağlantı sayısı iki kat daha fazla olmaktadır.



Şekil 2.12 Faz başına tek anahtarlı ve iki sargılı (bifilar) ARM sürücü devresi.

### 2.6.3 Boşalma Dirençli Besleme Devresi

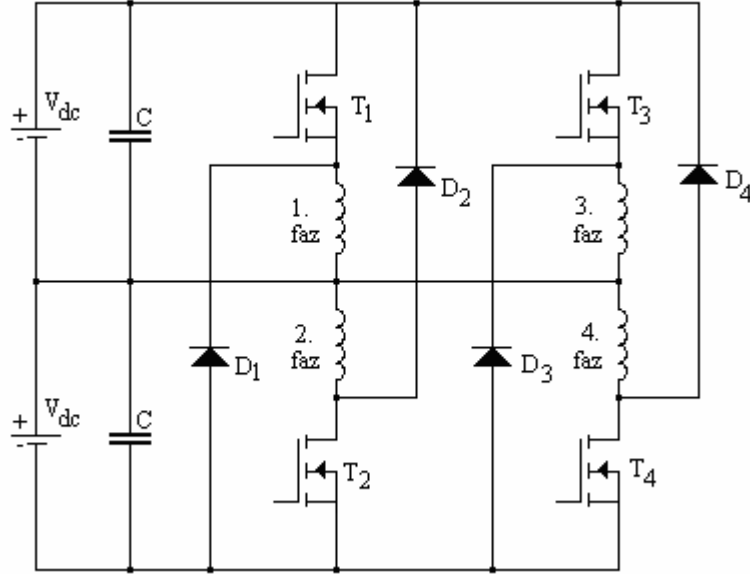


Şekil 2.13 Boşalma dirençli ARM sürücü devresi.

Boşalma direnci üzerinden faz akımlarının akıtılmasına müsaade eden ve iki sargı kullanmayı gerektirmeyen tek anahtarlı bir ARM sürücü devresi şekil 2.13'te gösterilmiştir. Bu sürücü devresindeki dirençte güç kayıpları çoğu durumlarda doğal olarak büyük olur ve bu devre elbette büyük güçlerde kullanılması mümkün değildir. Bu devrede, akımın hızla sıfıra yaklaşması için büyük bir boşalma direncine ihtiyaç vardır. Fakat bu büyük direnç, anahtarlama elemanında kabul edilemez yüksek bir tepe geriliminin üretilmesine sebep olur.

### 2.6.4 Orta Nokta Bağlantılı İki DC Kaynaklı Besleme Devresi

Şekil 2.14'deki devre şekil 2.11'deki devrenin bir türevidir, farklı olarak şekil 2.14'de iki DA kaynak kullanılmıştır. Devre dört anahtar ve dört diyota sahiptir. Yukarıdaki fazlar alttaki DA kaynağa serbest bağlanmıştır. Bununla beraber, herhangi bir fazdaki bir arıza üstteki ve alttaki değerlerin dengesini bozacaktır. Bu nedenle bu devrede, fazlar kendi aralarında tamamen bağımsız değildir.

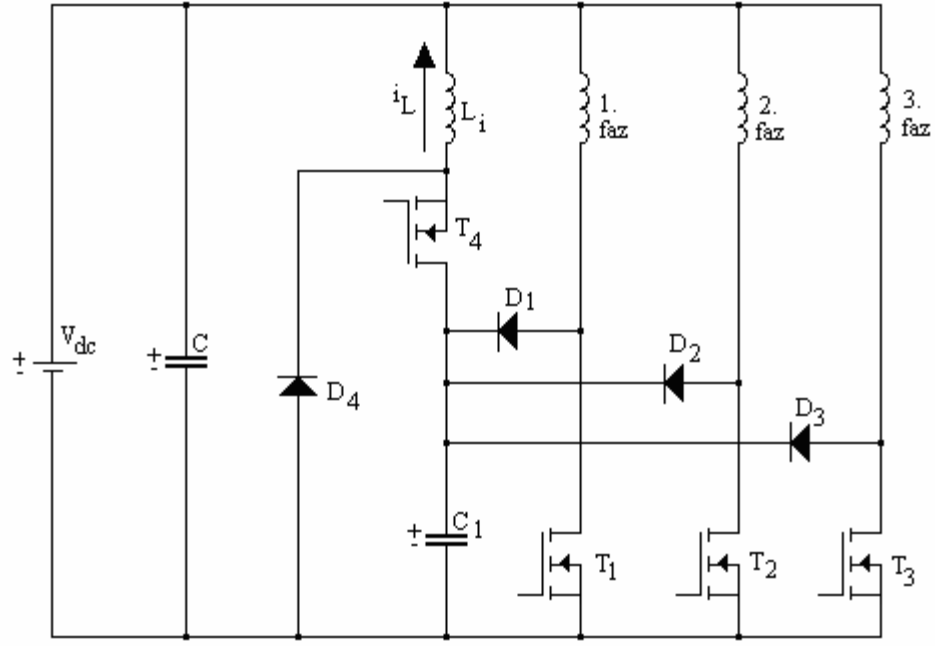


Şekil 2.14 Orta nokta bağlantılı iki DC kaynaklı ARM sürücü devresi.

### 2.6.5 Kondansatör Boşalmalı Besleme Devresi

Şekil 2.15'de gösterilen devre, C-boşalmalı devre diye adlandırılır. Çünkü depolanan enerji, bir rezonans devresiyle DA kaynağa döndürülmeden önce bir kondansatörün içine boşaltılır.

Her bir dönem boyunca geri kazanılan enerjinin miktarı  $T_4$  kıyıcı anahtarıyla denetlenebilir. Kıyıcı anahtarı kapatıldığında  $C_1$  boşalma kondansatörü deşarj olmaya başlar.



Şekil 2.15 Kondansatör boşalmalı (C- dump) ARM sürücü devresi.

Kıyıcı anahtarı açıldıktan sonra,  $L_i$ 'de biriken enerji  $D_4$  serbest dolaşım diyotu üzerinden kaynağa geri döner. Kondansatör gerilimi konverterle denetlenebilir ve enerjinin çoğu geri kazanılır.

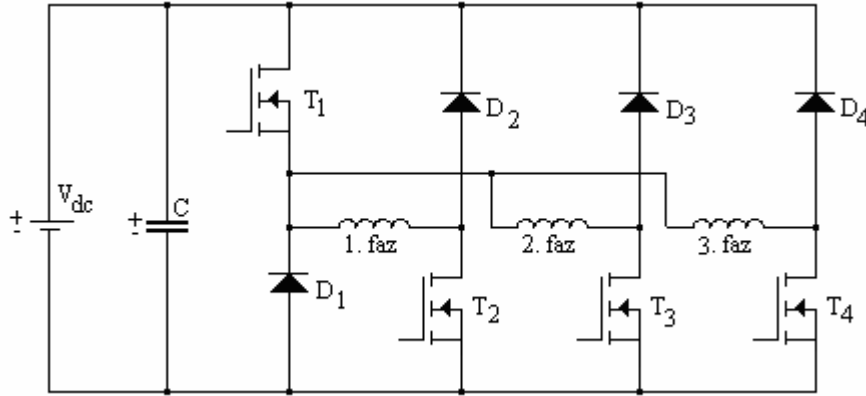
C-boşalma konverteri faz başına sadece tek bir anahtara sahiptir. Ana faz anahtarlarının tümü negatif DA şebeke ucuyla irtibatlıdır ve faz bacalarında “üst” elemanlar yoktur. C boşalma konverteri ARM besleme devrelerinin tüm üstünlüklerine sahiptir, fazlar arasında yüksek derecede bir bağımsızlık vardır ve kısa devre tehlikesi yoktur. Bu sürücü devresinde iki sargı veya iki seviyeli DA kaynak kullanımı yoktur ve bazı adım motor devrelerindeki gibi bir boşalma direncinde harcanmak yerine depolanan enerjinin büyük bir miktarı kaynağa geri döndürülür. Boşalma kondansatörü geriliminin denetimini gerçekleştirmek basittir ve boşalma reaktör akımı kıyıcı transistörün kısılmasıyla denetlenebilir. Bu, ihtiyaç duyulan boşalma reaktörünün büyüklüğünü küçültür.

C-boşalma konverteri, kıyıcı transistör eklendiği için devre tam manasıyla faz başına tek bir anahtarlı değildir. İlâveten, boşaltma kondansatörü, reaktör ve diyot vardır.

Kıyıcı transistör negatif DA uca bağlı değildir ve bu bazı durumlarda kapı sürücüsünü zorlaştırır. Eğer kıyıcı transistör açık devre arızası verirse, boşalma kondansatörünün gerilimi faz transistörleri aşırı gerilimle harap oluncaya kadar hızla artacaktır [12].

### 2.6.6 Miller Besleme Devresi

Şekil 2.16'da gösterilen Miller besleme devresinde yarıiletken eleman sayısı azaltılmıştır. Üç fazlı ARM için sadece dört anahtar ve dört diyot gereklidir. Bununla beraber ana anahtar( $T_1$ ) ve ana diyotun ( $D_1$ ) gücü, faz anahtarları veya faz diyotlarından çok daha yüksektir ve böylece daha pahalıdır. Faz akımları tek transistörle denetlenebileceği gibi iki transistörle de denetlenebilir. Miller devresinin dezavantajı, fazlar birbirinden tamamen bağımsız değildir.

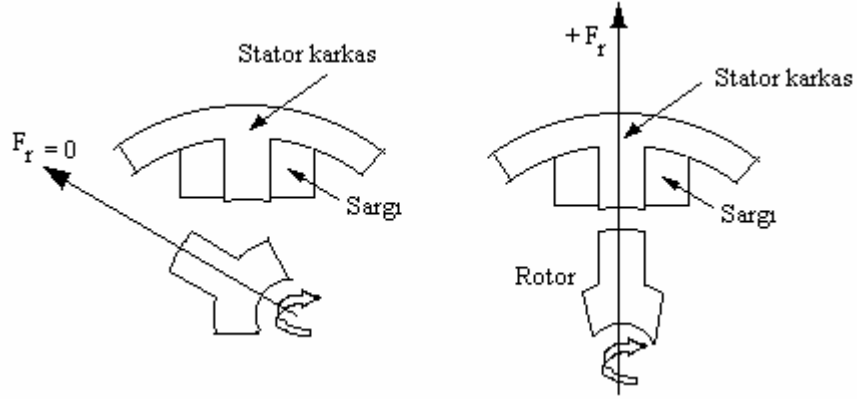


Şekil 2.16 Üç fazlı ARM için Miller besleme devresi.

### 2.7 Anahtarlı Relüktans Motorda Titreşim ve Akustik Gürültü

Tüm elektrik motorları çalışırken gürültü çıkarır, fakat anahtarlı relüktans motorlarda oluşan gürültü daha yüksektir. Statorun yarıçap yönünde oluşan kuvvetin meydana getirdiği titreşim tamamen magnetik kökenlidir ve anahtarlı relüktans motorda akustik gürültünün temel nedenidir. Stator ile rotor kutbu çakışmak üzere yaklaşınca stator kutbu ile rotor kutbu arasındaki hava aralığını azaltmaya çalışan yarıçap yönünde oluşan magnetik kuvvet titreşimlere neden olur. Hava aralığını azaltma çabası, bütün rotor konumları için herhangi bir fazın uyarılması boyunca vardır, özellikle çakışık konumda ve rotor kutuplarının konumları çakışık konuma girerken etkilidir. Bu konumda relüktans en düşük ve akı en yüksek değerdedir [59].

ARM'de karşılıklı stator kutupları üzerindeki sargılar bir fazı oluşturur ve aynı zamanda uyarılır. Faz uyarımı teğet kuvvetlerin oluşmasına neden olduğu gibi statorun yapısını bozan yarıçap yönünde oluşan kuvvetler de üretir. Stator titreşimi ARM'deki akustik gürültünün ana kaynağıdır [56].



**Şekil 2.17** Çakışık konumdan önce ve çakışık konumda yarıçap yönünde oluşan kuvvetin büyüklüğü.

ARM'de çok büyük titreşimler, uyarılan fazın artan harmoniği ve statorun rezonans frekansı üst üste çakıştığı zaman ortaya çıkar. Daha küçük titreşimler ise uyarılan akımın harmoniği ile statorun rezonans frekansı çakışmaması halinde oluşur.

Önemli stator titreşimleri komütasyon sırasında meydana gelir. Daha küçük titreşimler faz akımı ilk defa akıtılırken ve akım kısıyıcı başlangıcında oluşur. Komütasyon aralığında radyal kuvvetin eğimindeki çok büyük değişim nedeniyle titreşimler meydana gelir.

ARM'deki akustik gürültünün kaynağı mekanik ve magnetik olmak üzere iki başlık altında geniş olarak sınıflandırılabilir [48]. Gürültü kaynaklarının bir kısmında biri diğerini etkiler, titreşim ve gürültü çıkarmayı artırır. Evirici ve kontrol stratejisi hem mekanik hem de magnetik gürültüyü etkileyebilir.

ARM'deki akustik gürültüyü oluşturan mekanik ve magnetik sebepler şunlardır:

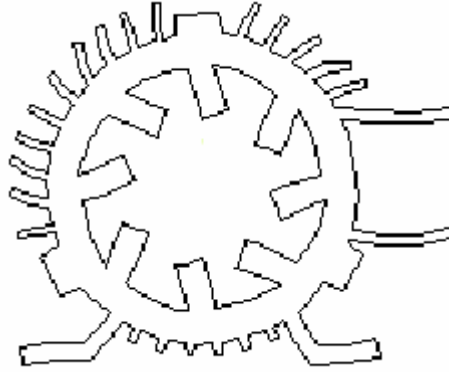
- 1- Yatak titreşimi, yapı nedeniyle ve herhangi bir tertibat hatası tamamen mekanik kaynaklı akustik gürültüye sebep olur.
- 2- ARM çift çıkıntılı yapıya sahiptir. Rotor kutuplarının dönerken oluşturduğu rüzgar akustik gürültüye neden olur.
- 3- Malzemelerin özelliklerinin tek biçimli(uniform) olmayışı sonucu rotorun mekanik dinamik balansızlığı, akı dağılımının düzgün olmayışı rotorda magnetik ve mekanik kuvvetlere sebep olur ve akustik gürültü meydana getirir.
- 4- Rotor ve statorun simetrik olmayan yapıları, özellikle düzgün olmayan hava aralığı rotorda simetrik olmayan kuvvetler meydana getirir.
- 5- Stator sargıları iyi düzenlenmemişse veya iyi yapılmamışsa motor çalışırken aktif veya pasif hareket edebilir. Bunun sonucu gürültü oluşur.
- 6- Stator sargılarından akan akımlar ile yerel magnetik alanlar sargılarda kuvvetler oluşacak şekilde birbirini etkiler ve sargı titreşimlerine sebep olur.

- 7- Eğer stator ve rotor sacları sıkı paketlenmemişse stator ve rotor saclarına etki eden magnetik kuvvetlerle titreşim oluşur.
- 8- Stator ve rotor kutuplarına etki eden ve moment üreten teğet kuvvetler, komütasyon esnasında stator ve rotorda titreşimlere neden olur.
- 9- Özellikle ARM'de çift çıkıntılı yapı nedeniyle stator ve rotor kutupları arasında güçlü bir radyal magnetik çekim mevcuttur. Bu çekim kuvveti stator titreşimlerine tesir eder.
- 10- ARM'nin momentindeki dalgalanma diğer elektrik motorlarından daha fazladır. Momentteki dalgalanmanın kutuplarda oluşturduğu teğet magnetik kuvvetler stator titreşimlerine neden olur.

Stator ile rotor arasındaki radyal çekim kuvveti çift çıkıntı yapılı ARM'de titreşimin ve akustik gürültünün temel kaynağı olduğu kabul edilmiştir.

Motorun yapı malzemeleri ve yapısı stator titreşimi doğasına tesir eder. Radyal kuvvetin genliği faz akımı ve rotor konumunun bir fonksiyonudur. Faz sargılarından akan akım faz sayısı, sac levhalarının şekli, sargıların direnci ve indüktansı, kaynak gerilimi, iletim ve kesim açıları, akım kıyıcı gibi denetleyici parametrelerine ve nihayet ARM'deki sabit parametrelere bağlıdır.

Literatürde rotor konumuna bağlı olarak ARM'ye etki eden radyal kuvvetleri sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplayan çalışmalar yayınlanmıştır [56], [52].



**Şekil 2.18** Radyal kuvvetlerin etkisi altında stator kutuplarında meydana gelen deformasyon.

## 2.8 Anahtarlı Relüktans Motorun Üstünlükleri

Elektrik motorlarının sınıflandırılması içinde asenkron motor, DA motor, fırçasız sabit mıknatıslı DA motor ve adım motorları ile karşılaştırıldığında anahtarlı relüktans motorların belirgin bazı üstünlükleri literatüre yansımıştır [9], [60], [20]. ARM'lerin üstünlükleri şunlardır:

- 1- ARM'nin rotoru basittir, üretimi kolaydır ve düşük ataleti vardır.
- 2- ARM'nin statoru basit sargılıdır, faz sargıları arasında herhangi bir bağlantı yoktur. Bir sargıdaki arıza diğer sargıları etkilemez.
- 3- Stator sargılarında meydana gelen bakır kayıpları, stator ve rotorda saclarında oluşan demir kayıpları sonucu ısınan motoru soğutmak kolaydır.
- 4- Mıknatıs içermediği için ARM'nin izin verilen rotor sıcaklığı fırçasız sabit mıknatıslı DA motordan daha yüksektir.
- 5- ARM'de moment akımın akış yönünden bağımsızdır. Bu da ARM besleme devrelerinde daha az anahtar kullanma imkânı ve düşük maliyet sağlar.
- 6- Arıza durumunda açık devre gerilimi ve kısa devre akımı sıfırdır veya çok küçüktür.
- 7- AC ve fırçasız sabit mıknatıslı DA motor evirici devrelerinin aksine ARM'de kullanılan konverterlerde faz sargısı ile anahtar seri olduğu için kısa devre olmaz.
- 8- Aşırı akım çekmeden çok yüksek yol alma momentleri ile yol alır. Hâlbuki asenkron motorda yol alma momenti düşük ve yol alma akımı çok yüksektir.
- 9- 90000 d/dak gibi oldukça yüksek hızlarda çalıştırmak mümkündür.

## 2.9 Anahtarlı Relüktans Motorun Sakıncaları

Anahtarlı relüktans motorların üstünlükleri yanında bazı sakıncaları var. Aşağıda sıralanan sakıncaları gideren çözüm önerileri sunulmuştur. Ama tamamen bu sakıncalar aşılmış değildir. Anahtarlı relüktans motorların başlıca sakıncaları şunlardır:

- 1- Anahtarlı relüktans motorun kutupları üzerindeki sargılardan sırasıyla akım akıtmak rotor konum bilgisi ile belirlenir. Rotor konumu, konum okuyucu ile tespit edilir. Rotor miline bağlı optik konum okuyucu kullanma zorunluluğu bir dezavantajdır.
- 2- Anahtarlı relüktans motorda gerek momentindeki dalgalanma ve gerekse radyal kuvvetlerin varlığı sebebiyle titreşim ve akustik gürültü meydana gelir. Şiddetli akustik gürültü ARM'lerin diğer bir dezavantajıdır.

## 2.10 Anahtarlı Relüktans Motorda Oluşan Kayıplar

Anahtarlı relüktans motorda meydana gelen kayıplar bakır, demir, sürtünme ve rüzgar kayıplarının toplamıdır. Demir kayıpları histerezis ve girdap akımı (fuko) kayıplarından oluşur. Böylece toplam kayıp için

$$P_k = P_{cu} + P_h + P_g + P_{stm} \quad (2.23)$$

formülü yazılabilir. Burada,

- $P_k$  : Toplam kayıp güç (W)  
 $P_{cu}$  : Bakır kayıpları (W)  
 $P_h$  : Histerezis demir kayıpları (W)  
 $P_g$  : Girdap akımı demir kayıpları (W)  
 $P_{stim}$  : Sürtünme ve rüzgâr kayıpları (W)

simgelemektedir.

Bakır kayıpları stator kutup sargılarının direnci üzerinde meydana gelen ısı kayıplarıdır ve faz akımının genliğinin karesi ile değişir. Bakır kayıpları

$$P_{cu} = q.R.i^2 \quad (2.24)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada q faz sayısı, R bir faz sargısı direnci ve i ise bir faz akımını ifade etmektedir.

Gerilim kontrollü bir ARM'de faz akımı  $\theta_{on}$  akım verme açısı ve  $(\theta_{off} - \theta_{on})$  iletim açısının bir fonksiyonu olarak değişir. Eğer  $\theta_{on}$ ,  $\theta_{off}$  akımı kesme açısına çekilirse moment üretimi olmayacaktır [39].

ARM'de demir çekirdekte meydana gelen  $P_h$  histerezis ve  $P_g$  girdap akımı kayıpları akı yoğunluğu ve uyarma frekansına bağlıdır. Demir kayıpları Steinmetz denklemi [68] kullanarak hesaplanır:

$$P_h = C_h . f . B_m^{a+bB_m} \quad (2.25)$$

$$P_g = C_e . f^2 . B_m^2 \quad (2.26)$$

$$P_{Fe} = P_h + P_g \quad (2.27)$$

Burada  $C_h$  ve  $C_e$  katsayılar, f uyarma akımı frekansı,  $P_{Fe}$  toplam demir kaybı, a ve b sabitlerdir.  $B_m$  akı yoğunluğunun maksimum değeridir.

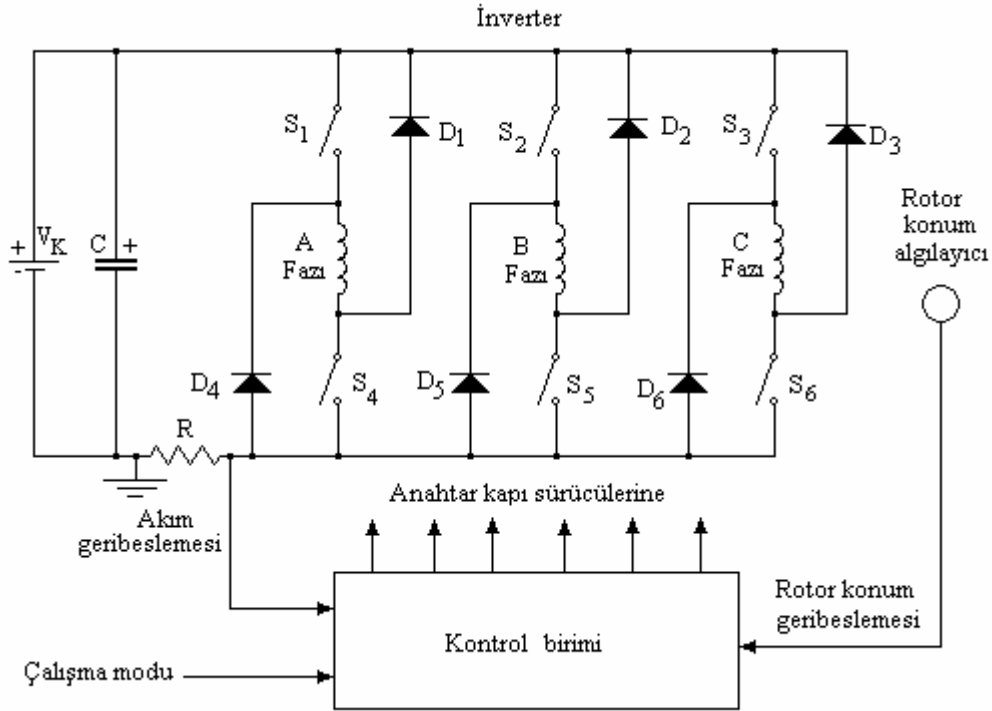
ARM' de demir kayıpları çekirdekte eşit dağılmış değildir. ARM stator ve rotor kutuplarında ve ayrıca stator karkası ile rotor karkasında meydana gelen demir kayıpları farklıdır. ARM' de yüksek frekanslarda demir kayıpları ve düşük frekanslarda bakır kayıpları fazla olacaktır.

## 2.11 Anahtarlı Relüktans Motorun Sürülmesi

Anahtarlı relüktans motorun faz sargılarından sırayla akım akıtılması için rotor konumunun bilinmesi gerekir. Rotor konum algılayıcı ile ARM'nin rotor konumu tespit edilir.

Şekil 2.19'da bir faz devresinde iki anahtar olan üç fazlı bir ARM sürücü devresi verilmiştir. Kontrol birimi rotor konumu, motor akımı ve motorun çalışma moduna (ileri

çalışma veya geri çalışma durumuna) göre anahtarların her biri için anahtar kapı işaretlerini üretir. Akım geri beslemesi R direnci üzerinden sağlanır.

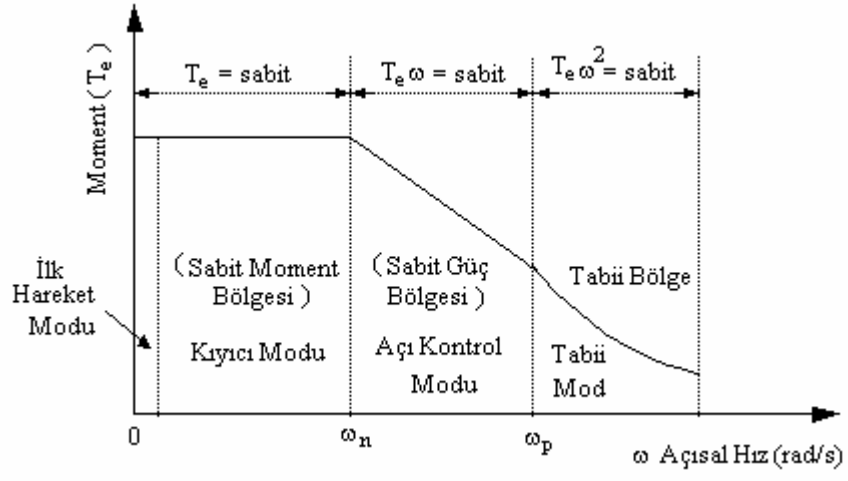


Şekil 2.19 Anahtarlı relüktans motor sürücü devresi.

## 2.12 Anahtarlı Relüktans Motorun Moment-Hız Karakteristiği

ARM'nin moment-hız grafiği Şekil 2.20'de gösterildiği gibi üç bölgeye ayrılır: Sabit moment bölgesi,  $\omega_n$  nominal hızın altındaki bölgedir. Nominal hız ( $\omega_n$ ) nominal gerilimde sabit ateşleme açısıyla motora uygulanabilen en büyük akımda ulaşılan en yüksek hız olarak tanımlanır. Düşük hız çalışma bölgesinde zıt emk küçük olduğu için iletimden sonra akım ani olarak yükselir. Bu bölgede, histerisiz denetleyici veya PWM gerilim denetleyici gibi ayarlayıcılarla akım istenilen sabit seviyede tutulabilir [36].

Yüksek hızlarda zıt emk önemlidir. Böylece faz için ileri iletim açısı gerekli olmaktadır, böylece daha düşük bir emk ile istenilen seviye akıma yine yükselebilir. Zıt emk dc gerilimi aştığı zaman, akım düşmeye zorlanır, kutup üst üste binmeye başlar ve PWM veya kıyıcı kontrol artık mümkün olmaz. Motor ondan sonra tek darbe modda çalışır, moment üretimi  $\theta_{dwell}$  iletim açısı (dwell açısı) ve  $\theta_{adv}$  ileri açısının ayarlanmasıyla yeterli yüksek seviyede sürdürülür. Bu bölge sabit güç ( $T_e\omega$ ) bölgesidir,  $\omega_p$  hızına kadar  $\theta_{dwell}$  ve  $\theta_{adv}$  sınırlarına ulaşıncaya kadar devam eder. Bu hızın ötesinde moment sadece tabii karakteristiği ile kontrol edilir ve çok dik bir eğim ( $1/\omega^2$ ) ile düşer.



Şekil 2.20 ARM moment-hız karakteristiği.

### **3. BÖLÜM**

#### **3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNDE ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORUN İNCELENMESİ**

##### **3.1 Giriş**

ARM'nin geometrik yapısı üzerinde yapılan birçok çalışma ile ARM'nin davranışının düzeltilmesi için değerli çabalar sarf edilmiştir. ARM'nin önemli bir problemi şüphesiz rahatsız edici olan akustik gürültüdür.

ARM'de oluşan akustik gürültünün birinci kaynağı motorun moment üretiminden gelen momentteki dalgalanmadır. İkinci sebep ise ARM'nin rotor kutuplarına etki eden magnetik radyal kuvvetlerdir. Stator ve rotor kutup sayısını arttırarak aynı moment için bir rotor kutbuna etki eden radyal kuvvetin azaltılması sağlanabilir. Bu amaçla üç fazlı, kutup sayısı arttırılmış bir ARM modeli tasarlanmıştır.

Bu bölümde, tasarlanan ARM modelinin Sonlu Elemanlar Yöntem'inde analizi yapılmıştır. Aynı moment için tasarlanan ARM'nin bir kutbuna etki eden radyal kuvvet ile üç fazlı daha az kutuplu ARM'lerin bir rotor kutbuna etki eden radyal kuvvetler karşılaştırılmıştır.

Anahtarlı relüktans motorda bir rotor adımında stator kutbu ile rotor kutbu arasındaki relüktans sabit olmadığı ve sürekli değiştiği için ARM'nin ürettiği moment için asenkron motorlarda olduğu gibi bir analitik bağıntı yazmak mümkün olmamaktadır. Analitik bir modelin geliştirilmesinin zor olduğu bu tür uygulamalarda Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanarak motorun ürettiği momenti ve motorun bir rotor kutbuna etki eden radyal kuvveti hesaplamak mümkündür.

##### **3.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi**

Bilgisayarın mühendislik problemlerinin çözümünde büyük bir kolaylık ve sürat sağlaması, Laplace ve Poisson tipi kısmi türevli diferansiyel denklemlerin çözümünde başlıca iki matematiğin gelişmesine neden olmuştur. Bunlardan birincisi Sonlu Farklar Yöntemi, diğeri Sonlu Elemanlar Yöntemidir. Sonlu Farklar Yöntemi doğrudan doğruya Laplace veya Poisson denklemlerinin çözümü ile ilgilenir. Sonlu Elemanlar Yöntemi bu denklemlerin çözümü yerine, bu çözümü sağlayan potansiyel fonksiyonun ele alınan sisteme ilişkin enerji fonksiyonelini minimize edip etmediği ile ilgilenir. Enerji fonksiyonelini minimize eden potansiyel fonksiyonu aynı zamanda Laplace veya Poisson diferansiyel denklemini sağlamaktadır. Yakın zamana

kadar tüm mühendislik dallarında yaygın olarak kullanılan Sonlu Farklar Yöntemi yerini Sonlu Elemanlar Yöntemine bırakmaktadır [70].

Sonlu Farklar Yönteminde kullanılan kısmi türevli diferansiyel denklemleri, fark denklemler haline getirmek için Taylor serisine açılır. Taylor serisinde üç ve daha yüksek mertebeden türev içeren terimler ihmal edilir. Bu ihmaller kesme hatası denilen bir hataya neden olur.

Sonlu Elemanlar Yöntemi, çözüm bölgesinin bir kısmındaki çözüm noktalarının sayısını istediğimiz şekilde artırma imkânı vermektedir. Eğrisel sınırlara kolayca uydurulabilmesi karmaşık matematiğine rağmen Sonlu Elemanlar Yönteminin tercih edilmesinin en önemli sebebidir.

Sonlu Elemanlar Yönteminde, deneme fonksiyonunu aramada kullanılan dört alt yöntem şunlardır:

- 1- Rayleigh-Ritz yöntemi,
- 2- Galerkin yöntemi,
- 3- En küçük kareler yöntemi,
- 4- Ağırlıklı artıklar yöntemi.

Bu yöntemlerden en yaygın olarak kullanılanı, Rayleigh-Ritz ve Galerkin yöntemidir.

### 3.2.1 Sınır Koşulları

Sınır koşulları üç grupta toplanır:

1- Dirichlet sınır koşulu: Bu koşulda potansiyel fonksiyonu  $\Phi(s)$  sınırın belirli bir kısmında veya bütün sınır boyunca belirli bir değerdedir. Eğer sınır koşulu sıfır ise, buna homojen Dirichlet sınır koşulu denir.

2- Neuman sınır koşulu: Sınıra dik doğrultuda gelen akı yoğunluğu ile ilgili bir sınır koşuludur. Eğer ortam izotropik ise sınıra dik doğrultuda gelen akı genel olarak

$$K(s) \frac{\partial \phi}{\partial n} = h(s) \quad (3.1)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada  $\mathbf{n}$ , sınırın dışına doğru normal birim vektörünü göstermektedir. Bu ifade çözüm bölgesindeki alandan bağımsızdır.  $h(s)=0$  olması haline, homojen Neuman sınır koşulu denir.

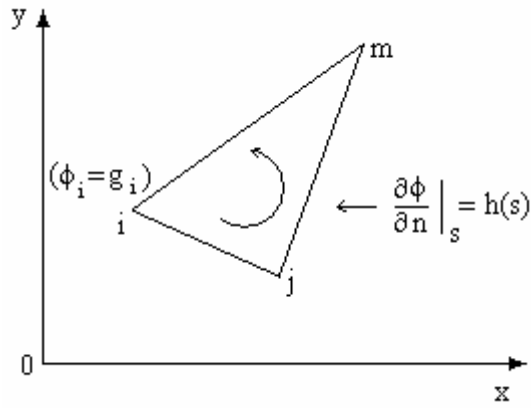
3- Karışık sınır koşulu: Sınırdaki bulunan iletken bir malzeme sınıra normal doğrultuda gelen akıyı etkiler. Sınırdaki bu değişimler lineer değişimler ise bu sınır koşulu genel olarak

$$K(s) \frac{\partial \phi}{\partial n} + \sigma(s)\phi(s) = h(s) \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada  $\sigma(s)$  sınırdaki elektriksel iletkenlik fonksiyonunu göstermektedir. Eğer  $K(s)=1$  ve  $h(s)=0$  ise homojen karışık sınır koşulu ortaya çıkar.

### 3.2.2 Sonlu Elemanlar ve Rayleigh-Ritz Yöntemi

Sonlu Elemanlar Yönteminin esası, karışık sınır koşulları nedeniyle tüm çözüm bölgesi için bir potansiyel fonksiyonu bulmanın mümkün olmadığı durumlarda, çözümün sonlu küçük elemanlar içinde aranmasına dayanır. Çözüm için elemanların geometrik yapısı aynı kalmak koşulu ile tüm çözüm bölgesi aynı geometrik elemanlara bölünür. Bu geometrik elemanlar üçgen, dörtgen ve benzeri şekiller olabilir. Düzensiz şekillerde ve gelişmiş güzel bölümlendirmelerde üçgen elemanlar kolaylık sağlar.



Şekil 3.1 Bir üçgen eleman.

Şekil 3.1'deki gibi bir tek üçgen eleman için deneme fonksiyonu

$$\phi(x, y) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y \quad (3.3)$$

olarak birinci dereceden bir polinomla ifade edilir. Bu deneme fonksiyonunda  $\phi$ ,  $x$  ve  $y$ 'ye göre doğrusal bir şekilde değişmektedir. Eğer üçgenin köşelerindeki potansiyel  $\phi_i$ ,  $\phi_j$  ve  $\phi_m$  ise, deneme fonksiyonu bu köşe noktalarında bu değerleri sağlamak zorundadır. Bu nedenle aşağıdaki ifadeler yazılabilir [70]:

$$\alpha_0 + \alpha_1 x_i + \alpha_2 y_i = \phi_i \quad (3.4)$$

$$\alpha_0 + \alpha_1 x_j + \alpha_2 y_j = \phi_j \quad (3.5)$$

$$\alpha_0 + \alpha_1 x_m + \alpha_2 y_m = \phi_m \quad (3.6)$$

Şekil 3.1'deki üçgenin alanı, köşe koordinatları cinsinden

$$\Delta = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_m & y_m \end{vmatrix} \quad (3.7)$$

yazılabilir. 3.4, 3.5 ve 3.6'bağıntılarında  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  ve  $\alpha_2$  değerlerini bularak deneme fonksiyonunda yerine yazmak üzere aşağıdaki kısaltmalar yapılarak,

$$a_i = x_j y_m - x_m y_j \quad b_i = y_j - y_m \quad c_i = x_m - y_j \quad (3.8)$$

$$a_j = x_m y_i - x_i y_m \quad b_j = y_m - y_i \quad c_j = x_i - x_m \quad (3.9)$$

$$a_m = x_i y_j - x_j y_i \quad b_m = y_i - y_j \quad c_m = x_j - y_i \quad (3.10)$$

$$N_i = \frac{(a_i + b_i x + c_i y)}{2\Delta} \quad (3.11)$$

$$N_j = \frac{(a_j + b_j x + c_j y)}{2\Delta} \quad (3.12)$$

$$N_m = \frac{(a_m + b_m x + c_m y)}{2\Delta} \quad (3.13)$$

elde edilir. Bu yeni tanımlamalar deneme fonksiyonundaki yerlerine yazılacak olursa

$$\phi(x, y) = N_i(x, y)\phi_i + N_j(x, y)\phi_j + N_m(x, y)\phi_m \quad (3.14)$$

bulunur. Burada kullanılan N fonksiyonlarına şekil fonksiyonları veya enterpolasyon fonksiyonları denir. Böylece elde edilen  $\phi(x, y)$  deneme fonksiyonu, üçgenin köşeleri dahil her tarafında geçerlidir. Her köşede o köşeye ait şekil fonksiyonunun değeri 1, diğer köşelere ait şekil fonksiyonlarının değeri sıfırdır.

Her bir üçgen eleman içinde, potansiyel fonksiyonun Laplace diferansiyel denklemini sağladığı varsayıldığından, homojen sınır koşullarında Laplace denkleminde karşı geçen fonksiyonel

$$F = \iint \left[ \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (3.15)$$

dir. Potansiyel fonksiyonları yerine 3.14'te ele edilen deneme fonksiyonu kullanılırsa

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \phi_i \frac{\partial N_i}{\partial x} + \phi_j \frac{\partial N_j}{\partial x} + \phi_m \frac{\partial N_m}{\partial x} = \frac{\phi_i b_i + \phi_j b_j + \phi_m b_m}{2\Delta} \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = \phi_i \frac{\partial N_i}{\partial y} + \phi_j \frac{\partial N_j}{\partial y} + \phi_m \frac{\partial N_m}{\partial y} = \frac{\phi_i c_i + \phi_j c_j + \phi_m c_m}{2\Delta} \quad (3.17)$$

$$F = \left( \frac{\phi_i b_i + \phi_j b_j + \phi_m b_m}{2\Delta} \right)^2 \iint dx dy + \left( \frac{\phi_i c_i + \phi_j c_j + \phi_m c_m}{2\Delta} \right)^2 \iint dx dy \quad (3.18)$$

bulunur. Burada

$$\Delta = \iint dx dy \quad (3.19)$$

olmak üzere

$$F = \frac{1}{4\Delta} \left[ (\phi_i b_i + \phi_j b_j + \phi_m b_m)^2 + (\phi_i c_i + \phi_j c_j + \phi_m c_m)^2 \right] \quad (3.20)$$

elde edilir.  $F=f(\phi_i, \phi_j, \phi_m)$  olacaktır.  $F$ 'yi minimum yapacak  $\phi_i, \phi_j$  ve  $\phi_m$  değerlerini bulmak için, değişkenlere göre kısmi türev alınır.

$$\frac{\partial F}{\partial \phi_i} = 2 \left[ \frac{(b_i + c_i)^2}{4\Delta} \phi_i + \frac{(b_i b_j + c_i c_j)}{4\Delta} \phi_j + \frac{(b_i b_m + c_i c_m)}{4\Delta} \phi_m \right] \quad (3.21)$$

Burada

$$S_{ii} = \frac{(b_i + c_i)^2}{4\Delta} \quad S_{ij} = \frac{(b_i b_j + c_i c_j)}{4\Delta} \quad S_{im} = \frac{(b_i b_m + c_i c_m)}{4\Delta} \quad (3.22)$$

ve benzer şekilde

$$S_{jj} = \frac{(b_j + c_j)^2}{4\Delta} \quad S_{mm} = \frac{(b_m + c_m)^2}{4\Delta} \quad S_{jm} = \frac{(b_j b_m + c_j c_m)}{4\Delta} \quad (3.23)$$

olur.  $S_{ij}=S_{ji}$ ,  $S_{im}=S_{mi}$ ,  $S_{jm}=S_{mj}$  kısaltmalarıyla

$$\frac{\partial F}{\partial \phi_i} = 2(S_{ii}\phi_i + S_{ij}\phi_j + S_{im}\phi_m) \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \phi_j} = 2(S_{ji}\phi_i + S_{jj}\phi_j + S_{jm}\phi_m) \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \phi_m} = 2(S_{mi}\phi_i + S_{mj}\phi_j + S_{mm}\phi_m) \quad (3.26)$$

$F=f(\phi_i, \phi_j, \phi_m)$  olduğundan

$$\frac{\partial F}{\partial \phi} = \frac{\partial F}{\partial \phi_i} + \frac{\partial F}{\partial \phi_j} + \frac{\partial F}{\partial \phi_m} = 0 \quad (3.27)$$

$$2 \begin{bmatrix} S_{ii} & S_{ij} & S_{im} \\ S_{ji} & S_{jj} & S_{jm} \\ S_{mi} & S_{mj} & S_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_i \\ \phi_j \\ \phi_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

elde edilir. Şekil 3.1'de verildiği haliyle  $\phi_i=g_i$  sınır koşulu matrisin ilk satırına yerleştirilse

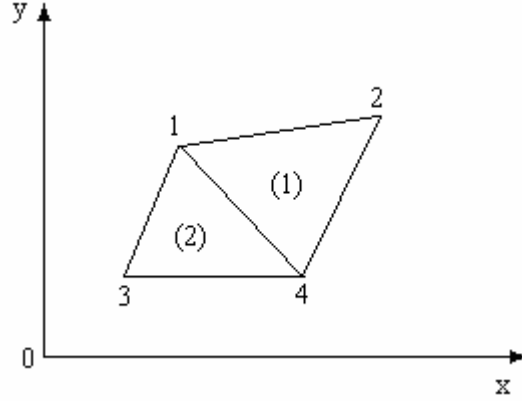
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ S_{ji} & S_{jj} & S_{jm} \\ S_{mi} & S_{mj} & S_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_i \\ \phi_j \\ \phi_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

ve bu matris düzenlenerek aşağıdaki simetrik matris elde edilir.

$$\begin{bmatrix} S_{jj} & S_{jm} \\ S_{mj} & S_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_j \\ \phi_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -g_i S_{ji} \\ -g_i S_{mi} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

### 3.2.3 Üçgen Elemanların Birleştirilmesi

Matematiksel çözümün doğruluğunu arttırmak için çözüm bölgesi çok sayıda elemana ayrılır. Bu durumda elemanlar arası ilişkilerin bilinmesi gerekir. Şekil 3.2'de iki elemana bölünmüş olan bir çözüm bölgesi gösterilmiştir. Her iki eleman için geçerli olan bir fonksiyonel vardır.



Şekil 3.2 İki üçgen eleman.

$$F = F^{(1)} + F^{(2)} \quad (3.31)$$

Bu fonksiyonellerin her birinin ayrı ayrı minimizasyonu ile elde edilen denklem takımı kısım 3.2.2 verildi. Bu denklem takımları 1. elemanda

$$\begin{bmatrix} S_{11}^1 & S_{12}^1 & S_{14}^1 \\ S_{21}^1 & S_{22}^1 & S_{24}^1 \\ S_{41}^1 & S_{42}^1 & S_{44}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

ve 2. elemanda

$$\begin{bmatrix} S_{11}^2 & S_{13}^2 & S_{14}^2 \\ S_{31}^2 & S_{33}^2 & S_{34}^2 \\ S_{41}^2 & S_{43}^2 & S_{44}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

şeklindedir. Bu iki eleman arasındaki ilişkiyi veren denklemlerden gerekli matematiksel işlem sonunda aşağıdaki denklem takımı elde edilir.

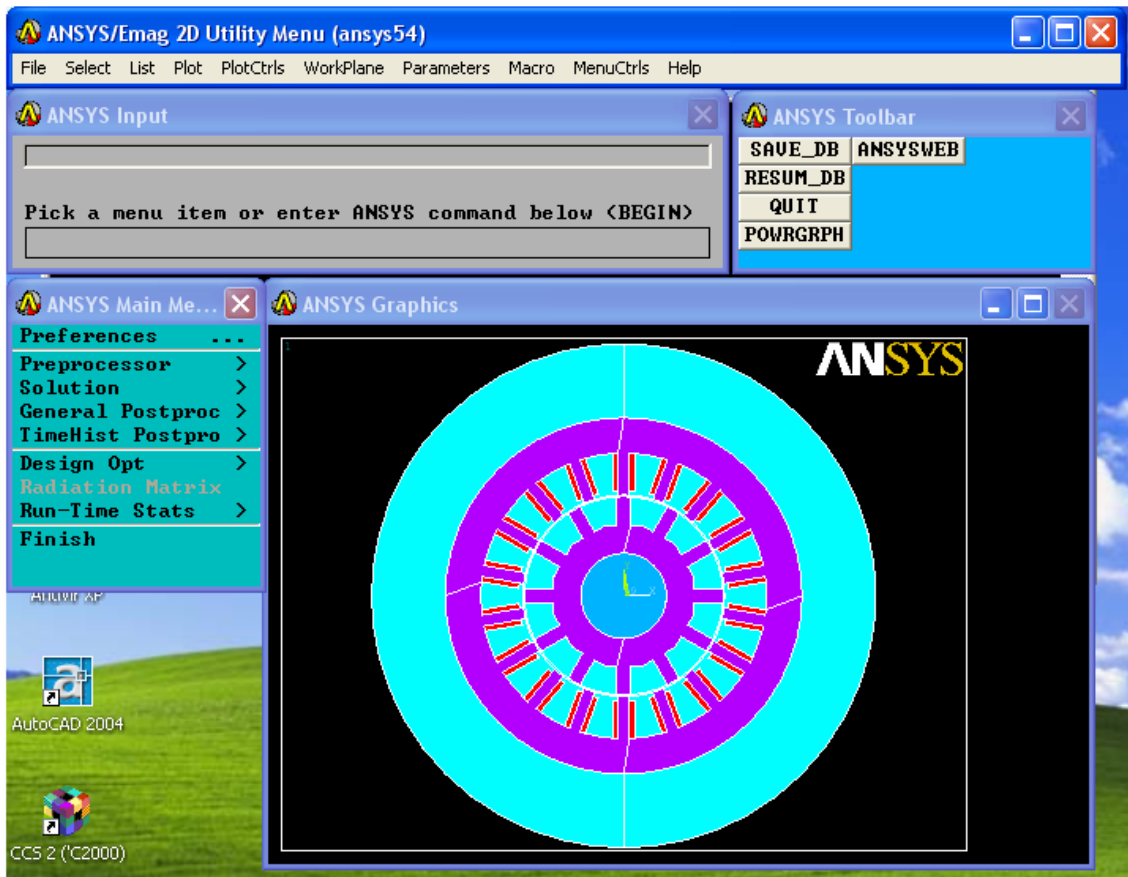
$$\begin{bmatrix} S_{11}^1 + S_{11}^2 & S_{12}^1 & S_{13}^2 & S_{14}^1 + S_{14}^2 \\ S_{21}^1 & S_{22}^1 & 0 & S_{24}^1 \\ S_{31}^2 & 0 & S_{33}^2 & S_{34}^2 \\ S_{41}^1 + S_{41}^2 & S_{42}^1 & S_{43}^2 & S_{44}^1 + S_{44}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

S terimlerinin üst indisleri eleman numaralarını, alt indisleri de düğüm numaralarını göstermektedir. Bu esas denklem takımından anlaşılacağı gibi matrisin her bir katsayısı, bir

düğümüne komşu olan elemanlardan dolayı komşuluk ilişkisi bulunan diğer düğümlerden gelen katsayıların toplamından oluşmaktadır.

### 3.3 ANSYS Programı

ANSYS programı, Sonlu Elemanlar Yönteminde hazırlanmış olan ve Windows işletim sistemi altında çalışabilen görsel bir programdır. İncelenen ARM'nin Sonlu Elemanlar Yönteminde incelenmesinde kullanılan ANSYS 5.4 sürümüne ait program penceresi şekil 3.3'de gösterilmiştir. ANSYS programı elektrik, inşaat ve makine mühendisliği olmak üzere üç farklı mühendislik dalına hitap eden bir programdır. Örneğin elektrik mühendisliğinde ANSYS



Şekil 3.3 ANSYS program penceresi.

programı, Sonlu Elemanlar Yönteminde iki ve üç boyutlu magnetik alan ve elektriksel alan problemlerinin çözümü imkânını verir. İnşaat mühendisliğinde yapı ve makine mühendisliğinde ısı ve akışkan problemlerinin Sonlu Elemanlar Yönteminde ANSYS programında çözümü mümkündür.

ANSYS programı farklı sahada birçok kullanıcıya hitap eden bir program olarak karşımızı çıktığına göre bu programı kullanmaya başlarken başta hangi tür bir problemin

çözümü için program kullanılacak ise ona göre seçimde bulunmak gerekir. Bu çalışmada iki boyutlu bir elektromagnetik problemin çözümü yapıldığından ANSYS programında iki boyutlu alan çözümü anlamına gelen “Emag 2D” seçimi yapılmıştır.

ANSYS programında geometrik şeklin oluşturulması programın en uğraştırıcı kısmını oluşturur. ANSYS programına ait ana menüyü üç kısımda incelemek mümkündür:

1-İncelenen nesnenin geometrik şeklinin oluşturulması ve bölmeleme işleminin yapılması ANSYS programının birinci kısmını oluşturur. Bu birinci kısımda “Preprocessor >” seçeneğinden iki boyutlu koordinatlar kullanarak incelenen nesnenin geometrik şekli oluşturulur. Stator ve rotor demir sacları, mil, hava aralığı ve sargılara ilişkin malzeme tipleri tanımlanır. Geometrik şeklin bölmelenmesi yapılır. Sınır değerler atanır ve akım yoğunlukları uygulanır.

2-Sonlu Elemanlar Yönteminde bölmelenen sınır değerleri ve akım yoğunlukları uygulanan geometrik şeklin vektör potansiyel değerleri “Solution >” seçeneğinden hesaplanır. Kısaca elektromagnetik problemin çözümü elde edilir.

3- Alan dağılımının gösterilmesi, elektromagnetik moment ve magnetik kuvvetlerin hesaplanması “General Postproc >” menüsünden yapılır.

Yukarıda anlatılan ana menü dışında yer alan menülerden biri “File” menüsüdür. Bu menüden yapılan çalışmanın kaydedilmesi veya kayıtlı çalışmanın tekrar ekrana getirilmesi gibi dosya işlemleri yapılır. “Plot” menüsünden geometrik şekle ait düğüm, çizgi, alan ve bölmelemelerin ekranda görüntülenmesi sağlanır. “PlotCtrls” menüsünden düğüm, çizgi ve alanların numaralarının görüntülenmesi sağlanabilir. Ayrıca şeklin görünüşünün büyütülmesi veya küçültülmesi, sağa veya sola kaydırılması gibi işlemler yapılabilir. “WorkPlane” menüsü geometrik şekli çizerken kartezyen veya silindirik koordinat sisteminden birini seçme imkânı sağlar. “Help” menüsünden ANSYS programının teorisi ve kullanımı ile ilgili geniş yardım desteği almak mümkündür.

ANSYS programında Sonlu Elemanlar Yönteminde çözümde ortaya çıkan nonlineer cebrik denklemlerin sayısal çözümünde Newton Raphson Yöntemi kullanılmıştır. Sınır koşulu olarak homojen Dirichlet sınır koşulu kullanılmıştır.

### **3.4 Newton Raphson Yöntemi**

Sayısal çözümleme ile  $f(x)=0$  şeklinde bir denklemin köklerinin bulunmasında kullanılan en yaygın yöntemlerden birisi de Newton-Raphson yöntemidir. Bu yöntemde, problemin çözümüne, söz konusu denklem için yaklaşık bir kök seçilerek başlanır. Eğer  $x_0$  yaklaşıma için başlangıç değeri olarak seçilmiş ise, şekil 3.4’den görüldüğü gibi  $(x_0, y_0)$

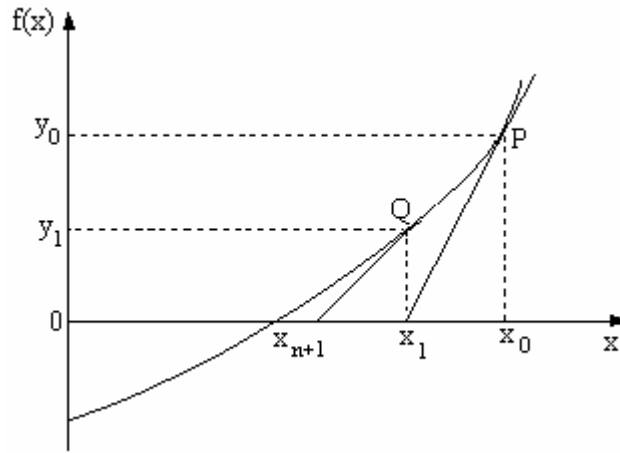
noktasından  $y=f(x)$  eğrisine çizilen teğetin  $x$  eksenini kestiği  $x_1$  noktasının değeri gerçek kök  $x_{n+1}$ 'e daha yakındır [71].  $y=f(x)$  eğrisine çizilen teğetin eğimi için

$$f'(x_n) = \frac{f(x_n) - 0}{x_n - x_{n+1}} \quad (3.35)$$

yazılabilir. Burada  $x_n$ ,  $n$ . adımdaki  $x$  değeri ve  $f'(x_n)$  ise teğetin eğimidir. Gerçek değere yakın kök için

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (3.36)$$

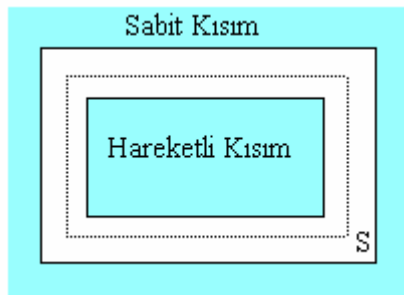
formülünden elde edilir.



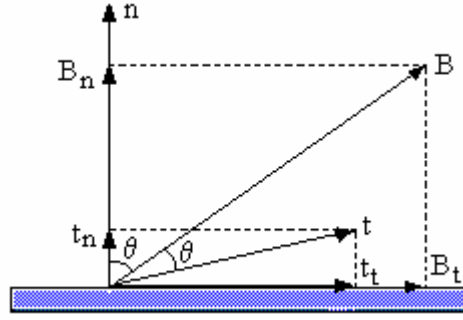
Şekil 3.4 Newton Raphson Yönteminin geometrik anlamı.

### 3.5 Maxwell Stress Tensor Yöntemi

Magnetik kuvvetlerin veya hareketli kısımlardaki momenti hesaplamada kullanılan yöntemlerden biri de Maxwell Stress Tensor Yöntemidir. Bu yöntemde hesaplamalar için model içinde kapalı bir çizgi belirtilmelidir. Bir kapalı çizginin seçimi sonuçların doğruluğunu etkiler. Tanımlanan kapalı çizgi hava aralığı bölgesinden geçmeli ve mümkün olduğu kadar magnetik araçlardan uzak olmalıdır.



Şekil 3.5 Maxwell Stress Tensor Yönteminde kapalı bir çizginin seçilmesi.



Şekil 3.6 Magnetik alan diyagramı, yerel stress ve diğer bileşenleri.

Maxwell Stress Yönteminde, yerel stress, yüzeyde tüm sınır noktalarında hesaplanır, toplam normal ve teğet kuvvet bileşenlerini bulmak için yüzey integrali (veya iki boyutlu çizgisel integral) alınır.

Maxwell Stress Yönteminde tek bir alan çözümü gerektirdiğinden Sonlu Elemanlar Yönteminde magnetik kuvvet bileşenleri ve momentin hesaplanmasında tercih edilmektedir. İki boyutlu problemlerde Maxwell Stress Tensor Yönteminde, kapalı çizgi boyunca tüm noktalarda akı yoğunluğu değerlerinin normal ve teğet değerlerinin bilinmesi gerekir [72,73]. Magnetik alan B, yerel stress t, ve diğer bileşenler şekil 3.6'da gösterilmiştir. Stress bileşenleri alan bileşenlerine bağlıdır, normal ve teğet kuvvet değerleri tanımlanan çevre çizgisi boyunca normal ve teğet kuvvet ile moment değerleri 3.37, 3.38 ve 3.39 denklemlerinden hesaplanabilir.

$$F_n = \frac{1}{2\pi\mu_0} \int_s (B_n^2 - B_t^2) ds \quad (3.37)$$

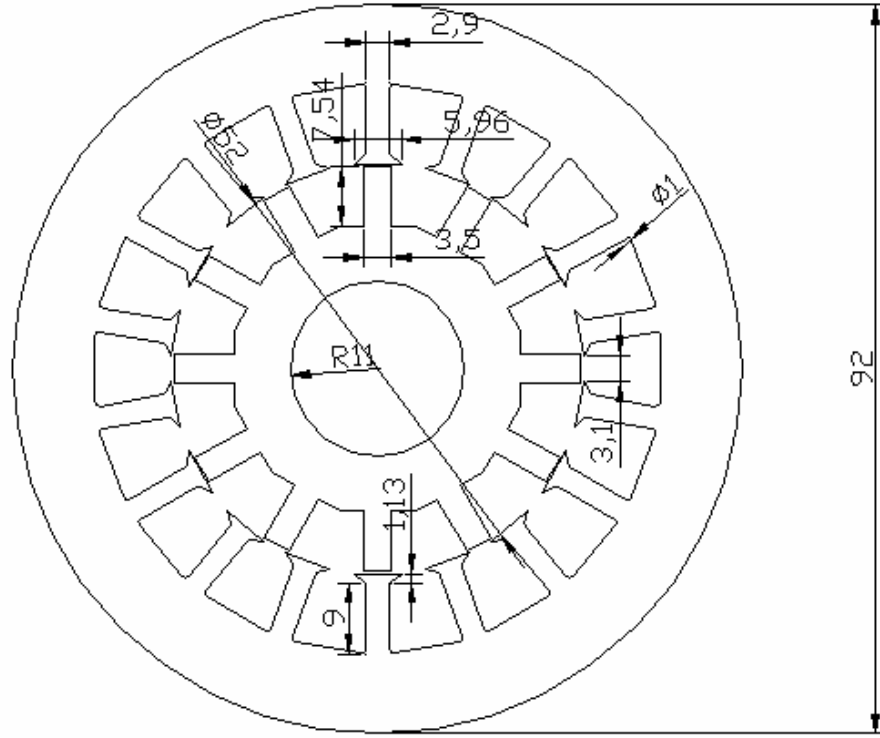
$$F_t = \frac{1}{\mu_0} \int_s B_n B_t ds \quad (3.38)$$

$$T = \int_s \left[ \frac{1}{\mu_0} (r \times B)(B \cdot n) - \frac{1}{2\mu_0} B^2 (r \times n) \right] ds \quad (3.39)$$

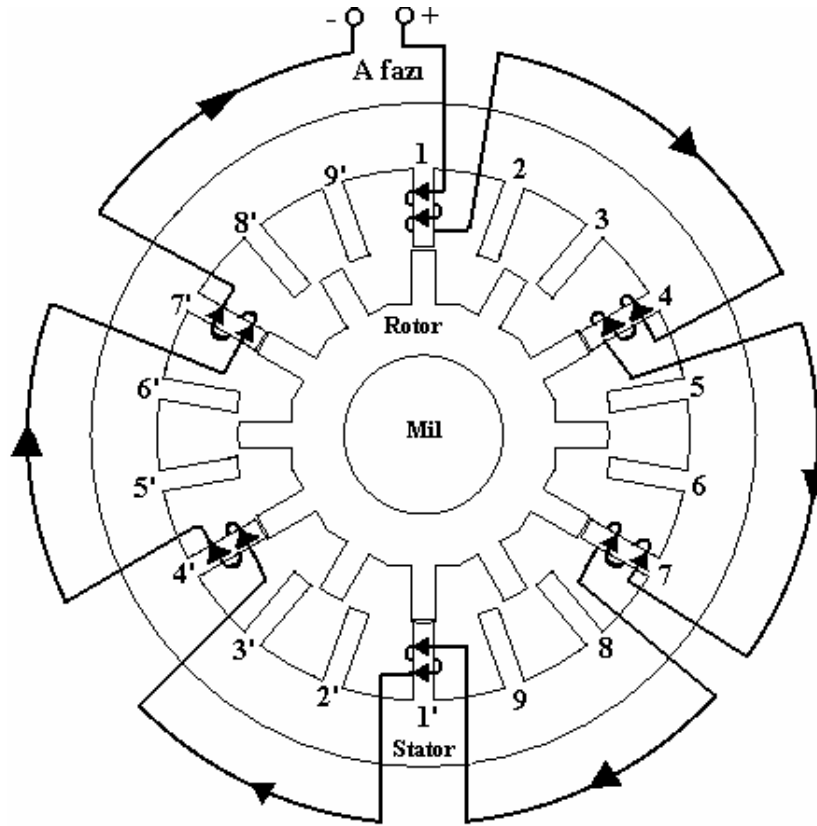
Burada  $\mu_0$  magnetik geçirgenliği, s yüzeyi, r yer değişim mesafesi,  $B_n$  magnetik alanın normal bileşeni,  $B_t$  magnetik alanın teğet bileşeni,  $\mathbf{n}$  normal yöndeki birim vektörü,  $F_n$  normal yöndeki kuvvet bileşeni,  $F_t$  teğet kuvvet bileşenini ve T üretilen toplam momenti göstermektedir [14,15].

### 3.6 Tasarlanan Anahtarlı Relüktans Motorun Ölçüleri

Emsaş Elektrik Motorları ve Pompa San. Tic. Ltd. Şirketinin (EMSAŞ MOTOR) Elazığ Organize Sanayi Bölgesi'nde bulunan motor fabrikası tesislerinde tarafımızdan üretilen, statorunda 18 kutup ve rotorunda ise 12 kutup bulunan yeni tasarlanmış ARM modelinin şekli ve ölçüleri şekil 3.7'de gösterilmiştir. Şekil 3.8'de ise bu motorun bir faz sargısı gösterilmiştir. ARM'de karşılıklı iki stator kutbu üzerindeki sargıların seri bağlanarak fazların



Şekil 3.7 18/12 kutuplu ARM'nin ön görünüşü (Ölçüler mm cinsindedir).



Şekil 3.8 A fazı sargısının bağlantısı.

oluşturulmasından farklı olarak burada, karşılıklı altı stator kutbu üzerinde bulunan sargılar birbirine seri bağlanmak suretiyle motorun bir fazı oluşturulmuştur. Bu şekilde fazların oluşturulmasında, toplam faz sayısını üçe indirerek motorun sürülmesinde kullanılacak yarı iletken anahtar sayısını azaltarak maliyetin düşürülmesi amaçlanmıştır ve üretilen toplam momentin daha büyük olması sağlanmıştır.

Şekil 3.7’de gösterilen anahtarlı relüktans motorun diğer büyüklükleri tablo 3.1’de ayrıntılı verilmiştir.

**Tablo 3.1** İncelenen ARM’nin büyüklükleri.

Stator kutup sayısı ( $N_s$ )	18
Rotor kutup sayısı ( $N_r$ )	12
Stator kutup yayı uzunluğu ( $\beta_s$ )	6.39 <sup>0</sup> derece
Rotor kutup yayı uzunluğu ( $\beta_r$ )	7.83 <sup>0</sup> derece
Stator kutup genişliği	2.9 mm
Rotor kutup genişliği	3.5 mm
Stator kutup adımı ( $\alpha_s$ )	20 <sup>0</sup> derece
Rotor kutup adımı ( $\alpha_r$ )	30 <sup>0</sup> derece
Hava aralığı	0.4 mm
Stator dış çapı	92 mm
Stator iç çapı	52 mm
Stator paket uzunluğu	95 mm
Mil çapı	22 mm
Rotor dış çapı	51.2 mm
Stator kutup yüksekliği	11 mm
Rotor kutup yüksekliği	7.54 mm
Bir fazın sarım sayısı	180
İletken çapı	0.65 mm
Bir iletkenin kesiti	0.33183 mm <sup>2</sup>
Statorda bir oyuğun alanı	61 mm <sup>2</sup>
Nominal akım	6.5 A
Bir faz direnci (R)	2.6 $\Omega$
Çakışık konum endüktansı ( $L_{max}$ )	7.296 mH
Çakışık olmayan konum endüktansı ( $L_{min}$ )	2.363 mH
Eylemsizlik momenti ( J )	0.000695 Kg·m <sup>2</sup>
Sürtünme katsayısı ( B )	0.00018 Nm/rad/s

### 3.7 ARM'nin Alan Dağılımının Elde Edilmesi

Sonlu Elemanlar Yönteminde hesaplanan temel büyüklük magnetik vektör potansiyel değerleridir. Magnetik vektör potansiyel değerleri ile akım yoğunluğu arasındaki ilişki Maxwell'in elektomagnetik ile ilgili temel denkleminde

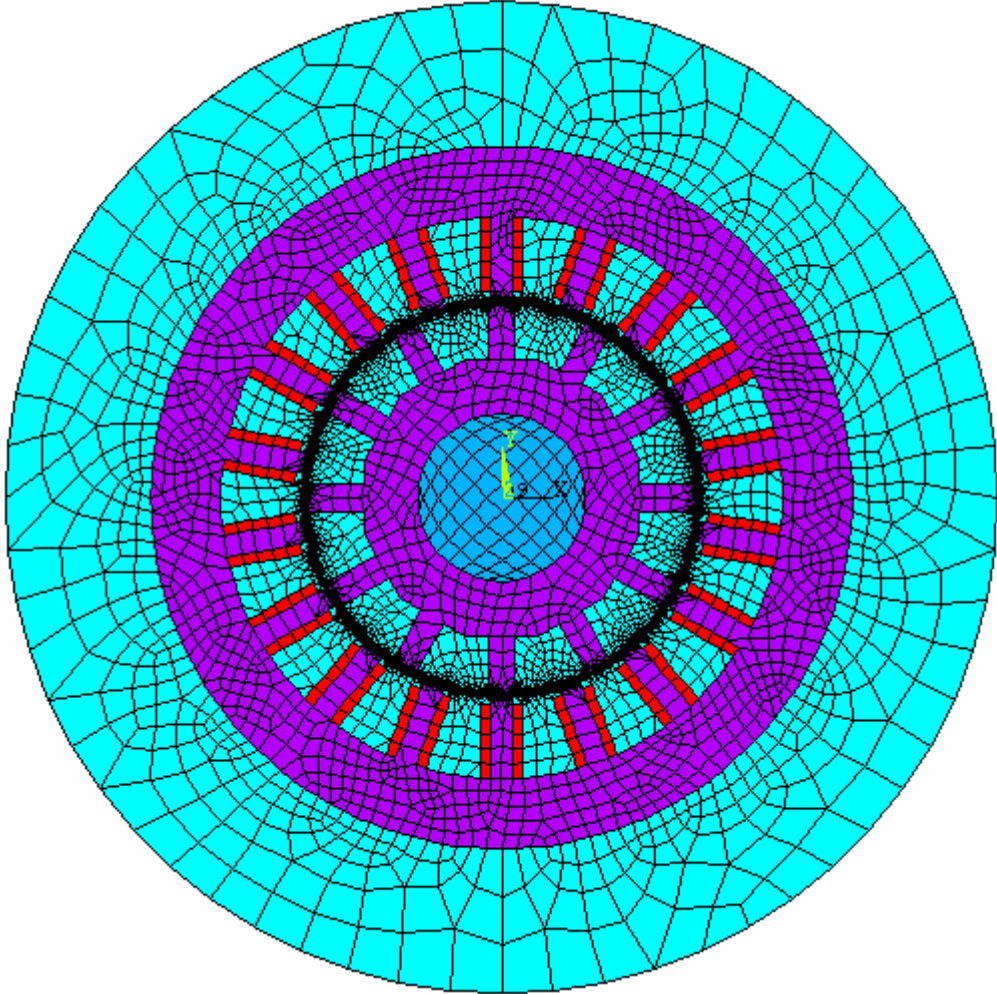
$$\nabla \times \mathbf{H} = \nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (3.40)$$

şeklindedir. Burada  $\mathbf{H}$  manyetik alan şiddeti,  $\mathbf{A}$  manyetik vektör potansiyeli,  $\mathbf{J}$  akım yoğunluğu ve  $\mu$  magnetik iletkenliktir. (3.40) bağıntısı iki boyutlu düzlemde analitik olarak

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) = -\mathbf{J} \quad (3.41)$$

yazılabilir.

Sonlu Elemanlar Yönteminde (3.41) ile verilen denklemi çözebilmek için çözüm alanı, üçgen veya dikdörtgen şeklinde uygun geometrik elemanlara bölünür. İncelenen 18/12 kutuplu ARM'nin uygun dikdörtgen elemanlara bölünmüş hali şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 18/12 kutuplu ARM'nin  $\theta=0^\circ$  için bölünmüş hali.

Nonlinear enerji fonksiyonu;

$$F = \iint (\int_0^B \mathbf{H}d\mathbf{B})dxdy - \iint \mathbf{J}\mathbf{A}dxdy \quad (3.42)$$

olarak tanımlanır. Bu fonksiyonun kısmi türevi alınıp sifıra eşitlenmek suretiyle ( $\partial F/\partial \mathbf{A}=0$ ) bir matris eşitliği oluşturulur. Bu matris eşitliğinin çözümünden vektör potansiyel değerleri hesaplanır. Magnetik alan için

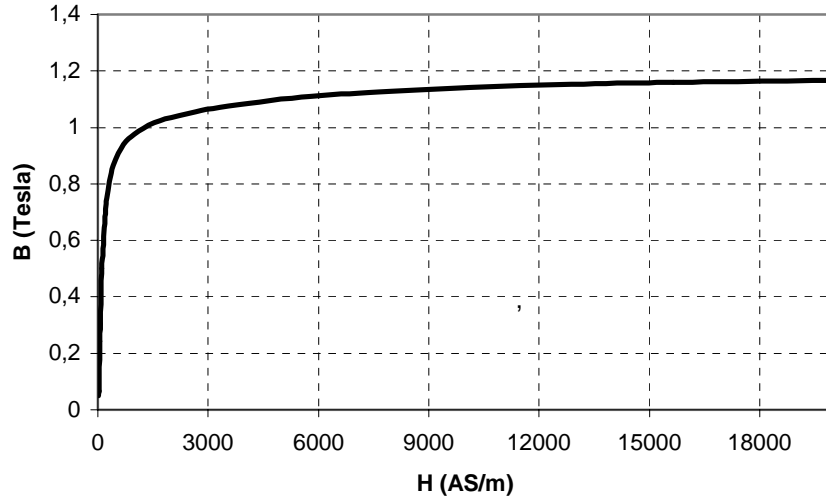
$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (3.43)$$

bağıntısı yazılabilir. Burada  $\mathbf{B}$  magnetik alan yoğunludur.

$\mathbf{A}$  vektör potansiyel değerleri, motorun dışında yeterli uzaklıktaki noktalara sıfır vektör potansiyeli uygulanarak elde edilmiştir. Vektör potansiyel değerleri bulunurken;

- 1)  $\mathbf{A}$  vektör potansiyelinin sadece z eksenine yönünde bileşeni olduğu kabul edilmiştir.
- 2) Histerezis ve fuko etkileri ihmal edilmiştir.
- 3) Sargılarda akım yoğunluğunun her yerde aynı olduğu kabul edilmiştir.

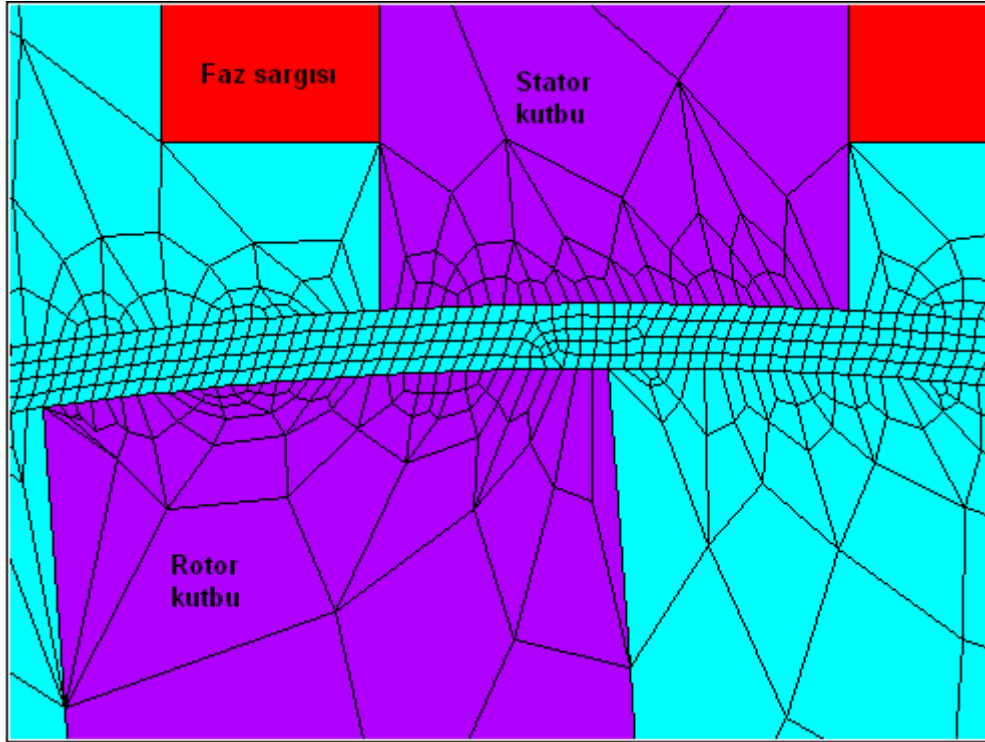
Sonlu Elemanlar Yöntemi ile analizde ANSYS paket programında ARM'nin geometrik modeli değişik rotor konumları için ayrı ayrı oluşturulmuştur. Sonlu Elemanlar Yönteminde hesaplamaların doğruluğunu arttırmak için ARM'nin rotor ve statorunun imalatında kullanılan silisli demir sacların B-H eğrisi deneysel tespit edilmiş ve hesaplamalarda şekil 3.10'da gösterilen bu B-H eğrisi kullanılmıştır.



Şekil 3.10 ARM'nin stator ve rotorunun imalatında kullanılan saclarının deneysel elde edilen B-H grafiği.

Stator kutup sargılarından akan akımların oluşturduğu magnetik enerjinin bir kısmı hava aralığını geçerek rotorda bir momentin endüklenmesini sağlar. Ancak magnetik enerjinin bir kısmı ise hava aralığında depolanır. Dolayısıyla stator ile rotor arasındaki hava aralığı

bölgesinde magnetik büyüklüklerin hesaplanmasında doğruluğu arttırmak için hava aralığı şekil 3.11’de gösterildiği gibi çok küçük elemanlarla bölmelenmiştir.

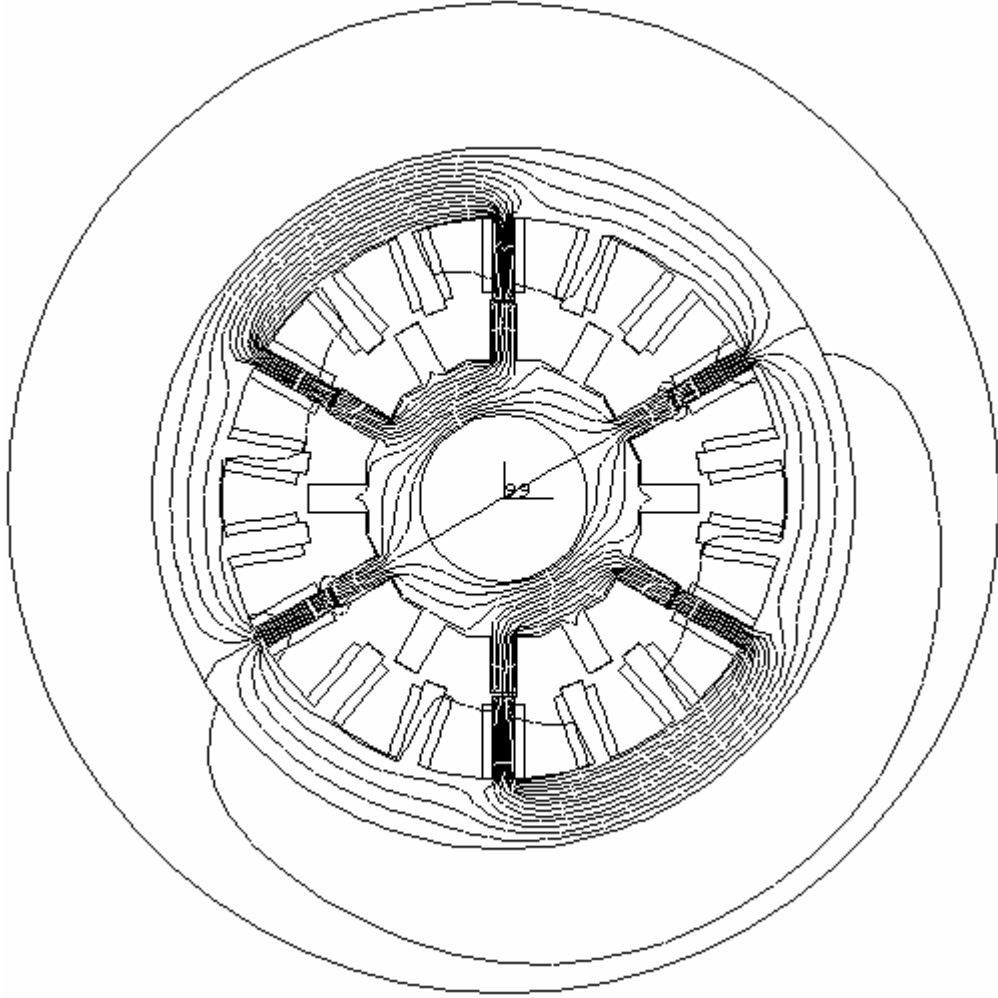


Şekil 3.11 Hava aralığı şekildeki gibi küçük elemanlara bölünmüştür.

ANSYS paket programında oluşturulan ARM modelinin bölmelenmesinde (mesh edilmesinde) 16645 eleman ve 16648 düğüm oluşmuştur. Motorun dışında yeterli uzaklıktaki noktalara sıfır vektör potansiyelleri atanarak sınır değerleri belirlenmiştir. Faz sargılarına uygulanan  $J$  akım yoğunluğu farklı faz akımı değerleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır. 0, 1,2, 3, 4, 5, 6,7, 8, 10, 12, 14, 15 derece mekaniksel rotor konumları ve 2 A, 3 A, 4 A, 5 A, 6.5 A faz akımları için ARM'nin magnetik vektör potansiyel değerleri hesaplanmış ve alan dağılımları elde edilmiştir.

Şekil 3.12’de çakışık rotor konumunda ARM'nin alan dağılımı verilmiştir. Bu konumda düzgün bir alan dağılımı oluşmuştur. Stator kutbunun oluşturduğu magnetik alanın tamamı hava aralığını geçerek karşısındaki rotor kutbu üzerinde devresini tamamlamaktadır. Çakışık konumda moment üretilmez, fakat magnetik radyal kuvvet en büyük değerdedir.

Alan çizgileri motorda magnetik alan dağılımını gözlemek ve incelemek için oldukça faydalı olmaktadır. Akı dağılımı makinanın değişik kısımlarında magnetik doyumun derecesini verir [20]. Alan çizgileri tasarımcıya magnetik doyumdan kaçınmak için demir sacın eklenmesi gerektiği yerleri ve maliyeti düşürmek için alan çizgilerinin geçmediği yerden demir sacın çıkarılması gerektiği kısımları işaret eder.

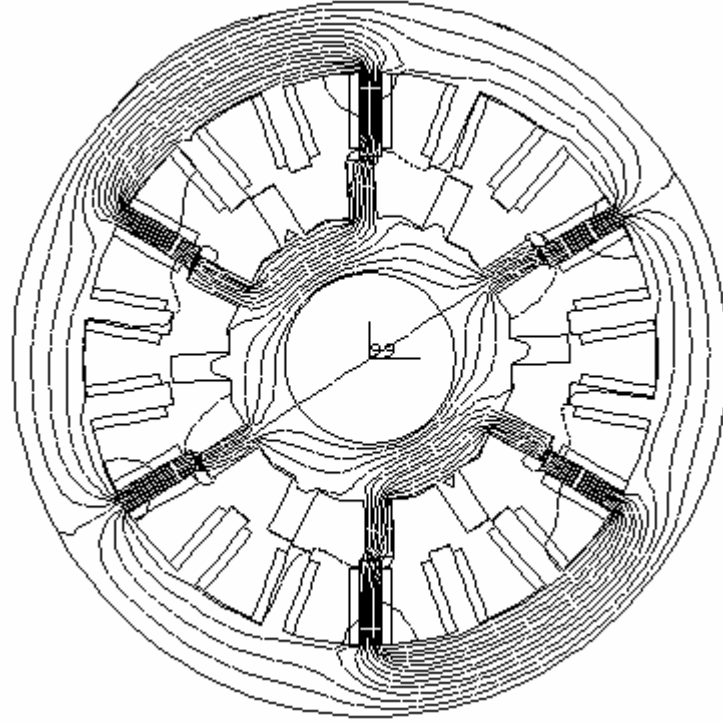


**Şekil 3.12** 18/12 kutuplu ARM'nin  $\theta=0^\circ$  için alan dağılımı.

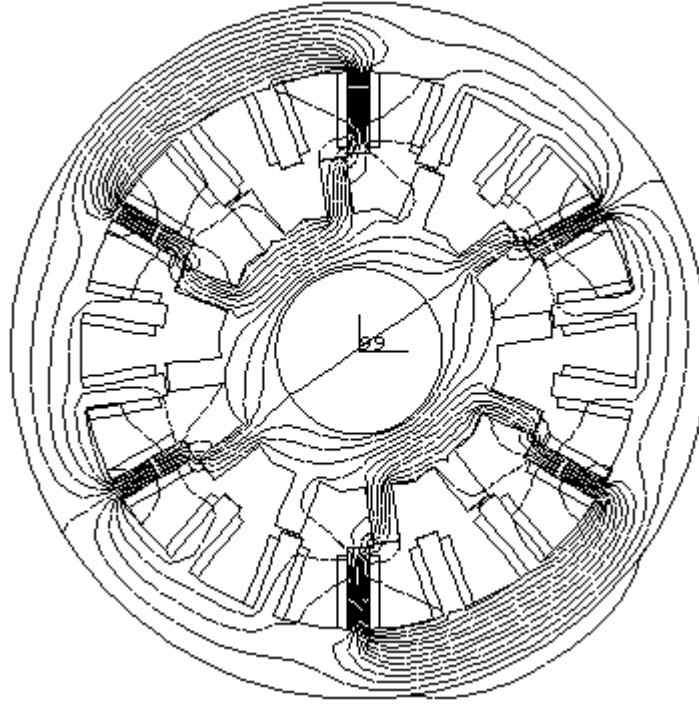
$\theta=3^\circ$  rotor konumuna ait magnetik alan dağılımı şekil 3.13'de gösterilmiştir. Bu konumda stator faz sargısının oluşturduğu magnetik alan çizgileri düzgün bir şekilde hava aralığını geçerek stator kutuplarının karşısındaki rotor kutupları üzerinden devresini tamamlamaktadır.

Rotorun biraz daha dönmüş diğer bir konumu ( $\theta=8^\circ$ ) için alan çizgileri şekil 3.14'te gösterilmiştir. Bu konumdan sonra rotor kutbu giderek stator kutbundan uzaklaşmakta ve az sayıda alan çizgileri hava aralığından devresini tamamlamaktadır.

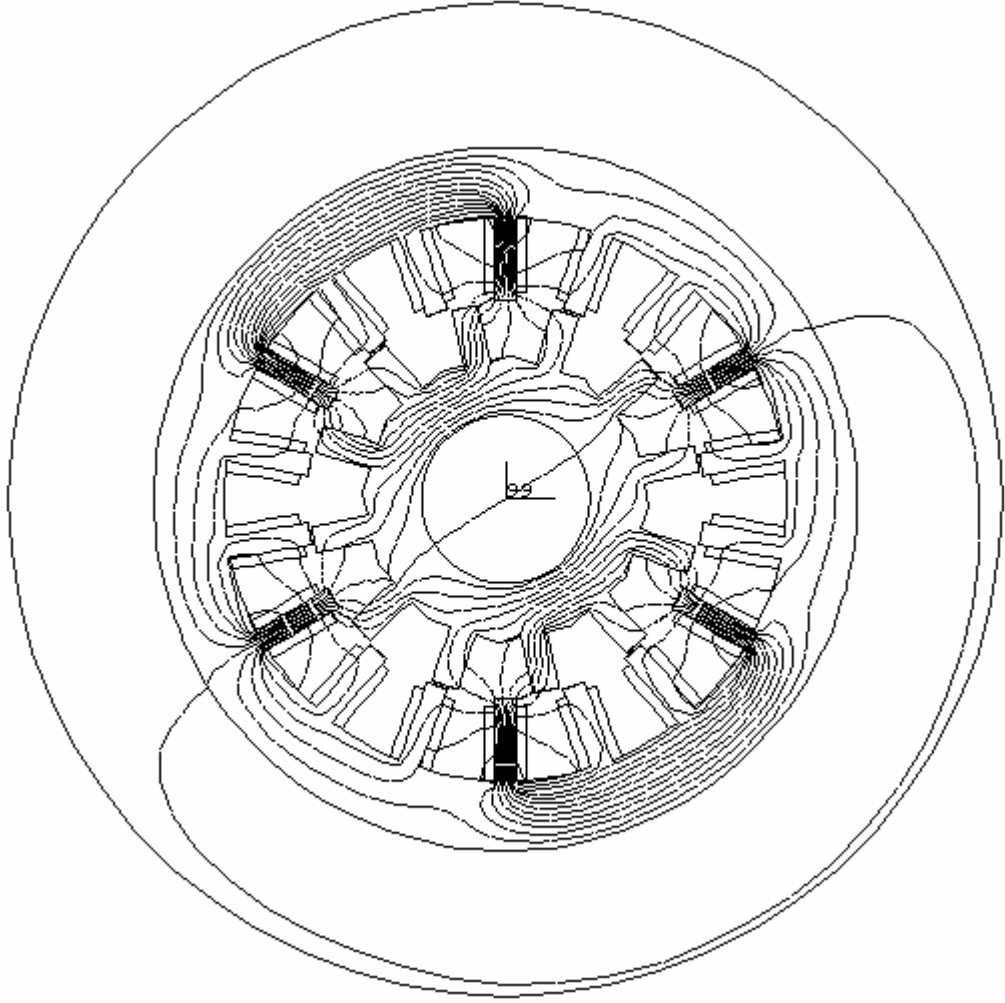
Enerjilenen sargının bulunduğu stator kutbunun eksenini ile rotor kutup eksenini arasındaki açı arttıkça alan dağılımının düzgünlüğü bozulmaktadır. Şekil 3.15'de alan çizgilerinin bir kısmı komşu stator kutupları üzerinden devresini tamamlarken alan çizgilerinin kalan kısmı ise komşu iki rotor kutbu üzerinden akarak akı halkaları oluşturmuştur.



Şekil 3.13 18/12 kutuplu ARM'nin  $\theta=3^\circ$  için alan dağılımı.



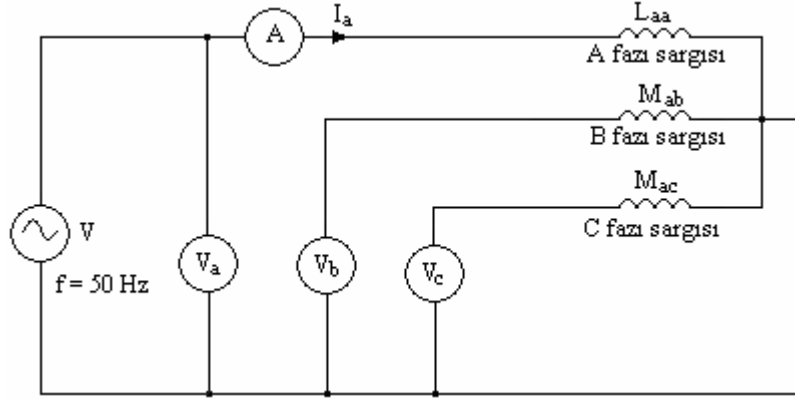
Şekil 3.14 18/12 kutuplu ARM'nin  $\theta=8^\circ$  için alan dağılımı.



Şekil 3.15 18/12 kutuplu ARM'nin  $\theta=12^\circ$  için alan dağılımı.

### 3.8 Faz Endüktansları ve Ortak Endüktansların Deneysel Olarak Belirlenmesi

ARM'nin A fazı endüktansı, B ve C fazları ortak endüktanslarının deneysel olarak belirlenmesinde şekil 3.16'da gösterilen deney bağlantı şeması kullanılmıştır. 50 Hz sabit frekanslı, genliği ayarlanabilen bir gerilim kaynağından A fazı sargısına alternatif bir gerilim uygulanarak  $I = 2$  A faz akımı için farklı rotor konumlarında fazlardan ölçülen sargı gerilimleri tablo 3.2'de verilmiştir. Tablo 3.2'de verilen  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  gerilimleri ve  $I_a$  faz akımı bilgileri 3.44, 3.45 ve 3.46 bağıntıları kullanarak hesaplanan  $L_{aa}$  indüktansı,  $M_{ab}$  ve  $M_{ac}$  ortak endüktansları değerleri tablo 3.3'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.16** ARM'nin A fazı endüktansı ve B ve C fazları ortak endüktanslarının tespitinde kullanılan deney bağlantı şeması.

**Tablo 3.2** A,B ve C fazı sargıları gerilimleri.

Konum (Derece)	V <sub>a</sub> (Volt)	V <sub>b</sub> (Volt)	V <sub>c</sub> (Volt)
-15	5,1	0,215	0,079
-14	5,12	0,235	0,073
-13	5,17	0,259	0,068
-12	5,22	0,285	0,067
-11	5,3	0,306	0,064
-10	5,38	0,325	0,064
-9	5,5	0,343	0,064
-8	5,66	0,358	0,067
-7	5,85	0,37	0,072
-6	6,07	0,374	0,077
-5	6,23	0,372	0,084
-4	6,38	0,37	0,093
-3	6,51	0,364	0,103
-2	6,61	0,353	0,116
-1	6,69	0,335	0,127
0	6,71	0,315	0,137
1	6,67	0,295	0,147
2	6,6	0,272	0,156
3	6,5	0,252	0,159
4	6,35	0,225	0,163
5	6,22	0,205	0,167
6	6,06	0,185	0,165
7	5,83	0,172	0,165
8	5,66	0,157	0,159
9	5,51	0,154	0,148
10	5,38	0,154	0,145
11	5,27	0,159	0,129
12	5,2	0,167	0,115
13	5,17	0,178	0,104
14	5,13	0,188	0,096
15	5,12	0,203	0,089

A fazı endüktansı için

$$L_{aa} = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\left(\frac{V_a}{I_a}\right)^2 - R_a^2} \quad (3.44)$$

bağıntısı yazılabilir. Burada  $V_a$  A fazına uygulanan kaynak gerilimi,  $f$  kaynak gerilimi frekansını,  $I_a$  A faz sargısı akımını,  $R_a$  A fazı sargısı direncini göstermektedir.  $M_{ab}$  ve  $M_{ac}$  ortak endüktansları için

$$M_{ab} = \frac{1}{2\pi f} \frac{V_b}{I_a} \quad (3.45)$$

$$M_{ac} = \frac{1}{2\pi f} \frac{V_c}{I_a} \quad (3.46)$$

ifadeleri yazılabilir.

**Tablo 3.3** A fazı endüktansı, B ve C fazı ortak endüktansları değerleri.

Konum (Derece)	$L_{aa}$ (mH)	$M_{ab}$ (mH)	$M_{ac}$ (mH)
-15	2,2509	0,3422	0,1257
-14	2,3631	0,374	0,1162
-13	2,6244	0,4122	0,1082
-12	2,8642	0,4536	0,1066
-11	3,2149	0,487	0,1019
-10	3,5355	0,5173	0,1019
-9	3,9758	0,5459	0,1019
-8	4,5089	0,5698	0,1066
-7	5,0863	0,5889	0,1146
-6	5,702	0,5953	0,1226
-5	6,1236	0,5921	0,1337
-4	6,5031	0,5889	0,148
-3	6,8216	0,5793	0,1639
-2	7,061	0,5618	0,1846
-1	7,2494	0,5332	0,2021
0	7,2961	0,5014	0,218
1	7,2025	0,4695	0,234
2	7,0373	0,4329	0,2483
3	6,7974	0,4011	0,2531
4	6,4283	0,3581	0,2594
5	6,0978	0,3263	0,2658
6	5,675	0,2944	0,2626
7	5,0278	0,2738	0,2626
8	4,5089	0,2499	0,2531
9	4,0107	0,2451	0,2356
10	3,5355	0,2451	0,2308
11	3,0874	0,2531	0,2053
12	2,7705	0,2658	0,183
13	2,6244	0,2833	0,1655
14	2,4174	0,2992	0,1528
15	2,3631	0,3231	0,1417

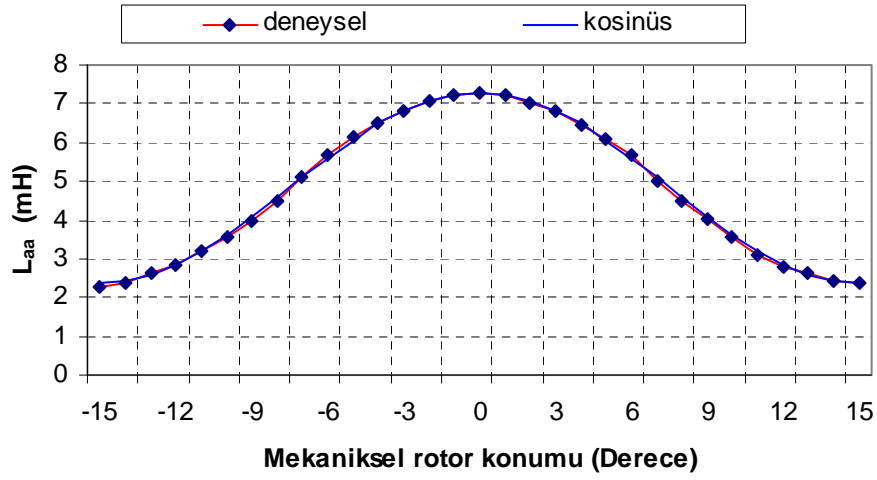
A, B ve C fazları sargı endüktansları matematiksel olarak,

$$L_{aa} = L_1 + L_2 \cos(N_r \theta) = 4,829569 + 2,46649 \cos(12\theta) \quad (3.47)$$

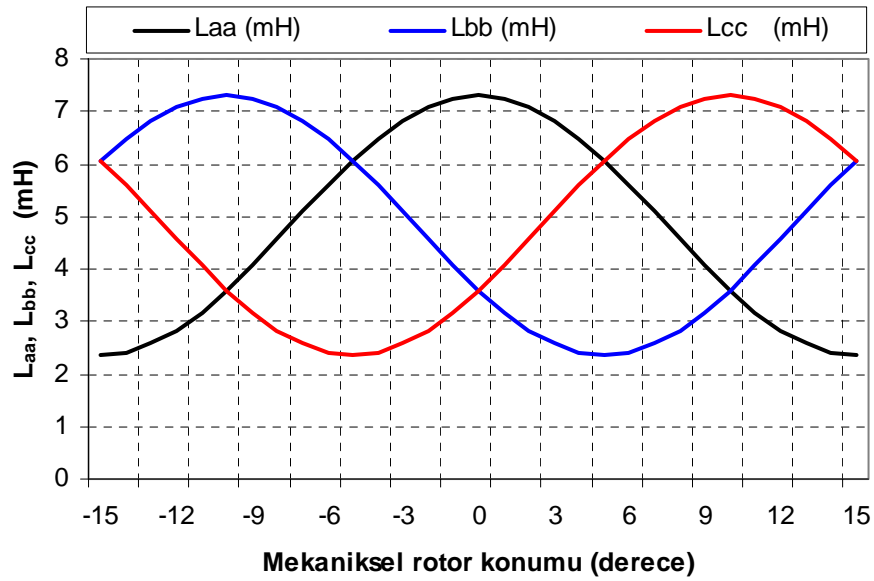
$$L_{bb} = L_1 + L_2 \cos(N_r \theta + \frac{2\pi}{3}) = 4,829569 + 2,46649 \cos(12\theta + \frac{2\pi}{3}) \quad (3.48)$$

$$L_{cc} = L_1 + L_2 \cos(N_r \theta - \frac{2\pi}{3}) = 4,829569 + 2,46649 \cos(12\theta - \frac{2\pi}{3}) \quad (3.49)$$

şeklindeki bağıntılar ile ifade edilmiştir. A fazı sargısı endüktansının deneysel ölçülen değerleri ile geliştirilen matematiksel modelin değerleri şekil 3.17’de birlikte gösterilmiştir.



Şekil 3.17 İncelenen ARM’nin A fazı endüktansının deneysel ölçülen değerleri ile kosinüs yaklaşımı endüktans değerleri birlikte grafikte gösterilmiştir.



Şekil 3.18 L<sub>aa</sub>, L<sub>bb</sub> ve L<sub>cc</sub> faz endüktanslarının rotor konumuna bağlı değişim grafiği.

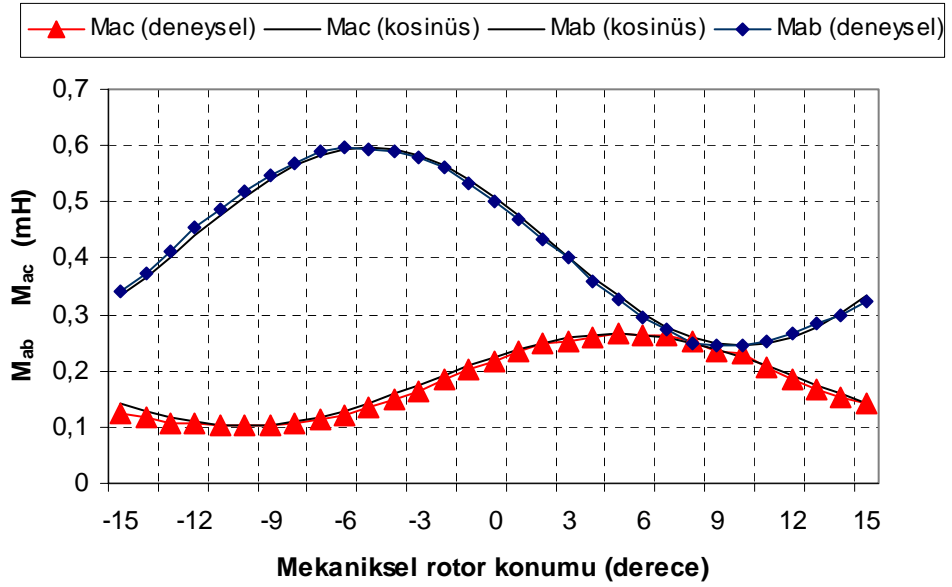
$M_{ab}$ ,  $M_{ac}$  ve  $M_{bc}$  ortak endüktansları için

$$M_{ab} = 0,421 + 0,1759\cos(12\theta + \frac{\pi}{3}) \quad (3.50)$$

$$M_{ac} = 0,18383 + 0,08197\cos(12\theta - \frac{\pi}{3}) \quad (3.51)$$

$$M_{bc} = 0,421 + 0,1759\cos(12\theta - \pi) \quad (3.52)$$

matematiksel bağıntıları çıkarılmıştır. Deneysel tespit edilen  $M_{ab}$ ,  $M_{ac}$  ortak endüktansları ile geliştirilen matematiksel bağıntılar ile hesaplanan ortak endüktans değerleri şekil 3.19'da gösterilmiştir.



**Şekil 3.19** İncelenen ARM'nin  $M_{ab}$  ve  $M_{ac}$  ortak endüktanslarına ait deneysel ölçülen değerleri ile matematiksel hesaplanan endüktans değerleri birlikte grafikte gösterilmiştir.

ARM'nin üç fazı için endüktans matrisi

$$L = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

şeklinde olur. Endüktans matrisinde  $M_{ab}=M_{ba}$ ,  $M_{ac}=M_{ca}$  ve  $M_{bc}=M_{cb}$ 'dir.

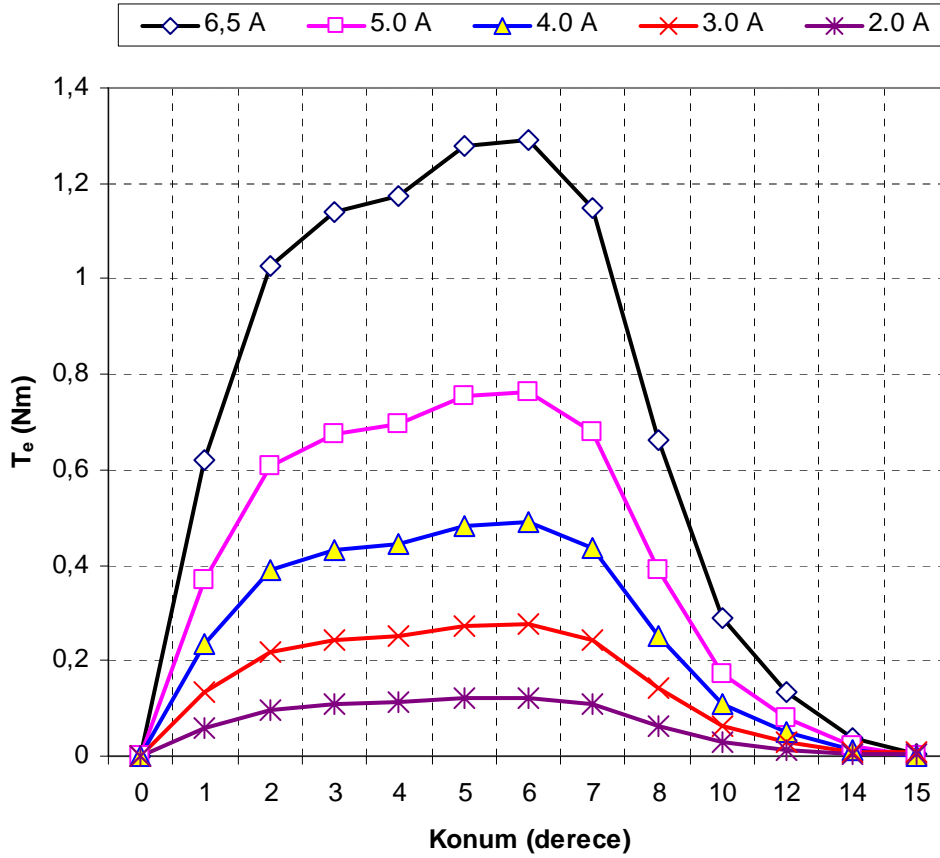
### 3.9 ARM'nin Ürettiği Momentin Hesaplanması

ARM'nin ürettiği moment, farklı rotor konumları için alan dağılımını elde etmek için Sonlu Elemanlar Yöntemi'nde hesaplanan magnetik vektör potansiyel değerleri kullanılarak hesaplanmıştır.

ANSYS paket programında Maxwell Stress Tensor Yöntemi kullanılarak moment hesaplaması yapılmaktadır.

İncelenen  $N_s/N_r=18/12$  kutuplu ARM'nin bir fazının rotor konumuna bağlı olarak ürettiği moment Sonlu Elemanlar Yönteminde sırayla 2 A, 3 A, 4 A, 5 A ve 6.5 A akım değerleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Rotor konumuna bağlı olarak farklı faz akımları için elde edilen moment grafikleri şekil 3.20'de verilmiştir.

ARM'de üretilen moment akımın karesi ile doğru orantılıdır. Düşük akımlarda üretilen moment küçük iken akım arttıkça ARM'nin ürettiği momentin akımın karesi ile arttığı şekil 3.20'de açıkça görülmektedir.



Şekil 3.20 18/12 kutuplu ARM'nin SEY'den hesaplanan momentin konuma bağlı değişim grafiği.

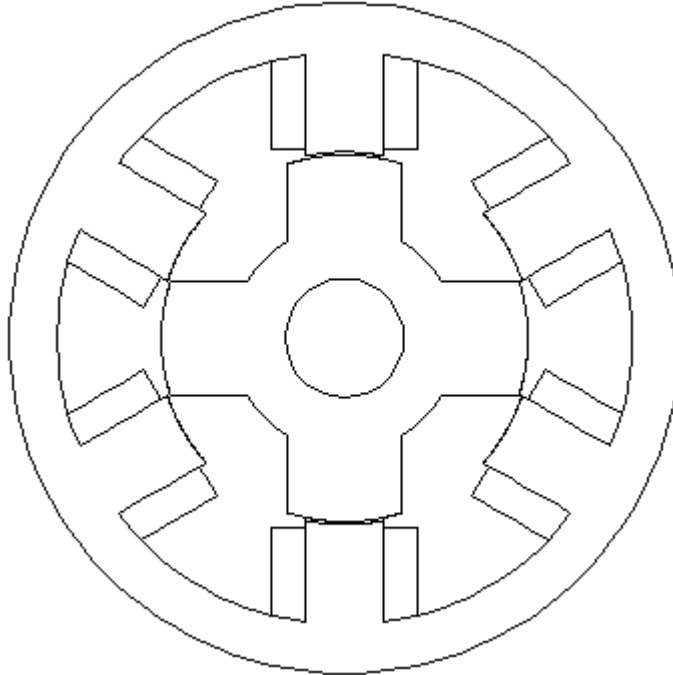
### 3.10 Yarıçap Yönünde Oluşan Kuvvetler Bakımından İncelenen ARM'nin Diğer ARM Modelleri ile Karşılaştırılması

Anahtarlı relüktans motorun temel problemlerinden biri de yarıçap yönünde oluşan kuvvetlerin sebep olduğu titreşimlerin oluşturduğu gürültüdür. Stator ve rotor kutup sayısı artırıldığı zaman aynı moment için bir stator kutbuna etki eden yarıçap yönünde oluşan kuvvet azaldığı üç farklı ARM modeli üzerinde gösterilmiştir. Sonuçları kolay karşılaştırılmasını sağlamak için fazları eşit, stator ve rotor paket boyları ve rotor dış çapları aynı olan motor yapıları seçilmiştir.

Birinci ARM modeli Krishnan [19] çalışmasından alınmıştır.  $N_s/N_r=6/4$  kutuplu üç fazlı ARM'nin boyutları tablo 3.4'de verilmiş, ön görünüşü şekil 3.21'de gösterilmiştir.

**Tablo 3.4**  $N_s/N_r=6/4$  kutuplu ARM'nin ölçüleri.

Stator kutup sayısı ( $N_s$ ) :	6
Rotor kutup sayısı ( $N_r$ ) :	4
Stator dış çapı :	92 mm
Stator iç çapı :	52 mm
Stator paket uzunluğu :	95 mm
Rotor dış çapı :	51.2 mm

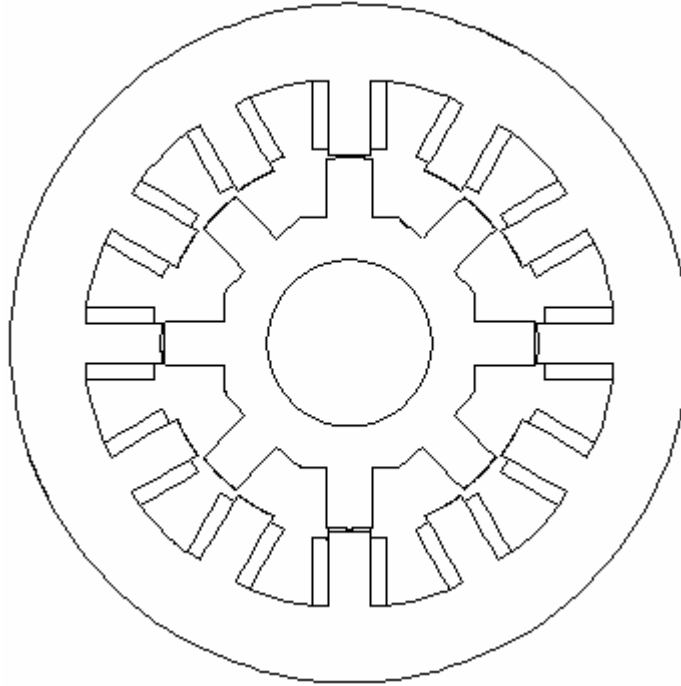


**Şekil 3.21**  $N_s/N_r=6/4$  kutuplu ARM'nin ön kesit görünüşü.

İkinci ARM modeli tarafımızdan alan dağılımı incelenen [67] motordur.  $N_s/N_r=12/8$  kutuplu üç fazlı ARM'nin boyutları tablo 3.5'de verilmiş, ön görünüşü şekil 3.22'de gösterilmiştir.

**Tablo 3.5**  $N_s/N_r=12/8$  kutuplu ARM'nin ölçüleri.

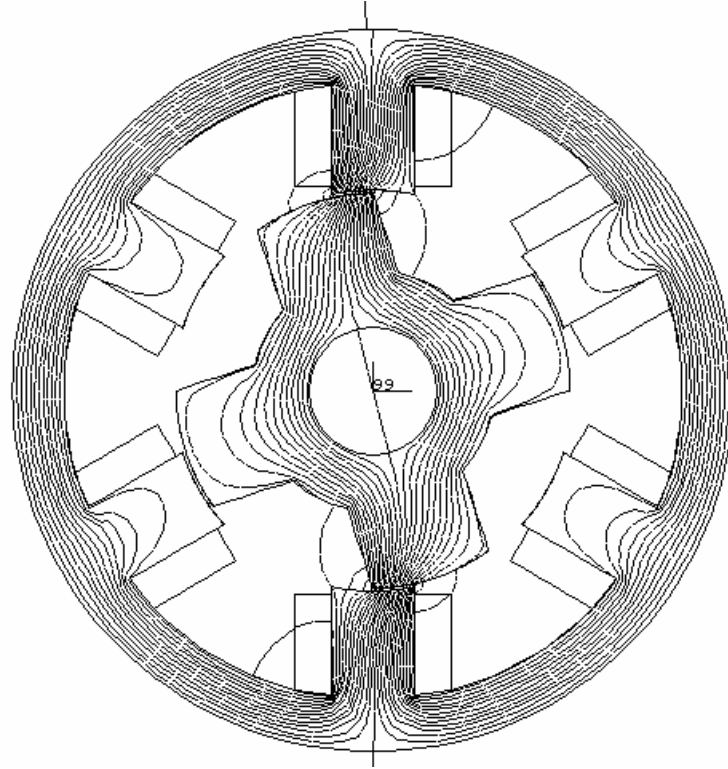
Stator kutup sayısı ( $N_s$ ):	12
Rotor kutup sayısı ( $N_r$ ):	8
Stator dış çapı	: 90 mm
Stator iç çapı	: 50 mm
Stator paket uzunluğu	: 95 mm
Rotor dış çapı	: 49.2 mm



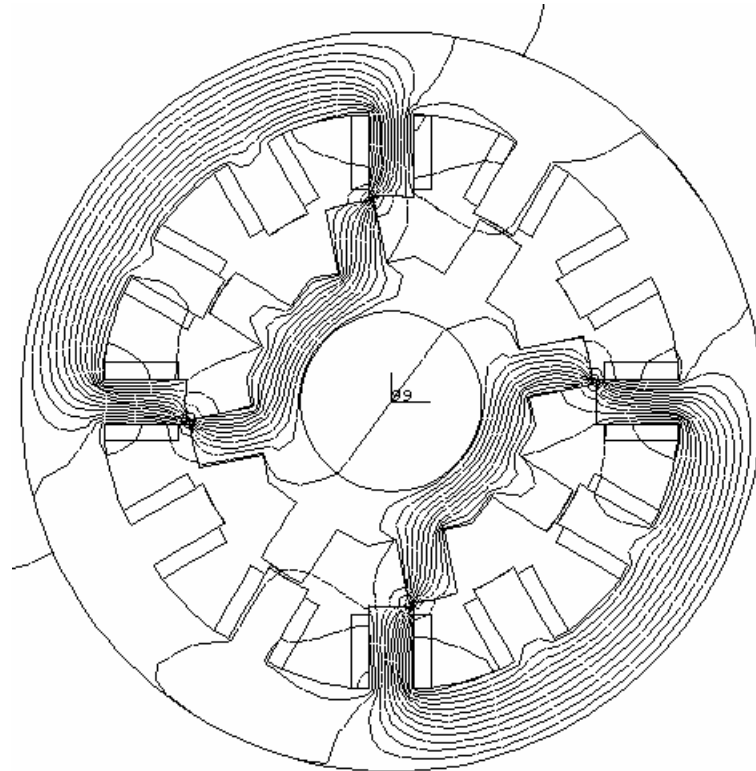
**Şekil 3.22**  $N_s/N_r=12/8$  kutuplu ARM'nin ön kesit görünüşü.

Stator ve rotor kutup sayıları farklı üç ARM modelinin bir rotor kutbuna etki eden yarıçap yönünde oluşan kuvvetlerin karşılaştırılması şekil 3.25, şekil 3.26 ve şekil 3.27'de gösterildiği gibi farklı ARM modellerinde aynı tepe değer momentin üretilmesi durumu için yapılmıştır.

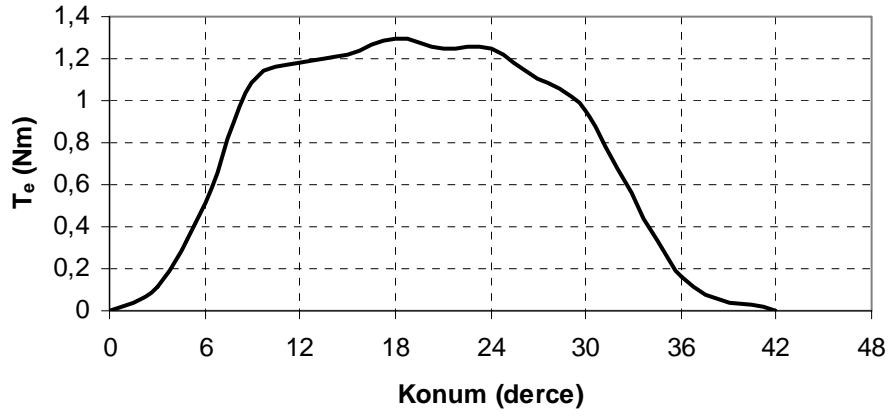
$N_s/N_r=6/4$ ,  $N_s/N_r=12/8$  ve  $N_s/N_r=18/12$  kutuplu ARM'lerin bir rotor kutbuna etki eden yarıçap yönünde oluşan kuvvet Sonlu Elemanlar Yöntemi'nden hesaplanmıştır. Üç motor tipi için rotor konumuna bağlı olarak radyal kuvvetin değişimi şekil 3.28, şekil 3.29 ve şekil 3.30'da sırasıyla gösterilmiştir.



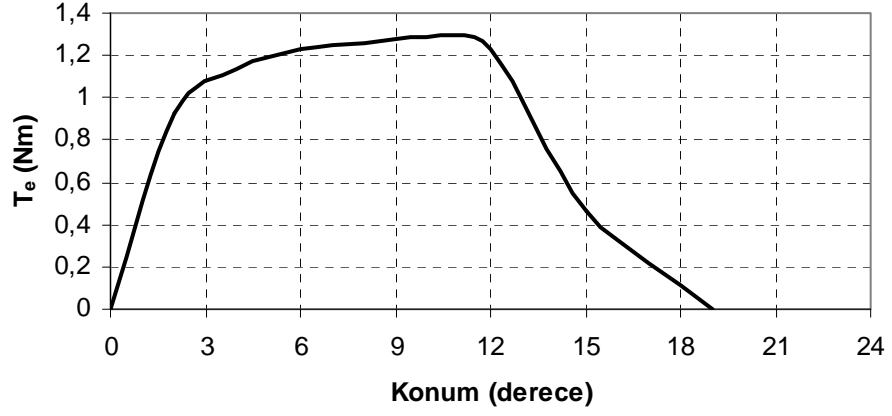
Şekil 3.23  $N_s/N_r=6/4$  kutuplu ARM'nin  $\theta=18^\circ$  için alan dağılımı



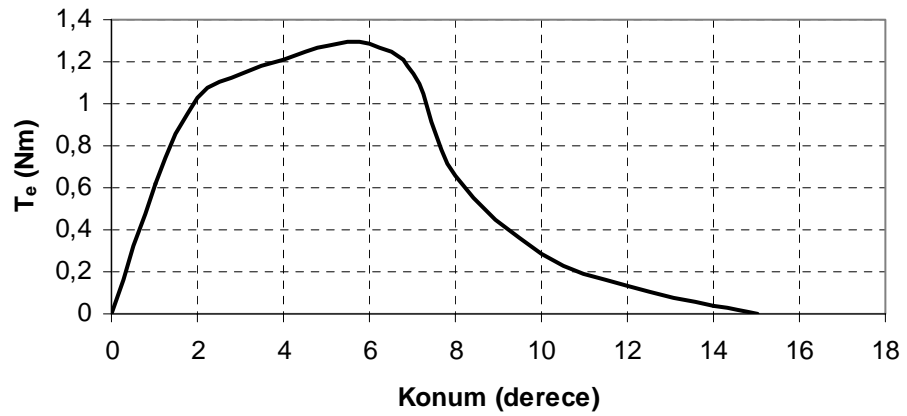
Şekil 3.24  $N_s/N_r=12/8$  kutuplu ARM'nin  $\theta=12^\circ$  için alan dağılımı



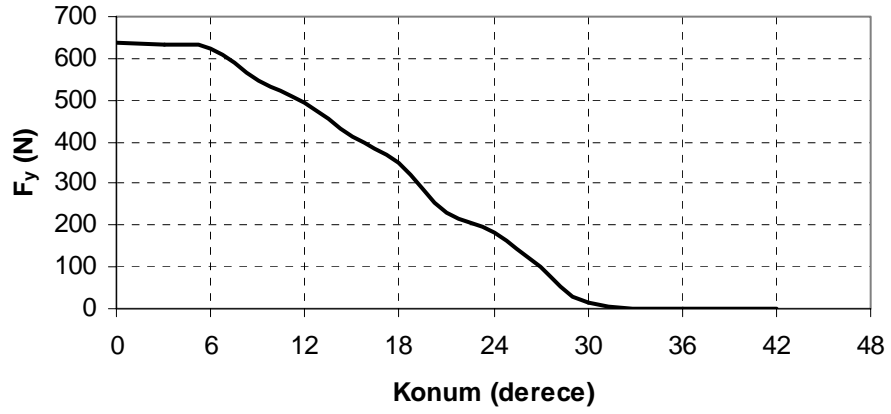
Şekil 3.25  $N_s/N_r=6/4$  ARM'nin rotor konumuna bağlı moment değişim grafiği.



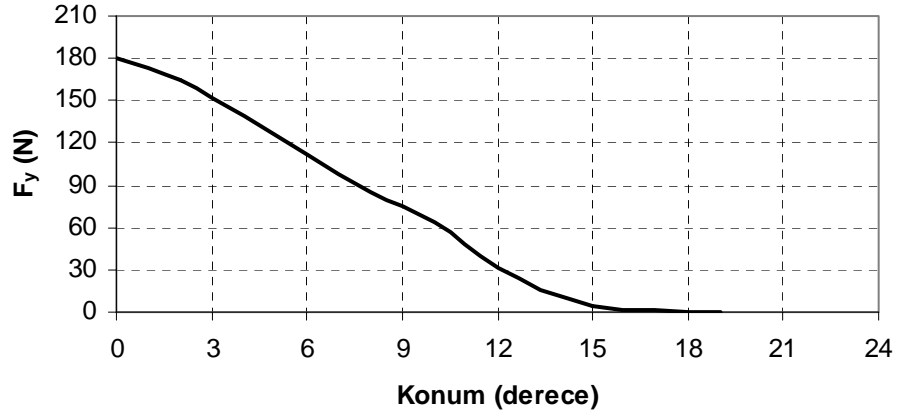
Şekil 3.26  $N_s/N_r=12/8$  ARM'nin rotor konumuna bağlı moment değişim grafiği.



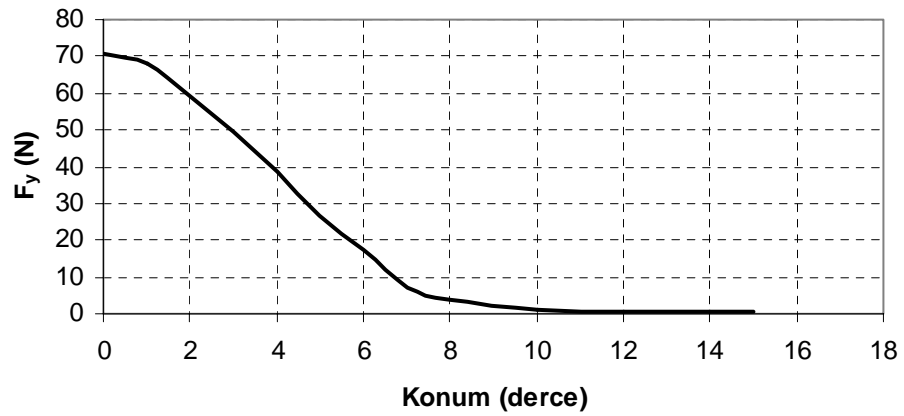
Şekil 3.27  $N_s/N_r=18/12$  ARM'nin rotor konumuna bağlı moment değişim grafiği.



Şekil 3.28  $N_s/N_r=6/4$  ARM'nin rotor konumuna bağlı yarıçap yönünde oluşan kuvvetin değişim grafiği.



Şekil 3.29  $N_s/N_r=12/8$  ARM'nin rotor konumuna bağlı yarıçap yönünde oluşan kuvvetin değişim grafiği.



Şekil 3.30  $N_s/N_r=18/12$  ARM'nin rotor konumuna bağlı yarıçap yönünde oluşan kuvvetin değişim grafiği.

Üç farklı ARM modeline ait radyal kuvvetler karşılaştırıldığında aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- 1) Üç fazlı  $N_s/N_r=6/4$  kutuplu ARM'de bir rotor kutbuna etki eden radyal kuvvet  $N_s/N_r=18/12$  kutuplu ARM'nin bir kutbuna etki eden radyal kuvvetin yaklaşık dokuz katıdır.
- 2) Yine üç fazlı  $N_s/N_r=12/8$  kutuplu ARM'de ise bir rotor kutbuna etki eden radyal kuvvet  $N_s/N_r=18/12$  kutuplu ARM'nin bir rotor kutbuna etki eden radyal kuvvetin yaklaşık iki buçuk katıdır.
- 3) Dolayısıyla  $N_s/N_r=18/12$  kutuplu ARM'de radyal kuvvetler sonucu oluşan titreşimin meydana getirdiği gürültü  $N_s/N_r=12/8$  kutuplu ARM'ye göre iki buçuk kat,  $N_s/N_r=6/4$  kutuplu ARM'ye göre dokuz kat az olur.

## 4. BÖLÜM

### 4. ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORUN KONTROLÜ

#### 4.1 Giriş

ARM'nin yapısındaki basitlik, sağlamlık ve düşük maliyet avantajı ARM'yi değişik genel amaçlı hızı ayarlanabilir uygulamalar için uygun bir seçenek yapmaktadır. ARM, yüksek derecede güvenilirlik gerektiren uygulamalarda basit güç elektroniği sürücü devresi ihtiyacı ve arızasız konverter üstünlüklerini sunar. Bir ARM'nin milindeki mekanik çıkış gücü eşdeğer indüksiyon motordan daha yüksektir ve rotorda sargılar olmaması nedeniyle moment-atalet oranı daha yüksektir.

Klasik makinalarla karşılaştırıldığında bir ARM'nin birinci dezavantajı akustik gürültü ve titreşime neden olan momentteki yüksek dalgalanmadır. ARM'de momentteki dalgalanmanın kaynağı moment üretim mekanizmasının ayrık tabiatı ve yüksek nonlineerliktir. ARM 'de toplam moment fazların bağımsız ürettiği momentlerin toplamına eşittir. ARM'de akımın bir fazdan diğer faza geçtiği komütasyon anında momentte dalgalanma daha fazla olmaktadır.

Yüksek performanslı servo uygulamalarda momentin düzgün olması ve momentte dalgalanmanın küçük olması çok önemlidir. Momentteki dalgalanmayı azaltan tekniklerin geliştirilmesiyle ARM'nin mükemmel pozitif özellikleri servo sistemlerde kullanılabilir. Bu tip sürücüler otomotiv endüstrisinde, direkt sürücü makine aletlerinde yaygın uygulamalara sahiptir [40].

Motor sürücülerinden istenen özellik yüksek verim ve düşük maliyettir. ARM'nin fiziki yapısının basit olması beraberinde düşük üretim maliyeti getirmektedir. Ancak motorun elektronik kısmını oluşturan güç anahtarları, konum algılayıcı, akım algılayıcıları, analog-dijital (A/D) veya dijital-analog(A/D) dönüştürücüler, opto-izolatörler ve mikroişlemciler ARM sürücünün maliyetini arttırmaktadır.

Fazların iletim ve kesim açıları ile motora uygulanan gerilimin kontrolü ARM denetiminin anahtar parametreleridir. Düzgün moment yanında tepe değeri düşük bir akım dalga şekli ARM'nin istenilen sonuçlarından biridir. Motorun doğru bir dinamik modelinin oluşturulması, ani moment ve akım değişimlerinin belirlenmesinde kolaylık sağlayacaktır.

Parametre değişimlerine karşı duyarsız olmak, bozuculardan etkilenmemek ve dayanıklılık bir denetleyiciden beklenen özelliklerdir. Momentteki dalgalanmayı önlemek veya küçültmek, sıfır hız dâhil geniş bir hız aralığında dört bölgede çalışma sağlamak ve gürültüyü en aza indirmek bir ARM kontrolünde gerçekleştirilmesi hedeflenen noktalarlardır.

Anahtarlı relüktans motor gerek bir fazının eşdeğer devresi ve gerekse akımın karesine bağlı olarak büyük momentler üretme yönü ile doğru akım seri uyarmalı motora benzer. Bu benzerlikten hareketle doğru akım seri uyarmalı motorun kontrolüne benzer bir kontrolü ARM'ye uygulamak mümkün değildir. Çünkü ARM'de indüktans hem rotor konumuna hem de faz akımına bağlı değişmektedir. Bundan dolayı Bir ARM sürücü sistemi için bir kontrol yöntemi geliştirmek kolay olmamaktadır. Tam aksine, diğer tüm elektrik makinelerinde kontrol yöntemleri değişik uyarmalarda sabit makine parametrelerine bağlı oluşturulur.

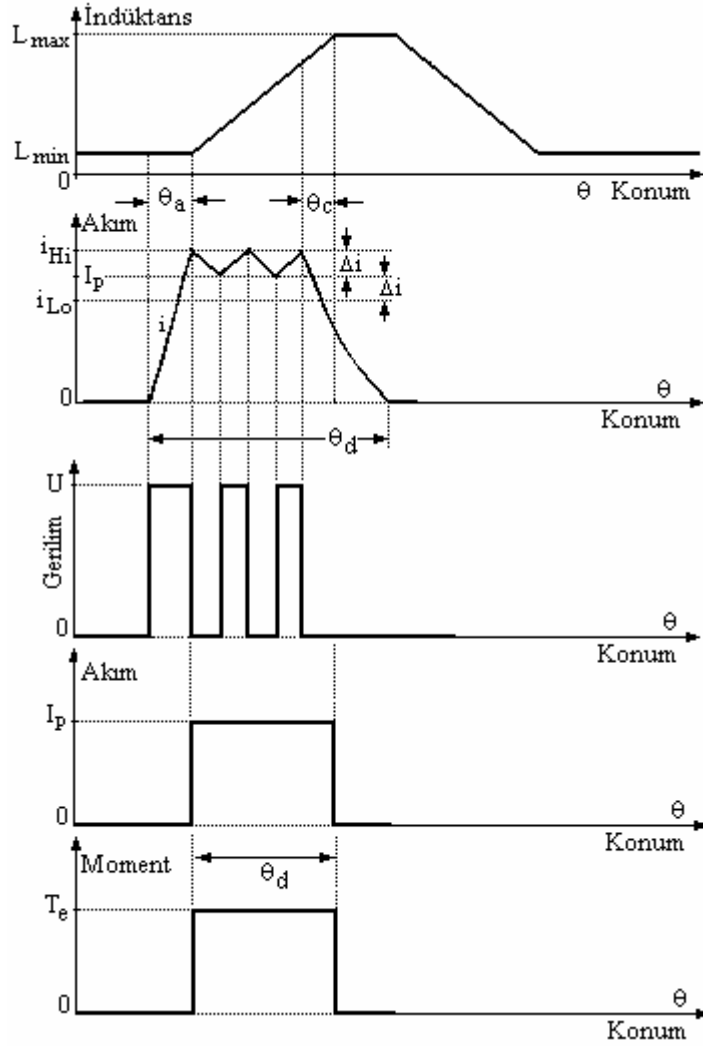
#### 4. 2 Kontrol Prensibi

Motor çalışmada ARM'nin bir fazın indüktansı ile üretilen momentin değişimi şekil 4.1'de gösterilmiştir. Makinanın tüm fazlarının ürettiği elektromagnetik moment darbelerinin ani değerlerinin toplamı ortalama momenti verecektir. Makine ayrık moment darbeleri üretir, ancak faz indüktans grafiklerinin kısmen üst üste bindirilmesi ile sürekli bir moment üretmek mümkündür.

Şekil 4.1'de görüleceği üzere ortalama moment sargı akımının  $I_p$  genliği ayarlanarak veya iletim açısı  $\theta_a$  değiştirilerek kontrol edilebilir. Momentteki dalgalanmayı azaltmak için iletim açısının sabit tutulması ve sargı akımı genliğinin değiştirilmesi tavsiye edilir [64].

Ani moment üretiminin oluşumu için indüktansın arttığı kısımda akım akıtılmalıdır. Bobin içeren devrede bobin, akımın ani olarak yükselmesine ve ani olarak düşmesine müsaade etmez.. Bu sebeple akımın pozitif eğimli indüktans başlangıcında tepe değere ulaşması için ileri gerilim uygulamak ve negatif eğimli indüktans bölgesinden önce akımı sıfıra çekmek için ileri komütasyon gerekir.  $\theta_a$  ileri açısında faz sargısına gerilim uygulanır ve akım kesimi  $\theta_c$  ileri açısında başlatılır.  $\theta_a$  ve  $\theta_c$  açıları  $i_p$  faz akımının tepe genliğine ve rotor hızına bağlıdır. Transistörlerin açılıp kapatılmasıyla akım  $i_p$  genliğinde tutulur. Akımın +/- $\Delta i$  kadar değişmesine izin verilir. Bu bant aralığı anahtarlama frekansının küçültülmesine ve iletim, kesim kayıplarının azalmasına olanak sağlar.

Boştaki hızın altında zıt emk hat geriliminden daha düşük olduğundan ARM'de akım, şekil 4.1'de gösterildiği gibi, darbe genişlik modülasyon yöntemi (Pulse Width Modulation = PWM) ile kontrol edilir. Bunun sonucu moment kontrol edilmiş olur. Boştaki hızın üstünde, yüksek emk nedeniyle PWM akım kontrolü mümkün değildir. Sabit güç çalışma bölgesinde iletim ve kesim açıları ile ARM'nin hız kontrolü yapılır [51]. Boştaki hızın üstünde kontrol parametreleri yalnız faz iletim ve kesim açılarıdır [20].



Şekil 4.1 Akım kontrollü ARM sürücü.

### 4.3 ARM'nin Doğrusal Çalışma Modeli

Doğrusal çalışmada endüktansın akımla değişmediği ve magnetik doyumun olmadığı varsayılır. Fazlar arasındaki ortak endüktans çok küçük olduğu için ihmal edilir. Anahtarlı relüktans motorun bir fazına ilişkin şekil 4.12'deki eşdeğer devreden hat gerilimi için

$$V = Ri + \frac{d\Psi(\theta, i)}{dt} \quad (4.1)$$

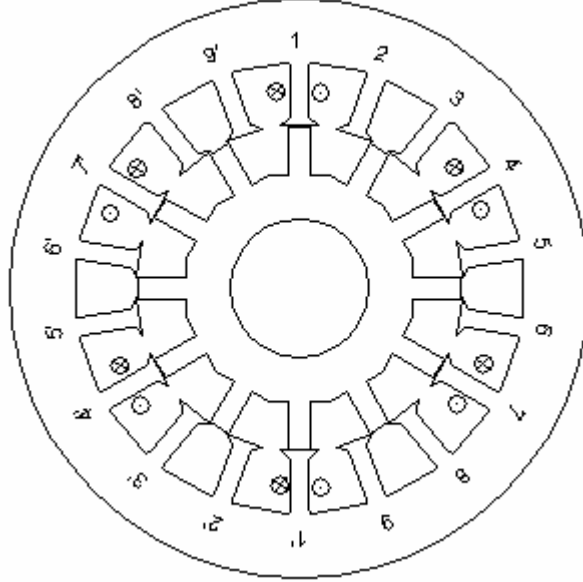
yazılabilir. Burada V şebeke gerilimi, i faz akımı, R faz direnci ve  $\Psi$  faz akısıdır. ARM'nin bir faz akısı  $\theta$  rotor konumu ve faz akımının bir fonksiyonudur. Akım ve konuma göre türev almak için birini sabit tutup diğerinin kısmi türevini alıp çarpmak ve toplamak gerekir.

$$V = Ri + \frac{\partial\Psi}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial\Psi}{\partial\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (4.2)$$

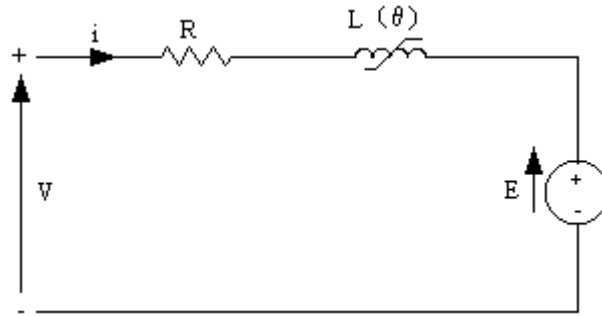
Açısal hız  $\omega$  ile konum  $\theta$  arasındaki ilişki,

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (4.3)$$

şeklindedir.



**Şekil 4.2** 18/12 kutuplu ARM'nin ön görünüşü. 1-1', 4-4' ve 6-6' kutupları üzerindeki sargıların seri bağlanması ile A fazı oluşmuştur.



**Şekil 4.3** ARM sürücünün bir fazının eşdeğer devresi.

Endüktans bağıntısı için

$$L = \frac{\partial \Psi}{\partial i} \quad (4.4)$$

yazılabilir. Akı ile endüktans arasında doğrusal ilişki kullanılırsa

$$\Psi = iL \quad (4.5)$$

yazılabilir. (4.3), (4.4) ve (4.5) ifadeleri (4.2)'de yerine yazılırsa

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{d\theta} \omega \quad (4.6)$$

elde edilir. (4.6) eşitliğinde eşitliğin sol tarafındaki üçüncü terim sargıda endüklenen zıt elektro motor kuvveti (emk) verir.

$$E = i \frac{dL}{d\theta} \omega \quad (4.7)$$

E bir faz sargısında endüklenen zıt emk'yi verir.

Basitleştirmek amacıyla nominal akımda endüktansın sadece konuma bağlı olarak çakışık olmayan konum endüktansı ( $L_{\min}$ ) ile çakışık konum endüktansı ( $L_{\max}$ ) arasında değiştiği kabul edildi. Endüktansın rotor konumuna göre türevi sabit alındı. Bu türev motorun çalışma aralığında çok az değişir.

Şekil 4.2'de gösterilen 18/12 kutuplu, üç fazlı ARM'nin her bir fazı için gerilim bağıntıları yazılırsa sırasıyla (4.8), (4.9) ve (4.10) ifadeleri elde edilir.

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + i_a \frac{dL_a}{d\theta} \omega \quad (4.8)$$

$$V_b = R_b i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + i_b \frac{dL_b}{d\theta} \omega \quad (4.9)$$

$$V_c = R_c i_c + L_c \frac{di_c}{dt} + i_c \frac{dL_c}{d\theta} \omega \quad (4.10)$$

olur. Buradaki indisler fazları göstermektedir.

Doğrusal çalışma şartlarında bir fazın ürettiği moment,

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (4.11)$$

bağıntısından hesaplanabilir. Fazlar için ayrı ayrı moment ifadeleri yazıldığında,

$$T_a(\theta, i_a) = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_a(\theta)}{d\theta} \quad (4.12)$$

$$T_b(\theta, i_b) = \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL_b(\theta)}{d\theta} \quad (4.13)$$

$$T_c(\theta, i_c) = \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL_c(\theta)}{d\theta} \quad (4.14)$$

bağıntıları elde edilir. Toplam üretilen moment ise fazların bağımsız ürettiği momentlerin toplamına eşittir:

$$T_e(\theta, i_a, i_b, i_c) = T_a(\theta, i_a) + T_b(\theta, i_b) + T_c(\theta, i_c) \quad (4.15)$$

ARM'nin mekanik hareket denklemi,

$$T_e = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + T_L \quad (4.16)$$

şeklindedir. Burada,  $T_e$  motor tarafından üretilen moment,  $T_L$  yük momenti, B sürtünme katsayısı ve J eylemsizlik momentidir. (4.3) ifadesi (4.16) denkleminde yerine yazılırsa,

$$T_c = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (4.17)$$

elde edilir. ARM sisteminin durum değişkenlerini i faz akımı ve  $\omega$  rotor hızı oluşturur. Gerilim ve moment denklemleri düzenlendiğinde durum değişkenleri denklemleri elde edilir.

ARM'nin durum denklemleri,

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_a} [V_a - (R_a i_a + i_a \frac{dL_a}{d\theta} \omega)] \quad (4.18)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{L_b} [V_b - (R_b i_b + i_b \frac{dL_b}{d\theta} \omega)] \quad (4.19)$$

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{1}{L_c} [V_c - (R_c i_c + i_c \frac{dL_c}{d\theta} \omega)] \quad (4.20)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} [T_c - (B\omega + T_L)] \quad (4.21)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (4.22)$$

olur.

#### 4.4 ARM'nin Doğrusal Çalışma Modeline Ortak Endüktansların Dahil Edilmesi

ARM'nin doğrusal çalışma modeline ortak endüktans dahil edilmesi halinde faz gerilimleri için (4.23)'de verilen matris eşitliği yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_{cc} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

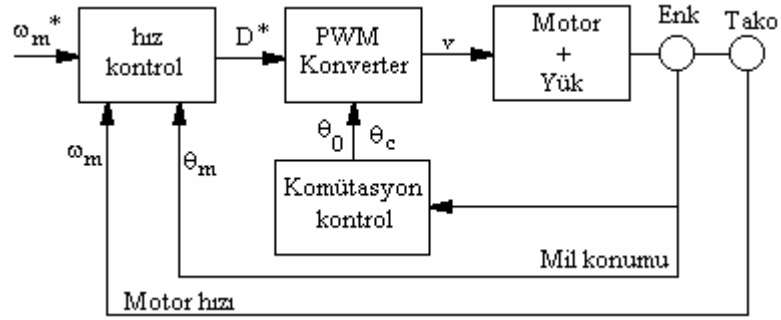
Ortak indüktansın dahil edildiği ARM'nin doğrusal moment bağıntısı için,

$$T_c = \frac{1}{2} [i_a \quad i_b \quad i_c] \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

yazılabilir.

#### 4.5 ARM Sürücünün Kapalı Çevrim Hız Kontrolü

Kapalı çevrim hız kontrolünde ARM sürücünün bir fazında yer alan anahtarlar hız kontrolör çıkışı ile bir  $f_{chop}$  frekansı ile  $t_{on} \times f_{chop} = t_{on}/T_{chop}$  ile açıklanan D görev periyodu içinde açılır ve kapatılır.  $T_{chop}=1/f_{chop}$  anahtarlama periyodudur. Kapalı çevrim hız kontrolünde kapalı çevrim ani akım kontrolü yapılmaz. Kaynak gerilimi  $D \times U_{dc}$  kadar kısıyılır. Şekil 4.4'de ARM'nin kapalı çevrim hız kontrol şeması verilmiştir.



Şekil 4.4 ARM sürücünün kapalı çevrim hız kontrol şeması.

#### 4.6 ARM Sürücünün Kapalı Çevrim Akım Kontrolü

Gerilim denkleminde rotor hızı ile akımın çarpımı terimi olması sebebiyle ARM nonlineerdir. Sistemdeki nonlineerite kontrolör tasarımını zorlaştırır. Eğer sistem lineerleştirilirse lineer kontrol sistemi teorisi kontrolör tasarımına uygulanabilir. Değişken hızlı bir ARM sürücünde çalışma noktası sürekli değiştiği için belli bir çalışma noktası için tasarlanmış nonlineer bir kontrolör akım çevriminde doğrusal çalışma koşulları ile beraber ortak indüktansın etkilerini de karşılar ve bunun sonucu davranışı da iyi olur. Akım kontrolörü tasarımında üç farklı yaklaşım vardır:

- 1- Lineerleştirilmiş akım kontrolörü tasarımı,
- 2- Lineerleştirilmiş geri beslemeli nonlineer akım kontrolörü tasarımı,
- 3- Ortak indüktansın etkilerini içeren nonlineer akım kontrolörü tasarımı.

Bütün bu yöntemler akım komutunu üretmek için darbe genişlik modülasyonu (PWM) kullanılır, fakat pratikte bazen histeresiz akım kontrolörle de karşılaşılır. Bu kontrolörü gerçekleştirmek daha kolaydır ve PI akım kontrolörlere gerek duymaz [64].



#### 4.7 ARM Sürücünün Moment Kontrolü

Tüm elektrik makinalarında akımın kontrolü ile hava aralığındaki moment tam düzgünleştirilir. Örneğin doğru akım motorlarında hava aralığı momentini uyarma akımı ile doğru orantılıdır. Böylece, bu makinalarda moment kontrolü lineer bir moment kontrolör ile sağlanır. ARM sürücü sisteminde ise hava aralığı momentini uyarma akımı arasında böyle lineer bir ilişki yoktur. Çünkü akı, uyarma akımı ve rotor konumu arasındaki üç boyutlu ilişki hava aralığı momentini uyarma akımı ve rotor konumu arasında nonlineer üç boyutlu bir ilişki oluşturmaktadır.

ARM'de komütasyon sırasında akım iki fazda akar. Akımın kesilmeye başladığı fazda akım kontrolsüz ve sadece akımın yeni akmaya başladığı fazda akım kontrol ediliyorsa iki fazın birlikte oluşturduğu hava aralığındaki toplam moment bu aralıkta sabit olmayacaktır. Komütasyon aralığı denilen bu aralıkta momentte dalgalanma artar. Yüksek performanslı bir sürücü sisteminde momentteki salınım hızda daha büyük salınıma ve daha yüksek makine kayıplarına sebep olacağından istenmez.

Komütasyon aralığında bir fazın akımı azalırken diğer fazın akımı artmaktadır. Bu aralıkta akım sabit değildir. Bu nedenle ancak üretilen toplam moment sabit tutulabilir.

Anahtarlı relüktans motorda komütasyon aralığında faz akımları karelerinin toplamı kontrol edilerek momentteki dalgalanma önlenir. Üç fazlı bir ARM'nin ürettiği toplam moment a,b,c fazlarının ürettiği momentlerin toplamına eşit olur. ARM'nin doğrusal çalışma modelinde toplam moment için

$$T_c(\theta, i_a, i_b, i_c) = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_a(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL_b(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL_c(\theta)}{d\theta} \quad (4.27)$$

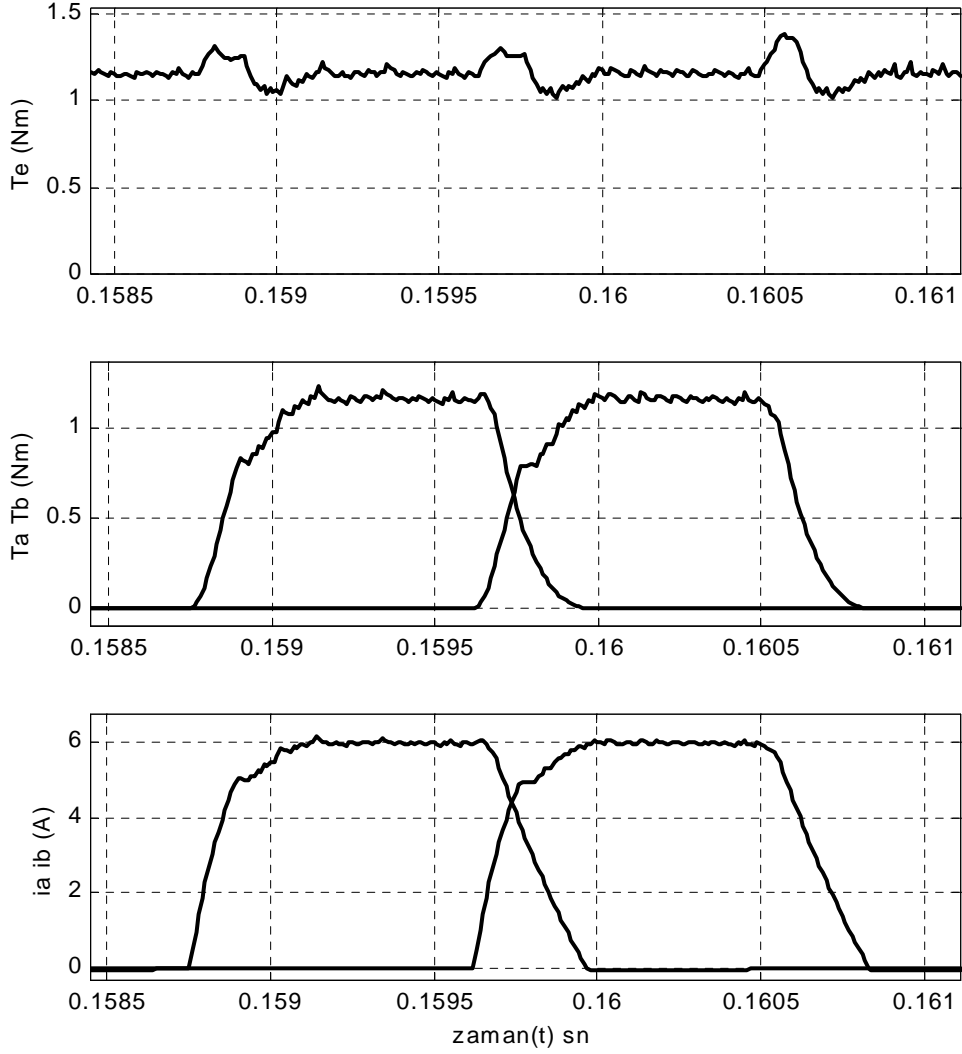
bağıntısı yazılabilir. (4.27) eşitliğindeki endüktansların türevi için

$$K_b = \frac{dL_a(\theta)}{d\theta} = \frac{dL_b(\theta)}{d\theta} = \frac{dL_c(\theta)}{d\theta} \quad (4.28)$$

yazılır ve (4.27)'de yerine konulursa,

$$T_c(\theta, i_a, i_b, i_c) = \frac{1}{2} K_b (i_a^2 + i_b^2 + i_c^2) \quad (4.29)$$

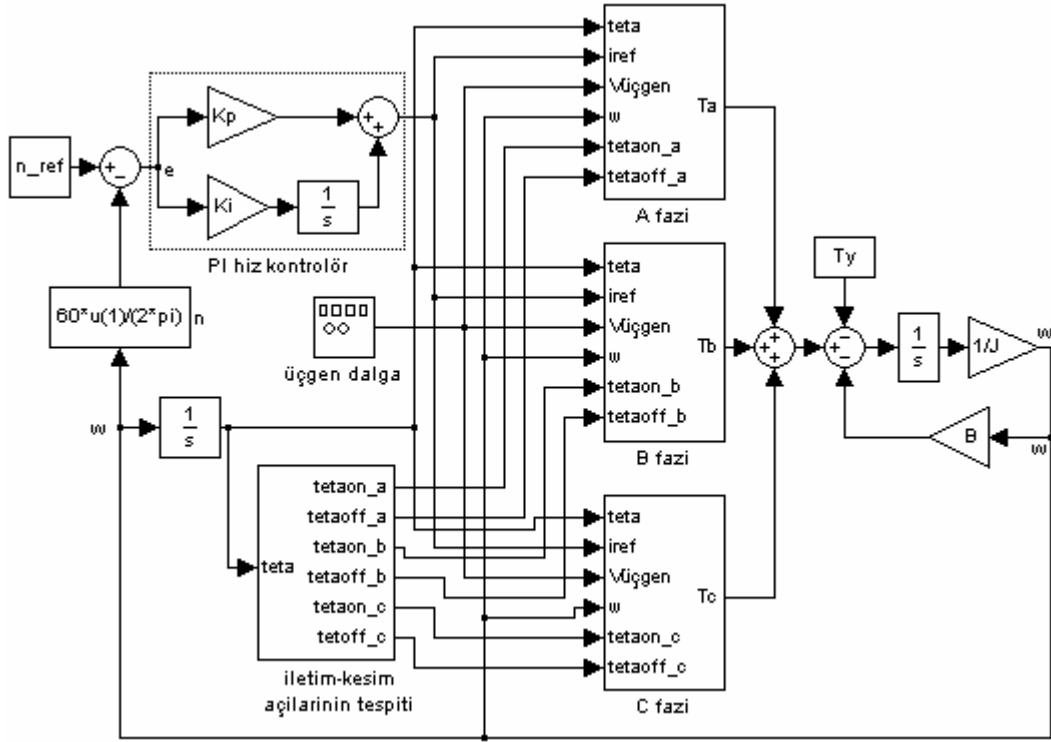
bağıntısı elde edilir. (4.29) bağıntısında  $(i_a^2 + i_b^2 + i_c^2)$  faz akımı karelerinin toplamı sabit tutulursa üretilen momentin de sabit tutulabileceği açıkça görülmektedir. Matlab/Simulink'te incelenen ARM'nin faz akımları karelerinin toplamı kontrol edilerek benzetim sonuçları elde edilmiştir. Faz akımı karelerinin toplamı kontrolü ile komütasyon aralığında da momentteki dalgalanma önlenmiştir.



**Şekil 4.7** Momentte büyük dalgalanmanın olduğu komutasyon aralığında A ve B fazları akım ve moment grafikleri ile motorun toplam momentinin değişim grafiği.

#### 4.8 Anahtarlı Relüktans Motorun Matlab/Simulink Programında Benzetimi

Matlab/Simulink programında anahtarlı relüktans motorun benzetiminde ARM'nin doğrusal çalışma modeli kullanılmıştır. Benzetim şemasını oluşturan faz blokları ve iletim kesim açılarının tespit edildiği blok ile beraber şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8 Matlab/Simulink'te hazırlanan ARM sürücünün benzetim şeması.

İletim ve kesim açıları ile faz endüktanslarının değişimi hariç faz bloklarının içeriği aynıdır. Bu nedenle mevcut A, B, C fazlarından sadece A fazına ait kontrol bloğunun ayrıntısı verilmiştir. Kapalı çevrim hız kontrolünde bu blokta akım kontrolü yapılmaz. Ancak Anahtarlı Relüktans motorun akım kontrolü yapıldığında, şekil 4.9'da gösterildiği gibi referans akım faz akımından çıkarıldıktan sonra elde edilen hata sinyali bir PI kontrolörden geçirilerek PWM kontrol işaretleri üretilir.

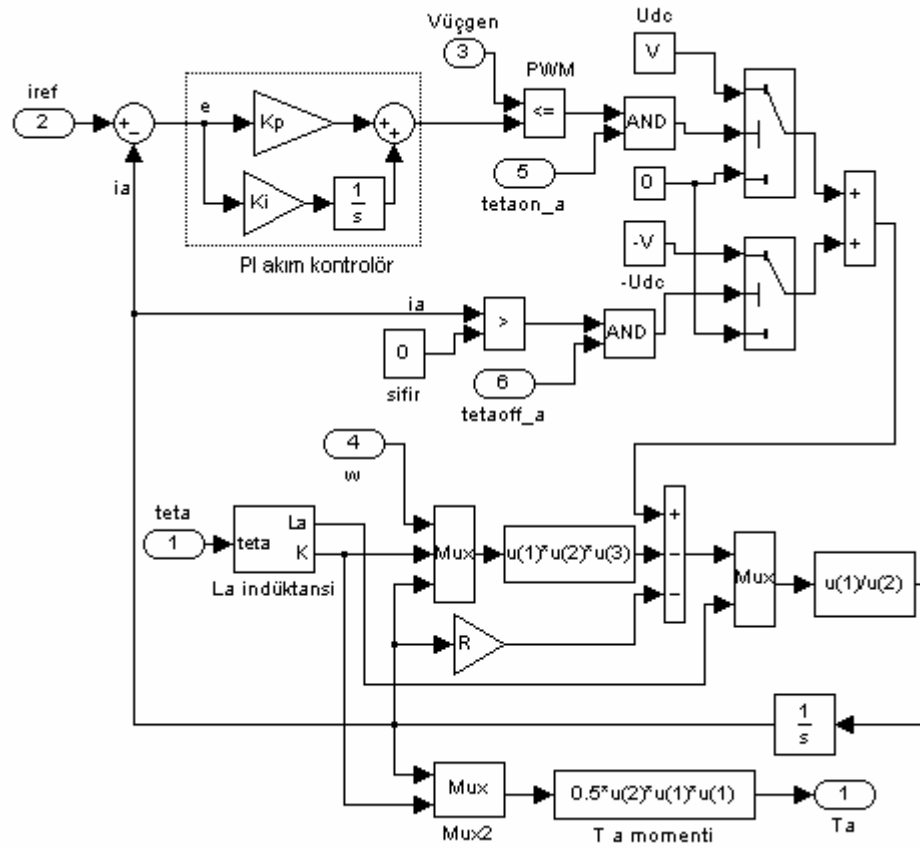
İncelenen  $N_s/N_r = 18/12$  kutuplu ARM'nin faz endüktansları için

$$L_a = L_1 + L_2 \cos(120) \quad (4.30)$$

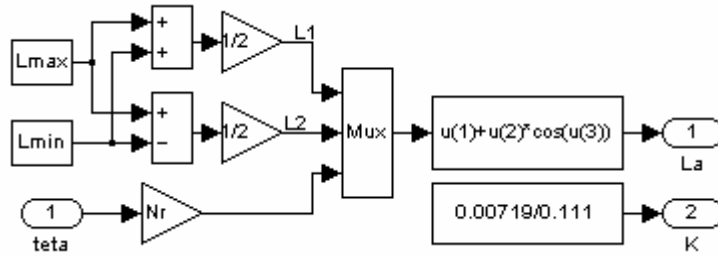
$$L_b = L_1 + L_2 \cos(120 - \frac{2\pi}{3}) \quad (4.31)$$

$$L_c = L_1 + L_2 \cos(120 + \frac{2\pi}{3}) \quad (4.32)$$

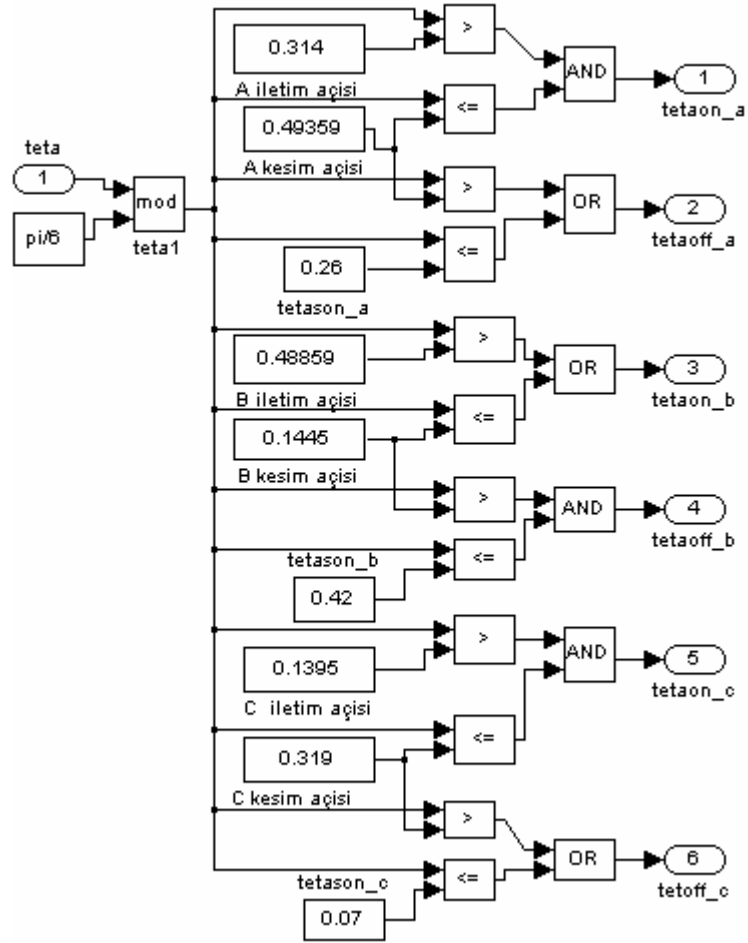
bağıntıları kullanılmıştır.  $L_1$  ve  $L_2$  değerleri (2.4) ve (2.5)'deki bağıntılardan hesaplanmıştır.



Şekil 4.9 A fazının akım kontrol blok şeması.



Şekil 4.10 A fazı endüktansı blok şemasının içeriği.



Şekil 4.11 Fazlara göre iletim ve kesim açılarının tespit edildiği bloğun ayrıntıları.

#### 4.9 Anahtarlı Relüktans Motorun Kontrolünde Kullanılan Donanım ve Yazılım

Anahtarlı relüktans motorun kapalı çevrim hız ve akım kontrolünü gerçekleştirmek amacı ile deneysel bir çalışma yapılmıştır. Bu deneysel çalışma, takip eden konu başlıklarında ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

IGBT anahtarlar kullanarak gerçekleştirilen motor güç devresi, IGBT sürücü devresi ve sayısal sinyal işlemcili kart, hızın ve akımların ölçülmesi, deneysel çalışmanın donanım kısmını meydana getirir. Hız ve faz akımı bilgilerinin işlenmesi, uygun PWM darbelerinin üretilmesi ise deneysel çalışmanın yazılım kısmını oluşturur.

##### 4.9.1 Güç Devresi

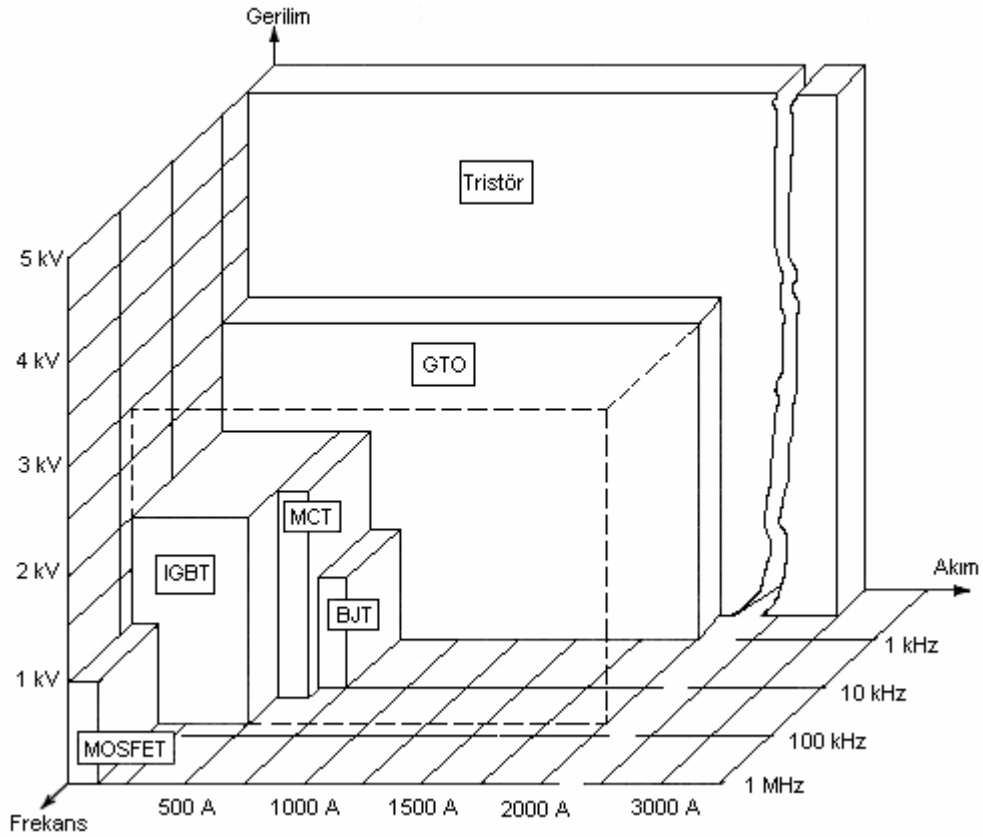
Elektrik motorlarının sürücü devresinde kullanılacak güç elektroniği elemanlarının seçimi yapılırken güç elektroniği elemanlarının maliyeti, sürülme kolaylığı, snubber ihtiyacı,

anahtarlama hızı, iletim kayıpları, motorun çalışma akım ve gerilimini içeren güç ihtiyacı kriterleri göz önünde bulundurulur.

Güç elektroniği anahtarlama elemanları transistör, tristör, kapıdan söndürmeli tristör (GTO), MOSFET, IGBT ve MOS kontrollü tristördür.

Akım kontrollü bir eleman olan transistörün sürülmesi zor olup 15 kHz frekansa kadar anahtarlama yapabilmektedir. Taşıyabileceği en büyük akım 800A ve çalışabileceği en yüksek gerilim 1200 voltur.

Tristör (SCR) ve GTO akım kontrollü elemanlardır. Sürülmeleri zor olup tristörler 1kHz frekansa kadar, GTO'lar ise 6 kHz frekansa kadar anahtarlama yapabilmektedir. Tristörün çalışabileceği en yüksek gerilim 6000 volt ve en büyük akım 3500 amperdir. GTO'ların ise çalışabileceği en yüksek gerilim 4500 volt ve en büyük akım 3000 amperdir.



Şekil 4.12 Güç elektroniği elemanlarının anahtarlama yapabildiği akım, gerilim ve frekans değerleri.

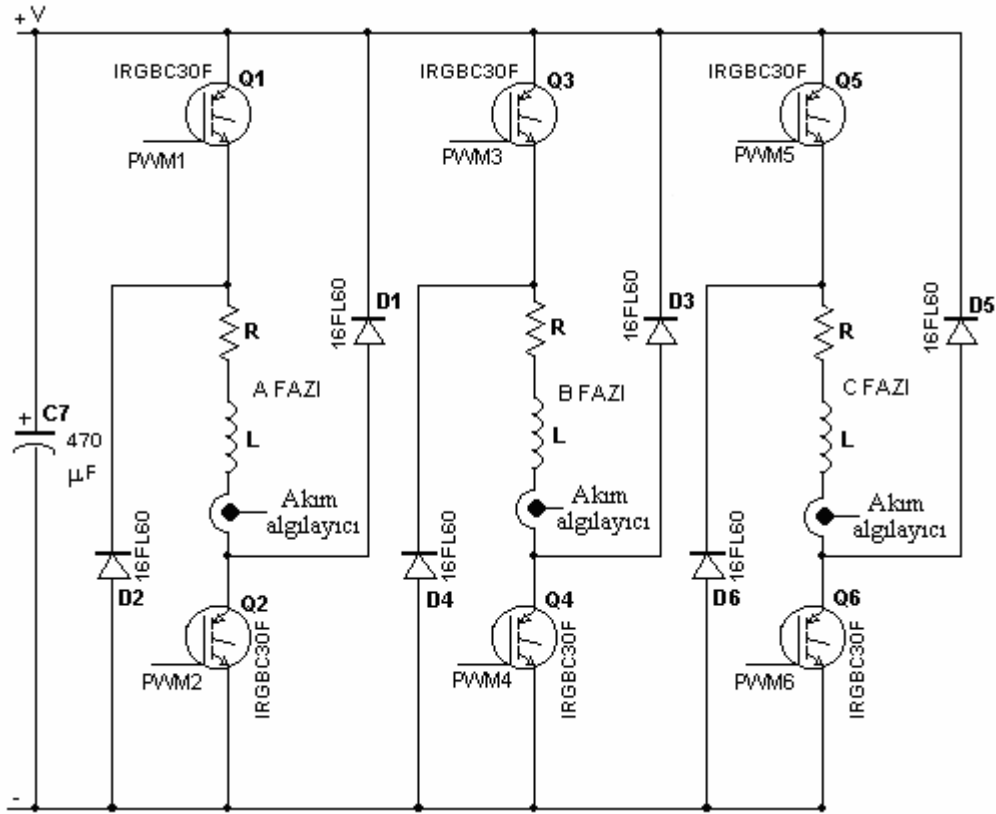
MOSFET'ler hızlı anahtarlama elemanlarıdır. 100 kHz ile 500kHz frekanslara kadar anahtarlama yapabilmektedir. MOSFET gerilim kontrollü bir eleman olup sürülmeleri kolaydır. Ancak anahtarlama güçleri küçüktür. Taşıyabilecekleri en büyük akım 140A ve çalışabilecekleri en yüksek gerilim 500 voltur.

IGBT'ler gerilim kontrollü elemanlar olup sürülmesi kolaydır. 30 kHz frekansa kadar anahtarlama yapabilmektedir. Taşıyabilecekleri en büyük akım 300A ve çalışabilecekleri en yüksek gerilim 1200 voltur.

MOS kontrollü tristör kısaca MCT olarak da adlandırılır. MCT gerilim kontrollü bir eleman olup sürülmesi basittir. 20 kHz anahtarlama frekansına kadar kullanılır. En yüksek çalışma gerilimi 1200 V ve taşıyabileceği en büyük akım 630 amperdir.

Yukarıda adı geçen güç elektroniği elemanlarının çalışabildiği akım, gerilim ve frekans değerleri şekil 4.12'de toplu olarak gösterilmiştir.

Anahtarlama hızı yüksek, sürülmesi kolay ve anahtarlama kayıpları düşük olduğu için anahtarlı relüktans motorun sürücü devresinde anahtarlama elemanı olarak IGBT seçilmiştir.



Şekil 4.13 Bir faz için iki anahtar kullanarak gerçekleştirilen ARM güç devresi.

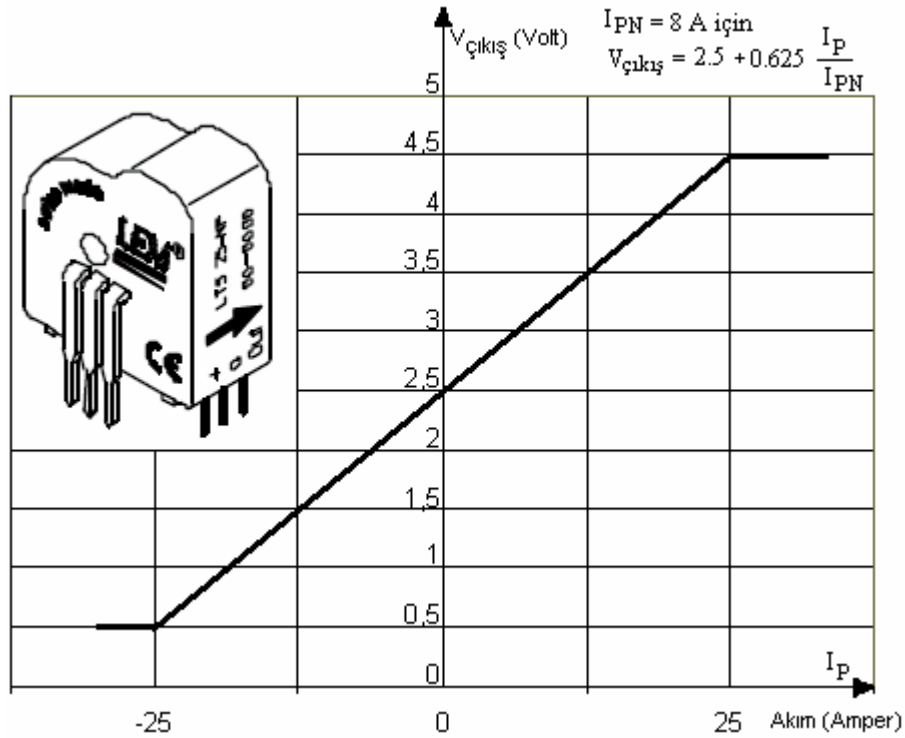
ARM'nin Anahtarlı relüktans motorun kontrolünde kullanılan güç devresi şekil 4.13'de gösterilmiştir. Güç anahtarı olarak IRG4BC30F IGBT transistör kullanılmıştır. IRG4BC30F çok hızlı bir anahtardır, çalışma gerilimi  $V_{CES} = 600$  V olup ve çalışma akımı  $I_C = 31$  A (25 °C),  $I_C = 17$  A (100 °C) 'dir. Kapı gerilimi  $V_{GE} = 15$  V 'dur. İletimde gerilim düşümü  $V_{CE(on)}=1.59$  V'

dur. Aynı zamanda 4. nesil IGBT'lerdendir. Önceki 3. nesile göre verimi daha yüksektir. TO-220AB kılıfında yapılmıştır.

Toparlama devresinde 16FL60S02 hızlı diyotu kullanıldı. Bu diyotun üzerinde taşıyabileceği ortalama akım  $I_{F(AV)} = 16A$  dir. Ters yönde dayanabileceği en büyük gerilim değeri  $V_{RRM} = 1000 V$ 'dur. Geri toplama zamanı  $t_{tr} = 200 ns$  dir. DO-4 (DO-203AA) kılıfında imal edilmiştir.

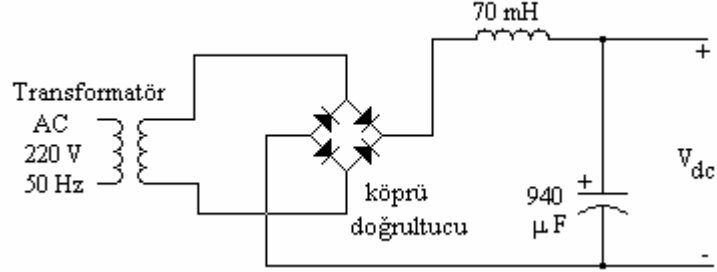
Faz akımlarının ölçülmesinde LTS 25-NP kapalı çevrim çok kademeli Hall duyargalı akım algılayıcısı kullanılmıştır. LTS 25-NP ile  $-25 A$  ile  $+25 A$  arasındaki akımlar ölçülebilmektedir.

LTS 25-NP akım algılayıcısı 100 kHz'e kadar geniş bir frekans aralığında çalışabilmektedir. LTS 25-NP akım algılayıcısının giriş akımına bağlı çıkış geriliminin değişimi doğrusal olup bu ilişki şekil 4.14'de gösterilmiştir. Anahtarlı relüktans motorun üç faz akımını ayrı ayrı ölçmek için üç adet bağımsız akım algılayıcısı kullanıldı. Sayısal sinyal işlemciye algılanan akım bilgileri analog-dijital dönüştürücünün ADC0, ADC1 ve ADC2 girişleri üzerinden aktarılmıştır.



Şekil 4.14 LTS 25-NP akım algılayıcısının akım-gerilim grafiği.

DA gerilim tek fazlı bir AA şebekeden köprü doğrultucu kullanılarak doğrultulmuştur. Doğrultulmuş gerilim 940 $\mu$ F bir kondansatör ile filtre edilmiştir. Akımın filtre edilmesinde L = 70 mH'lik bir bobin kullanılmıştır.

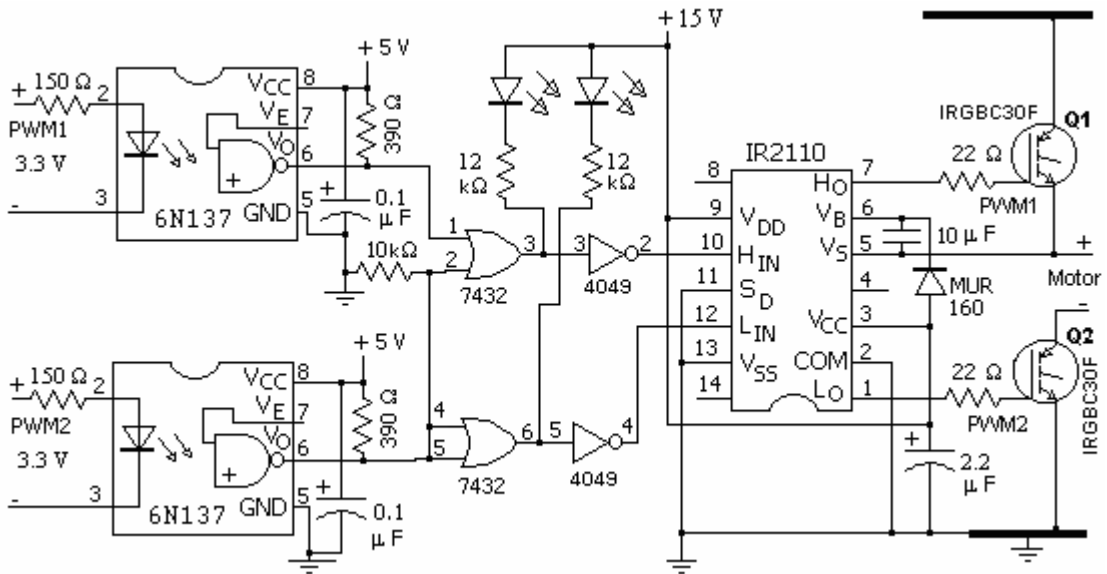


Şekil 4.15 Alternatif gerilimin doğrultularak doğru gerilimin elde edilmesi.

#### 4.9.2 IGBT Sürücü Devresi

IGBT sürücü devresi motorun A fazı için şekil 4.16'da gösterilmiştir. Diğer fazların IGBT sürücü devresi A fazının aynısıdır. Bu devrede opto-koplör olarak 6N137 kullanılmıştır. Böylece sayısal sinyal işlemci ile IGBT sürücü devresi elektriksel olarak yalıtılmış oldu. 6N137 TTL teknolojisinde yapılmış tek kanallı bir opto-koplördür. Yükselme/düşme zamanı 24/10 ns, yalıtım gerilimi 2500 Volt ve iletim hızı 10 MBd baudur.

Lojik kilitleme 7409 AND kapısı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.16'da gösterilen lojik kilitlemede Q<sub>2</sub> iletimde ise Q<sub>1</sub> iletime girer. IR2110 IGBT sürücü entegresi ile empedans uyumu 4049 değil kapısı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.16 A fazı IGBT sürücü devresi.

IGBT'lerin sürülmesinde IR2110 entegresi kullanıldı. IR2110 yüksek ve alçak olmak üzere bağımsız iki çıkışlı, yüksek hızlı güç MOSFET'i ve IGBT sürücü entegresidir. Çalışma gerilimi  $V_{OFFSET} = 500$  V, çıkış gerilimi  $V_{OUT} = 10-20$  Volt, tipik iletim kesim zamanı  $t_{on/off}=120$  ve 94 ns dir. DIL14 kılıfında üretilmiştir.

10  $\mu$ F kondansatörün çok kısa sürede VCC kaynak gerilimi ile şarj olması için çok hızlı diyot olan MUR160 kullanılmıştır. MUR160 diyotunun ters yönde dayanma gerilimi 600 Volt, üzerinde taşıyabileceği ortalama akım  $I_{F(AV)}=1$  Amper, yükselme zamanı  $t_r = 75$  ns dir.

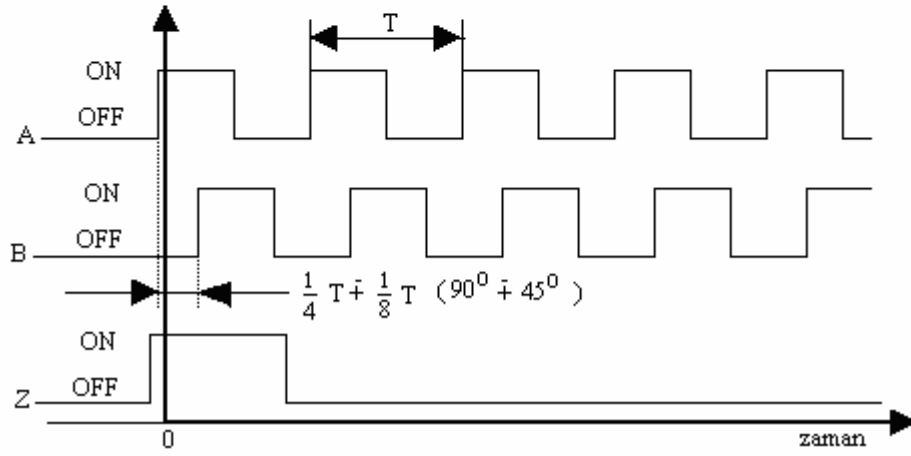
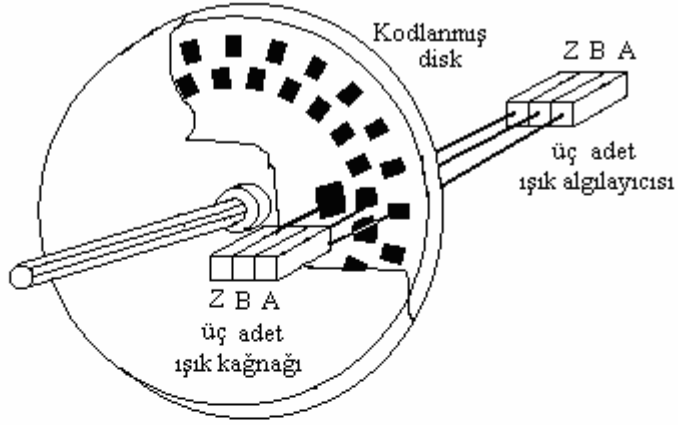
### 4.9.3 Konum Okuyucu

Dairesel mekanik hareketlerde enkoder, kontrol ünitesi ile mekanik kısım arasında çok önemli bir dönüşümü sağlar. Enkoderler, dairesel veya doğrusal hareketi elektriksel darbeler çevirir. Enkoderlerin yarık sayısı dolayısıyla bir devirde oluşan darbe sayısı hareketin doğru ölçülmesini belirleyen faktördür. Çok değişik dijital enkoder tipleri vardır. Bunlardan biri de optik enkoderlerdir. Bir optik enkoderin (konum kodlayıcının) dört ana parçası vardır: Işık kaynağı, kodlanmış disk (yarıklar), ışık algılayıcı ve sinyal düzenleyicidir. Optik konum okuyucular, artımlı (incremental) ve mutlak (absolute) enkoder olmak üzere ikiye ayrılır [70].

#### 4.9.3.1 Artımlı Konum Kodlayıcılar

Artımlı bir konum kodlayıcı bir disk üzerine dizili şekilde yerleştirilmiş yarıklar vasıtasıyla eşit darbeler üretir. Kodlanmış disk yarıklarından ışık geçince karşısındaki ışık algılayıcılar darbe üretir. En içte tek yarık vardır. Dıştaki iki sıra yarıkların sayısı eşittir. Ancak B sırası A sırasından belli bir açı farkıyla yerleştirilmişlerdir. Konum tespiti üretilen darbelerin sayılması ile sağlanır. A ve B darbelerinin oluşum sırasına göre ileri-geri dönüş yönü belirlenir. İndex darbesi özelliği olan konumkodlayıcılarda her bir devirde bir index darbesi oluşur, bu ise mekaniksel mutlak referans noktasının belirlenmesini sağlar. Artımlı konum okuyucular basit bir yapıya sahiptir ve buna bağlı olarak pahalı değildir.

Bu çalışmada, PNP açık kollektörlü çıkışları olan OMRON marka E6C2-CWZ5B tipi 360 P/R artımlı konum kodlayıcı kullanılmıştır. Konum kodlayıcı beslemesi DC 12 V ile 24 V arasında olabilmektedir. Bir devirde 360 darbe üretmektedir. Çalışabileceği en yüksek frekans 50 kHz dir. Enkoder A, B ve Z çıkış dalga şekilleri şekil 4.17'de gösterilmiştir. Enkoder A çıkışı TMS320LF2407A EV bordun QEP1'e, B çıkışı QEP2'ye ve Z çıkışı (indeks) ise CAP3'e bağlanmıştır.



Şekil 4.17 Bir atımlı optik konum okuyucunun A, B ve Z çıkışlarının dalga şekilleri.

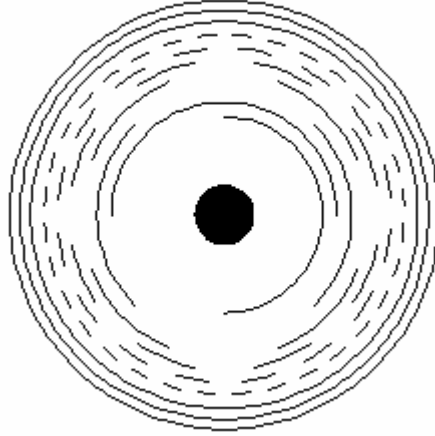
#### 4.9.3.2 Mutlak Konum Kodlayıcılar

Mutlak açısal konum algılayıcı temel yapısı artımlı konum kodlayıcıların aynısıdır. Dönen diskin ince ve uzun yarık düzeni şekil 4.18’de gösterilmiştir. Bit sayısına göre dıştan merkeze doğru ince ve uzun yarıklar aynı merkezli birer çember halinde düzenlenmiştir. Bu durumda dönen diskin en dışındaki çember en düşük biti gösterir.

Mutlak konum kodlayıcı x ekseni ile yapılan mutlak açığı tespit eder. Artımlı konum kodlayıcılardan farklı olarak enerji bağlı değilken bir önceki konumu unutmaz. Böylece her an konumu doğru tespit eder.

Artımlı konum kodlayıcılara göre mutlak konum kodlayıcıların sakıncası küçük ölçülerde üretme ve düşük üretim maliyeti zorluğudur. Bit sayısı arttıkça çıkış sinyal kablosu sayısı artar.

Mutlak konum kodlayıcılar çıkış kodları ikili taban ve onlu taban kodlar halinde sınıflandırılır. İkili tabanda kodlama doğal ikili kodlama ve Gray ikili kodlama olmak üzere ikiye ayrılır. Gray kodlamada herhangi bir durumda kodlamada sadece bir bit değişir.



Şekil 4.18 Mutlak konum kodlayıcıların dönen diski.

#### 4.9.4 Denetleyici Teknolojisi Seçimi

Anahtarlı relüktans motorun denetiminde geçmişten günümüze kadar üç farklı teknoloji kullanılmıştır:

- 1- Analog ve ayrık sayısal tümleşik devreler,
- 2- Mikro denetleyici,
- 3- Sayısal sinyal işlemci.

1970 yıllarının başında Anahtarlı relüktans motorların kontrolünde TTL teknolojisinden yapılmış işlemsel yükseltici, karşılaştırıcı ve 7400 serisinden oluşan mantık devreleri kullanımı tasarımcılar için tek çözüm olmuştur.

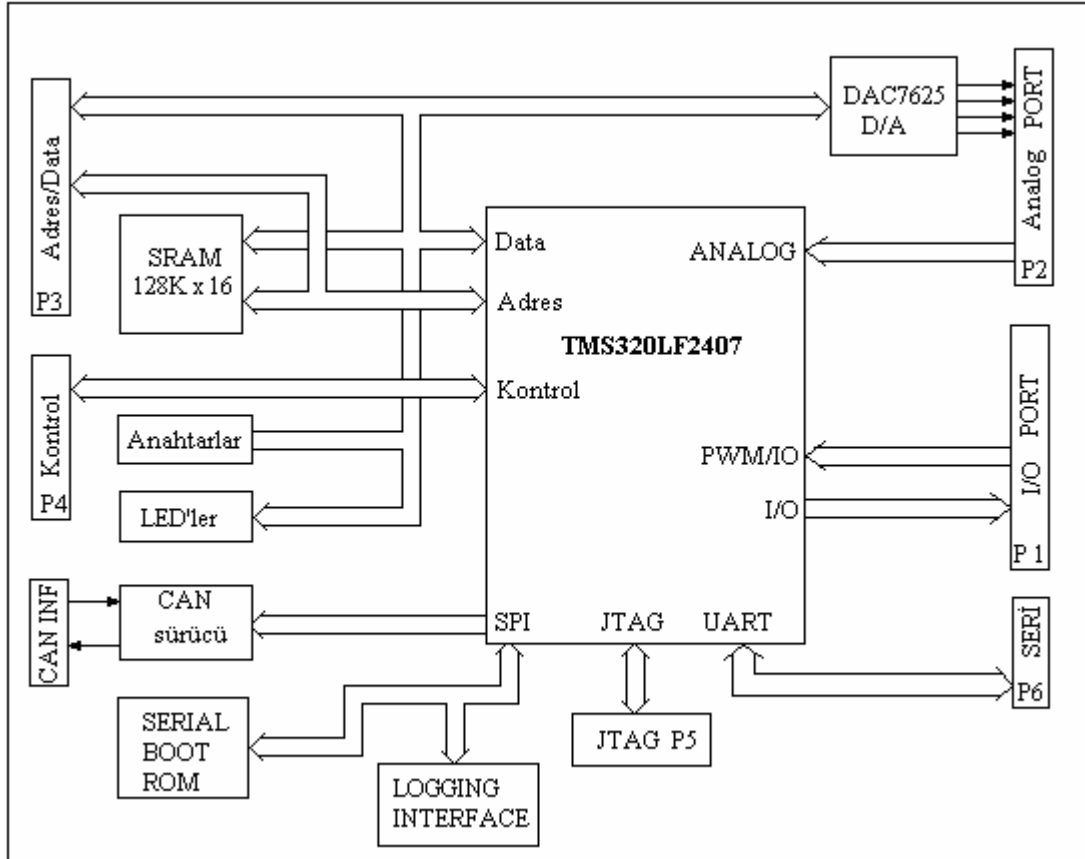
1970'li yılların sonunda ve 1980'li yılların başında piyasaya çıkan 8 bitlik mikroişlemci ve mikro denetleyiciler gerçek zamanda kontrol uygulamalarında yeni bir çağı başlatmıştır ve bunlar anahtarlı relüktans motorların kontrolünde kullanılmıştır [7]. Kontrol stratejilerindeki ilerlemelerden dolayı hızı yeterli olmadığından mikro denetleyicilerin kullanılması azalmaya başlamıştır [3].

En son geliştirilen denetleyici teknolojisi sayısal sinyal işlemciler olmuştur. Sayısal sinyal işlemciler, sayısal işlem kapasitelerinden dolayı tüm motor kontrollerinde kullanılmaya başlanmıştır. Sayısal sinyal işlemciler kontrol işlemi için doğrudan uygulanabilen donanım optimizasyonlarına sahiptir. Bu özelliklerinden bazıları, komut işleme zamanının kısa olması, her saykılada bir komut işlemesi ve bir saykılada bir çarpma işlemini gerçekleştirebilmesi olarak sayılabilir. Benzer özelliklere sahip farklı firmaların ürettikleri sayısal sinyal işlemciler mevcuttur. Bu çalışmada, Texas Instruments firmasının TMS320C2000 serisinin motor kontrolü için geliştirilmiş olan en gelişmiş sayısal sinyal işlemcisi TMS320LF2407A sayısal sinyal işlemcisi seçilmiştir.

#### 4.9.5 TMS320LF2407A EVM Kartı

TMS320LF2407A evaluation module (EVM) temelde TMS320LF2407A sayısal sinyal işlemcisi ve çevre birimleri içeren bir karttır. Bu kartın blok şeması şekil 4.18’de ve kartın üzerindeki elemanların yerleşimi şekil 4.19’da verilmiştir. TMS320LF2407A sayısal sinyal işlemcisinin özellikleri şunlardır:

- 1- Komut periyodu 25 ns, çalışma frekansı 40 MHz ’dir ve 3.3 V gerilimle çalışır.
- 2- TMS320C2xx DSP CPU çekirdeği üzerine kuruludur.
- 3- İşlemci üzerinde 16 bit iki yönlü erişimli 544 bit DARAM ve tek yönlü erişimli 2K SARAM belleği,
- 4- İşlemci üzerinde 16 bit 32K Flash ROM belleği,
- 5- EVA ve EVB olmak üzere iki tane yönetim birimi
- 6- 16 bitli dört adet genel amaçlı timer,
- 7- 12 adet karşılaştırmalı olmak üzere toplam 16 adet PWM çıkışı,
- 8- Programlanabilir ölü bandı (deadband),
- 9- 6 adet capture ve 4 adet QEP ünitesi,



Şekil 4.19 TMS320LF2407A EVM kartının blok şeması.



13- 64K program, 64K data ve 64K I/O için olmak üzere toplam 192K harici belleğe sahiptir.

14- Seri iletişim (SCI), CAN, JTAG ve 16 bit SPI iletişim yapılabilir.

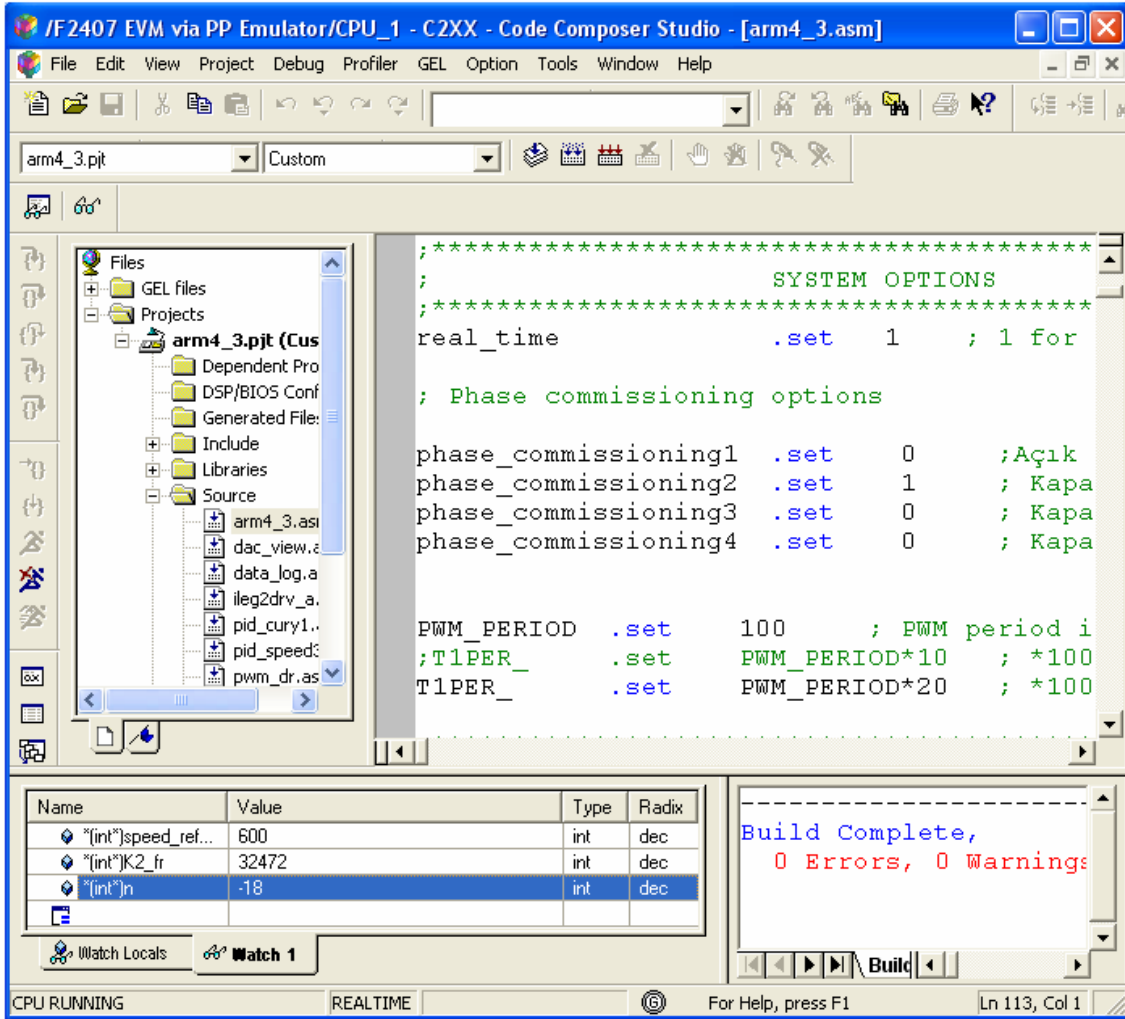
15- Ayrıca 4 kanallı dijitalden analoga dönüştürücü EVM kartı üzerinde vardır.

16- EVM kartı 5 V dc gerilimle beslenmektedir. Kart üzerinde 3.3 Voltluk regüle devresi vardır.

Bilgisayar ile DSP arasında emülatör olarak XDS510PP kullanılmıştır. Şekil 4.21'de XDS510PP emulatrörünün şekli verilmiştir.

#### 4.9.6 Yazılım

TMS320LF2407A sayısal sinyal işlemcisinin programlanmasında Texas Instruments tarafından geliştirilen Code Composer Studio (CCS) yazılımının 2.20 sürümü kullanılmıştır.



Şekil 4.22 Code Composer Studio yazılımı program penceresi.

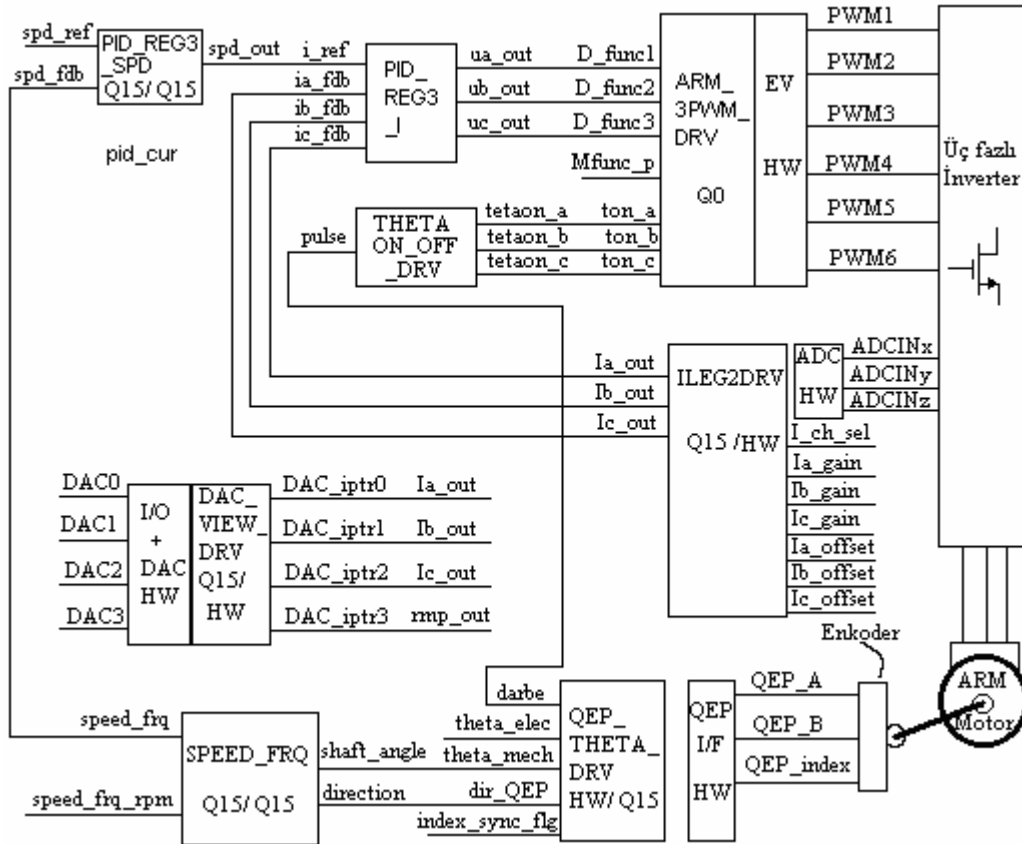
CCS programı Windows altında çalışmakta ve TMS320LF2407A için C programlama veya assembly dilinde program yazma imkanı sunmaktadır. CCS aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- 1- Windows işletim sistemi ile uyumludur.
- 2- Program kodlarını C ve assembly dilinde yazmak mümkündür.
- 3- Bir pencere içinde bellek içeriğini görüntüler.
- 4- CPU registerlerinin içeriğini görüntüleme ve değiştirme imkânı verir.
- 5- Gerçek zamanda çalışırken watch pencerelerinde değişkenlerin içeriğini anlık olarak gösterir.
- 6- Herhangi bir verinin zamana bağlı olarak değişim grafiğini çizer.
- 7- Programın işleyişini adım adım kontrol etme imkânı verir.

CCS yazılımına ait program penceresi şekil 4.22’de gösterilmiştir. Bu program penceresinde incelenen anahtarlı relüktans motorun kontrolü için hazırlanan programın ayrıntıları verilmiştir.

Şekil 4.24’deki program akış şeması bu programda yer alan her bir alt programın işlevini anlatmaktadır.

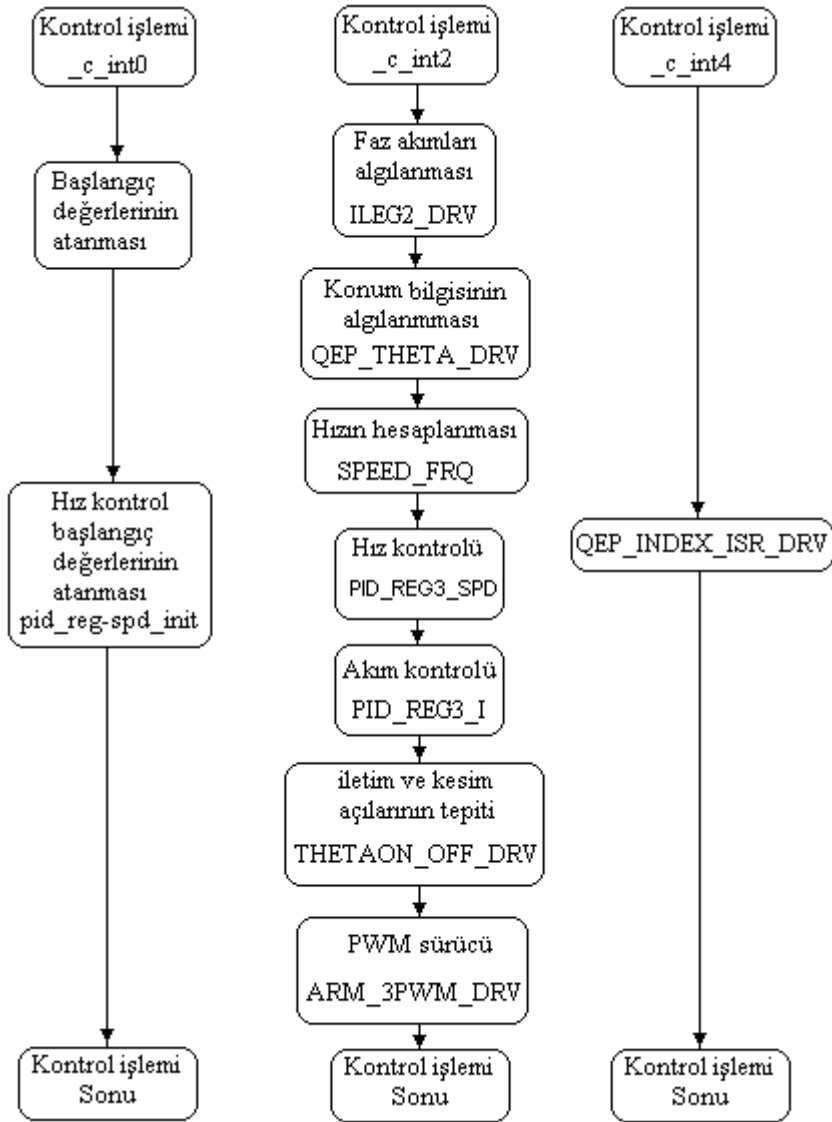
arm3\_7.cmd dosyası linker komut dosyası olup, bellek haritasını tanımlar. Programda kullanılan değişkenler için bu dosya içerisinde bellekte yeri belirlenir. x24x\_app.h dosyası



Şekil 4.23 Anahtarlı relüktans motorun kontrolü için hazırlanan programın bloklar halinde gösterilişi.

sayısal sinyal işlemciyi tanımlayan bir dosyadır. Registerler, portlar gibi tüm birimlerin bellekteki adresleri bu dosya içinde tanımlanmıştır.

qep\_drva.asm dosyası enkoder darbelerinden mekaniksel ve elektriksel konumu hesaplar. ton\_off.asm dosyası ise enkoder darbelerinden rotor konumunu tespit eder ve fazların iletim ve kesim açılarını belirler. speed\_fr.asm alt programı rotor konum bilgisinden rotorun açısal hızını hesaplar. pid\_speed.asm dosyası referans hız ile ölçülen hızı karşılaştırır ve PI hız kontrolü uygular. ileg2drv\_a.asm alt programı A, B ve C faz akımı sensörlerinden  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  faz akımlarını analogdan dijitale dönüştürücü üzerinden algılar, okur. pid\_cur.asm alt programında  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  faz akımları  $I_{ref}$  referans akım ile karşılaştırılır ve faz akımlarının bağımsız akım kontrolünü yapar. TMS320LF2407A sayısal sinyal işlemcinin PWM1, PWM2, PWM3,



Şekil 4.24 DSP'nin yaptığı ARM kontrol işlemleri.

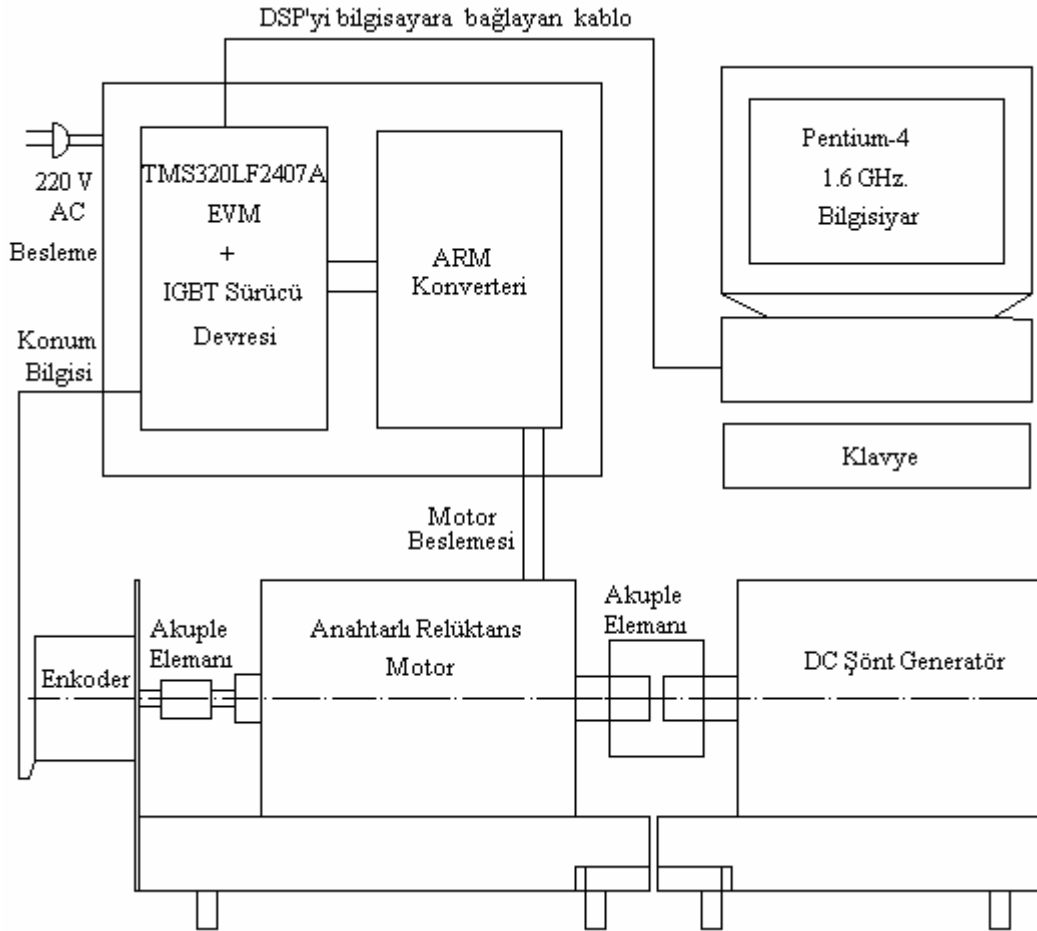
PWM4, PWM5, PWM6 çıkışları ARM kontrolünde kullanıldı. pwm\_dr.asm alt programı rotor konumuna göre PWM çıkışlarından istenen PWM darbelerini üretir.

TMS320LF2407A EVM kartının dört adet dijitalden–analoğa dönüştürücü çıkışı vardır. dac\_view.asm dosyası sayısal sinyal işlemciden istenen büyüklüğün analog çıkışının elde edilmesini sağlar. Şekil 4.22’de D/A çıkışlardan  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  faz akımlarının anlık değişimleri osiloskopta gözlenmiştir.

Şekil 4.24’te akış diyagramında gösterildiği gibi başlangıç değerlerinin atanması bitince DSP’de `_c_int0` kesmesi, periyodik kontrol işlemleri sonunda `_c_int2` kesmesi, konum okuyucudan index işareti oluşunca `_c_int4` kesmesi üretilir.

İncelenen  $N_s/N_r=18/12$  kutuplu anahtarlı relüktans motorun açık çevrim hız kontrol, kapalı çevrim hız ve akım kontrolü sağlayan program CCS programında assembly dilinde hazırlanmıştır.

ARM’nin yüklenmesinde bir DA şönt generatör kullanılmıştır. Motorun yüklenmesine ilişkin deney bağlantı şeması şekil 4.25’de verilmiştir. ARM’nin yükünün büyüklüğü 0.46 Nm yük momenti altında deneysel sonuçlar alınmıştır.



Şekil 4.25 Anahtarlı relüktans motorun deney bağlantı şeması.

## 5. BÖLÜM

### 5. ANAHTARLI RELÜKTANS MOTOR SÜRÜCÜNÜN KONTROLÜNE İLİŞKİN SONUÇLAR

#### 5.1 Giriş

İncelenen  $N_s/N_r=18/12$  kutuplu anahtarlı relüktans motorun benzetim sonuçlarının elde edilmesinde MATLAB/SIMULINK programı kullanılmıştır. ARM'nin benzetiminde kullanılan motor parametreleri Tablo 5.1 verilmiştir. Deneysel ve benzetim sonuçları aşağıda belirtilen üç farklı kontrol için alınmıştır:

- 1- Anahtarlı relüktans motorun açık çevrim hız kontrolü,
- 2- Anahtarlı relüktans motorun kapalı çevrim hız kontrolü,
- 3- Anahtarlı relüktans motorun kapalı çevrim hız ve akım kontrolü.

Yukarıda belirtilen üç kontrol uygulaması yüklü ve yüksüz olmak üzere iki farklı durum için ayrı ayrı yapılmıştır.

Deneysel sonuçlar ve benzetim sonuçlarının alınmasında oransal-integral hız kontrolör ve oransal-integral akım kontrolör kullanılmıştır. Bu çalışmada ARM sürücünün kontrolü yapılırken farklı kontrolörlerin ARM sürücünün davranışı üzerindeki etkilerini incelenmek yerine PI kontrolör kullanarak incelenen ARM sürücünün davranışının belirlenmesi tercih edilmiştir. Yüklü çalışmada yükün eylemsizlik momenti ve sürtünme katsayısı tespit edilerek benzetimde kullanılmıştır. Benzetimde nonlinear indüktans değişimi kullanılmış ve ortak indüktansın etkileri hesaba katılmıştır.

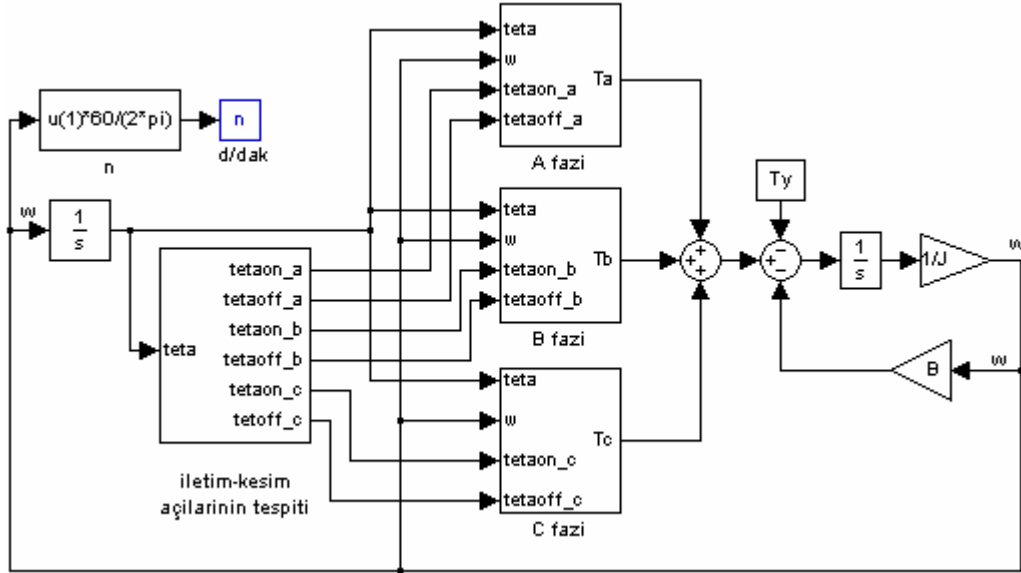
**Tablo 5.1** İncelenen  $N_s/N_r= 18/12$  kutuplu ARM'nin motor parametreleri.

Stator kutup yayı uzunluğu ( $\beta_s$ )	6.39 <sup>0</sup> derece
Rotor kutup yayı uzunluğu ( $\beta_r$ )	7.83 <sup>0</sup> derece
Bir faz direnci ( R )	2.6 $\Omega$
Çakışık konum indüktansı ( $L_{max}$ )	7.296 mH
Çakışık olmayan konum indüktansı ( $L_{min}$ )	2.363 mH
Eylemsizlik momenti ( J )	0.000695 Kg $m^2$
Sürtünme katsayısı ( B )	0.00018 Nm/rad/s
Besleme gerilimi ( V )	34 V
Yük momenti ( $T_v$ )	0.46 Nm

## 5.2 ARM Sürücünün Yüksüz Açık Çevrim ve Kapalı Çevrim Hız Kontrol Sonuçları

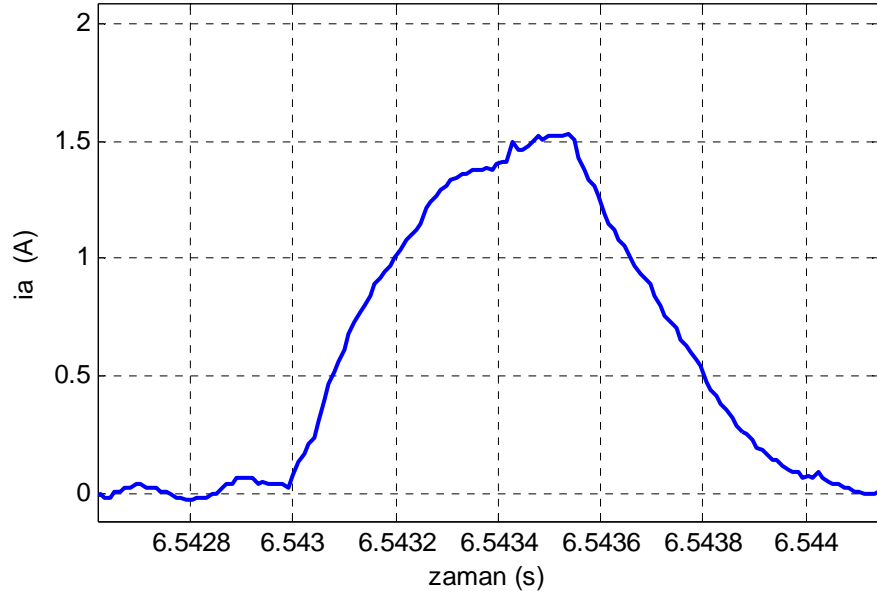
### 5.2.1 Yüksüz Durum için ARM Sürücünün Açık Çevrim Hız Kontrol Sonuçları

İncelenen  $N_s/N_r=18/12$  kutuplu ARM'nin yüksüz açık çevrim benzetim sonuçlarının çıkarılmasında şekil 5.1'de gösterilen benzetim şeması kullanılmıştır. Yüksüz açık çevrim hız kontrol ait deneysel sonuçlar ve benzetim sonuçları 34 V besleme geriliminde alınmıştır. Yüksüz açık çevrim hız kontrol yapıldığında  $n=3065$  d/dak hızda deneysel ölçülen A, B ve C faz akımlarının grafikleri sırayla şekil 5.2, şekil 5.4, şekil 5.6 ve benzetim sonuçları ise şekil 5.3, şekil 5.5, şekil 5.7'de verilmiştir. Benzetim şemasında yer alan  $T_y$  yük momenti yüksüz çalışmada  $T_y=0$  Nm alınmıştır.

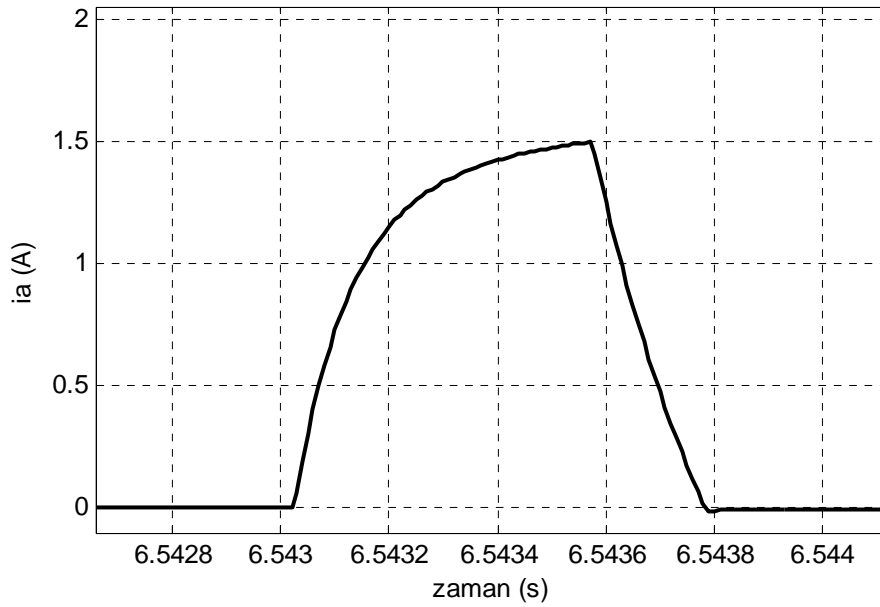


Şekil 5.1 Açık çevrim hız kontrol benzetim şeması.

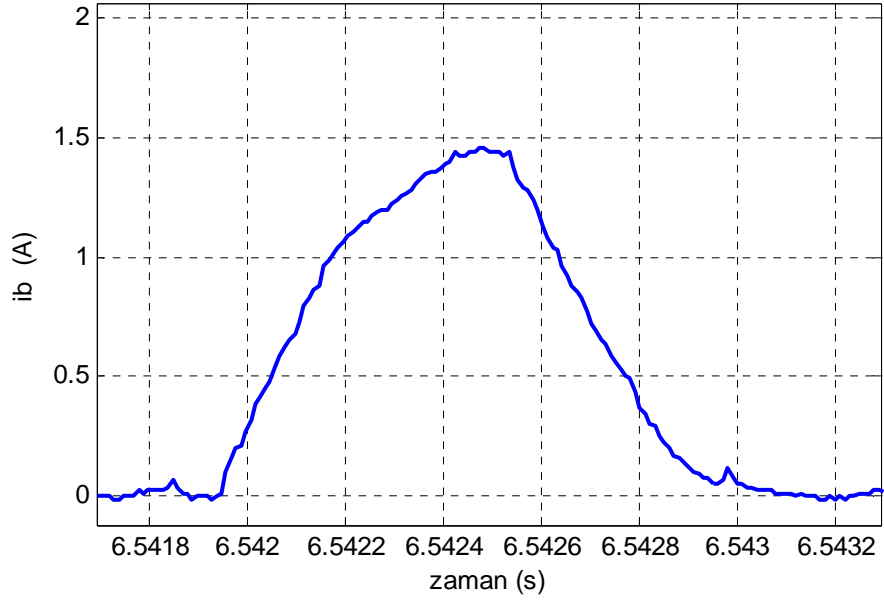
Açık çevrim hız kontrolünde motor yüksek hızlarda döndüğü için faz akımlarının iletim süreleri kısadır. Faz sargılarına iletim süresinde besleme gerilimi tamamen uygulandığı için akım hızlı yükselir, buna karşılık kesim açısından itibaren ters yönde uygulanan negatif motor besleme gerilimiyle negatif moment bölgesine erişmeden akımın sıfıra düşmesi sağlanır. Düşük hızlarda faz akımları, referans akım değerine erişince kontrol birimi tarafından akım sabit tutulur. Ancak yüksek hızlarda bu durum söz konusu değildir. Faz akımları iletim süresi içinde daima yükselen bir grafik çizer. Bu durum deneysel ölçülen ve benzetim sonucu elde edilen akım grafiklerden açıkça görülmektedir.



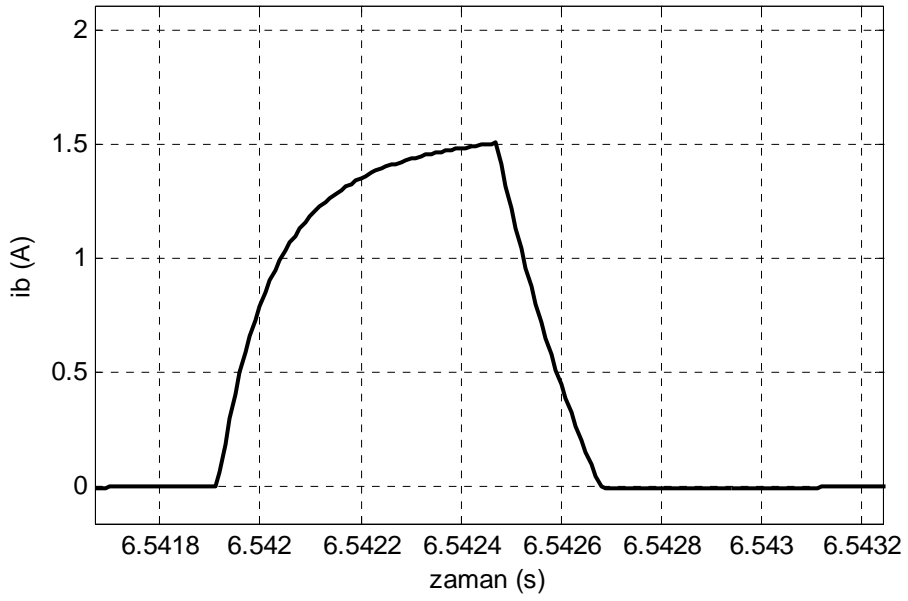
Şekil 5.2 ARM sürücünün yüksüz  $n=3065$  d/dak hızda deneysel ölçülen A fazı akımının değişim grafiği.



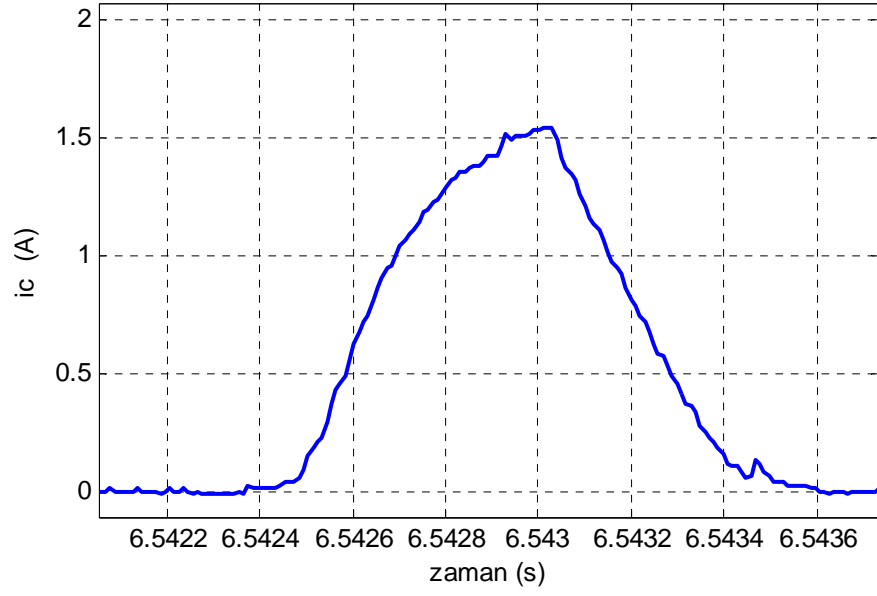
Şekil 5.3 ARM sürücünün yüksüz  $n=3065$  d/dak hızda benzetim sonucunda elde edilen A fazı akımının değişim grafiği.



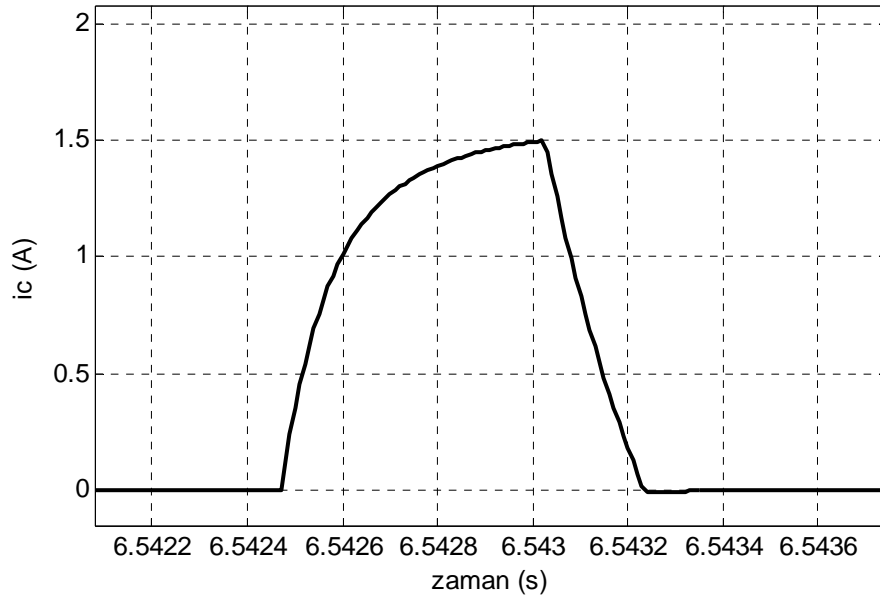
Şekil 5.4 ARM sürücünün yüksüz  $n=3065$  d/dak hızda deneysel ölçülen B fazı akımının değişim grafiği.



Şekil 5.5 ARM sürücünün yüksüz  $n=3065$  d/dak hızda benzetim sonucunda elde edilen B fazı akımının değişim grafiği.

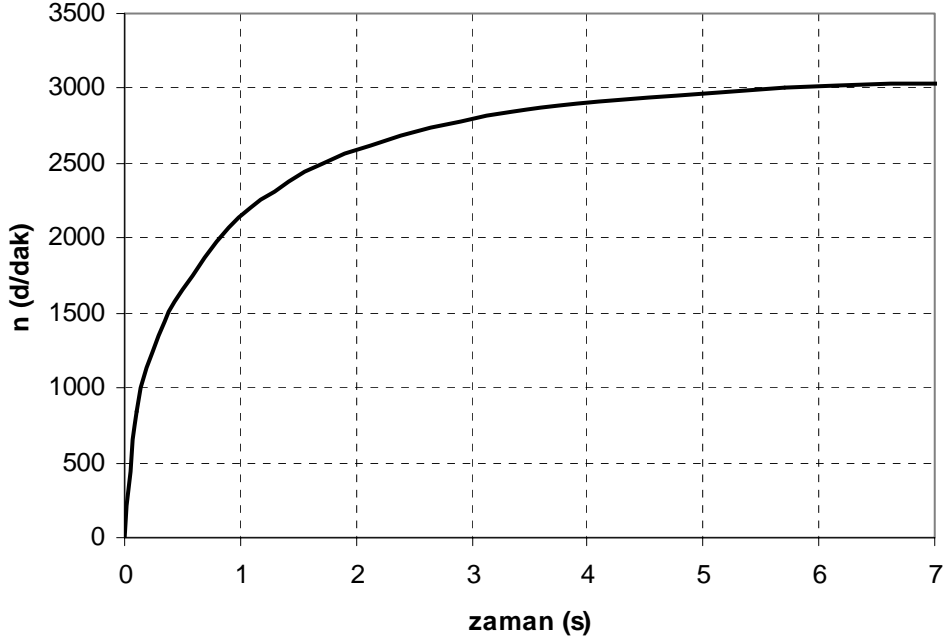


Şekil 5.6 ARM'nin yüksüz  $n=3065$  d/dak hızda deneysel ölçülen C fazı akımının değişim grafiği.

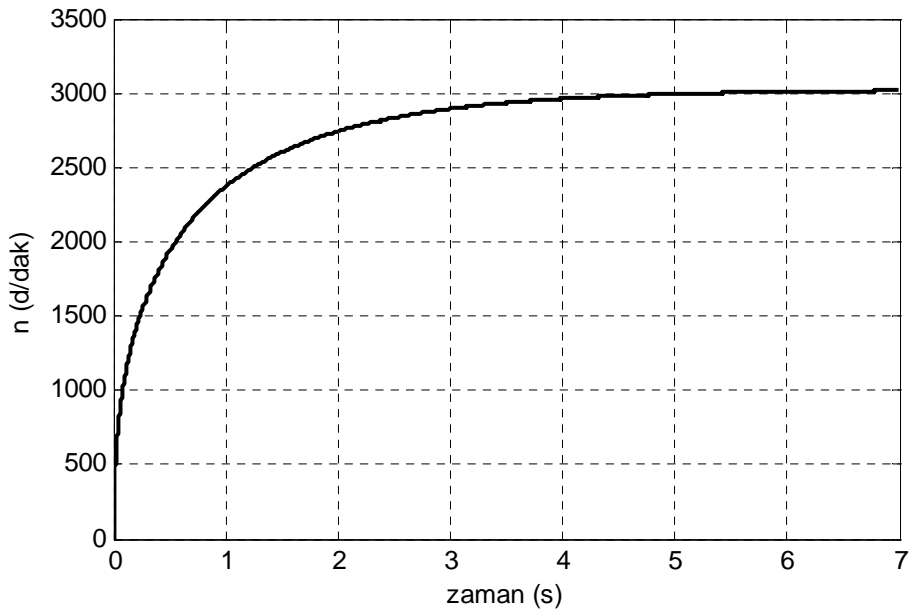


Şekil 5.7 ARM'nin yüksüz  $n=3065$  d/dak hızda benzetim sonucunda elde edilen C fazı akımının değişim grafiği.

ARM sürücünün yüksüz açık çevrim hız kontrolü yapıldığında motorun hızlanmasına ilişkin deneysel ölçülen hız grafiği şekil 5.8 ve benzetim sonucu elde edilen hız grafiği şekil 5.9'da gösterilmiştir.

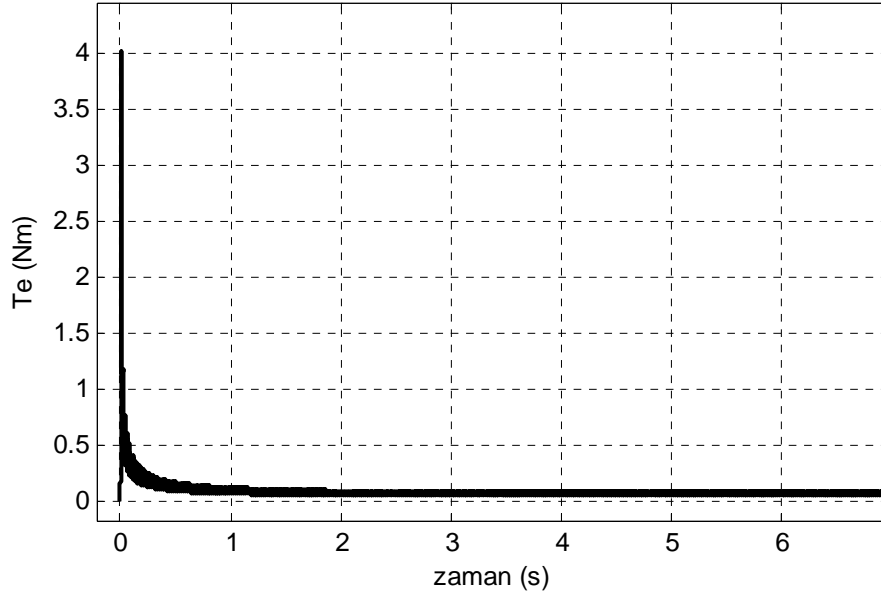


Şekil 5.8 ARM sürücünün yüksüz durumda deneysel ölçülen hız grafiği.

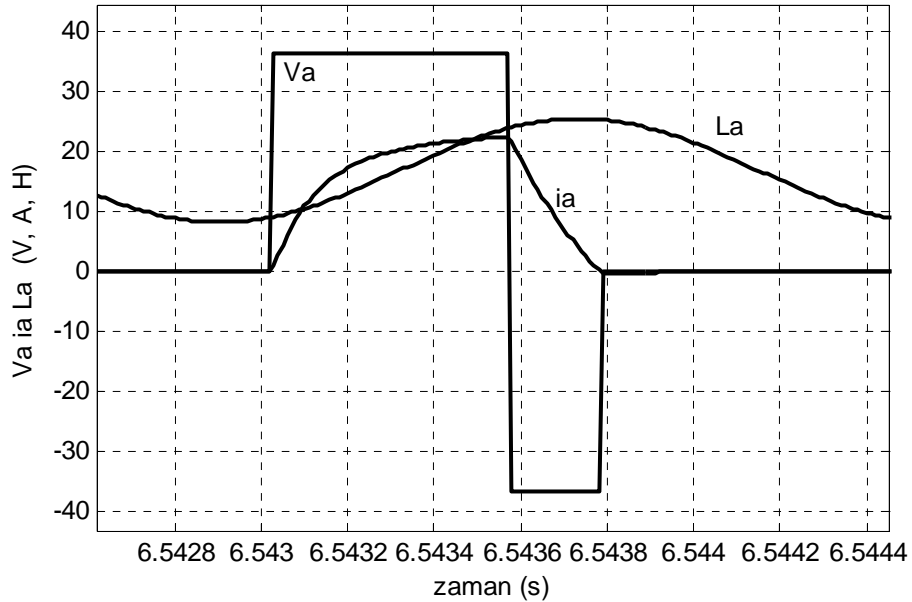


Şekil 5.9 ARM sürücünün yüksüz durumda benzetim sonucunda elde edilen hız grafiği.

ARM sürücünün yüksüz açık çevrim hız kontrolüne ait moment değişim grafiği şekil 5.10'da verilmiştir. Ayrıca A fazının gerilim, akım ve indüktansının zamana bağlı değişim grafikleri şekil 5.11'de birlikte gösterilmiştir.

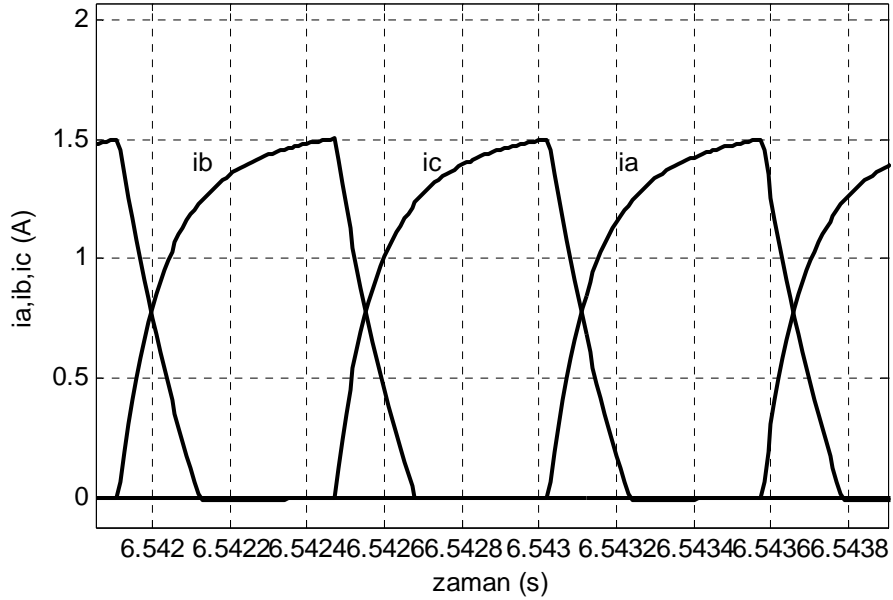


Şekil 5.10 ARM'nin  $V=34$  V besleme geriliminde yüksüz durumda açık çevrim hız kontrolünde motor tarafından üretilen toplam momentin  $T_e$  değişim grafiği.

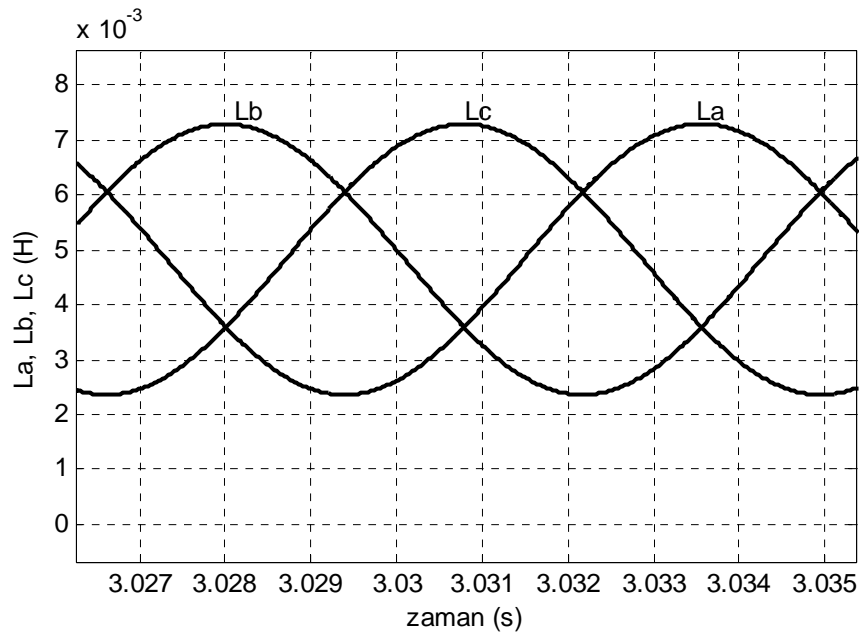


Şekil 5.11 ARM sürücünün yüksüz durumda açık çevrim hız kontrol benzetim sonucunda elde edilen  $V_a$ , faz gerilimi  $i_a$ , faz akımı  $L_a$ , faz indüktansının değişim grafiği. Burada akım  $k_1=15$  ve indüktans  $k_2=3500$  katsayıları ile çarpılmıştır.

ARM sürücünün yüksüz açık çevrim hız kontrol benzetim sonucu elde edilen A, B ve C faz akımlarının zamana bağlı değişim grafikleri şekil 5.12’de gösterilmiştir. Şekil 5.13’te deneysel ölçülen ve benzetim kullanılan üç fazın indüktanslarının zamana bağlı değişim grafikleri gösterilmiştir.

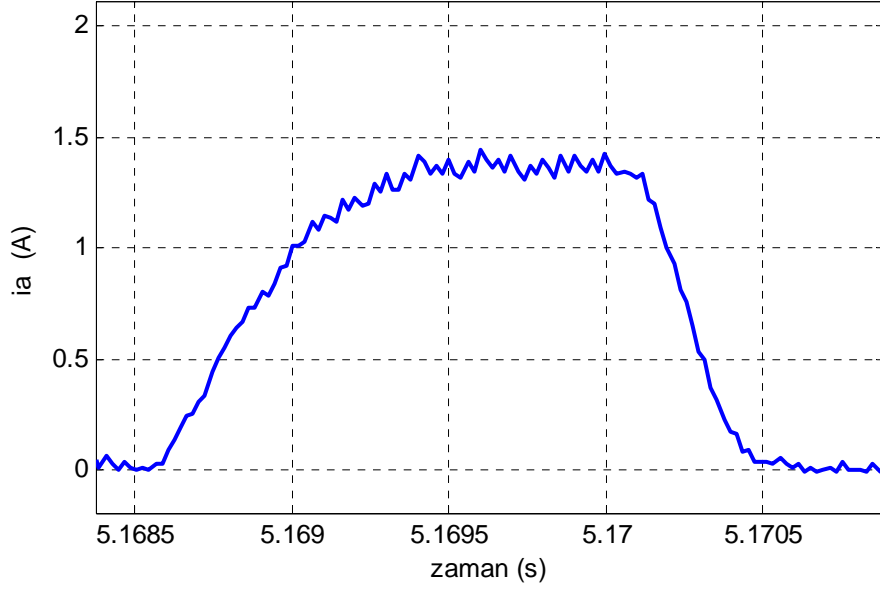


Şekil 5.12 ARM sürücünün  $n=3065$  d/dak hızda yüksüz durumda açık çevrim hız kontrol benzetim sonucunda elde edilen  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  faz akımlarının değişim grafiği.

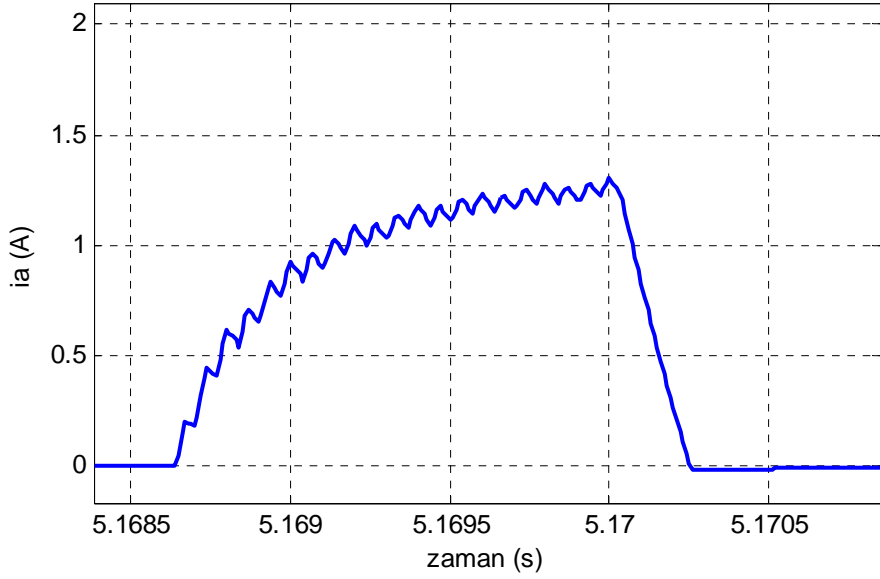


Şekil 5.13 Deneysel elde edilen ARM sürücünün kosinüs şeklinde değişen  $L_a$ ,  $L_b$ ,  $L_c$  faz indüktanslarının değişim grafiği.

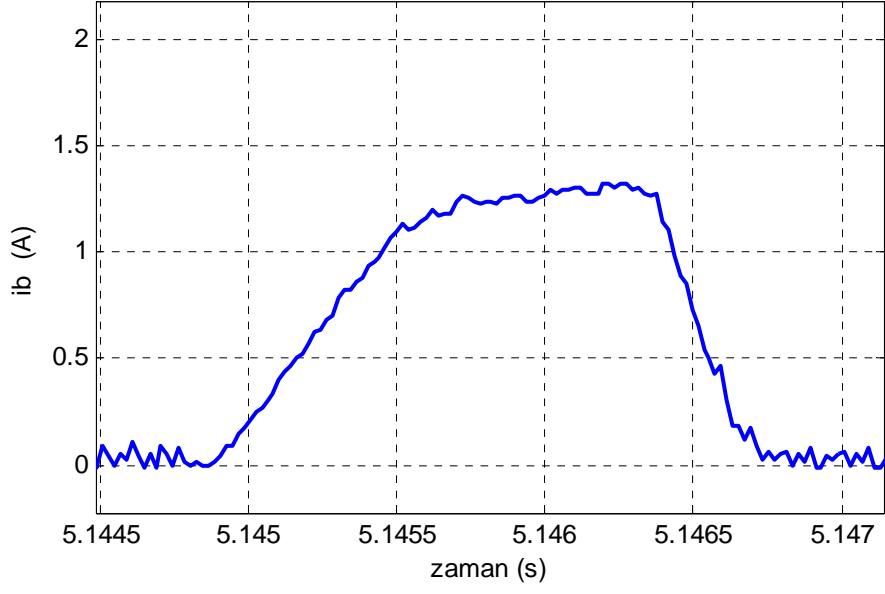




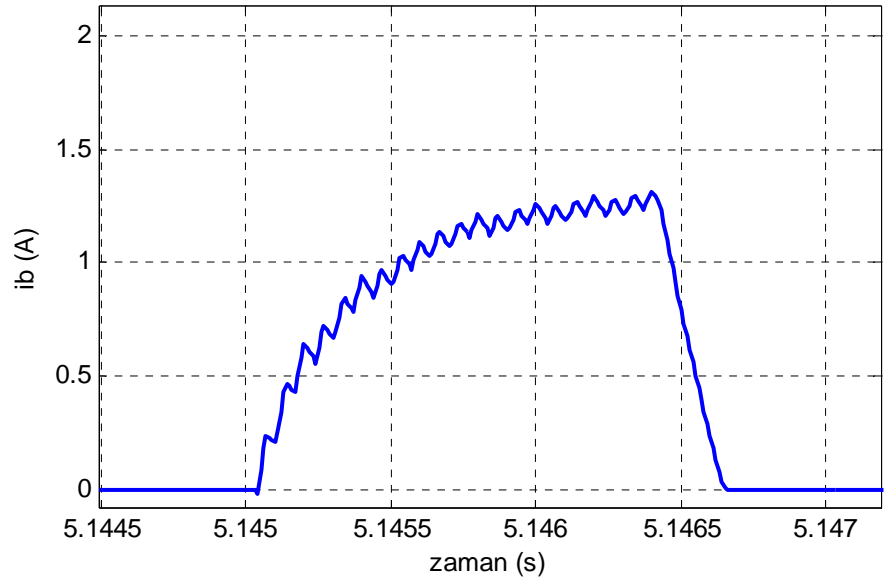
**Şekil 5.15** ARM sürücünün  $n = 1200$  d/dak referans hız  $V=34$  V besleme geriliminde yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde ölçülen  $i_a$ , faz akımının değişim grafiği.



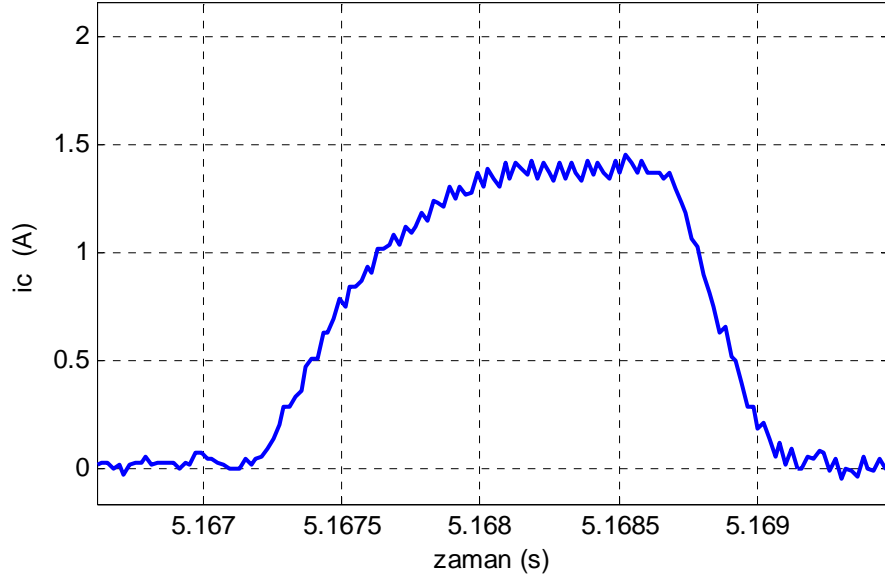
**Şekil 5.16** ARM sürücünün  $n = 1200$  d/dak hızda  $V=34$  V besleme geriliminde yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen  $i_a$ , faz akımının değişim grafiği.



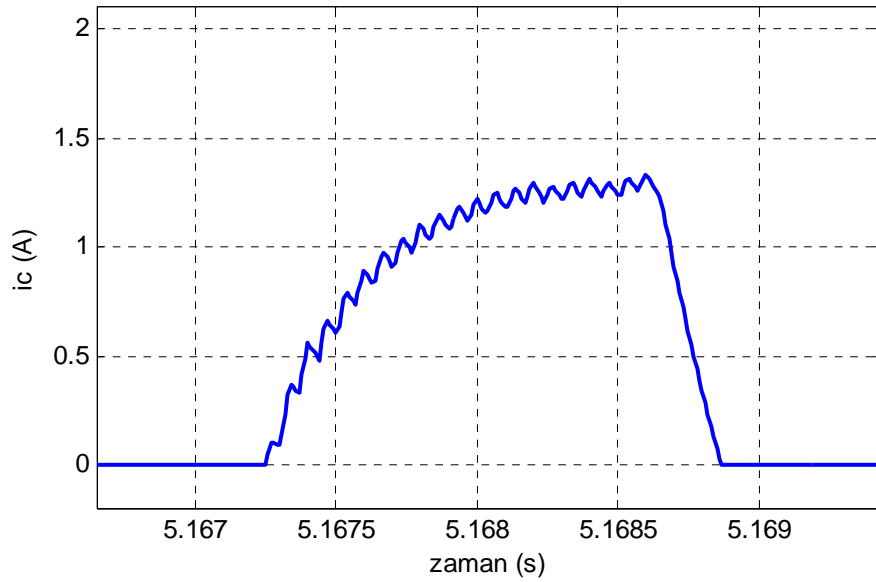
**Şekil 5.17** ARM sürücünün  $n = 1200$  d/dak referans hız  $V=34$  V besleme geriliminde yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde ölçülen  $i_b$ , faz akımının değişim grafiği.



**Şekil 5.18** ARM sürücünün  $n = 1200$  d/dak hızda  $V=34$  V besleme geriliminde yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen  $i_b$ , faz akımının değişim grafiği.

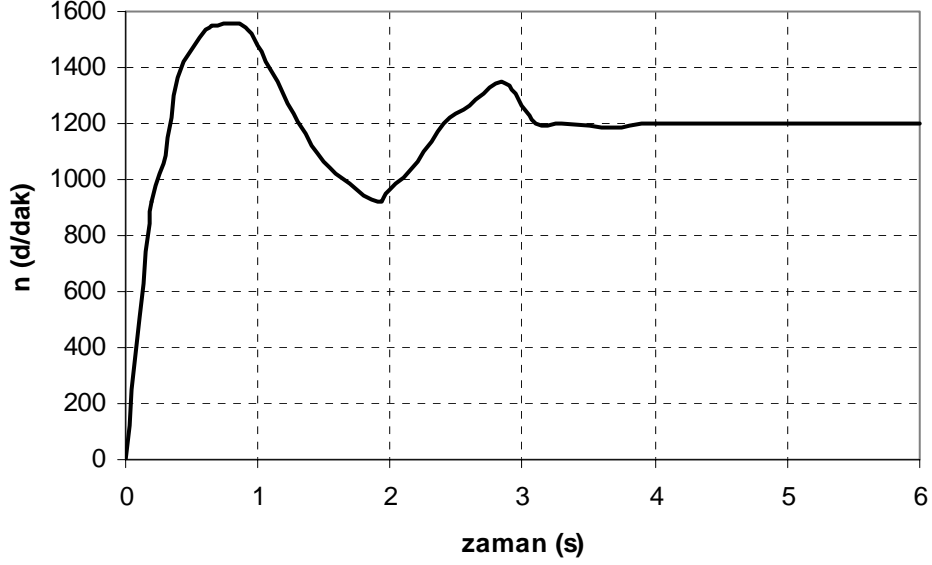


**Şekil 5.19** ARM sürücünün  $n = 1200$  d/dak referans hız  $V=34$  V besleme geriliminde yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde ölçülen  $i_c$ , faz akımının değişim grafiği.

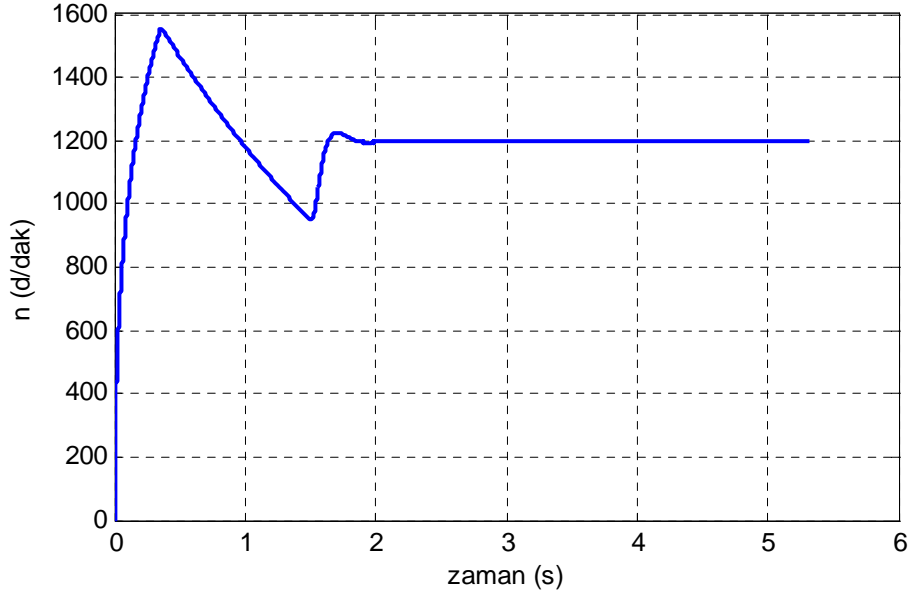


**Şekil 5.20** ARM sürücünün  $n = 1200$  d/dak hızda  $V=34$  V besleme geriliminde yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen  $i_c$ , faz akımının değişim grafiği.

ARM sürücünün yüksüz kapalı çevrim hız kontrolü yapıldığında motorun hızlanmasına ilişkin deneysel ölçülen hız grafiği şekil 5.21 ve benzetim sonucu elde edilen hız grafiği şekil 5.22’de gösterilmiştir.

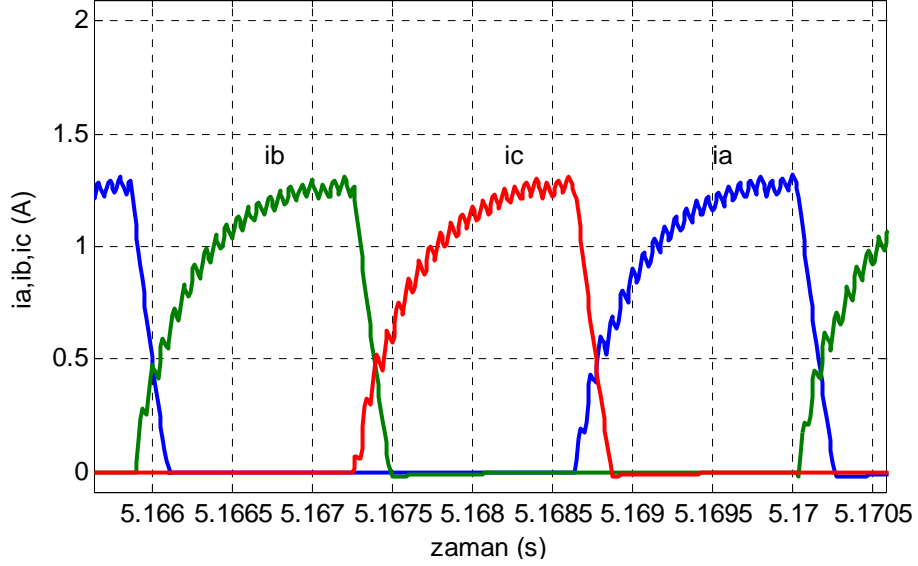


Şekil 5.21 ARM sürücünün  $n=1200$  d/dak referans hız  $V=34$  V besleme geriliminde yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde ölçülen hızın değişim grafiği.

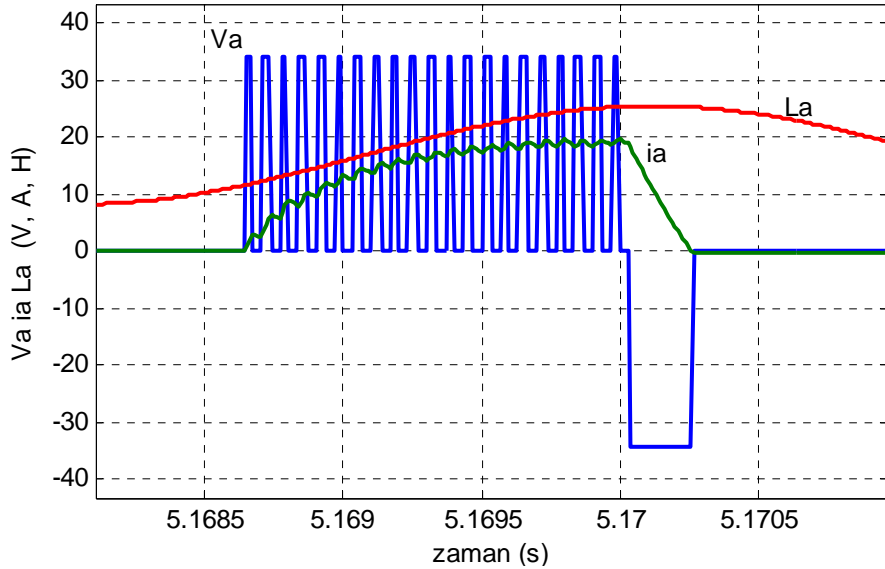


Şekil 5.22 ARM sürücünün  $n=1200$  d/dak referans hız  $V=34$  V besleme geriliminde yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde benzetim elde edilen hızın değişim grafiği.

ARM sürücünün yüksüz kapalı çevrim hız kontrolüne ait A,B,C faz akımlarının değişim grafiği şekil 5.23'te verilmiştir. Ayrıca A fazının gerilim, akım ve indüktansının zamana bağlı değişim grafikleri şekil 5.24'te birlikte gösterilmiştir.

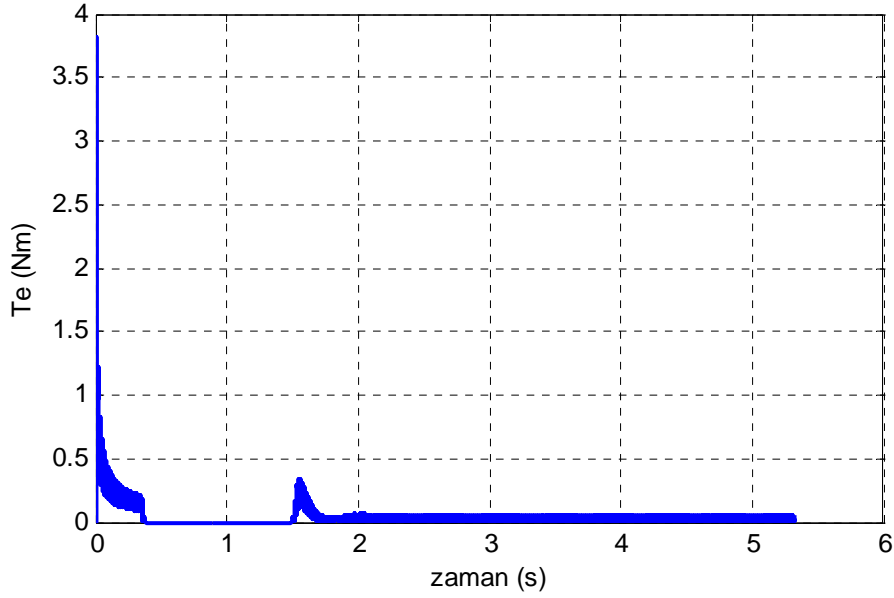


**Şekil 5.23** ARM sürücünün  $n=1200$  d/dak hızda  $V=34$  V besleme geriliminde yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde simülasyon sonucunda elde edilen  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  faz akımlarının değişim grafiği.

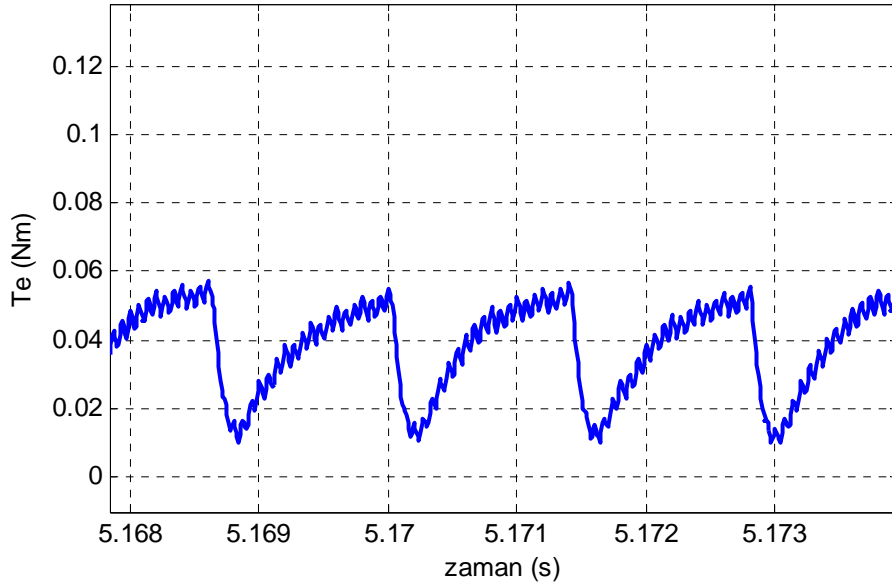


**Şekil 5.24** ARM sürücünün  $n=1200$  d/dak hızda  $V=34$  V besleme geriliminde yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde simülasyon sonucunda elde edilen  $V_a$ , faz gerilimi  $i_a$ , faz akımı  $L_a$ , faz indüktansının değişim grafiği. Burada akım  $k_1=15$  ve indüktans  $k_2=3500$  katsayıları ile çarpılmıştır.

ARM sürücünün yüksüz kapalı çevrim hız kontrolüne ait benzetim sonucunda elde edilen moment değişim grafiği şekil 5.25’de gösterilmiştir. Şekil 5.25’deki moment grafiği 5.168 saniye ile 5.173 saniye zaman aralığında büyütülmüş olarak şekil 5.26’da verilmiştir.



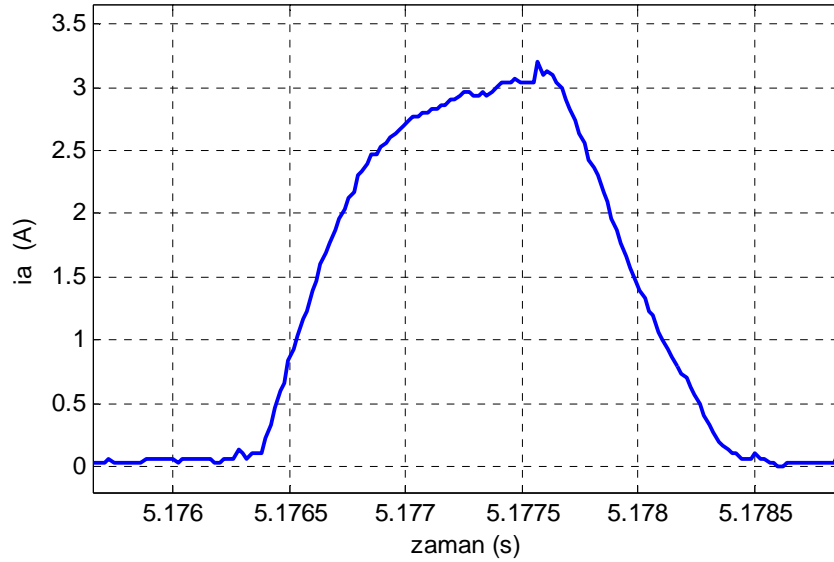
Şekil 5.25 ARM sürücünün  $n=1200$  d/dak hızda  $V=34$  V besleme geriliminde yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde motor tarafından üretilen toplam momentin  $T_e$  değişim grafiği.



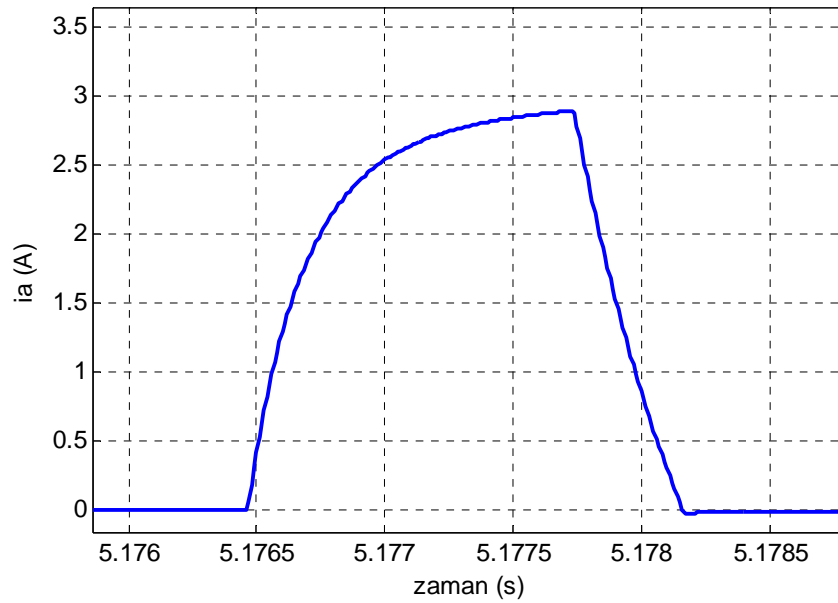
Şekil 5.26 ARM sürücünün  $n=1200$  d/dak hızda  $V=34$  V besleme geriliminde yüksüz durumda kapalı çevrim hız kontrolünde motor tarafından üretilen toplam momentin  $T_e$  değişim grafiği.

### 5.2.3 Generatörün ARM Sürücüye Bağlı Bulunduğu Yüksüz Durum için Açık Çevrim Hız Kontrol Sonuçları

DA şönt generatörün yüksüz ARM sürücüye bağlı bulunduğu açık çevrim hız kontrol sonuçları  $n=1375$  d/dak hızda alınmıştır. Deneysel ölçülen A fazı akımı şekil 5.27 ve benzetim sonucunda elde edilen A fazı akımı şekil 5.28’de gösterilmiştir.

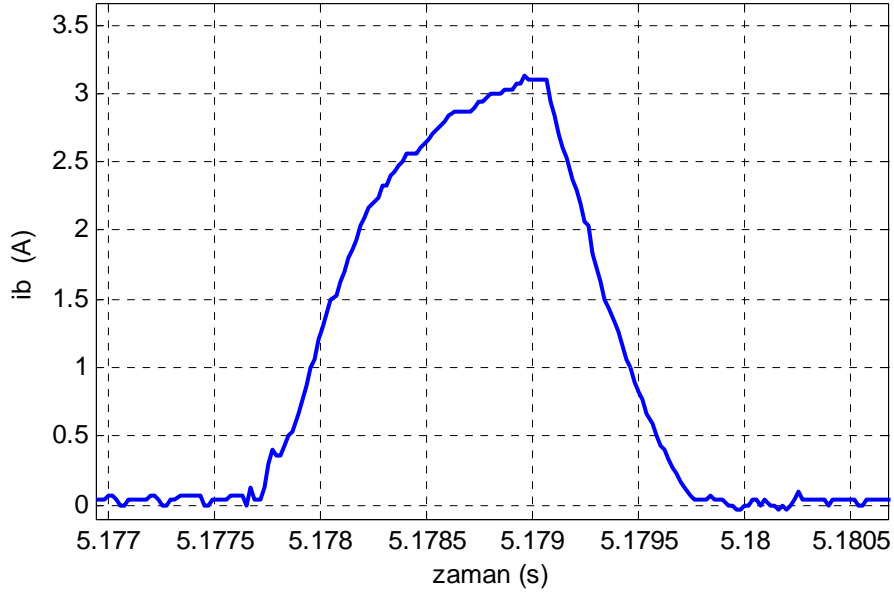


Şekil 5.27 ARM sürücünün  $n=1375$  d/dak hızda generatörün yüksüz bağlı olduğu durumda ölçülen  $i_a$ , faz akımının değişim grafiği.

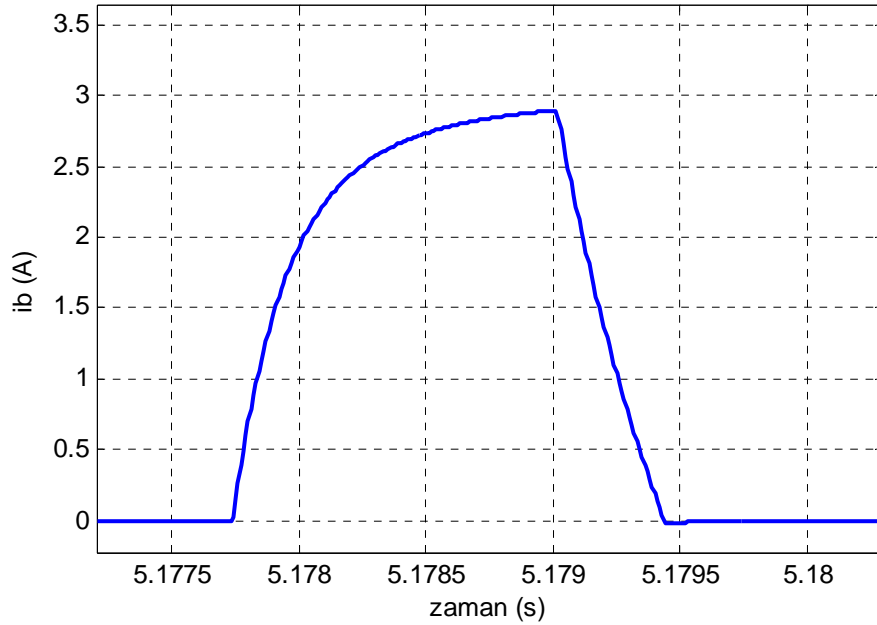


Şekil 5.28 ARM sürücünün  $n=1375$  d/dak hızda generatörün yüksüz bağlı iken benzetim sonucunda elde edilen  $i_a$ , faz akımının değişim grafiği.

Generatörün yüksüz ARM sürücüyeye bağlı bulunduğu açık çevrim hız kontrol sonucu  $n=1375$  d/dak hızda deneysel ölçülen B fazı akımı şekil 5.29 ve benzetim sonucunda elde edilen B fazı akımı şekil 5.30'da gösterilmiştir.

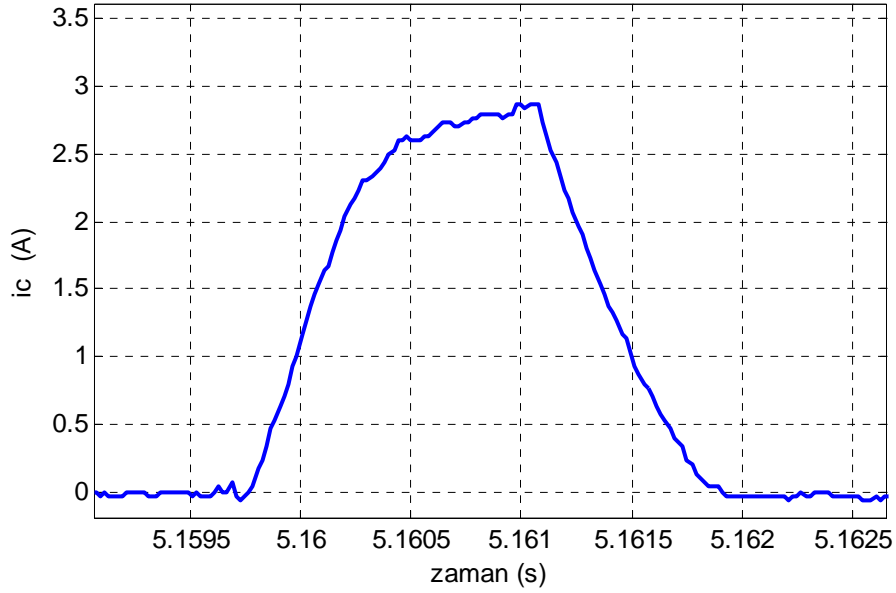


**Şekil 5.29** ARM sürücünün generatöre yüksüz bağlı olduğu durumda açık çevrim hız kontrolü sonucu  $n=1375$  d/dak hızda deneysel ölçülen  $i_b$ , faz akımının değişim grafiği.

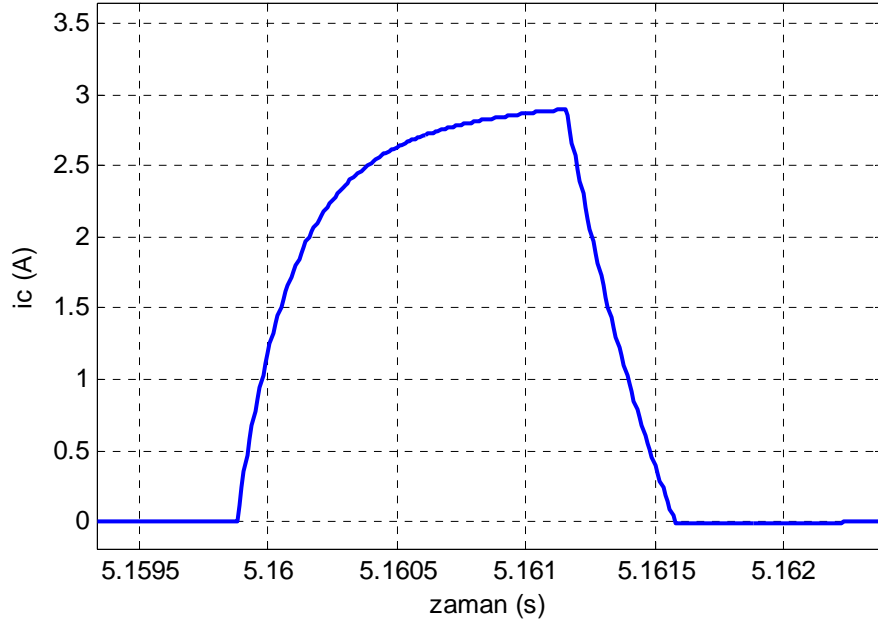


**Şekil 5.30** ARM sürücünün generatöre yüksüz bağlı olduğu durumda açık çevrim hız kontrolü sonucu  $n=1375$  d/dak hızda benzetim sonucunda elde edilen  $i_b$ , faz akımının değişim grafiği.

Generatörün yüksüz ARM sürücüyeye bağlı bulunduğu açık çevrim hız kontrol sonucu  $n=1375$  d/dak hızda deneysel ölçülen C fazı akımı şekil 5.31 ve benzetim sonucunda elde edilen C fazı akımı şekil 5.32’de gösterilmiştir.

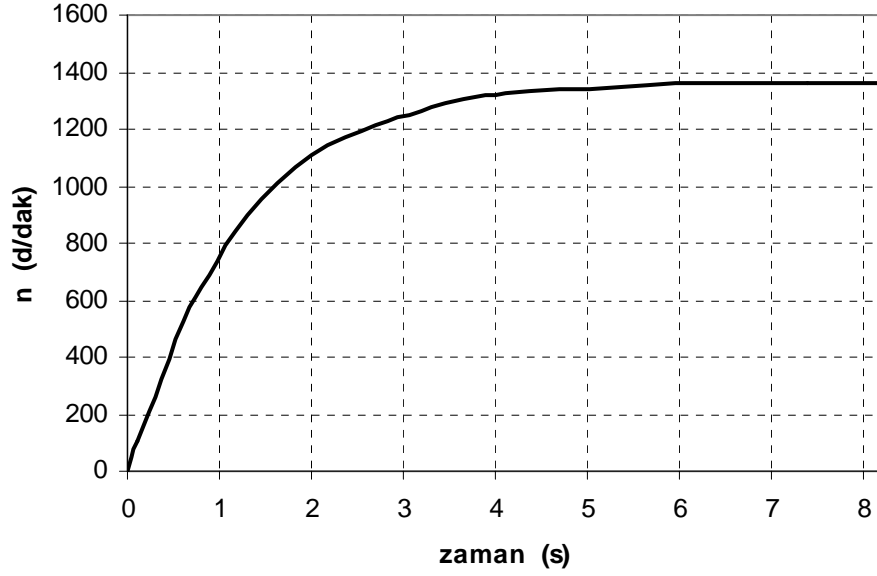


**Şekil 5.31** ARM sürücünün generatöre yüksüz bağlı olduğu durumda açık çevrim hız kontrolü sonucu  $n=1375$  d/dak hızda deneysel ölçülen  $i_c$  faz akımının değişim grafiği.

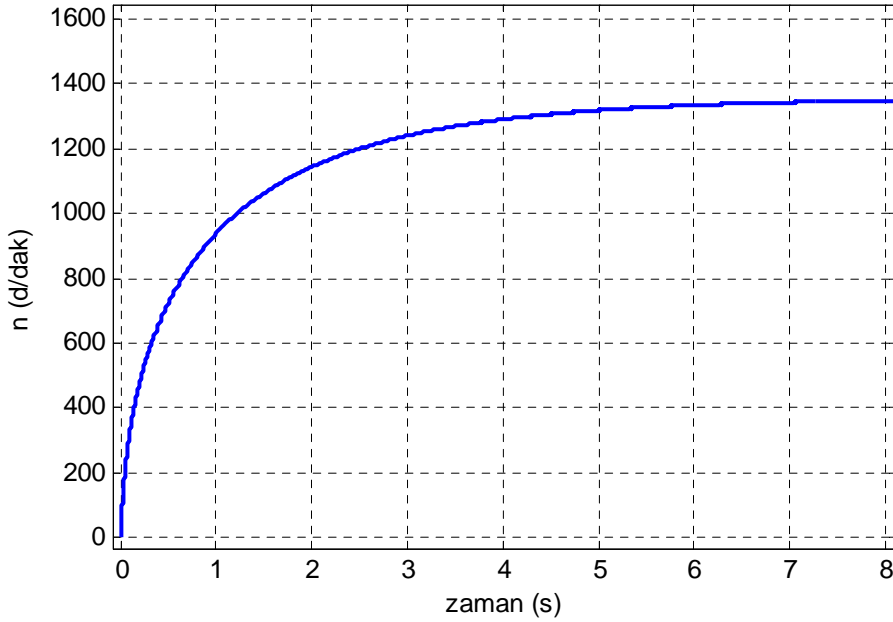


**Şekil 5.32** ARM sürücünün generatöre yüksüz bağlı olduğu durumda açık çevrim hız kontrolü sonucu  $n=1375$  d/dak hızda benzetim sonucunda elde edilen  $i_c$  faz akımının değişim grafiği.

Generatörün yüksüz ARM sürücüye bağlı bulunduğu açık çevrim hız kontrol durumunda deneysel ölçülen hız grafiği şekil 5.33 ve benzetim sonucunda elde edilen hız grafiği şekil 5.34'te gösterilmiştir.



Şekil 5.33 ARM sürücünün  $V=34$  V besleme geriliminde generatörün yüksüz bağlı olduğu durum için deneysel elde edilen açık çevrim hız grafiği.

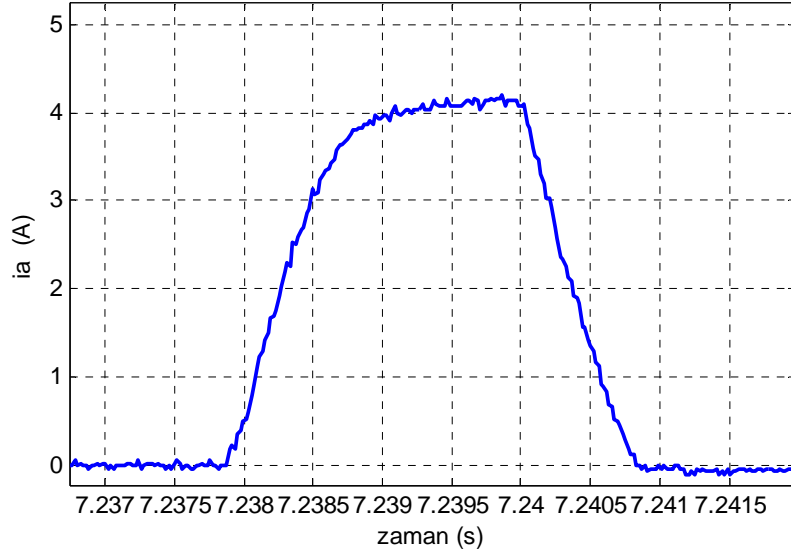


Şekil 5.34 ARM sürücünün  $V=34$  V besleme geriliminde generatörün yüksüz bağlı olduğu durum için benzetim sonucunda elde edilen açık çevrim hız grafiği.

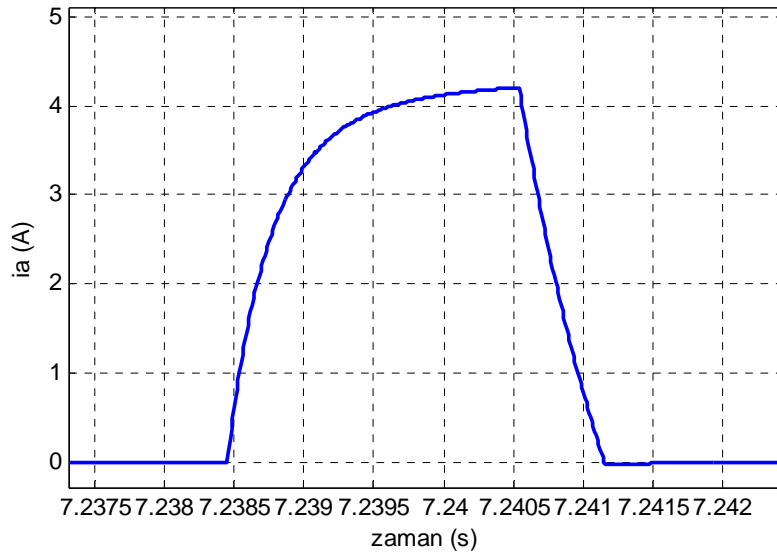
### 5.3 ARM Sürücünün Yüklü Açık Çevrim ve Kapalı Çevrim Hız Kontrol Sonuçları

#### 5.3.1 ARM Sürücünün Yüklü Durum Açık Çevrim Hız Kontrol Sonuçları

ARM sürücüye bağlı DA şönt generatörün  $T_y=0.35$  Nm yüküyle yüklendiği açık çevrim hız kontrol sonuçları  $n=797$  d/dak hızda alınmıştır. Deneysel ölçülen A fazı akımı şekil 5.34 ve benzetim sonucunda elde edilen A fazı akımı şekil 5.35’de gösterilmiştir.

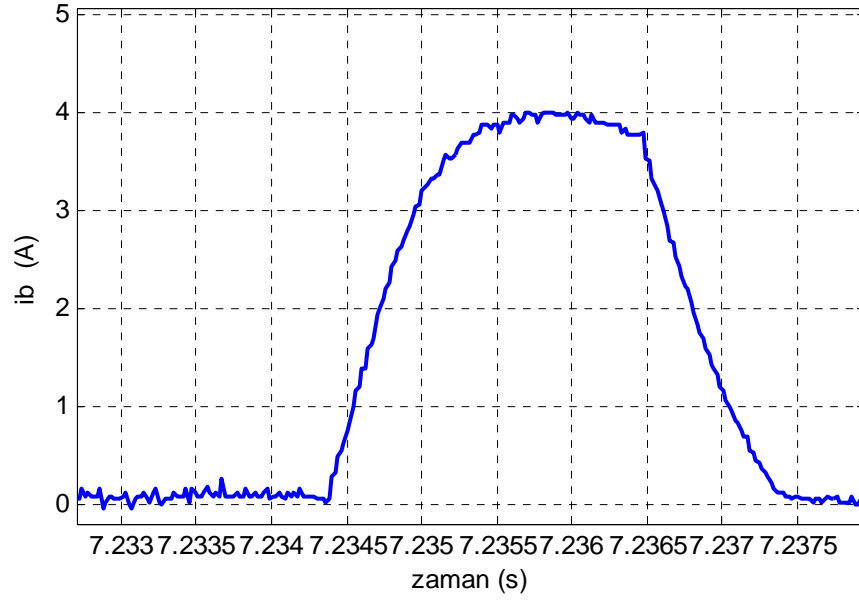


**Şekil 5.35** ARM sürücünün  $n=797$  d/dak hızda  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda açık çevrim hız kontrolünde ölçülen  $i_a$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.35$  Nm).

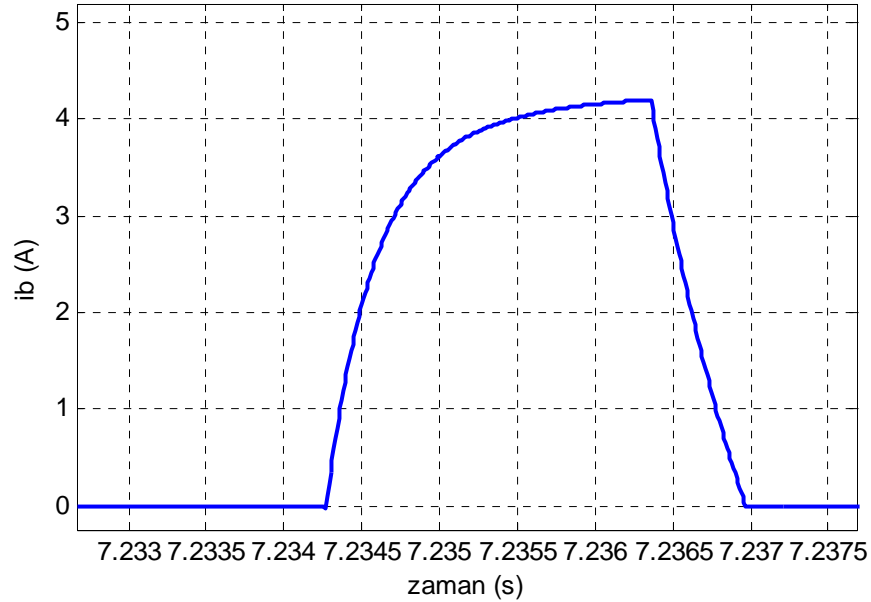


**Şekil 5.36** ARM sürücünün  $n=797$  d/dak hızda  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda açık çevrim hız kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen  $i_a$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.35$  Nm).

DA şönt generatörün yüklü ARM sürücüye bağlı bulunduğu açık çevrim hız kontrol sonucu  $n=797$  d/dak hızda deneysel ölçülen B fazı akımı şekil 5.36 ve benzetim sonucunda elde edilen B fazı akımı şekil 5.37’de gösterilmiştir.

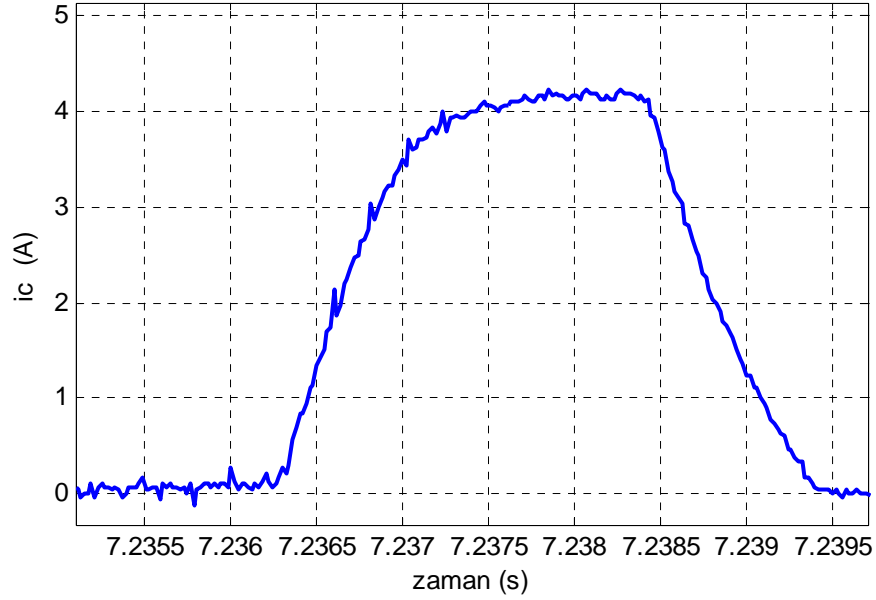


**Şekil 5.37** ARM sürücünün  $n=797$  d/dak hızda  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda açık çevrim hız kontrolünde deneysel ölçülen  $i_b$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.35$  Nm).

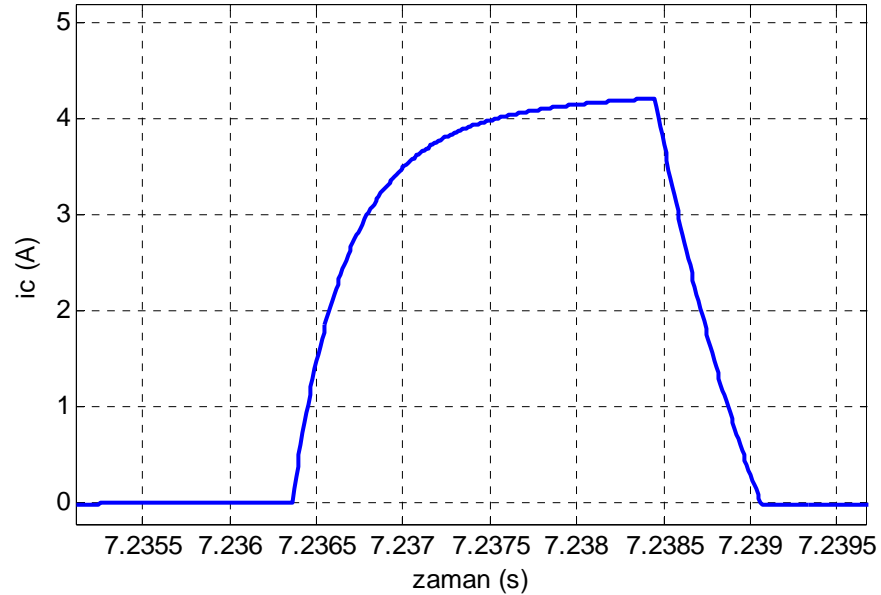


**Şekil 5.38** ARM'nin  $n=797$  d/dak hızda  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda açık çevrim hız kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen  $i_b$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.35$  Nm).

Generatörün yüklü ARM sürücüyeye bağı bulunduğı açık çevrim hız kontrol sonucu  $n=797$  d/dak hızda deneysel ölçülen C fazı akımı şekil 5.36 ve benzetim sonucunda elde edilen C fazı akımı şekil 5.37’de gösterilmiştir.

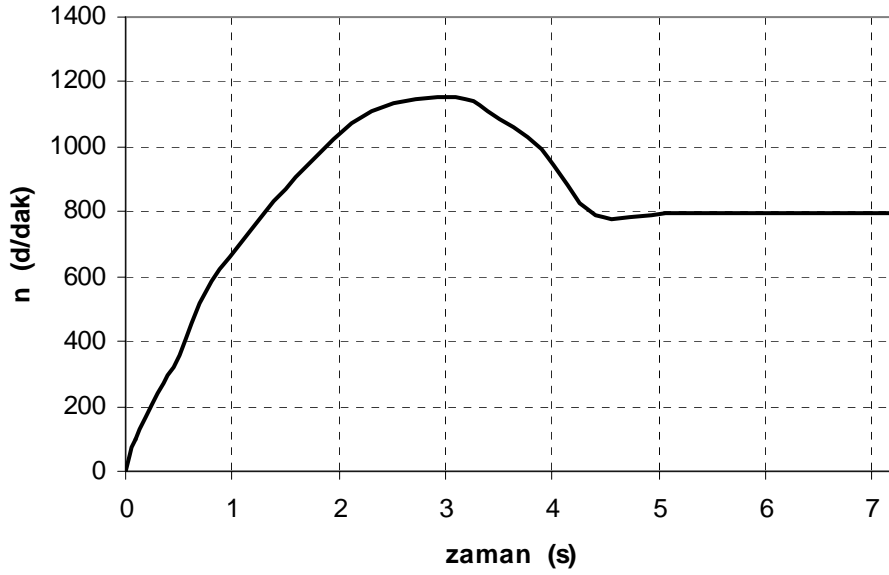


**Şekil 5.39** ARM sürücünün  $n=797$  d/dak hızda  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda açık çevrim hız kontrolünde ölçülen  $i_c$  faz akımının değışim grafiğı ( $T_y=0.35$  Nm).

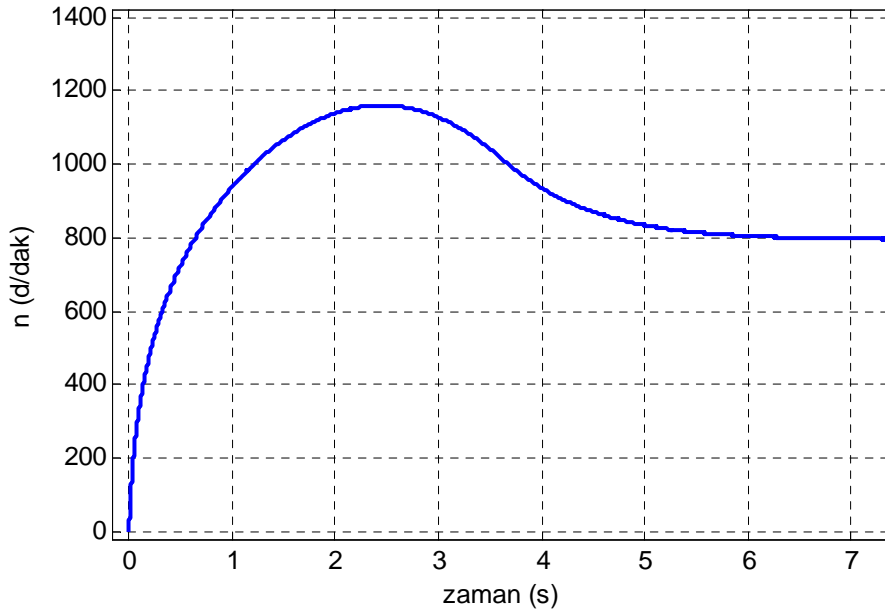


**Şekil 5.40** ARM sürücünün  $n=797$  d/dak hızda  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda açık çevrim hız kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen  $i_c$  faz akımının değışim grafiğı ( $T_y=0.35$  Nm).

ARM sürücünün  $T_y=0.35$  Nm yükü yüklediğinde açık çevrim hız kontrol sonucu deneysel ölçülen hız grafiği şekil 5.41 ve benzetim sonucunda elde edilen hız grafiği şekil 5.42’te gösterilmiştir.

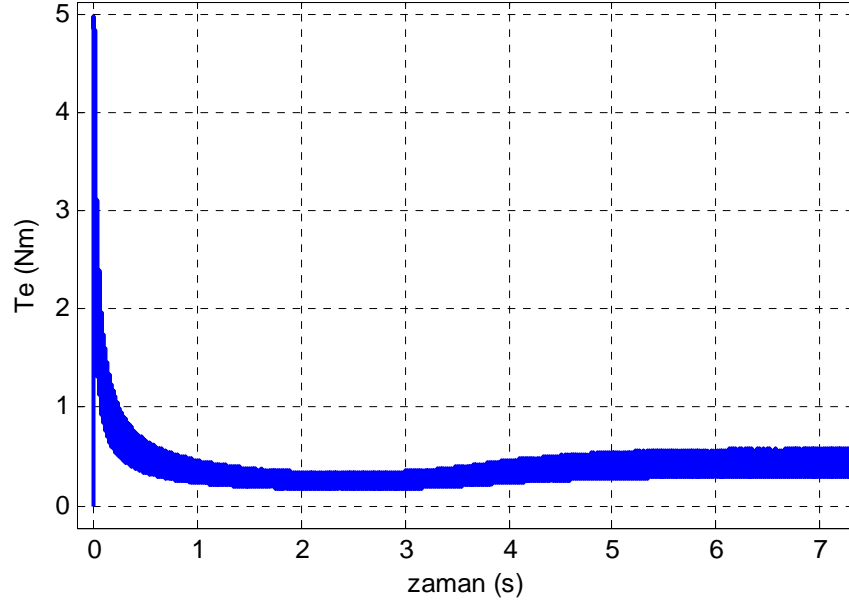


Şekil 5.41 ARM sürücünün  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda açık çevrim hız kontrolünde deneysel elde edilen hız grafiği ( $T_y=0.35$  Nm).

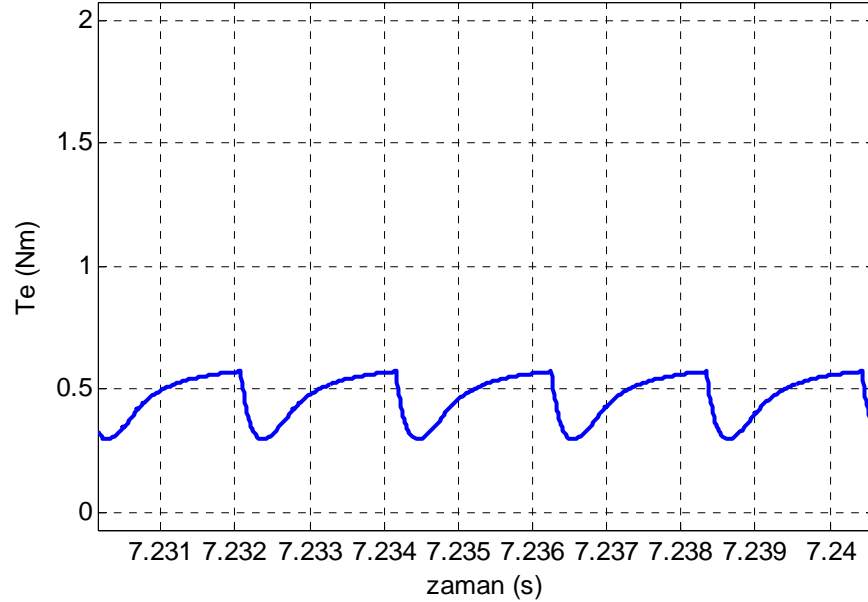


Şekil 5.42 ARM sürücünün  $V=34$  V besleme geriliminde yüksüz durumda açık çevrim hız kontrolünde benzetim ile elde edilen hız grafiği ( $T_y=0.35$  Nm).

ARM sürücünün yüklü açık çevrim hız kontrolüne ait benzetim sonucunda elde edilen moment değişim grafiği şekil 5.43'te gösterilmiştir. Şekil 5.43'teki moment grafiği 7.231 saniye ile 7.24 saniye zaman aralığında büyütülmüş olarak şekil 5.44'te verilmiştir.

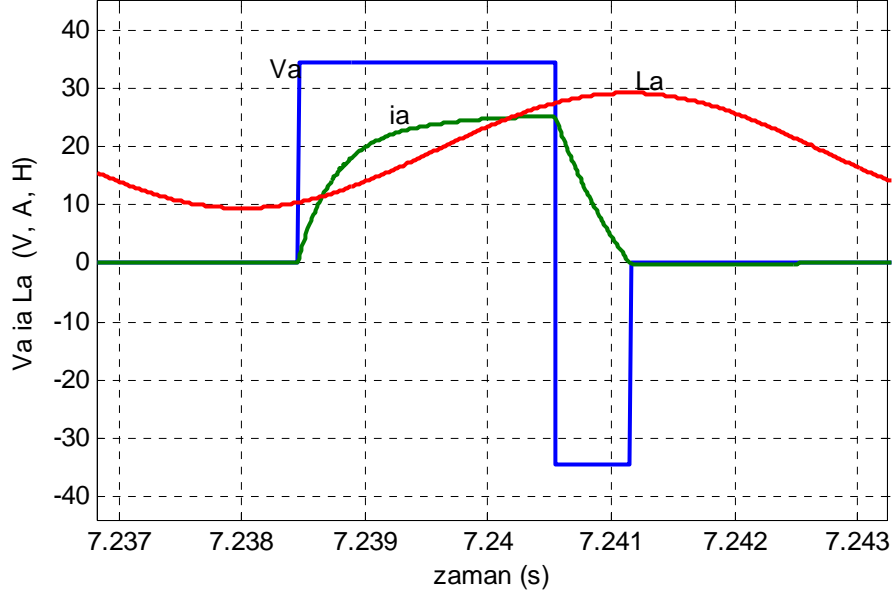


**Şekil 5.43** ARM sürücünün  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda açık çevrim hız kontrolünde motor tarafından üretilen toplam momentin  $T_e$  değişim grafiği ( $T_y=0.35$  Nm).

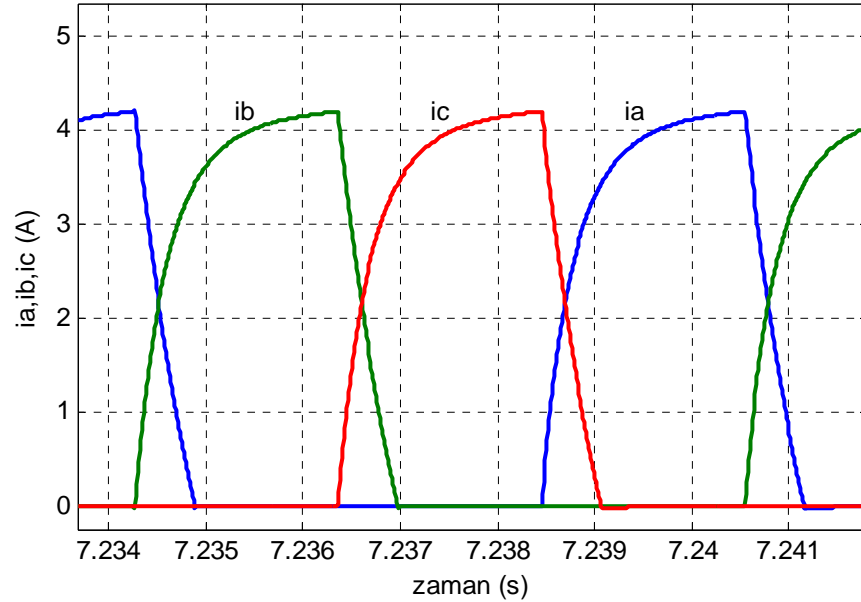


**Şekil 5.44** ARM sürücünün  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda açık çevrim hız kontrolünde motor tarafından üretilen toplam momentin  $T_e$  değişim grafiği ( $T_y=0.35$  Nm).

ARM sürücünün yüklü açık çevrim hız kontrolüne ait A fazının gerilim, akım ve indüktansının zamana bağlı değişim grafikleri şekil 5.45’de birlikte gösterilmiştir. Ayrıca A, B, C faz akımlarının değişim grafiği şekil 5.46’da verilmiştir.



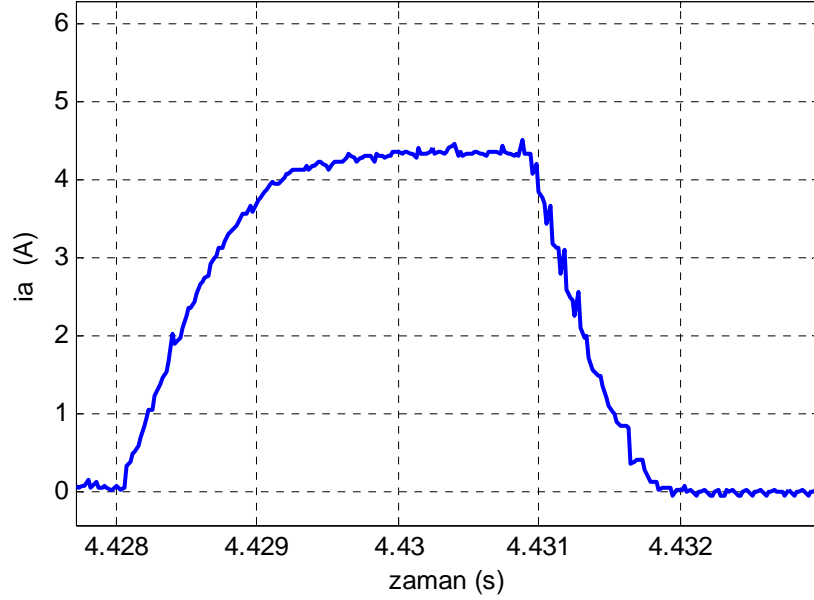
**Şekil 5.45** ARM sürücünün  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda açık çevrim hız kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen  $V_a$  faz gerilimi,  $i_a$  faz akımı ve  $L_a$  faz indüktansının değişim grafiği. Burada akım  $k_1=6$  ve indüktans  $k_2=4000$  katsayıları ile çarpılmıştır ( $T_y=0.35$  Nm).



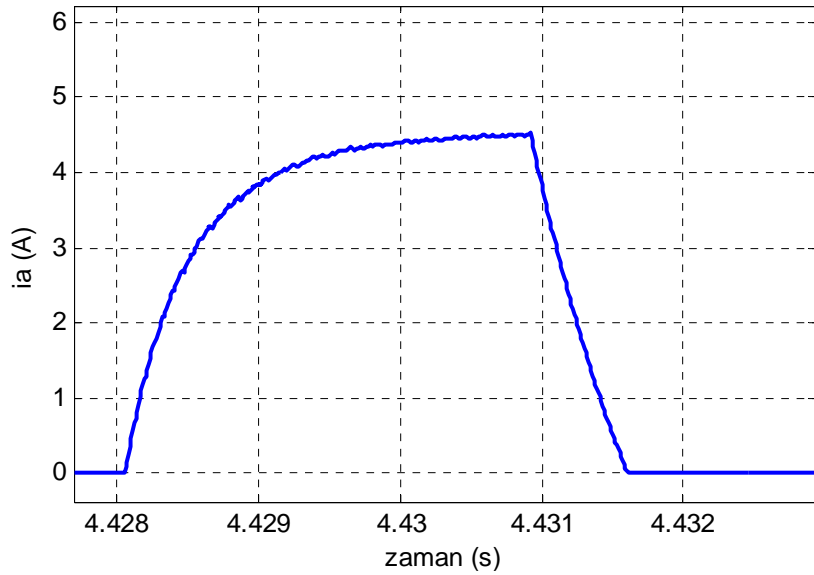
**Şekil 5.46** ARM sürücünün  $n=797$  d/dak hızda  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda açık çevrim hız kontrol benzetim sonucunda elde edilen  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  faz akımlarının değişim grafiği ( $T_y=0.35$  Nm).

### 5.3.2 ARM Sürücünün Yüklü Durumu için Kapalı Çevrim Hız Kontrol Sonuçları

ARM sürücüyeye bağlı generatörün  $T_y=0.46$  Nm yükle yüklendiği kapalı çevrim hız kontrol sonuçları  $n=600$  d/dak referans hızda alınmıştır. Deneysel ölçülen A fazı akımı şekil 5.47 ve benzetim sonucunda elde edilen A fazı akımı şekil 5.48'de gösterilmiştir.

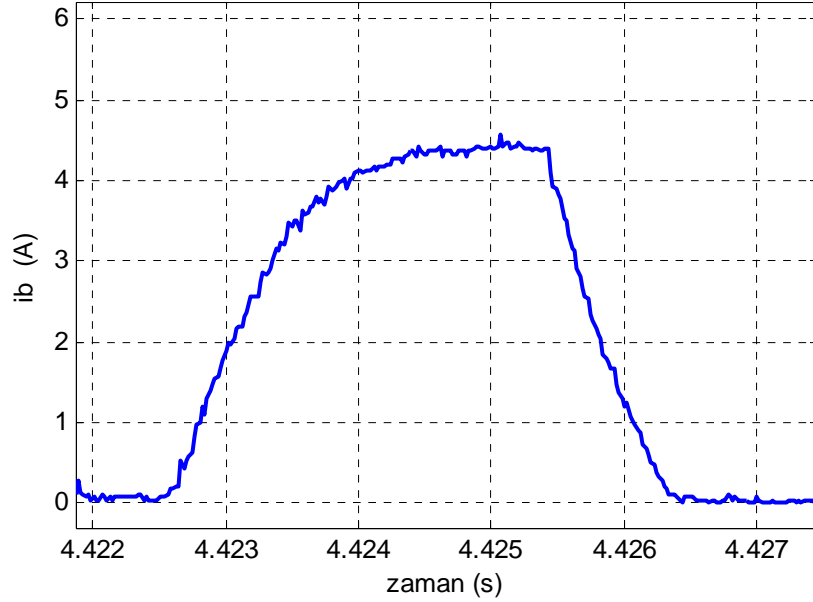


Şekil 5.47 ARM sürücünün  $n=600$  d/dak referans hız  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız kontrolünde deneysel ölçülen  $i_a$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.46$  Nm).

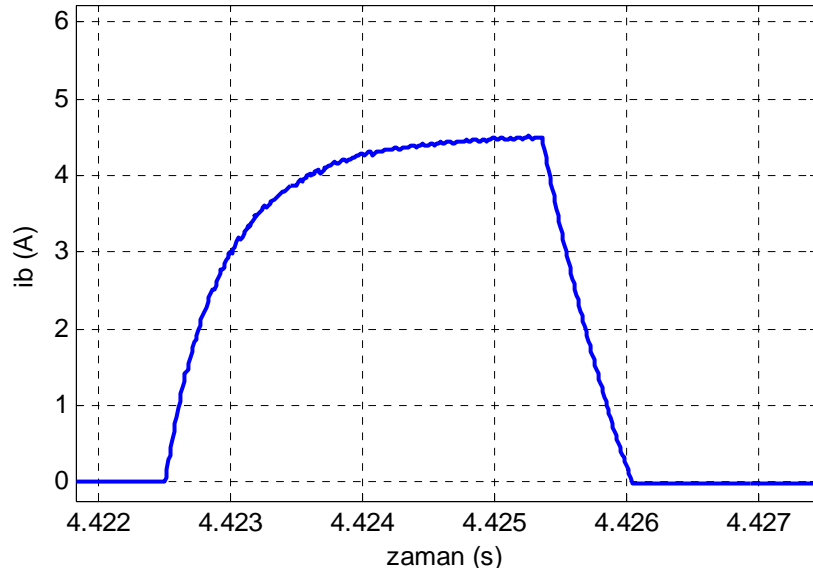


Şekil 5.48 ARM sürücünün  $n=600$  d/dak hızda  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen  $i_a$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.46$  Nm).

ARM sürücü  $T_y=0.46$  Nm yükü yüklediğinde  $n=600$  d/dak referans hızda kapalı çevrim hız kontrol uygulaması sonucu, deneysel ölçülen B fazı akımı şekil 5.49 ve benzetim sonucunda elde edilen B fazı akımı şekil 5.50’de gösterilmiştir.

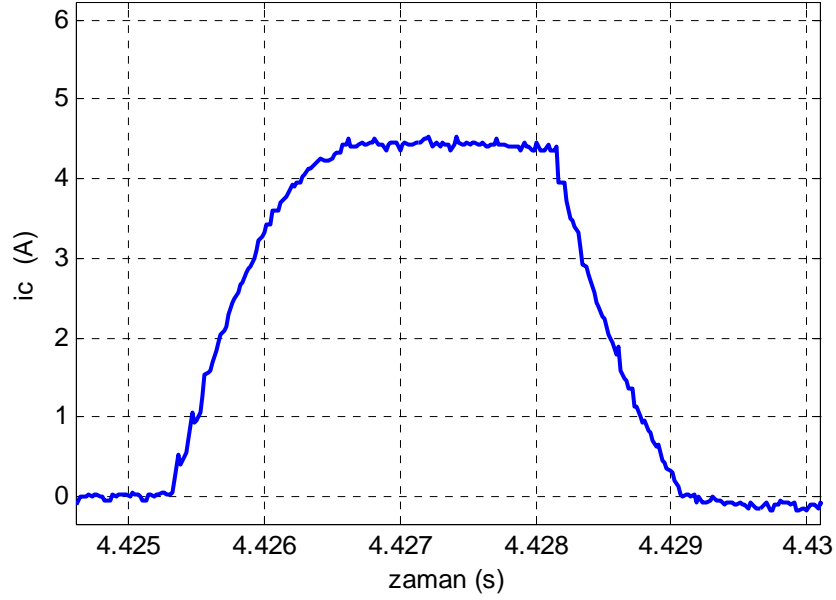


**Şekil 5.49** ARM sürücünün  $n=600$  d/dak referans hız  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız kontrolünde ölçülen  $i_b$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.46$  Nm).

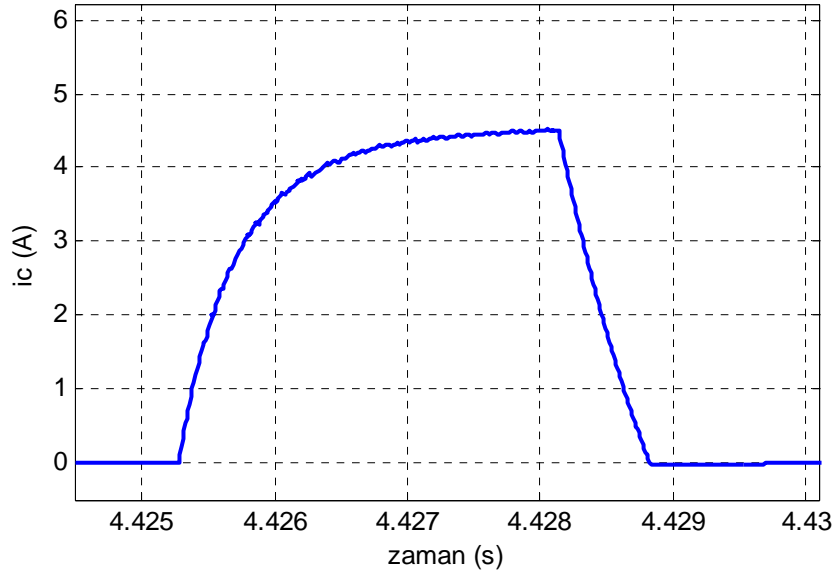


**Şekil 5.50** ARM'nin  $n=600$  d/dak hızda  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen  $i_b$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.46$  Nm).

ARM sürücü  $T_y=0.46$  Nm yükü yüklediğinde  $n=600$  d/dak referans hızda kapalı çevrim hız kontrol uygulaması sonucu, deneysel ölçülen C fazı akımı şekil 5.51 ve benzetim sonucunda elde edilen C fazı akımı şekil 5.52’de gösterilmiştir.



**Şekil 5.51** ARM sürücünün  $n=600$  d/dak referans hız  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız kontrolünde deneysel ölçülen  $i_c$  faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.46$  Nm).

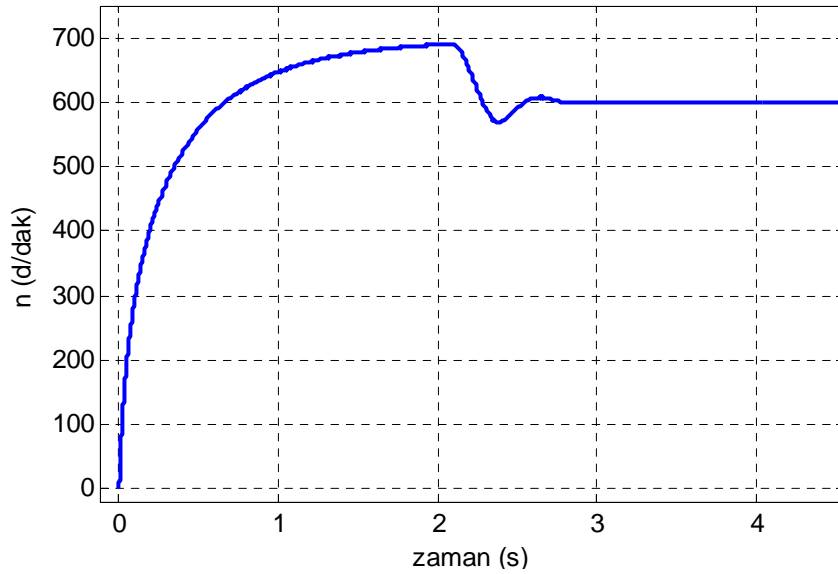


**Şekil 5.52** ARM'nin  $n=600$  d/dak hızda  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen  $i_c$  faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.46$  Nm).

ARM sürücünün  $T_y=0.46$  Nm yükü yüklediğinde kapalı çevrim hız kontrol sonucu deneysel ölçülen hız grafiği şekil 5.53 ve benzetim sonucunda elde edilen hız grafiği şekil 5.54'te gösterilmiştir.

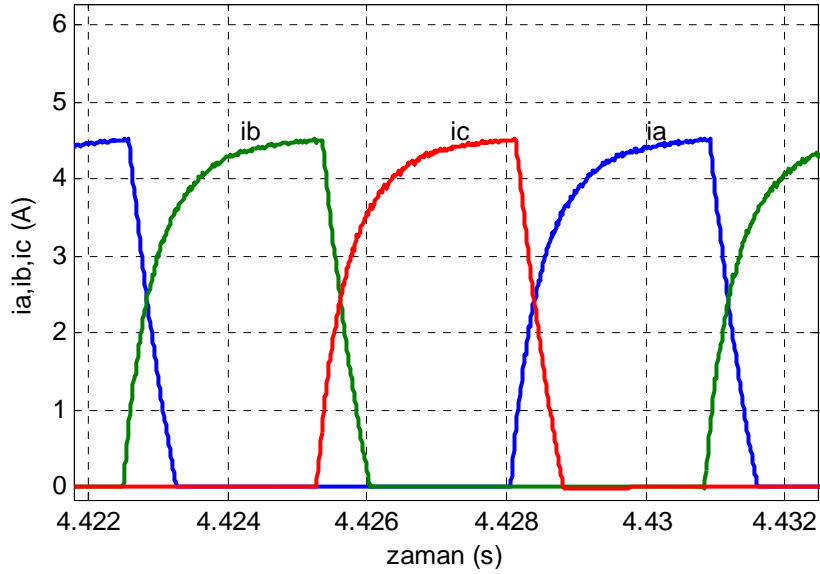


**Şekil 5.53** ARM sürücünün  $n=600$  d/dak referans hız  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız kontrolünde ölçülen hızın değişim grafiği ( $T_y=0.46$  Nm).

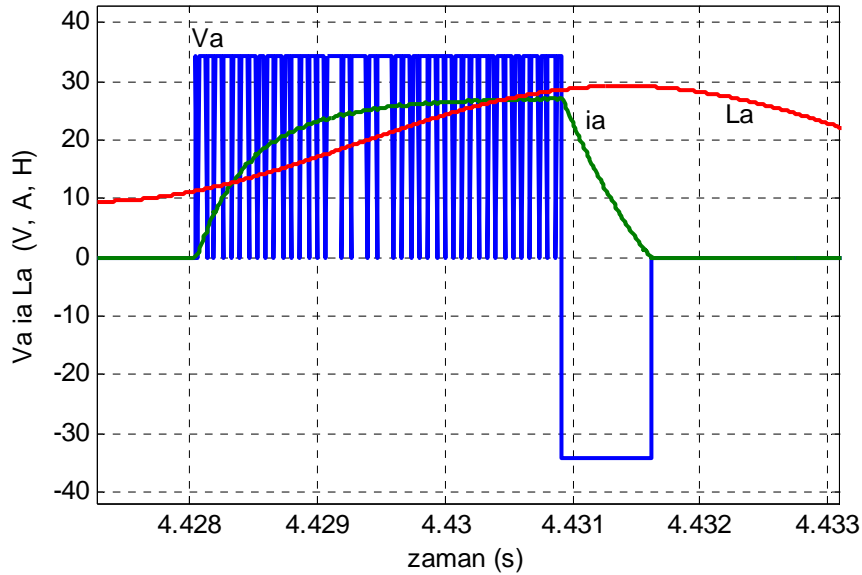


**Şekil 5.54** ARM'nin  $n=600$  d/dak referans hız  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen hızın değişim grafiği ( $T_y=0.46$  Nm).

ARM sürücünün yüklü kapalı çevrim hız kontrolüne ait A,B,C faz akımlarının değişim grafiği şekil 5.55’de gösterilmiştir. Ayrıca A fazının gerilim, akım ve indüktansının zamana bağlı değişim grafikleri şekil 5.56’da birlikte verilmiştir.

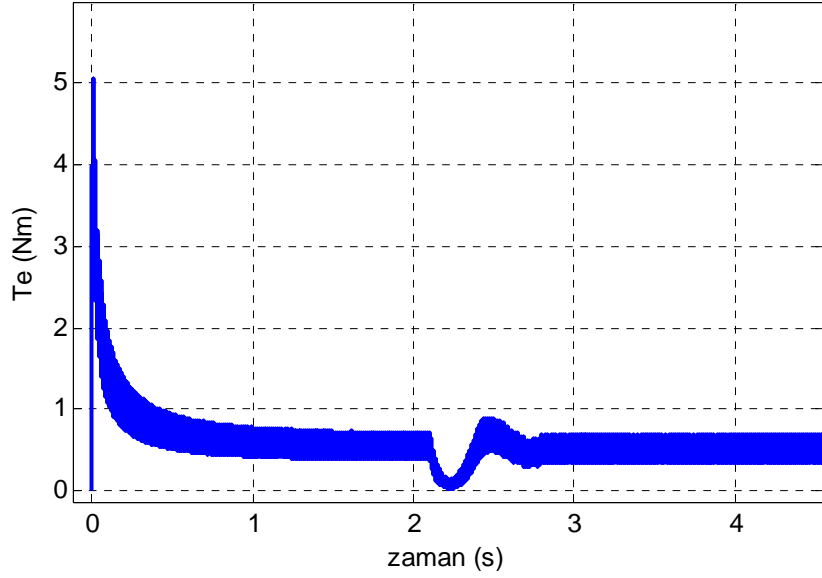


**Şekil 5.55** ARM sürücünün  $n = 600$  d/dak hızda  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız kontrolünde benzetim sonucu elde edilen  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ , faz akımlarının değişim grafiği.

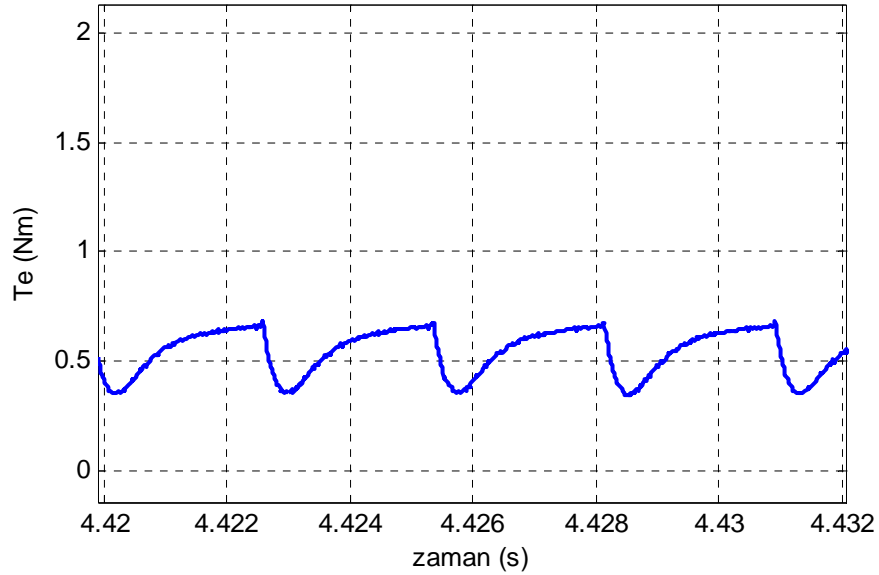


**Şekil 5.56** ARM'nin  $n = 600$  d/dak hızda  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız kontrolünde benzetim sonucu elde edilen  $V_a$ , faz gerilimi  $i_a$ , faz akımı  $L_a$ , faz indüktansının değişim grafiği. Burada akım  $k_1=6$  ve indüktans  $k_2=3500$  katsayıları ile çarpılmıştır ( $T_y=0.46$  Nm).

ARM sürücünün yüklü kapalı çevrim hız kontrolüne ait benzetim sonucunda elde edilen moment değişim grafiği şekil 5.57’de gösterilmiştir. Şekil 5.57’deki moment grafiği 4.42 saniye ile 4.432 saniye zaman aralığında büyütülmüş olarak şekil 5.58’de verilmiştir.



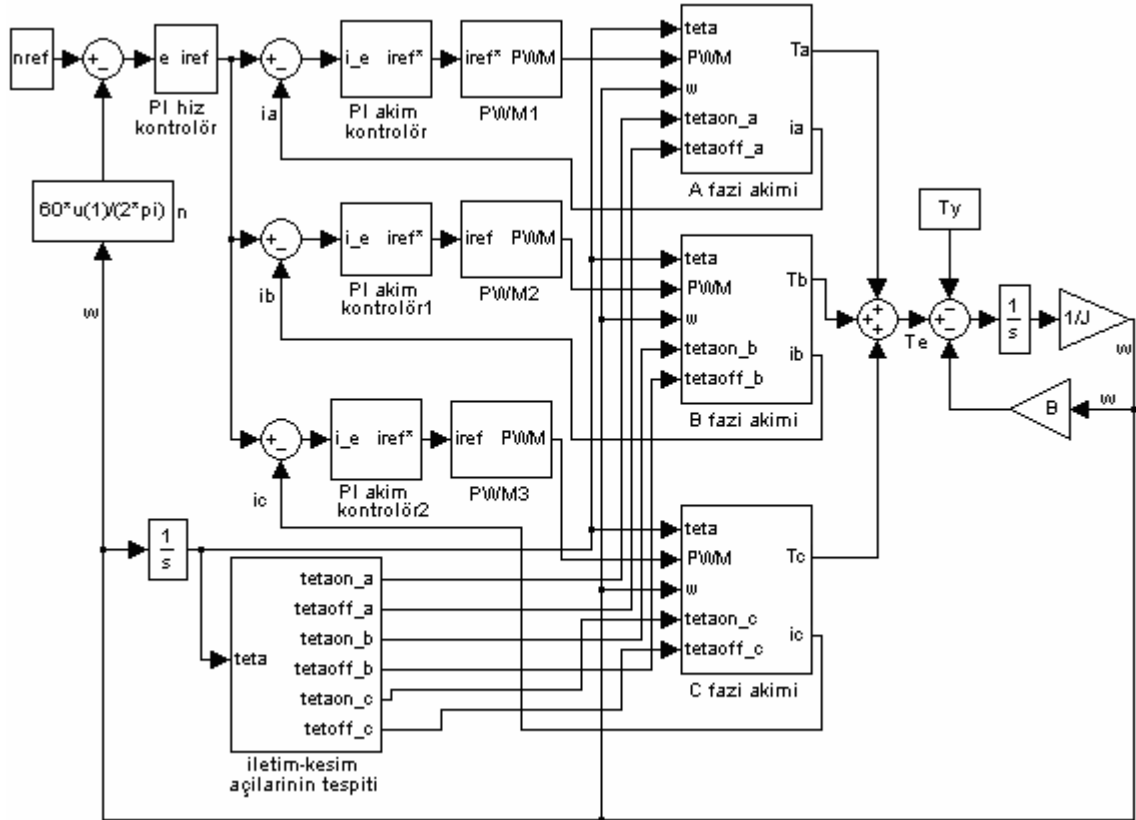
Şekil 5.57 ARM sürücünün  $n=600$  d/dak hızda yüklü durumda kapalı çevrim hız kontrol sonucu motor tarafından üretilen toplam momentin  $T_e$  değişim grafiği ( $T_y=0.46$  Nm).



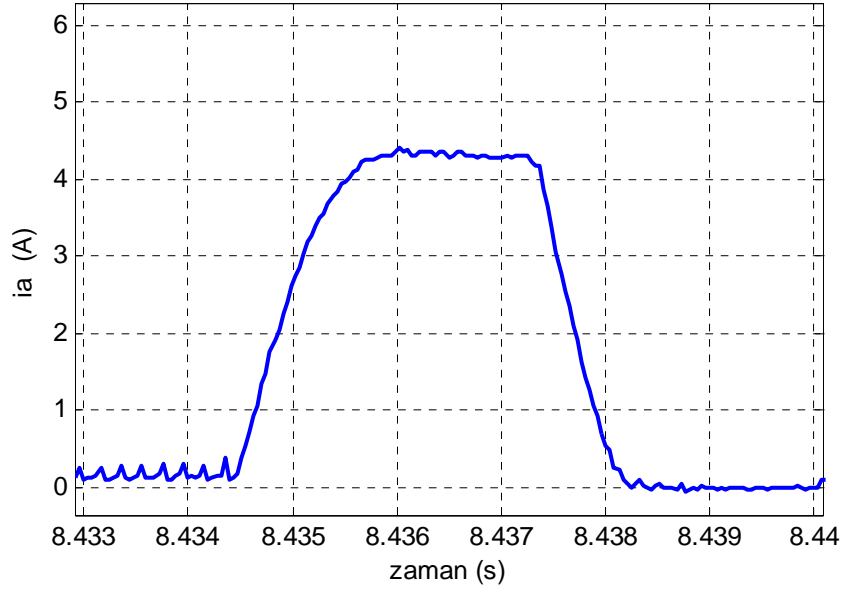
Şekil 5.58 ARM sürücünün  $n=600$  d/dak hızda yüklü durumda kapalı çevrim hız kontrolünde motor tarafından üretilen toplam momentin  $T_e$  değişim grafiği ( $T_y=0.46$  Nm).

#### 5.4 ARM Sürücünün Yüklü Durumu için Kapalı Çevrim Hız ve Akım Kontrol Sonuçları

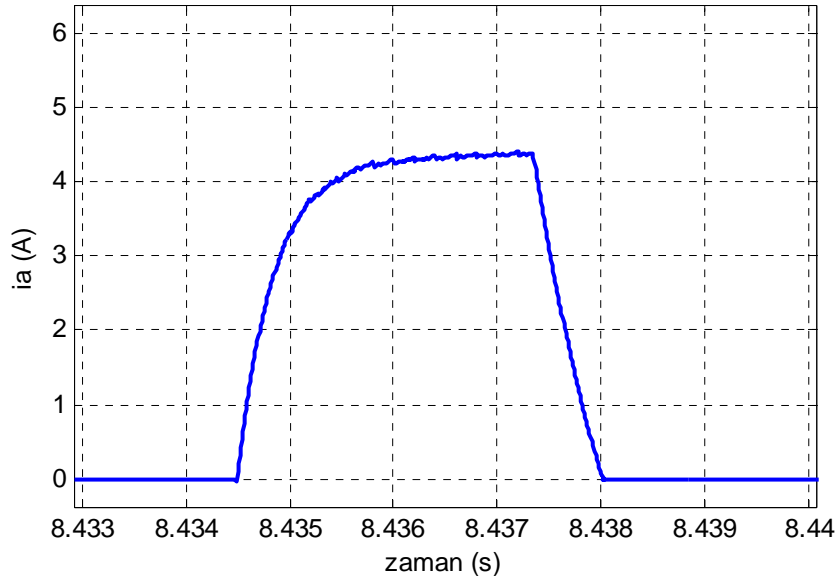
Bu kısımda, ARM sürücünün hız kontrolü ile birlikte akım kontrolü yapılmıştır. Şekil 5.59'da gösterilen ARM sürücünün kapalı çevrim hız ve akım kontrol benzetim şeması benzetim sonuçlarının çıkarılmasında kullanılmıştır. Şekil 5.59'daki şemada açık olarak görüldüğü gibi A, B ve C faz akımlarının birbirinden bağımsız akım kontrolü yapılmıştır. ARM sürücüsüne bağlı DA şönt generatörün  $T_y=0.46$  Nm yüküyle yüklendiği kapalı çevrim hız ve akım kontrol sonuçları  $n=600$  d/dak referans hızda alınmıştır. Deneysel ölçülen A, B ve C faz akımları şekil 5.60, şekil 5.62 ve şekil 5.64 ve benzetim sonucu elde edilen A, B ve C faz akımları ise şekil 5.61, şekil 5.63 ve şekil 5.65'de sırayla gösterilmiştir.



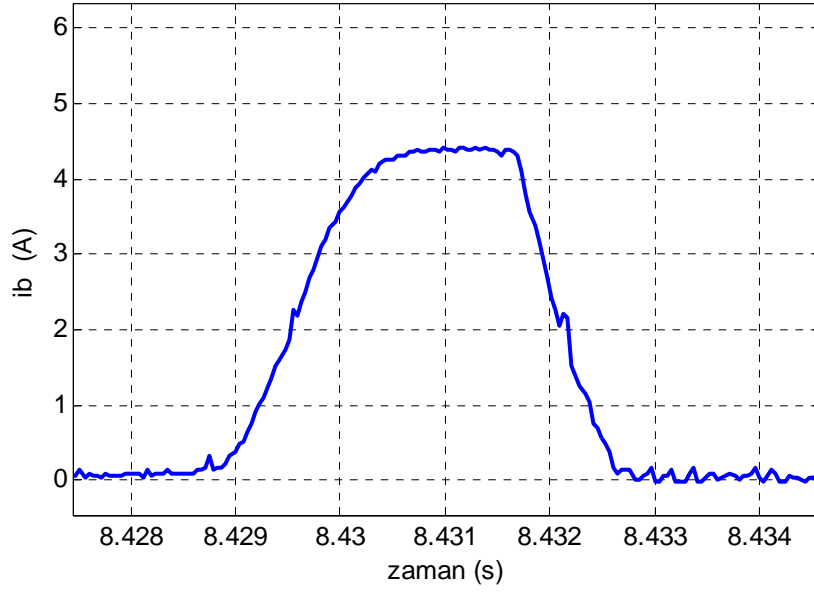
Şekil 5.59 ARM'nin yüklü kapalı çevrim hız ve akım kontrol benzetim şeması.



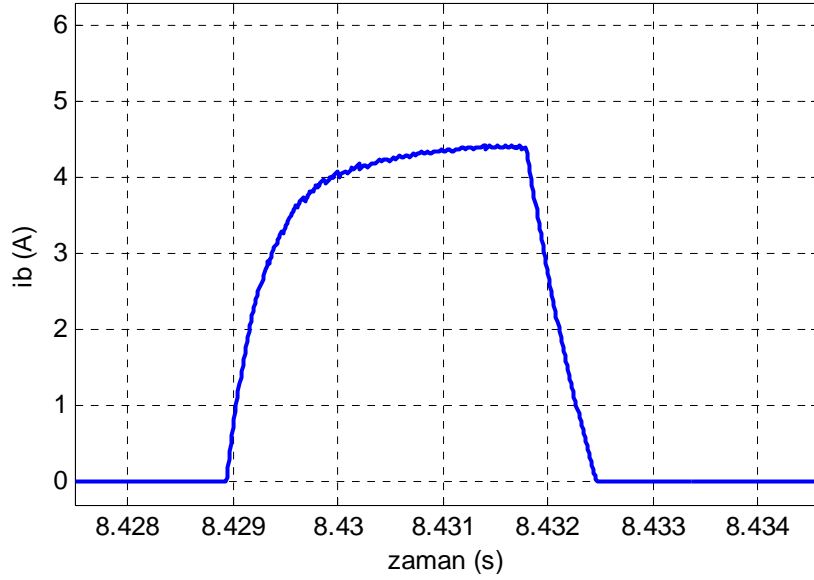
**Şekil 5.60** ARM sürücünün  $n=600$  d/dak referans hız  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız ve akım kontrolünde deneysel ölçülen  $i_a$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.46$  Nm).



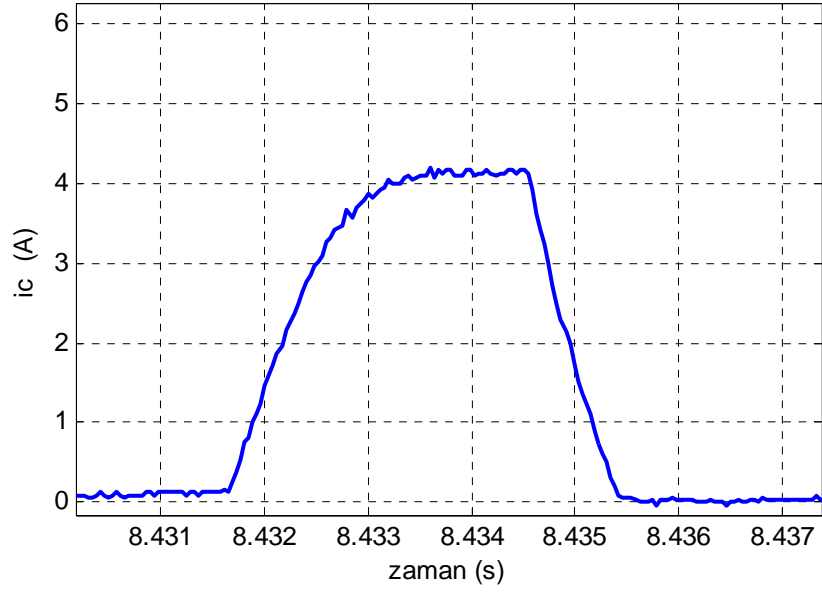
**Şekil 5.61** ARM sürücünün  $n=600$  d/dak referans hız ve  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız ve akım kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen  $i_a$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.46$  Nm).



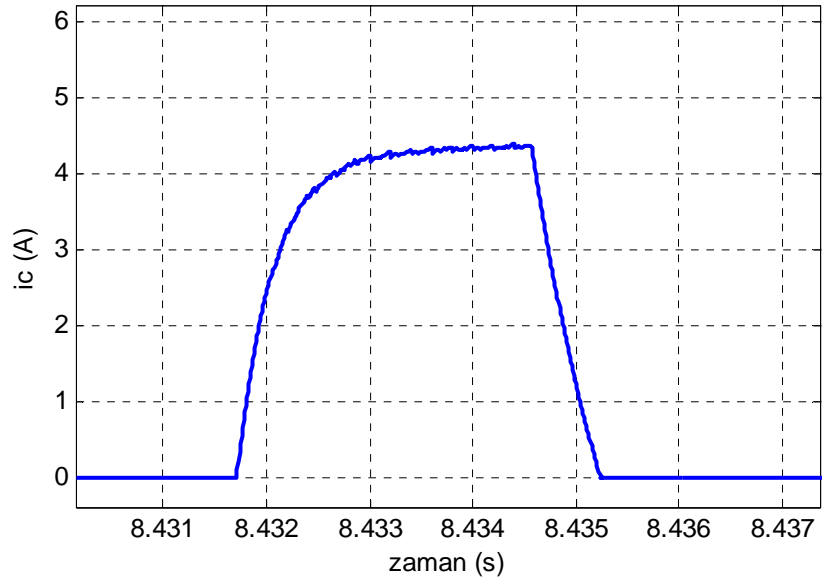
**Şekil 5.62** ARM sürücünün  $n=600$  d/dak referans hız  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız ve akım kontrolünde deneysel ölçülen  $i_b$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.46$  Nm).



**Şekil 5.63** ARM sürücünün  $n=600$  d/dak hızda  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız ve akım kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen  $i_b$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.46$  Nm).



Şekil 5.64 ARM sürücünün  $n = 600$  d/dak referans hız,  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız ve akım kontrolünde ölçülen  $i_c$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.46$  Nm).

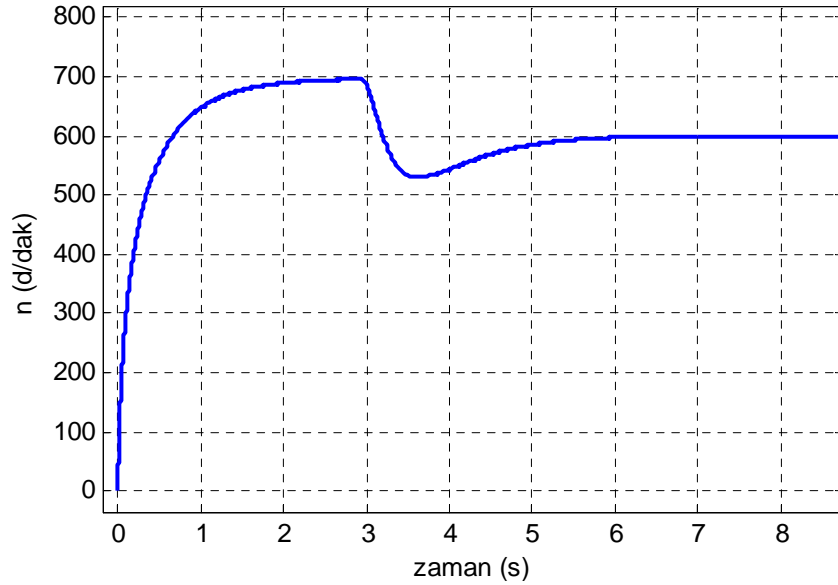


Şekil 5.65 ARM sürücünün  $n = 600$  d/dak referans hız,  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız ve akım kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen  $i_c$ , faz akımının değişim grafiği ( $T_y=0.46$  Nm).

ARM sürücünün  $T_y=0.46$  Nm yükü yüklediğinde kapalı çevrim hız ve akım kontrol sonucu deneysel ölçülen hız grafiği şekil 5.66 ve benzetim sonucunda elde edilen hız grafiği şekil 5.67’de gösterilmiştir.

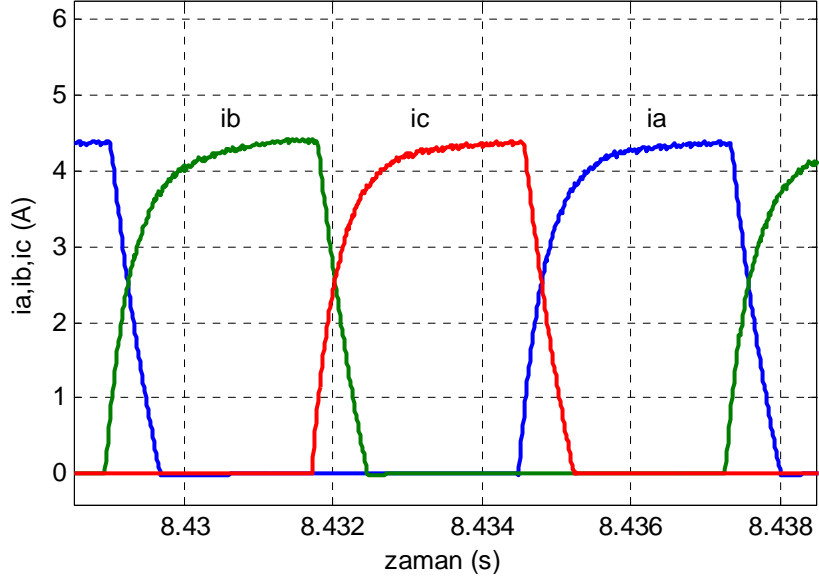


Şekil 5.66 ARM sürücünün  $n=600$  d/dak referans hız  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız ve akım kontrolünde ölçülen hızın değişim grafiği ( $T_y=0.46$  Nm).

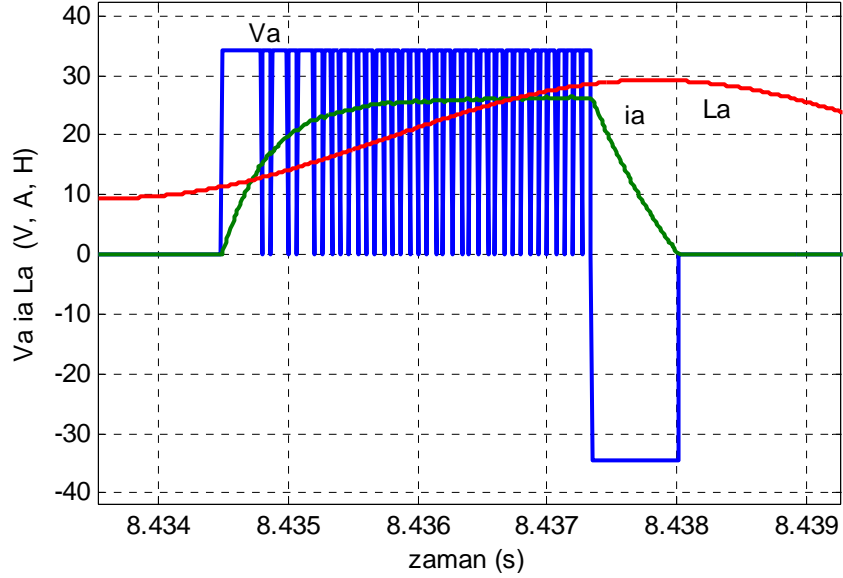


Şekil 5.67 ARM sürücünün  $n=600$  d/dak referans hız  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız ve akım kontrolünde benzetim elde edilen hızın değişim grafiği ( $T_y=0.46$  Nm).

ARM sürücünün yüklü kapalı çevrim hız ve akım kontrolüne ait A, B, C faz akımlarının değişim grafiği şekil 5.68'de gösterilmiştir. Ayrıca A fazının gerilim, akım ve indüktansının zamana bağlı değişim grafikleri şekil 5.69'da birlikte verilmiştir.

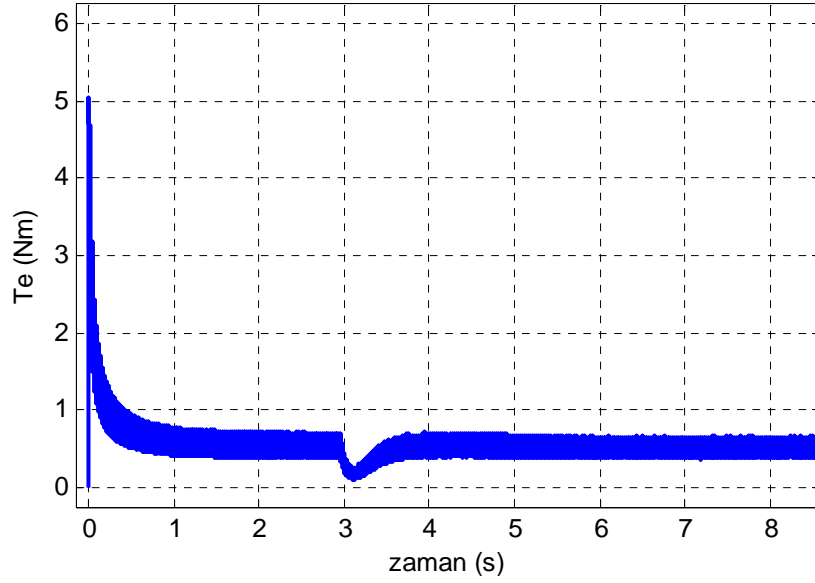


**Şekil 5.68** ARM sürücünün  $n = 600$  d/dak hızda  $V = 34$  V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız ve akım kontrolünde simülasyon sonucu elde edilen  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  faz akımlarının değişim grafiği ( $T_y = 0.46$  Nm).

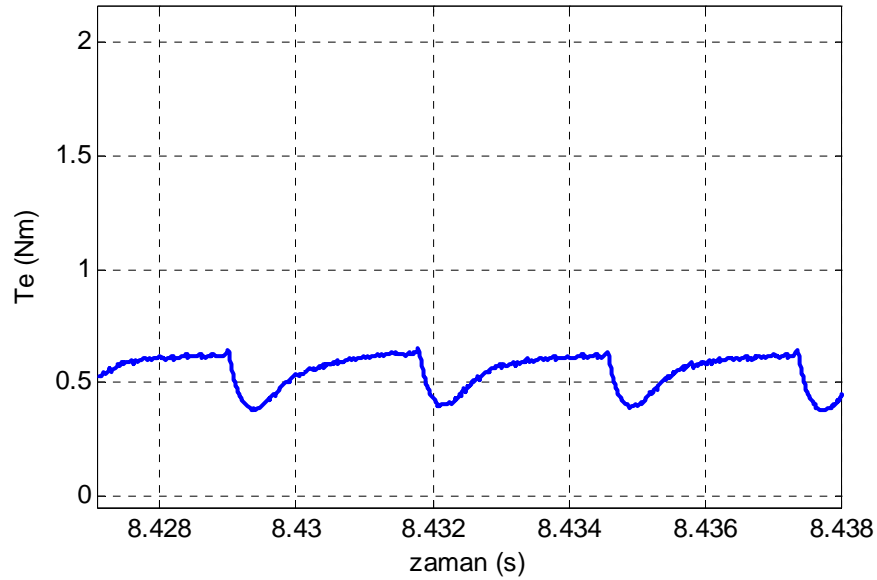


**Şekil 5.69** ARM'nin  $n = 600$  d/dak hızda  $V = 34$  V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız kontrolünde benzetim sonucu elde edilen  $V_a$ , faz gerilimi  $i_a$ , faz akımı  $L_a$ , faz indüktansının değişim grafiği. Burada akım  $k_1 = 6$  ve indüktans  $k_2 = 3500$  katsayıları ile çarpılmıştır.

ARM sürücünün yüklü kapalı çevrim hız ve akım kontrolüne ait benzetim sonucunda elde edilen moment değişim grafiği şekil 5.70’de gösterilmiştir. Şekil 5.70’deki moment grafiği 8.428 saniye ile 8.438 saniye zaman aralığında büyütülmüş olarak şekil 5.71’de verilmiştir.

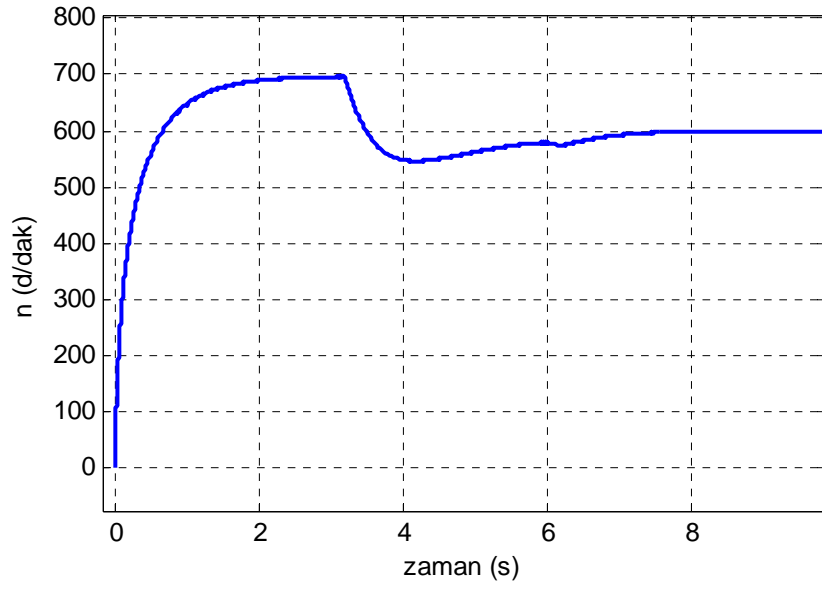


**Şekil 5.70** ARM sürücünün  $n = 600$  d/dak hızda  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız ve akım kontrolünde motor tarafından üretilen toplam momentin  $T_e$  değişim grafiği ( $T_y=0.46$  Nm).

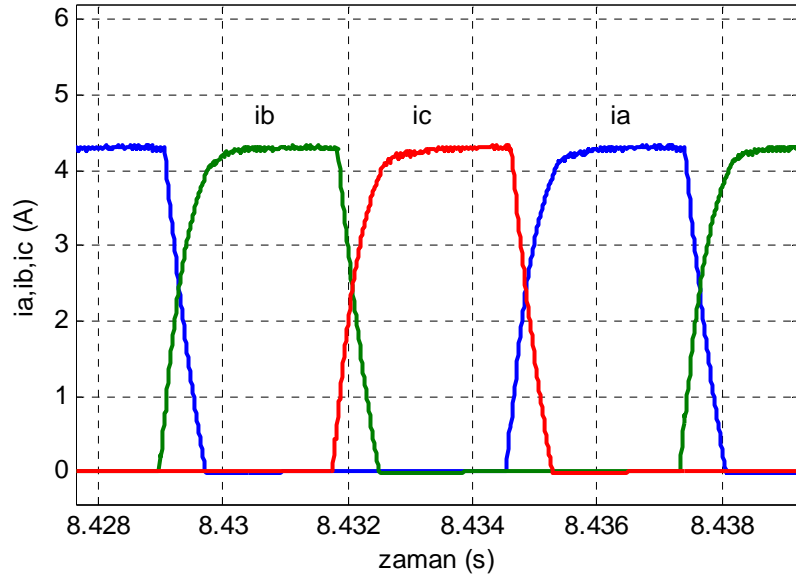


**Şekil 5.71** ARM sürücünün  $n = 600$  d/dak hızda  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim hız ve akım kontrolünde motor tarafından üretilen toplam momentin  $T_e$  değişim grafiği ( $T_y=0.46$  Nm).

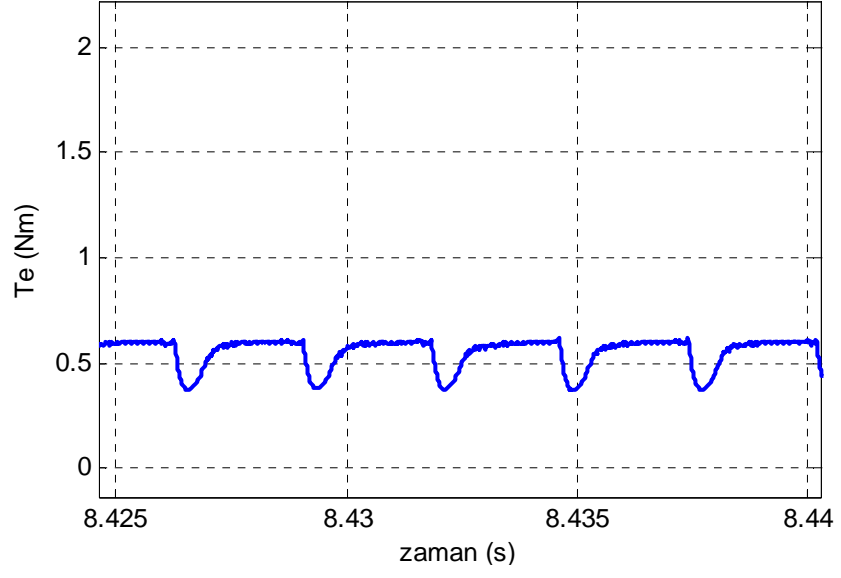




**Şekil 5.73** ARM sürücünün  $n=600$  d/dak referans hız  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim akımın karesi kontrolünde simülasyonda elde edilen hızın değişim grafiği ( $T_y=0.46$  Nm).



**Şekil 5.74** ARM sürücünün  $n=600$  d/dak hızda  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim akımın karesi kontrolünde benzetim sonucunda elde edilen  $i_a, i_b, i_c$  faz akımlarının değişim grafiği ( $T_y=0.46$  Nm).



**Şekil 5.75** ARM sürücünün  $n = 600$  d/dak referans hızda  $V=34$  V besleme geriliminde yüklü durumda kapalı çevrim akımın karesi kontrolünde motor tarafından üretilen toplam momentin  $T_e$  değişim grafiği ( $T_y=0.46$  Nm).

## 6. BÖLÜM

### 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

#### 6.1 Sonuçlar

Anahtarlı relüktans motorlarda (ARM) rotor kutuplarına etki eden magnetik kuvvet iki bileşene ayrılır. Birinci kuvvet bileşeni teğet kuvvet bileşeni olarak adlandırılır ve bu bileşen ARM’de moment üretir. İkinci kuvvet bileşeni ise yarıçap yönünde kuvvet bileşeni olarak adlandırılır. ARM’de yarıçap yönünde oluşan kuvvetler rulmanlara etki ederek titreşimler sebep olur. Bu titreşimler statorda gürültü meydana getirir. Yarıçap yönünde meydana gelen kuvvetin büyüklüğü azaltılırsa ARM’de oluşan gürültü azaltılabilir. Bunun için stator ve rotor kutup sayıları artırılarak her bir rotor kutbuna etki eden yarıçap yönündeki kuvvet bileşeni azaltılabilir.

Bu amaçla, statorunda 18 kutup ve rotorunda 12 kutup bulunan yeni bir anahtarlı relüktans motor modeli tasarlanmıştır. Tasarlanan ARM Sonlu Elemanlar Yönteminde incelenmiş ve aynı tepe değer moment için bir rotor kutbuna etki eden radyal kuvvetler bakımından  $N_s/N_r=6/4$  ve  $N_s/N_r=12/8$  kutuplu ARM modelleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Stator dış çapı, rotor dış çapı, hava aralığı mesafesi ve stator paket boyu aynı olan üç fazlı ARM modellerinde yarıçap yönündeki kuvvet bileşeni bakımından incelenmiştir:

1-  $N_s/N_r=6/4$  kutuplu ARM’de bir rotor kutbuna etki eden yarıçap yönündeki kuvvet bileşeni,  $N_s/N_r=18/12$  kutuplu ARM’nin bir kutbuna etki eden yarıçap yönündeki kuvvet bileşenin yaklaşık dokuz katı olarak hesaplanmıştır.

2-  $N_s/N_r=12/8$  kutuplu ARM’de ise bir rotor kutbuna etki eden yarıçap yönündeki kuvvet bileşeni,  $N_s/N_r=18/12$  kutuplu ARM’nin bir rotor kutbuna etki eden yarıçap yönündeki kuvvet bileşeninin yaklaşık iki buçuk katı olmuştur.

3- Dolayısıyla aynı tepe değer moment için  $N_s/N_r=18/12$  kutuplu ARM’de yarıçap yönündeki kuvvet bileşeni sonucu oluşan titreşimin meydana getirdiği gürültü  $N_s/N_r=12/8$  kutuplu ARM’ye göre iki buçuk kat,  $N_s/N_r=6/4$  kutuplu ARM’ye göre dokuz kat daha az olur.

ARM’de fazlardan sırayla akım akıtılarak sürekli bir dönme hareketi elde edilir. ARM’de üretilen moment ise fazlar tarafından sırayla üretilen momentlerin toplamı olur. ARM’de bir fazın ürettiği moment rotor konumuna göre sabit bir moment değildir. Rotor kutbunun stator kutupları arasında bulunduğu konumu çakışık olmayan konum olarak adlandırılır. Rotor kutup eksenini ile stator kutup ekseninin üst üste geldiği konuma çakışık konum denir. Rotor kutbu çakışık olmayan konumdan çakışık konuma gelirken ARM’nin bir

fazının ürettiği moment eğrisel olarak artar bir tepe noktasından sonra azalarak çakışık konumda sıfır olur. Adım motorlarında, momentin bu tepe değerine tutma momenti adı verilir. Dolayısıyla stator ve rotor kutup sayısı az olan ARM modellerinde momentteki bu değişim daha fazla olmaktadır. ARM’de fazların bağımsız sırayla ürettiği momentlerin toplamı, ARM’nin toplam momentini verdiği için dolayısı momentte salınımlar meydana gelir. Momentte meydana gelen salınımlar ARM’nin hızında değişimlere neden olur. Hızdaki değişimler ise gürültüye sebep olur. Momentteki salınımları azaltmak için kutup sayısının artırılması önerilir. Ancak kutup sayısının artırılması ARM sürücü devresinde kullanılacak yarı iletken anahtar sayısını arttırır. ARM’de bir fazın ürettiği momentte bir düşme meydana gelir. Bu çalışmada, altı stator kutbu üzerindeki sargılar seri bağlanmak suretiyle bir faz oluşturulmuştur. Dolayısıyla bu şekilde fazla yarı iletken anahtarın kullanımı önüne geçilmiş ve momentteki düşme önlenmiştir.

ARM’de faz akımları kontrol edilerek her bir fazın ürettiği momentin salınımsız olması sağlanır. Akımın bir fazdan diğer faza geçtiği zaman aralığı komütasyon aralığı olarak adlandırılır. Bu komütasyon aralığında kesime giren fazın akımın negatif moment bölgesine girmemesi için hızlı bir şekilde sıfıra çekilmesi gerekir. Bundan dolayı, komütasyon aralığında kesime giren fazın akımı kontrolsüzdür. Komütasyon aralığında ancak yeni iletme giren fazın akımı kontrol edilebilir. ARM’nin momentinde salınımların çoğu bu bölgede meydana gelir. Bu çalışmada komütasyon aralığında meydana gelen salınımları azaltmak amacıyla faz akımlarının karelerinin toplamı yöntemi uygulanmıştır.

Yukarıda anlatılan teorik açıklamalara ait deneysel sonuçlar elde etmek amacıyla tasarlanan  $N_s/N_r=18/12$  kutuplu ARM’nin üretimi yapılmıştır. Bu amaçla;

4- Deneysel olarak elde edilen endüktans ve ortak endüktans değerleri kullanarak Matlab/Simulink programında üretilen ARM sürücünün kapalı çevrim hız ve akım kontrolünü içeren doğrusal çalışma modeli oluşturulmuştur. Bu modelden incelenen ARM sürücüyeye ait yüklü ve yüksüz durum için açık çevrim hız kontrol, kapalı çevrim hız kontrol, kapalı çevrim hız ve akım kontrolüne ait benzetim sonuçları alınmıştır. Komütasyon aralığında momentteki salınımları azaltmak için faz akımlarının karesinin toplamı kontrolü yapılmış ve buna ilişkin benzetim sonuçları elde edilmiştir. Bu şekilde, ARM sürücü için geliştirilen akımların karesinin toplamının kontrolü algoritması ile komütasyon aralığında düzgün bir moment üretimi sağlanmıştır.

5- Benzetim sonucu elde edilen sonuçların doğruluğunu belirlemek için TMS320LF2407A sayısal sinyal işlemcisini kullanarak incelenen ARM sürücünün deneysel olarak kapalı çevrim hız ve akım kontrolü yapmak amacıyla Texas Instruments CCS 2.20 yazılımı kullanarak Assembly dilinde bir programı hazırlanmıştır.

6- TMS320LF2407A sayısal sinyal işlemcisini kullanarak incelenen ARM sürücünün deneysel olarak yüklü ve yüksüz durum için kapalı çevrim hız ve akım kontrolü yapılmıştır. Benzetim sonucu elde edilen hız ve faz akımları sonuçları, deneysel elde edilen hız ve faz akımı sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçları ile deneysel sonuçların uyumluluğu ortaya konmuştur. Deneysel olarak faz akımları kontrol edilmiş ve gürültüye neden olan momentteki salınımlar azaltılmıştır.

## **6.2 Sonraki Çalışmalar İçin Öneriler**

1- ARM sürücünün konumu ve rotor hızı artımlı konum kodlayıcı kullanılarak tespit edilmiştir. Konum kodlayıcı kullanımı ARM sürücünün fiziksel boyutlarını büyütmede ve beraberinde ek maliyet getirmektedir. Bundan sonraki çalışmalarda konum kodlayıcı kullanılmadan ARM sürücünün kontrolü üzerinde çalışılması önerilebilir.

2- ARM sürücülerde indüktansın değişimi ve momentin üretimi rotor konumu, akım ve magnetik doyum parametrelerine göre değişir. Bu çalışmada, magnetik doyum ve indüktansın akıma bağlı değişimi hesaplamalara katılmamıştır. Bundan sonraki çalışmalarda konumla beraber akıma bağlı indüktansın değişimini içeren ARM'nin nonlinear bir modeli oluşturularak kontrol edilmesi önerilebilir.

3- Bu çalışmada oransal-integral denetleyici kullanılmıştır. Oransal-integral denetleyici parametre değişimi ve bozuculardan etkilenir. Parametre değişimi ve bozuculardan etkilenmeyen denetleyiciler (örneğin bulanık denetleyici, yapay sinir ağları gibi) kullanılarak ARM sürücüsünün kontrol edilmesi önerilebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Ray, W. F., Lawrenson, P. J., Davis, R. M., Stephenson, J. M., Fulton, N. N., Blake, R. J., 1986, High Performance Switched Reluctance Brushless Drives , IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA-22, No. 4, 722–730, July/August.
- [2] Lawrenson, P. J., Stephenson , J. M., Blenkinsop, P. T., Corda, J., Fulton, N. N., 1980, Variable Speed Switched Reluctance Motors , IEE Proc., Vol. 127, Pt. B, No. 4, 253-265, July,
- [3] Miller, T. J. E., 2001, Electronic Control of Switched Reluctance Machines, Newnes Power Engineering Series.
- [4] Ray, W. F., Davis, R. M., 1979, Inverter Drive for Doubly Slient Switched Reluctance Motor: Its Fundemantal Behaviour, Linear Analysis and Cost İmplications, Electric Power Applications, Vol. 2, No. 6, 185-193, December.
- [5] Arumugam, R., Lowther, D. A., Krishnan, R., Lindsay, J. F., 1985, Magnetic Field Analysis of a Switched Reluctance Motor Using a Two Dimensional Finite Element, IEEE Transactions On Magnetics, Vol. MAG-21, No. 5, 1883-1885, September.
- [6] Miller, T. J. E., 1985, Converter Volt–Ampere Requirements of the Switched Reluctance Motor Drive, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA-21, No. 5, 1136–1144, September/October.
- [7] Bose, B. K., Miller, T. J. E., Szczesny, P. M., Bicknell, W. H., 1986, Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA-22, No. 4, pp. 708–715, July/August.
- [8] Lindsay, J. F., Arumugam, R., Krishnan, R., 1986, Finite Element Analysis Characterisation of a Switched Reluctance Motor with Multitooth Per Stator Pole, IEE Proc., Vol. 133, Pt. B, No. 6, 347-353, November.
- [9] Harris, M. R., Finch, J. W., Mallick, J. A. H., Miller, T. J. E, 1986, A Review of the Integral-Horsepower Switched Reluctance Drive, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA-22, No. 4, 716–721, July/August.
- [10] Ray, W. F., Davis, R. M., Blake, R. J., 1986, The Control of SR Motors, CAMC '86 Conference, The University of Minneapolis, 51–59, 10<sup>th</sup> -12<sup>th</sup> June, Minnesota.
- [11] Dawson, G. E., Eastham, A. R., Mizia, J., 1987, Switched Reluctance Motor Torque Characteristics: Finite Element Analysis and Test Results, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA-23, No. 3, 532–537, May/June.
- [12] Ehsani, M., Miller, Bass, J. T., Miller, T. J. E., Steigerwald, R. L., 1987, Development of a Unipolar Converter for Variable Reluctance Motor Drives, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA-23, No. 3, 545– 553, May/June.

- [13] Ilıc'-Spong, M., Marino, R., Peresada, S. M., Taylor, D. G., 1987, Feedback Linearizing Control of Switched Reluctance Motors, IEEE Transaction on Automatic Control, Vol. AC-32, No. 5, 371–379, May.
- [14] Fauchez, M. B., 1988, Magnetic Analysis of a Switched Reluctance Motor Using a Boundary Element-Finite Element Coupling Method, IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 24, No. 1, 475-478, January.
- [15] Mizia, J., Adamiak, K., Eastham, A. R., Dawson, G. E., 1988, Finite Element Force Calculation: Comparison of Methods for Electric Machines, IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 24, No. 1, 447-449, January.
- [16] Petrovic, M., Mandic, I., 1988, Numerical Procedure for Determining Parameters of Electrical Machines, IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 24, No. 1, 508-511, January.
- [17] Krishnan, R., Bharadwaj, A. S., Materu, P. N., 1988, Computer Aided design of Electrical Machines for variable Speed Applications, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 35, No. 4, 560–571, November.
- [18] Harris, W. D., Lang, J. H., 1990, A Simple Motion Estimator for Variable Reluctance Motors, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 26, No. 2, 237–243, March/April.
- [19] Krishnan, R., Mang, X., Bharadwaj, A. S., 1990, Design and Performance of Microcontroller Based Switched Reluctance Motor Drive System, Electric Machines and Power Systems, 359– 373.
- [20] Moghbelli, H., Adams, G. E., Hoft, R. G., 1991, Performance of a 10 Hp Switched Reluctance Motor and Comparison with Induction Motors, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 27, No. 3, 531– 538, May/June.
- [21] Preston, M. A., Lyons, J. P., 1991, A Switched Reluctance Motor Model with Mutual Coupling and Multi-Phase Excitation, IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 27, No. 6, 5423-5425, November.
- [22] Moallem, M, Ong, C. M., 1991, Predicting the Steady–State Performance of a Switched Reluctance Machine, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 27, No. 6, 1087– 1097, November/December.
- [23] Moghbelli , H., Adams, G. E., Hoft, R. G., 1991, Prediction of the Instantaneous and Steady State Torque of the Switched Reluctance Motor using FEM with Experimental Results Comparison, Electric Machines and Power Systems, 287– 303.
- [24] MacMinn, R. S., Rzesos, W. J., Szczesny, P. M., Jhans, T. M., 1992, Application of Sensor Integration techniques to Switched Reluctance Motor, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 28, No. 6, 1339– 1343, November/December.

- [25] Jack, A. G., Finch, J. W., Wright, J. P., 1992, Adaptive Mesh Generation to Switched Reluctance Motor Design, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 28, No. 2, 370–375, march/April.
- [26] Wallace, S. R., Taylor, D. G., 1992, A Balanced Commutator for Switched Reluctance Motors to Reduce Torque Ripple, IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 7, No. 4, 617–626, October.
- [27] Becerra, R. C., Ehsani, M., Miller, T. J. E., 1993, Commutation of SR Motors, IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 8, No. 3, 257–263, July.
- [28] Faiz, J., Finch, J. W., 1992, Aspects of Design Optimisation for Switched Reluctance Motors, IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 8, No. 4, 704-713, December.
- [29] Krishnan, R., Materu, P. N., 1993, Analysis and Design of a Low Cost Converter for Switched Reluctance Motor Drives, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 29, No. 2, 320–326, March/April.
- [30] Arkadan, A. A., B., Kielgas, W., 1993, Effects of Force Fitting on the Inductance Profile of a Switched Reluctance Motor, IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 29, No. 2, 2006-2009, March.
- [31] Bolognani, S., Ognibeni, E., Zigliotto, M., 1993, Sliding Mode Control of the Energy Recovery Chopper in a C-Dump Switched Reluctance Motor Drive , IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 29, No. 1, 181–186, January/February.
- [32] Buja, G. S., Menis, R., Valla, M. I., 1993, Variable Structure Control of An SRM Drive, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 40, No. 1, 56– 63, February .
- [33] Michaelides, A. M., Pollock, C., 1994, Effect of End Core Flux on the Performance of the Switched Reluctance Motor, IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol. 141, No. 6, 308– 316, November.
- [34] Buja, G. S., Valla, M. I., 1994, Control Characteristics of the SRM Drives. Part II: Operation in the Saturated Region, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 41, No. 3, 316– 325, June.
- [35] Iqbal, H., Ehsani, M., 1994, Error Analysis in Indirect Rotor Position Sensing of Switched Reluctance Motors, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 41, No. 3, 301–307, January.
- [36] Iqbal, H., Ehsani, M., 1994, Rotor Position Sensing in Switched Reluctance Motor Drives by measuring Mutually Induced Voltages, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 30, No. 3, 665– 671, May/June.

- [37] Arkadan, A. A., B., Kielgas, W., 1994, Switched Reluctance Motor Drive Systems Dynamic Performance Prediction Under Internal and External Fault Conditions, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 9, No. 1, pp. 45-51, March.
- [38] Ehsani, M., Iqbal, H., Mahajan, S., Ramani, K. R., 1994, New Modulation Encoding Techniques for indirect Rotor Position Sensing in Switched Reluctance Motors, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 30, No. 1, 85– 91, January/February.
- [39] Kjaer, P. C., Nielsen, P., Andersen, L., Blaabjerg, F., 1995, A New Energy Optimizing Control Strategy for Switched Reluctance Motors, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 31, No. 5, 1088–1095, September/October.
- [40] Iqbal, H., Ehsani, M., 1996, Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives by PWM Current Control, IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 11, No. 1, 83– 88, January.
- [41] Panda, S. K., Dash, P. K., 1996, Application of Nonlinear Control to Switched Reluctance Motors: a Feedback Linearisation Approach, IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol. 143, No. 5, 371– 379, September.
- [42] Bolognani, S., Zigliotto, M., 1996, Fuzzy Logic Control of a Switched Reluctance Motor Drive, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 32, No. 5, 1063–1068, September/October .
- [43] Kjaer, P. C., Gribble, J. J., Miller, T. J. E., 1996, High- Grade Control of Switched Reluctance Machines, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 33, No. 6, 1585–1593, November/December.
- [44] Heno, H., Capolino, G.A, Bassily, E.,1998, Current Control Algorithms for Switched Reluctance Machine Servo Drive, Electric Machines and Power Systems, pp. 1019-1033.
- [45] Mir, Ş., Iqbal, H., Elbuluk, M. E., 1998, Switched Reluctance Motor Modeling with On-Line Parameter Identification, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 34, No. 4, 776– 783, July/August.
- [46] Russa, K., Iqbal, H., Elbuluk, M. E., 1998, Torque- Ripple Minimization in Switched Reluctance Machines Over a Wide Speed Range, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 34, No. 5, 1105– 1112, September/October.
- [47] Sahoo, N.C., Panda, S.K., Dash, P.K, 1999, A Fuzzy Logic Based Current Modulator for Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motors, Electric Machines and Power Systems, pp. 181-194.
- [48] Pillay, P., Cai, W., 1999, A Investigation into Vibration in Switched Reluctance Motors, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 35, No. 3, 589– 596, May/June.

- [49] Mir, Ş., Elbuluk, M. E., Iqbal, H., 1999, Torque–Ripple Minimization in Switched Reluctance Motors Using Adaptive Fuzzy Control, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 35, No. 2, pp. 461–468, March/April .
- [50] Choi, C., B., Lee, D., Park, K., 2000, Fuzzy Design of a Switched Reluctance Motor Based on the Torque Profile Optimization, IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 36, No. 5, 3548–3550, September.
- [51] Rahman, K. M., Fahimi, B., Gopalakrishnan, S., Rajarathnam, A. V., Ehsani, M., 2000, Advantages of Switched Reluctance Motor Applications to EV and HEV: Design and Control Issues, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 36, No. 1, 111– 121, January/February.
- [52] Anwar, M. N., Iqbal, H., 2000, Radial Force Calculation and Acoustic Noise Prediction in Switched Reluctance Machines, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 36, No. 6, 1589– 1597, November/December
- [53] Bu, J., Xu, L., 2001, Eliminating Starting Hesitation for Reliable Sensorless Control of Switched Reluctance Motors, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 37, No. 1, 59–66, January/February.
- [54] Rahman, K. M., Gopalakrishnan, S., Fahimi, B., Rajarathnam, A. V., Ehsani, M., 2001, Optimized Torque Control of Switched Reluctance Motor at All Operational Regimes Using Neural Network, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 37, No. 3, 904–913, May/June.
- No. 1, pp. 34–44, January/February.
- [55] Bouji, M., Arkadan, A. A., Ericson, R., 2001, Fuzzy Inference System for the Characterization of SRM Drives Under Normal and Fault Conditions”, IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 37, No. 5, 3745–3748, September.
- [56] Stassis, A., Michaelides, A. M., 1999, The Design of Low Vibration Doubly Salient Motors, Electric Machines and Power Systems, 967-981.
- [57] Nagel, N. J., Lorenz, R. D., 2000, Modeling of a Saturated Switched Reluctance Motor Using an Operating Point Analysis and the Unsaturated Torque Equation, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 36, No. 3, 714– 722, May/June.
- [58] Bose, B. K., 1992, Evaluation of Modern Power Semiconductor Devices and Future Trends of Converters , IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 28, No. 2, 403– 413, March/April.
- [59] Pillay, P., Samudio, R. M., Ahmed, M., Patel, R. T., 1995, A Copper–Controlled SRM Drive for Reduced Acoustic Noise and Improved Ride–Through Capability Using Supercapacitors, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 31, No. 5, 1029– 1038, September/October.

- [60] Miller, T. J. E., 1989, Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor drives, Oxford University Science Publications, New York.
- [61] Sousa, G. C. D., Bose, B.K., 1994, A Fuzzy Set Theory Based Control of a Phase-Controlled Converter DC Machine Drive, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 30,
- [62] Derdiyok, A., 1997, Anahtarlmalı Relüktans Motorun Doyma Modelinde Ortak Endüktans Etkilerinin incelenmesi ve Bulanık ve Kayan Kipli Denetleyicilerle moment Dalgalanmasının Azaltılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [63] İnanç, N., 1996, Anahtarlmalı Relüktans Motorun Modellenmesi ve yeni Kontrol Teknikleri ile Denetimi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [64] Krishnan, R., 2001, Switched Reluctance Motor Drives Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications, CRC Press.
- [65] Dote, Y., 1990, Servo Motor and Motion Control Using Digital Signal Processors, Prentice Hall and Texas Instruments.
- [66] Stephenson, J. M., Corda, J., 1979, Computation of Torque and Current in Doubly Salient Reluctance Motors From Nonlinear magnetisation Data, IEE Proc., Vol. 126, No. 5, 393-396, May.
- [67] Omaç, Z., Kürüm, H., 2001, Anahtarl Relüktans Motorun Ürettiği Momentin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Hesaplanması, Elektrik- Elektronik- Bilgisayar Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi, s. 54-57.
- [68] Hayaashi, Y., Miller, T. J. E., 1995, A New Approach to Calculating Core Losses in the SRM, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 31, No. 5, 1039-1046, September/October.
- [69] Toliyat, H. A., Campbell, S. G., 2004, DSP Based Electromechanical Motion Control, CRC Press.
- [70] Kürüm, H., 1990, Çift Yanlı Linear Asenkron Motorların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ.
- [71] Akpınar, S., Kürüm, H., 2005, Sayısal Çözümleme, Üniversite Kitabevi, Ankara.
- [72] İmal, E., 1993, Suspension and Propulsion Forces On Thin - Plate Secondaries of Linear Reluctance Motors, D. Phil. thesis, University of Sussex, U.K.
- [73] Coulomb, J. L., 1983, A Methodology For The Determination of Global Electromechanical Quantities From a Finite Element Analysis and Its Application to The evaluation of magnetic Forces, Torques and Stiffness, IEEE Transactions On Magnetics, Vol. MAG-19, No. 6, 2514-2519, November.

## ÖZGEÇMİŞ

05.02.1968 yılında Elazığ'da doğdu. Orta öğrenimini Elazığ'da tamamladı. 1987 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde yüksek öğrenime başladı. 1991 yılında Elektrik- Elektronik Mühendisi olarak mezun oldu. Aynı yıl Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisansa girdi. "Relüktans Motorlarda Alan Dağılımının İncelenmesi" konusunda Yüksek Lisans tezi hazırladı. 1994 yılında Yüksek Lisansını tamamladı. 1995 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora yapmaya başladı. 1993 yılından beri Fırat Üniversitesi Bingöl Meslek Yüksekokulu'nda Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

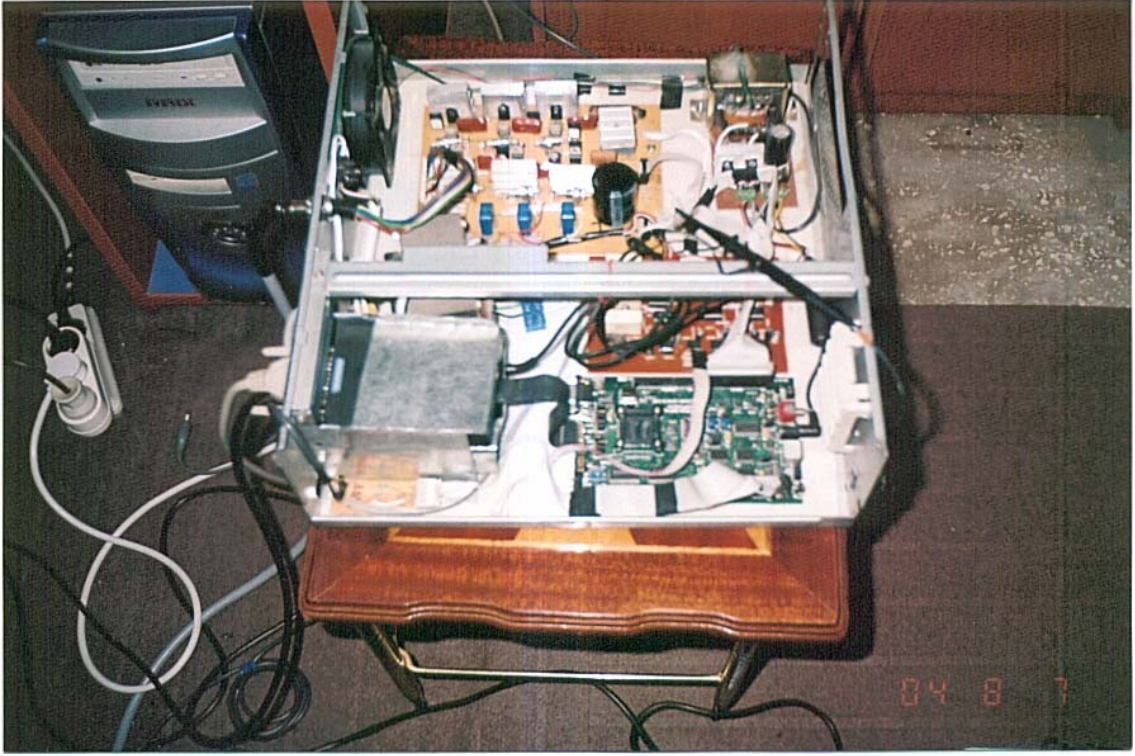
## EKLER



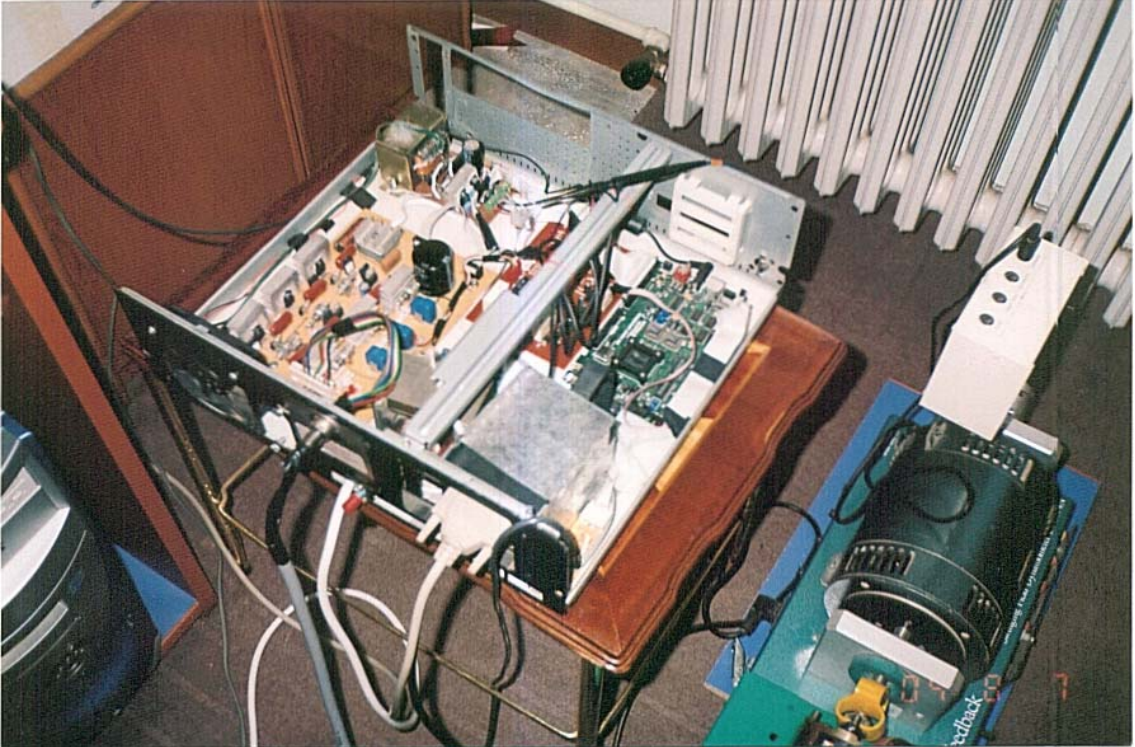
Şekil 1 Anahtarlı relüktans motor, DA şönt generatör ve ARM sürücü devresinin tümünün fotoğrafı.



Şekil 2 Anahtarlı relüktans motor ve DA şönt generatör yakın çekim fotoğrafı.

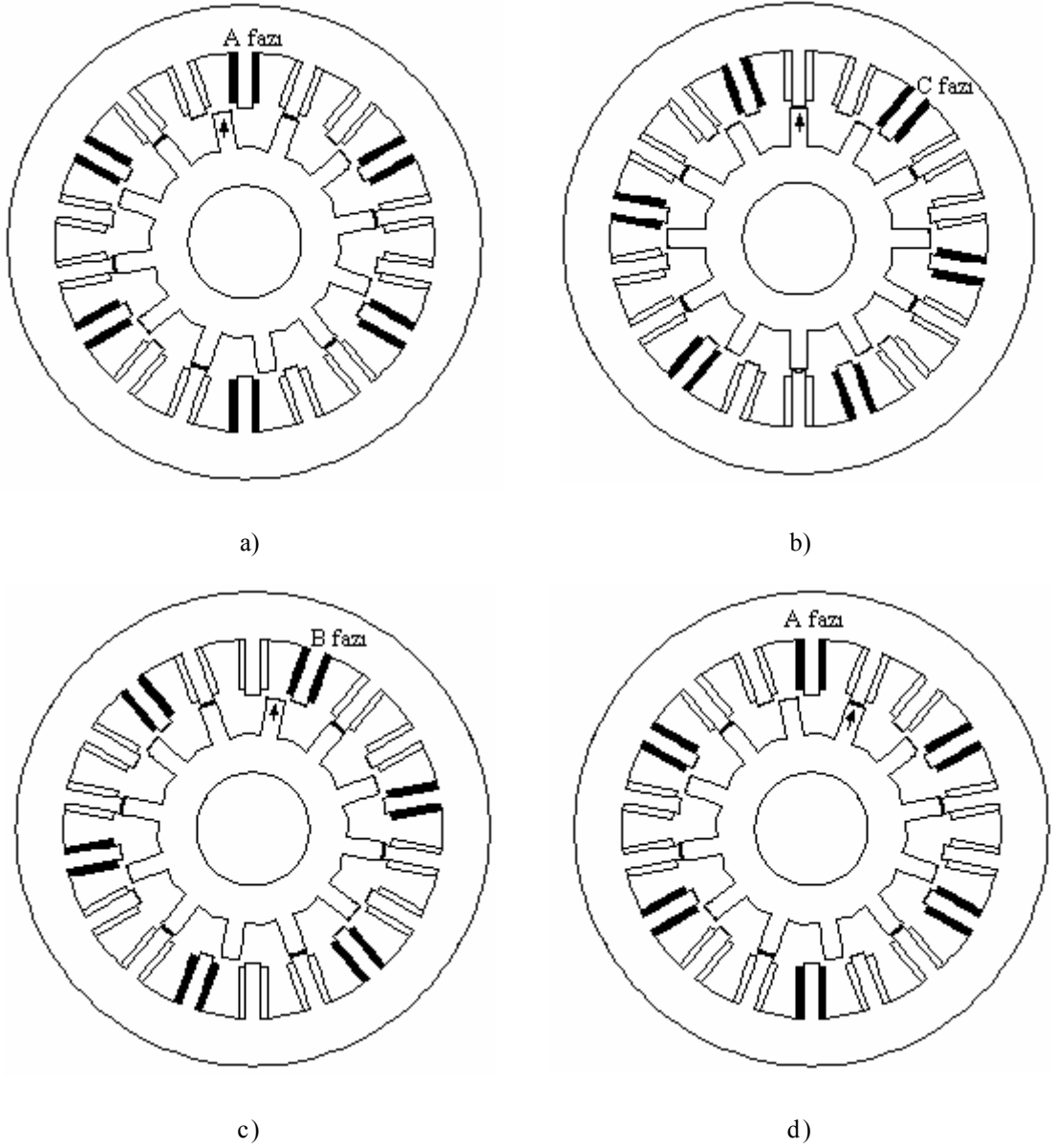


Şekil 3 ARM sürücü devresinin fotoğrafı.



Şekil 4 ARM sürücü devresinin kablo bağlantılarının olduğu taraftan görünüş fotoğrafı.

## ARM'nin Mekaniksel 30° Hareketi



**Şekil 5** ARM'nin saat yönünde 30°'lik mekaniksel dönüşü üç adımda a), b), c), d) şıklarında gösterilmiştir.

$N_s/N_r = 18/12$  ARM'nin saat yönünde mekaniksel 30 derece dönüşü şekil 5'de a, b, c ve d şıklarında sırayla gösterilmiştir. a) şıkında A fazına enerji verilir. Rotor stator kutbu ile çakışık konuma gelene kadar döner. b) şıkında C fazına enerji verilir, rotor çakışık konuma ulaşınca c) şıkındaki gibi B fazına enerji verilir. Böylece fazların bir periyodu tamamlanmış olur. d) şıkında A fazının tekrar enerjilenmesine sıra gelir. Motorun mekaniksel bir devir yapabilmesi için a, b ve c şıklarındaki hareketin 12 defa tekrarlanması gerekir. Şayet A, B, C faz sırasıyla sargılara enerji verilirse motor saat yönünün tersine dönecektir.