

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLARINDA
BULANIK MANTIK VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE
KONUM ALGILAYICISIZ DENETİM**

**DOKTORA TEZİ
Taşdemir AŞAN**

Anabilim Dalı : Elektrik Mühendisliği

Programı : Elektrik Mühendisliği

HAZİRAN 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLARINDA
BULANIK MANTIK VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE
KONUM ALGILAYICISIZ DENETİM**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Taşdemir AŞAN
(504902023)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Nisan 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Haziran 2008**

Tez Danışmanı :

Prof.Dr. Emin TACER

Diğer Jüri Üyeleri

Prof.Dr. Oruç BİLGİÇ (Y.T.Ü.)

Prof.Dr. Faik MERGEN (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU (KOÜ)

Prof.Dr. Serhat ŞEKER (İ.T.Ü.)

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

1984 yılında, İstanbul Teknik Üniversitesi'nde başladığım lisans öğrenimimden bu yana, hem Yüksek Lisans çalışmamda hem de Doktora eğitimim boyunca bana ışık tutan, üniversitedeki görevimde her zaman destek olan ve eğitim-öğretim konusundaki deneyimlerini benimle paylaşan Hocam, Sayın Prof.Dr. M.Emin TACER'e teşekkürü bir borç bilirim.

Her türlü konuda, her zaman bana destek olan, sevgilerini esirgemeyen, özel yaşamımda olduğu kadar doktora çalışmalarım da bana moral veren AİLEM'e en derin şükranlarımı sunarım.

Haziran, 2008

Taşdemir AŞAN

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vii
TABLO LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
SEMBOL LİSTESİ	xiii
ÖZET	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Anahtarlama Relüktans Motorunun (ARM) Tarihçesi	1
1.2. ARM ile İlgili Çalışmalar	3
1.3. Çalışmanın Amacı ve Yapısı	4
2. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORU (ARM)	7
2.1. Giriş	7
2.2. Yapısal Özellikleri	7
2.2.1. Olumlu ve olumsuz yanları	8
2.2.2. Motor tipleri	9
2.3. Çalışma İlkesi	10
2.3.1. Endüktans değişimi	12
2.3.2. Moment oluşumu	12
2.4. Güç Elektronik Besleme Devreleri ve Denetimi	15
2.5. Rotor Konum Algılayıcıları	19
2.6. Akı-Akım Özeğrilerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi	20
2.7. Moment-Hız Karakteristiği	23
3. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORU (ARM) DENETİMİ	25
3.1. Giriş	25
3.2. ARM'nda Konum Algılayıcılı Denetim	25
3.3. ARM'nda Konum Algılayıcısız Denetim	27
3.3.1. Endüktans Algılamaya Dayalı Konum Algılayıcısız Denetim	29
3.3.2. Akı-Akım Özeğrilerine Dayalı Konum Algılayıcısız Denetim	30
4. BULANIK MANTIK (BM) VE YAPAY SİNİR AĞLARI (YSA) İLE ROTOR KONUM ALGILAYICISIZ DENETİM	31
4.1. Giriş	31
4.2. Bulanık Mantık	31
4.2.1. Elektrik Makinelerinde Bulanık Mantık	32
4.2.2. ARM'nun BM ile Denetimi	32
4.3. Yapay Sinir Ağları ve Modelleri	36
4.4. YSA'da Öğrenme	37
4.5. Geri Yayılım Algoritması	38

5. TMS320C240 SAYISAL İŞARET İŞLEMCİ (Sİİ) İLE OLUŞTURULAN DENETİM ALGORİTMASI	41
5.1. Giriş	41
5.2. Programın Yapısı	41
5.3. Öğrenme Algoritması	42
5.4. Aktarım Algoritması	47
5.5. Hız Kestirimi ve Denetimi	48
6. GERÇEKLEŞTİRİLEN SİSTEMİN YAPISI, DENEY VE BENZETİM SONUÇLARI	49
6.1. Giriş	49
6.2. Sistemin Yapısı	49
6.3. Deney Düzeni	50
6.4. Deney ve Benzetim Sonuçları	51
7. SONUÇLAR	59
KAYNAKLAR	61
EKLER	69
ÖZGEÇMİŞ	101

KISALTMALAR

ARM	: Anahtarlmalı Relüktans Motoru
BM	: Bulanık Mantık
YSA	: Yapay Sinir Ağları
Sii	: Sayısal İşaret İşlemci

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 4.1. : BM denetim kuralları	34

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : 6/4 ve 8/6 motor kesitleri.	8
Şekil 2.2 : 4/2 ve 10/8 kutuplu ARM kesitleri.	10
Şekil 2.3 : ARM sistemi blok gösterimi.....	11
Şekil 2.4 : Akım ve konuma bağlı endüktans değişimi.....	12
Şekil 2.6 : Doğrusal akı-akım karakteristiği.	13
Şekil 2.7 : Doğrusal durumda endüktans ve moment.	14
Şekil 2.8 : ARM köprü besleme devresi.....	15
Şekil 2.9 : Miller besleme devresi.	17
Şekil 2.10 : Basit optik algılayıcı yapısı.	19
Şekil 2.11 : $h(t)$ fonksiyonu.....	22
Şekil 2.12 : Akı-Akım karakteristiği.	23
Şekil 2.13 : Moment-hız karakteristiği.	23
Şekil 4.1 : BM Denetleyici.	33
Şekil 4.2 : Üyelik Fonksiyonları.....	33
Şekil 4.3 : Tasarım sırasında denenen üyelik fonksiyonlarından birine ilişkin benzetim	35
Şekil 4.4 : Tasarım sırasında denenen farklı bir üyelik fonksiyonuna ilişkin benzetim.....	35
Şekil 4.5 : ARM'nun hız denetiminde kullanılan üyelik fonksiyonu ve kural tablosu.	36
Şekil 5.1 : Konum algılayıcısız denetim blok gösterimi.	42
Şekil 5.2 : Öğrenme algoritması.	43
Şekil 5.3 : ARM deneysel olarak elde edilen akı-akım karakteristikleri.....	44
Şekil 5.4 : ARM karşılaştırmalı akı-akım karakteristikleri	45
Şekil 5.5 : ARM'nun çakışık konuma ait karşılaştırmalı akı-akım eğrisi.....	45
Şekil 5.6 : ARM'nun ayrık konuma ait karşılaştırmalı akı-akım eğrisi	46
Şekil 5.7 : Aktarım algoritması.....	47
Şekil 5.8 : Hız denetleyici blok gösterimi.....	48
Şekil 6.1 : Gerçekleştirilen sistemin temel gösterimi.	49
Şekil 6.2 : 900 d/dak ve 0,5 Nm için faz akımlarının zamana göre değişimleri	51
Şekil 6.3 : 500 d/dak ve 0,5 Nm için faz akımlarının zamana göre değişimleri	52
Şekil 6.4 : 900 d/dak ve 0,8 Nm için faz akımlarının zamana göre değişimleri	52
Şekil 6.5 : 500 d/dak ve 0,8 Nm için faz akımlarının zamana göre değişimleri	53
Şekil 6.6 : 500 d/dak ve 1,2 Nm için faz akımlarının zamana göre değişimleri	53
Şekil 6.7 : 900 d/dak ve 1,2 Nm için faz akımlarının zamana göre değişimleri	54
Şekil 6.8 : 900 d/dak ve 0,8 Nm için faz akımları ve a fazı geriliminin zamana göre değişimleri.....	54
Şekil 6.9 : 500 d/dak ve 0,5 Nm için faz akımları ve a fazı geriliminin zamana göre değişimleri.....	55
Şekil 6.10 : 500 d/dak ve 1,2 Nm için faz akımları ve a fazı geriliminin zamana göre değişimleri.....	55

Şekil 6.11	: 900 d/dak ve 1,2 Nm için faz akımları ve a fazı geriliminin zamana göre değişimleri.	56
Şekil 6.12	: 1200 d/dak ve 1,2 Nm için faz akımları ve a fazı geriliminin zamana göre değişimleri.	56
Şekil 6.13	: 200 d/dak ve 1,2 Nm için faz akımları ve a fazı geriliminin zamana göre değişimleri.	57
Şekil 6.14	: 300 d/dak ve 0,8 Nm için a fazı akımı ve a fazı geriliminin zamana göre değişimleri.	57
Şekil Ek B.1	: 8 IGBT, 8 diyottan oluşan köprü güç elektroniği devresi	95
Şekil Ek B.2	: Akım algılayıcılar	95
Şekil Ek B.3	: Güç katı ve sürücü devre	96
Şekil Ek B.4	: Güç ve denetim sistemleri.....	96
Şekil Ek B.5	: IGBT sürücü devresi.....	97
Şekil Ek B.6	: Deney düzeneğinin görünümü.....	97
Şekil Ek B.7	: Tezde kullanılan 8/6 ARM	98
Şekil Ek C.1	: Kullanılan ARM için hazırlanan benzetim devresinin genel görünümü.....	99
Şekil Ek C.2	: Benzetim devresindeki akım denetim bloğu	99
Şekil Ek C.3	: Benzetimde kullanılan güç devresine ait aktarım bloğu	100

SEMBOL LİSTESİ

R_m	: Manyetik devrenin relüktansı
l_m	: Manyetik devrenin uzunluğu
μ	: Manyetik geçirgenlik
L	: Sargı endüktansı
N	: Sargı sarım sayısı
θ	: Rotor konum açısı
$i_1, \dots, i_4$	: Sargı akımları
L_{min}	: Sargı endüktansının minimum değeri
L_{maks}	: Sargı endüktansının maksimum değeri
M	: Motor moment
W'	: Tümleyen enerji
ψ	: Toplam manyetik akı
W	: Enerji
V	: Ara devre gerilimi
R	: Faz sargısı direnci
$v(t)$	: Faz sargısına uygulanan gerilim
CE	: Hız hatasındaki değişim
E	: Hız hatası
DU	: Referans akım
$\mu()$	: Üyelik fonksiyonu
$e(pu)$	: Hız hatası birime indirgenmiş değeri
$ce(pu)$	: Hız hatasındaki değişimin birime indirgenmiş değeri
$du(pu)$	: Referans akımın birime indirgenmiş değeri
$E(k)$	: Karesel hata
$E(c)$	: Toplam karesel hata

ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLARINDA BULANIK MANTIK VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE KONUM ALGILAYICISIZ DENETİM

ÖZET

Bu tez çalışmasının amacı, anahtarlama relüktans motorlarının, en önemli sakıncalarından biri olan, rotor konum algılayıcıları kullanmak yerine, elektriksel yanda yapılan ölçümler ile rotor konumunu dolaylı olarak belirlemektir. Anahtarlama relüktans motorları, son yıllarda, oldukça yaygın kullanılmaya başlanmakla beraber, rotor konumunun algılanması zorunluluğundan dolayı hak ettiği yeri henüz alamamıştır. Özellikle küçük güçlü sistemlerde, rotor konum algılayıcısının maliyeti, anahtarlama relüktans motorlu sistemin maliyetini önemli oranda arttırmaktadır. Bu nedenle, hem üreticiler hem de kullanıcılar tarafından yeteri kadar tercih edilmemektedir. Anahtarlama relüktans motorlarında rotor konum algılayıcısız denetim amacına yönelik çeşitli yöntemler ortaya atılmıştır. Bu yöntemlerin, tezin giriş bölümünde açıklanacağı üzere çeşitli olumsuzlukları vardır. Tezde öngörülen konum algılayıcısız denetimin gerçekleştirilmesi için, bu amaca uygun olarak, rotor konumunun belirlenmesinde yapay sinir ağlarından faydalanılmıştır. Aynı zamanda, motorun hız denetiminde de klasik denetim yöntemlerinin yerine bulanık mantık denetleyici kullanılmıştır. Bulanık mantık ve yapay sinir ağlarının kullanımı ile anahtarlama relüktans motorlarının karmaşık matematiksel modellerinin elde edilmesi veya kullanılması zorluğundan kurtulunmuştur. Tezin birinci bölümü, anahtarlama relüktans motorlarının tarihçesini, yapılan araştırmaları ve konum algılayıcısız çalışma yöntemlerini içermektedir. İkinci bölümde, motorun yapısı, olumlu ve olumsuz yanları, tipleri ve çalışma ilkesi anlatılmış ve bu tezin uygulama kısmında kullanılacak güç elektroniği besleme devresi tanıtılmıştır. Ayrıca, bazı önemli karakteristikleri verilmiştir. Üçüncü bölümde, anahtarlama relüktans motorunun, konum algılayıcı ve konum algılayıcısız denetim yöntemleri genel olarak açıklanmıştır. Dördüncü bölümde, motorun konum algılayıcısız denetiminde kullanılan bulanık mantık ve yapay sinir ağları ile ilgili temel kavramlar verilerek, denetimin genel ilkeleri açıklanmıştır. ARM'de kullanılacak bulanık mantık denetleyici ve yapay sinir ağları modeli

anlatılmıştır. Beşinci bölüm, bütün bu denetim işlemlerinin gerçekleştirilmesi için TMS320C240 sayısal işaret işlemcisine özgü hazırlanan algoritmalar ve akış şemalarına ayrılmıştır. Altıncı bölüm, sistemde kullanılan donanımlara ve özelliklerine yer vermektedir. Yine bu bölümde, yapılan deneysel çalışma ve benzetime ilişkin sonuçlar verilmiştir.

Sonuç olarak, anahtarlama relüktans motorlarının bulanık mantık ve yapay sinir ağları ile konum algılayıcısız denetiminin ortaya koyduğu özellikler ve üstünlükler sunulmuştur. Böyle bir sistemle, anahtarlama relüktans motorunun denetiminin klasik denetim yöntemlerinin yanında çok daha hızlı cevap vermesi, daha basit yapıya sahip olması gibi sonuçların ortaya çıktığı gözlenmiştir.

POSITION SENSORLESS CONTROL OF SWITCHED RELUCTANCE MOTORS BY USING FUZZY LOGIC AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

SUMMARY

The aim of this thesis is to determine the rotor position in an indirect method. This determination is done by means of electrical measurements instead of using the rotor position sensors which is the most defective problem of switched reluctance motors. Although, in last decades the switched reluctance motors are used in many fields, the difficulties in the determination of rotor position makes this type of motors not preferable. Especially, in the low power system, the cost of rotor position sensing increases the overall cost of switched reluctance system. As a result of this fact, switched reluctance motor is not preferred not only by the producer firms but also by the users. Many methods have been developed to perform a control without rotor position sensors in the switched reluctance motor world. These methods have many disadvantages as described in the introduction of this thesis. Relevant to the main idea of the thesis artificial neural networks were used in order to perform the control without position sensors. On the other hand, the fuzzy logic controller was used instead of classical speed control methods of the motor. By using fuzzy logic and artificial neural networks the difficulties because of the necessity of using the complex mathematical models in switched reluctance motors are eliminated. The content of the first chapter of the thesis, is the historical review of switched reluctance motors and the methods of rotor position estimation. In the second chapter; the construction of motor, its advantages and disadvantages, motor types and the operation principle are explained and the power electronics converter which is used in the performance of the thesis is described. Also, some important characteristics are given. The third chapter includes basic methods for control of switched reluctance motor with and without position sensors. The fourth chapter includes the basic idea of control and the fundamental notions of fuzzy logic and artificial neural networks which are used to control switched reluctance motor without using position sensor. The fuzzy logic controller and the artificial neural

network model that will be used in switched reluctance motor, have described. The content of the fifth chapter is algorithm which is prepared according to the TMS320C240 digital signal processor and the flow-charts. The sixth chapter includes the hardwares which were used in the system, experimental and simulation results for several conditions.

As a result, the specialities and the advantages of sensorless control of switched reluctance motors using fuzzy logic and artificial neural network are presented. Compared to the classical control strategies, system response of the motor will be faster and the structure of control will be simpler by using this type of control system.

1.GİRİŞ

Elektrik motorları, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren elektromekanik enerji dönüşüm aygıtlarıdır. Elektrik motorları, yüzyılı aşkın bir süredir kullanılmaktadır. Bu zaman zarfında, dünyanın her yerinde sayısız araştırma yapılmıştır. Elektrik motorları ve çalışma ilkelerinin geliştirilmesi, ondokuzuncu yüzyılın ortalarından günümüze değin sürdürülmektedir. Elektrik makinelerinin teknolojik gelişimi oldukça yavaştır ve uzun bir süreç gerektirmektedir. Günümüz araştırmacıları, hala bu motorlar üzerinde, gerek yapısal özellikler, gerekse denetim yöntemleri ile ilgili yenilikler ve iyileştirmeler yapmaktadır. Bu yüzyılın başlarında, çalışma ilkeleri ve yapısı tasarlanmış bazı motorlar ise uzun süre uygulama alanı bulamamıştır. Ancak, güç elektroniği elemanları ve sayısal işlemcilerin gelişimlerine paralel olarak bu motorlar da uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Anahtarlamalı relüktans motoru (ARM) ve sürekli mıknatıslı motorlar bunların başında gelmektedir. Özellikle relüktans makinesi çok eski bir geçmişe sahip olmasına karşın uzun yıllar araştırmacılar bu konuda suskun kalmışlardır.

Bu tez çalışmasında, incelenen motor anahtarlamalı relüktans motorudur. Çalışmanın bu bölümünde söz konusu motorla ilgili olarak günümüze kadar olan çalışmalar, gelişimi, ortaya çıkan sonuçlar ve karşılaşılan sorunlar ve bunların çözümlerine yönelik literatürde yapılanlar açıklanacaktır. Bu bölümde, son olarak ARM'nin en önemli olumsuzluklarından biri olan rotor konum algılayıcı kullanım zorunluluğunun ortadan kaldırılması ve motorun denetim koşullarının iyileştirilmesine yönelik tasarlanan çözüm kısaca tanıtılmıştır.

1.1. Anahtarlamalı Relüktans Motorunun (ARM) Tarihçesi

Relüktans motorları, hem rotor hem de statorunun çıkık kutuplu olması nedeniyle, relüktans momenti ilkesine göre çalışan bir yapıya sahiptir. Söz konusu ilke, tarihte yapılan ilk elektromekanik deneylerden bu yana bilinmektedir. Bilim insanları, 19.yüzyılın ilk yarısında bu ilkeyi kullanarak devamlı elektriksel hareket üretmenin yollarını aramışlardır. İlk çalışmalara elektromanyetik makineler adını vermişlerdir. H.M.Noad'un 1859 yılında basılan kitabında [1], bu çalışmaların gelişimine yer verilmiştir. Bazı tasarımların günümüz relüktans motoruna benzerliği dikkat çekicidir. W.H.Taylor, 1838 yılında kendi tasarladığı elektromanyetik makine için A.B.D.'den

ve 1840 yılında da İngiltere'den patent almıştır [2]. Motor, tahta bir tekerlek üzerine yerleştirilmiş yedi küçük demir parçasından ve tekerleğin içinde serbestçe dönebileceği dört elektromıknatıslı bir iskeletten oluşmaktaydı. Taylor'un makinesindeki mıknatıslar öyle sıralanmıştı ki, dönüş yönü ne olursa olsun, elektromıknatıslardan he rbiri birbirinden bağımsız olarak moment üretebiliyordu. Bu görüş, günümüzdeki relüktans motorlarının farklı stator ve rotor kutup sayılarına sahip olmaları ile özdeştir. Bu makinede, konumu saptayan mekanik bir aktarım elemanı (mekanik komütatör) kullanılıyordu. Yumuşak demir parçalarından biri elektromıknatısla hizaya gelinceye kadar elektromıknatıs enerjilendiriliyor, sonra enerjisi kesiliyordu. Taylor, ayrıca elektromıknatıslardan akan akımların yönlerinin bir yönde olması gerektiğini vurgulamıştı. Böylece güç kaynağı ile bağlantı şekli basitleşmiş oluyordu. Ayrıca, mekanik aktarım elemanının üzerinde bulunan gelişmiş bir kol düzeneği ile elektromıknatısların enerjilendirilme açıları değiştirilerek motorun frenlenmesi ya da dönüş yönünün değiştirilmesi sağlanıyordu. Bu makineyle ilgili ayrıntılı açıklamaların bir dergide yayınlanması [3] ile benzer çalışmalar yapan pek çok bilim insanının projelerini yarıda bırakmalarına sebep olmuştur. Bu bilim insanlarından biri de Aberdeen'den Robert Davidson 'du. Davidson aynı derginin editörüne gönderdiği yazıda Taylor'un çalışmasının "ilk" diye nitelendirilmesini reddetmiş ve benzeri bir çalışmaya daha önce kendisinin yaptığını bildirmişti [4]. Davidson, daha sonra çalışmalarını geliştirmiş ve 1842 yılında altı adımlı bir relüktans motoru kullanarak, Edinburgh'dan Glasgow'a uzanan demiryolu hattında çalışan bir elektrikli lokomotif yapmıştır [5,6]. Fakat, daha sonra,düşük hızlarda lokomotifin başarısız olduğu kendisine rapor edilmişti. Bütün bu bilim insanlarının karşılaştığı sorunların başında, makineye güç sağlayan akümülatörlerin boyutları idi. Diğer bir önemli sorun da demir çekirdekte meydana gelen aşırı ısı kayıplarıydı. Ayrıca, hava aralığının geniş olması nedeniyle manyetik kuvvetlerde oluşan dengesizliklerdi. Relüktans motoruna benzerlik gösteren diğer elektromanyetik makineler Bain, Wheatstone ve Henley tarafından gerçekleştirilmiştir [1]. Bütün bu çalışmalara karşın, bu motorlarda ortaya çıkan aşırı moment salınımlarının olumsuz etkilerinin yanı sıra, doğru akım motorlarının icadı da bunların bir yana bırakılmasına neden olmuştur.

Bu ilk denemelerden 100 yıl kadar sonra, mekanik aktarım elemanının yerine geçecek yarıiletken güç anahtarları gündeme gelmiştir. 1960'ların ortalarından önce relüktans ilkesinden faydalanan tek makine tipi, senkron makinelerdi. Güç elektroniği anahtarlarının gelişmesi ve bilgisayar destekli elektromanyetik tasarımlardaki ilerlemeler, anahtarlama relüktans motorlarının araştırmacılar tarafından daha çok ilgi görmesine ve de yaygın olarak değişken hızlı uygulamalarda kullanılmasına yol açmıştır. 1980 yılında, Lawrenson ve arkadaşları,

değişken hız uygulamalarında kullanılabilen bir sistem sunmuşlardır [7]. O günden bu güne, ARM konusunda, kayda değer pek çok akademik ve endüstriyel araştırma yapılmıştır. ARM günümüzde de, araştırmacıların en gözde çalışma konularından biri olmaya devam etmektedir.

1.2. ARM ile İlgili Çalışmalar

1980 yılında, Lawrenson ve ekip arkadaşları tarafından sunulan çalışmadan sonra, araştırmalar bu makine üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu çalışmalar, temel olarak altı ana başlıkta toplanmaktadır. Birinci gruptaki çalışmalar, makinenin çalışma ilkesi ve teorisinin ortaya çıkarılmasına, geliştirilmesine ve motor tasarımına yönelik çalışmalardır [8,23,32,34,39]. İkinci grup çalışmalarda, makinenin modellenmesi ve sayısal benzetimine ağırlık verilmiştir [9,10,11,23,24,28,33,34,41-43]. Üçüncü gruptaki çalışmalar motorun yapısal geliştirilmesi üzerinde yoğunlaşmışlardır [13,28,37,39,40]. Dördüncü grupta toplanan çalışmaların içeriğini, güç elektroniği besleme devrelerinin geliştirilmesi oluşturmaktadır [10,12,14,20,29,32,36,38,46]. Beşinci grup araştırmalar, sayısal işlemci tabanlı hız ve moment denetimi yöntemleri, motorun performansını artırıcı geliştirmeler ve endüstriyel uygulamalarını içermektedir [15-19,22,25,27,30,31,35,40,44,45,47]. Son gruptaki çalışmalar, rotor konum algılayıcıların kullanılması yerine konumun dolaylı olarak belirlenmesine yöneliktir [21,26,45-50]. Bu çalışmalar, yapılan tez çalışmasının ana fikrini meydana getirmektedir. İlk dört gruptaki çalışmalar, günümüzde doyma noktasına gelmiştir. Ancak, son iki gruptaki araştırmalar yoğun olarak sürmektedir.

Daha sonra ilgili bölümde ayrıntılı çalışma ilkesi verilecek olan ARM'de, motorun sürekli dönebilmesi için fazların enerjilendirilme anlarının belirlenmesi amacıyla rotor konumunun algılanması gerekmektedir. Yukarıda verilen ilk beş grupta bununla ilgili olarak optik, hall etkili veya endüktif değişik konum algılayıcılar kullanılmıştır.

ARM'lerin endüstride kullanımı, özellikle küçük güçlü uygulamalarda, hem maliyetin düşük olması, hem de boyutlarının küçük olması açısından bir takım yeni olanakların düşünülmesini zorunlu kılmıştır. Bu açıdan bakıldığında, yukarıda da verildiği gibi 6. gruptaki çalışmalar gündeme gelmiştir. Başka bir deyişle, rotor algılayıcısız ARM'ler üzerine yoğunlaşmıştır. Bunlarla ilgili olarak yapılan literatür taraması sonucunda, çalışmaların, uygulanan yöntemlere göre beş ana grupta toplanabileceği görülmüştür.

1. Akı-Akım Yöntemi: Bu yöntemde denetlenecek motor için deneysel olarak hazırlanan akım-akı-endüktans-konum bilgilerini içeren tablolardan (look-up table) faydalanılarak enerjilendirilen faz sargısı akım ve gerilim ölçümü ile konum belirlenmektedir. Denetlenecek motora ait

çok sayıda tablonun oluşturulması ve ancak bu tablolardaki değerlerle sınırlı olması yöntemin sakıncalı yanını oluşturmaktadır[51,52,53].

2. Pasif Dalga Şekli İzleme Yöntemi: Yöntem hareket sonucu endüklenen gerilim ilkesine dayanmaktadır. Bilindiği gibi endüklenen hareket geriliminin ani değeri rotor konumuna bağlı olduğundan akımın zaman göre değişiminden etkilenen gerilimin elektronik olarak gözlenmesi ile rotor konumu belirlenmektedir. Bu yöntem, adım motorları için geliştirilmiş olup düşük hızlarda uygun sonuçların elde edilmesini mümkün kılmamaktadır[54,55].
3. Artımsal (incremental) Endüktans Ölçümü: Yöntem, rotor konumunun akımın yükselme ve alçalma zamanlarına bağlı olarak belirlenmesi temeline oturtulmuştur. Yöntemin uygulanmasında enerjilendirilen faz sargılarının kullanılabileceği gibi boştaki faz sargısı da kullanılmaktadır. Her ne kadar geniş bir hız aralığında çalışma olanağı verse de; örnekleme zamanının ve bu zamanlara karşılık düşen işaretlerin belirlenmesindeki zorluklar, yöntemin sakıncalı yanını oluşturmaktadır[56,57,58].
4. Karşıt Endüklem Yöntemi: Bu yöntem, sargılar arasındaki karşıt endüklem nedeniyle endüklenen gerilimlerin ölçülmesi ve değişik çalışma koşulları içeren tabloların (look-up table) oluşturulması üzerine kurulmuştur. Yöntem, birinci yöntemde vurgulanan aksaklıkları içermektedir[59,60].
5. Gözlemciye (observer) Dayalı Yöntemler: Bu yöntemler, ARM'nin lineer olmayan yapısı göz önüne alınarak zamanla değişken doğrusal gözlemcilerin modellenmesine dayalıdır. Yöntemin uygulanmasında kayan kip (sliding-mode) denetimi ve düşük dereceli Luenberger gözlemciler kullanılmaktadır. Yöntem, hassas ve uzun hesaplamalara dayandığından karmaşıktır[61,62,63].

1.3. Çalışmanın Amacı ve Yapısı

Yukarıda anılan çalışmalarda klasik kontrol yöntemlerinden faydalanılmaktadır. Bu da, yukarıda belirtilen sakıncaların yanı sıra, sistemin yavaş çalışmasına neden olmaktadır. Ayrıca konum algılayıcılı sistemlerde denetim amacıyla Bulanık Mantık (BM) ve ARM'nin modellenmesinde de Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanılmaktadır. Bütün bunların sonucunda, ARM'nin denetiminde BM ve YSA kullanımının mümkün olduğu ortaya çıkmıştır[64,65,66]. Yukarıda verilen konum algılayıcısız yöntemlerde

ortaya çıkan aksaklıkların giderilmesi ve gerçek zamanda denetim yapılması amacıyla bu tez çalışmasında, ARM'de konum algılayıcısız denetimin, BM ve YSA ile birlikte sağlanması amaçlanmıştır. Böylece, motorun doğrusal olmayan yapısına karşın BM ve YSA kullanımı ile cevabı hızlı, öğrenen ve karar verebilen bir sistem oluşturulmuştur.

Yukarıda belirtilen amaca uygun olarak tezin birinci bölümünde, ARM'nin tarihçesi ile ilgili genel bir bilgi verilmiş, rotor konum algılayıcılı ve algılayıcısız sistemlerle ilgili olarak literatürde yapılanlar özetlenmiş, karşılaşılan sorunlara değinilmiş ve tezin amacı ve yapısı tanıtılmıştır. Tezin ikinci bölümünde ARM'nin yapısal özellikleri, endüktansa bağlı olarak çalışma ilkesi ve daha sonraki bölümlerde kullanılacak matematiksel modeli ve ilgili özeğrileri açıklanmıştır. Tezin üçüncü bölümünde, konum algılayıcısı kullanım gereği ve tezin amacı doğrultusunda konum algılayıcısız denetim ile ilgili kapsamlı bir açıklama yapılmıştır. Dördüncü bölümde, tezde öngörülen rotor konum algılayıcısız denetimin genel ilkeleri, moment ve hız denetiminde kullanılacak BM ve rotor konumunun dolaylı olarak belirlenmesi için kullanılacak YSA modeli açıklanmıştır. Tezin beşinci bölümünde TMS320C240 Sayısal İşaret İşlemcinin (Sİİ) denetimi için geliştirilen algoritmalar ve bunlarla ilgili birimlerin işleyiş özellikleri açıklanmıştır. Tezin altıncı bölümünde, ARM'nin BM ve YSA ile konum algılayıcısız denetimi için geliştirilen ve tezin beşinci bölümünde verilen algoritmaları içeren devreler, sürücü sistemin yapısı ve deney düzeneği tanıtılmıştır. Ayrıca, gene bu bölümde, oluşturulan tüm sistemin değişik çalışma durumlarını içeren benzetim yapılmıştır. Tezin son bölümü olan yedinci bölümde, benzetim sonuçları ile deney sonuçlarının karşılaştırılması yapılmış ve algılayıcısız denetim ile ilgili olarak daha önce yapılan çalışmalarla karşılaştırılması verilmiş ve buna bağlı olarak daha sonra yapılabilecek çalışmalar açıklanmıştır.

2. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORU (ARM)

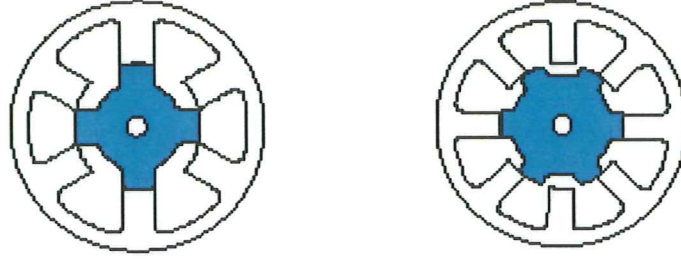
2.1. Giriş

Bu bölümde; Anahtarlama Relüktans Motorları'nın (ARM) yapısal özellikleri, diğer elektrik motorlarına göre ortaya çıkan olumlu, olumsuz yanları, motor tipleri çalışma ilkesi, sargı endüktansının rotor konumuna bağımlı değişimi ve buna bağlı olarak moment üretiminin nasıl gerçekleştiği açıklanmıştır. Bunların yanı sıra, motorun çalışması için gerekli iki öge olan güç elektroniği besleme devreleri ve rotor konum algılanması açıklanmıştır. Tezin uygulama kısmında güç elektroniği besleme devresi olarak bu bölümde anlatılan köprü devresi kullanılmaktadır. Ayrıca, tezin ana konusu olan rotor konum algılayıcısız denetimde, yapay sinir ağları ile kurulan modelin gerçek deney sonuçları ile uyumunu belirlemek amacıyla ARM'nun en önemli karakteristiği olan akı-akım karakteristiklerinin deneysel olarak elde edilmesi verilmiştir. Gene bu bölümde, motorun, moment–devir sayısı karakteristiği ve davranışının incelenmesine yer verilmiştir.

2.2. Yapısal Özellikleri

Yapısı gereği sürekli hareket yapan değişken relüktanslı adım motoru olarak düşünülebilen ARM, stator ve rotorunda çıkık kutupları bulunan ve yalnızca statorunda bağımsız doğru akım sargıları mevcut olan bir elektrik motorudur. Stator ve rotor gövdeleri sac paketlerinden oluşmaktadır. Rotorda sargı alüminyum iletken veya sürekli mıknatıslar bulunmamaktadır. Statorunda oluklara yayılmış sargılar yerine her bir kutup için ayrı ayrı sarılmış basit sargılar kullanılmaktadır. Stator sargıları birbirlerinden bağımsız olarak her bir stator çıkık kutbuna yerleştirilmiştir. Stator sargıları karşılıklı olarak birbirleriyle seri bağlanarak bir faz sargısını oluştururlar. Bundan dolayı motorun faz sayısı stator kutup sayısının yarısına eşittir. Ayrıca makinenin yapısal özelliğini ortaya çıkaran önemli büyüklüklerden ikisi de stator ve rotor kutup sayılarıdır. Şekil 2.1'de 6/4 ve 8/6 kutup sayılarına sahip iki örnek kesit verilmiştir. Burada verilen ilk sayılar stator; ikinciler de rotor kutup sayılarını göstermektedir. Şekil 2.1'den de görüldüğü gibi motor, yapısal olarak oldukça basittir. Bu da hem üretim hem de onarımda kolaylıklar sağlamaktadır. Motor sargıları, herhangi bir alternatif veya doğru gerilim kaynağına bağlı olduğunda

rotorun sürekli hareketini sağlamak olanaksızdır. Bu yüzden motorla birlikte bir de uygun yapıda güç elektroniği devresi kullanılmaktadır.



Şekil 2.1 6/4 ve 8/6 motor kesitleri.

2.2.1. Olumlu ve olumsuz yanları

ARM'nun üzerine yapılan araştırmalar; motorun diğer elektrik motorlarına göre pek çok üstünlüklerinin olduğunu, bunun yanı sıra olumsuz yanlarının da mevcut olduğunu ortaya çıkarmıştır [7,8,9,10,13].

Stator ve rotor yapısının oldukça basit olması, üretimde kolaylık ve düşük maliyet sağlamaktadır. Bakım gerektirmemekte ve çalışma ömürleri uzun olmaktadır. Motorun hareketli kısmı olan rotorunda sargı veya mıknatıs bulunmaması; yalnızca sac paketlerinden oluşması önemli bir üstünlük olarak ortaya çıkmaktadır. Bu rotor yapısından dolayı ARM zor koşullarda sorunsuz çalışabilmektedir [7,8,9,19]. Özellikle mıknatıslı motorlarda yüksek sıcaklıklarda veya hızlarda ortaya çıkabilen mıknatıs sorunları gibi sorunlar ARM'nda yaşanmamaktadır. Rotorun tek parçalı bu yapısı nedeniyle, diğer motorlara göre daha yüksek hızlarda çalışma olanağı sağlamaktadır. ARM ile 20000-25000 d/d'lık hızlara herhangi bir mekanik önlem almadan çıkmak olanaklıdır [7,9,19,22]. Bu motorlar, çok düşük hızlarda da nominal momentini verebilmektedir. Böylece çok geniş bir hız aralığında çalışma olanağı sağlamaktadır. ARM'nda kayıpların tamamına yakını statorunda oluşmaktadır. Bu da soğutma için kolaylık sağlamaktadır. Çoğu elektrik motorunda rotor en çok ısınan elemandır. Hem rotor hem de statorun soğutulması gerekmektedir. ARM'ndaki rotor yapısı kendi kendini soğutabilecek hava akışı özelliğine de sahiptir. Motorun dönüş yönü sargı akımının yönünden bağımsızdır. Bu da, kullanılan elektronik devrelerin maliyet ve denetim zorluğunu en aza indirmektedir [7,9,12,14,20]. Yol alma momenti yüksek bunun yanında yol alma akımı düşüktür. ARM'nun birim hacim için ürettiği mekanik çıkış gücü diğer motorlara göre oldukça yüksektir [7,8,9,10,13,19]. Döndürme momenti/eylemsizlik oranı büyüktür. ARM performans açısından da doğru akım motor gruplarının üstünlüklerini taşımaktadır. Özellikle 4-bölgede çalışma olanağı ve yüksek dinamik özellikler sağlamaktadır. ARM'nda kullanılan elektronik besleme devreleri, diğer elektrik motorlarının besleme devrelerine göre

hata ve kısıadevrelere karşı daha dayanıklı bir yapıya sahiptirler. Aynı zamanda bu sistemin verimi de oldukça yüksektir [7,8,9,10].

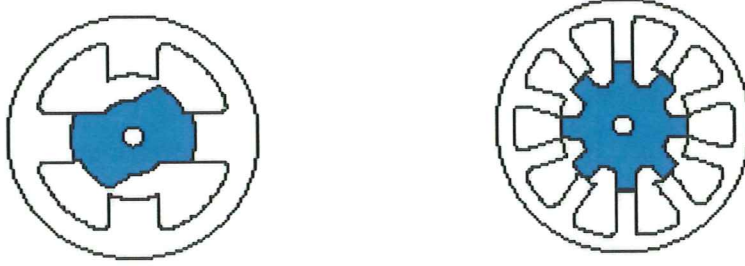
Yukarıdaki paragrafta sözü edilen tüm olumlu özelliklerinin yanında, ARM'nun da diğer elektrik motorları gibi hem mekanik, hem de elektriksel temelli olumsuz yönleri bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi; motorun çalışma ilkesinden kaynaklanan güç elektroniği devresi gereksinimidir. Rotorun sürekli olarak hareketinin sağlanabilmesi için faz sargılarının ardışık olarak doğru gerilim kaynağına bağlanması, aynı zamanda rotor konumunun algılanması ihtiyacını da ortaya çıkarmaktadır [7,8,9,15, 21,22]. Bu durum, ARM'nun ikinci önemli olumsuz özelliğidir. ARM'nda karşılaşılan bu önemli olumsuzluk, bu çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Rotor konumunun doğrudan algılanması için kullanılan algılayıcılar, ARM sistemleri hem bir ek maliyet, hem de ek arıza riski getirmektedir. Özellikle, küçük güçlerdeki uygulamalarda motor ve güç elektroniği devresi maliyetinin düşük olduğu göz önüne alındığında konum algılayıcıların getireceği yük daha da ön plana çıkacaktır. ARM'nun yapısından kaynaklanan bir olumsuzluk da moment titreşimleri ve gürültülü çalışmadır. Bunların başlıca kaynağı momentin sürekli olmayışı, başka bir deyişle ardışık olarak farklı faz sargıları tarafından oluşturulmasıdır. Moment titreşimlerine neden olan diğer bir etken de akım denetimidir. Moment titreşimlerinin azaltılabilmesi için çeşitli araştırmalar yapılmış olup bu konu hala araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Hava aralığının küçük oluşu nedeniyle radyal yöndeki simetrisizliklere çok duyarlıdır. Bu da rotorun yataklanmasının çok iyi olması gereğini ortaya koymaktadır. Diğer taraftan, besleme devresine giden iletken sayısının fazlalığı, karmaşık bir bağlantı yapısının ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Yukarıda anılan olumsuz özelliklerine karşın, ARM günümüzde oldukça geniş bir güç ve hız aralığında uygulama alanı bulmaya başlamıştır. Son yıllarda ARM ile ilgili sürdürülen yoğun araştırmalar, yeni iyileştirmeler ve çözümler ortaya koymaktadır. Bu iyileştirmelerin bir kısmı motor tasarımı sırasında alınan yapısal önlemler olmakla beraber, oldukça büyük bir bölümünü yeni denetim stratejileri oluşturmaktadır [45,46,47,50].

2.2.2. Motor tipleri

ARM; bir, iki, üç, dört ve daha çok faz sayılı olarak yapılabilmektedir. Genellikle rotor kutup sayıları, stator kutup sayılarından 2 kutup daha azdır. Örnek olarak 4/2, 6/4, 8/6, 10/8, 12/10 kutup sayılarına sahip motorlar verilebilir. Ancak 2/2, 6/2, 10/4, 12/10 vb. kutup sayılarında motorlara da rastlanmaktadır. Yaygın olarak 6/4 ve 8/6 kutuplu motorlar kullanılmaktadır. Bunlar sırasıyla 3 fazlı ve 4 fazlı motorlardır. Faz sayısının artması rotor adımının ve moment titreşiminin daha az olmasını

sağlamakla beraber besleme devresinin karmaşıklaşmasına ve maliyetinin artmasına yol açmaktadır. Ayrıca 4/2 ve 2/2 kutup sayılı motorlarda, yol alma, işletim ve iki yönlü çalışma sırasında sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu motorlarda, tasarım sırasında kutuplara özel formlar verilerek iyileştirmeler yapılabilmektedir [28,32,37,39]. Şekil 2.2'de 4/2 ve 10/8 kutuplu motorların kesitleri örnek olarak verilmiştir.



Şekil 2.2 4/2 ve 10/8 kutuplu ARM kesitleri.

2.3. Çalışma İlkesi

ARM'nin hem stator hem de rotorda çıkık kutupları bulunan bir yapıdadır. Başka bir deyişle, stator ile rotor arasındaki hava aralığının radyal doğrultudaki uzunluğu değişkendir. Manyetik devrenin relüktansı,

$$R_m = l_m / (\mu \cdot S) \quad (2.1)$$

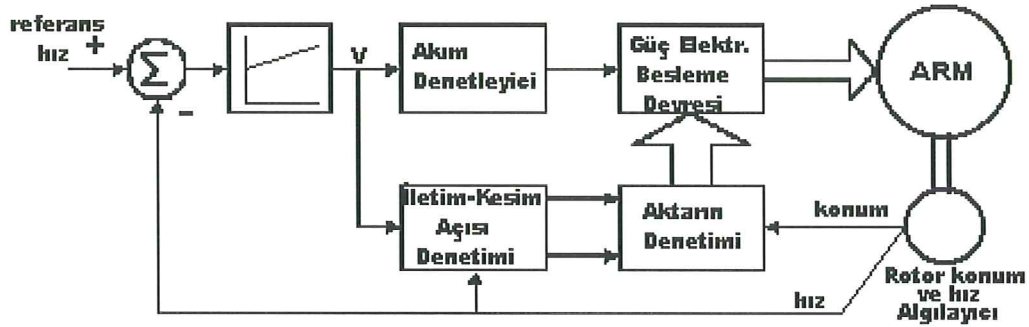
bağıntısı ile tanımlanmaktadır. Burada; μ manyetik geçirgenlik, l_m akının aldığı yol (manyetik devrenin uzunluğu), S de akının aktığı kesitin alanını göstermektedir. Hava aralığının değişken olması nedeniyle rotorun hareketi sırasında relüktans rotor açısına bağlı olarak değişecektir. Relüktans aynı zamanda devrenin endüktansı ile de ilişkilidir.

$$L = N^2 / R_m \quad (2.2)$$

(2.1) eşitliği, relüktans ile endüktans arasındaki ilişkiyi vermektedir. Burada, N akıyı oluşturan sargının sarım sayısıdır.

ARM'nun faz sargılarından biri kaynağa bağlanarak doğru akım taşımaya başladığında bir manyetik alan meydana gelir. Oluşan düzgün manyetik akı devresini stator kutbu, hava aralığı, rotor kutbu, rotor gövdesi, karşıt rotor kutbu, karşıt stator kutbu stator boyunduruğu üzerinden tamamlamaktadır. Akı akarken kendisine en az direnç gösteren, başka bir deyişle en küçük relüktanslı yolu seçecektir. Bu durumda akı, rotoru relüktansın en küçük olacağı konuma getirecek biçimde bir kuvvet etki ettirecektir. Sonuçta rotor, kaynağa bağlı olan sargının bulunduğu stator kutbu ile tam olarak karşı karşıya gelip sabitlenecektir. Tezde;

stator ve rotor kutup eksenlerinin tam olarak üst üste geldiği konum çakışık konum ve eksenlerin en uzak oldukları konum da ayırık konum olarak adlandırılacaktır. Şekil 2.2'den görüleceği gibi stator ve rotor eksenleri arasındaki açı θ olarak tanımlanmıştır. θ açısının değerinin, çakışık konumda 0° olduğu görülmektedir. θ 'nın ayırık konumda alacağı değer motorun kutup sayılarına bağlı olarak değişmektedir. Şekil 2.1'de verilen 6/4 kutuplu motor için bu değer 45° olmaktadır. Faz sargılarından birinin doğru gerilimle beslenmesi sonucunda rotor hareket ederek çakışık konuma gelecektir. Rotor, bu konuma geldikten sonra faz sargısı hala kaynağa bağlı ise sabitlenecek ve dönme hareketi sona erecektir. Bu nedenle yapılması gereken, o faz sargısını kaynaktan ayırarak bir sonraki fazın kaynağa bağlanmasıdır. Böylece stator fazlarının ardışık olarak uygun sırada kaynağa bağlanması ile rotorun sürekli bir dönme hareketi yapması mümkün kılınır. Ancak stator faz sargılarına, rotor konumundan bağımsız olarak, sabit aralıklarla ardışık doğru gerilimler uygulandığında rotorun dönüşünde sorunlar çıkacak, rotorun sabit aralıklı ardışık işaretleri izlemesi sağlanamayacaktır. Hareketin süreklilik kazanabilmesi için rotor çakışık konuma geldikten sonra o faz kaynaktan ayrılıp bir sonraki faz sargısının kaynağa bağlanması gerekmektedir. Bunun için rotor konumunun bilinmesi ve bununla eşzamanlı ardışık işaretlerle faz sargılarının kaynağa bağlanması koşulu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, ARM'nun çalışması için bir güç elektroniği düzenine ve konum algılanmasına gerek duyulmaktadır.

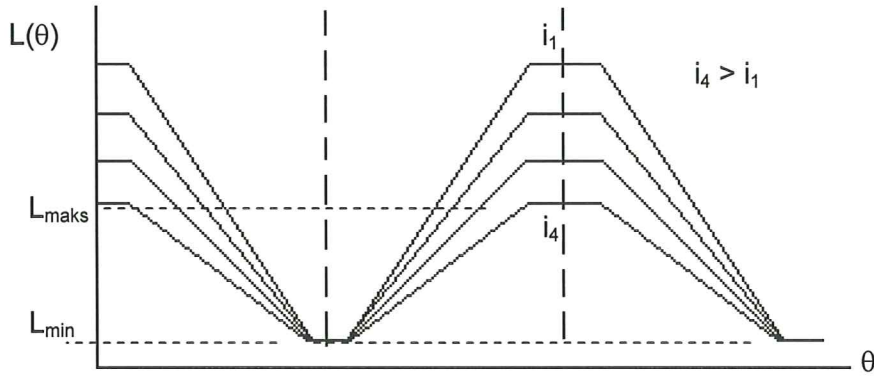


Şekil 2.3 ARM sistemi blok gösterimi.

Şekil 2.3'te verilen sistem, rotor konum algılayıcısı içeren bir ARM sistemine aittir. Rotor algılayıcısı, sistemin maliyetini arttırmakla kalmamakta, aynı zamanda, sistemi daha karmaşık hale getirerek güvenilirliğini azaltmaktadır.

2.3.1. Endüktans değişimi

Daha önceki ayrılarda açıklandığı gibi bir rotor kutbunun stator kutbuna doğru hareketi sırasında relüktans azalırken enerjilendirilen sargının endüktansı artmaktadır. Şekil 2.4’de, endüktansın, $L_{\min}$ ve $L_{\max}$ değerleri arasındaki değişimi doğrusal varsayılarak, akım ve rotor açısına bağlı eğrileri verilmiştir. Eğrilerden görüldüğü üzere farklı akım değerleri için endüktansın maksimum değeri değişmekle beraber, minimum değeri sabit kalmaktadır. Böylelikle, farklı akımlar için endüktansın $L_{\max}$ ve $L_{\min}$ değerleri arasındaki eğrilerin eğimleri farklılık göstermektedir. Akımın artan değerleri için L ’ın değeri azaldığı için eğimler de azalmaktadır.



Şekil 2.4 Akım ve konuma bağlı endüktans değişimi.

2.3.2. Moment oluşumu

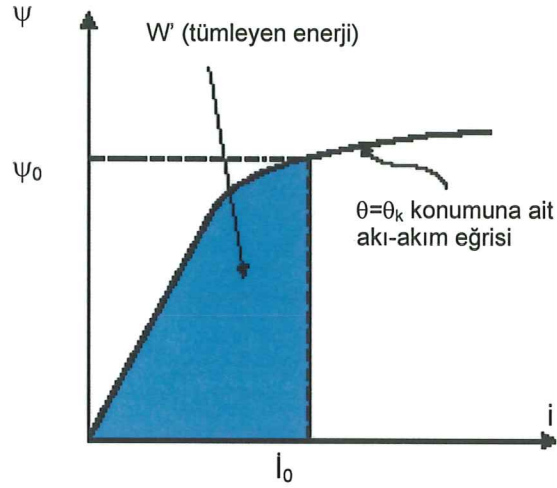
Moment; manyetik devrenin, relüktansını minimum yapmak için en yakın rotor kutbunu, enerjilendirilen stator kutbunun karşısına çekmeye çalışması ile oluşmaktadır. Oluşan moment akım yönünden bağımsızdır. Endüktans ve hava aralığında biriktirilen manyetik enerji, rotorun hareketi sırasında θ açısı ile değişmektedir. Bu değişimin görülebilmesi için akı-akım karakteristiği Şekil 2.5’de verilmiştir. Döndürme momenti, doğrusal olmayan sistemlerde tümleyen enerji cinsinden aşağıdaki eşitlikle belirlenir.

$$M(\theta, i) = \partial W' / \partial \theta \quad i = \text{sabit} \quad (2.3)$$

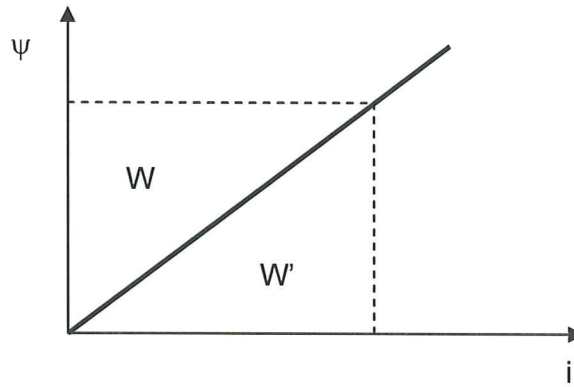
Burada $M(\theta, i)$ konum ve akıma bağlı değişen momenti, W' tümleyen enerjiyi göstermektedir. Tümleyen enerji ise, akı-akım karakteristiğinde eğrinin akım eksenine ile arasında kalan alan olarak tanımlanmaktadır. Öyleyse, tümleyen enerji;

$$W'(\theta, i) = \int \psi \cdot di \quad (2.4)$$

eşitliği ile verilir. Burada, ψ manyetik akıdır. Akı ile akım arasında değişimin doğrusal olduğu varsayılırsa, Şekil 2.6'daki eğri akı-akım karakteristiği olarak kullanılabilir.



Şekil 2.5 Doğrusal olmayan sistemlerde akı-akım karakteristiği.



Şekil 2.6 Doğrusal akı-akım karakteristiği.

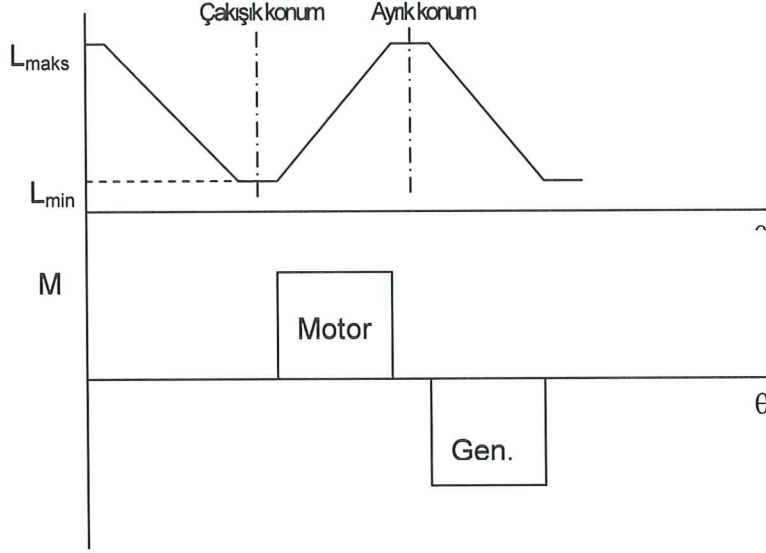
Akı-akım değişiminin doğrusal olması başka bir deyişle magnetik doymanın ihmal edilmesi ile manyetik enerji ve tümleyen enerji için,

$$W = W' = \left(\frac{1}{2}\right) Li^2 \quad (2.5)$$

ve moment için de,

$$M = \left(\frac{1}{2}\right) i^2 \left(\frac{\partial L}{\partial \theta}\right) \quad (2.6)$$

İfadeleri kullanılır. Doymanın kapsama alınması halinde (2.5) ve (2.6) denklemleri geçersiz olup, bu durumda (2.3) ve (2.4) eşitlikleri kullanılmalıdır. (2.5) ve (2.6) eşitliklerinde verilen L devrenin endüktans değeri olup θ 'ya bağlı olarak değişmektedir. Endüktansın θ ile değişimi Şekil 2.4'de verilmiştir.



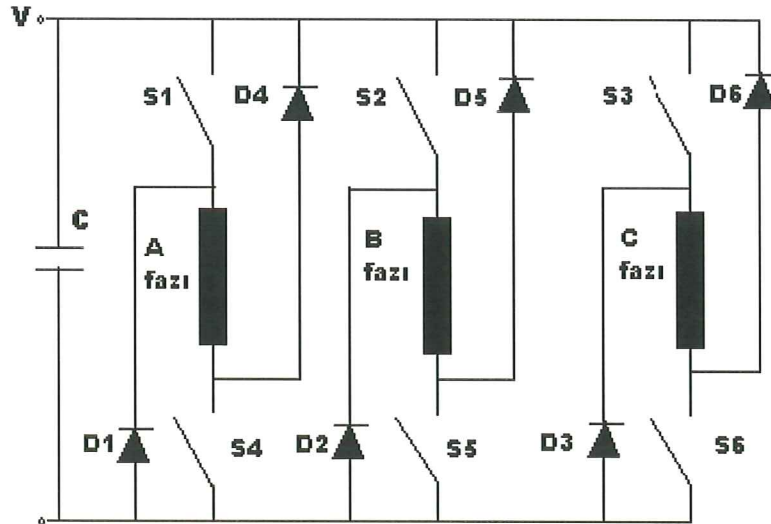
Şekil 2.7 Doğrusal durumda endüktans ve moment.

Bu değişimin doğrusal olması durumunda, endüktans ve moment Şekil 2.7'deki gibi olacaktır. Daha önce de belirtildiği gibi sargı endüktansı, bir minimum ve maksimum değer arasında değişmektedir. Şekil 2.7'de endüktans değişimi ile birlikte moment de verilmiştir. Motor çalışma durumunda sargı akımı, endüktansın minimum değerinden yükselmeye başladığı anda uygulanır ve maksimum değerinden bir süre önce kesilir. Bu an aktarım noktası olarak tanımlanır. Bu aralıkta ARM'nin momenti sabit ve pozitif bir değer almaktadır. Bu değer, (2.6) eşitliği ile belirlidir. Böylece rotor, uygulanan pozitif moment ile dönmeye başlar. Eğer stator akımı, endüktansın en büyük olduğu noktadan en küçük olduğu noktaya kadar uygulanırsa, bu durumda negatif moment meydana gelecektir. Motor pozitif yönde dönerken sargı akımının endüktansın azaldığı bölgede uygulanması, rotorun hareketine ters yönde bir moment oluşturacaktır. Bu durum makinenin jeneratör olarak frenleme bölgesinde çalışmasına yol açacaktır. Akımın biraz geç kesilmesi, istenmeyen negatif bir fren momentinin oluşmasına neden olacaktır. Motorun sürekli dönme hareketi yapılabilmesi için her fazın kendi karşısına gelen rotor kutbunun konumuna göre enerjilendirilmesi ve hep pozitif yönde momentler oluşturacak biçimde akımın süresinin ayarlanması gereklidir. Bunun yanı sıra akımın akıtıldığı ve kesildiği anın ve akım değerinin denetlenmesine rağmen motor yapısında kaynaklanan moment salınımları meydana gelecektir. Bu etkinin ortadan kaldırılması veya azaltılması için birçok araştırma yapılmakla beraber iyileştirme çalışmaları sürdürülmektedir.

ARM'nun özel bir manyetik devresinin olduğu ve bunun da rotor konumuna göre değişen bir endüktans sonucunu doğurduğundan bahsedilmişti. Dolayısıyla endüktif etkisi olan rotor sargılarından akıtılacak akımın ani olarak yükselmesi mümkün olmayacaktır. Devrenin zaman sabiti, akımın yükselme, aynı zamanda düşme zamanlarını belirlemektedir. Sargı akımı uygun zamanda kesilmek zorundadır. Ancak manyetik devrenin endüktansı buna izin vermez ve akım, sargı zaman sabitinin belirleyeceği bir eğimle azalır. Akımın kesilmesi için sargıyı kaynağa bağlayan güç anahtarlarını kesime götürülmesi ve endüktansta biriken enerjinin harcanması veya kaynağa aktarılması için bir yol oluşturulması gerekmektedir. Biriken enerjinin endüktanstan uzaklaştırılmaması rotoru frenlemeye çalışan momentler anlamına gelir ki, bu da istenmeyen bir etkidir. Ayrıca akımın akacağı bir yol sağlanmaması güç anahtarlarının güvenli bir biçimde kesime götürülmesi açısından da sorun yaratacaktır.

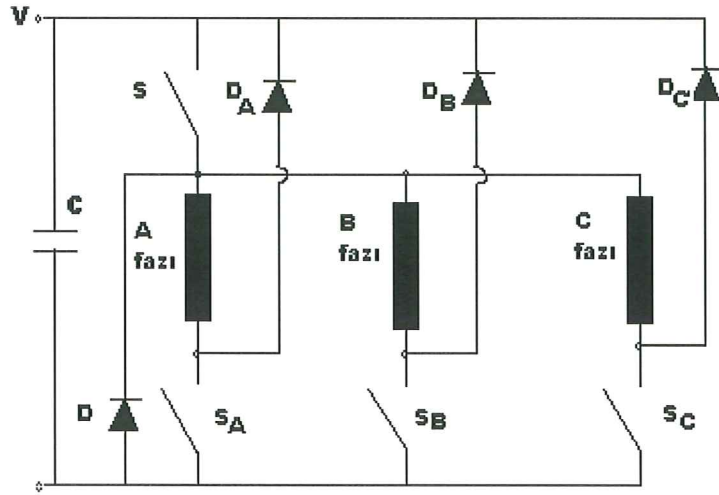
2.4. Güç Elektroniği Besleme Devreleri ve Denetimi

ARM'nin çalışma ilkesinin gerçekleşmesinde gerekli koşulları sağlamak için bu motorlara özgü bir güç elektroniği devresine gerek duyulmaktadır. Bu devrelerin çeşitli işlevleri söz konusudur. Rotor konumunun izlenmesi ile elde edilen konum bilgilerine bağlı olarak uygun stator fazının uygun zamanda doğru gerilim kaynağına bağlanması gereklidir. Bununla beraber uygun zamanda güç anahtarlarının kesime götürülmesi gerekmektedir. Bu devreler yardımı ile faz akımının izlenerek histerezis denetim, darbe genişlik modülasyonu gibi tekniklerle denetlenmesi olanaklıdır.



Şekil 2.8 ARM köprü besleme devresi.

Güç elektroniği devresi ile faz sargının enerjilendirilmesinden sonra biriken enerjinin uzaklaştırılması ve en uygunu kaynağa geri verilmesi sağlanabilmelidir. Bu işlevleri yerine getirmek amacıyla ARM denetiminde kullanılabilecek çeşitli Güç elektroniği devreleri mevcuttur. Bunlarından en yaygın kullanılan ve en esnek denetim olanağı sağlayıcı, köprü devresi adı verilen yapıdır. Şekil 2.8'de, 3 fazlı ARM için bu tip bir devre verilmiştir. Bu devrede, her faz için iki anahtar kullanılmaktadır. Anahtarlardan biri fazın seçimi, yani aktarım için kullanıp, diğeri de akım denetimi görevini üstlenmektedir. Ayrıca her faz sargısı için iki adet geribesleme diyotu kullanılmaktadır. Güç anahtarı olarak GTO, BJT, MOSFET veya IGBT kullanılabilir. Büyük güçlere çıkıldıkça GTO kullanımı daha ön planda olmasına rağmen her geçen gün gerilim ve akım kapasitesi daha yüksek, iletim ve anahtarlama kayıpları daha düşük, daha hızlı anahtarlatabilen elemanlar geliştirilmektedir. Orta güçlerde daha yaygın olarak MOSFET veya IGBT'ler kullanılmaktadır. Güç devresinde kullanılan anahtarların tek tip kullanılmasının yanında, karma elemanlı devrelere de rastlanmaktadır. Aktarım için kullanılan anahtarlar, akım denetiminde kullanılanlardan daha düşük frekanslarda çalıştıklarından, devrenin alt kolunda bulunan bu anahtarlar için iletim kayıpları daha düşük ve orta hızlı elemanlar seçilebilir. Üst kolda bulunan ve akım denetimi sırasında çok daha hızlı anahtarlanan elemanlar için anahtarlama kayıpları düşük olanlar tercih edilmektedir. Bu da güç devresinin maliyetini bir miktar optimize etmektedir. ARM için yaygın olarak kullanılan devrelerden biri de Şekil 2.9'da verilen Miller devresidir [9,14,20]. Bu devre, köprü devresine göre daha az sayıda anahtar eleman içermektedir. Bu yüzden maliyeti daha düşüktür. Ancak köprü devresine göre daha düşük denetim olanakları sağlamaktadır. Buna rağmen, çok karmaşık denetim yöntemlerinin kullanılmadığı uygulamalarda basit devre yapısı ve düşük maliyeti dolayısıyla tercih edilmektedir. Bu devrenin köprü devresinden farkı, tüm fazlar için akım denetimi yapacak tek bir anahtar ve de daha az sayıda diyot kullanılmasıdır.



Şekil 2.9 Miller besleme devresi.

ARM'nda kullanılan güç elektroniği devre yapısı, diğer hız denetim sistemlerine göre kısıadevrelere daha dayanıklı ve hata riski daha az çalışma koşullarına sahiptir. Örneğin, asenkron motorlarda kullanılan köprü evirici devrelerinde görülen kısıadevrelere, ARM'nda rastlanmamaktadır.

Şekil 2.8'de verilen köprü devresi, ARM'de kullanılan en kapsamlı güç elektroniği devresidir. Her bir faz için iki anahtar eleman ve iki geri besleme diyotu mevcuttur. Anahtar elemanlar konum algılayıcıdan alınan işaretlere uygun olarak bir sürücü devre üzerinden sürülmektedir. Konum algılayıcıdan gelen bilgi sonucunda bir fazın enerjilendirilmesi için o faza ait alt ve üst koldaki iki anahtara iletim için kapı işaretleri uygulanır. Alt kolda bulunan anahtar bir sonraki fazın enerjilendirilmesine ilişkin konum algılayıcıdan bir işaret gelinceye kadar, yani bir sonraki aktarıma kadar sürekli olarak iletimde kalacaktır.

Üst koldaki anahtar ise alt koldaki anahtarın iletimde olduğu süre boyunca akımın istenilen değerde sabit tutulmasını sağlamak amacıyla daha yüksek frekansta anahtarlama yapacaktır. Rotor, bir sonraki fazın enerjilendirilmesi gereken konuma geldiğinde, iki anahtar da kesime götürülürler. Ancak endüktansta biriken enerjiden dolayı sargı akımı hala akmak isteyecektir. Bu durumda, geribesleme diyotları iletim yönünde kutuplandıkları için sargıda biriken enerjiyi kaynağa çok kısa bir sürede geri verirler. Böylece, o fazın negatif moment üreterek rotoru frenlemeye çalışmasının önüne geçilmiş olur. Bu amaçla, enerjinin kaynağa olabildiğince kısa sürede aktarılabilmesi için geribesleme diyotu olarak kullanılacak diyotların hızlı diyotlar olmaları gerekmektedir.

ARM'nin bir fazına ait elektriksel denklemi;

$$V = R.i + d\psi/dt \quad (2.7)$$

biçimindedir. Burada, V sargının bağlı olduğu doğru gerilim kaynağının değerini, R bir faz sargısının direnci, i sargı akımı ve ψ de halkalanan toplam akıyı göstermektedir. Akının da sargı endüktansı ve sargı akımına bağlı olduğu bilinmektedir.

$$\psi = L(\theta).i \quad (2.8)$$

(2.8) eşitliği, (2.7)'de yerine konulursa,

$$V = R.i + \frac{dL(\theta)}{dt} i \quad (2.9)$$

$$V = R.i + L(\theta).di/dt + [\partial L(\theta)/\partial t].i \quad (2.10)$$

$$V = R.i + L(\theta).di/dt + [\partial L(\theta)/\partial \theta].(d\theta/dt).i \quad (2.11)$$

Bu ifadede ortaya çıkan $(d\theta/dt)$ terimi, açısal hız (ω) olduğuna göre; motorun elektriksel yanına ilişkin denklem aşağıdaki şekle gelecektir.

$$V = R.i + L(\theta).di/dt + [\partial L(\theta)/\partial \theta].\omega.i \quad (2.12)$$

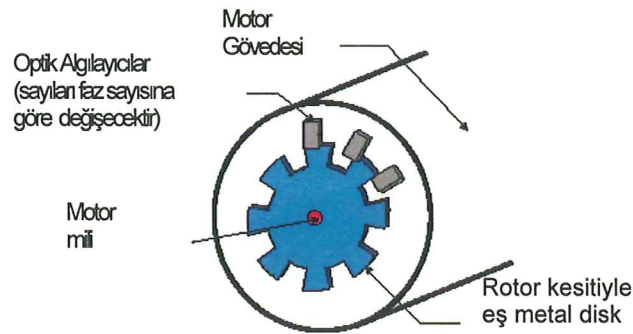
Burada; $L(\theta).di/dt$ terimi endüklenen transformatör gerilimi, $[\partial L(\theta)/\partial \theta].\omega.i$ terimi de endüklenen hareket gerilimini göstermektedir.

Şekil 2.8'de verilen devrede A fazına ait S1 ve S4 anahtarları sürücü devreler üzerinden iletme sokulurlar. İletimin başladığı anda, rotor kutbu statoru kutbunun altında olmadığından sargıdaki akım artmaya başlayacak ve bir sınır değere erişecektir. Bu durum, özellikle düşük hızlarda daha belirgindir. Çünkü düşük hızlarda akımın artışını sınırlayan endüklenen hareket gerilimi küçüktür. Akım sınır değere ulaştığında S1 ve S4 anahtarları açılır ve akım D1 ve D4 geribesleme diyotları üzerinden akarak enerji kaynağa aktarılır. Endüktansta biriken enerjinin boşalmasına paralel olarak akım azalır. Ve bir minimum değere ulaştığında tekrar S1 ve S4 anahtarları kapatılır. Böylece sargı akımı seçilmiş olan bir aralıkta denetlenmiş olur. Rotor kutbu, çakışık konuma geldiğinde A fazının işlevi sona erecektir. Bunun için S1 ve S4 anahtarları açılarak D1 ve D4 diyotları üzerinden endüktansta biriken enerjinin tamamı kaynağa geri verilir. Böylece A fazının akımı devre parametrelerine bağlı olarak sıfıra düşer. S1 ve S4 anahtarlarının açılması ile birlikte rotorun dönüş yönüne göre B fazı veya C fazının enerjilendirilmesi gereklidir. Bunun için ilgili faza ait koldaki anahtarlar kapatılıp açılarak yukarıdakine benzer işlemler tekrarlanır ve akım denetlenir. Bir faz sargısından geçen akımın kısılması

sırasında, kıyma frekansı rotor konumuna bağlıdır. Rotor ayrık konuma yakinken endüktans küçük olduğundan zaman sabiti küçük dolayısıyla akımın yükselme ve düşme zamanları da çok büyüktür. Bundan dolayı akımın belirli bir aralıkta tutulması için çok sık açma-kapama yapılması gereklidir. Bu nedenle kıyma frekansı yüksektir. Bu işlevi üst kolda bulunan anahtarlar üstlenmektedir. Rotor kutbu çakışık konuma yaklaştıkça endüktansın değeri artacak ve akımın yükselme ve düşmesi daha yavaş olacaktır. Bunun sonucunda kıyma frekansı düşük olacaktır. Sargı akımının kıyılarak sabit tutulması sağlanmaktadır. Motor yüksek hızlarda çalıştırıldığında endüklenen hareket gerilimi büyüyeceğinden sargı akımı düşük hızlarda olduğu gibi hızla yükselmeyecektir. Bundan dolayı, akım referans değere ulaşamadığından yüksek hızlarda kıyma işlemine gerek olmamaktadır. Ancak bu hızlarda, akım dalga şekli düzgün olmadığından meydana gelen moment de daha salınımlı olacaktır. Sargıda endüklenen büyük değerli hareket gerilimi nedeniyle akım nominal değere hiçbir zaman yükselmeyeceğinden motor momenti de önemli ölçüde azalacaktır. Bu sakıncayı olumsuzluğu biraz olsun ortadan kaldırmak için iletim açısının erkene alınması yoluna gidilmektedir. ARM'de akım sınırlaması için kıyma frekansını sabit tutan bir darbe genişlik modülasyon (DGM) yöntemi benimsenmişse, güç elektroniği devresinin üst kolunda faz sayısı kadar anahtar kullanılması zorunluluğu ortadan kalkar. Bu yöntemin uygulanmasında Miller besleme devresi kullanılabilir. Ancak Şekil 2.9'da verilen bu devre, yüksek hızlarda, sargıda biriken enerjinin yeterince hızlı kaynağa aktarılamaması ve rotoru frenleyici negatif momentler oluşturmaları nedeniyle yetersiz kalmaktadır. Bu tezin uygulamasında, Şekil 2.8'de verilen köprü besleme devresi kullanılmıştır.

2.5. Rotor Konum Algılayıcıları

Bu bölümden önce, ilgili bölümlerde de belirtildiği gibi, besleme devrelerinde bulunan güç elektroniği anahtarlarının rotor konumuna uygun olarak çalışabilmeleri



Şekil 2.10 Basit optik algılayıcı yapısı.

amacı ile konumunun algılanması zorunludur. Rotor konumunun belirlenmesi için dolaylı ve dolaysız olmak üzere iki yöntem karşımıza çıkmaktadır. Rotor konumunun

dolaysız olarak belirlenmesi, doğrudan motor miline bağlı algılayıcılar ile mekanik olarak yapılmaktadır. Bu amaçla, kullanılan algılayıcıların başında optik algılayıcılar gelmektedir. Bunların yapısının, Şekil 2.10'da verildiği gibi basit olabileceği gibi daha karmaşık optik kodlayıcılar (encoder) biçiminde de olabilmektedir. Bunların dışında faz kilitli çevrim ilkesi ile çalışan yüksek frekanslı osilatörler veya Hall etkili algılayıcılar kullanılmaktadır. Bu algılayıcılardan alınan işaretler, bir işlemcide değerlendirilerek, uygun tetikleme işaretlerine dönüştürülürler.

Bu çalışmanın temelini oluşturan, rotor konumunun dolaylı olarak belirlenmesi, yani rotor konum algılayıcısız denetim için giriş bölümünde açıklandığı şekilde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde, motorun elektriksel yanında yapılan ölçüm sonuçları kullanılmaktadır. Genel olarak, ölçülen büyüklükler, faz sargısının akımı ve sargıya uygulanan gerilimdir. Ölçülen elektriksel büyüklükler, bir işlemci yardımı ile her yöntem için kullanılan kendine özgü algoritmalarla rotor konum bilgisine dönüştürülür.

2.6. Akı-Akım Özeğrilerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi

ARM'nin bir fazına ilişkin gerilim denklemi (2.7) eşitliğinde verilmişti. Bu denklem yardımı ile manyetik akının zamana göre değişimi aşağıda verildiği gibi elde edilebilir.

$$\frac{d\psi(t)}{dt} = v(t) - R \cdot i(t) \quad (2.13)$$

$$d\psi(t) = [v(t) - R \cdot i(t)] \cdot dt \quad (2.14)$$

$$\int d\psi(t) = \int [v(t) - R \cdot i(t)] \cdot dt \quad (2.15)$$

$$\psi(t) = \int [v(t) - R \cdot i(t)] \cdot dt \quad (2.16)$$

(2.16) numaralı denklem gereği bir faz sargı direnci, faz sargısına uygulanan gerilim ve bu fazın akım ifadeleri biliniyor ise akının zamana göre değişimi belirlenebilir. Sargı direncinin değeri, sargı normal çalışma sıcaklığına ulaştıktan sonra herhangi bir direnç ölçme yöntemi ile elde edilebilir. Sargı akım ve geriliminin değişimleri de ölçüldüğünde akı, (2.16) numaralı denklem ile hesaplanır. Ancak sargının beslendiği doğru gerilim kaynağının değeri biliniyor olsa da, sargı akımının akmaya başlaması ile kaynak sonsuz güçlü olmadığından besleme geriliminin değeri çekilen akıma ve aynı zamanda sargı parametrelerine bağlı olarak azalmaya başlayacaktır. Diğer taraftan akımın ani değer ifadesinin belirlenmesi de endüktans değişiminin bilinmemesinden dolayı mümkün olmayacaktır. Bunların sonucunda akı-akım karakteristiklerinin özel sayısal yöntemlerle (Sonlu Elemanlar Yöntemi, Sınır

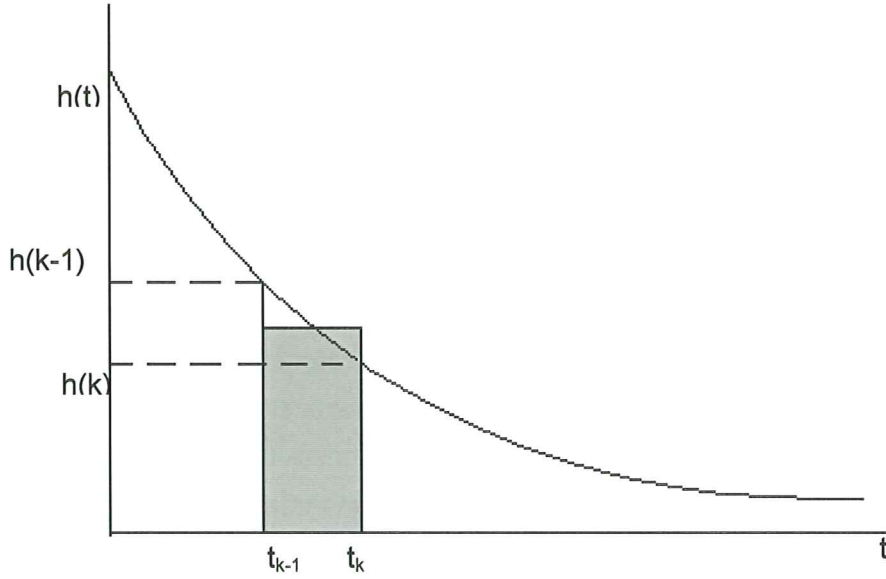
Elemanlar Yöntemi vb.) ya da deneysel olarak belirlenmesi gereği ortaya çıkmaktadır.

Akı-akım karakteristiklerinin deneysel olarak belirlenmesi için sargı gerilimi ve akımının zamana göre değişimleri örneklenerek bir veri dosyası oluşturulmalıdır. Stator faz sargısı doğru gerilim kaynağından beslenerek, sargı gerilimi bir gerilim bölücü üzerinden ve sargı akımı da uygun değerde bir şönt direnç yardımı ile bir giriş-çıkış kartı kullanılarak bilgisayar ortamında bir veri dosyası halinde saklanır. Bu ölçümler alınırken, sargının enerjilendirilmesi ile rotorun arzu edilen bir konum açısında sabit tutularak hareket etmesini önleyecek bir mekanik aygıttan yararlanılmaktadır. Bu işlem, akı-akım karakteristikleri hangi konum açısı aralıklarında isteniyorsa o aralıklarla alınarak tekrarlanmalıdır. Örneğin 6/4 kutuplu bir ARM için bir stator ve rotor kutup eksenlerinin yüz yüze ve ayrı konumda olmaları arasındaki açı farkı 45°'dir. Buna göre karakteristikler, 1° aralıkla elde edilmek istenirse; $\theta=0^\circ$ 'den $\theta=45^\circ$ 'ye kadar aynı ölçümler 46 kez tekrarlanmalıdır. Böylece 46 adet veri dosyası oluşturulmuş olur.

Deney sırasında ölçüm sonuçlarının alınabilmesi için zaten mevcut olan köprü güç elektroniği devresindeki, ilgili faza ait koldaki güç anahtarları kullanılmaktadır. Alt ve üst güç anahtarları, oluşturulan bir kare dalga katarı ile eşzamanlı olarak sürülmektedir. Kare dalganın frekansı, sargı akımlarının sürekli hal değerine erişebileceği bir değer olarak belirlenmelidir. Birkaç periyotluk dalga şekilleri bilgisayar ortamına aktarıldıktan sonra, akımların sıfır değerinden sürekli hal değerine kadar olan kısımları eşzamanlı gerilim değerleri ile birlikte asıl veri dosyaları olarak alınmaktadır. Elde edilen bu veri dosyaları zaman, sargı akımı ve sargı gerilimi değerlerinden oluşan 3 sütunlu bir dosyadır. Dosyanın satır sayıları akımın sürekli hale ulaştığı süreye ve de giriş-çıkış kartının örnekleme zamanına bağlı olarak değişmektedir. Elde edilen veriler kullanılarak;

$$h(t) = v(t) - R.i(t) \quad (2.17)$$

ifadesi yardımı ile Şekil 2.11'de verilen $h(t)$ fonksiyonu oluşturulur.



Şekil 2.11 $h(t)$ fonksiyonu.

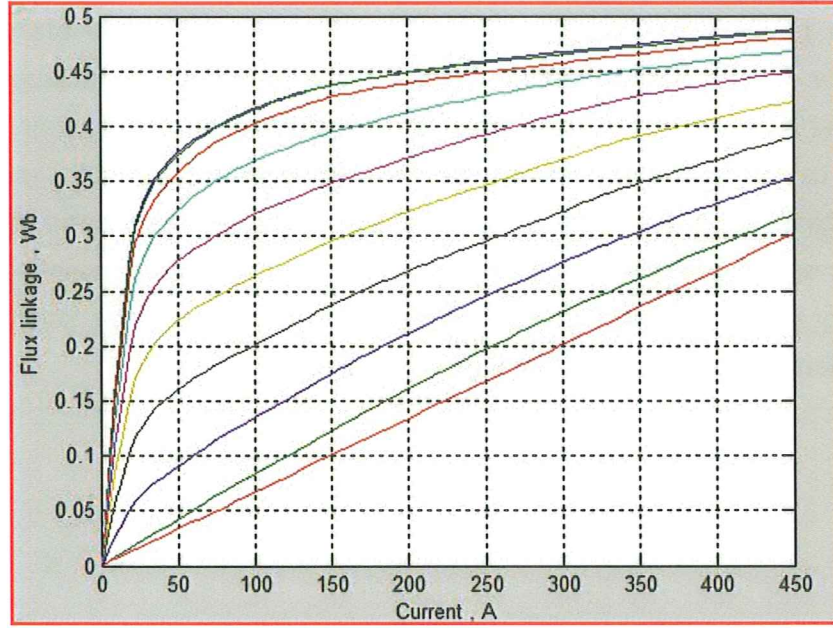
$h(t)$ fonksiyonunun sayısal integrasyonu ile akının zamana göre değişimlerini veren eğriler Şekil 2.12’de olduğu gibi elde edilmektedir. Sayısal integrasyon hesabı için;

$$\psi(k) = \{[h(k) + h(k-1)]/2\} \cdot (t_k - t_{k-1}) + \psi(k-1) \quad (2.18)$$

ifadesi kullanıldığında, her bir zaman değerine karşılık gelen akı değeri hesaplanmış olur. Aynı zaman değerine karşılık gelen akım ve akı değerleri eşlenerek akı-akım değişimi elde edilir. Tüm işlemler yüz yüze konumdan ayırık konuma kadar olan bütün θ açıları için yinelendiğinde akı-akım karakteristikleri Şekil 2.12’deki gibi belirlenmektedir. Aynı zamanda bu sonuçlar kullanılarak; endüktansın konuma bağlı değişimi de belirlenebilir. Endüktans her akım değerinde farklılık gösterdiği için Şekil 2.12’deki her eğrinin, sabit bir akım değerine karşılık gelen akı değerleri, alınarak;

$$L(\theta) = \psi/i \quad (2.19)$$

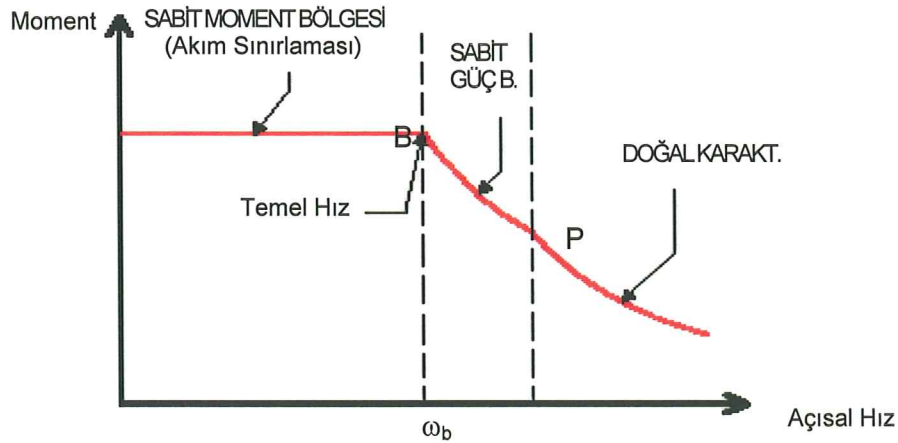
ifadesi ile belirlenmektedir.



Şekil 2.12 Akı-Akım karakteristiği.

2.7. Moment-Hız Karakteristiği

ARM'na ait moment-hız karakteristiği Şekil 2.13'te verilmiştir. Eğrinin üzerinde gösterilen B noktasının solunda kalan bölge sabit moment bölgesidir. İstenilen çalışma noktası, motorun moment-hız karakteristiği ile yükün moment eğrisinin kesim noktası olacaktır. Çalışma noktasının belirlenmesinde, verimin maksimum, moment salınımlarının minimum yapılmasına çalışılır. Şekil 2.13'deki B noktası, nominal gerilimde, sabit tetikleme açıları için, maksimum akımın uygulanabileceği en büyük hız değerini (temel hız) göstermektedir.



Şekil 2.13 Moment-hız karakteristiği.

Hızın daha büyük değerlerinde, motor momenti, ω açısal hızıyla orantılı olarak azalmaktadır. Bunun başlıca nedeni, yüksek hızlarda sargıda endüklenen hareket geriliminin artması ve bunun sonucunda da faz akımlarının azalmasıdır. Bu etkiyi azaltmak üzere tetikleme anları bir miktar erkene alınarak moment-hız karakteristiğinin sabit güç bölgesinde çalışması sağlanır. Hızın daha da artması durumunda eğride gösterilen P noktasına ulaşılır. Bu nokta, ateşlemenin en erkene alınabileceği çalışma noktasıdır. Bu nedenle, P noktasının sağında kalan bölgede, motor momenti hızın karesiyle orantılı olarak azalacaktır [7,9,23].

3. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORU (ARM) DENETİMİ

3.1. Giriş

ARM'ları, yüksek verimli ve yüksek moment/hacim oranına sahip olduklarından endüstriyel uygulamalarda değişken hızlı sürücülerde, diğer elektrik motorlarına göre üstünlük sağlamışlardır. Güç elektroniği ve denetleyici yapısındaki gelişmelere paralel olarak tüketiciye dönük uygulamalarda da gittikçe artan bir öneme sahip olmuşlardır. ARM'ları, elektrikli sürüş sistemlerinde, hız denetimi yapmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Endüstride kullanılan ARM'larının güçleri 100 W ile 100 kW arasında, hızları ise 250-15000 d/dak arasında değişmektedir. Bunun yanı sıra ARM; uzay araçları, madencilik araçları, ofis araçları, elektrikli otomobiller, karıştırıcılar ve pompalarda sıkça kullanılmaktadır. Son yıllarda, ARM'larının hız denetiminde üstünlüğü anlaşıldığından, moment dalgalanmasının azaltılması, gelişmiş mikroişlemci ya da sayısal işaret işlemcili (Sİİ) hız denetim sistemleri ve bunlara bağlı olarak da konum algılayıcısız denetim yöntemleri ile ilgili pek çok çalışma literatüre girmiştir.

3.2. ARM'nda Konum Algılayıcı Denetim

ARM, diğer motorlarla karşılaştırıldığında, çalışma ilkesi daha basit gibi gözükse de, kontrol yönünden daha karmaşık bir sistemdir. ARM'de matematiksel modelin elde edilmesi diğer motorlara göre çok daha karmaşık işlemler gerektirmektedir. Doğru akım motorunun denetimi sırasında yük ile motorun matematiksel modeli kurularak, kontrol yapısı tasarlanmaktadır. Asenkron motorun vektör denetiminde ise, zamanla değişen rotor değişkenleri, d ve q eksenleri tanımlanarak, doğrusal yapıya uygun bir model haline getirilmektedir. Motorun d ve q eksenlerine indirgenmesi, kontrol değişkenlerini karmaşık, doğrusal olmayan yapıdan kurtararak, doğrusal yapıya sokmaktadır. ARM'nda ise, moment ile akım arasında doğrusal bir ilişki olmadığından ve asenkron motorda olduğu gibi dolaylı yoldan da elde edilemediğinden, tasarlanan denetim yöntemi, karmaşık bir hal almaktadır. Bunun nedeni, moment, akım, hız ve ateşleme açıları arasındaki doğrusal olmayan ilişki ve her bir değişkenin yükün ve hızın bir fonksiyonu olmasıdır. Bu yüzden sistemin

denetimi; faz akım ve geriliminin gerçek değerleriyle işlem yapabilen, gerçek zamanda denetime uygun bir yapının kullanılması ile gerçekleştirilmektedir.

ARM denetiminde sistemden beklenen özellikler; moment darbelerinin çok düşük olması, dinamik cevabının hızlı olması, kararlılığının iyi olması, düşük ve yüksek hızlarda çalışabilmesi ve dört bölgeli çalışmaya uygun olmasıdır. Diğer taraftan, motor değişkenlerinin yüke ve hıza çok bağımlı olması, sistem tasarımı sırasında yükün hız ve moment bilgisinin belirlenmesi ve algoritmanın bu yönde kurulmasını gerektirmektedir. Motor, yüksek hızlara çıkarılmak istendiğinde, akım denetimi gereken cevabı vermemektedir. Bunu sağlamak için, güç elektroniği devresinde kullanılan güç anahtarlarının ateşleme açıları veya anahtarlama anlarının kaydırılması denetimi kullanılmaktadır. Moment denetimi için, ateşleme açıları veya anahtarlama anları, fazın enerjilendirilmesi gereken zamandan önce uygulanmaktadır. Rotorun konumuna dair gelen bilgi değerlendirilerek, ilişkin faz erken enerjilendirilmekte; böylece yüksek hızlara düşük moment salınımları ile çıkılabilmektedir. Hızın fonksiyonu olarak, ateşleme açılarının değerlerinin belirlenmesi doğrusal olmayan ve karmaşık bir işlemdir. En uygun anahtarlama anlarının belirlenmesi ancak yükleme deneyleri ile mümkün olmaktadır. Bunun yanında, ARM için geliştirilmiş benzetim programları, bu alanda büyük destek sağlamaktadır.

ARM sisteminin denetimi için özel tümleşik devreler geliştirilmiştir. Bu devreler yardımıyla, motorun belirli hız aralıklarında ve moment değerleri ile çalışması sağlanmaktadır. Bu kontrol devreleri kullanılarak, motorun temel denetimi kolaylıkla gerçekleştirilebilir. Analog yapıda olan bu devreler yanında, sayısal tüm devreler de geliştirilmiştir. Sayısal bir giriş çıkış birimi üzerinden haberleşebilen sistem, motorun tam denetimini gerçekleştirmektedir. Böyle bir sisteme örnek, Hewlett Packard firması tarafından geliştirilen HCTL-1100 tümdevresidir. HCTL-1100, doğru akım, adım, fırçasız doğru akım ve ARM motorlarının denetimini gerçekleştirebilmektedir. Motor hızı istenilen aralıkta ayarlanabileceği gibi, belirli bir hız profilini takip etme işlemi de kolaylıkla gerçekleştirilmektedir. Motordaki moment salınımlarını minimum seviyeye indirmek ve gürültü problemlerini ortadan kaldırmak amacıyla, gereken düzeltmeler anahtarlama anları ayarlanarak yapılabilir. Bununla birlikte, sistemin iç yapısına karışılmadığından, değişik uygulamalarda sorun olmaktadır. Bu durum, yazılan program ile aşılabılır. Örneğin, sistem, motorun iki yöne gereken hareketini gerçekleştirirken, kontrol yapısı dört bölgeli çalışma için uygun değildir.

ARM'nun denetiminde mikroişlemcinin veya Sİİ yapılarından hangisinin tercih edilmesi gerektiği sistemin isteklerine göre belirlenmelidir. Matematik olarak çok yüklü bir algoritma kullanılmadığında, mikroişlemci doğru seçim olmaktadır. Mikrobilgisayar yapısındaki Sİİ sistemiyle ek donanım ihtiyacı duyulmadan kontrol sağlanabilir. Mikroişlemci, Sİİ'ye göre daha ucuz ve programlanması daha kolay olduğundan, sistem gereksinimini karşıladığı sürece doğru çözümü sunmaktadır. Bununla beraber, sistemin istekleri değiştiğinde ve karmaşılaştığında, mikroişlemcinin, Sİİ'nin üstün davranışını göstermesi beklenmemelidir. Örneğin, motorun dört bölgesi, hız, akım ve moment denetiminin yapıldığı bir yapı kurulmak istendiğinde, mikroişlemci gereken çözüm davranışını yakalamaktan uzak kalacaktır. Bu aşamada Sİİ, doğru çözüm alternatifi olmaktadır.

3.3. ARM'nda Konum Algılayıcısız Denetim

Konum algılayıcısız denetim sisteminde rotorun konumuna ait bilgiler, algılayıcı yardımıyla değil de elektriksel işaretler yardımıyla alınır ve işlenir. İdeal, güvenilir bir konum algılayıcısız denetim uygulamasında, tüm hız ve moment limitlerinde motor sargılarından alınan verilerin kullanımıyla yüksek verimli çalışma gerçekleştirilir. İşte bu ideal uygulamaya konum algılayıcısız ARM sürücüleri ile yaklaşılmaya çalışılmaktadır. Geçtiğimiz 15 yılda, çok sayıda algılayıcısız denetim yöntemi ileri sürülmüştür[58-62]. ARM'lerin verimlerini ve endüstriyel uygulamalardaki güvenilirliğini artırmak için pek çok konum algılayıcısız denetim sistemi geliştirilmiştir. Bu sistemlerin çoğu, makinenin manyetik özeğrileri ile ilgilidir. Konum algılayıcısız denetim, dolaylı rotor konumu tahmini yöntemleri, açık çevrim ya da senkron denetim yöntemi, doğrusal veya doğrusal olmayan ilişki yöntemi gibi yöntemler içerir.

Açık çevrim denetim yöntemleri, alınan momenti doğrudan giriş parametrelerini ayarlayarak motoru geribesleme olmadan yöneten sistemlere dayanır. Bu tür sistemler, fazla karmaşık ve pahalı olmamakla beraber hassas uygulamalarda kullanıcıya güven vermez ve bazı durumlarda motoru rezonansa sokabilir[56]. Endüklenen gerilim yönteminde ise genel olarak faz sargılarında boşta olan enerjisiz fazların incelenmesi ya da akı algılayıcılarının kullanımına rastlanır. Endüktans temelli ya da akı temelli sistemler endüklenen gerilim ile ilgili yöntemlerin içinde yer almaktadır. Tüm bu sistemlerin altında yatan gerçek ARM'nin mekanik zaman sabitinin elektriksel zaman sabitinden çok daha büyük olmasıdır. Bu nedenle aktif ya da pasif bir fazın gerilimi, akısı, akımı endüklenen gerilim denkleminde belirlenerek, rotor konumu dolaylı yoldan elde edilmiş olur. Bu modellerde, fiziksel makinedeki

giriş işaretleri geçerlidir. Ölçülen çıkış ve beklenen çıkış arasındaki fark alınarak hesaplanan çıkış değerlerine yakınsamasına çalışılır. Bu da açık çevrim çalışmadan farklılığı ortaya koyar.

ARM'lerin endüstride kullanımı, özellikle küçük güçlü uygulamalarda, hem maliyetin düşük olması, hem de boyutlarının küçük olması açısından bir takım yeni olanakların ortaya konulmasını zorunlu kılmış ve dolayısıyla da çalışmaların rotor konum algılayıcısız ARM'ler üzerine yoğunlaşmasına yol açılmıştır. Bunlarla ilgili olarak yapılan literatür taraması sonucunda, çalışmaları, uygulanan yöntemlere göre beş ana grupta toplamak mümkündür.

1. Akı-Akım Yöntemi: Bu yöntemde denetlenecek motor için deneysel olarak hazırlanan akım-akı-endüktans-konum bilgilerini içeren tablolardan (look-up table) faydalanılarak enerjilendirilen faz sargısı akım ve gerilim ölçümü ile konum belirlenmektedir. Denetlenecek motora ait çok sayıda tablonun oluşturulması ve ancak bu tablolardaki değerlerle sınırlı olması yöntemin sakıncalı yanını oluşturmaktadır[51,52,53].
2. Pasif Dalga Şekli İzleme Yöntemi: Yöntem hareket sonucu endüklenen gerilim ilkesine dayanmaktadır. Bilindiği gibi endüklenen hareket geriliminin ani değeri rotor konumuna bağlı olduğundan akımın zaman göre değişiminden etkilenen gerilimin elektronik olarak gözlenmesi ile rotor konumu belirlenmektedir. Bu yöntem, adım motorları için geliştirilmiş olup düşük hızlarda uygun sonuçların elde edilmesini mümkün kılmamaktadır[54,55].
3. Artımsal (incremental) Endüktans Ölçümü: Yöntem, rotor konumunun akımın yükselme ve alçalma zamanlarına bağlı olarak belirlenmesi temeline oturtulmuştur. Yöntemin uygulanmasında enerjilendirilen faz sargılarının kullanılabileceği gibi boştaki faz sargısı da kullanılmaktadır. Her ne kadar geniş bir hız aralığında çalışma olanağı verse de; örnekleme zamanının ve bu zamanlara karşılık düşen işaretlerin belirlenmesindeki zorluklar, yöntemin sakıncalı yanını oluşturmaktadır[56,57,58].
4. Karşıt Endükleme Yöntemi: Bu yöntem, sargılar arasındaki karşıt endükleme nedeniyle endüklenen gerilimlerin ölçülmesi ve değişik çalışma koşulları içeren tabloların (look-up table) oluşturulması üzerine

kurulmuştur. Yöntem, birinci yöntemde vurgulanan aksaklıkları içermektedir[59,60].

5. Gözlemciye (observer) Dayalı Yöntemler: Bu yöntemler, ARM'nin lineer olmayan yapısı göz önüne alınarak zamanla değişken doğrusal gözlemcilerin modellenmesine dayalıdır. Yöntemin uygulanmasında kayan kip (sliding-mode) denetimi ve düşük dereceli Luenberger gözlemciler kullanılmaktadır. Yöntem, hassas ve uzun hesaplamalara dayandığından karmaşıktır[61,62,63].

Yukarıda verilen gruplandırmalar, genel olarak endüktansın ya da akının denetimine dayanmaktadır.

3.3.1. Endüktans Algılamaya Dayalı Konum Algılayıcısız Denetim

Bilindiği üzere, doğrudan konum algılayıcıları kullanılması makinenin elektriksel özeğrileri konusunda bilgi vermez. Bunun nedeni, endüktansın rotor konumunun fonksiyonu olan değişiminin elde edilmesinde, motorda kullanılan konum algılayıcıları yeterli olmamasından kaynaklanmaktadır. Bunun yanında, motorda üretilen moment rotor konumuna bağlı olmanın yanı sıra tümleyen enerjideki değişime bağlıdır. Anlık moment değeri, endüktansın rotor konumuna göre değişiminden elde edilmektedir. ARM'nda her konumda en azından bir adet enerjilendirilmemiş faz olduğundan, o fazdaki endüktans, aktarım anının denetimi için kullanılabilir. Enerjilendirilmeyen fazın endüktansı motorun uç gerilim ve akımlarının ölçümlerinden yola çıkılarak bulunabilir. Aktif sargının aktarım anlık değerleri hareketsiz fazdaki endüktans cinsinden ifade edilir. Endüktans algılayıcıların esas tipleri şu izleyen prensiplere dayanır.

- Faz darbesi: ARM'nin enerjilendirilmemiş bir fazına belli bir süre aralığında V gerilim darbesi uygulanır ve sargı akımı da ölçülünce; Endüktansın darbe gerilimi ve uygulanan süre ile doğru, sargı akımıyla ters orantısından endüktans bulunur.
- Frekans Modülasyonu: Endüktans bilgisi frekans modülasyonu sinyali kullanan alçak gerilim analog devresi tarafından kodlanır.
- Faz Modülasyonu: ARM'nin enerjisiz fazından birine alçak alternatif gerilim uygulanarak giriş gerilim değeri ile akım arasındaki faz açısı belirlenir.
- Genlik Modülasyonu: Enerjisiz faza düşük değerinde alternatif gerilim uygulanır ve akımın genliği sayesinde sargı endüktansı bulunabilir.

- Öz Gerilim Tekniđi: Aktif fazın endüktansı aktif faz akım ve akısı ölçümleriyle gerçek zamanlı olarak bulunur.

3.3.2. Akı-Akım Özeğrilerine Dayalı Konum Algılayıcısız Denetim

ARM'de rotor konumu, akı-akım karakteristiklerinden bazı işlemler sonucunda belirlenebilir. Aşağıda, bununla ilgili açıklamalar verilmiştir.

- Dalgacık şekli tekniği: Faz akımının yükseliş ve düşüş zamanlarının izlenmesi ve bunun sonucunda endüktanstaki artımsal akım ve rotor konumunun bir fonksiyonudur, değişiminin incelenmesini olanaklı kılar.
- Durum Denetleme yöntemiyle de ölçülen uç gerilim ve akım değerleri sayısallaştırılmış elektromanyetik ARM modeli girdisi olarak değerlendirilir.,

4. BULANIK MANTIK (BM) VE YAPAY SİNİR AĞLARI (YSA) İLE ROTOR KONUM ALGILAYICISIZ DENETİM

4.1. Giriş

ARM'de rotor konumunun algılanması zorunluluğu, beraberinde bazı sorunlar getirmektedir. Konum algılayıcıların kullanımı, özellikle küçük güçlerde daha önemlidir. Küçük güçlerde motor ve güç elektroniği besleme devreleri, düşük maliyetli ve küçük boyutlu olmaktadır. Bunun yanında, rotor konum algılayıcısının kullanımı ile hem maliyet hem de boyutlar büyüyecektir. Bunlara ek olarak, konum algılayıcılar, sistemin güvenilirliğini azaltmaktadır. Bütün bu sebeplerden dolayı ARM'nin rotor konum algılayıcılar kullanılmadan hız ve moment denetiminin yapılması istenmektedir. Rotor konumunun algılanmasına önceki bölümde değinilmişti. Konum algılayıcılar kullanılmadan rotor konumunun, motorun elektriksel yanında yapılan ölçümlerle belirlenmesine ilişkin temel yöntemler, üçüncü bölümünde açıklanmıştır. Tezde amaç edinilen yöntem, ARM'nin konum algılayıcısız denetiminde, Bulanık Mantık (BM) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanılmasına dayanmakta olup YSA'ndaki öğrenme yöntemi için yeni bir algoritmanın geliştirilmesidir.

Bu bölümde, beşinci bölümde verilen algoritmaya ön hazırlık olmak üzere ARM'nin hız denetiminde ve rotor konumunun belirlenmesinde kullanılacak olan Bulanık Mantık ve Yapay Sinir Ağları ile ilgili temel bilgiler verilecektir. Ayrıca, bu yöntemlerin ARM'nin rotor algılayıcısız denetiminde nasıl kullanıldığı açıklanacaktır.

4.2. Bulanık Mantık

Bulanık Mantık (BM), günümüzün ilgi çeken konularından biridir. Klasik mantığın birçok alanda yetersiz kalması, araştırmaların bulanık mantık üzerine eğilmesine neden olmuştur. İlk olarak 1965 yılında, Zadeh tarafından matematiksel bir düşünce olarak ortaya atılmıştır. Temel olarak, çok değerli mantık, olasılık kuramı ve yapay sinir ağları ile ilişkilidir. Bu yöntem, elektrik makinelerinin denetimine yeni boyutlar getirmiştir. Geleneksel kontrol kuramı, karmaşık dinamik modellere sahip makineler karşısında çoğu kez yetersiz kalmaktadır. Oysa BM, insan aklının işleyişine benzer bir düzenle, önce sistem davranışını gözlemekte sonra ona uygun denetim işlemini

uygulamaktadır. Denetim işlemi, hazırlanan sisteme özgü kural tablosunu kullanan neden-sonuç ilişkisi ile sağlanmaktadır. Diğer bir deyişle, denetlenecek sisteme ait karmaşık modelleri kullanmak yerine, sistem davranışını izlemeyi esas almaktadır. BM, geleneksel yöntemlerle yeterli doğrulukta modellenemeyen karmaşık sistemlerde, doğrusal olmayan sistemlerde, ilk koşullarında, giriş ve tanımlarında belirsizlikler olan sistemlerde kullanıldığında en iyi çözümleri vermektedir [64,65].

4.2.1. Elektrik Makinelerinde Bulanık Mantık

Elektrik makinelerinin denetimi, makine tipine ve kullanılan denetim yöntemine bağlı olarak çok çeşitli zorluklar içermektedir. En önemli sorun, denetlenecek olan makineye ilişkin bir matematiksel modelin çıkarılmasıdır. Basit modellemeler, makinenin çalışmasını tam yansıtmamakta ve denetimin yeterince duyarlı yapılamamasına neden olmaktadır. Sistemi, tam olarak yansıtan ayrıntılı modellemeler ise denetim işleminin yavaşlamasına yol açmaktadır. Elektrik makinelerinin çok parametrelili oluşu ve doğrusal olmayan (nonlineer) yapıda oluşları, bunların düzgün modellenmesini güçleştirmektedir. BM, makinenin dinamik modelinin kullanılmasına gerek duymadığından, bu tip sorunlara uygun çözümler üretmekte ve denetim işlemini hızlandırmaktadır.

4.2.2. ARM'nun BM ile Denetimi

ARM'lerin, diğer elektrik motorlarına göre ortaya çıkan üstünlükleri endüstriyel uygulamalarda ön plana çıkmasına neden olmuştur. BM'nin katkısıyla, ARM sistemleri, daha etkin kullanılabilir hale gelmiştir. BM'nin kullanılmasıyla, klasik kontrol yöntemlerinin olumsuzlukları ortadan kalkmıştır.

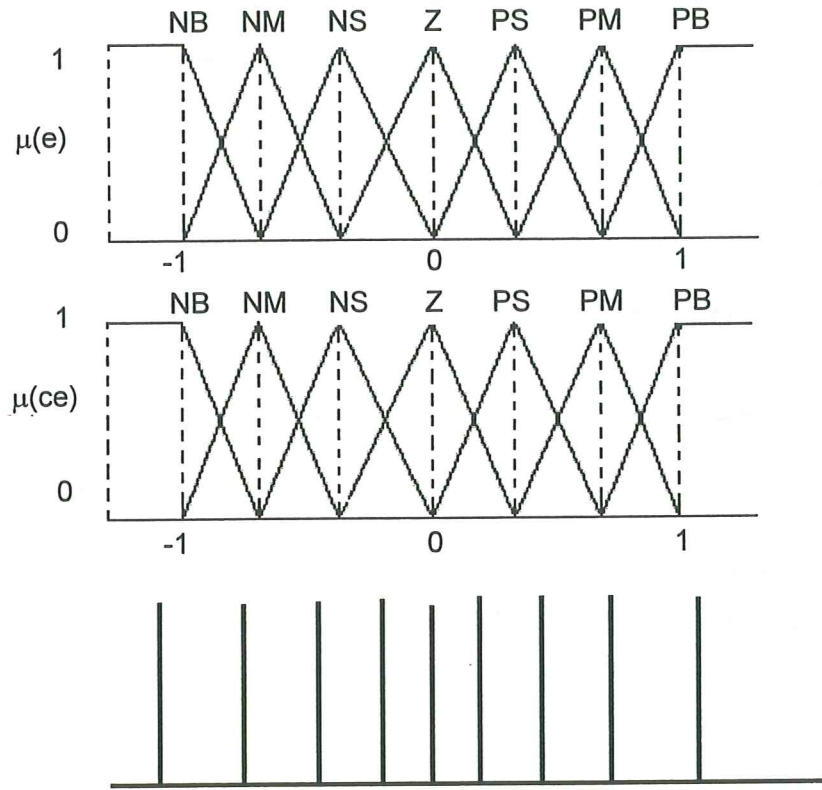
BM, özel bir tür sembolik denetleyici olarak düşünülebilir. Bu denetleyiciler, üç ana bloktan oluşmaktadır. Bunlar; bulanıklaştırma (fuzzification), bulanık karar verme (fuzzy inference) ve durulaştırma (defuzzification) bloklarıdır. Şekil 4.1'de bu sisteme ait toplu gösterim verilmiştir. Bu sistemle ARM hız denetimi yapılmak istendiğine göre, E hız hatası, CE hız hatasındaki değişim ve DU referans akım olarak alınmalıdır. e (E'nin birime indirgenmiş değeri) ve ce (CE'nin birime indirgenmiş değeri) için 7 dilsel düzey ve du (ΔI_{ref}) için de 8 dilsel düzey söz konusudur. İlgili üyelik fonksiyonları, Şekil 4.2'de verilmiştir. Kural tabanı için kuralı oluşturan koşullu önerme,

$$\text{EĞER } E(K) \text{ X VE CE}(K) \text{ Y O HALDE DU}(K) \text{ Z} \quad (4.1)$$

Biçiminde yazılabilir. Burada, X, Y ve Z sırasıyla E, CE ve DU'nun söylem evrenlerindeki alt kümeleridir[66,67].



Şekil 4.1 BM Denetleyici.



Şekil 4.2 Üyelik Fonksiyonları.

Değişkenlerin birime indirgenmiş değerleri;

$$e(pu) = E(K)/GE \quad (4.2)$$

$$ce(pu) = CE(K)/GCE \quad (4.3)$$

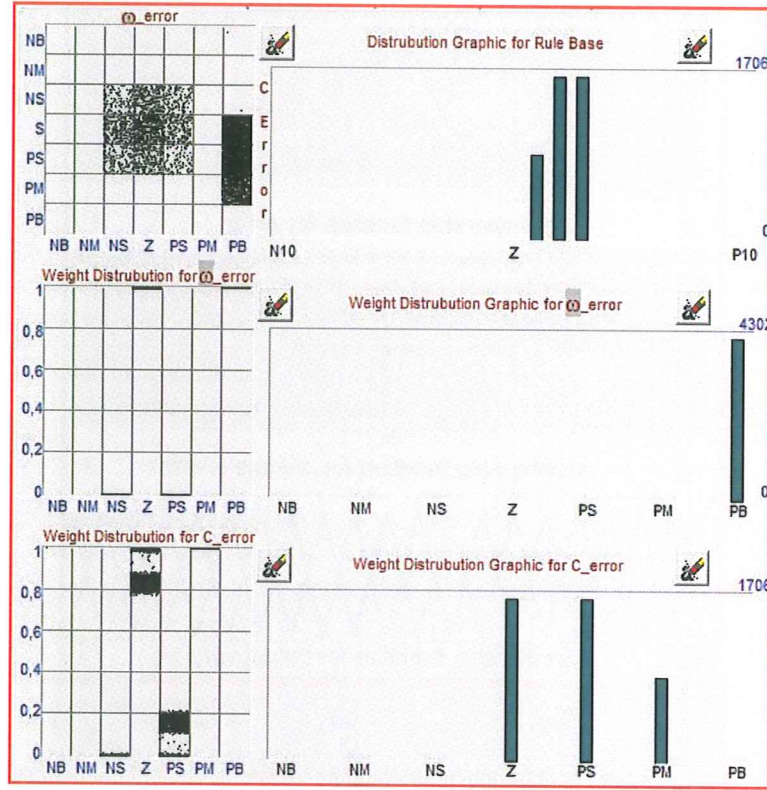
$$du(pu) = DU(K)/GU \quad (4.4)$$

olarak alınacaktır. Burada, GE, GCE ve DU denetleyici kazançlarıdır. Birime indirgenmiş değerlerle çalışmak sisteme esneklik kazandırmaktadır. Denetleyicinin kullanacağı bulanık denetim kuralları Tablo 4.1'de verildiği gibi belirlenmiş ve BM hız denetimi bu kurallarla yapılmıştır [66,67].

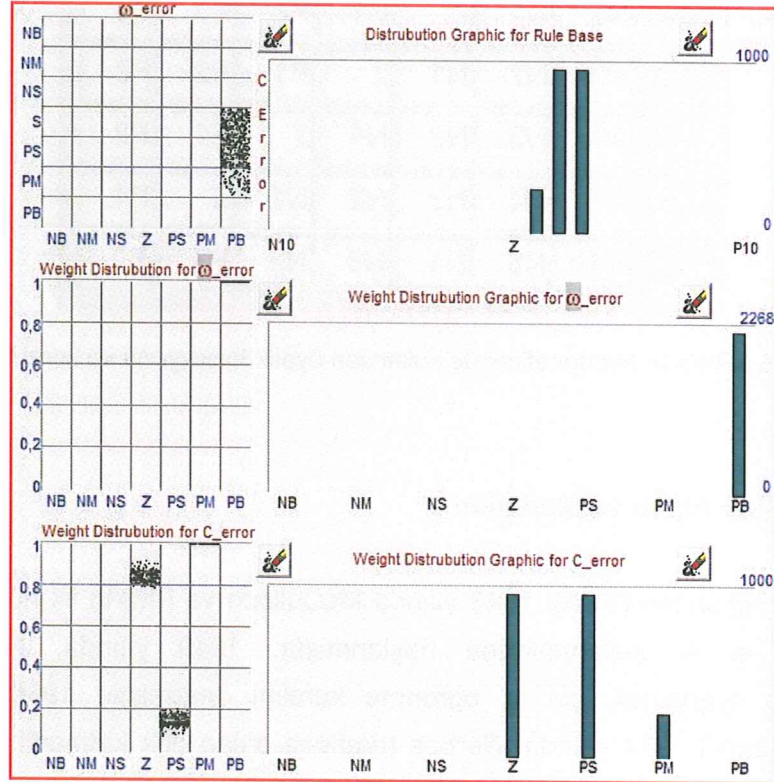
Tablo 4.1. BM denetim kuralları.

	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
NB	S	PK	PK	PO	PB	PB	PÇB
NO	NK	S	PK	PK	PO	PB	PB
NK	NK	NK	S	PK	PK	PO	PB
S	NO	NK	NK	S	PK	PK	PO
PK	NB	NO	NK	NK	S	PK	PK
PO	NB	NB	NO	NK	NK	S	PK
PB	NÇB	NB	NB	NO	NK	NK	S

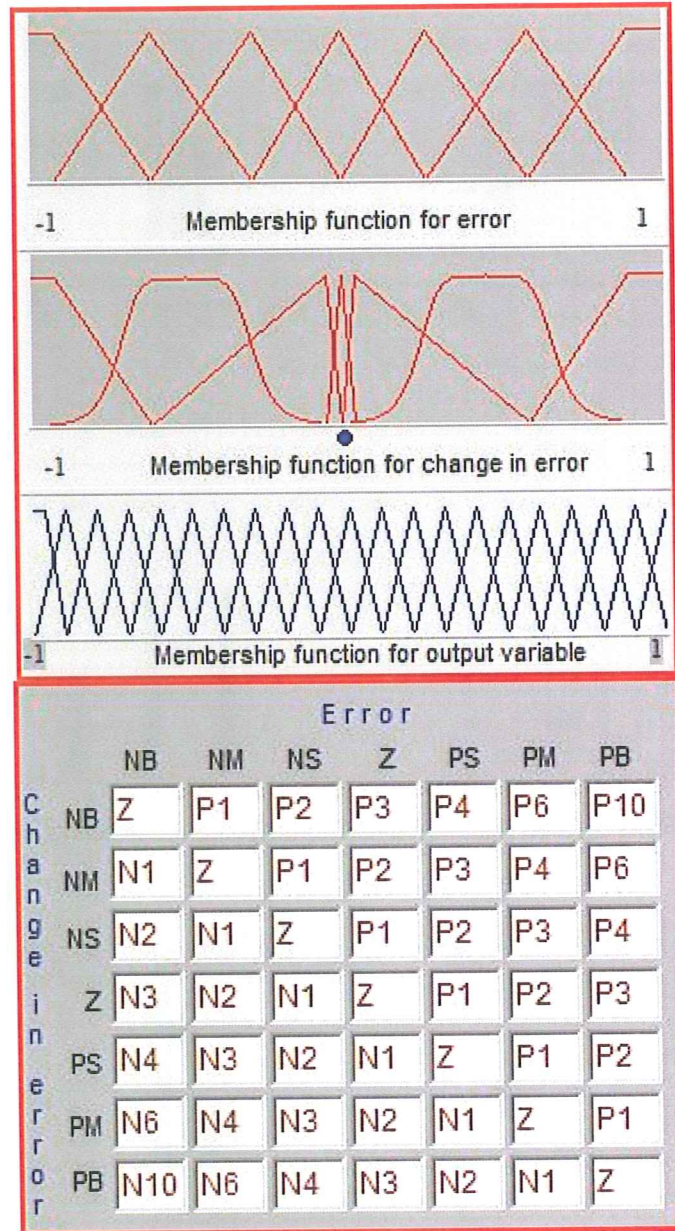
ARM'nun hız denetiminde kullanılacak bulanık mantık denetleyicinin tasarımı sırasında farklı denetim kuralları ve üyelik fonksiyonları benzetim sonucunda denenerek uygun denetim kural tablosu ve üyelik fonksiyonları seçilmiştir.



Şekil 4.3 Tasarım sırasında denenen üyelik fonksiyonlarından birine ilişkin benzetim.



Şekil 4.4 Tasarım sırasında denenen farklı bir üyelik fonksiyonuna ilişkin benzetim.



Şekil 4.5 ARM'nun hız denetiminde kullanılan üyelik fonksiyonu ve kural tablosu.

4.3. Yapay Sinir Ağları ve Modelleri

Yapay Sinir Ağları'nın (YSA), 1943 yılında McCulloch ve Pitts'in ilk hücre modelini geliştirmesi ile ilk kullanımlarına başlanmıştır. 1949 yılında, Hebb, hücre bağlantılarını ayarlamak için ilk öğrenme kuralını önermiştir. 1986 yılında ise Rumelhart, temeli 1974 yılında Werbos tarafınca atılan çok katmanlı algılayıcı tip ağlar için geri yayılım algoritması denen bir eğitim algoritması geliştirdi. Bu çalışma, YSA için yeni çığır açmıştır. Geri yayılım algoritması, halen en çok kullanılan

öğrenme algoritmasıdır. Tezde benimsenen algoritma da bu olduğu için sonraki ayrıtlarda bu algoritmanın esasları açıklanacaktır [68].

YSA, alışlagelmiş bilgi işleme yöntemlerine göre çok daha üstün davranışlar sergilemektedir. Klasik yöntemlerin çoğu seri işlemlerle oluşturulduğunda hız önemli bir sorun olmaktadır. YSA'da ise aynı katmandaki hücreler arasında zamanla bağımlılık olmadığına eş zamanlı çalışabilirler. Bu da, hızlarının çok yüksek olmasını sağlamaktadır. YSA'nın gerçekleştirilmesi, karışık fonksiyonlar yerine basit işlemler içerdiği için oldukça kolaydır. Hücreler, çok basit işlemler yapmalarının yanında, aralarındaki görev paylaşımı ile çok karmaşık ve zor problemleri çözebilmektedirler [69].

Son yıllarda, çok sayıda ağ modeli geliştirilmiştir. Bunlar, temel olarak, ileri beslemeli ya da cebrik ağlar ve geri beslemeli ya da dinamik ağlar olarak iki sınıfa ayrılırlar. İleri beslemeli ağlar örüntü tanımadaki, geri beslemeli ağlar da optimizasyonda kullanılabilmektedir [70].

4.4. YSA'da Öğrenme

YSA'da değişen sistem parametreleri, hücreler arasındaki bağlantıları sağlayan sinapsları gösteren bağlantıların ağırlıklarıdır. Öğrenme için, eğitim kümesine gerek duyulmaktadır. Eğitim kümesi, YSA'ya öğrenme için uygulanacak girişlerden ve istenen çıkışlardan oluşmaktadır. Her adımda, eğitim kümesinden sırayla veya rastlantısal olarak örnek alınarak ağın girişlerine karşılık çıkışlar bulunmaktadır. Tüm örnekler bir defa ağa uygulandıktan sonra belirli bir amaç ölçütü uyarınca ağın bağlantı ağırlıkları değiştirilmektedir. Öğrenme; eğer ağırlıklar, adım sonunda değişiyorsa veri uyarmalı öğrenme, çevrim sonunda değişiyorsa grup uyarmalı öğrenme olarak adlandırılmaktadır. YSA, eğitici veya eğitici olmamak üzere iki şekilde eğitilir. Eğitici öğrenmede, ağ çevreden aldığı girişlere karşı bir eğitiminin belirttiği doğru çıkışı üretecek biçimde kendini ayarlamaktadır. Ağ; hem girişler, hem de istenen çıkışlar verilmektedir. Eğitici öğrenmede ise istenen çıkışlar ağa verilmez. YSA'nın bağlantı ağırlık katsayıları, oluşan hatayı göz önüne almadan bir amaç ölçütü uyarınca sadece girişlere bağlı olarak değişmektedir[68].

Yapay sinir ağlarının konum kestiriminde kullanımı aşağıdaki biçimlerde olmaktadır. Eğer basitleştirilmiş bir teknik kullanılacaksa, o zaman motor Ψ -i karakteristiklerinin bilindiği varsayılarak, YSA bu eğrileri tahmin eden bir non-lineer fonksiyon tahmincisi olarak kullanılır.

YSA, çok katmanlı ileri beslemeli YSA olabilir ve eğitme geriye yayılım algoritmasına dayanır. Eğitme statik özeğri verilerini kullanır. Böylece eğitilen YSA konum

algılayıcısız sistemlerde kullanılabilir. Ancak, ölçülen akım–gerilim değerlerindeki hatalar, kaydırma değerleri, stator direncinin sıcaklığa bağlı değişiminden kaynaklanan hatalardan dolayı konum kestiriminin doğruluğunun etkilenmesine neden olacaktır. Bu hataların çeşitli yöntemler kullanılarak ortadan kaldırılabilir.

Statik özeğrilerin kullanılmadığı daha güvenilir, YSA temelli konum kestiricilerin kullanılması da olasıdır. Böylece, YSA konum kestiriminin görevi, statik özeğrilerin tahmin edilmesi değil, gerçek çalışma koşullarında çıkış büyüklüğü olan rotor konumu ile giriş büyüklükleri, arasındaki ilişkiyi tahmin etmek olacaktır. Bu amaçla, bir başlangıç test düzeneğinde motor kendi gerçek çalışma koşullarında çalıştırılır ve gerçek zamanda giriş-çıkış verileri ölçülür. Bunlar, YSA'nın eğitilmesinde kullanılırlar. Yalnızca, bu eğitim verilerinin toplanması sırasında konum algılayıcılar kullanılmaktadır. Her iki şekilde de akının da bir giriş büyüklüğü olduğu bir YSA modeli kullanılmaktadır. Ve bu bir integrasyon sonucunda elde edilmektedir. Ancak, doğrudan akım ve gerilim bilgileri ile konum kestirimi yapabilen YSA tabanlı bir konum kestirimi oluşturmak da mümkündür. Bu YSA'nın eğitimi, konum algılayıcıların da kullanıldığı bir başlangıç test düzeneği ile elde edilen verilerle yapılabilir.

Çok katmanlı ileri beslemeli YSA kullanıldığında, eğitime sırasında saklı katmanların ve nöronları sayıları deneme yanılma yöntemiyle belirlenir. Ancak, Mamdani-Sugeno tipi Fuzzy-Neural kestirimciler kullanılarak ve de bulanık setlerin sayısı seçilerek YSA'nın yapısının sabit bir yapıda olması sağlanabilir. Böylece, saklı katmanların ve nöronların sayısının bulunması sorunu ortadan kaldırılmış olur. Fuzzy-Neural kestirimcinin eğitimi YSA'nın eğitimi için kullanılan aynı verilere dayanmaktadır.

Öğrenme için geri yayılım algoritması kullanılmaktadır. Öğrenme akı-akım özeğrisi verilerini kullanarak akı-akım giriş çiftlerine karşılık konum çıkışını belirleyecektir. Çok katmanlı ileri beslemeli YSA kullanıldığında öğrenme aşamasında saklı katmanlar ve nöronların sayısı deneme yanılma yoluyla bulunur. Ancak, özel bir bulanık sinir ağı kestirimi ile bu sayılar seçilerek ağ yapısı sabitlenir.

4.5. Geri Yayılım Algoritması

Geri yayılım algoritması, günümüzde en çok kullanılan öğrenme algoritmasıdır. Bunu başlıca nedenleri, öğrenme kapasitesi ve algoritmasının basitliğidir. Geriye yayılım algoritması, gerçek çıkış y ile istenen çıkış d arasındaki karesel hatayı minimum yapmak için gradyen azalma algoritmasını kullanır. k . örnek ya da k . adım için karesel hata $E(k)$; c . çevrimde tüm örnek çiftler için toplam karesel hata $E(c)$;

$$E(k) = \sum_{i=1}^M (d_i(k) - y_i(k))^2 = \|d(k) - y(k)\|_2^2 \quad (4.5)$$

$$E(c) = \sum_{k=1}^P \|d(k) - y(k)\|_2^2 \quad (4.6)$$

olarak yazılabilir. Geri yayılım algoritması bir çevrimde yapılan hatayı minimize eder. Öğrenme oranı yeterince küçükse, $E(k)$ 'yi minimize etmenin, $E(c)$ 'yi minimize ettiği Rumelhart tarafından gösterilmiştir. Bu algoritmaya ait adımlar aşağıda verilmiştir [68].

1.Adım: Öğrenme oranı $\alpha(>0)$ ve kabul edilebilir en büyük hata E_{maks} seçilir. $W_{L \times N}^1$ ve $W_{M \times L}^2$ ağırlıklarına, $b_{L \times 1}^1$ ve $b_{M \times 1}^2$ eşiklerine rastgele küçük değerler atanır.

2.Adım: Eğitim bu adımda başlar. Girişler ağa uygulanır ve tüm hücrelerin çıkışları hesaplanır:

$$x \leftarrow x(p), d \leftarrow d(k) \quad (4.7)$$

$$z_j \leftarrow f^1(w_j^{1T} x + b_j^1) \quad (4.8)$$

$$y_j \leftarrow f^2(w_j^{2T} z + b_j^2) \quad (4.9)$$

3.Adım: Hata hesaplanır.

$$E \leftarrow \frac{1}{2} \|d - y\|^2 + E \quad (4.10)$$

4.Adım: Her iki katmanın da hata işaret vektörleri $\delta_{L \times 1}^1$ ve $\delta_{M \times 1}^2$ hesaplanır.

$$\delta_j^2 = (d_j - y_j) f^{2'}(s_j^2) \quad (4.11)$$

$$\delta_q^1 = f^{1'}(s_q^1) \sum_{j=1}^M \delta_j^2 w_{jq}^2 \quad (4.12)$$

5.Adım: Çıkış katmanının ağırlıkları ve eşikleri ayarlanır.

$$w_{jq}^2 \leftarrow w_{jq}^2 + \alpha \delta_j^2 z_q \quad (4.13)$$

$$b_j^2 \leftarrow b_j^2 + \alpha \delta_j^2 \quad (4.14)$$

6.Adım: Saklı katmanın ağırlıkları ve eşikleri ayarlanır.

$$w_{qi}^1 \leftarrow w_{qi}^1 + \alpha \delta_q^1 x_i \quad (4.15)$$

$$b_q^1 \leftarrow b_q^1 + \alpha \delta_q^1 \quad (4.16)$$

7.Adım: $p < P$ ise $p \leftarrow p+1$, $c \leftarrow c+1$ ve 2. Adıma git; değilse 8 Adıma git.

8.Adım: Eğitim çevrimi tamamlanmıştır. $E < E_{\text{maks}}$ ise eğitim bitmiştir. Çıkış ağırlıkları W^1 ve W^2 , eğitim çevrimine başlamak için 2.Adıma git.

5. TMS320C240 SAYISAL İŞARET İŞLEMCİ (Sİİ) İLE OLUŞTURULAN DENETİM ALGORİTMASI

5.1. Giriş

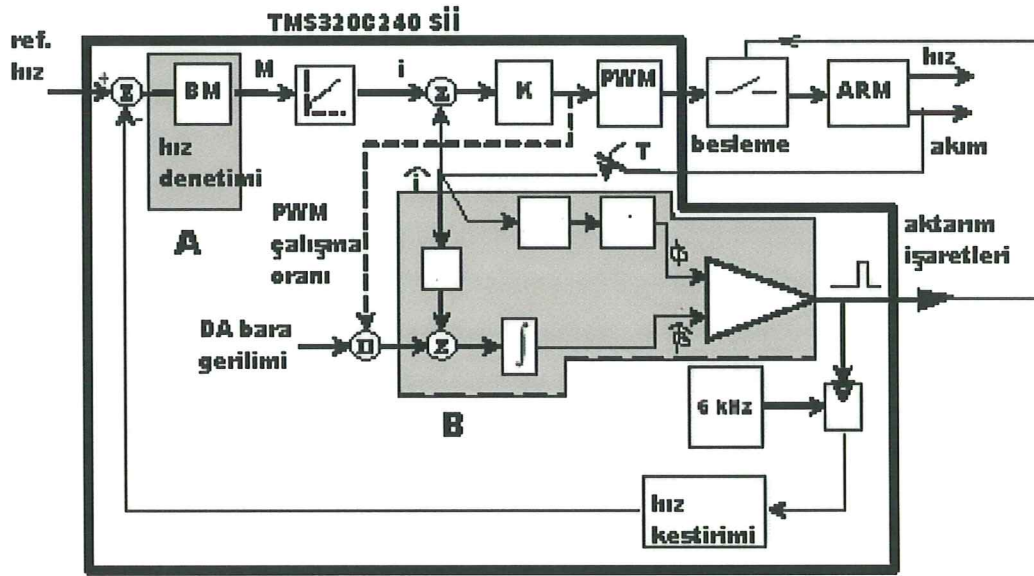
Bir önceki bölümde açıklandığı gibi ARM'nin hız denetiminde BM, rotor konumunun belirlenmesinde ise YSA kullanılmaktadır. BM, konum algılayıcı uygulamalarda ve araştırmalarda birlikte kullanılmaktadır. Böylece klasik denetimde ortaya çıkan karmaşık modellerden kurtulunmuştur. Diğer taraftan, gene konum algılayıcı denetimde ve aynı zamanda makinenin modellenmesinde YSA kullanılmaktadır. Konum algılayıcısız denetim ile ilgili çalışmalarda, YSA tek başına kullanılmıştır [71]. BM'nin karmaşık modellemelere gerek duymaksızın daha hızlı sistem cevabı sağlaması açısından katkıda bulunması ve YSA'nın da ARM'nin gerçek davranışını belirlemedeki katkısı göz önüne alınarak her ikisinin birlikte kullanılması ile ilgili çalışmalar literatürde bulunmaktadır.. Bu birlikte kullanımda, YSA için öğrenim eğitimi makine konum algılayıcı olarak çalıştırılarak yapılmaktadır. Böyle bir sistemde, rotor konumunun konum algılayıcılarla belirlenme zorunluluğunda kalınması algılayıcısız kontrol amacına aykırı düşmektedir. Bu nedenle, algılayıcısız denetimin herhangi bir şekilde rotor konum algılayıcısı kullanılmadan sağlanması öngörülerek tezin ana amacını oluşturan BM ve YSA kullanılan algılayıcısız denetim sistemi için yeni bir algoritma geliştirilmiştir.

Rotor konumunun belirlenmesi için geliştirilen algoritma, C dilinde yazılmış bir programa dönüştürülerek Texas Instruments firması tarafından özellikle motor denetimi uygulamalarında kullanılmak üzere üretilen bir sayısal işaret işlemci olan TMS320C240 ile gerçek zamanlı sisteme uygulanmıştır. Tasarlanan ARM sürüş sisteminin yapısı, bir fazlı köprü doğrultucu, 8/6 ARM'na ait IGBT'li köprü güç elektroniği devresi, IGBT sürücüler ve akım-gerilim algılayıcılardan oluşmaktadır. Tüm sisteme ait blok şema Şekil 5.1'de verilmektedir.

5.2. Programın Yapısı

ARM'nin, konum algılayıcısız denetimi için geliştirilmiş olan sistemin, blok gösterimi Şekil 5.1'de verilmiştir. Bu gösterimde, kalın çizgilerle çerçeve içine alınmış kısım, konum algılayıcısız denetim için TMS320C240'ın içerisinde kullanılan yazılımları,

bunun dışında kalanlar donanım kısmını oluşturmaktadır. Burada, 4 fazlı 8/6 kutuplu bir ARM'nin rotor konum algılayıcısız denetimi amaçlanmıştır. Geliştirilen yazılımlar, rotor konum algılayıcısız denetimin esaslarının yanı sıra, kapalı çevrim hız denetimi ve akım denetimi kurallarını da içermektedir. Şekil 5.1'de BM denetleyici hız denetimi bloğunda A ile gösterilen çerçeve içinde, YSA ile öğrenme ise B ile gösterilen çerçeve içerisinde verilmiştir. Yazılımlar, C dilinde olup kapsamında bulunan kısımların akış şemaları ilerideki ayrıtlarda açıklanmıştır.

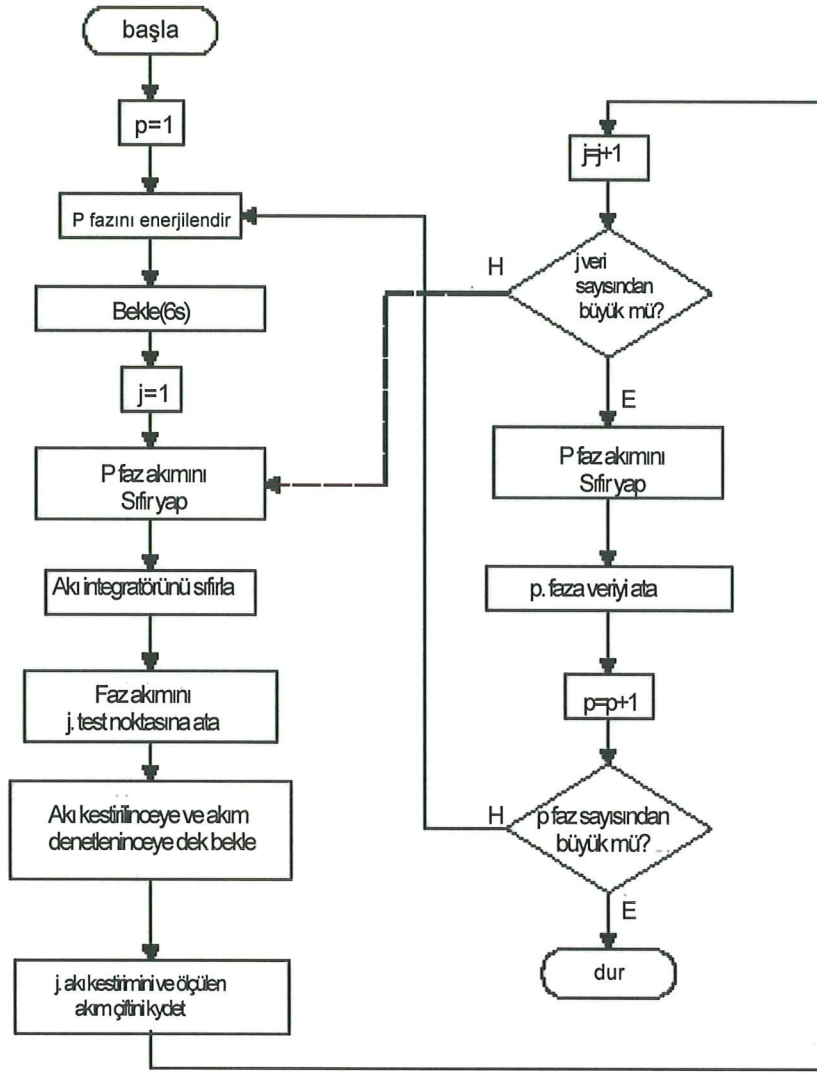


Şekil 5.1 Konum algılayıcısız denetim blok gösterimi.

5.3. Öğrenme Algoritması

ARM'nun akı-akım karakteristiklerinin kestirimi için kullanılan yazılımın akış şeması Şekil 5.2'de verilmiştir. Başlangıç anında, sargılardan biri enerjilendirilerek rotor çakışık konuma geldiğinde rotor mili osilasyon yapmaya başlamaktadır. Bu çınılama, yük ve rotor eylemsizliği, sürtünme ve rotorun ilk harekete başladığı konum gibi parametrelere bağlı olarak oldukça karmaşık bir fonksiyon içermektedir. Bunun üstesinden gelebilmek ve kestirimin doğruluğunu artırmak için rotor çakışık konuma ulaştıktan sonra belirli bir süre beklemek gereklidir. Bu süre 5-10 s alınabilmektedir.

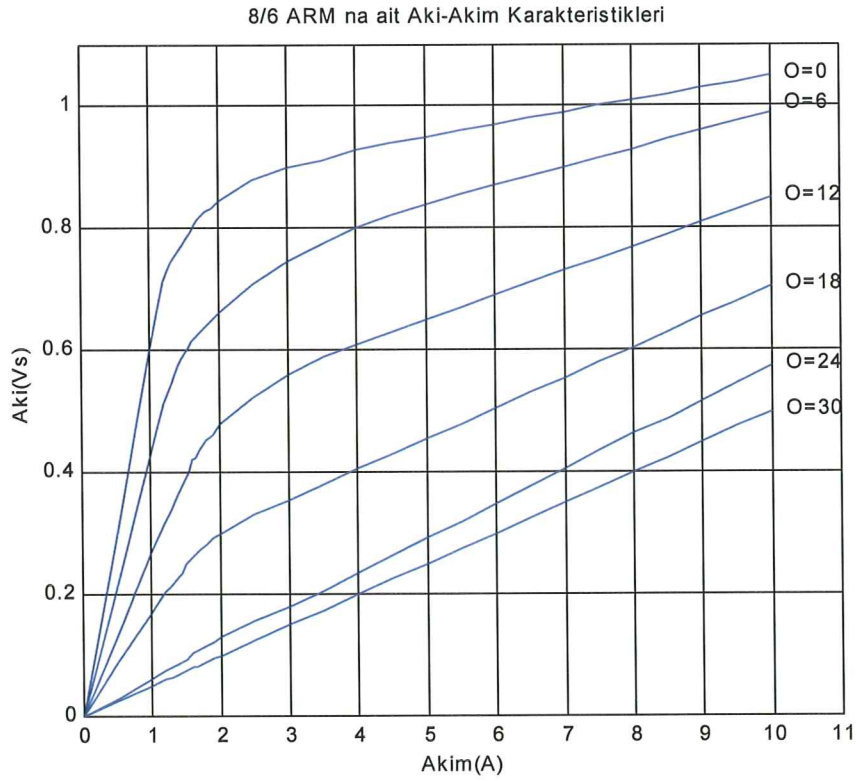
Şekil 5.2'de, bu yöntemle oluşturulan algoritmaya ait akış şeması verilmiştir. Ayrıca, bu bölümde verilen algoritmalara ait yazılımlar, tezin EKLER bölümünde verilmiştir.



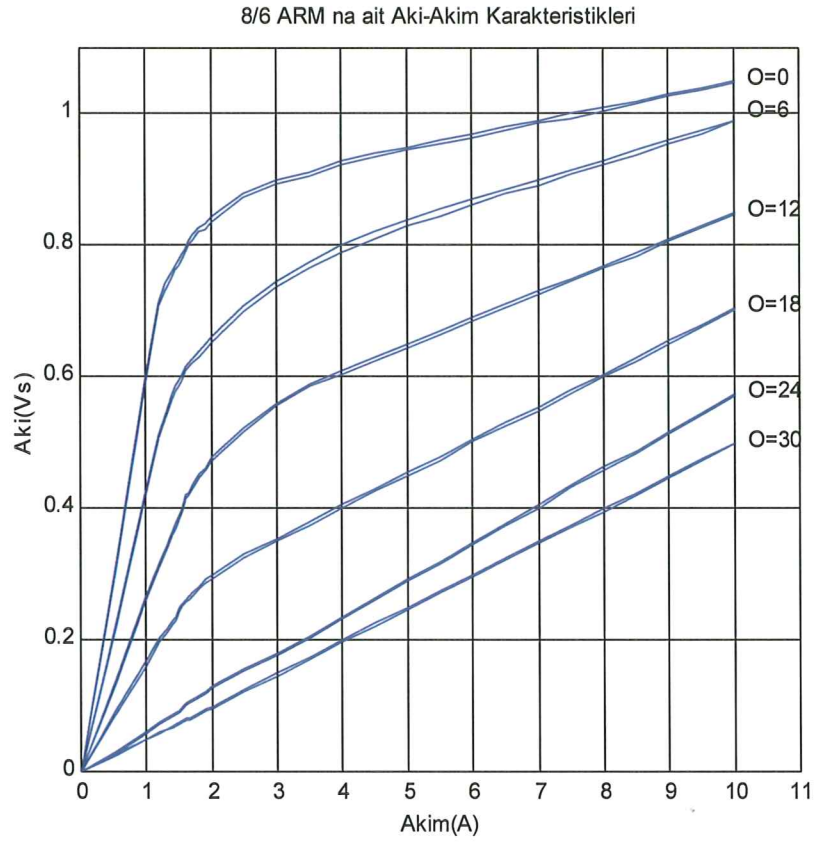
Şekil 5.2 Öğrenme algoritması.

Bu işlem sırasında, ARM'nin değişik konumları için akı-akım ilişkisi belirlenmektedir. Buradan belirli bir akım değeri için referans açıdaki akı elde edilmiştir. Algoritmanın temel yaklaşımı, kestirilen akının, ölçüm sonuçlarından belirlenen akı ile karşılaştırılması ve bu yolla, daha önce saptanmış olan referans açığı göre rotor konumunu belirlemektir. Böylelikle, motor karakteristiklerini veren önceden hazırlanmış modellere veya tablolara gerek duyulmamaktadır. Yöntemin ana fikri, gerçek zamanda çalışan bir algoritma ile akı-akım değişiminin, motorun her fazı için çakışık ve ayırık konumlar referans alınarak belirlenmesi ve bu bilgiler kullanılarak rotor konumunun alınan referans konumlara göre yerinin kestirilmesine dayanmaktadır.

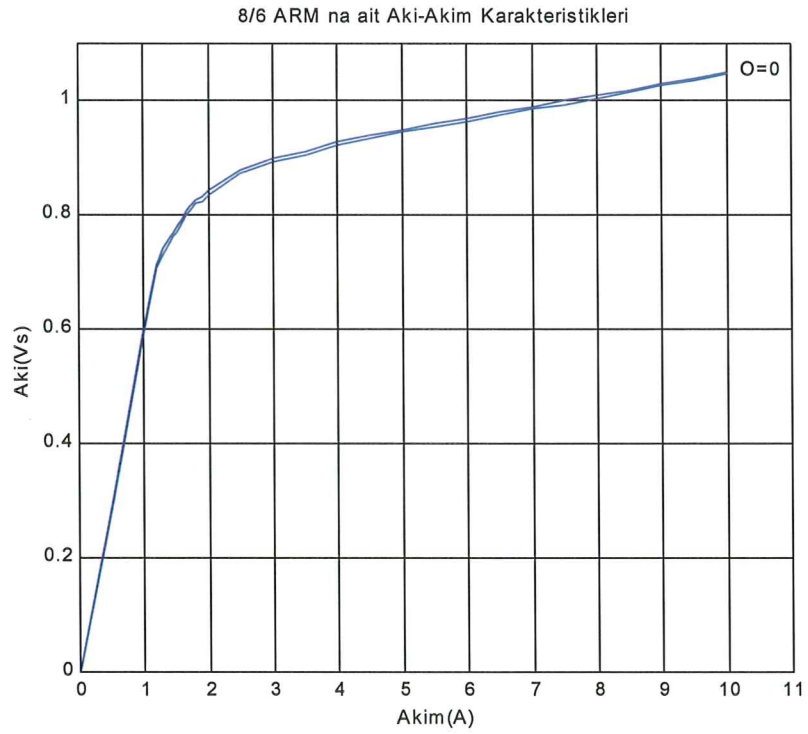
Akı-akım karakteristiklerinin doğrusal olduğu bölgelerde ARM'nun çalıştırılması ve bu doğrusal bölgede kalınması durumunda çakışık ve ayırık konumlar arasındaki akı-akım değişimleri, YSA ile oluşturulan iterasyonlarla belirlenir. Böylece, çakışık ve ayırık konumlar için ilk çalıştırma sırasında alınan ölçümlerle belirlenen eğrilerin arasındaki bölge için diğer konum açlarına ait eğriler oluşturulabilmektedir. Eğriler arasında iterasyon sırasında geçişleri sağlamak amacıyla uygun katsayılar, motorun ilk başlangıç anında belirlenir. İkinci bölümde, akı-akım karakteristiklerinin deneysel olarak elde edilmesi ile ilgili verilen yöntem kullanılarak denetimi yapılan 8/6 ARM'nun akı-akım karakteristikleri farklı konum açıları için deneysel olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu eğriler ve YSA ile belirlenen eğrilere ilişkin karşılaştırmalı grafikler, Şekil 5.3, 5.4, 5.5 ve 5.6'da verilmiştir.



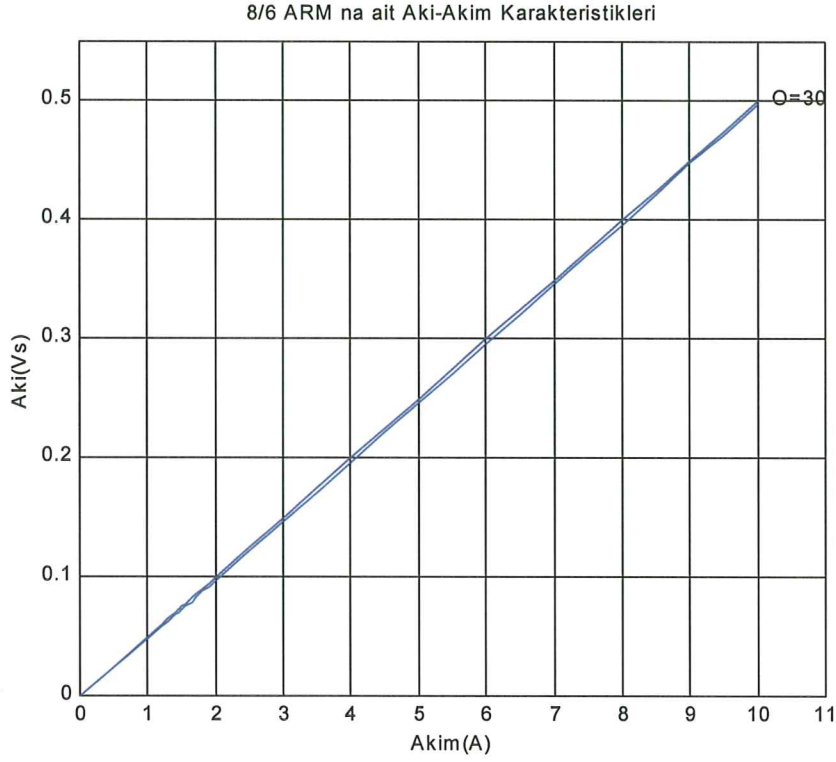
Şekil 5.3 ARM deneysel olarak elde edilen akı-akım karakteristikleri



Şekil 5.4 ARM karşılaştırmalı aki-akım karakteristikleri



Şekil 5.5 ARM'nun çakışık konuma ait karşılaştırmalı aki-akım eğrisi

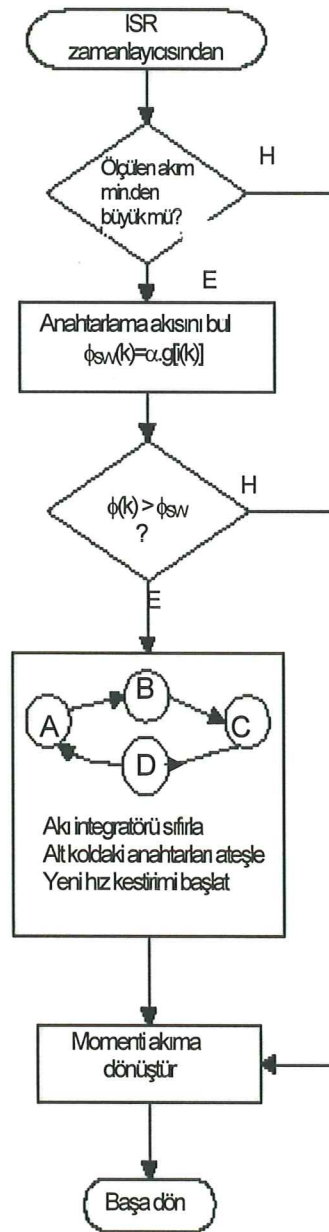


Şekil 5.6 ARM'nun ayırık konuma ait karşılaştırmalı akı-akım eğrisi

Şekil 5.3'de verilen karakteristikler, deneysel olarak belirlenen karakteristiklerdir. Bu deneyler ile akı-akım karakteristiklerinin yanı sıra endüktansın konum açısına göre değişimi ve statik moment karakteristikleri de elde edilmiştir. Akı-akım karakteristiklerine ait deneyler, ARM'nun faz sargılarının simetrik olması nedeniyle yalnızca bir faz sargısı için yapılmış ve eğriler bu faz için elde edilmiştir. Şekil 5.4'de deneysel olarak elde edilen eğriler ve YSA kullanılarak kestirilen eğriler aynı eksen takımında verilmiştir. YSA ile belirlenen eğriler, 2° aralıkla farklı konum açıları için elde edilmiş olmasına karşılık, akı-akım karakteristik deneyi sırasında bu aralık 6° 'de tutulmuştur. Bu nedenle, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'de verilen eğriler, konum açılarının $\theta=0^\circ$ (çakışık konum) ile $\theta=30^\circ$ (ayırık konum) arasında 6° aralıklarla verilmektedir. Şekil 5.5. ve Şekil 5.6'da verilmiş olan eğriler, deneysel ve kestirilmiş eğriler arasındaki karşılaştırmayı, sırasıyla, $\theta=0^\circ$ (çakışık konum) ile $\theta=30^\circ$ (ayırık konum) için göstermektedir. Kurulmuş olan YSA modeli tarafından öngörülen akı-akım değerleri ile oluşturulan eğrilerin doğrusal bölgede, deneysel sonuçlarla çakıştığı görülmüştür. Bu sonuçlardan, kurulan YSA ile öğrenme modelinin, gerçek değerlere yakınsadığı ve durum kestirimi için kullanılabileceği sonucu çıkmaktadır.

5.4. Aktarım Algoritması

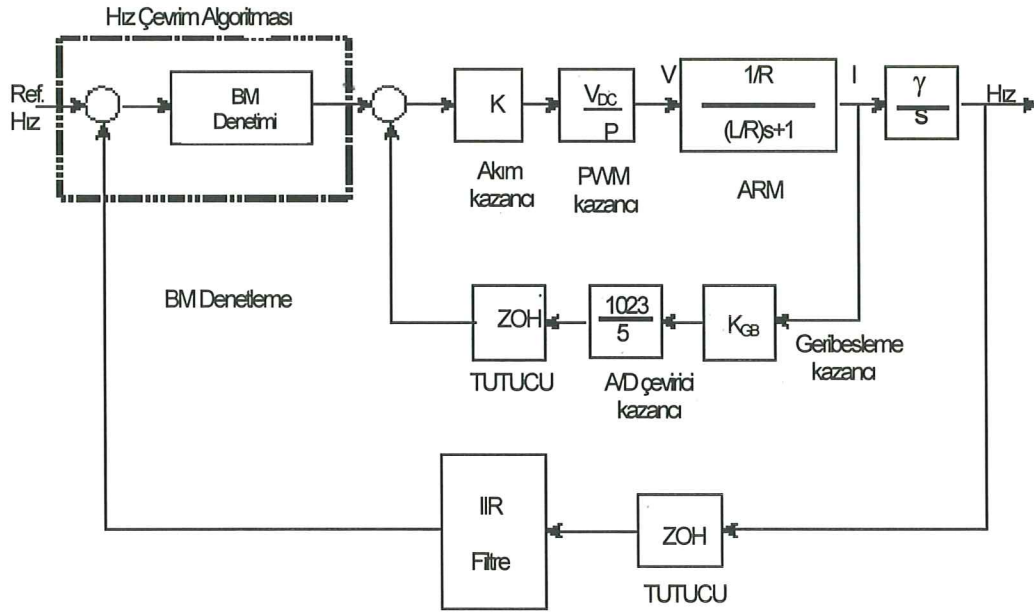
Aktarım algoritmasına ilişkin akış şeması Şekil 5.7’de verilmiştir. Bu algoritma, ISR zamanlayıcısının her işaretinde bir kez koşturulmaktadır. Oluşturulan bu algoritma ile rotor konumunun değişimi bilgisini taşıyan ISR zamanlayıcısında her işaret alındığında, ölçülen akımın belirli bir eşik (minimum) değerden büyük olması durumunda kestirilen akıyı, ölçüm sonuçlarından hesaplanan akı ile karşılaştırılır. Bu karşılaştırma sonrası, bir sonraki faz sargısını enerjilendirmek amacıyla, aktarım işlevini gerçekleştiren güç elektroniği besleme devresinin alt kolundaki anahtarları sürebilecek uygun çıkışların üretilmesi sağlanır.



Şekil 5.7 Aktarım algoritması.

5.5. Hız Kestirimi ve Denetimi

Hız, aktarım kararları arasında, ISR zamanlayıcı tarafından üretilen zaman adetlerinin sayılması ile kestirilir. Hız denetimi için konum algılayıcı sistemlerdekine benzer bir karşılaştırma yöntemi kullanılmıştır. Ancak, hızın denetlenmesinde daha hızlı cevap verebilen ve basit bir yapıda kurulan BM denetleyici seçilmiştir. Bunu sağlamak amacıyla bulanıklaştırma, kural tablosu ve durulaştırma işlemlerine ait bloklar bir arada BM denetleme bloğu olarak gösterilmiştir. Hız, referans hız ile kestirilen mil hızının karşılaştırılması ve elde edilen hatanın ortadan kaldırılması ile denetlenmektedir. Bu denetime ilişkin blok gösterimi, Şekil 5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.8 Hız denetleyici blok gösterimi.

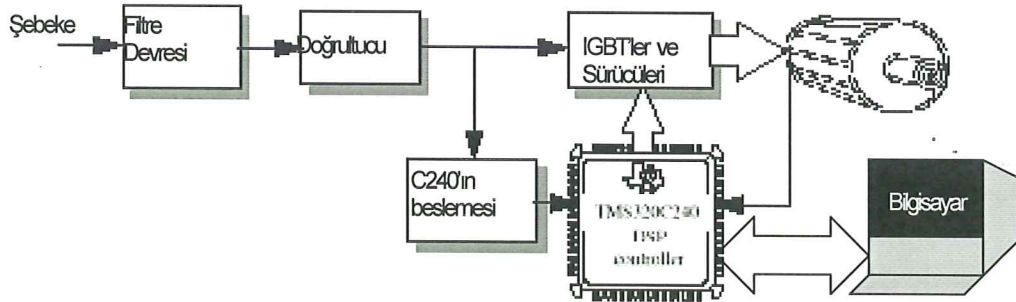
6. GERÇEKLEŞTİRİLEN SİSTEMİN YAPISI, DENEY VE BENZETİM SONUÇLARI

6.1. Giriş

Bu bölümde, ARÇELİK A.Ş. AR&GE Merkezi Laboratuvarlarından temin edilen 8/6 kutuplu, 4 fazlı ARM'nin, rotor konum algılayıcısız denetimi amacıyla gerçekleştirilen sistem ve bu sisteme ait deneylerin yapıldığı deney düzeni tanıtılmış, değişik hızlarda seçilen değişik yük durumları için deneyler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deney sonuçlarının benzetim sonuçları ile karşılaştırılmasını yapma amacıyla benzetim sonuçları da bu bölümde verilmiştir.

6.2. Sistemin Yapısı

Sistem; motor, güç elektroniği besleme devresi, güç elektroniği anahtarlarının sürücü devresi, TMS320C240 Sİİ ve bilgisayardan oluşmaktadır. Bilgisayar, Sİİ için C programlama dilindeki yazılımların hazırlanması, derlenmesi ve Sİİ modülüne aktarılmasında kullanılmaktadır. Buna ilişkin temel yapı Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1 Gerçekleştirilen sistemin temel gösterimi.

Güç elektroniği besleme devresinde, ikinci bölümde yapısı ve çalışma şekli açıklanan köprü besleme devresi kullanılmıştır. Kullanılan motor 4 fazlı olduğundan besleme devresinde, 8 adet IGBT ve 8 adet hızlı diyot kullanılmıştır. Aradevre geriliminin değeri ve sargı akımlarının nominal değerleri göz önüne alınarak anahtarların güvenli çalışabilmeleri için tolerans bırakılarak 600V, 40A gerilim ve

akım değerlerine sahip International Rectifier firması tarafından üretilen TO-247 kılıflı IRGPC40MD2 model IGBT'ler kullanılmıştır. Benzer nedenden dolayı, geri besleme diyotları için 600V, 8A'lık yine, International Rectifier firmasının ürettiği TO-220 kılıflı, çok hızlı diyotlar (ultrafast recovery) seçilmiştir. IGBT'lerin sürülmesinde, IGBT kapı sürücü optik-bağlayıcıları kullanılmıştır. Bunlar, Hewlett Packard firmasınca üretilen HCPL-3100 tüm devreleridir. Giriş ve çıkışı yalıtılmış olan bu tüm devreler ile anahtarların kapıları güvenle sürülmektedir. Ancak dikkat edilmesi gereken bir konu, köprü tipi devrelerin kullanıldığı tüm uygulamalarda karşılaşılan üst kol anahtarlarının kapı işaretlerinin referanslarında karşılaşılan sorundur. Bu sorun, alt kolda bulunan anahtarların emetör uçları aynı noktaya bağlı olduğundan yaşanmamaktadır. Bu yüzden, alt kolda kullanılan IGBT'lerin sürücüleri aynı simetrik ayarlı gerilim kaynağından beslenebilmesine karşılık; üst kolda bulunanların her bir sürücüsü için birbirinden yalıtılmış 4 ayrı simetrik ayarlı gerilim kaynağı kullanılmalıdır. Rotor konumunun dolaylı olarak belirlenmesinde yapılacak olan ölçümlerden biri olan akım algılanmasında, LTA50P/SP1 tip LEM akım algılayıcılar kullanılmıştır. Böylece, güç sistemi ile denetleme işaretleri yalıtılmış olmaktadır. Her faz sargısı için bir adet olmak üzere 4 fazlı olan 8/6 ARM için toplam 4 adet akım algılayıcı kullanılmıştır. Kullanılan çekirdek tipli akım algılayıcılar 50 A nominal akım değerine sahiptir. Çekirdek içerisinden geçen iletkendeki akım nominal değerdeyken, gerilim çıkışlı olarak kullanılan bu akım algılayıcının çıkışında 5 V'luk gerilim elde edilebilmektedir. Denetimi yapılan ARM'nun akım değerleri 10 A'den küçük olduğu için akım algılayıcının çıkışında uygun ve yeterli seviyede bir gerilim işareti okuyabilmek amacıyla sargıları besleyen iletkenler, çekirdeğin içerisinden 5 tur geçirilerek her faza ilişkin akım değerleri kaydedilmiştir. Bu durumda, çekirdek içerisinden aynı değerli faz akımı aynı yönde beş kez geçtiğinden, akıma karşılık okunan gerilim değeri gerçek akım değerine ait olan değerden 5 kat fazla olacaktır. Daha sonra bu gerilim değeri, yazılım içerisinde düzeltilerek gerçek akıma ait değerlerin kullanılması sağlanmıştır.

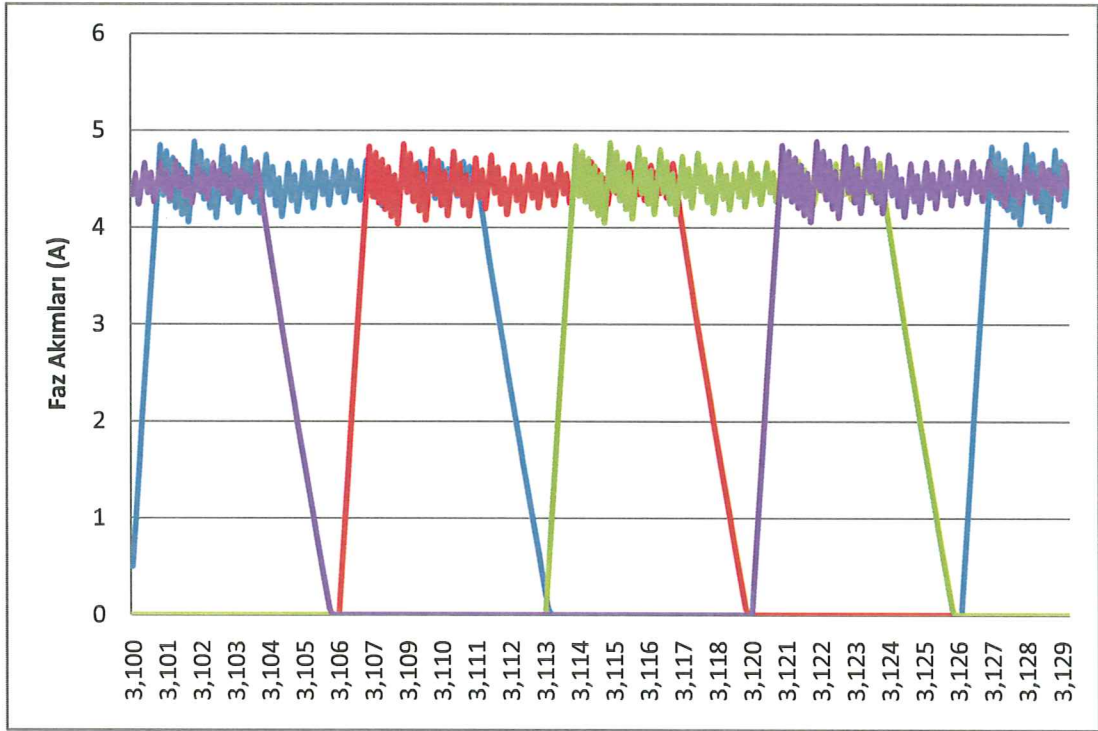
6.3. Deney Düzeni

ARM'nin, rotor konum algılayıcısız denetimi sırasında, giriş-çıkış güçlerinin, veriminin, farklı yüklerde ve hızlarda davranışının ve güvenilirliğinin belirlenmesi ve diğer denetim yöntemlerle karşılaştırılabilmesi için dinamik deneylerinin yapılması gereklidir. Bu amaçla, ARM, bir DA generatörü yardımı ile yüklenerek, iki makine millerinin arasına bağlanmış olan bir moment algılayıcı ile sürekli hal momenti belirlenmiştir. ARM mili ve yükleme için kullanılan doğru akım makinesinin mili arasında bir moment algılayıcı bulunmaktadır. Kullanılan bu motor test sisteminde bulunan moment algılayıcı ile ancak sürekli hal moment değerleri kaydedilebilmiştir.

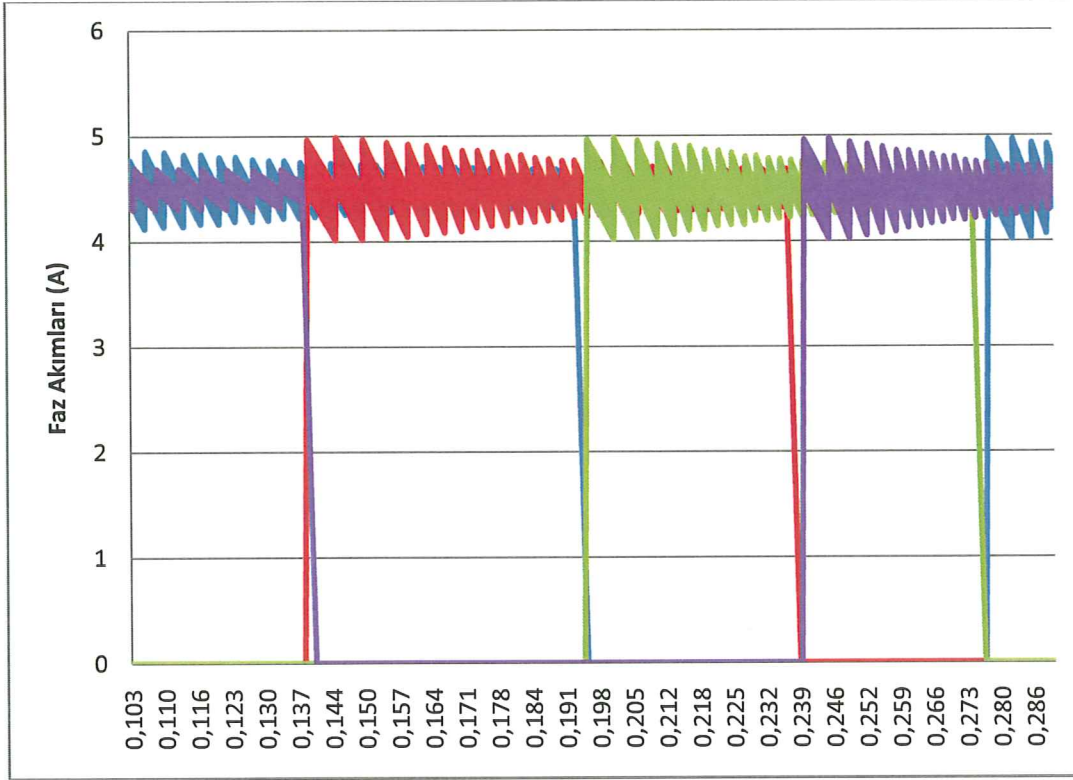
6.4. Deney ve Benzetim Sonuçları

Yukarıda belirtilen deney düzeneği ile BM ve YSA ile konum algılayıcısız 8/6 ARM'nun denetimi, gene yukarıda belirtilen algoritmalar ve bunların kullanılması ile oluşturulan C dilinde yazılmış programın koşturulması ile gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirme, 500 d/dak ve 900 d/dak lık motor hızları için ve 0.5 Nm, 0.8 Nm ve 1.2 Nm'lik yükler için yapılmıştır.

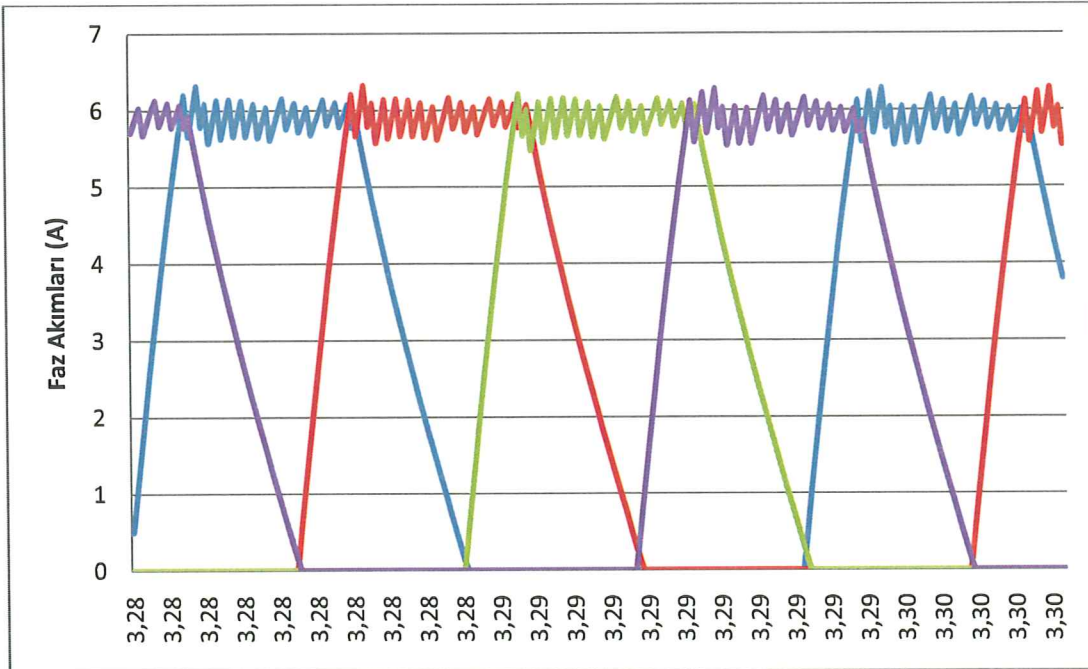
Söz konusu deneyler sonucunda elde edilen çıktılar, faz akımlarının zamana göre değişimleri olarak Şekil 6.2,6.3,...,6.7'de verilmiştir.



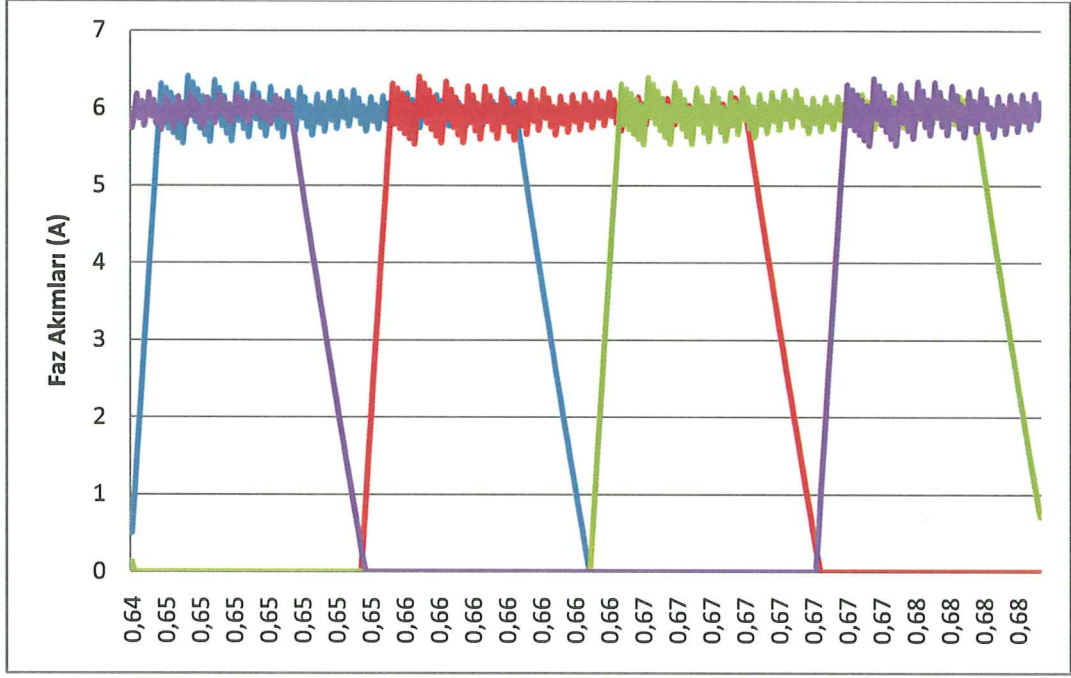
Şekil 6.2 900 d/dak ve 0,5 Nm için faz akımlarının zamana göre değişimleri.



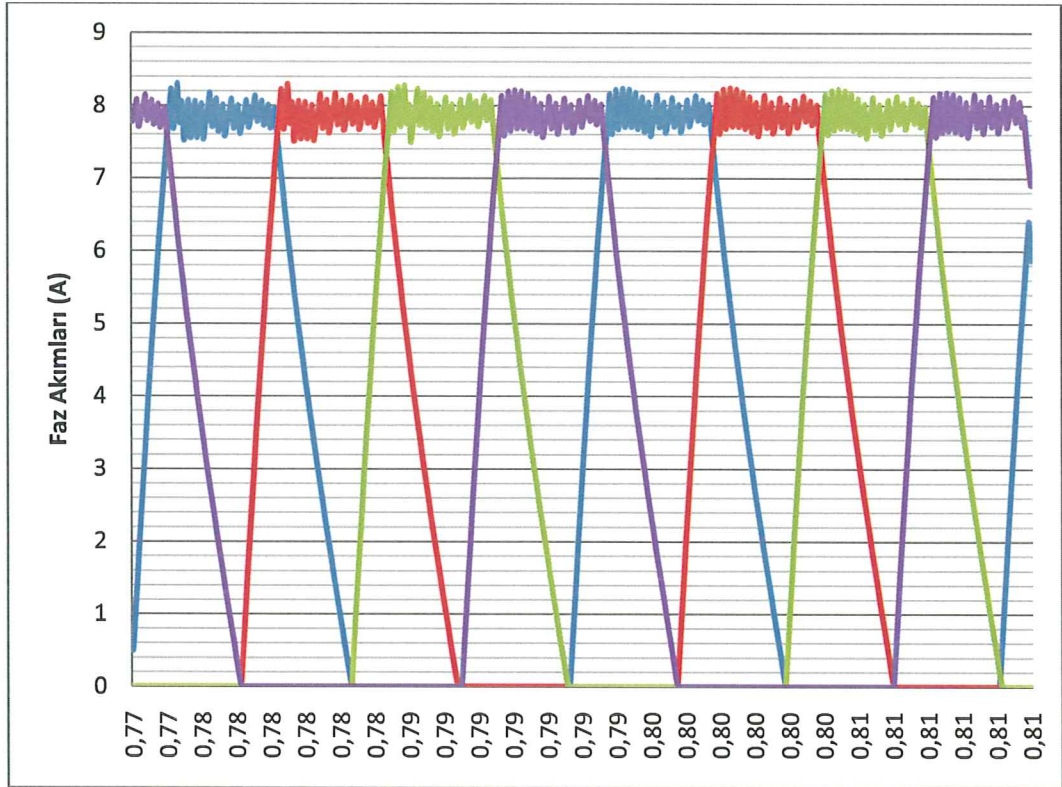
Şekil 6.3 500 d/dak ve 0,5 Nm için faz akımlarının zamana göre değişimleri.



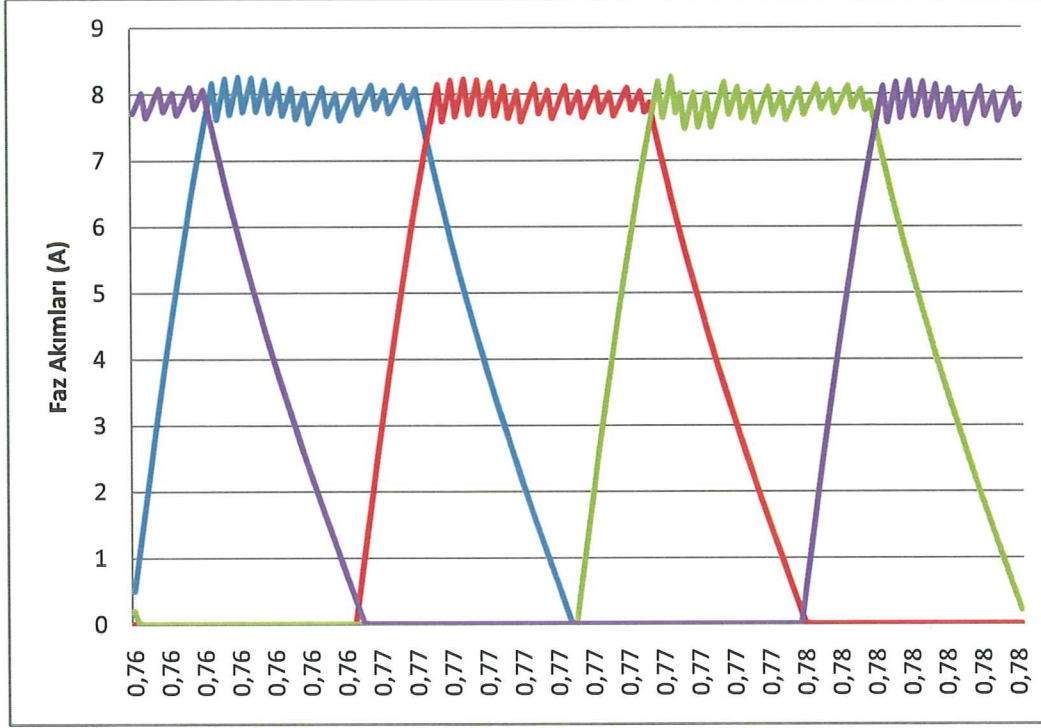
Şekil 6.4 900 d/dak ve 0,8 Nm için faz akımlarının zamana göre değişimleri.



Şekil 6.5 500 d/dak ve 0,8 Nm için faz akımlarının zamana göre değişimleri.

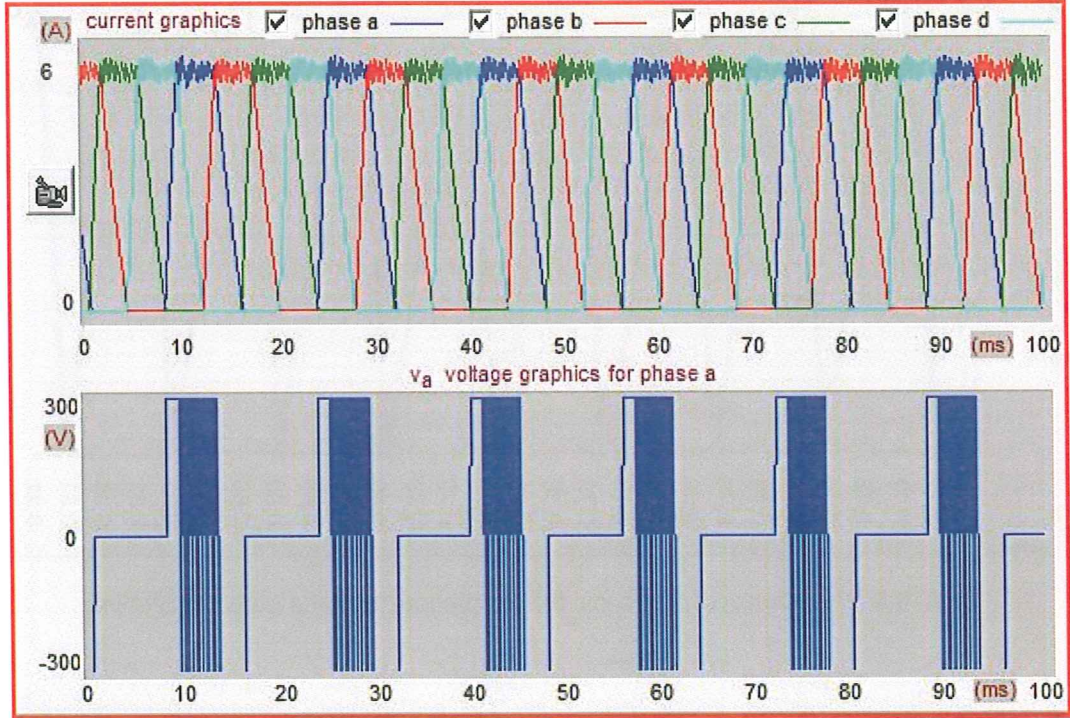


Şekil 6.6 500 d/dak ve 1,2 Nm için faz akımlarının zamana göre değişimleri.

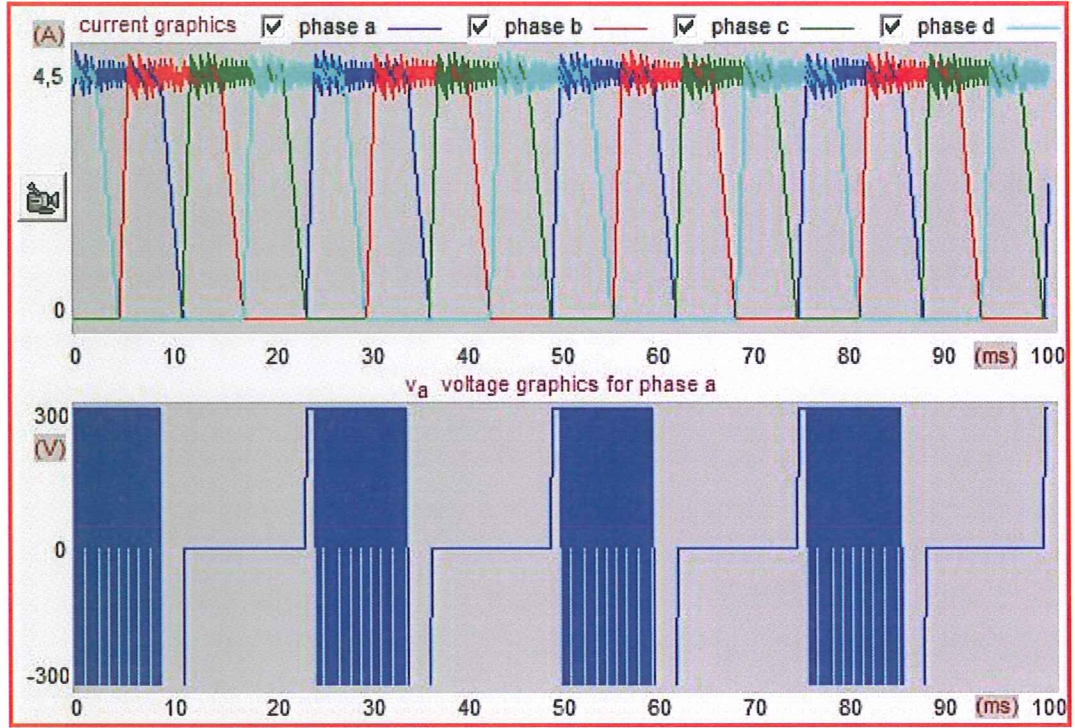


Şekil 6.7 900 d/dak ve 1,2 Nm için faz akımlarının zamana göre değişimleri.

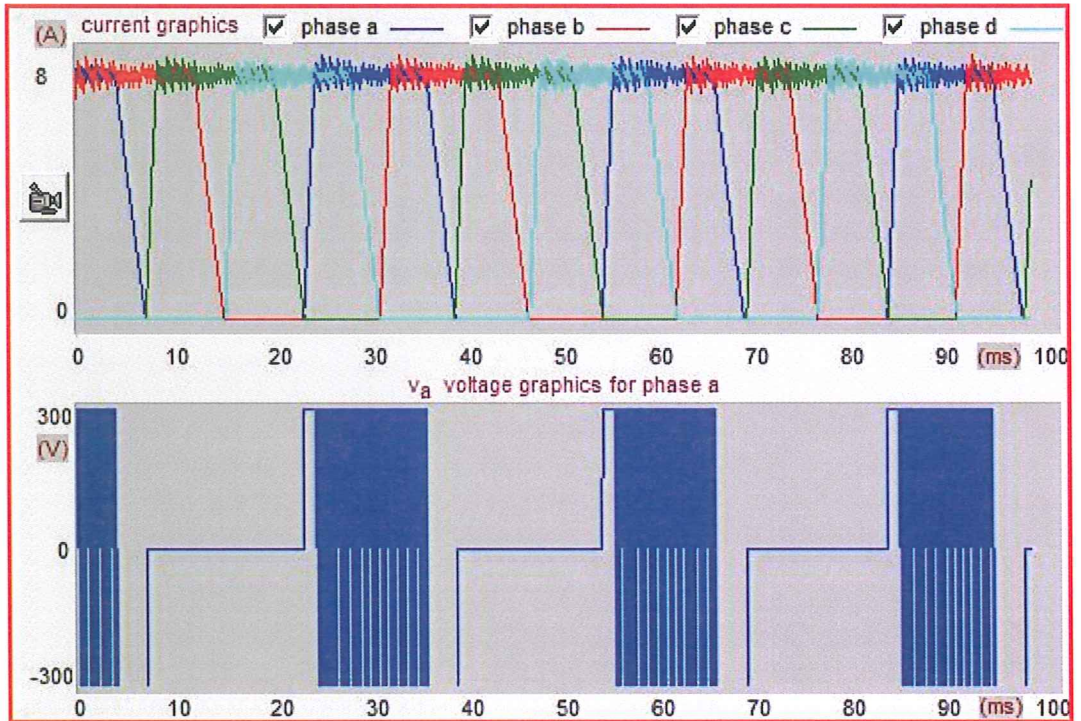
Aynı sisteme ilişkin benzetim sonuçlarını gösteren akım ve gerilim grafikleri, Şekil 6.8, 6.9,...,6.14'de verilmiştir.



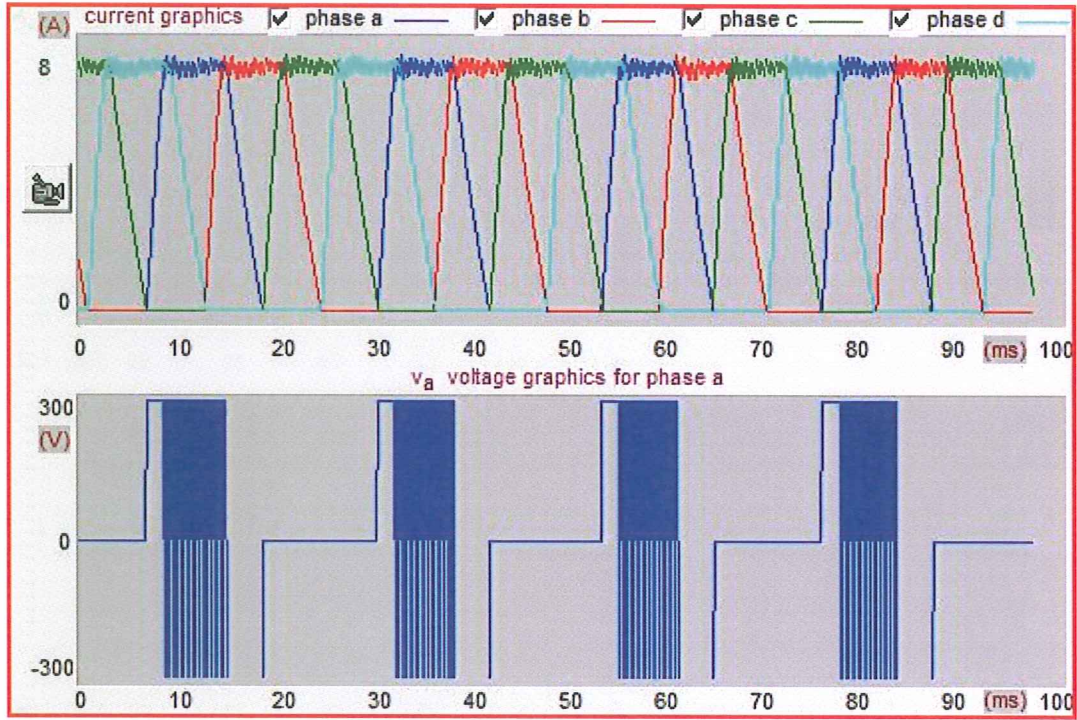
Şekil 6.8 900 d/dak ve 0,8 Nm için faz akımları ve a fazı geriliminin zamana göre değişimleri.



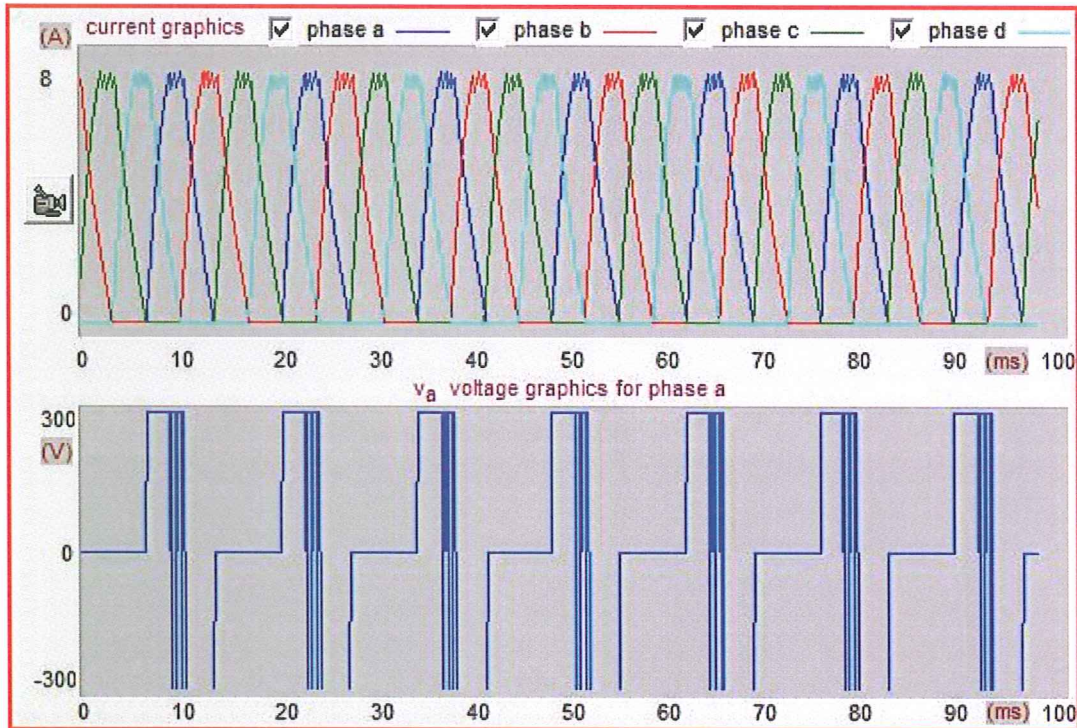
Şekil 6.9 500 d/dak ve 0,5 Nm için faz akımları ve a fazı geriliminin zamana göre değişimleri.



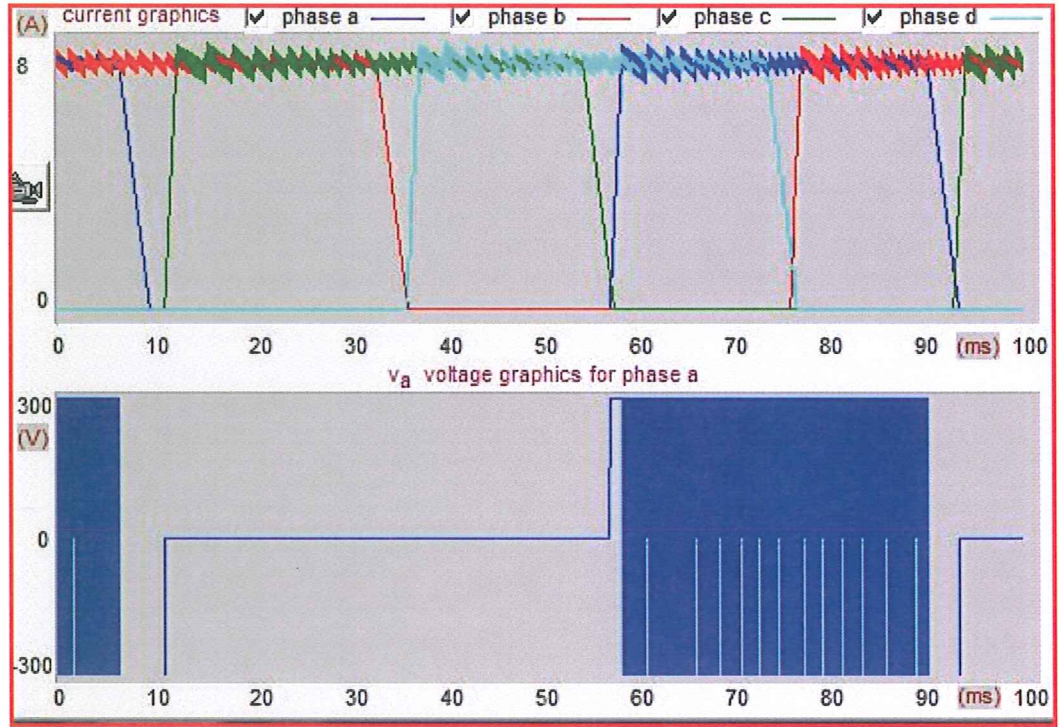
Şekil 6.10 500 d/dak ve 1,2 Nm için faz akımları ve a fazı geriliminin zamana göre değişimleri.



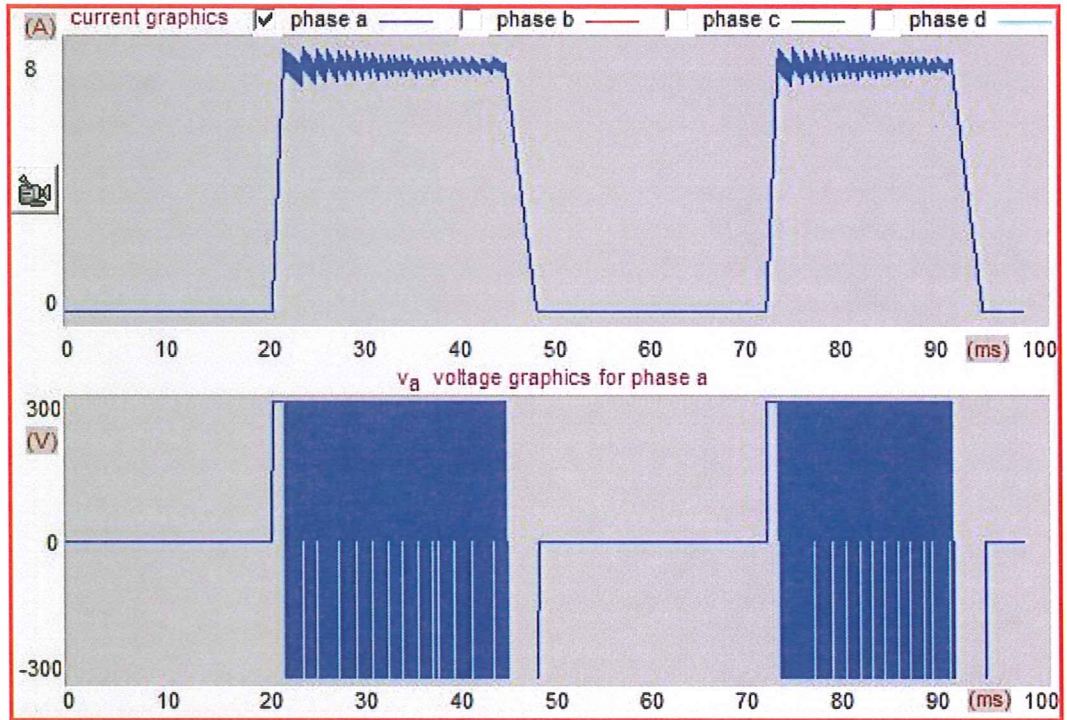
Şekil 6.11 900 d/dak ve 1,2 Nm için faz akımları ve a fazı geriliminin zamana göre değişimleri.



Şekil 6.12 1200 d/dak ve 1,2 Nm için faz akımları ve a fazı geriliminin zamana göre değişimleri.



Şekil 6.13 200 d/dak ve 1,2 Nm için faz akımları ve a fazı geriliminin zamana göre değişimleri.



Şekil 6.14 300 d/dak ve 0,8 Nm için a fazı akımı ve a fazı geriliminin zamana göre değişimleri.

7. SONUÇLAR

Bu tezde, anahtarlama relüktans motorunun konum algılayıcı kullanılmaksızın hız ve moment denetiminin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, önce konum algılayıcı sistemlerin incelemesi yapılmış ve bunların getirdiği sorunlar ortaya konulmuştur. Bu sorunlardan en önemlisi, ARM'nin endüstride daha yaygın kullanılmasını önleyen konum algılayıcıların getirdiği ek maliyet, boyut ve karmaşıklığıdır. Konum algılayıcıların ortadan kaldırılması ile hem maliyetin düşürülmesi, hem tüm sistemin boyutlarının küçülmesi, hem de sistem güvenilirliğinin artırılması sağlanmış olacaktır. Bu nedenle, rotor konum algılayıcı birimlerini içermeyen konum algılayıcısız denetimli ARM, tezin temelini oluşturmaktadır.

Konum algılayıcısız denetim için, ARM'nin faz sargısı akım ve gerilim bilgilerinden yola çıkılarak yapay sinir ağlarıyla öğrenme algoritması kullanılarak uygun aktarım işaretlerinin oluşturulması sağlanabilmektedir. Literatürde, giriş bölümünde de belirtildiği üzere YSA'nın eğitilmesi konum algılayıcılarının kullanılması ile sağlanmıştır. Her ne kadar bu uygulamalarda, denetimin konum algılayıcısız olduğu belirtilmekteyse de öğrenme sırasında konum algılayıcılara ihtiyaç duyulmuştur. Bu aksaklığın ortadan kaldırılması, başka bir deyişle, denetimin tamamen konum algılayıcısız olmasını sağlamak amacıyla tezde yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmada, başlangıç anında motor faz sargılarının belirli bir süre enerjilendirilmeleri ile elde edilen verilerle YSA'nın sistemi tanıyarak kendi modelini oluşturması, diğer bir deyişle; akı-akım değişimlerini, kendi kendine öğrenmesi mümkün kılınmıştır. Diğer taraftan, bulanık mantık denetleyici ile makinenin doğrusallıktan uzak olan karmaşık matematik modelinin kurulması veya kullanılmasına gerek duyulmadan uygun üyelik fonksiyonları ve kural tabloları oluşturularak basit, cevabı hızlı ve karar verebilen bir hız denetimi gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucunda, klasik yöntemlerin hız denetiminde gereksinim duyduğu, motorun s veya z-domenlerindeki karmaşık; ancak, tam olarak gerçek sisteme ait olmayan modellerinin kurulması ve kullanılması gereği ortadan kaldırılmıştır.

Sonuç olarak, BM ve YSA'nın birlikte kullanılması ile değişik yüklerin değişik hızlarda gerçekleştirilen benzetim ve deney sonuçları karşılaştırıldığında birbirleriyle örtüşükleri saptanmıştır.

Gelişen teknolojiye paralel olarak sayısal işaret işlemcilerinin giderek daha hızlı ve yüksek kapasiteli oldukları gözlemlenmektedir. Bu durum, tezde kullanılan TMS320C240 işlemciden daha gelişmiş yeni nesil Sİİ'lerin kullanılması durumunu ortaya çıkarmaktadır. Bunun sonucunda da sistemin daha hızlı ve daha hassas bir şekilde denetimi sağlanması söz konusu olacaktır. Ayrıca, kullanılan algoritmaya yönelik hazırlanmış olunan yazılımın optimizasyonu sağlanarak daha az bellek kullanımı ve daha hızlı sistem cevabı sağlanması söz konusu olacaktır. Tüm değinilen bu önerilerin gerçekleştirilmesi ile ARM'nun daha yüksek hızlarda güvenilir çalıştırılması mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Noad, H.M.**, 1859. A Manual of Electricity, Lockwood.
- [2] **Taylor, W.H.**, Obtaining Motive Power, *United Kingdom Patent*, No.8255, 2nd May 1840.
- [3] **Mechanics Magazine**, Vol.XXXII, 1840, pp. 693-696.
- [4] **Mechanics Magazine**, Vol.XXXIII, 1840, pp. 53
- [5] **Anderson, A.R.**, 1975. Robert Anderson-Father of the Elektrik Locomotive, *IEE History of Electrical Engineering Conference*.
- [6] **Mackie D.**, 1842. The Prospects of Electromagnetism as a Prime Mover, *The Practical Mechanic and Engineering Magazine*, November.
- [7] **Lawrenson, P.J., Stephenson, J.M., Blekinson, P.T., Corda, J., Fulton, N.N.**, 1980. Variable-speed switched reluctance motors, *IEE Proceedings*, vol.127, pt. B, no. 4, July, 253-265.
- [8] **Krishnan, R., Arumugam, R. and Lindsay, J.F.**, 1988. Design procedure for switched reluctance motors, *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 24, no. 3, May/June, 456-461.
- [9] **Miller, T.J.E.**, 1988. Brushless reluctance-motor drives, *Power Engineering Journal*, November, 325-331.
- [10] **Ray, W.F., Davis, R.M.**, 1979. Inverter drive for doubly salient reluctance motor: its fundamental behaviour, linear analysis and cost implications, *Electric Power Applications*, vol. 2, no. 6, December, 185-193.
- [11] **Stephenson, J.M., Corda, J.**, 1979. Computation of torque and current in doubly salient reluctance motors from nonlinear magnetisation data, *IEE Proceedings*, vol 126, no. 1, January, 393-396.
- [12] **Ray, W.F., Davis, R.M., Blake, R.J.**, 1981. Inverter drive for switched reluctance motor circuits and component ratings, *IEE Proc.*, vol. 128, pt. B, no. 2, March, 126-136.

- [13] **Byrne, J.V., McMullin, M.F.**, 1982. Design of a reluctance motor as a 10 kW spindle drive, *Proc. Of Motorcon '82, Geneva, Switzerland*, September, 10-24.
- [14] **Miller, T.J.E.**, 1984. Converter volt-ampere requirements of the switched reluctance motor drive, *IEEE Ind. Appl. Soc. Annual Meeting*, 813-819.
- [15] **Chappell, P.H., Ray, W.F. and Blake, R.J.**, 1984. Microcomputer control of switched reluctance motor, *IEE Proc.*, vol. 131, pt. B, no. 2, september, 51-60.
- [16] **French, J.R.**, 1984. Switched reluctance motor drives for rail traction: relative assessment, *IEE Proc.*, vol. 131, pt. B, no. 5, September, 209-219.
- [17] **Ray, W.F., Lawrenson, P.J., Davis, R.M., Stephenson, J.M., Fulton, N.N. and Blake, R.J.**, 1984. Switched reluctance motor drives for rail traction: a second view, *IEE Proc.*, vol. 131, pt. B, no. 5, September, 220-264.
- [18] **Ray, W.F., Lawrenson, P.J., Davis, R.M., Stephenson, J.M., Fulton, N.N. and Blake, R.J.**, 1984. The control of switched reluctance motors for battery electric road vehicles, *Proc. of IEE Conf. on Power Electronics and Variable Speed Drives, London*, May, 361-364.
- [19] **Ray, W.F., Lawrenson, P.J., Davis, R.M., Stephenson, J.M., Fulton, N.N. and Blake, R.J.**, 1985. High performance switched reluctance brushless drives, *Conf. Rec. of IEEE Ind. Appl. Soc. Annual Meeting*, 1769-1776.
- [20] **Bass, J.T., Ehsani, M., Miller, T.J.E., Steigerwald, R.L.**, 1985. Development of a unipolar converter for variable reluctance motor drives, *Conf. Rec. Of IEEE Ind. Appl. Soc. Annual Meeting*, 1062-1068.
- [21] **Miller, T.J.E., Bass, J.T., Ehsani, M.**, 1985. Stabilization of variable-reluctance motor drives operating without shaft position feedback, *14th Annual Symp. On Incremental Motion Control Systems and Devices, Illinois*, June, 361-368.
- [22] **Bose, B.K., Miller, T.J.E., Szczesny, P.M. and Bicknell, W.H.**, 1985. Microcomputer control of switched reluctance motor, *Conf. Rec. Of IEEE Ind. Appl. Soc. Annual Meeting*, 542-547.

- [23] **Kuo, B.C., Brown, R.H.**, 1985. Determining torque speed characteristics for variable reluctance step motors, *14th Annual Symp. On Incremental Motion Control Systems and Devices, Illinois*, June, 347-352.
- [24] **Arumugam, R., Lowther, D.A., Krishnan, R. and Lindsay, J.F.**, Magnetic field analysis of a switched reluctance motor using a two dimensional finite element model, *IEEE Trans. Magnetics*, vol. MAG-21, no. 5, September, 1883-1885.
- [25] **Obradowic, I.J.**, 1986. Correspondence on switched reluctance motor for rail traction, *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, vol. 133, pt. B, no. 1, January.
- [26] **Acarney, P.P., Hill, R.J. and Hooper, C.W.**, 1985. Detection of rotor position in stepping and switched motors by monitoring of current waveforms, *IEEE Trans. on Ind. Elec.*, vol. IE-32, no. 3, August, 215-222.
- [27] **Byrne, J.V. and O'Dwyer, J.B.**, 1986. A high performance variable reluctance drive: a new brushless servo, *Power Conversion and Intelligent Motion, USA*, vol. 12, pt. 2, February.
- [28] **Lindsay, J.F., Arumugam, R. and Krishnan, R.**, 1986. Finite element analysis characterisation of switched reluctance motor with multitooth Per statorpole, *IEE Proc.*, vol. 133, pt. B, no. 6, November, 347-353.
- [29] **Sugden, D.M., Blake, R.J., Randall, S.P. and Stephenson, J.M.**, 1987. Switched reluctance drives using MOSFETs, *2nd European Power Electronics Conf., Grenoble*, September, 935-940.
- [30] **Ilic-Spong, M., Miller, T.J.E., Macminn, S.R. and Thorp, J.S.**, 1987. Instantaneous torque control of electric motor drives, *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. PE-2, no. 1, January, 55-61.
- [31] **Roche, P.J., Egan, M.G. and Murphy, J.M.D.**, 1987. Intelligent 8086 based multimode control of a variable reluctance motor drive, *2nd European Power Electronics Conf., Grenoble*, September, 917-922.
- [32] **Pollock, C. and Williams, B.W.**, 1987. An integrated approach to switched reluctance motor design, *2nd European Power Electronics Conf., Grenoble*, September, 865-870.
- [33] **Dawson, G.E., Eastham, A.R. and Mizia, J.**, 1987. Switched reluctance motor torque characteristics: Finite element analysis and test results, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-23, no. 3, May/June, 532-537.

- [34] **Miller, T.J.E. and McGilp, M.**, 1987. PC CAD for switched reluctance drives, *IEE Conf. Publication 282 3rd Int. Conf. of Electrical Machines and Drives*, November, 360-366.
- [35] **Mang, X., Krishnan, R. and Chandramouli, G.**, 1988. Design and performance of an interactive personal computer controller for switched reluctance motor drives, *Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Soc. Annual Meeting*, Part1, 515-519.
- [36] **Pollock, C. and Williams, B.W.**, 1988. A unipolar converter for a switched reluctance motor, *Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Soc. Annual Meeting*, Part 1, 44-49.
- [37] **Arumugam, R., Lindsay, J.F. and Krishnan R.**, 1988. Sensitivity of pole arc/pole pitch ratio on switched reluctance motor performance, *IEEE Ind. Appl. Soc. Annual Meeting*, Part 1, 50-54.
- [38] **Krishnan, R. and Materu, P.**, 1988. Design of a single-switch-per-phase converter for switched reluctance motor drives, *Conf. Rec. Of IEEE IECON'88*, 773-779.
- [39] **Stephenson, J.M. and El-Khazendar M.A.**, 1989. Saturation in doubly salient reluctance motors, *IEE Proceedings*, vol. 136, pt.B, no. 1, January.
- [40] **Pollock, C. and Williams, B.W.**, 1989. The design and performance of a multiphase switched reluctance drive, *EPE Conf*, Part 1, Aachen, 29-34.
- [41] **Materu, G. And Krishnan, R.**, 1989. Steady-state analysis of the variable-speed switched reluctance motor drive, *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, vol. 36, no. 4, November.
- [42] **Torrey, D.A. and Lang, J.H.**, 1990. Modelling a nonlinear variable reluctance motor drive, *IEE Proc.*, vol. 137, pt. B, no. 5, September.
- [43] **Zelaya De La Parra, H. and Elmas, Ç.**,1991. Computer analysis of the drive systems for the switched reluctance motor, *EPE Conf.*, Part 1, Italy, 360-365.
- [44] **Elmas, Ç. and Zelaya De La Parra, H.**, 1992. ADSP controlled switched reluctance drive system for wide range of operating speeds, *IEEE PESC'92, Spain*, 29 June-3 July, 844-859.
- [45] **Bass, J.T., Ehsani, M. And Miller, T.J.E.**, 1986. Robust torque control of switched reluctance motor without shaft position sensor, *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, vol. IE-33, no. 3, August.

- [46] Bass, J.T., Ehsani, M. And Miller, T.J.E., 1987. Simplified electronics for torque control of sensorless switched reluctance motor, *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, vol. IE-34, no. 2, May.
- [47] Lumsdaine, A. And Lang, J.H., 1990. State observer for variable reluctance motors, *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, vol. 37, no. 2, April.
- [48] Mvungi, N.M. and Stephenson, J.M., 1991. Accurate sensorless rotor position detection in a SR motor, *EPE Conf.*, Part 1, Italy, 390-393.
- [49] Elmas, Ç., 1992. A position sensorless operation of a switched reluctance motor drive based on a non-linear observer, *PhD Thesis*, The university of Birmingham, Birmingham.
- [50] Panda, S.K. and Amaratunga, G.A.J., 1993. Waveform detection technique for indirect rotor position sensing of switched reluctance motor drives, Part 1: Analysis, *IEE Proc.*, B-140, 80-88.
- [51] Miller, T.J.E., 1993. Switched reluctance motors and their control, *Magna Physics Publishing*, Hillsboro, Oxford.
- [52] Lyons, J., MacMinn, S., Preston, M., 1991. Flux/current methods for SRM rotor position estimation, *IEEE IAS Annual Meeting Conf. Record*.
- [53] Ray, W.F., Al-Bahadly, I.H., 1993. Sensorless methods for determining the rotor position of SRM, *Proc. EPE Conf.*, vol 6.
- [54] Acarnley, P.P., French, C.D. and Al-Bahadly, I.H., 1995. Position estimation in switched reluctance drives, *EPE, Seville*, 3.765-3.779.
- [55] Laurent, P., Gabsi, M. and Multon, B., 1993. Sensorless rotor position analysis using resonant method for switched reluctance motor, *IEE IAS Meeting*, pp. 687-689.
- [56] Kokornaczyk, E. and Stiebler, M., 1996. A method of on-line inductance estimation applied to sensorless SR motors, *PEMC, Budapest*, 2/501-2/504.
- [57] Becerra, R., Ehsani, M. and Miller, T.J.E., 1993. *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 8, pp. 257-262.
- [58] Hoppach, E., 1996. Sensorless control of an 8/6 switched reluctance drive, *Intelligent Motion Proceedings*, May, pp. 145-149.
- [59] Husain, I. And Ehsani, M., 1994. Rotor position sensing in SRM drives by measuring mutually induced voltages, *IEEE Trans. on Ind. Applications*, IA-30, pp. 665-672.

- [60] **Ehsani, M. and Husain, I.**, 1992. Elimination of discrete position sensor and Current sensor in SRM drives, *IEEE Trans. on Ind. Applications*, vol. 28, no. 1, January/February, pp. 128-135.
- [61] **Elmas, Ç.**, 1992. A position sensorless operation of a switched reluctance motor drive based on a non-linear observer, *PhD Thesis*, The university of Birmingham, Birmingham.
- [62] **Zelaya De La Parra, H. and Elmas, Ç.**, 1993. Position sensorless operation of a switched reluctance motor drive based on , *EPE Conf., England*, Part 6, pp. 82-87.
- [63] **Elmas, Ç. and Zelaya De La Parra, H.**, 1993. Application of a full-order extended Luenberger obsrver for position sensorless operation of a switched reluctance motor drive, *IEE Proceedings Electric Power Appl.*, March.
- [64] **Bezdek, J.B.**, 1993. Editorial fuzzy models-What are they and Why?, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 11, no. 1, pp. 1-5, February.
- [65] **Sugeno, M.**, 1993. Fuzzy system theory and its applications, Academic Press, USA.
- [66] **Bolognani, S. and Zigliotto, M.**, 1993. Inferantal processor based fuzzy control for electric drive, *EPE conf., Brighton, UK*, pp. 225-230.
- [67] **Bolognani, S. and Zigliotto, M.**, 1996. Fuzzy logic controlof a switched reluctance motor drive, *IEEE Transactions on Ind. Applications* 32, 1063-1068.
- [68] **Zurada, J.**, 1990. Introduction to Artificial Neural Systems.
- [69] **Simpson, P.K.**, 1990. Artificial Neural Systems, *Pergamon Press*.
- [70] **Narendra, K.S. and Parthasarathy, K.**, 1990. Identification and control Dynamic system using neural networks, *IEEE Trans. on Neural Networks*, vol. 1, pp. 235-241.
- [71] **Bellini, A., Filippetti, F., Franceschini, G., Tassoni, C. and Vas, P.**, 1998. Sensorless SRM drives using ANN-based estimators, *ICEM'98, Turkey*, vol. 1/3, pp. 137-142.
- [72] **Meşe, E., Torrey, D.A.**, 1997. Sensorless position estimation for variable reluctance machines using artificial neural networks, *Proc. IEEE IAS Annual Meeting*, pp. 540-547.

- [73] Meşe, E., 1999. Sensorless position estimation for Switched Reluctance Motors Using Artificial Neural Networks, *PhD Thesis*, Rensselaer Polytechnic Institute.
- [74] Meşe, E., Torrey, D.A., 2000. Optimal Phase Selection for a Rotor Position Estimator in a Sensorless Switched Reluctance Motor Drive, *International Conference On Electrical Machines, Helsinki, Finland*.
- [75] Elmas, Ç., 2003. Yapay Sinir Ağları, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- [76] Elmas, Ç., Akcayol. M.A., Yiğit, T., 2007. Bulanık PI Denetleyici ile bir Anahtarlama Relüktans Motorun Hız Denetimi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der..Cilt 22, No 1, 65-72.
- [77] Akcayol, M.A., 2001. Bir Anahtarlama Relüktans Motorun Sinirsel-Bulanık Denetimi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2001.
- [78] Bay, O.F., Elmas, Ç., 2004. Modelling of Inductance Variation and Control of the Switched Reluctance Motor Based on Fuzzy Logic, *Intelligent Automation and Soft Computing*, pp. 233-246..
- [79] Ramamurthy, S.S., Balda, J.C., 2000. Implementation of Neural Networks to Aid Switched Reluctance Motor Control on the TMS320C6701, *Texas Instruments, Application Report*.
- [80] Dursun, M., Saygın, A., 2005. Bulanık Mantık Denetimli Anahtarlama Relüktans Motor ile Asansör Tahriki, *İBilimde Modern Yöntemler Sempozyumu, Kocaeli*, s. 579-585.
- [81] Fahimi, B., Suresh, G., Ehsani, M., 2000. Review of Sensorless Control Methods in Switched Reluctance Motor Drives, *IEEE Proceedings*, pp. 1850-1857.
- [82] Lu, W., Keyhani, A., 2001. Sensorless Control of Switched Reluctance Motors Using Sliding Mode Observers, *IEEE Proceedings*, pp. 68-72.
- [83] Ertuğrul, N., Cheok, A.D., 2000. Sensorless SRM drives using ANN-based estimators, *IEEE Proceedings* pp. 1029-1044.
- [84] Salmasi, F.R., 2002. Sensorless Control of the Switched Reluctance Motor Drive Based on Back EMF Estimation, *Ph.D. Thesis*, Texas A&M University, Texas.
- [85] Hossain, S.A., 2002. Modeling and Four Quadrant Control Of A Sensorless Switched Reluctance Motor Driven Actuator System, *Ph.D. Thesis*, University of Akron.

EKLER

EK A : Yazılımlar

EK B : Deney Düzeneği Fotoğrafları

EK C : MATLAB Simulink Benzetimleri

EK A

Bu bölümde, TMS320C240 Sİİ için ARM'nun konum algılayıcısız denetimi amacıyla kullanılan yazılımlar verilmiştir. Yazılımların listesi aşağıda verilmektedir.

TYPEDEFS.H

C240.H

CONSTANTS.H

ARM.H

MAIN.C

ARM.C

AKI_KESTIRIM.C

EVMGR.C

VECTORS.ASM


```

*****
* File: TYPEDEFS.H *
*****/
#ifndef TYPEDEFS_H
#define TYPEDEFS_H
#define FALSE 0
#define TRUE 1
typedef unsigned int WORD;          /* 16-bit data */
typedef unsigned long DWORD;        /* 32-bit data */
typedef volatile WORD * PORT;
#define STR(x) #x
#define OUTMAC(address,data) \
asm("      LDPK      _STR(data)); \
asm("      OUT      _STR(data) ", " STR(address))
#define INMAC(address,data) \
asm("      LDPK      _STR(data)); \
asm("      IN      _STR(data) ", " STR(address))
#define Int_Read(addr)      * (int *) (addr)
#define Int_Write(addr,data) * (int *) (addr) = (data)
#endif /* _TYPEDEFS */

```

```

/*****

* File: C240.H *

* TMS320C240 Peripheral Register Addresses *

*****/

#ifndef c240_h
#define c240_h
#include "typedefs.h"
/*-----*/
/* definitions of I/O space macros */
/*-----*/
#define STR(x) #x
#define OUTMAC(address,data) \
asm("      LDPK    _STR(data)); \
asm("      OUT     _STR(data) ", " STR(address))
#define INMAC(address,data) \
asm("      LDPK    _STR(data)); \
asm("      IN      _STR(data) ", " STR(address))
#define LED_LOC 000ch /* F240 EVM I/O space location for LEDs */
/*-----*/
/* definitions of CPU core registers */
/*-----*/
#define IMR_REG (( PORT )0x0004 )
#define IFR_REG (( PORT )0x0006 )
/*-----*/
/* External Memory Interface Registers */
/*-----*/
#define WSGR      0x0ffff
/* Wait State Generator Register */
/*-----*/
/* System Module Registers */
/*-----*/
#define SYSCR      (( PORT )0x07018) /* System Module Control
Register */
#define SYSSR      (( PORT )0x0701A) /* System Module Status
Register */
#define SYSIVR     (( PORT )0x0701E) /* System Interrupt Vector
Register */
#define XINT1_CR   (( PORT )0x07070) /* Int1 (type A) Control reg
*/
#define NMI_CR     (( PORT )0x07072) /* Non maskable Int(type A)
Cont reg*/
#define XINT2_CR   (( PORT )0x07078) /* Int2 (type C) Control reg
*/
#define XINT3_CR   (( PORT )0x0707A) /* Int3 (type C) Control reg
*/
#define PDPINT_CR (( PORT )0x0742C) /* PowerDriveProtection Int
cntl reg*/
/* System Interrupt Vector Register - Address offsets */
#define PHANTOM_INT_VECTOR 0x00
#define NMI_INT_VECTOR    0x02
#define XINT1_INT_VECTOR   0x01

```

```

#define XINT2_INT_VECTOR      0x11
#define XINT3_INT_VECTOR      0x1f
#define SPI_INT_VECTOR        0x05
#define SCI_RX_INT_VECTOR     0x06
#define SCI_TX_INT_VECTOR     0x07
#define RTI_INT_VECTOR        0x10
#define PDP_INT_VECTOR        0x20
#define EV_CMP1_INT_VECTOR    0x21
#define EV_CMP2_INT_VECTOR    0x22
#define EV_CMP3_INT_VECTOR    0x23
#define EV_SCMP1_INT_VECTOR   0x24
#define EV_SCMP2_INT_VECTOR   0x25
#define EV_SCMP3_INT_VECTOR   0x26
#define EV_T1PER_INT_VECTOR   0x27
#define EV_T1CMP_INT_VECTOR   0x28
#define EV_T1UF_INT_VECTOR    0x29
#define EV_T1OF_INT_VECTOR    0x2a
#define EV_T2PER_INT_VECTOR   0x2b
#define EV_T2CMP_INT_VECTOR   0x2c
#define EV_T2UF_INT_VECTOR    0x2d
#define EV_T2OF_INT_VECTOR    0x2e
#define EV_T3PER_INT_VECTOR   0x2f
#define EV_T3CMP_INT_VECTOR   0x30
#define EV_T3UF_INT_VECTOR    0x31
#define EV_T3OF_INT_VECTOR    0x32
#define EV_CAP1_INT_VECTOR    0x33
#define EV_CAP2_INT_VECTOR    0x34
#define EV_CAP3_INT_VECTOR    0x35
#define EV_CAP4_INT_VECTOR    0x36
#define AC2_INT_VECTOR        0x04
/*-----*/
/* Digital I/O Registers */
/*-----*/
#define OCRA      (( PORT )0x07090)      /* Output Control Reg A */
#define OCRB      (( PORT )0x07092)      /* Output Control Reg B */
#define PADATDIR  (( PORT )0x07098)      /* I/O port A
Data&Direction reg. */
#define PBDATDIR  (( PORT )0x0709A)      /* I/O port B
Data&Direction reg. */
#define PCDATDIR  (( PORT )0x0709C)      /* I/O port C
Data&Direction reg. */
/*-----*/
-----*/
/* Watch-Dog(WD) / Real Time Int(RTI) / Phase Lock Loop(PLL)
Registers */
/*-----*/
-----*/
#define RTICNTR   (( PORT )0x07021)      /* RTI Counter reg */
#define WDCNTR    (( PORT )0x07023)      /* WD Counter reg */
#define WDTKEY    (( PORT )0x07025)      /* WD Key reg */
#define RTICR     (( PORT )0x07027)      /* RTI Control reg */
#define WDCR      (( PORT )0x07029)      /* WD Control reg */
#define CKCR0     (( PORT )0x0702B)      /* PLL control reg 1 */
#define CKCR1     (( PORT )0x0702D)      /* PLL control reg 2 */
/*-----*/
/* Analog-to-Digital Converter(ADC) registers */
/*-----*/
#define ADCTRL1   (( PORT )0x07032)      /* ADC Control & Status
reg */
#define ADCTRL2   (( PORT )0x07034)      /* ADC Configuration reg
*/

```

```

#define ADCFIFO1 (( PORT )0x07036) /* ADC Channel 1 Result
Data */
#define ADCFIFO2 (( PORT )0x07038) /* ADC Channel 2 Result
Data */
/*-----*/
/* Serial Peripheral Interface (SPI) Registers */
/*-----*/
#define SPICCR (( PORT )0x07040) /* SPI Config Control Reg
*/
#define SPICTL (( PORT )0x07041) /* SPI Operation Control
Reg */
#define SPISTS (( PORT )0x07042) /* SPI Status Reg */
#define SPIBRR (( PORT )0x07044) /* SPI Baud rate control
reg */
#define SPIEMU (( PORT )0x07046) /* SPI Emulation buffer
reg */
#define SPIBUF (( PORT )0x07047) /* SPI Serial Input buffer
reg */
#define SPIDAT (( PORT )0x07049) /* SPI Serial Data reg */
#define SPIPC1 (( PORT )0x0704D) /* SPI Port control reg1
*/
#define SPIPC2 (( PORT )0x0704E) /* SPI Port control reg2
*/
#define SPIPRI (( PORT )0x0704F) /* SPI Priority control
reg */
/*-----*/
/* Serial Communications Interface (SCI) Registers */
/*-----*/
#define SCICCR (( PORT )0x07050) /* SCI Comms Control Reg
*/
#define SCICTL1 (( PORT )0x07051) /* SCI Control Reg 1 */
#define SCIHBAUD (( PORT )0x07052) /* SCI Baud rate control
*/
#define SCILBAUD (( PORT )0x07053) /* SCI Baud rate control
*/
#define SCICTL2 (( PORT )0x07054) /* SCI Control Reg 2 */
#define SCIRXST (( PORT )0x07055) /* SCI Receive status reg
*/
#define SCIRXEMU (( PORT )0x07056) /* SCI EMU data buffer */
#define SCIRXBUF (( PORT )0x07057) /* SCI Receive data buffer
*/
#define SCITXBUF (( PORT )0x07059) /* SCI Transmit data
buffer */
#define SCIPC1 (( PORT )0x0705D) /* SCI Port control reg1
*/
#define SCIPC2 (( PORT )0x0705E) /* SCI Port control reg2
*/
#define SCIPRI (( PORT )0x0705F) /* SCI Priority control
reg */
/*-----*/
/* Event Manager (EV) Registers */
/*-----*/
#define GPTCON (( PORT )0x07400) /* General Timer Controls
*/
#define T1CNT (( PORT )0x07401) /* T1 Counter Register */
#define T1CMP (( PORT )0x07402) /* T1 Compare Register */
#define T1PER (( PORT )0x07403) /* T1 Period Register */
#define T1CON (( PORT )0x07404) /* T1 Control Register */
#define T2CNT (( PORT )0x07405) /* T2 Counter Register */
#define T2CMP (( PORT )0x07406) /* T2 Compare Register */
#define T2PER (( PORT )0x07407) /* T2 Period Register */

```



```

#define T2CON      (( PORT )0x07408)    /* T2 Control Register */
#define T3CNT      (( PORT )0x07409)    /* T3 Counter Register */
#define T3CMP      (( PORT )0x0740a)    /* T3 Compare Register */
#define T3PER      (( PORT )0x0740b)    /* T3 Period Register */
#define T3CON      (( PORT )0x0740c)    /* T3 Control Register */
#define COMCON     (( PORT )0x07411)    /* Compare Unit Control */
#define ACTR       (( PORT )0x07413)    /* FullCompUnitOutput
Action Ctrl*/
#define SACTR      (( PORT )0x07414)    /*
SimpleCompUnitOutputAction Ctrl*/
#define DBTCON     (( PORT )0x07415)    /* Dead Band Timer Control
*/
#define CMPR1      (( PORT )0x07417)    /* Full Compare Ch 1
Threshold*/
#define CMPR2      (( PORT )0x07418)    /* Full Compare Ch 2
Threshold */
#define CMPR3      (( PORT )0x07419)    /* Full Compare Ch 3
Threshold */
#define SCMPR1     (( PORT )0x0741a)    /* Simple Comp Ch 1
Threshold */
#define SCMPR2     (( PORT )0x0741b)    /* Simple Comp Ch 2
Threshold */
#define SCMPR3     (( PORT )0x0741c)    /* Simple Comp Ch 3
Threshold */
#define CAPCON     (( PORT )0x07420)    /* Capture Unit Control */
#define CAPFIFO    (( PORT )0x07422)    /* FIFO1-4 Status Register
*/
#define FIFO1      (( PORT )0x07423)    /* Capture Channel 1 FIFO
Top */
#define FIFO2      (( PORT )0x07424)    /* Capture Channel 2 FIFO
Top */
#define FIFO3      (( PORT )0x07425)    /* Capture Channel 3 FIFO
Top */
#define FIFO4      (( PORT )0x07426)    /* Capture Channel 4 FIFO
Top */
#define IMRA       (( PORT )0x0742c)    /* Group A Interrupt Mask
Regist */
#define IMRB       (( PORT )0x0742d)    /* Group B Interrupt Mask
Regist */
#define IMRC       (( PORT )0x0742e)    /* Group C Interrupt Mask
Regist */
#define IFRA       (( PORT )0x0742f)    /* Group A Interrupt Flag
Regist */
#define IFRB       (( PORT )0x07430)    /* Group B Interrupt Flag
Regist */
#define IFRC       (( PORT )0x07431)    /* Group C Interrupt Flag
Regist */
#define IVRA       (( PORT )0x07432)    /* Group A Int. Vector
Offset Reg*/
#define IVRB       (( PORT )0x07433)    /* Group B Int. Vector
Offset Reg*/
#define IVRC       (( PORT )0x07434)    /* Group C Int. Vector
Offset Reg*/
#endif

```

```

/*-----*/
-----*/
/*File: CONSTANTS.H */
/*-----*/
-----*/
/* Constants for the SRM control algorithms */
/*-----*/
-----*/
/* clock frequencies and time related constants */
/*-----*/
#define PWM_FREQ      20000      /* PWM frequency (Hz) */
#define SYSCLK_FREQ    20000000   /* DSP clock frequency (Hz) */
#define CPU_INT_FREQ   6000      /* timer ISR frequency (Hz) */
#define ONE_HALF_SECOND (CPU_INT_FREQ/2)
#define TWENTY_MSEC     (CPU_INT_FREQ/50)
#define NUM_20MS        3
/*-----*/
/* calibration/training algorithm constants */
/*-----*/
#define ALIGN_CURRENT    300      /* current to align phase:
1023=4.27A */
#define MAX_TEST_CURRENT 320      /* max test current: 1023=4.273A
*/
#define NUM_POINTS      80        /* total number of test
points/phase */
#define VBUS             174      /* Vdc (Volts) x 1.024 */
#define R_PHASE          8        /* phase resistance (Ohms) */
/*-----*/
/* current loop algorithm constants */
/*-----*/
#define ILOOP_GAIN       22        /* Q3: gain = 2.75 */
#define MAXIMUM_DUTYRATIO 999      /* limit on the PWM duty
cycle:*/
/* 100% = (SYSCLK_FREQ/PWM_FREQ-1) */
#define ILIMIT           1023     /* current limit: (1023 = 4.273
A) */
/*-----*/
/* commutation algorithm constants */
/*-----*/
#define ALPHA            5         /* Q3: alpha = 0.625 */
#define MIN_DECISION_CURRENT 120   /* min decision current
(1023=4.273A) */
/*-----*/
/* velocity loop algorithm constants */
#define KI               1         /* (Q14 x 1200): Ki = 0.073 */
#define KP               1         /* Q2: Kp = 0.25 */
#define SPEED_THRESHOLD  4000     /* reduce velocity bw below 400
rpm */
#define INTEGRAL_LIMIT   16384000
#define MIN_TORQUE_COMMAND 150
/*-----*/
/* velocity estimation algorithm constants */
#define K_VELOCITY_EST    150000
#define BETA              15       /* Q4: beta = 0.9375 */

```

```

#define ONE_MINUS_BETA      (16-BETA)    /* Q4: 1-beta = 0.0625 */
/* motor geometry related */
#define NR                  8            /* number of rotor poles
*/
#define NUMBER_OF_PHASES    3

/*+++++*/
/*File: ARM.H */
/*-----*/
-----*/
/* Variable declarations for the SRM control algorithms */
/*+++++*/
#include "sl_const.h"
#include "typedefs.h"
/*-----*/
-----*/
/*SRM variables data structure: */
/*-----*/
-----typedef struct {
    long  fluxEstimate[NUMBER_OF_PHASES];
    int   b0[NUMBER_OF_PHASES];
    int   b1[NUMBER_OF_PHASES];
    int   bias[NUMBER_OF_PHASES];
    long  df1_remainder;
    long  df2_remainder;
    int   waitFlag;
    int   waitCount;
    int   delta_current;
    WORD  alignedCurrent[NUM_POINTS];
    long  alignedFlux[NUM_POINTS];
    long  minFlux;
    WORD  latch_current;
    long  latch_flux;
    int   a2d_chan[NUMBER_OF_PHASES];
    int   desiredTorque;
    long  integral_speed_error;
    WORD  iDes[NUMBER_OF_PHASES];
    int   delta_count;
    int   last_count;
    int   wEst_10xrpm;
    int   wDes_10xrpm;
    int   Active;
    WORD  iFB[NUMBER_OF_PHASES];
    WORD  dutyRatio[NUMBER_OF_PHASES];
    int   Update_Velocity;
} anSRM_struct;
/*-----*/
*/
/*PROTOTYPE DEFINITIONS */
/*-----*/
*/
void eventmgr_init();

```

```

void initializeSRM(anSRM_struct *anSRM);
void velocityController(anSRM_struct *anSRM);
void currentController(anSRM_struct *anSRM);
void Sensorless_Commutation(anSRM_struct *anSRM, int count);
void switch_lowside(int phaseactive);
void switch_mux(int adc1, int adc2);
void estimateFluxLinkage(anSRM_struct *anSRM);
void disable_interrupts();
void dsp_setup();
void initialize_counters_and_flags();
void enable_interrupts();
void start_background();
long get_alignedFlux(anSRM_struct *anSRM, int current);
void update_flux_estimate(anSRM_struct *anSRM);

/*****
****+
/*File: MAIN.C
****+
****+*/
/* This file is the main program for the control of an SRM drive
without */
/*using a position sensor */
****+
****+*/
/*-----*/
/*INCLUDE FILES */
/*-----*/
#include "c240.h"
#include "sl_srm.h"
/*-----*/
/*GLOBAL VARIABLE DECLARATIONS */
/*-----*/
int count;
int slice;
int Learn_Flux_Curves;
int Toggle_LED;
anSRM_struct SRM;
int LEDvalue;
/*-----*/
/*MAIN PROGRAM */
/*-----*/
void main() {
    disable_interrupts();
    dsp_setup();
    initializeSRM(&SRM);
    eventmgr_init();
    initialize_counters_and_flags();
    enable_interrupts();
    start_background();
}
/*****
/
/*BACKGROUND TASKS */
****+
void start_background()
{
    while (1)
    {
        /*-----*/
        /* Flux-vs-current estimation task */

```



```

/*-----*/
if (Learn_Flux_Curves) {
    estimateFluxLinkage(&SRM);
    Learn_Flux_Curves = 0;
}
/*-----*/
/* Velocity update task */
/*-----*/
if (SRM.Update_Velocity) {
    Msmt_Update_Velocity(&SRM);
    SRM.Update_Velocity = 0;
}
/*-----*/
/* Visual feedback task */
/*-----*/
if (Toggle_LED) {
    LEDvalue = -LEDvalue;
    if (LEDvalue == 1) {
        asm(" OUT 1, 000ch");
    }
    else {
        asm(" OUT 0, 000ch");
    }
    Toggle_LED = 0;
    SRM.wDes_10xrpm = 6000; /* motorspeed cmd units =
(rpm x 10)*/
/* just hard-coded here,
but setup */
/* another background task
to allow */
/* command from an
external input */
}
}
/*+++++*/
/*TIMER ISR */
/*+++++*/
void c_int3()
{
    *IFR_REG = 0x0004; /* clear interrupt flags */
    *IFRB = 0xff;
    currentController(&SRM); /* current loop algorithm */
    count = count + 1; /* increment count */
    slice = slice + 1; /* increment slice */
    if (!Learn_Flux_Curves) { /* Normal operation, perform */
        Sensorless_Commutation(&SRM, count); /* commutation
algorithm */
        if (slice == 1) {
            velocityController(&SRM); /* do velocityloop
algorithm*/
        } /* in the 1st slice
*/
    }
    else { /* Else, calibration active */
        SRM.waitCount = SRM.waitCount + 1; /* increment wait
count */
        if (count % TWENTY_MSEC == 0 ) { /* toggle software
wait */

```



```

/*****
void enable_interrupts() {
    *IFR_REG = 0xffff;      /* Clear pending interrupts */
    *IFRA = 0xffff;
    *IFRB = 0xffff;
    *IFRC = 0xffff;
    *IMR_REG = 0x0004;      /* Enable CPU Interrupts: */
                           /* INT3 */
    *IMRA = 0x0000;        /* Disable all event manager */
                           /* Group A interrupts */
    *IMRB = 0x0010;        /* Enable timer 3 period */
                           /* interrupt */
    *IMRC = 0x0000;        /* Disable Group C interrupts */
    asm(" CLRC  INTM");     /* Global interrupt enable */
}

/*****
/*File: ARM.C
/*****
+-----+
*/
/*INCLUDE FILES */
+-----+
*/
#include "c240.h"
#include "sl_srm.h"
/*****
+-----+
/*COMMUTATION ALGORITHM */
+-----+
-----*/
void Sensorless_Commutation(anSRM_struct *anSRM, int count)
{
    int active, next;
    long alignedFlux;
    long switchingFlux;
    int channel;
    int current;
    active = anSRM->Active;      /* the active phase */
    current = anSRM->iFB[active]; /* the current measurement */
    /*
        if (current > MIN_DECISION_CURRENT) { /* if above current
threshold check */
                                                    /* commutation condition */
    /*
        alignedFlux = get_alignedFlux(anSRM, current);
                                                    /* get aligned flux for
given */
                                                    /* current msmt from model */
    /*
        switchingFlux = (ALPHA*alignedFlux) >> 3;

```

```

a */
/* calc switching flux as
/* percentage of the */
/* aligned flux */
if (anSRM->fluxEstimate[active]>switchingFlux)
/* check commutation
condition */
{
    next = active + 1; /* switch to next phase */
    if (next > NUMBER_OF_PHASES-1) next = 0;
/* check range of phase
value */
    anSRM->Active = next; /* store change */
    anSRM->fluxEstimate[active] = 0; /* reset flux
integrator */
    anSRM->df1_remainder = 0; /* and remainders */
    anSRM->df2_remainder = 0;
    anSRM->iDes[active] = 0; /* current this phase to 0
*/
    anSRM->iDes[next] = anSRM->desiredTorque;
/* torque to current */
    if (anSRM->iDes[next] > ILIMIT) {
/* current limit */
        anSRM->iDes[next] = ILIMIT;
    }
    channel = anSRM->a2d_chan[next]; /* switch A/D input
mux */
    switch_mux(channel,channel+8);
    switch_lowside(0x1 << next); /* switch low-side
FET's */
    anSRM->delta_count = /* store count of
timer ISR's */
        count - anSRM->last_count; /* since last
commutation */
    if (anSRM->delta_count < 0) { /* for velocity
estimation */
        anSRM->delta_count = anSRM->delta_count
            + ONE_HALF_SECOND;
    }
    anSRM->last_count = count;
    anSRM->Update_Velocity = 1; /* set flag to run
velocity */
/* estimation in
background */
}
}
else { /* else, not above current
minimum */
/* threshold */
    anSRM->iDes[active] = anSRM->desiredTorque; /* torque to
current */
    if (anSRM->iDes[active] > ILIMIT) { /* current
limit */
        anSRM->iDes[active] = ILIMIT;
    }
}
}
}
/*+++++*/
/*+++++*/
/*VELOCITY ESTIMATION ALGORITHM */
/*-----

```



```

-----*/
void Msmt_Update_Velocity(anSRM_struct *anSRM)
{
    DWORD sum_cnt;
    int inst_velocity;
    long filt_velocity;
    if (anSRM->delta_count > 7) {          /* protect from divide by
0 and */
                                           /* estimate out of range
*/
        /*-----*/
        /* apply velocity = delta_theta/delta_time algorithm */
        /*-----*/
        sum_cnt = K_VELOCITY_EST/anSRM->delta_count;
        inst_velocity = ((int) sum_cnt);
        /*-----*/
        /* IIR filter for smoothing velocity estimate */
        /*-----*/
        filt_velocity = (BETA * anSRM->wEst_10xrpm)
            + (ONE_MINUS_BETA * inst_velocity);
        anSRM->wEst_10xrpm = (int) (filt_velocity >> 4);
    }
}
/*+++++*/
/*VELOCITY CONTROL LOOP ALGORITHM */
/*-----*/
-----*/
void velocityController(anSRM_struct *anSRM)
{
    int speed_error;
    int integral_error;
    /*-----*/
    /* calculate error signal */
    /*-----*/
    speed_error = anSRM->wDes_10xrpm - anSRM->wEst_10xrpm;
    /*-----*/
    /* reduce loop bandwidth at low shaft speed */
    /*-----*/
    if (anSRM->wEst_10xrpm < SPEED_THRESHOLD) {
        speed_error = speed_error >> 2;
    }
    /*-----*/
    /* integrate error */
    /*-----*/
    anSRM->integral_speed_error = anSRM->integral_speed_error +
(long) speed_error;
    /*-----*/
    /* apply integrator limit */
    /*-----*/
    if (anSRM->integral_speed_error > INTEGRAL_LIMIT) {
        anSRM->integral_speed_error = INTEGRAL_LIMIT;
    }
    if (anSRM->integral_speed_error < -INTEGRAL_LIMIT) {
        anSRM->integral_speed_error = -INTEGRAL_LIMIT;
    }
    /*-----*/
    /* PI filter */
    /*-----*/
    integral_error = (int) ((KI*anSRM->integral_speed_error) >>
14);

```

```

        anSRM->desiredTorque = ((KP*speed_error) >> 2) +
integral_error;
/*-----*/
/* insure a minimum phase current */
/*-----*/
if (anSRM->desiredTorque < MIN_TORQUE_COMMAND) {
    anSRM->desiredTorque = MIN_TORQUE_COMMAND;
}
}          /* end velocityController */
/*+++++++*/
++++++*/
/*CURRENT CONTROL LOOP ALGORITHM */
/*-----*/
-----*/
void currentController(anSRM_struct *anSRM) {
    int phase;
    int ierr;
    phase = anSRM->Active;
    /*-----*/
    /* read A/D converter for current feedback */
    /*-----*/
    anSRM->iFB[phase] = read_a2d(1);
    /*-----*/
    /* update flux linkage estimate --- */
    /* do here because it is a function of */
    /* current measurement, at time k & */
    /* voltage cmd (dutyRatio) at time k-1 */
    /*-----*/
    update_flux_estimate(anSRM);
    /*-----*/
    /* calculate error signal */
    /*-----*/
    ierr = anSRM->iDes[phase] - anSRM->iFB[phase];
    if (ierr < 0) ierr = 0;
    /*-----*/
    /* current loop compensation */
    /*-----*/
    anSRM->dutyRatio[0] = 0;
    anSRM->dutyRatio[1] = 0;
    anSRM->dutyRatio[2] = 0;
    anSRM->dutyRatio[phase] = ILOOP_GAIN * ierr;
    anSRM->dutyRatio[phase] = (anSRM->dutyRatio[phase] >> 3);
    /*-----*/
    /* limit duty ratio */
    /*-----*/
    if (anSRM->dutyRatio[phase] > MAXIMUM_DUTYRATIO) {
        anSRM->dutyRatio[phase] = MAXIMUM_DUTYRATIO;
    }
    /*-----*/
    /* output PWM signals to high-side FET's */
    /*-----*/
    *CMPR1 = anSRM->dutyRatio[0];
    *CMPR2 = anSRM->dutyRatio[1];
    *CMPR3 = anSRM->dutyRatio[2];
}          /* end currentController */
/*+++++++*/
++++++*/
/*SRM ALGORITHM INITIALIZATION */
/*-----*/
-----*/
void initializeSRM(anSRM_struct *anSRM)

```

```

{
    int i;
    /*-----
-- */
    /* define mux positions for current feedback of each phase */
    /*-----
- */
    anSRM->a2d_chan[0] = 1;      /* phase A on pin ADCIN1 */
    anSRM->a2d_chan[1] = 2;      /* phase B on pin ADCIN2 */
    anSRM->a2d_chan[2] = 3;      /* phase C on pin ADCIN3 */
    /*----- */
    /* specify initial conditions */
    /*----- */
    for (i=0; i < NUMBER_OF_PHASES; i++) {
        anSRM->iDes[i] = 0;
        anSRM->iFB[i] = 0;
        anSRM->fluxEstimate[i] = 0;
    }
    anSRM->wEst_10xrpm = 0;
    anSRM->integral_speed_error = 0;
    anSRM->desiredTorque = 0;
    anSRM->last_count = 0;
    anSRM->minFlux = -999999;
    anSRM->df1_remainder = 0;
    anSRM->df2_remainder = 0;
    /*----- */
    /* initialization for calibration routine */
    /*----- */
    for (i=0; i < NUM_POINTS; i++) {
        anSRM->alignedCurrent[i] = 0;
        anSRM->alignedFlux[i] = 0;
    }
    for (i=0; i < NUMBER_OF_PHASES; i++) {
        anSRM->b1[i] = 0;
        anSRM->b0[i] = 0;
        anSRM->bias[i] = 0;
    }
    anSRM->delta_current = MAX_TEST_CURRENT/NUM_POINTS;
}

```

```

/*+++++*
++++*/
/*File: AKI_KESTIRIM.C*/
/*+++++*
++++*/
/* This file contains the algorithms used to estimate the SRM's*/
/*flux-linkage vs. current characteristics at the aligned*/
/*position.*/
/*+++++*
++++*/
/*-----
*/
/*INCLUDE FILES */
/*-----
*/
#include "c240.h"
#include "sl_srm.h"
/*-----*/
/*MACRO DEFINITION */
/*-----*/
#define WAIT(time) \
    for (j=0; j < time; j++){ \
        anSRM->waitFlag = 0; \
        while(!anSRM->waitFlag); }
/*+++++*
/*CALIBRATION ROUTINE */
/*-----*/
void estimateFluxLinkage(anSRM_struct *anSRM)
{
    int i,j;
    int test_current;
    int channel;
    int phase;

    /*-----*/
    /* for each phase do ... */
    /*-----*/
    for (phase=0; phase < NUMBER_OF_PHASES; phase++) {
        channel = anSRM->a2d_chan[phase]; /* switch mux A/D for
current */
        switch_mux(channel,channel+8);          /* measurement
*/
        anSRM->Active = phase;
        /*-----*/
        /* rotor to aligned position */
        /* -----*/
        switch_lowside((0x1 << phase));          /* turn low-side FET
on */
        anSRM->iDes[phase] = ALIGN_CURRENT;          /* current command
*/
        WAIT(300);          /* wait for some
time for phase */
                                /* to settle */

        /*-----*/

```



```

/* cycle through test points */
/*-----*/
for (i=0; i < NUM_POINTS; i++) {
    switch_lowside(0); /* turn low-side FET off */
    anSRM->iDes[phase] = 0; /* command current to zero */
    WAIT(1); /* wait for current decay */
    switch_lowside(0x1 << phase); /* turn low-side FET
on */
    test_current = (i+1)*anSRM->delta_current; /* new test
point */
    anSRM->iDes[phase] = test_current; /* cmd current to
test value */
    anSRM->fluxEstimate[phase] = 0; /* reset integrator
and */
    anSRM->df1_remainder = 0; /* remainders */
    anSRM->df2_remainder = 0; /* */
    WAIT(NUM_20MS); /* wait for current
rise */
    anSRM->alignedFlux[i] = anSRM->latch_flux; /* store
flux/current data */
    anSRM->alignedCurrent[i] = anSRM->latch_current;
}
/*-----*/
/* make sure rotor is still aligned */
/*-----*/
    anSRM->iDes[phase] = ALIGN_CURRENT; /* current command
*/
    WAIT(100); /* wait for some
time for phase */
/*-----*/
/* turn off phases */
/*-----*/
    *CMPR1 = 0; *CMPR2 = 0; *CMPR3 = 0; /* all high-side
FET's off */
    switch_lowside(0); /* low-side FET's
off */
    anSRM->iDes[phase] = 0; /* current command
to zero */
    WAIT(3); /* wait for current
decay */
    /*-----*/
    /* curve fit data */
    /*-----*/
    leastSquaresFit(anSRM, phase);
} /* end for loop */
/*-----*/
/*
*/
/* set rotor initial conditions for start of normal operation */
/*-----*/
-*/
    anSRM->minFlux = 0; /* flux estimate lower limit */
    anSRM->Active = 0; /* from aligned C, turn on A */
    /* for positive rotation */
    channel = anSRM->a2d_chan[anSRM->Active]; /* set A/D mux */
    switch_mux(channel, channel+8);
    switch_lowside((0x1 << anSRM->Active)); /* turn low-side FET
on */

```

```

}
/*+++++LEAST SQUARES ESTIMATION ALGORITHM +++++*/
/*-----*/
void leastSquaresFit(anSRM_struct *anSRM, int phase)
{
    int i;
        float current;
        float flux;
        float sumX, sumY, sumXY, sumX2;
        float xbar, ybar;
        float b1, b0;
        float bias;
/*-----*/
/* clear summers */
/*-----*/
        sumX = 0;
        sumY = 0;
        sumXY = 0;
        sumX2 = 0;
/*-----*/
/* perform required summations */
/*-----*/
        for (i=0; i < NUM_POINTS; i++) {
            current = (float) anSRM->alignedCurrent[i];
            flux = (float) anSRM->alignedFlux[i];
            sumX = sumX + current;
            sumY = sumY + flux;
            sumXY = sumXY + current*flux;
            sumX2 = sumX2 + current*current;
        }
/*-----*/
/* apply linear fit equations */
/*-----*/
        b1 = (NUM_POINTS*sumXY - sumX*sumY)/(NUM_POINTS*sumX2 -
sumX*sumX);
        xbar = sumX/NUM_POINTS;
        ybar = sumY/NUM_POINTS;
        b0 = ybar - b1*xbar;
/*-----*/
/* determine bias correction */
/*-----*/
        bias = b0/(TWENTY_MSEC*NUM_20MS);
/*-----*/
/* store estimation results */
/*-----*/
        anSRM->b1[phase] = (int) b1;
        anSRM->b0[phase] = (int) b0;
        anSRM->bias[phase] = (int) bias;
    }
/*+++++CALCULATE ALIGNED FLUX +++++*/
/*-----*/
long get_alignedFlux(anSRM_struct *anSRM, int current)
{
    long alignedFlux;
    alignedFlux = current * anSRM->b1[anSRM->Active]; /* calc
aligned flux*/
    return alignedFlux;
}
/*+++++*/

```

```

/*UPDATE_FLUX_ESTIMATE */
/*----- */
void update_flux_estimate(anSRM_struct *anSRM)
{
    int phase;
    long df1, df2;
    int temp1, temp2;
    long dflux;
    phase = anSRM->Active;
    /*-----*/
    /* update flux linkage estimate */
    df1 = VBUS * anSRM->dutyRatio[phase] + anSRM-
>df1_remainder;
    anSRM->df1_remainder = df1 & 0x3ff;
    temp1 = (int) (df1 >> 10);
    df2 = R_PHASE * anSRM->iFB[phase] * 273 + anSRM-
>df2_remainder;
    anSRM->df2_remainder = df2 & 0xffff;
    temp2 = (int) (df2 >> 16);
    dflux = 100*(temp1-temp2) - anSRM->bias[phase];
    anSRM->fluxEstimate[phase] = anSRM->fluxEstimate[phase] +
dflux;
    if (anSRM->fluxEstimate[phase] < anSRM->minFlux ) {
        anSRM->fluxEstimate[phase] = anSRM->minFlux;
    }
}

/*+++++
+++*/
/*File: EVMGR.C
*/
/*+++++
+++*/
/* This file contains the routines for initializing and using the
event */
/* manager peripherals.
*/
/*+++++
+++*/
/*-----
*/
/*INCLUDE FILES */
/*-----
*/
#include "c240.h"
#include "constant.h"
/*+++++
*/
/*EVENT MANAGER INITIALIZATION */
/*+++++
*/
void eventmgr_init() {
    WORD iperiod;
    /*-----*/
    /* Initialize GP timer 3 to provide desired CPU interrupt */
    /*-----*/
    iperiod = (SYSCLK_FREQ/CPU_INT_FREQ) - 1;
    *GPTCON = 0x1055; /* Setup general-purpose control reg
*/
    *T3PER = iperiod; /* Load timer #2 period register */

```

```

        *T3CON = 0x9040;          /* Initialize timer #3 control
register */
/*-----*/
/* Initialize GP timer 1 to provide a 20 kHz time base for */
/* fixed frequency PWM generation */
/*-----*/
iperiod = (SYSCLK_FREQ/PWM_FREQ) - 1;
*T1PER = iperiod;                /* Load timer #1 period */
*T1CON = 0x9040;                /* Initialize timer #1 control
register */
/*-----*/
*/
/* Initialize GP timer 2 to provide time base for clocking */
/* capture events */
/*-----*/
*/
*T2PER = 0xffff;                /* Load timer #2 period */
*T2CON = 0x9440;                /* Initialize timer #2 control
register */
/*-----*/
/* Setup Compare units for PWM outputs */
/*-----*/
*ACTR = 0x0111;                 /* Initialize action on output pins */
*DBTCN = 0x0;                   /* Disable deadband */
*CMPR1 = 0x0;                   /* Clear period registers */
*CMPR2 = 0x0;
*CMPR3 = 0x0;
*COMCON = 0x0207;               /* Setup COMCON w/o enable */
*COMCON = 0x8207;               /* Setup COMCON and enable */
/*-----*/
/* Setup shared pins */
/* -----*/
*OCRA = 0x0;                    /* pins IOPB0-IOPB7 & IOPA0-IOPA3 to
I/O pins */
*OCRB = 0xf1;                   /* pins are: ADSOC, XF, /BIO, CAP1-
CAP4 */
*PBDATDIR = 0xf0f0;             /* inputs IOPB0-IOPB3 */
/* outputs IOPB4-IOPB7, set high */
/*-----*/
/* Setup capture units */
/*-----*/
*CPCON = 0x0;                   /* reset capture control register */
*CAPFIFO = 0xff;                /* Clear FIFO's */
*CPCON = 0xb0fc;                /* enable #1-3, use Timer2, both edges
*/
/*-----*/
/* Setup A/D converter */
/*-----*/
*ADCTRL1 = 0x2c00;              /* Initialize A/D control register */
*ADCTRL2 = 0x0403;              /* Clear FIFO's, Pre-scaler = 4 */
}
/*****
/*SWITCH A/D INPUT CHANNEL */
/*-----*/
void switch_mux(int adc1, int adc2)
{
    WORD ctrl_word;
    ctrl_word = 0x2c00; /* mask channel select bits */
    ctrl_word = ctrl_word | (adc1 << 4); /* set ADC1 channel bits
*/
    ctrl_word = ctrl_word | ((adc2-8) << 1); /* set ADC2 channel

```



```

bits */
    *ADCTRL1 = ctrl_word;
    *ADCTRL2 = 0x0403;
}
/***** */
/*READ A/D FIFO REGISTER */
/*----- */
WORD read_a2d(int a2d_chan)
{
    WORD inval;
    if (a2d_chan == 1) {
        inval = (*ADC_FIFO1 >> 6) & 0x03ff;
    }
    else if (a2d_chan == 2) {
        inval = (*ADC_FIFO2 >> 6) & 0x03ff;
    }
    return inval;
}
/***** */
/*SWITCH LOW-SIDE MOSFETS */
/*----- */
void switch_lowside(int phaseactive)
{
    WORD action;
    /*-----*/
    /* load action register and mask PWM2, PWM4, and PWM6 */
    /* to force low */
    /*-----*/
    action = *ACTR;
    action = action & 0xf333;
    /*-----*/
    /* Force hi PWM2 if phase0 (A) is active */
    /*-----*/
    if (phaseactive & 0x1) {
        action = action | 0x000c;
    }
    /*-----*/
    /* Force hi PWM4 if phase1 (B) is active */
    /*-----*/
    if (phaseactive & 0x2)
        action = action | 0x00c0;
    }
    /*-----*/
    /* Force hi PWM6 if phase2 (C) is active */
    /*-----*/
    if (phaseactive & 0x4) {
        action = action | 0x0c00;
    }
    /*-----*/
    /* Write new word to action register */
    /*-----*/
    *ACTR = action;
}
/***** */
/*READ CAPTURE FIFO REGISTERS */
/*----- */
/* This routine is used to read the data from the capture FIFO
/*registers.
/*inputs:      capture = which FIFO to read?
/*             range = 1-3
/*outputs      fifo_data =

```

```

/*          range = 0-65535
/***** */
WORD read_fifo(int capture)
{
    WORD fifo_data;
    int fifo_status;
    if (capture == 1) {
        do {
            fifo_data = *FIFO1;          /*read value*/
            fifo_status = *CAPFIFO & 0x0300; /*read stat
reg,mask bits*/
        } while (fifo_status != 0);
    }
    else if (capture == 2) {
        do {
            fifo_data = *FIFO2; /* read value */
            fifo_status = *CAPFIFO & 0x0c00; /* read status
register, mask bits */
        } while (fifo_status != 0);
    }
    else if (capture == 3) {
        do {
            fifo_data = *FIFO3; /* read value */
            fifo_status = *CAPFIFO & 0x3000; /* read status
register, mask bits */
        } while (fifo_status !=0);
    }
    else {
        fifo_data = 0xffff; /* error, not a valid capture */
    }
    return fifo_data;
}

```

```

/*****
* File: VECTORS.ASM *
*-----
* This file contains the interrupt vectors *
*****/
    .length 58
    .option T
    .option X
/***** *
* ILLEGAL INTERRUPT ROUTINE *
*****/
    .text
    .def _int_0
_int_0: B _int_0 ; ILLEGAL INTERRUPT SPIN
/***** *
* INTERRUPT VECTORS *
*****/
    .sect "VECTOR"
    .ref _c_int0
    .ref _c_int3
    .ref _c_int4
    B _c_int0 ; RESET
    B _int_0 ; INT1
    B _int_0 ; INT2
    B _c_int3 ; INT3
    B _c_int4 ; INT4

```

```

B   _int_0    ; INT5
B   _int_0    ; INT6
B   _int_0    ; Reserved
B   _int_0    ;
B   _int_0    ;
B   _int_0    ;
B   _int_0    ;
B   _int_0    ;
B   _int_0    ;
B   _int_0    ;
B   _int_0    ;
B   _int_0    ;
B   _int_0    ; TRAP
B   _int_0    ; NMI
B   _int_0    ;
B   _int_0    ;
B   _int_0    ;
.end

```

```

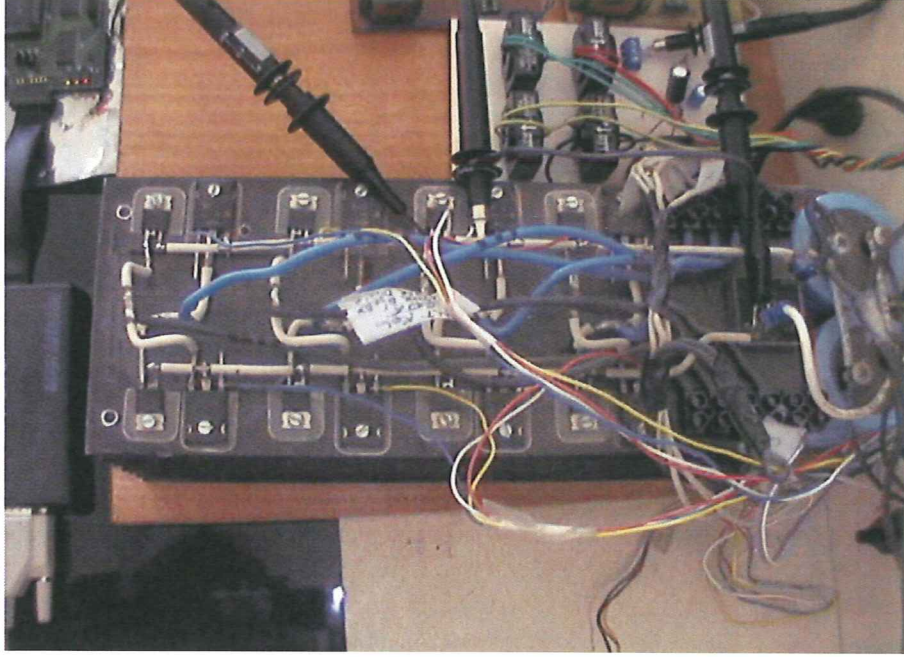
/* FILE: SL_LINK.CMD */
/* Linker command file for F240 EVM implementation of sensorless SRM
drive */
vectors.obj
evmgr.obj
sl_srm.obj
flux_est.obj
-c          /*use ROM autoinitialization model */
-m  main.map
-o  main.out
-l  c:\2xxtools\rts2xx.lib
MEMORY
{
    PAGE 0: VECTORS:  origin = 0x0000 length = 0x0040      /* EMIF
*/
    PAGE 0: CODE:     origin = 0x0040 length = 0x1FC0      /* EMIF
*/
    PAGE 1: MMRS:     origin = 0x0000 length = 0x0060      /* MMRS
*/
                B2:    origin = 0x0060 length = 0x0020      /* DARAM
*/
                B0:    origin = 0x0100 length = 0x0100      /* DARAM
*/
                B1:    origin = 0x0300 length = 0x0100      /* DARAM
*/
                DATA: origin = 0xa000 length = 0x2000      /* EMIF
*/
}
SECTIONS
{
    .VECTOR    > VECTORS    PAGE 0
    .text      > CODE       PAGE 0
    .cinit     > CODE       PAGE 0
    .switch    > CODE       PAGE 0
    .mmrs      > MMRS       PAGE 1      /* Memory Mapped Registers
*/
    .data      > DATA      PAGE 1
    .bss       > DATA      PAGE 1

```

```
.const      > DATA      PAGE 1  
.stack      > DATA      PAGE 1  
.systemem   > DATA      PAGE 1  
}
```


EK B

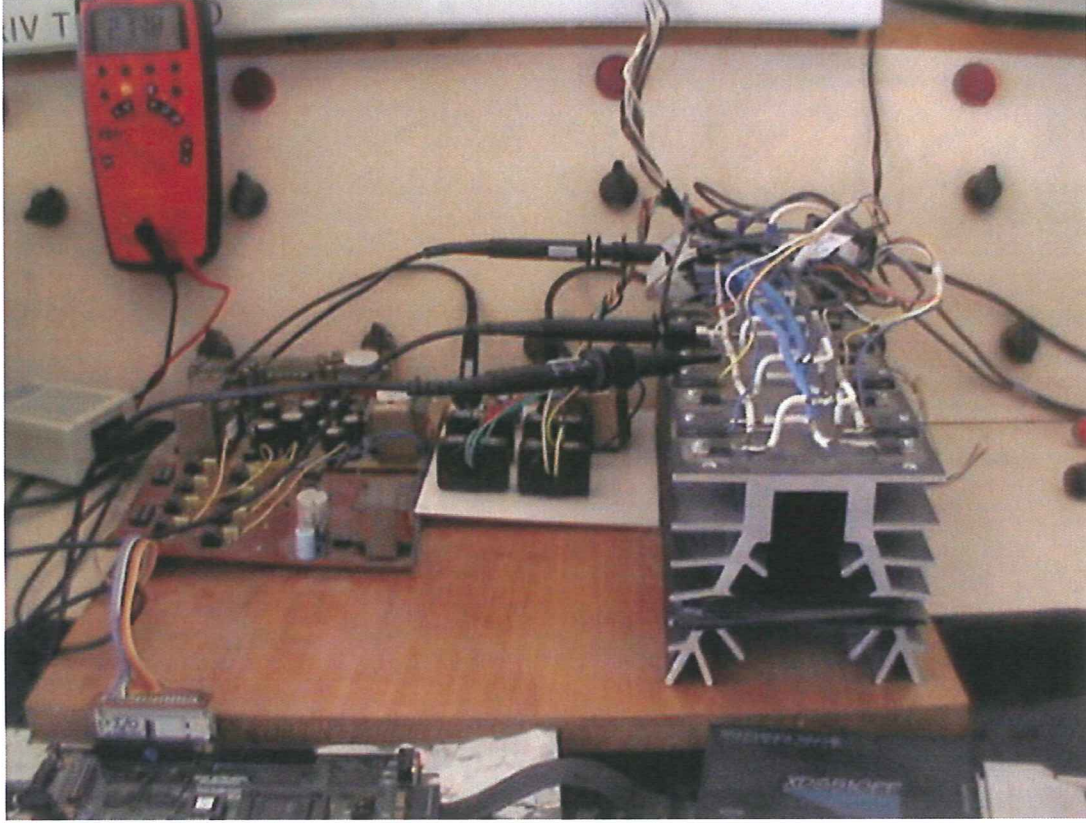
Bu bölümde, tez çalışmasında kullanılan deney düzeneğine ait fotoğraflar verilmiştir



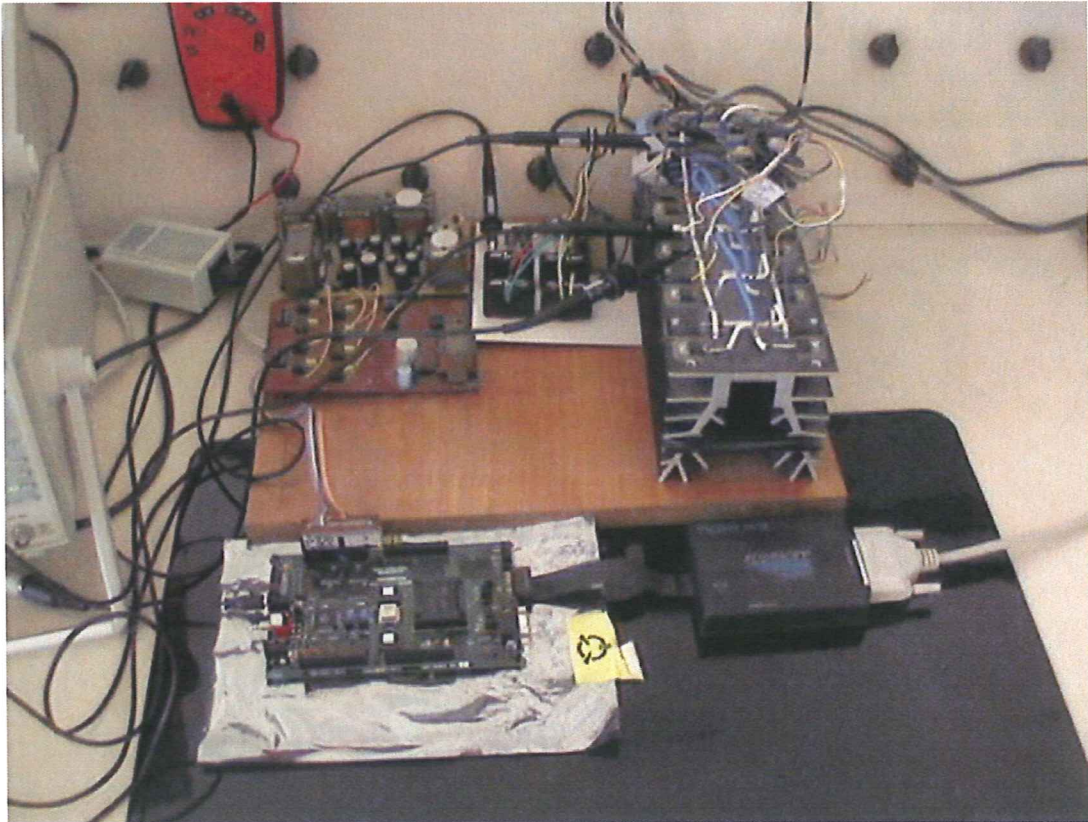
Şekil Ek B.1 8 IGBT, 8 diyottan oluşan köprü güç elektroniği devresi



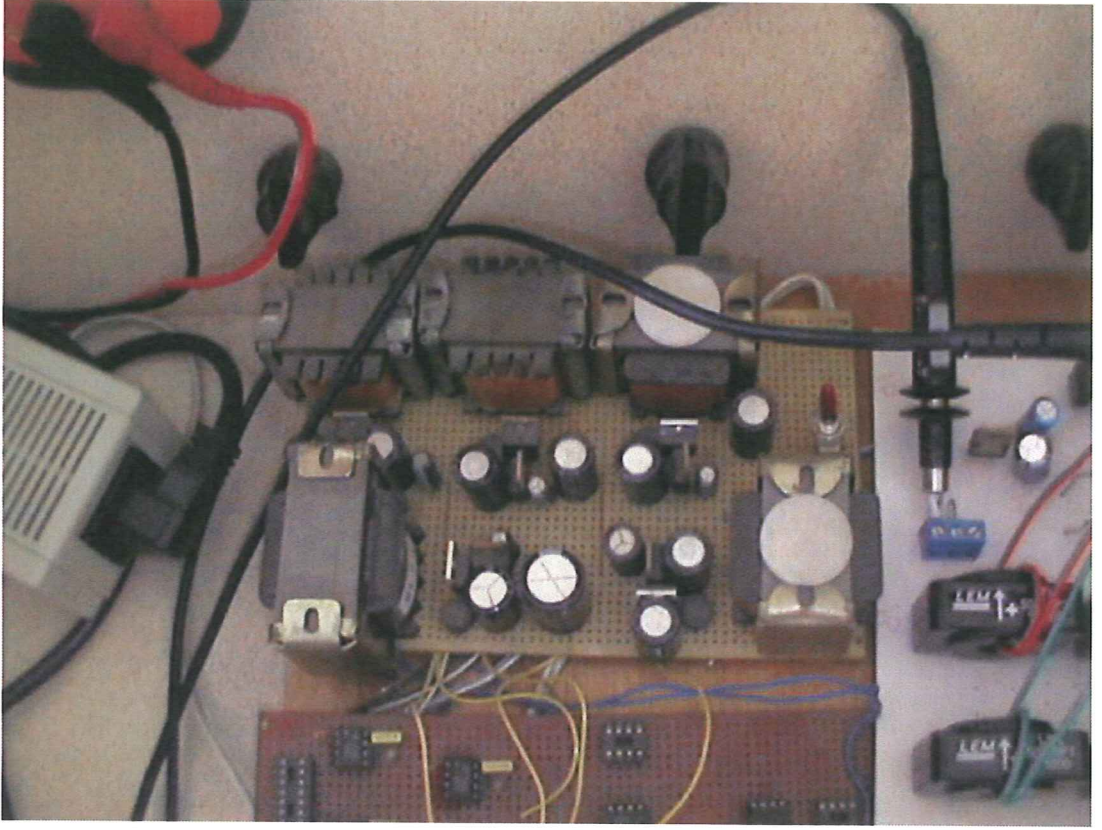
Şekil Ek B.2 Akım algılayıcılar



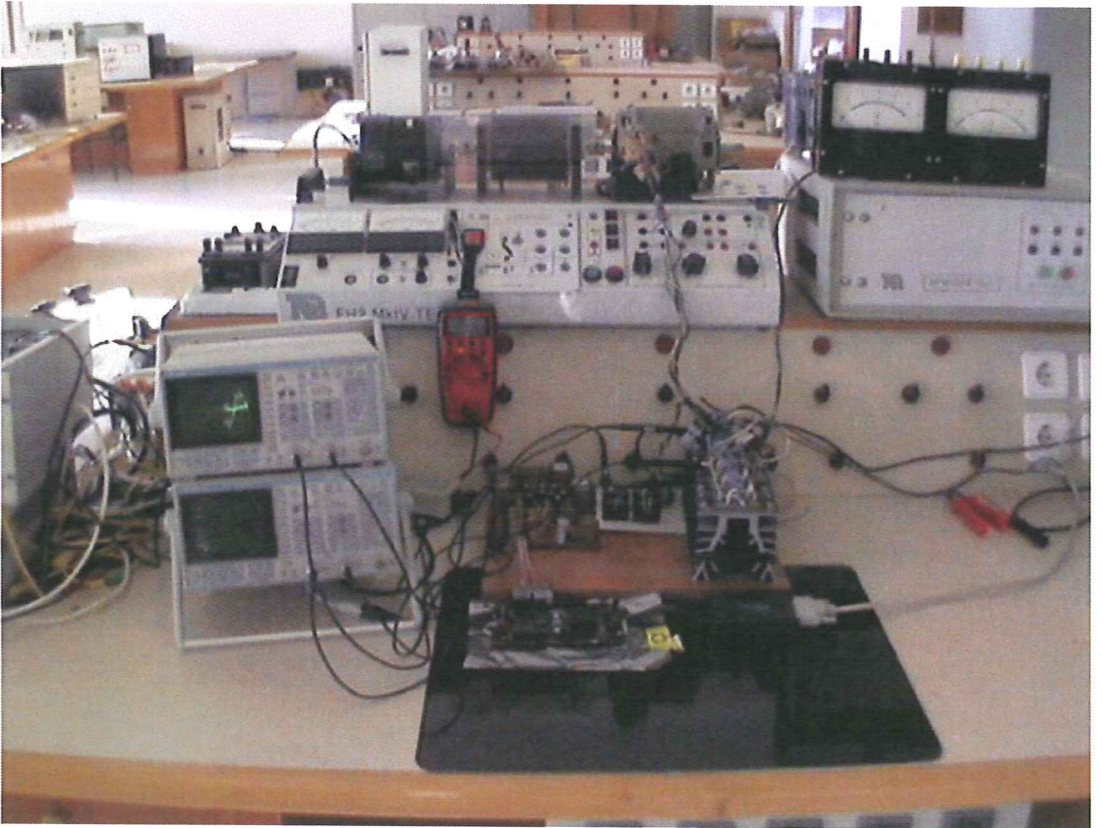
Şekil Ek B.3 Güç katı ve sürücü devre



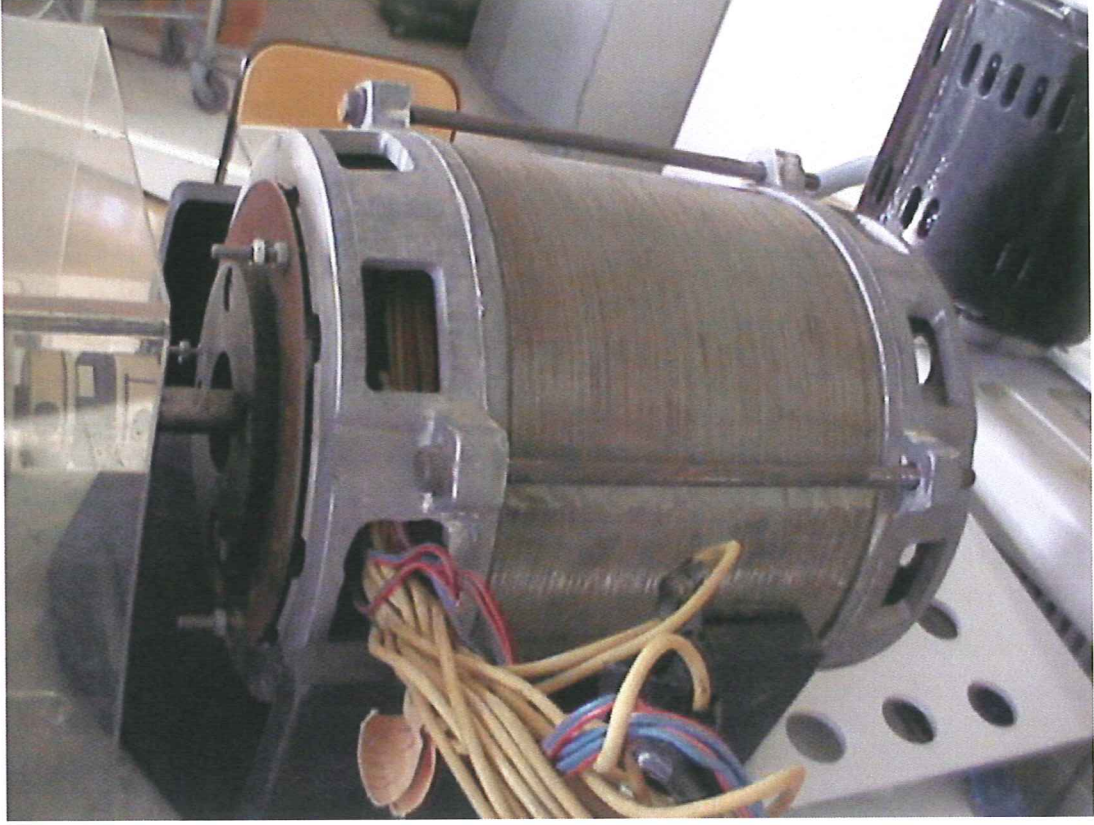
Şekil Ek B.4 Güç ve denetim sistemleri



Şekil Ek B.5 IGBT sürücü devresi

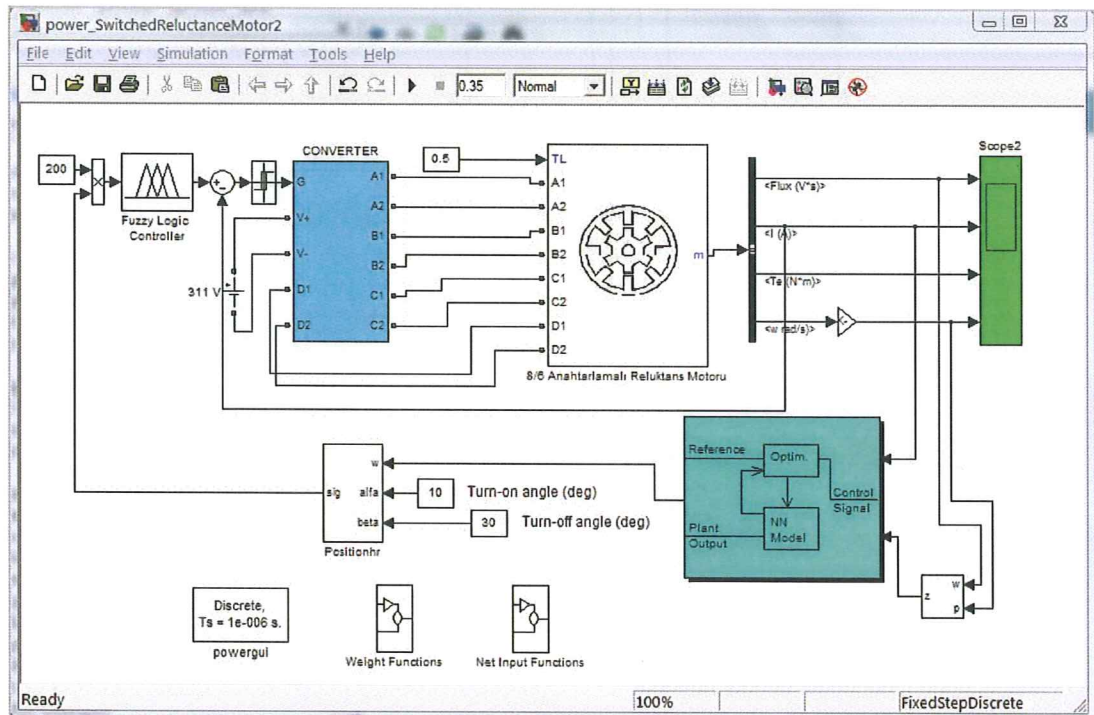


Şekil Ek B.6 Deney düzeneğinin görünümü

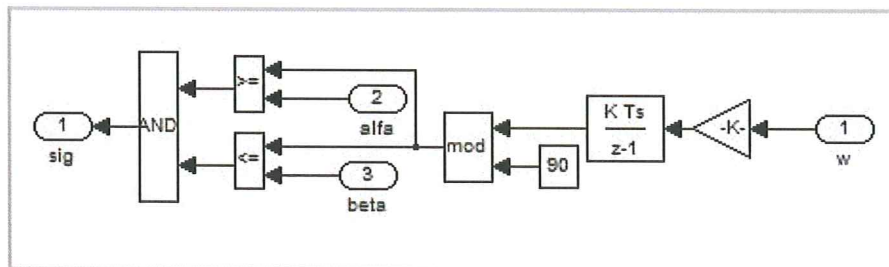


Şekil Ek B.7 Tezde kullanılan 8/6 ARM

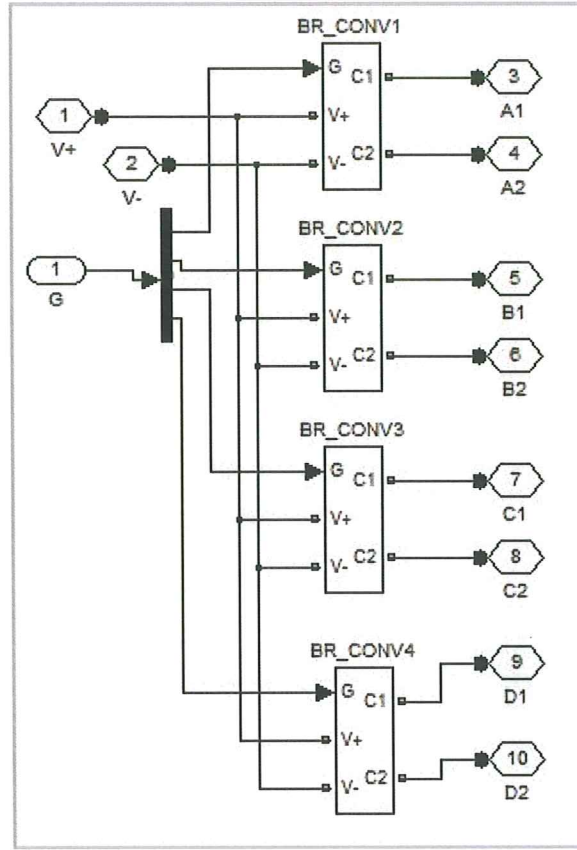
Bu bölümde tez çalışması için hazırlanılan MATLAB Simulink benzetimlerine ait blok şemaları verilmiştir.



Şekil Ek C.1 Kullanılan ARM için hazırlanan benzetim devresinin genel görünümü



Şekil Ek C.2 Benzetim devresindeki akım denetim bloğu



Şekil Ek C.3 Benzetimde kullanılan güç devresine ait aktarım bloğu

ÖZGEÇMİŞ

Taşdemir AŞAN, 1967 yılında İstanbul'da doğdu. İlköğrenimini Bostancı İlkokulu, orta ve lise öğrenimini Beşiktaş ATATÜRK Lisesi'nde tamamladı. 1984 yılında, İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde lisans öğrenimine başladı. 1988 yılında, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elektrik Mühendisliği Programında Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 1990 yılında, Yüksek Mühendis ünvanını aldı ve İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elektrik Mühendisliği Programına Doktora öğrencisi olarak kaydoldu. Ocak 1991'de, İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Elektrik Makineleri Ana Bilim Dalı'na, Araştırma Görevlisi olarak girdi. Halen aynı Ana bilim Dalı'nda Öğretim Görevlisi olarak görevini sürdüren Taşdemir AŞAN'ın Ulusal Kongrelerde yayınlanmış iki bildirisi bulunmaktadır. Taşdemir AŞAN, evli ve bir çocuk babasıdır.

