

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**2 x 6/4 DİSK TİPİ ANAHTARLAMALI RELÜKTANS
MOTOR TASARIMI İLE TORK DALGALANMASININ
AZALTILMASI**

**Tezi Hazırlayan
Aykut EMİRE**

**Tezi Yöneten
Yrd. Doç. Dr. Ferhat DALDABAN**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Ağustos 2010
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**2 x 6/4 DİSK TİPİ ANAHTARLAMALI RELÜKTANS
MOTOR TASARIMI İLE TORK DALGALANMASININ
AZALTILMASI**

**Tezi Hazırlayan
Aykut EMİRE**

**Tezi Yöneten
Yrd. Doç. Dr. Ferhat DALDABAN**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

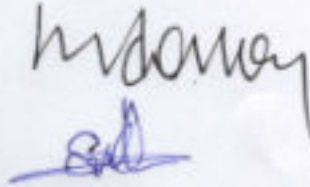
**Ağustos 2010
KAYSERİ**

Yrd. Doç. Dr. Ferhat DALDABAN danışmanlığında Aykut EMİRE tarafından hazırlanan "2 x 6/4 Disk Tipi Anahtarlama Relüktans Motor Tasarımı İle Tork Dalgalanmasının Azaltılması" adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

14/09/2010

JÜRİ:

Başkan: Prof. Dr. Kenan DANIŞMAN



Üye : Doç. Dr. Şaban ÖZER



Üye : Yrd. Doç. Dr. Ferhat DALDABAN

**ONAY:**

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun ~~24/09/2010~~ tarih ve ~~2010/34-09~~ sayılı kararı ile onaylanmıştır.

24/09/2010


Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

“2 x 6/4 Disk Tipi Anahtarlmalı Relüktans Motor Tasarımı İle Tork Dalgalanmasının Azaltılması” konulu tez çalışmasının seçiminde, yürütülmesinde, sonuçlandırılmasında ve sonuçlarının değerlendirilmesinde maddi ve manevi destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Ferhat DALDABAN’a teşekkür ederim.

Yapılan analizlerde her türlü yardımı yapan, zaman harcayan, emek veren ve tecrübesini paylasan Yrd. Doç. Dr. Nurettin ÜSTKOYUNCU’ya, Mak.Müh. Faruk BAKAN’a, Teknisyenler Nail ÖZLÜ, Cemalettin TAŐTAN, Kemal BAYIR, Abdullah SOYLU, Hasan DEMİR’e ve Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünün saygıdeğer öğretim üyelerine teşekkür ederim.

Tez çalışması boyunca bana verdiği manevi destek, göstermiş olduğu sabır ve anlayıőtan dolayı değerli eőim Yasemin EMİRE’ye ve her akőam afacanlıkları ve yaramazlıkları ile yüzümüzü güldüren, sıkıntımızı alan ikizlerim Duru ve Baki Doruk’a teşekkür ederim.

2 x 6/4 DİSK TİPİ ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTOR TASARIMI İLE TORK DALGALANMASININ AZALTILMASI

Ayktut EMİRE
Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Ağustos 2010
Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ferhat DALDABAN

ÖZET

Anahtarlamaalı relüktans motorlar (ARM) yapılarının basitliği, kullanım kolaylıkları ve maliyetlerinin düşük olması nedeniyle gün geçtikçe kullanım alanları artmakta olan basit elektrik makinalarıdır. Motorun çalışma prensibi relüktans kuvvetine dayanmakta ve serbest hareketli, çıkık yapılı rotorun, bulunduğu manyetik devre içerisinde akının, en kolay yol bulabileceği en küçük relüktans konumuna kadar kuvvet uygulanarak çekilmesi şeklinde gerçekleşmektedir.

Son yıllardaki yarı iletken teknolojisinde meydana gelen hızlı gelişmelerden hem güç elektroniği elemanları, hem de mikrodenetleyiciler olumlu yönde etkilenmişlerdir. Şöyle ki, tek bir yarı iletken anahtar, kontakları arasına uygulanan bin voltun üzerindeki potansiyel farkı nano saniyeler mertebesinde açıp kapatabilmekte ve bu süre zarfında akıttığı akım değerleri yüzlerce amperle ifade edilmektedir. Aynı zamanda mikrodenetleyicilerin performansları ile birlikte kapasiteleri de artmış ve motor kontrol devrelerinin vazgeçilemez özelliği olan PWM (Pulse Width Modulation) gibi birçok fonksiyonu donanımsal olarak desteklemekte ve programsal olarak da kullanıcıya birçok kolaylıklar sağlamaktadırlar.

Güç elektroniğinde kullanılan yarı iletken teknolojilerinin gelişimi, mikrodenetleyici yapılarında meydana gelen gelişmeler ve kontrol tekniklerinin de gelişimiyle paralel olarak ARM'lerin literatürdeki yeri artmaya başlamıştır.

ARM'lerin birçok üstünlüklerine karşılık en önemli dezavantajı momentindeki dalgalanmanın büyük olmasıdır. Momentindeki bu dalgalanma motorun rulmanlarına zarar vermekte olup akustik gürültüye sebep olmaktadır. Motorda oluşan bu moment dalgalılığını azaltmak için ya motorun kontrol devresi ya da motorun manyetik devresi esas alınabilir.

Bu çalışmada motorun manyetik devresi esas alınarak motor tasarımında yapılacak değişikliklerle momentindeki dalgalanmanın azaltılması amaçlanmış ve “2 x 6/4 Disk Tipi Anahtarlamaalı Relüktans Motor” tasarımı gerçekleştirilmiştir. Buna göre öncelikle, ARM’ler üzerinde yapılan çalışmalar, avantajları, dezavantajları, yapısı, çalışma ilkesi, enerji dönüşümleri, elektriksel ve manyetik parametrelerinin belirlenmesi, kontrolü, sürücü seçimi ve tasarım kriterleri incelenmiştir. Daha sonra ARM’nin bilgisayar destekli modellenmesi ve tasarıma yönelik yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Son bölümde ise, sayısal manyetik alan analizi ve deney düzeneği ile elde edilen sonuçların değerlendirmesi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Anahtarlamaalı relüktans motor; sürücüler; güç elektroniği; tork dalgalanması.

DESIGN OF 2 x 6/4 DISC TYPE SWITCHED RELUCTANCE MOTORS WITH TORQUE RIPPLE MINIMIZATION

Aykut EMIRE

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M. Sc. Thesis, August 2010

Thesis Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ferhat DALDABAN

ABSTRACT

Switched Reluctance Motors (SRM) are simple electrical machines whose application areas ever increasing thanks to their simple structures, convenient usage and cheap costs. The working principle of the motor is based on reluctance force and it is realized by applying force to the rotor that have a free movement and doubly-salient structure such that the flux inside the same magnetic circuit with this rotor, comes into the least reluctance position so that the flux will find the easiest way to flow.

Both power electronic components and microcontrollers have been positively affected by the increasing developments in semiconductor technologies in recent years. In such a manner that, only one semiconductor switch is able to open/close the potential difference having over 1000 volt that is applied between the contacts in nanoseconds and during this time the current transferred values are expressed by hundreds of amperes. At the same time, the capabilities of microcontrollers have been increased together with its performance and it started to support many functions in hardware base such as PWM which are indispensable features of motor control circuits and it also provides convenient usage programmatically for the users.

The developments of power electronics that is used in the semiconductor technology started to have more place in the SRM literature with the help of parallel developments that occur in structures of microcontrollers and control techniques.

Despite the many advantages of SRM, its biggest disadvantage is having torque ripple. This torque ripple causes damage to bearing system and produces acoustic noises. For minimizing the torque ripple in the motor, either motor control circuit or the magnetic circuit of the motor shall be handled.

In this work while taking magnetic circuit of the motor as basis, the changes in the motor design and minimizing of the torque ripple is aimed and design of “2 x 6/4 Disk Type Switched Reluctance Motors” is created. According to this first of all related works done on SRM, its advantages, disadvantages, structure, working principle, energy transformation, identification of the electrical and magnetic parameters, its control, driver selection and design criteria have been researched. After these topics, the computer aided design of the SRM and works related to design of SRM have been given. In the last part, numerical magnetic field analysis and evaluations of the results obtained through the experiment setup have been made.

Keywords : Switched reluctance motor; drivers; power electronics; torque ripple.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI	i
TEŞEKKÜR	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
KISALTMA VE SİMGELER	ix
TABLolar LİSTESİ	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ixv
1. BÖLÜM	
GİRİŞ	
1.1. Tezin Literatürdeki Yeri	1
1.2. Çalışmanın Amacı	9
2. BÖLÜM	
ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN TEMELLERİ	
2.1. Giriş	11
2.2. Elektrik Makinaları	11
2.3. Elektrik Makinalarının Yapısı	12
2.4. Anahtarlamaalı Relüktans Motor	14
2.4.1. Anahtarlamaalı Relüktans Motorun Yapısı	15
2.4.2. Anahtarlamaalı Relüktans Motorun Çalışması	22
2.4.3. Değişken Relüktans	24
2.4.4. Eşdeğer Devre	26
2.4.5. Enerji Dönüşümü	28
2.4.6. Tork	30

2.4.7. ARM’de Tork Dalgalanması	33
2.4.8. Temel Parametreler	35
3. BÖLÜM	
ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTOR ÇEVİRİCİ DEVRELERİ	
3.1. Giriş	38
3.2. Çevirici Devreleri	39
4. BÖLÜM	
2 x 6/4 DİSK TİPİ ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTOR TASARIMI	
4.1. Giriş	47
4.2. Tasarım İşlemi	48
4.3. 2 x 6/4 Disk Tipi Anahtarlamaalı Relüktans Motor	50
4.4. Tasarımı Yapılan 2 x 6/4 Disk Tipi ARM’ye Ait Teknik Resimler	53
5. BÖLÜM	
BENZETİM SONUÇLARI VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR	
5.1. Benzetim Sonuçları	60
5.2. Deneysel Çalışmalar-1	66
5.3. Deneysel Çalışmalar-2	70
5.4. Deneysel Çalışmalar-1 ile Deneysel Çalışmalar-2’nin Karşılaştırılması	72
5.5. Benzetim Sonuçları ile Deneysel Çalışmalar-2’nin Karşılaştırılması	73
6. BÖLÜM	
SONUÇ VE ÖNERİLER	74
KAYNAKLAR	76
ÖZGEÇMİŞ	80

KISALTMA VE SİMGELER

Bu çalışmada kullanılmış bazı kısaltma ve simgeler, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar	Açıklama
AA	Alternatif Akım
AC	Alternating Current
ARM	Anahtarlamalı Relüktans Motor
AT	Ampertur
DA	Doğru Akım
DC	Direct Current
GTO	Gate Turn-Off
PWM	Pulse Width Modulation
R1	Rotor 1
R2	Rotor 2
SRM	Switched Reluctance Motor
TRV	Torque Per Unit Rotor Volume
VRM	Variable Reluctance Motor

Simgeler	Açıklama
B	Akı yoğunluğu
d_d	Rotor dış yarıçapı
d_i	Rotor iç yarıçapı
D_i	Stator iç çapı
D_s	Stator eni
D_r	Rotor eni
g	Hava aralığı
g_{\min}	Minimum hava aralığı
F	Magneto motor kuvveti
H	Manyetik alan şiddeti
i	Akım
k	Sabit
l	Uzunluk
l_s	Stator kutup uzunluğu
l_r	Rotor kutup uzunluğu
L_{stk}	Saç paketinin uzunluğu
L	İndüktans
N	Sarım sayısı

N_s	Stator kutup sayısı
N_r	Rotor kutup sayısı
P_I	Giriş gücü
P_{ag}	Hava aralığı gücü
q	Faz sayısı
R	Direnç
R_s	Sargı direnci
$R1$	Rotor 1
$R2$	Rotor 2
$R2_{ort}$	Rotor 2 ortalama tork dalgalanması
RT_{ort}	Toplam ortalama tork dalgalanması
\mathfrak{R}	Relüktans
S	Kesit alanı
t	Zaman
T	Tork
T_{min}	Min. tork
T_{max}	Max. tork
v	Gerilim
w_m	Hız

W_f	Manyetik alanda depolanan enerji
W'	Ko-enerji
ΔW_m	Mekanik iş
y_s	Stator kutup derinliği
y_r	Rotor derinliği
π	Pi sayısı
μ	Manyetik geçirgenlik
ϕ	Ak1
λ	Halkalanma akısı
θ	Rotor pozisyonu
θ_s	Stator kutup açısı
θ_r	Rotor kutup açısı
γ_s	Stator kutup konum açısı
γ_r	Rotor kutup konum açısı

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1. ARM'nin diğler motorlarla karşılaştırılması	14
Tablo 4.1. Örnek bir ARM için istenilen özellikler	49
Tablo 4.2. Tasarlanan 2 x 6/4 disk tipi ARM'nin parametreleri ve değerleri	51
Tablo 5.1. Maxwell 3D alan simülatöründe R1, R2 ve her ikisi devrede iken ortalama tork değerleri	63
Tablo 5.2. Toplam 10 A akım değerinde ölçülen deneysel değerler-1	69
Tablo 5.3. Toplam 10 A akım değerinde ölçülen deneysel değerler-2	70
Tablo 5.4. Toplam 15 A – 20 A akım değerlerinde ölçülen deneysel değerler-3	71

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	6/4 ARM kesiti	17
Şekil 2.2.	En çok bilinen ve kullanılan ARM dizilimleri	17
Şekil 2.3.	Farklı dizilimlere sahip ARM'ler	18
Şekil 2.4.a.	Motor pozisyon sensörleri	20
Şekil 2.4.b.	Motor pozisyon sensörünün yerleşimi	20
Şekil 2.5.	ARM'de doğrusal çalışma için rotor konumuna göre indüktans değişimi	21
Şekil 2.6.	Akım ve halkalanma akısı arasındaki doğrusal olmayan ilişki	21
Şekil 2.7.	ARM'nin çalışması	22
Şekil 2.8.	Çeşitli akım değerlerinde rotor konumuna göre elde edilen indüktans değişimi	23
Şekil 2.9.	Çeşitli akım değerlerinde rotor konumuna göre elde edilen halka akılarının değişimi	23
Şekil 2.10.	Çeşitli akım değerlerinde rotor konumuna göre elde edilen tork değişimi	24
Şekil 2.11.	ARM'nin tek fazına ait elektriksel eşdeğer devre	26
Şekil 2.12.	Manyetizasyon eğrisi ve enerji ilişkisi	28
Şekil 2.13.	Alan enerjisi, ko-enerji ve mekanik iş	29
Şekil 2.14.	Sabit stator sargı akımında torkun indüktans ile değişimi	31
Şekil 2.15.	ARM'nin elektromanyetik alan dağılımı	32
Şekil 2.16.	ARM'de tork dalgalanması	34

Şekil 3.1.	ARM kontrol sisteminin yapısı	39
Şekil 3.2.	ARM'lerde kullanılan dönüştürücülerin anahtar sayısına göre sınıflandırılması	40
Şekil 3.3.a.	Üç fazlı bir ARM için 2n tipi klasik köprü çevirici devresi	41
Şekil 3.3.b.	Bir faz için ARM uyartım devresi	41
Şekil 3.3.c.	Bir faz için ARM dalga şekilleri	42
Şekil 3.4.	n+1 topolojisindeki ARM çevirici devresi	43
Şekil 3.5.	Split DC çevirici devresi	44
Şekil 3.6.	Üç faz ARM için bifilar sargılı çevirici devresi	44
Şekil 3.7.	Üç faz ARM için C-vuruş tipi çevirici devresi	45
Şekil 3.8.	Üç fazlı ARM için söndürme dirençli çevirici devresi	45
Şekil 3.9.	Üç faz ARM için çift eğimli çevirici devresi	46
Şekil 4.1.	Hız-tork diyagramının dört çeyreği	49
Şekil 4.2.a.	Tasarımı yapılan 2 x 6/4 disk tipi ARM'ye ait statorun kesit görünümü	51
Şekil 4.2.b.	Statorun üç boyutlu önden görünümü	52
Şekil 4.2.c.	Statorun üç boyutlu arkadan görünümü	52
Şekil 4.3.	Stator sargılarının yerleşimi	53
Şekil 4.4.a.	Tasarımı yapılan 2 x 6/4 disk tipi ARM'ye ait rotorun kesit görünümü	53
Şekil 4.4.b.	Rotorun üç boyutlu çizimi	54

Şekil 4.5.	Rotora saç paketinin yerleşimi	54
Şekil 4.6.a.	Tek taraflı stator ile rotorun birleşiminin önden görünümü	55
Şekil 4.6.b.	Tek taraflı stator ile rotorun birleşiminin arkadan görünümü	55
Şekil 4.7.	Çift taraflı stator ile rotorun birleşiminin kesit görünümü	56
Şekil 4.8.	Stator sargıları ile rotorun görünümü	56
Şekil 4.9.	Stator ile rotor saç paketinin görünümü	57
Şekil 4.10.	Tasarımı yapılan 2 x 6/4 disk tipi ARM'nin üç boyutlu yandan görünümü	57
Şekil 4.11.	Tasarımı yapılan 2 x 6/4 disk tipi ARM'nin üç boyutlu önden görünümü	58
Şekil 4.12.	Tasarımı yapılan 2 x 6/4 disk tipi ARM'nin önden görünümü	58
Şekil 4.13.	Tasarımı yapılan 2 x 6/4 disk tipi ARM'nin arkadan görünümü	59
Şekil 5.1.	Maxwell 3D alan simülatörü ile ARM'nin modellenmesi	61
Şekil 5.2.	Maxwell 3D alan simülatörü ile R2 devrede iken akı dağılımı	61
Şekil 5.3.	Maxwell 3D alan simülatörü ile R1 ve R2 devrede iken akı dağılımı	62
Şekil 5.4.	R2 devrede iken statik tork grafiği	63
Şekil 5.5.	R1 ve R2 devrede iken motora ait statik tork grafiği	64
Şekil 5.6.	5-35 derece çalıştırma durumu için R2'ye ait tork dalgalanması	64
Şekil 5.7.	5-35 derece çalıştırma durumu için iki rotora ait tork dalgalanması	65

Şekil 5.8.	Tasarımı yapılan 2 x 6/4 disk tipi ARM için tork ölçüm noktasının görünümü	67
Şekil 5.9.	Tasarımı yapılan 2 x 6/4 disk tipi ARM'nin yandan görünümü	67
Şekil 5.10.a.	Tasarımı yapılan 2 x 6/4 disk tipi ARM'ye ait deney düzeneği-1	68
Şekil 5.10.b.	Tasarımı yapılan 2 x 6/4 disk tipi ARM'ye ait deney düzeneği-2	68
Şekil 5.11.	Toplam 10A için statik tork grafiği-1	69
Şekil 5.12.	Toplam 10A için statik tork grafiği-2	70
Şekil 5.13.	R1 ve R2 devrede iken toplam 15 A - 20 A akım değerleri için ölçülen statik tork grafiği-3	71
Şekil 5.14.	Deneyisel çalışmalar-1 ile deneyisel çalışmalar-2'nin karşılaştırılması	72
Şekil 5.15.	Benzetim sonuçları ile deneyisel çalışmaların karşılaştırılması	73

1. BÖLÜM

GİRİŞ

1.1. Tezin Literatürdeki Yeri

Elektrik makinelerinin performanslarını artırmaya yönelik çalışmalar her zaman araştırmacıların ilgisini çeken bir konu olmuştur. Genellikle tasarım esnasında yapılan bu çalışmalar ile verimi yükseltmek, başka bir deyişle elektrik makinesinden en iyi şekilde yararlanmak amaçlanmıştır. Anahtarlamalı relüktans motor (ARM), gerek yapısı ve çalışma ilkesi gerekse kontrolü açısından, uzun zamandır üzerinde yoğun çalışmaların yapıldığı bir elektrik makinesidir.

ARM'ler, basit yapıları ve çok geniş hız sahasına sahip olma özellikleri sayesinde kullanım alanları gün geçtikçe yaygınlaşan elektrik motorlarıdır [1]. Hava aralığındaki relüktans değişimi prensibini temel aldıklarından ve faz indüktanslarının değişken olmasından dolayı önceleri değişken relüktanslı motorlar olarak isimlendirilen ARM'ler, daha sonraları çalışma prensipleri göz önünde bulundurularak anahtarlamalı relüktans motorlar olarak isimlendirilmişlerdir.

Elektrik makinalarının temel ilkeleri ilk kez Faraday tarafından ortaya konulmuştur. Faraday, manyetik alanla ilgili Oersted'in buluşlarından yararlanarak 1822 yılında, içinden akım geçen bir iletkenin manyetik alan tarafından itildiğini bulmuştur. Bu buluştan yararlanan Barlov, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren ilk makinayı 1824 yılında yapmıştır. Barlov'un yaptığı ve Barlov tekerleği olarak bilinen yapı, ilk elektrik makinası olarak bilinmektedir.

ARM'nin çalışma prensibi ise ilk kez Davidson ve Wheatsone tarafından tanımlanmıştı. 1838 yılında Davidson tarafından İskoçya'da Glasgow ile Edinburgh arasındaki tren yolunda çalışan bir lokomotifte kullanılmıştır [2]. Relüktans motorun patenti 1840

yılında W.H. Toylar tarafından alınmıştır [3]. Ancak 1960'lı yılların sonlarına kadar çok küçük güçlerde imal edilen ve üzerinde pek durulmayan bu motor, yarı iletken teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak tekrar gündeme gelmiştir. 1970'li yıllarda ucuz ve hızlı elektronik güç anahtarlarının, anahtarlama stratejileri ile yüksek güçlerde değişken relüktanslı motorların üretilmesi ile relüktans motorlar üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Bu bağlamda ilk önemli adım 1969 yılında Nasar ve Ofsenani tarafından atılmıştır [1,4].

Günümüzdeki ARM'lerin temel özelliklerini taşıyan ilk ARM patenti 1972 yılında ABD'de Bedford ve Hoft tarafından alınmıştır [5]. İlk ARM'ler 1974 yılında Ford Motor şirketinde çalışan Unnewehr ve Koch, daha sonra ise 1978 yılında Bausch tarafından üretilmiştir [6,7]. 1980 yılında Leeds Üniversitesinde Lawrenson ve arkadaşları, relüktans motorları üzerine gerçekleştirdikleri kapsamlı bir çalışmadan sonra araştırmacılar bu motora ilgi göstermeye başlamışlardır [8]. Ticari amaçlı olarak ilk ARM'ler, 1983 yılında Oulton Drives Ltd. lisansı ile Tascos Drives tarafından İngiltere'de üretilmeye başlanmıştır.

Bu motorlara, 1980'li yıllardan önce, makinenin yapısından kaynaklanan, faz endüktanslarının değişken olmasından dolayı "Değişken Relüktanslı Motor" (Variable Reluctance Motor, VRM) denmekteydi. Motorların güç elektroniği ile birleştirilmiş tasarımından sonra faz sargılarının yarı iletken anahtar elemanlar tarafından devreye alınıp çıkartılmasından dolayı "Anahtarlama Relüktans Motor" adı daha yaygın kullanılmaya başlamıştır.

Bunu takip eden yıllarda güç elektroniğinde kullanılan yarı iletken teknolojilerinin gelişimi, mikrodenetleyici yapılarında meydana gelen gelişmeler ve kontrol tekniklerinin de gelişimiyle paralel olarak ARM'lerin literatürdeki yeri artmaya başlamıştır. Ancak ticari ortamda yavaş yer almasının nedeni, motorun karşılıklı stator kutuplarının oluşturduğu radyal kuvvetlerin meydana getirdiği ovalleştirme etkisi sonucu doğal gürültüsü-titreşimi [9–10] ve bir sürücü devresi ile çoğu durumlarda bir rotor konumu algılayıcısı kullanılmaya zorunluluğundan kaynaklanmaktadır [2].

Gerçekte bir senkron makinenin yapısına sahip olan ARM'ler, yarı iletken anahtarlarla kontrol etmeye elverişli olan bir çeşidedir. Hem stator hem de rotorlarının çıkık yapıya

sahip olmaları ve statorlarında doğru akım (DA) makinaların sargılarına benzer sargılar bulundurmalarına karşın, rotorlarında herhangi bir sargı ve mıknatıs bulunmaması gibi bir takım özelliklere sahip olmaları yönünden diğer elektrik makinalarından ayrılmakta ve çalışma prensipleri de bu açıdan diğer makinalara göre değişiklik arz etmektedir.

Bir dönen elektrik makinesi olarak, hem motor hem de generatör olarak çalışabilmektedir. Ancak bugüne kadar gerçekleştirilen uygulamalarda daha çok motor olarak kullanımı söz konusudur. Diğer birçok elektrik makinesinden farklı olarak bir güç elektroniği devresine gereksinim duymakta olup, doğrudan alternatif akım (AA) veya doğru akım kaynağından beslenerek çalıştırılmaz.

Motorun çalışma prensibi relüktans kuvvetine dayanmakta ve serbest hareketli, çıkık yapılı rotorun, bulunduğu manyetik devre içerisindeki akının, en kolay yol bulabileceği en küçük relüktans konumuna kadar kuvvet uygulanarak çekilmesi şeklinde gerçekleşmektedir. Dolayısıyla ARM'lerde elektrik enerjisinin mekanik enerji olarak kullanımı relüktans kuvveti ile gerçekleşmektedir. Relüktans kuvveti, dönme hareketini sağlayan döndürme momentini oluşturmakta ve rotor kutbunun stator kutbuna göre konumu izlenerek faz sargılarının sırasıyla uyarılması ile sürekli döndürme momenti sağlanmaktadır [11].

ARM elektronik kontrol devresi ile birlikte, hızı ve momenti kontrol edebilen bir tahrik sistemi oluşturmakta ve hız/moment kontrolü gerektiren uygulamalarda yer almaktadır. Bir tahrik sisteminden istenen temel özelliklerin, ARM tarafından da sağlanması istenir, bu nedenle ARM'li tahrik sisteminin uygulama alanı bulabilmesi için; büyük verim, yüksek güç/ağırlık, hassas hareket yeteneği, düşük akustik gürültü, titreşimsiz yüksek moment, güvenilirlik ve düşük maliyet ölçütlerini sağlaması gerekmektedir. Her uygulamanın kendine özgü bazı öncelikleri vardır ve bu öncelikler göz önünde bulundurularak düşük maliyetli bir ARM'li tahrik sisteminin oluşturulması mümkündür.

ARM'lerin sahip oldukları avantajlardan önemli olanları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Rotorlarında herhangi bir sargı ya da mıknatıs bulunmaması sebebiyle maliyetlerinin düşük olması,
- Statorlarında yer alan sargıların basit yapıda olması,

- Rotorun sargısız ve fırçasız yapıya sahip olması sebebiyle motorun çok yüksek hızlarda işletilebilmesi,
- Stator sargılarının yarı iletken anahtarlama elemanlarına seri bağlı olması sebebiyle anahtarlama anlarında anahtarlama elemanlarında problem meydana gelme olasılığının düşük olması,
- Motora ait stator fazlarının birbirinden bağımsız çalışabilmelerinden dolayı herhangi bir fazın arızalanması durumunda bile motorun çalışmasını sürdürebilmesi ve dolayısıyla da hata toleranslarının yüksek olması.

Birçok avantajlara sahip olmalarına rağmen, ARM'ler yakın zamana kadar çok fazla kullanım alanı bulamamışlardır. Bunun en önemli nedenleri arasında;

- Özellikle düşük hız uygulamalarında momentte büyük genlikli salınımlar oluşması nedeniyle akustik gürültüye sahip olması ya da akustik gürültü üretimine meyilli olması,
- Rotor konumunun bilinmesinin gerekliliği (motorun dönebilmesi için belli bir anda hangi faza gerilim uygulanması gerektiğinin bilinmesi zorunludur) ve dolayısıyla bir pozisyon sensörüne ihtiyaç duyulması,
- Torkta meydana gelen ani çökmeler ve dolayısıyla oluşan tork dalgalılığı gösterilebilir.

Bununla birlikte ARM'lerin kullanıldığı uygulama alanlarından başlıcaları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Ev aletleri,
- Taşıma araçları,
- Otomotiv sektörü,
- Endüstriyel madencilik,
- Tekstil sektörü,
- Havacılık,
- Enerji üretimi,
- İş aletlerinde,
- Bilgisayar cihazları,

gibi alanlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Ev aletlerinden özellikle elektrikli süpürgeler olmak üzere ayrıca otomatik çamaşır makinalarında, mutfak robotlarında, soğutucularda; taşıma sistemlerinden akümülatörle beslemeli golf arabası, çekici gibi taşıtlarda; otomotiv endüstrisinde otomobil sileceklerinde, kamyon ve kamyonetlerde, motosikletlerde; hafif yapısından dolayı havacılık sektöründe; bilgisayarlarda disket sürücülerde, hard disklerin, yazıcı, çizici, tarayıcı cihazların çalıştırılmasında kullanılmaktadırlar. Ayrıca dinamik cevabının hızlı olmasından dolayı, özellikle hareketini dönme ve öteleme ile sağlayan “servo” ve “actuator” uygulamaları için uygundur [12].

Basit yapıları ve kullanılan çevirici yapısının basitliği nedeniyle endüstride kendine yer bulmaya başlayan ARM'ler hakkında yakın zamanda oldukça fazla sayıda çalışma yapılmıştır.

1992' de ARM'lerin gürültüsü hakkındaki ilk sistematik çalışma D.E. Cameron, J.H. Lang ve S.D. Umans tarafından yayımlandı. D.E. Cameron, J.H. Lang ve S.D. Umans, temel mühendislik teorisi ve bir dizi deneyler yaparak gürültünün ana kaynaklarının ovalleşmesi ya da stator arka demirinin titreşmesi ve stator kutuplarının yanal bozulması olduğunu göstermişlerdir [10].

1994'te çalışmalar hem tork titreşiminin azaltılması hem de akustik gürültü üzerine yoğunlaştı [13,14]. Bu yazarların çoğu çalışmalarını akım biçimlendirme ya da elektronik kontrol stratejisinin diğer uyarlamaları üzerinde yoğunlaştırmışlar ve çok azı ARM'nin mekanik tasarımı hakkında çalışma yapmışlardır.

1997'de Nihat İnanç, Adnan Derdiyok ve Veysel Özbek “Kayma mod kontrol tekniği ile anahtarlamalı relüktans motor ortak indüktanslarının tork titreşiminin minimize edilmesi” adlı çalışmalarında, 8/6 bir ARM üzerinde kayma mod tekniğini uygulamışlardır. Pratik olarak, motoru sürmek için voltaj kaynağını kullanmışlar ve akımı da kontrol etmişlerdir. Torkun akımın karesi ile değiştiğini belirtmişlerdir. Sonuçta, anahtarlamalı relüktans motorun önemli derecede lineer olmayan karakteristiklere sahip olduğunu ve kayma mod tekniğinin lineer olmayan sistemlerde iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır. Tork değişimindeki düşük frekanslı titreşimleri anahtarlamalı relüktans motorun hız çevrimi içerisinde kayma mod kontrolünü uygulayarak elimine etmişlerdir [15].

1998 yılında B.Fahimi, G. Suresh, K. M. Rahman, M. Ehsani yapay sinir ağıları kullanarak anahtarlamalı relüktans motorun akustik gürültüsünün azaltılmasını incelemiştir. ARM'deki gürültünün kaynağı ve bu gürültüde etkin olan kuvvetleri vererek bazı akım-radyal kuvvet-zaman grafikleri elde etmişler ve sinir ağıları tabanlı akım profili kullanarak akustik gürültüyü en aza indirmeye çalışmışlardır [16].

2000 yılında Sanada, Morimoto ve Takeda "Akustik gürültüyü azaltmak için ARM'nin yeni kutup tasarımı" adlı çalışmalarında rotor kutuplarına değişik boyutlarda delikler açmışlar ve bu prototip motorların performanslarını birbirleriyle karşılaştırmışlardır. Kullandıkları motorlar 6/4, 8/6 ve 12/8 dizilimlerinde idi. Performans karşılaştırmasında performans indeksi olarak yeni bir ifade tanımlamışlardır. Bu ifade ortalama torkun radyal kuvvetin maksimum değerine oranı idi. Sonuç olarak, 12/8 dizilimindeki motorun maksimum tork ve minimum akustik gürültü açısından en iyi performansa sahip olduğunu görmüşlerdir. Sanada, Morimoto ve Takeda'nın çalışması 12/8 dizilimindeki ARM'nin yaygın olarak kullanılmaması sebebiyle çok fazla geçerli bir çalışma olmamasına karşın rotor boşluğunun akustik gürültüye etkileri açısından önemlidir [17].

2000' de Jin.Woo. Lee, Hong Seok Kim, Byung Il Kwon ve Byung Taek Kim sonlu eleman yöntemi kullanarak ARM'nin tork titreşimini en aza indirmek için yeni bir rotor şekli tasarlamışlardır. Tasarladıkları rotor şeklinde tam kutup başlarına yakın çentikler açmışlar ve çentiğin konumuna göre torkta oluşan titreşimleri grafik şeklinde vermişlerdir. Tasarlanan ve genel modelin tork-harmonik bileşen grafiğini de ayrıca vermişlerdir. Sonuçta, tasarladıkları modelin tork titreşimini %3 ila %4 arasında azalttığını ispatlamışlardır [18].

2002'de Khwaja M. Rahman ve Steven E. Schulz araçların hareketinde kullanılan 12/8 bir ARM üzerinde yüksek etkinlikli ve yüksek tork yoğunluklu motor elde edilmesi için çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında düşük akustik gürültü için makine tasarlanırken çok dikkat edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Akustik gürültünün makine boyutları arttıkça daha önemli hale geldiğini vurgulamışlardır. Rahman ve Schulz elektrik makinalarında yüksek tork yoğunluğu, yüksek verim, düşük akustik gürültü, sabit güç çalışma sahası, düşük tork salınımı ve düşük maliyetin önemini ifade ederek denenen 12/8 makine için yüksek hızda gürültünün fazla olmasına karşın 6/4 ve 8/6

makinalardan önemli derecede düşük olduğunu, bunda rotor kutup başlarının etkili olduğunu vurgulamışlardır [19].

2002 yılında K. Nakata, K. Hiramoto, M. Sanada, S. Morimoto ve Y. Takeda anahtarlamalı relüktans motorun rotoruna delik açmak suretiyle akustik gürültüdeki değişimi tespit etmeye çalışmışlardır. ARM'deki radyal ve teğetsel kuvvetlerin akustik gürültüyle olan ilişkisini incelemiştirlerdir. A, B ve C adını verdikleri 3 tip farklı delik boyutlarına sahip ARM'nin akustik gürültü analizini yapmışlardır. Yayılan akustik gürültünün güç seviyesini titreşim hızının karesini alarak elde etmişlerdir. Sonuç olarak, rotora delik açma işleminin akustik gürültü seviyesini düşürürken, motorun verimini düşürdüğünü tespit etmişlerdir [20].

2004 yılında M. Balaji, C.A. Vaithilingam ve V. Kamaraj anahtarlamalı relüktans motorların tork titreşiminin azaltılması üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalarında ARM'nin rotorunda sargıları olmaması dolayısı ile tork-eylemsizlik oranının diğer motorlara nazaran daha yüksek olduğunu belirterek bu durumun yüksek tork titreşimi ve akustik gürültüyü meydana getirdiğini ifade etmişlerdir. Hizalı ve hizalı olmayan konumlarda tork değerlerini eğim açısına göre vermişlerdir [21].

2005' te R.T. Naayagi ve V. Kamaraj genetik algoritmasına dayalı bir teknikle tork dalgalanmasını minimize etmeye çalışmışlardır. Akı bağlantısını ve endüktans oranını en yükseğe çıkartarak tork dalgalanmasının azaldığını yaptıkları deneylerle göstermeyi başarmışlardır [22].

2006 yılında X.D. Xue, K.W.E. Cheng ve S.L. Ho tork dalgalanmasını azaltmak için yeni bir kontrol şeması sunmuşlar ve bu şemaya göre, torkun doğrusal olmayan paylaşma fonksiyonunu kullanmışlardır. Bu fonksiyona göre akım düzenleme fazı sırasında iki aktif fazda torka destekte bulunmakta, diğer durumlarda ise tork aktif faz tarafından oluşturulmaktadır [23].

2007 yılında Yan Cai Chao Gao anında tork kontrolü ile anahtarlı relüktans motorlarında tork dalgalanmasını en aza indirmeye çalışmıştır. Anında tork kontrolüne dayalı faz akımı profili oluşturulması yoluyla tork dalgalanmasını minimuma indirdiğini iddia etmiştir. Yapılan deneyle tork dalgalanmasını en aza indirgemede etkili ve kullanılabilir bir yöntem olduğunu göstermiştir [24].

2007 yılında H. Khalili, E. Afjei ve A. Najafi anahtarlı relüktans motorları için tork dalgalanmasının azaltılması konusunda yeni bir metot sunmuşlardır. Bu teknikte simülasyonlar yardımı ile endüktans ve onun pozitif tork üretimine katkıda bulunan her motor safhasındaki hız oranını elde etmişlerdir. Tork dalgalanmasını en aza indirmek için, rotor pozisyonuna göre PWM teknikleri kullanılarak akımın büyüklüğü değiştirmişlerdir. Düzenlemeler sırasında da iki tane pozitif tork üreten faz aynı anda farklı sinyal genişlikleri ile aktif edilerek tork sinyali olabildiğince az tutulmuştur [25].

2008 yılında R. Gobbi ve K. Ramar ARM'nin doğrusal olmayan özellikleri sebebiyle ortaya çıkan tork dalgalanmalarına bulanık yineleme tekniği kullanarak çözüm aramışlardır. Bu metod ile faz akım profilini ayarlamaya çalışmışlardır. Bu teknik kullanılarak deneyler yapmışlar ve sonuçlara göre tork dalgalanmasını %5'lik seviyelerde tutmayı başarmışlardır [26].

2009 yılında M. Divandari, R. Brazamani, A. Dadpour ve M. Jazaeri dinamik gözlemci tekniğine dayanan yüksek performanslı bir anahtarlı relüktans motoru tanıtmışlardır. Dinamik gözlemci geniş bir hız aralığı için rotor pozisyonunu ve hızını tahmin etmeye çalışır. Gözlemcinin elde ettiği değerler bulanık mantık hibrid algoritmasına göre düzeltilmiştir. Ayrıca tork dalgalanmasını azaltmak için bulanık mantık akım telafi edicisi (FLCC) tanıtmışlar. Torkun azaldığı alanlarda, FLCC her faz akımı için fazladan akım gönderir. Bu ARM'in doğrusal olmayan modeli için Matlab/Simulink kullanılarak simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre sunulan teknik ile bütün hızlar için rotor pozisyonu ve hızı yüksek bir doğruluk oranı ile tahmin edilebiliyor. Ayrıca FLCC tork dalgalanmalarını azaltmıştır. Bu tekniğin sağlamlık, yüksek güvenilirlik ve yüksek performans gibi avantajları olduğunu öne sürmüşlerdir [27].

2009 yılında R. Gobbi ve K. Ramar SRM'lerin doğrusal olmayan karakteristik özelliğini detaylı bir şekilde incelenmiş ve ortaya çıkan tork dalgalanmalarını azaltmak için kullanılan birçok kontrol metodu sunmuşlardır. Bu konuda çokça kullanılan histerezis akım kontrolü metodu üzerine odaklanmışlar ve bu metodu geliştirmek için yeni teknikler kullanıp, geliştirilmiş metotlarını kullanarak deneyler yapmışlar ve başarılı sonuçlar elde etmişlerdir [28].

1.2. Çalışmanın Amacı

ARM'lerin birçok üstün yönlerine rağmen endüstriyel alanlarda günümüze değin yeterince yer alamayışlarının en önemli nedenlerinden birisi sahip oldukları yüksek akustik gürültü ve fazların oluşturduğu toplam momentteki dalgalılıktır. Moment dalgalılığı akustik gürültünün kaynaklarından birisidir ve moment dalgalılığının azaltılması akustik gürültü seviyesinin düşürülmesine katkı sağlamaktadır. Özellikle hassas hız/moment gereksinimi olan uygulamalarda titreşimsiz moment isteği önem kazanmakta ve ARM'nin böyle bir alanda kullanılabilmesi için moment dalgalılığının azaltılması kaçınılmaz olmaktadır.

Akustik gürültünün iyileştirilebilmesi için gerçekleştirilen çalışmalar;

- ARM'nin manyetik yapısında yapılacak değişiklikler vasıtasıyla akustik gürültünün iyileştirilmesi,
- ARM'nin kontrol devresi ve kontrol tekniğinde yapılacak değişiklikler vasıtasıyla akustik gürültünün iyileştirilmesi.

Literatürde bu konu ile ilgili olarak gerçekleştirilen çalışmalardan birçoğu ikinci grupta yer almaktadır. Özellikle maliyet giderlerinin fazla oluşu ve fazla zaman alması gibi nedenlerden dolayı ilk grupta yapılan çalışmalar oldukça sınırlı sayıda kalmaktadır. Ancak son yıllarda güç elektroniğinde kullanılan yarı iletkenlerin hızlarının ve akım kapasitelerinde oldukça artış olması, mikrodenetleyicilerin hızlarının ve kapasitesinin yanı sıra, ARM'lerin kontrolünde temel teşkil eden PWM (Pulse Wide Modulation) gibi kontrol tekniklerini donanımsal olarak desteklemeleri ve kullanılan yazılımların, bu ve benzeri özellikleri gerçek zamanlı olarak işlemeye olanak sağlaması gibi gelişmeler ve çeşitli kontrol tekniklerinin de gelişimi, son zamanlarda yapılan çalışmaların bu yönde olmasını sağlamıştır.

Sunulan tezde motorun manyetik devresi esas alınarak motor tasarımında yapılacak değişikliklerle momentindeki dalgalanmanın azaltılması amaçlanmış ve “2 x 6/4 Disk Tipi Anahtarlama Relüktans Motor” tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada, öncelikle daha sonraki bölümlerin daha iyi anlaşılabilmesi için geleneksel anahtarlama relüktans motorların avantajları, dezavantajları, yapısı, çalışma ilkesi,

enerji dönüşümleri, elektriksel ve manyetik parametrelerinin belirlenmesi, kontrolü, sürücü seçimi ve tasarım kriterleri incelenmiştir. Daha sonra ARM'nin bilgisayar destekli modellenmesi ve tasarıma yönelik yapılan çalışmalara yer verilmiş olup, son bölümde ise sayısal manyetik alan analizi ve deney düzeneği ile elde edilen sonuçların değerlendirmesi yapılmıştır.

2. BÖLÜM

ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN TEMELLERİ

2.1. Giriş

Bu bölümde, ilk olarak elektrik makinalarının genel bir değerlendirmesi ve elektrik makinaları içerisinde ARM'lerin yeri verilecek olup, devamında ARM'lerin yapıları detaylı olarak incelenecektir.

2.2. Elektrik Makinaları

Son yıllarda teknolojinin gelişmesine paralel olarak artan rekabet, daha kaliteli ürünü daha kısa sürede daha az maliyetli üretebilme zorunluluğunu beraberinde getirmiştir. Geliştirilen sistemlerdeki daha yüksek performans, daha yüksek kararlılık, daha küçük boyut, daha düşük gürültü ve daha az maliyet gibi özellikler sistem tasarımında gerçekleştirilmesi hedeflenen önemli parametrelerdir. Ayrıca, üretilen ürünlerin insan sağlığına ve çevreye uygun şartlarda üretilmiş olması da oldukça önemli diğer bir husustur. Mühendisler bu gereksinimleri karşılayabilmek amacıyla araştırmalara devam etmektedirler.

Günümüzde elektrik makinaları en basitinden en karmaşığına birçok elektromekanik sistem içerisinde yer almaktadır. Bu sebeple elektrik makinalarının tasarım parametrelerinin en uygun şekilde gerçekleştirilmesi makinanın doğrudan kullanım alanının artması olarak günlük hayata yansımaktadır.

Çeviriciler herhangi bir formdaki enerjiyi diğer bir forma dönüştürmekte kullanılırlar. Elektriksel girişi mekaniksel çıkış şekline veya bunun tersine mekaniksel girişi elektriksel çıkış şekline sürekli olarak çevirmekte kullanılan çeviricilere elektrik makinaları denir. Elektrik makinalarının temel ilkeleri ilk kez Faraday tarafından ortaya konulmuştur. Faraday, manyetik alanla ilgili Oersted'in buluşlarından yararlanarak 1822 yıllarında, içinden akım geçen bir iletkenin manyetik alan tarafından itildiğini

bulmuştur. Bu buluştan yararlanan Barlov, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren ilk makinayı 1824 yılında yapmıştır. Barlov'un yaptığı ve Barlov tekerleği denilen yapı, ilk elektrik makinası olarak bilinmektedir.

Elektrik makinaları tork üretim mekanizmalarına göre genel olarak elektromanyetik ve değişken relüktans olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir[29].

Elektromanyetik olarak tork üretiminin olduğu elektrik makinelerinde, hareket stator ve rotor tarafından oluşturulan iki manyetik alanın etkileşimi ile üretilmektedir. Ortak olarak etkileşimli iki manyetik alan, alanların hizaya gelmesi prensibine göre manyetik tork oluşturmaktadır. Günümüzde ticari olarak kullanılan motorların çoğu bu prensiple çalışmaktadır. DC, indüksiyon ve daimi mıknatıslı motorlar bu motorlara örnek olarak verilebilir.

İkinci kategorideki yani değişken relüktans ile tork üretimi olan makinelerde hareket rotor ve stator arasındaki hava aralığındaki değişken relüktansın sonucu olarak üretilir. Relüktansı manyetik devrede akıya karşı gösterilen zorluk olarak tanımlanabilir. Bu durumda bir stator sargısı enerjilendiğinde, tek bir manyetik alan üreterek rotorun eğilimi ile üretilen relüktans torku rotoru minimum relüktans konumuna hareket ettirecektir. Anahtarlamalı relüktans motorlar (ARM) bu ikinci çalışma prensibi ile tork üreten motorlardır.

2.3. Elektrik Makinalarının Yapısı

Bir elektrik makinası, stator ve rotor diye adlandırılan ve hava aralığı ile birbirinden ayrılan iki önemli bölümden oluşur. Normalde hareket etmeyen stator, makinanın dış kısmını çevreler. Dönebilecek şekilde serbest olan rotor içteki kısımdır.

Stator veya rotor oluklarına yerleştirilen iletkenler bir sargı oluşturacak şekilde içeriden birbirlerine birleştirilirler. İçerisinde gerilim indüklenen sargılar armatür sargıları diye adlandırılır. Akı üretmek için akımın geçtiği sargılar ise alan sargıları diye adlandırılır. Bazı makinalarda bu akıyı sağlamak için daimi mıknatıslar kullanılır.

Döner elektrik makinaları; DC makinalar, endüksiyon makinaları ve senkron makinalar diye üç temel makine olarak adlandırılır. Daimi mıknatıslı makinalar, histerisiz makinalar, step motorlar ve relüktans motorlar ise diğer tip özel makinalardır.

DC makinada alan sargıları statora ve armatür sargıları rotora yerleştirilmiştir. Makinada akı üretmek için alan sargılarından bir DC akım geçirilir. Armatür sargılarında endüklenen gerilim değişkendir. Gerilimin doğrultulması veya akımın yön değiştirmesi komütatör ve fırça sistemi ile gerçekleştirilir.

Senkron makinada rotor alan sargılarını, stator ise armatür sargılarını taşır. Alan sargıları hava aralığında akı üretmek üzere bir DC akımla uyarılır. Rotor döndüğünde stator oluklarına yerleştirilen armatür sargılarında gerilim endüklenir. Armatür akımı hava aralığında rotor hızı ile aynı hızda dönen bir akı meydana getirecektir. Rotor hızı ile akı hızının aynı olması sebebiyle bu makina senkron makina olarak adlandırılır.

Endüksiyon makinasında (asenkron) stator sargıları, hem armatür sargıları hem de alan sargıları olarak iş görürler. Asenkron makinalarda hem stator hem de rotor da alternatif akım vardır. Alternatif akım doğrudan stator sargılarına uygulanır. Rotor sargılarındaki akım ise indüksiyon yolu ile oluşur. İndüksiyon makinası denmesinin sebebi budur. Biraz daha ayrıntılı bakıldığında endüksiyon makinası şöyle çalışır: Stator sargıları bir AC kaynağa bağlandığında hava aralığında bir akı oluşacak ve bu akı, senkron hız diye bilinen sabit bir hız ile hava aralığında dönecektir. Bu dönen akı, rotor sargılarında olduğu gibi stator sargılarında da bir gerilim endükleyecektir. Rotor devresi bir kapalı devre oluşturursa, rotor devresinden bir akım akacak bu akımın dönen akılar ile etkileşmesi sonucu tork oluşacaktır. Sürekli çalışma durumunda rotor hızı senkron hıza çok yakındır. Rotor, stator gibi sargılara sahip olduğu gibi sincap kafes tipi denilen kısa devre iletkenli de olabilir. Sincap kafes tipi sargı alüminyum ya da bakır çubukların rotor gövdesindeki oluklara yerleştirilerek sonları kısa devre edilmek sureti ile elde edilir.

ARM' nin diğer motorlarla karşılaştırılması Tablo 2.1'de verilmiştir[30].

Tablo 2.1. ARM'nin diğer motorlarla karşılaştırılması.

	<i>Asenkron Motor</i>	<i>Senkron Motor</i>	<i>D.A. Motoru</i>	<i>Fırçasız D.A.Motoru</i>	<i>Adım Motoru</i>	<i>A.R. Motor</i>
<i>Besleme Şekli</i>	Alternatif gerilim	Alternatif gerilim	Doğru gerilim	Doğru gerilim	Doğru gerilim	Doğru gerilim
<i>Uyarma Durumu</i>	Uyarma gerekmez	Doğru gerilimle uyarılır.	Doğru gerilimle uyarılır	Uyarma gerekmez	Uyarma gerekmez	Uyarma gerekmez
<i>Konverter</i>	Değişken hız uygul. gerekir	Değişken hız uygul. gerekir	Değişken hız uygul. gerekir	Daima gerekir	Daima gerekir	Daima gerekir
<i>İşletme ve Bakım Masraf</i>	Yok denebilir	Kısmen bakım gerekir	Bakım gerekir	Yok denebilir	Yok denebilir	Yok denebilir
<i>Motor Maliyeti</i>	Ucuz	Pahalı	Pahalı	Orta	Orta	Ucuz
<i>Konverter Maliyeti</i>	Pahalı	Pahalı	Orta	Orta	Orta	Orta
<i>Verim</i>	iyi	iyi	Orta	Orta	Orta	iyi
<i>Çalışma Ortamı</i>	Her ortamda çalışır	Her ortamda çalışır	Patlayıcı Ortamlarda Kullanılmaz	Her ortamda çalışır	Her ortamda çalışır	Her ortamda çalışır
<i>Stabilite</i>	iyi	iyi	iyi	iyi	iyi	iyi

2.4. Anahtarlamalı Relüktans Motor

ARM, çıkıntılı kutuplu olarak farklı rotor ve stator kombinasyonlarında tasarlanan, basit bir geometrik yapıya sahip olan, rotor pozisyon bilgisi ve sürücü devresi kullanımını gerektiren bir motordur.

İlk ARM, senkron motor yapısı üzerinde değişiklikler yapılarak tasarlanmıştır. Yine ilk ARM'ler indüksiyon motorlarından daha ağır ve daha geniş boyutlarda idiler. Daha sonraki yıllarda bu motorlar üzerinde yapılan çalışmalar ile hacimleri küçültülmüş ve dolayısıyla hafifletilmişlerdir. Günümüzde ARM'ler, üzerinde en çok çalışma yapılan

elektrik makinelerinin başında gelmektedir. Bunun en önemli sebebi ise diğer motorlara nazaran önemli avantajlara sahip olmalarıdır.

ARM'lerin sahip oldukları avantajlardan önemli olanları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Rotorlarında herhangi bir sargı ya da mıknatıs bulunmaması sebebiyle maliyetlerinin düşük olması,
- Statorlarında yer alan sargıların basit yapıda olması,
- Rotorun sargısız ve fırçasız yapıya sahip olması sebebiyle motorun çok yüksek hızlarda işletilebilmesi,
- Stator sargılarının yarı iletken anahtarlama elemanlarına seri bağlı olması sebebiyle anahtarlama anlarında anahtarlama elemanlarında problem meydana gelme olasılığının düşük olması,
- Motora ait stator fazlarının birbirinden bağımsız çalışabilmelerinden dolayı herhangi bir fazın arızalanması durumunda bile motorun çalışmasını sürdürebilmesi ve dolayısıyla da hata toleranslarının yüksek olması.

Birçok avantaja sahip olmalarına rağmen, ARM'ler yakın zamana kadar çok fazla kullanım alanı bulamamışlardır. Bunun en önemli nedenleri arasında; rotor konumunun bilinmesinin gerekliliği ve dolayısıyla bir pozisyon sensörüne gereksinim duyulması, torkta meydana gelen ani çökmeler ve dolayısıyla oluşan tork dalgalılığı ile akustik gürültü gösterilebilir.

2.4.1. Anahtarlama Relüktans Motorun Yapısı

Anahtarlama relüktans motorlar, hem stator hem de rotorlarında çıkıntılar bulunduklarından çift çıkıntılı bir yapıya sahiptir. Bu sebeple çıkıklı ya da çift çıkıklı motorlar olarak bilinmektedirler. Gerçekte bir çeşit senkron motor olan ARM'lerin rotorlarında herhangi bir mıknatıs, sargı yada kısa devre halkası bulunmayıp sadece masif demir veya saç paketi içermektedir [6]. Stator da ise DC motorların sargılarına benzer şekilde basit yapılı ve ince telli sarımlardan oluşan yoğun sargılar bulunmaktadır. Bunun nedeni faz uyarıldığında ortaya çıkan manyetik akıdan daha çok faydalanmaktır.

Adım motorundakine benzer şekilde ARM'lerde de karşılıklı iki stator kutbu bir faz oluşturmaktadır. Stator ve rotor nüvelerinin her biri, demir kayıplarını azaltmak açısından ince yaprak halinde lamine saçlardan imal edilmektedir. Genelde stator ve rotor kutup sayılarına göre isimlendirilen ARM'lerde, yüksek hız gerektiren uygulamalarda rotor kutup sayısı stator kutup sayısına göre küçük seçilirken, yüksek tork gerektiren uygulamalarda ise rotor kutup sayısı stator kutup sayısına oldukça yakın seçilmektedir.

ARM'lerde genellikle stator kutupları rotor kutuplarına göre daha dar tutulmaktadır. Bunun nedeni, statordaki herhangi bir faz uyarıldığında oluşan manyetik alandan daha fazla yararlanabilmek için sargılara daha geniş yer sağlamaktır [31].

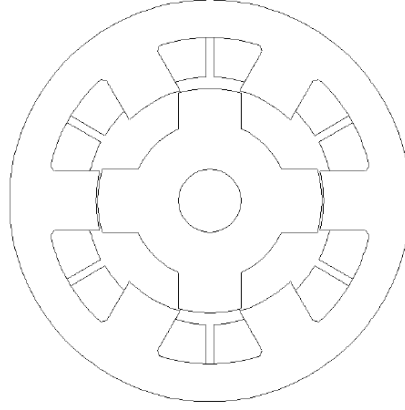
Stator ve rotor kutup genişliklerinin seçimi tahrik sisteminin özelliklerine bağlıdır. Ancak bunun yanında negatif moment üretiminden kurtulmak ve her fazın pozitif ve negatif moment üretme bölgelerini ayırabilmek için rotor kutuplarının genişliği, stator kutuplarının genişliğinden daha büyük seçilmektedir.

Rotor ve stator çıkık kutup sayıları çift sayıda olmak üzere sayıca birbirinden az, fazla ya da birbirine eşit olabilir. Çoğunlukla stator çıkık kutup sayısı rotor çıkık kutup sayısından daha fazladır. Stator ve rotor çıkık kutup sayıları ya da ARM'nin tipi stator kutup sayısı/ rotor kutup sayısı şeklinde ifade edilmektedir. Örneğin; 8/6, 8 stator çıkık kutbuna, 6 rotor çıkık kutbuna sahip bir ARM'yi temsil etmektedir. Şekil 2.1' de 6/4 yapıdaki bir ARM'ye ait kesit görülmektedir.

Karşılıklı olarak birbirine seri şekilde bağlantısı yapılmış olan 2 stator kutup sargısı ARM'nin bir fazını oluşturmaktadır. ARM'lerin tek fazlı olarak 2/2, 4/4, 6/6, 8/8; çift fazlı olarak 4/2, 8/4, 4/6, 8/6; üç fazlı olarak 6/4, 6/8, 12/8, 18/12, 24/16, dört fazlı olarak 8/6, 16/12 gibi birçok değişik dizilimleri oluşturulabilir. Bu dizilimler arasında 3 fazlı 6/4, 4 fazlı 8/6 en çok bilinen ve kullanılan dizilimler iken 3 fazlı 12/8 dizilimi de 6/4 ve 8/6 dizilimlerine göre daha az olmakla birlikte kullanılmaktadır.

Senkron motorlarda rotor ve hava aralığı hızı aynı olmasından dolayı kalkınma problemi vardır. ARM'de ise rotor ve stator yapısı çıkıklardan müteşekkildir. Rotor ve stator çıkık sayısı birbirinden farklıdır. Bu sebeple senkron motorlarda olduğu gibi

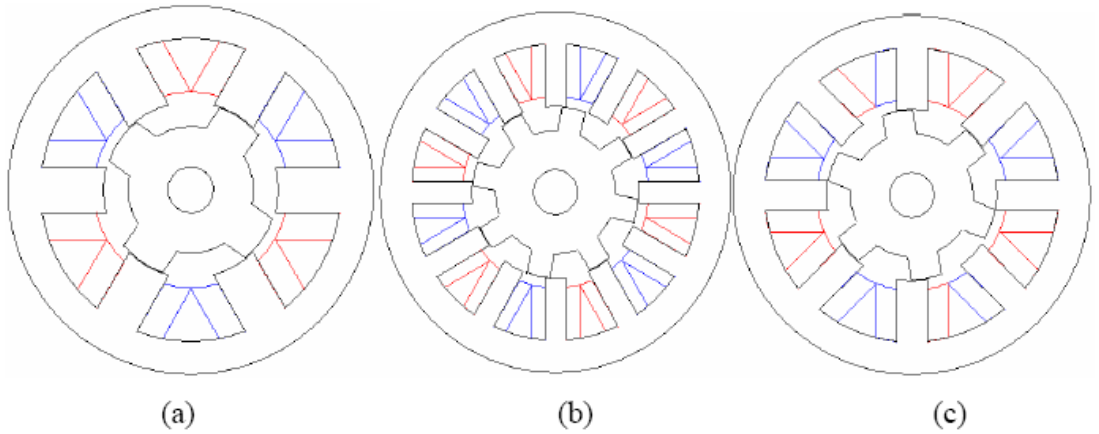
kalkınma problemi yaşanmaz. Kalkınma probleminin olmaması yönüyle bu motorlar asenkron motorlara benzerler.



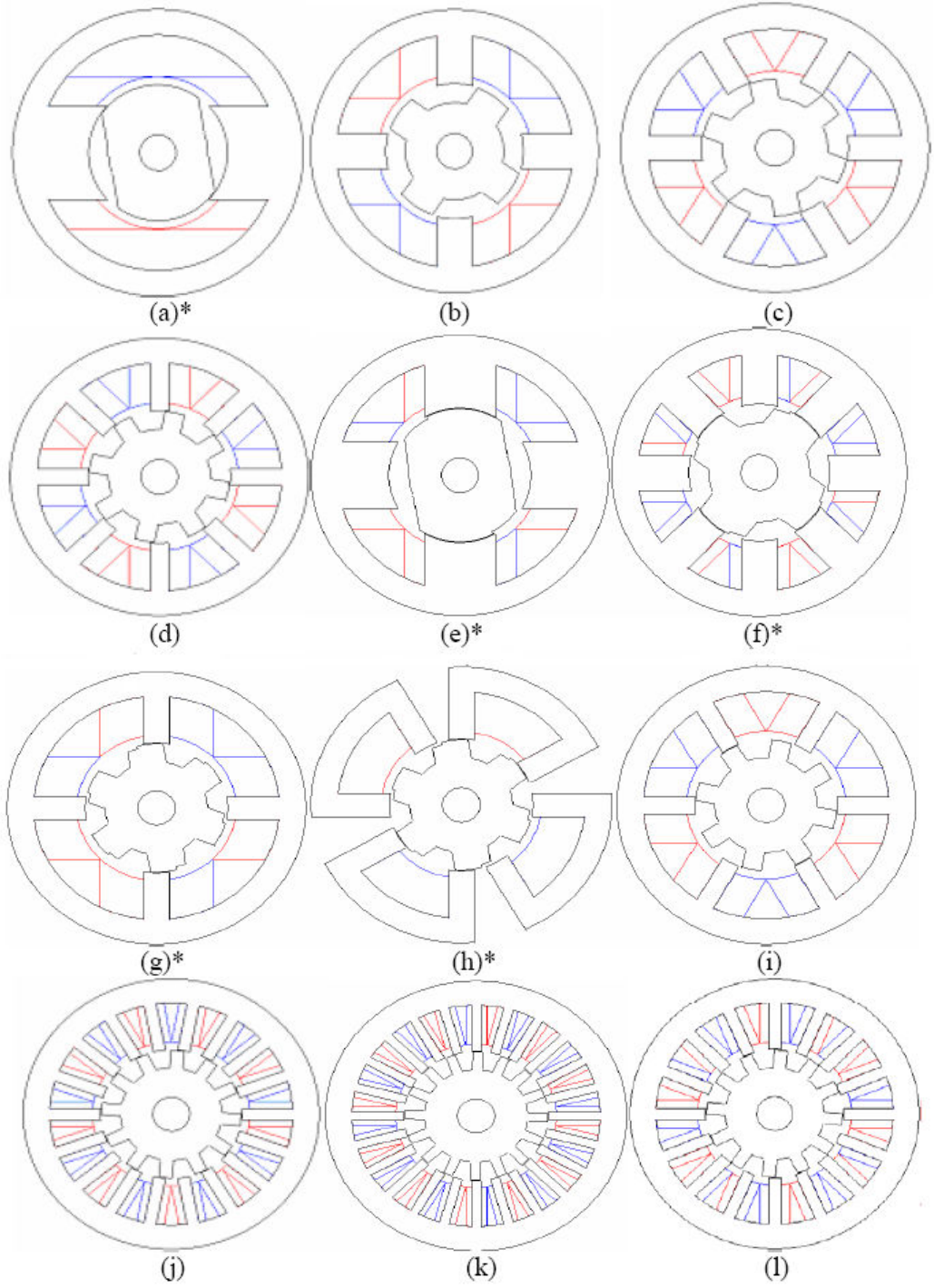
Şekil 2.1. 6/4 ARM kesiti.

Şekil 2.2’de ise en çok bilinen ve kullanılan dizilimlere sahip ARM’ler, Şekil 2.3’de ise çeşitli dizilimlere sahip ARM’ler görülmektedir.

ARM’nin bu farklı dizilimleri arasından tek fazlı 2/2, iki fazlı 4/2, 8/4, 4/6, 8/6 (Şekil 2.3. a, e, f, g ve h) dizilim yapısına sahip olanlar yapıları teorikte düşünülebilir olmasına karşın yeterli kalkınma torkunu en iyi konumda dahi üretmek mümkün olmadığından pratikte hiçbir anlam ifade etmemektedir.



Şekil 2.2. En çok bilinen ve kullanılan ARM dizilimleri.
(a) Üç faz 6/4, (b) Üç faz 12/8, (c) Dört faz 8/6.



Şekil 2.3. Farklı dizilimlere sahip ARM'ler.

(a) Tek faz 2/2,

(b) Tek faz 4/4,

(c) Tek faz 6/6,

(d) Tek faz 8/8,

(e) İki faz 4/2,

(f) İki faz 8/4,

(g) İki faz 4/6,

(h) İki faz 8/6,

(i) Üç faz 6/8,

(j) Üç faz 18/12,

(k) Üç faz 24/16,

(l) Dört faz 16/12.

(* Kalkınma torkunun üretilmediği ARM dizilimleri)

ARM'nin indüksiyon motorundan en önemli farkı ise uygulanan gerilimin yapısı itibarı ile. İndüksiyon motorlarında hem rotor hem de statorda alternatif akım varken ARM'lerde yalnızca stator sargılarına, sırasıyla akım darbe şeklinde verilir. Çalışma prensibi temel olarak stator sargılarına akım uygulayarak hava aralığında oluşan relüktansın değiştirilmesi aracılığı ile rotorun hareketinin sağlanması ve tork elde edilmesi şeklindedir. ARM'lerde rotor hiçbir iletken, sargı vs. içermez ve çok sade bir yapıdadır.

ARM'lerin diğer elektrik makinalarından en önemli fark ve avantajı, rotorunun mıknatıssız ve fırçasız olması ve hiçbir şekilde sargıya sahip olmamasıdır. Rotor kalkınma problemini önlemek, akı değişiminin fazlalığının önüne geçmek ve gürültüyü azaltmak amaçlarıyla hafif eğik şekilde imal edilmektedirler.

ARM'lerin döndürme momenti akımın yönüne değil sadece genliğine bağlıdır. Dolayısıyla motorun sürücü devresinde kullanılacak yarı iletken sayısı diğer sürücülere nazaran daha azdır. Bunun yanında tork değeri indüktansın değişimine bağlı olduğundan, eğer akım indüktansın artma yönünde uygulanırsa döndürme momenti pozitif olurken, akımın indüktansı azaltma yönünde olması durumunda ise negatif olacaktır.

Akım darbelerinin, indüktans değişiminin hangi bölgelerinde uygulanacağını tespit edilmesi ve bu bölgelere ait rotor konumunun bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle ilgili rotor pozisyonu bilgisinin elde edilebilmesi için optik ya da alan etkili sensörlerin kullanımı gerekmektedir.

Pozisyon sensörlerinin görevi motorun konumunu doğru olarak algılama ve bu bilgiyi mikrodenetleyiciye ulaştırmaktır. Motor pozisyonun doğru bir şekilde algılanması performans açısından çok önemlidir[29].

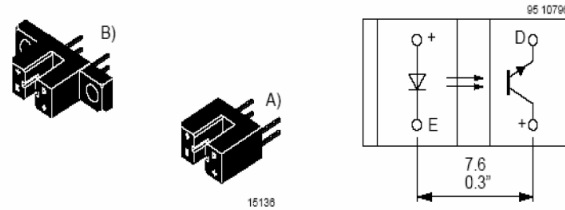
Bu uygulamada kullanılan ve Arçelik A.Ş. AR-GE laboratuvarlarında üretilmiş olan 6/4'lük ARM için kullanılan motor pozisyon sensörü yerleşimi Şekil 2.4'de görüldüğü gibidir. Birinci fazın statorları ile aynı hizada yerleştirilen ilk sensörden sonra diğer sensörler 30'ar derece ara ile yerleştirilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi birinci faz stator sargıları ile tam doğrultulu pozisyona geldiği anda motorun ileri yönde hareket

ettiği düşünülecek olursa B sensörü 7.5 derece geçilmiş olacaktır. Geri yönde ise aynı şekilde A sensörü 7.5 derece geçilmiş olacaktır.

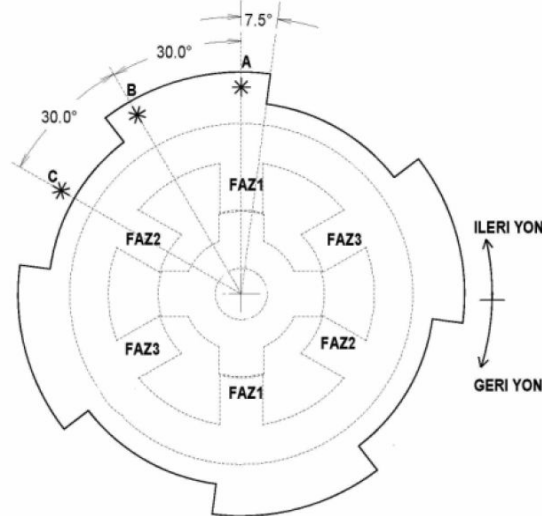
Bunun sebebi fazlar tam doğrultulu pozisyona gelmeden 7.5 derece önce durumun algılanması ve tork üretiminde ölü bölgeye gelmeden önce, ilgili fazın enerjisi kesilerek, diğer faza geçmek ve motordan azami verimi alabilmektir.

4 adet elektriksel terminali bulunan bu sensörün bir tarafında IR led diğer tarafında ise IR foto transistör bulunmaktadır. Sensör arasında herhangi bir fiziksel engel olmadığı müddetçe transistör iletimdedir. Aksi durumda kesime gidecektir.

Motor milinin arka kısmına yerleştirilmiş ve disk şeklindeki 45'er derecelik 4 adet çıkıntısı bulunan metal Şekil 2.4.b'de koyu çizgilerle belirtilmiştir. Bu disk motor gövdesine 3 adet pozisyon sensörünün tam ortasından geçecek şekilde, motor miline, rotorla birlikte dönebilecek şekilde sabitlenmiştir.

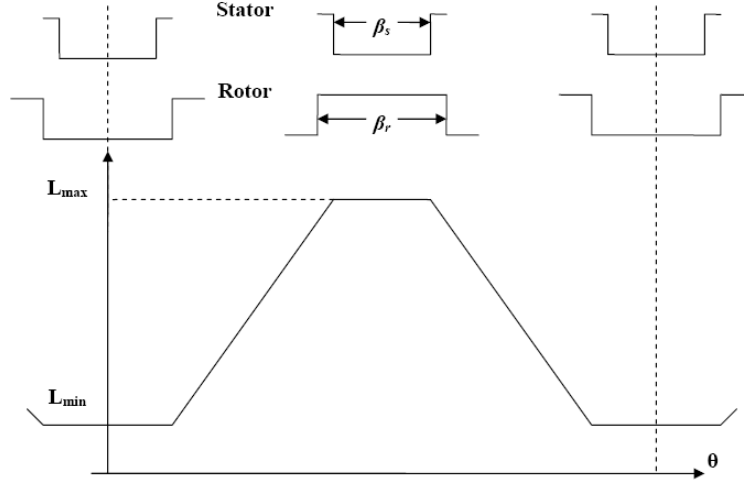


Şekil 2.4.a. Motor pozisyon sensörleri.

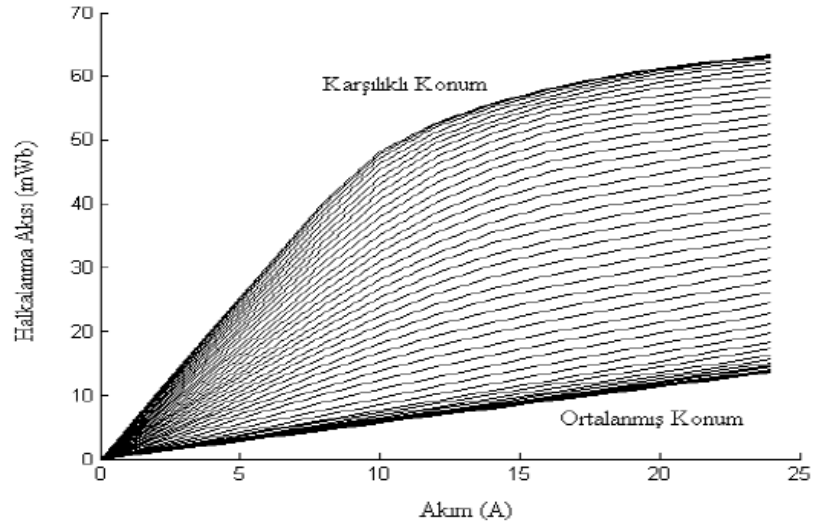


Şekil 2.4.b. Motor pozisyon sensörünün yerleşimi.

Şekil 2.5'te doğrusal çalışma için rotorun statora göre olan konumuna göre indüktans değişimi, Şekil 2.6'da ise motora ait akım ve halkalanma akıları arasındaki doğrusal olmayan ilişki gösterilmiştir.



Şekil 2.5. ARM' de doğrusal çalışma için rotor konumuna göre indüktans değişimi.



Şekil 2.6. Akım ve halkalanma akısı arasındaki doğrusal olmayan ilişki.

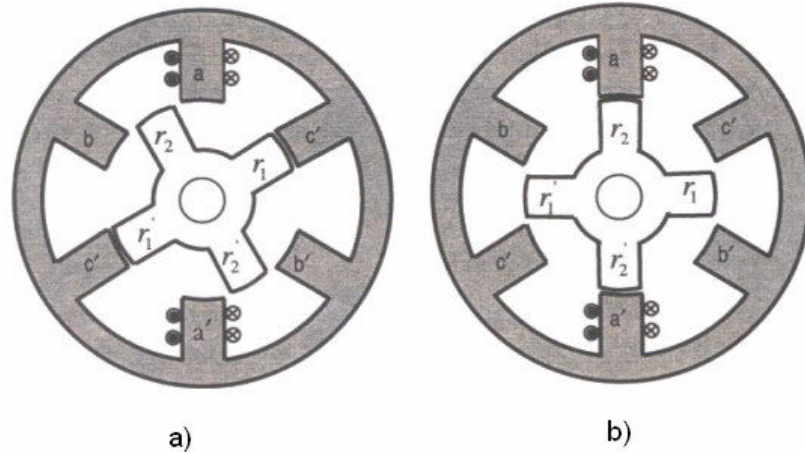
Şekil 2.5'te verilen indüktans değişimi doyumsuz durum içindir. Normal çalışmada ise motorun doğrusal olmayan yapısından dolayı doğrusal olmayan bir indüktans değişimi gözlenecektir.

2.4.2. Anahtarlamalı Relüktans Motorun Çalışması

Bir relüktans makina, uyarılmış sargı indüktansının maksimum olduğu noktadaki konuma hareketli parçanın hareket eğilimi ile torkun üretildiği bir makinadır. Bu tanım, hem anahtarlamalı hem de senkron relüktans makinaları kapsar.

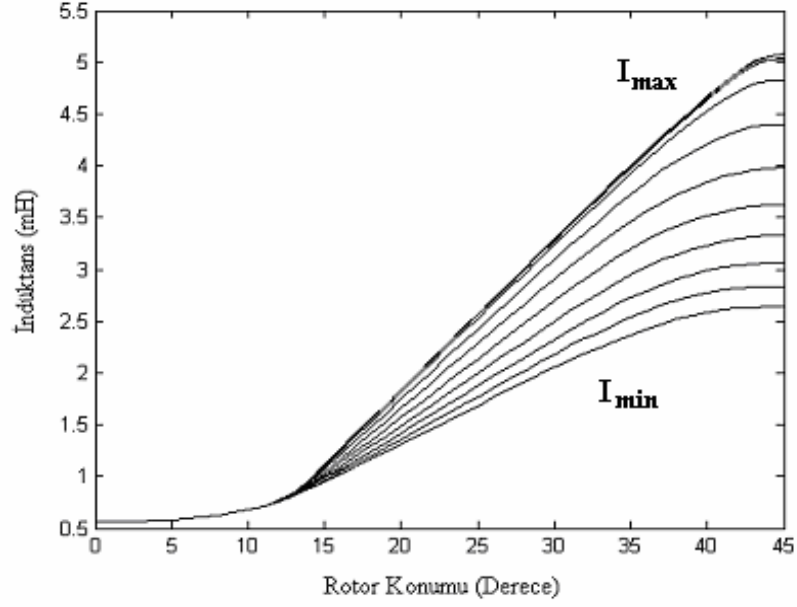
Anahtarlama, ARM'ye ismini vermektedir. Bu tip motor elektronik sürücüsü ya da kontrol edicisi olmaksızın çalışmaz. ARM'lerin döndürme momenti akımın yönüne değil sadece genliğine bağlıdır. Dolayısıyla motorun kontrol devresinde kullanılacak yarı iletken sayısı yarıya indirilebilir.

Motorun çalışmasının daha net anlaşılabilmesi relüktans ve indüktans ve buna bağlı olarak tork üretiminin anlaşılabilmesine bağlıdır. Şekil 2.7.a'daki motorda r_1 ve r_1' rotor kutupları ile c ve c' stator kutuplarının aynı eksende olduğunu (örtüşen pozisyonda olduğunu) kabul edelim. Şekil 2.7.a'da gösterilen yönde a-fazına bir akım uygulanırsa, a ve a' stator kutupları ile r_2 ve r_2' rotor kutupları içinde bir akı üretilir. Bu akı, r_2 ve r_2' rotor kutuplarını a ve a' stator kutuplarına doğru çekmeye çalışır. Kutuplar aynı eksene geldiklerinde, a-fazının akımı kesilir ve bunun sonucunda oluşan durum Şekil 2.7.b'de gösterilmiştir. Şimdi statorun b-sargısı uyarılır, r_1 ve r_1' ; c-fazının enerjilenmesi sonucu r_2 ve r_2' kutupları c ve c' kutupları ile aynı eksene gelir. Bu anahtarlama sırasına göre 90° hareket ettirmek için abc sırasına göre üç fazın enerjilenmesi gerekir. Rotorun bir devirlik hareketi, her fazın akımlarının rotor kutupları sayısı kadar anahtarlama ile üretilir. Akımların a, b, c sırasında anahtarlama rotor dönüş yönünün ters çevrilmesini sağlar. Bu durum Şekil 2.7 (a) ve (b) yardımıyla görülebilir [32].

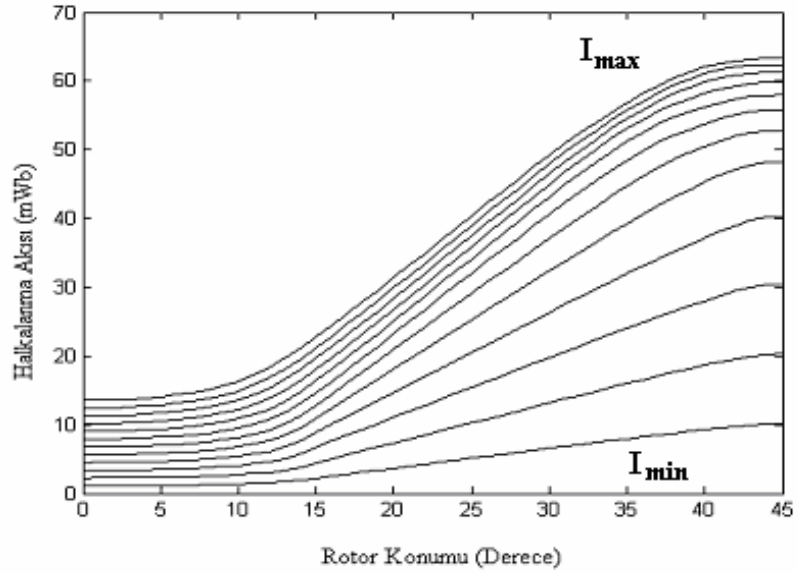


Şekil 2.7. ARM'nin çalışması, (a) c fazı örtüşen pozisyonda, (b) a fazı örtüşen pozisyonda

Şekil 2.8 ve 2.9’da çeşitli rotor konumlarında değişik akım değerlerinde elde edilen indüktans ve halkalanma akısı değerlerinin değişimi verilmiştir.

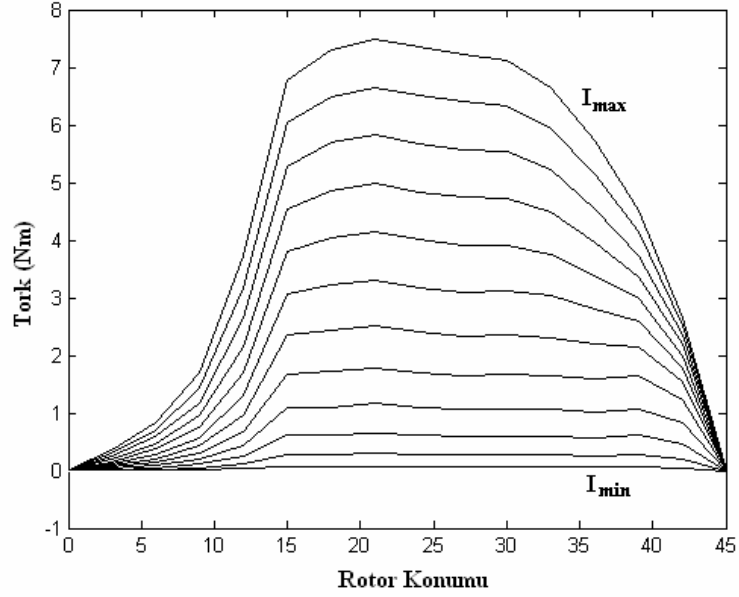


Şekil 2.8. Çeşitli akım değerlerinde rotor konumuna göre elde edilen indüktans değişimi.



Şekil 2.9. Çeşitli akım değerlerinde rotor konumuna göre elde edilen halka akılarının değişimi.

Motor tarafından üretilen tork değeri o andaki akım değerine ve indüktans değişimine bağlı olduğundan tork değişimi de Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Çeşitli akım değerlerinde rotor konumuna göre elde edilen tork değişimi.

2.4.3. Değişken Relüktans

Relüktans, elektrik devresindeki rezistansın manyetik devredeki karşılığı şeklinde düşünülebilir. Bir manyetik devrede relüktans, rotor ve stator arasındaki hava aralığının manyetik direncidir. Elektrik devresinde rezistans elektrik akımına karşı zorluk gösterirken, manyetik devredeki relüktans manyetik akının dolaşımına zorluk gösterir. Ancak relüktans manyetik devre içerisinde sürekli değişkendir ve her noktada aynı değerde değildir.

ARM'lerde rotor konumuna göre halkalanma akılarının izlediği yol değişmekte ve bu da manyetik devredeki relüktansın değişimine neden olmaktadır. Herhangi bir manyetik devrenin relüktans ifadesi Eşitlik 2.1 ile verilebilir.

$$\mathfrak{X} = \frac{F}{\phi} = \frac{Hl}{BS} = \frac{l}{\mu S} \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1 ifadesinde yer alan \mathfrak{R} gösterimi relüktansı, F magneto motor kuvvetini, ϕ akıyı, H hava aralığındaki manyetik alan şiddetini, l manyetik yolun uzunluğunu, B akı yoğunluğunu, S manyetik yolun kesit alanını ve μ ise manyetik malzemenin manyetik geçirgenliğini ifade etmektedir.

ARM'de özellikle l , μ ve S parametreleri rotorun açısal değişimi ile birlikte manyetik devre relüktansının değişimine neden olmaktadır. Öyle ki stator ve rotor kutupları karşılıklı pozisyona gelmeden önceki ortalanmış pozisyonda manyetik geçirgenlik değeri μ , boş uzayın geçirgenliği olan μ_0 değerine eşittir ve bu değer de malzemenin geçirgenliği ile karşılaştırıldığında çok küçük bir değerdedir. Dolayısıyla ortalanmış konumda relüktans değeri maksimum değerini almaktadır. Ancak rotor ve stator kutuplarının karşılıklı pozisyon konumuna yaklaşmaları durumunda artan örtüşüm alanıyla birlikte geçirgenlik değeri de hızlı bir şekilde artacak ve dolayısıyla da relüktans değeri azalacaktır. Rotor ve stator kutupları tamamen karşılıklı konuma geldiklerinde ise örtüşüm alanı maksimum olacak ve dolayısıyla da manyetik geçirgenlik maksimum değerine ulaşacaktır. Bir başka deyişle manyetik devrenin relüktansı minimum değerini alacaktır [33].

Ortalanmış konumda relüktans değerinin maksimum olması nedeniyle akı doyuma ulaşmayacak ve ortalanmış konumdan karşılıklı konuma geçiş sırasında azalan relüktans değeri ile birlikte doyuma geçmeye başlayacak ve karşılıklı konumda en yüksek doyuma ulaşacaktır.

Genellikle ARM'lerde relüktans yerine daha çok kullanılan kriter indüktans değeri olup bu iki değer arasındaki ilişki Eşitlik 2.2' deki gibi ifade edilebilir.

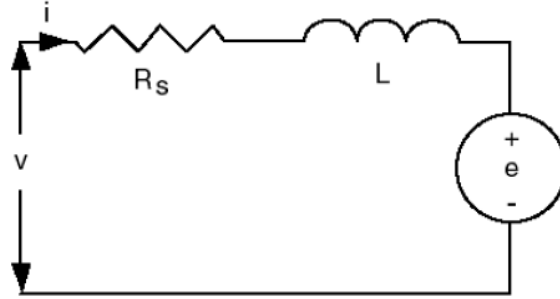
$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N\phi}{i} = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.2' de λ ifadesi halkalanma akısı değerini, i ifadesi faz akımını ve N ifadesi ise faza ilişkin sarım sayısını göstermektedir.

2.4.4. Eşdeğer Devre

ARM'lerin çalışma prensibi relüktans kuvvetine dayanmakta ve serbest hareketli, çıkık yapılı rotorun, bulunduğu manyetik devre içerisindeki akının, en kolay yol bulabileceği en küçük relüktans konumuna kadar kuvvet uygulanarak çekilmesi şeklinde gerçekleşmektedir. Şekil 2.11'de ARM'nin tek fazına ait eşdeğer devre gösterilmiştir.

Şekil 2.11'de verilen devrede R_s , her bir faz için stator sargılarına ait direnci ve L indüktans değerini temsil etmektedir.



Şekil 2.11. ARM'nin tek fazına ait elektriksel eşdeğer devre.

Burada her bir faza uygulanmakta olan gerilim değeri Eşitlik 2.3'deki gibi verilebilir.

$$v = R_s i + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (2.3)$$

ve

$$\lambda = L(\theta, i) i \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilebilir. Giriş gücü ise Eşitlik 2.5' de verildiği gibi ifade edilebilir.

$$p_I = vi = R_s i^2 + i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} + L(\theta, i) i \frac{di}{dt} \quad (2.5)$$

Burada,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) = L(\theta, i) i \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2.6)$$

eşitliği yazılabilir ve dolayısıyla da giriş gücü,

$$p_i = R_s i^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2.7)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Eşitlik 2.7' den de açıkça görüleceği üzere giriş gücü, $R_s i^2$ ifadesi ile verilen sargı kayıp gücü, $\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right)$ ifadesi ile verilen alan enerjisinin değişim oranı ve $\frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt}$ ifadesi ile verilen hava aralığı gücünün toplamından oluşmaktadır.

Hava aralığı gücü için zaman ifadesinde rotor pozisyonu ve hız terimleri yerine konulacak olursa,

$$t = \frac{\theta}{\omega_m} \quad (2.8)$$

ve dolayısıyla da,

$$p_{ag} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (2.9)$$

$$p_{ag} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_m$$

ifadesi elde edilir.

Hava aralığı gücü elektromanyetik tork ve hıza bağlı olarak,

$$p_{ag} = T \omega_m \quad (2.10)$$

olduğundan motora ait tork,

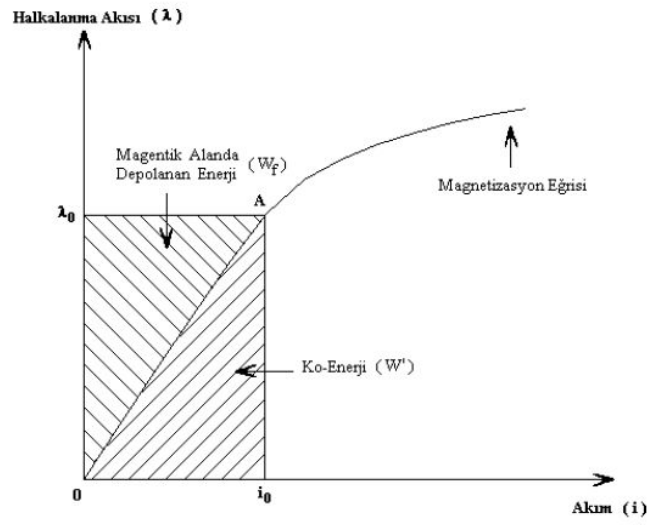
$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (2.11)$$

şeklinde elde edilir [1].

2.4.5. Enerji Dönüşümü

ARM'lerin normal çalışmaları esnasında relüktansın rotor konumu ve doyum sebebi ile değişiminden dolayı statora ait faz sargıları tarafından üretilen manyetik alanın basit bir matematiksel eşitliği yoktur [34].

Şekil 2.12'de karşılıklı ve ortalanmış konum arasındaki herhangi bir rotor açısında kilitlenmiş olan ARM' ye ait manyetizasyon eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Manyetizasyon eğrisi ve enerji ilişkisi.

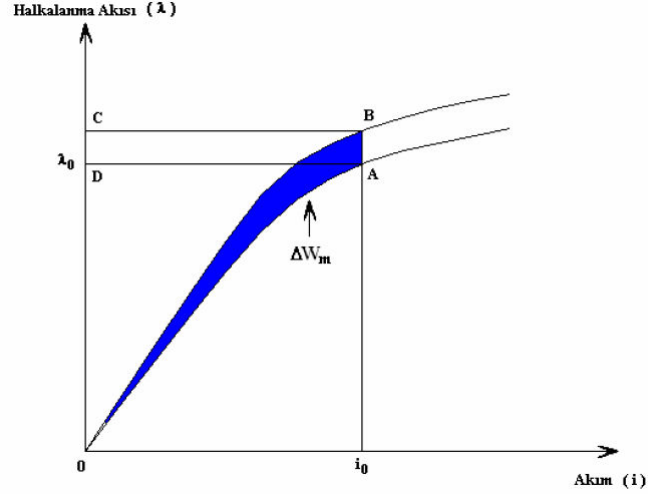
Şekil 2.12'den de açıkça görüleceği üzere manyetizasyon eğrisi üzerindeki herhangi bir A noktası için depolanan manyetik alan enerji ve ko-enerji ifadeleri sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir[34]:

$$W_f = \int_0^{\lambda_0} i d\lambda(\theta, i) \quad (2.12)$$

$$W' = \int_0^{\lambda_0} \lambda(\theta, i) di \quad (2.13)$$

Burada halkalanma akısı, rotor pozisyonu ve akıma bağlı bir değişken olup alan enerjisi, hava aralığı ile stator ve rotor malzemesinde depolanan manyetik enerjiyi ifade etmektedir.

Bakır ve çekirdek kayıpları ihmal edilecek olursa, enerjinin korunumu prensibi sebebiyle rotorun $\Delta\theta$ kadarlık konum değişimi esnasında alan enerjisinde meydana gelen değişim Şekil 2.13'den de görüleceği üzere $m \Delta W_m$ mekanik işine eşit olacaktır.



Şekil 2.13. Alan enerjisi, ko-enerji ve mekanik iş.

Dolayısıyla,

$$\Delta W_m = \Delta W' = \int_0^{i_0} \lambda(\theta_B, i) di - \int_0^{i_0} \lambda(\theta_A, i) di \quad (2.14)$$

eşitliği elde edilmiş olur. Mekanik iş;

$$\Delta W_m = T \Delta \theta \quad (2.15)$$

eşitliği ile verilebileceğinden, Eşitlik 2.15' den ani tork ifadesi çekilecek olursa;

$$T = \frac{\Delta W_m}{\Delta \theta} = \frac{\int_0^{i_0} \lambda(\theta_B, i) di - \int_0^{i_0} \lambda(\theta_A, i) di}{\Delta \theta} \quad (2.16)$$

ifadesi elde edilir. Herhangi bir i akımı için $\Delta\theta \rightarrow 0$ ile limit alınacak olursa ARM' ye ait anlık tork;

$$T = \frac{\partial}{\partial \theta} \int_0^i \lambda(\theta, i') di' \quad (2.17)$$

ifadesi ile tanımlanabilir. Doğrusal akı modeli için $\lambda(\theta, i) = L(\theta)i$ yazılabileceğinden;

$$T = \int_0^i \frac{\partial \lambda(\theta, i')}{\partial \theta} di' = \int_0^i \frac{dL}{d\theta} i' di' = \frac{dL}{d\theta} \int_0^i i' di' = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (2.18)$$

eşitliği elde edilir ki bu ifade Eşitlik 2.11 ifadesine eşittir. Daha önce de sözü edildiği gibi Eşitlik 2.11 ve Eşitlik 2.18, ARM' ye ait torkun faz akımının yönünden bağımsız ancak rotor konumuna göre motora ait indüktans $\left(\frac{dL}{d\theta}\right)$ değişiminin yönüne bağımlı olduğunu ortaya koymaktadır.

2.4.6. Tork

Anahtarlamalı relüktans motorda tork, üç değişkene bağlı olarak değişir. Bunlar indüktans, stator sargı akımı ve rotorun açısal konumudur.

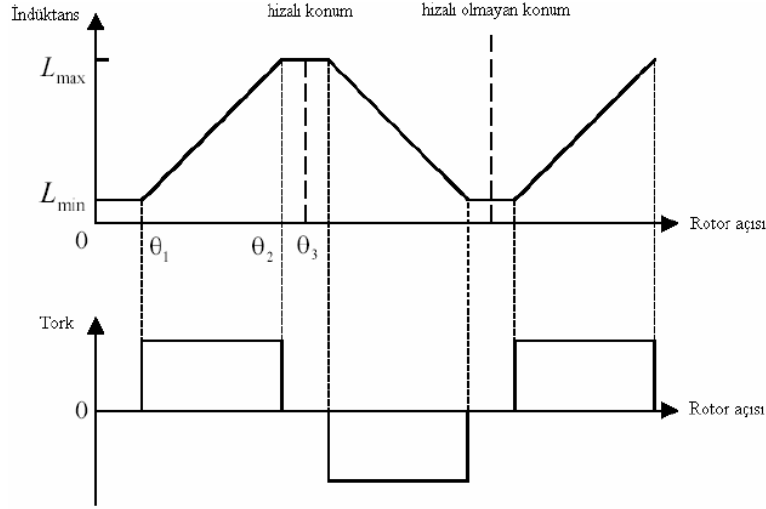
Eğer verilen bir akım değeri için değişen rotor konumuyla birlikte indüktans lineer olarak değişiyorsa, hem ARM'nin bir fazına ait eş değer devresinden hem de enerji dönüşümü ilkesinden elde edilen tork ifadesi, Eşitlik 2.11 ve Eşitlik 2.18 de belirtildiği gibi;

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (2.19)$$

şeklindedir. Burada θ , rotor konumunu belirtmektedir.

Buradan torkun akımın karesi ile doğru orantılı olduğu ve üretiminin indüktans değişimine bağlı olduğu görülmektedir.

Şekil 2.14'te torkun stator sargı akımı sabit iken indüktans ve rotor konumu ile değişimi verilmektedir.



Şekil 2.14. Sabit stator sargı akımında torkun indüktans ile değişimi.

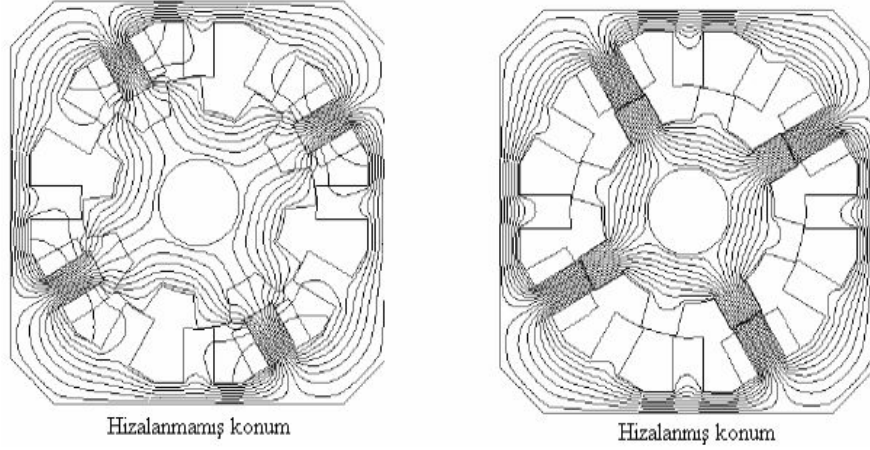
Şekil 2.14'te indüktans değişimi ideal olarak alınmıştır. Bu sebeple tork lineer indüktansla lineer olarak değişim göstermektedir. Ancak pratikte, ARM'lerin indüktans değişimi lineer değildir ve bunun sonucu olarak tork titreşimli olarak elde edilir.

Tork titreşimini en aza indirmek için indüktansın rotor açısı ile olan değişiminin ($dL/d\theta$) olabildiğince düzgün olması istenir. Bu amaçla rotor dişlerinde değişiklikler yapılarak indüktans değişimi olabildiğince lineer hale getirilmeye çalışılmaktadır.

Tork değeri indüktansın değişimine bağlı olduğundan, eğer akım indüktansın artma yönünde uygulanırsa döndürme momenti pozitif olurken, akımın indüktansı azaltma yönünde olması durumunda ise negatif olacaktır. Dolayısıyla akım darbelerinin, indüktans değişiminin hangi bölgelerinde uygulanacağını tespit edilmesi ve dolayısıyla da bu bölgelere ait rotor konumunun bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle ilgili rotor pozisyonu bilgisinin elde edilebilmesi için optik ya da alan etkili sensörlerin kullanımı gerekmektedir.

Anahtarlamalı relüktans motorda rotor yüksek relüktans noktasından düşük relüktans noktasına hareket etmektedir. Relüktansın en düşük olduğu bölge stator ve rotor kutuplarının tam olarak karşı karşıya geldiği hizalanmış konumdur. Relüktansın bu en düşük olduğu durumda indüktans da, relüktans ile ters orantılı olarak en yüksek değerine ulaşacaktır.

Şekil 2.15'te gösterildiği gibi tam hizalı konumda elektromanyetik alan çizgileri tam olarak karşı karşıyadır ve dolayısıyla indüktans da bu hizalı konum boyunca maksimum değerinde sabit kalır. Şekil 2.14'deki tork grafiğinden de anlaşılacağı gibi indüktans da değişimin olmamasına bağlı olarak, hizalanmış konumda herhangi bir tork üretilmez.



Şekil 2.15. ARM'nin elektromanyetik alan dağılımı.

Eşitlik 2.11 ve Eşitlik 2.18 'den şu sonuçlar çıkarılabilir:

- Tork, akımın karesi ile orantılıdır, bundan dolayı doğrusal olmayan torku üretmek amacı ile akım da farklı şekillerde uygulanabilir. Bu durum AC makineler için çok ters bir durumdur. Faz sargısı içerisindeki akımın değişik şekiller alabilmesi, ARM kontrol devrelerinin çeşitliliğini artırırken sürücü devrelerdeki güç anahtarlarının sayısını azaltabilir ve sürücüyü daha ekonomik hale getirir.
- Tork sabiti, indüktansın rotor konumu ile değişimi karakteristiği eğrisinin eğimi ile verilir. Buradan stator sargısının indüktansının hem rotor konumunun hem de akımın fonksiyonu olduğu görülmektedir. İndüktansın değişimi motorun çıkıklı yapısından dolayı lineer değildir. Motorun lineer olmayan bu yapısından dolayı, bu motor için basit bir eşdeğer devre geliştirmek mümkün değildir.
- Torkun akımın karesi ile doğru orantılı olmasından dolayı, motor DC motorlara benzer. Dolayısıyla, iyi bir başlangıç torkuna sahiptir.
- İndüktans eğrisinin negatif kısmında akımın değişimi ile negatif tork üretimi mümkündür. (Şekil 2.14)

- Dönme yönü basit bir işleme stator tetikleme kısmı değiştirilerek ters çevrilebilir.
- 1, 4 ve 5 özelliklerinden dolayı bu makine sürücülerle birlikte dört bölge de çalışmak için uygundur.
- Tork ve hız kontrolü sürücü kontrolü ile yapılabilmektedir.
- Makine, çalışması için kontrol devrelerine ihtiyaç duymaktadır. Dolayısıyla, sabit hızlı uygulamalarda motor sürücü indüksiyon ve senkron motorlara kıyasla pahalıdır.
- Çalışması için sürücü devreye bağımlı olmasından dolayı, motorun sürücüsü kendi yapısından gelen, değişken hızlı sürücü sistemine sahiptir.
- ARM'de makine faz sarımları arasında çok küçük bir ortak indüktans vardır ve neredeyse tüm pratik uygulamalarda bu etki ihmal edilmektedir. Ortak kuplaj olmamasından dolayı, her bir faz diğer fazlardan elektriksel olarak bağımsızdır. Bu özellik sadece anahtarlamalı relüktans motorlara has bir özelliktir. Bu özellik sayesinde herhangi bir fazdaki kısa devre hatasından diğer fazlar etkilenmez.

Bir fazda oluşabilecek hatalardan diğer fazların etkilenmemesi özelliği özellikle havacılık uygulamaları, soğutucu pompaları, elektrik cihazlarında önemli bir kriterdir.

2.4.7. ARM'de Tork Dalgalanması

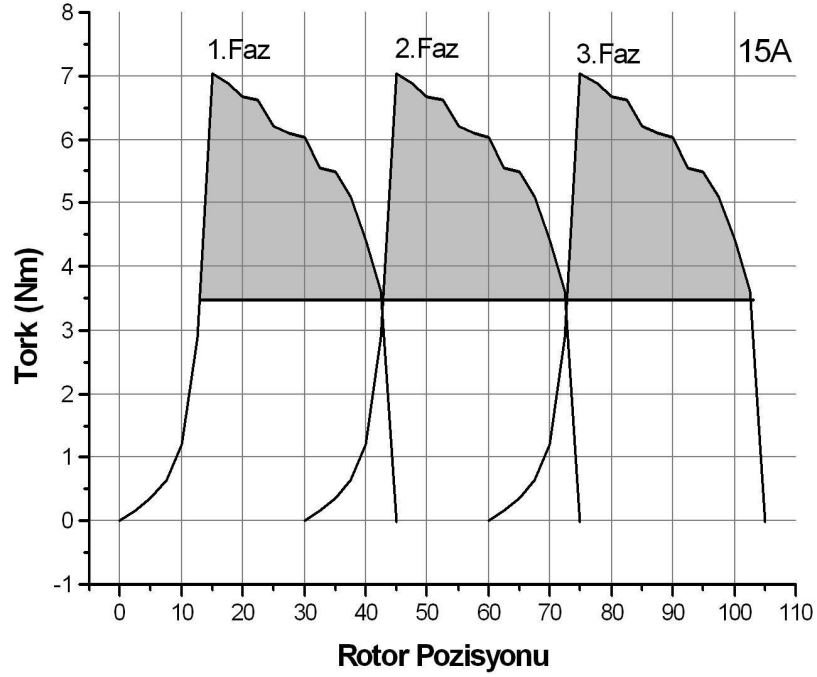
Çıkış torkundaki değişimlerden tork dalgalanmaları oluşur. Bu motorun hızına bağlı olduğu için tork dalgalanması ARM'nin çalışma moduna göredir. ARM genel olarak düşük, orta ve yüksek devir olarak 3 çalışma modu vardır. Emk gibi değişkenleri çoğu bu çalışma modlarındaki akıma bağlıdır. Tork dalgalanmalarının miktarını tahmin edebilmek için akım dalga şekilleri motorun statik tork karakteristiğinin en iyi olduğu duruma göre olmalıdır. Düşük hızlardaki tork değişimlerinde tork dalgalanmalarının etkisi çok önemlidir. Milde ani hızlanmalara neden olabilir. Daha yüksek hızlarda rotorun ataleti hızdaki değişimleri ve titreşimleri azaltmaya yardım eder. En düşük hızlardaki çalışmada akım dalga şekli dikdörtgene yakındır. Bu yüzden tanımlanmış seviyede uyartım zamanının kısa bir diliminde akım bekler[35].

Düşük hız uygulamaları için faz akımlarının üst üste gelmesi ihmal edilebilir. Yine de fazlar tork eğrisinin kesişme noktalarına uygun rotor pozisyonlarında anahtarlandığı

varsayılacaktır. Statik torkun maksimum değerine tepe statik tork (T_{max}) kesişme noktasındaki değere de minimum tork (T_{min}) denilmektedir. Burada yüzde tork dalgalanması Eşitlik 2.20 ile ifade edilebilir [35].

$$\%T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max}} 100 \quad (2.20)$$

Şekil 2.16'da modelin tork dalgalanması 3 faz için verilmiştir. Burada ARM'nin hızı ve ataleti dikkate alınmamıştır. Statik durum için verilmiştir.



Şekil 2.16. ARM'de tork dalgalanması.

Birinci faz örtüşen pozisyona ulaştığında ikinci faz uyarılmıştır, ikinci faz örtüşen pozisyona ulaştığında üçüncü faz uyarılmıştır, üçüncü faz örtüşen pozisyondayken tekrar birinci faz uyarılmıştır. Bu durum 1 tur için 4 kez tekrar etmektedir. Grafikte bir fazın çıkışı ile diğer fazın inişinin kesiştiği nokta minimum tork bölgesi olarak gösterilmiştir, fakat dinamik çalışmada rotorun ataleti ve hızı bu noktayı daha yukarı çıkaracaktır. Statik duruma göre tork dalgalanması yaklaşık %50 civarındadır[30,35].

2.4.8 Temel Parametreler

Anahtarlamalı relüktans motorlardan istenildiği gibi faydalanılabilmesi için birtakım önemli parametrelerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bunlardan bazılarını açıklamak ileriki bölümler açısından fayda sağlayacaktır.

Anahtarlamalı relüktans motora ait faz sayısı, stator ve rotor kutup sayıları motora ait başlıca parametrelerin en önemlilerindedir. Stator ve rotor kutup sayıları arasındaki oran tasarımcıya çok geniş bir seçim yelpazesi sunmaktadır. ARM'lerin en çok kullanılanları 2, 3 ve 4 fazlı olup iki fazlı olanlarda kalkış problemi yaşanmaktadır.

Dolayısıyla da bu tür ARM'lerde motorun herhangi bir konumdan kalkış yapmasını sağlayacak şekilde rotor kutup geometrisinin seçilmesi gerekmektedir. Faz sayılarının büyük değerlikli olduğu motorlarda tork dalgalılığı azalmakla birlikte bu motorların maliyeti artmaktadır [31].

ARM' de statora ait herhangi bir faz uyarıldığında rotor ekseninin stator üzerindeki belirli bir eksene göre hareket ettiği mesafeye rotor konum açısı denmektedir [31]. N_r , rotor kutup sayısını ve q faz sayısını belirtmek üzere rotor konum açısı Eşitlik 2.21 ile verilebilir:

$$\theta = \frac{360^\circ}{qN_r} \quad (2.21)$$

Sırası ile rotor ve stator kutup konum açıları olan γ_r ve γ_s ise rotor ve statora ait çevre açılarının rotor ve statora ait olan kutup sayılarına bölümü ile elde edilebilir:

$$\gamma_r = \frac{360^\circ}{N_r} \quad (2.22)$$

$$\gamma_s = \frac{360^\circ}{N_s} \quad (2.23)$$

Rotor kutup uzunluğu l_r , d_i rotor iç yarıçapını göstermek üzere, rotor iç çevre uzunluğunun rotor kutup sayısına oranı ile elde edilebilir. Aynı durum stator için de geçerlidir:

$$l_r = \frac{d_i \pi}{N_r} \quad (2.24)$$

$$l_s = \frac{D_i \pi}{N_s} \quad (2.25)$$

Rotor iç yarıçapı ile dış yarıçapı arasındaki fark rotor kutbunun derinliğini verirken ilgili fark değerinin ikiye bölünmesi ile rotor derinliği y_r hesaplanabilir:

$$y_r = \frac{d_d - d_i}{2} \quad (2.26)$$

D_i , stator iç çapını ve g_{\min} minimum hava aralığının göstermek üzere stator kutup derinliği ise Eşitlik 2.27' deki gibi verilebilir [31]:

$$y_s = \frac{D_i - d_d - 2g_{\min}}{2} \quad (2.27)$$

Rotor kutup açısı θ_r ile verilirse D_r rotor eni;

$$\sin\left(\frac{\theta_r}{2}\right) = \frac{\frac{D_r}{2}}{\frac{d_d}{2}} \quad (2.28)$$

olmak üzere,

$$D_r = d_d \sin\left(\frac{\theta_r}{2}\right) \quad (2.29)$$

ile verilebilir. Stator kutup eni ise;

$$\sin\left(\frac{\theta_s}{2}\right) = \frac{\frac{D_s}{2}}{g_{\min} + \frac{d_d}{2}} \quad (2.30)$$

olmak üzere,

$$D_s = (2g_{\min} + d_d) \sin\left(\frac{\theta_s}{2}\right) \quad (2.31)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Anahtarlamalı relüktans motorlar normalde yüksek hızlarda çalıştırılmasına karşın temel bir hız karakteristiğine sahiptir. Dolayısıyla temel hıza sahip bir motor oranlanmış bir moment ve çıkış gücü göstermektedir. k sabit bir değer olmak üzere L_{stk} motor saç paketinin uzunluğu Eşitlik 2.32' de verilmiştir.

$$L_{stk} = d_d k \quad (2.32)$$

Eşitlik 2.32'de yer alan k sabitinin değeri ilgili uygulama alanına göre değişiklik göstermesine karşılık, servo uygulamalar için 1 ile 3 arasında olurken servo olmayan uygulamalarda 0.25 ile 0.75 arasında olmaktadır [31].

3. BÖLÜM

ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTOR ÇEVİRİCİ DEVRELERİ

3.1. Giriş

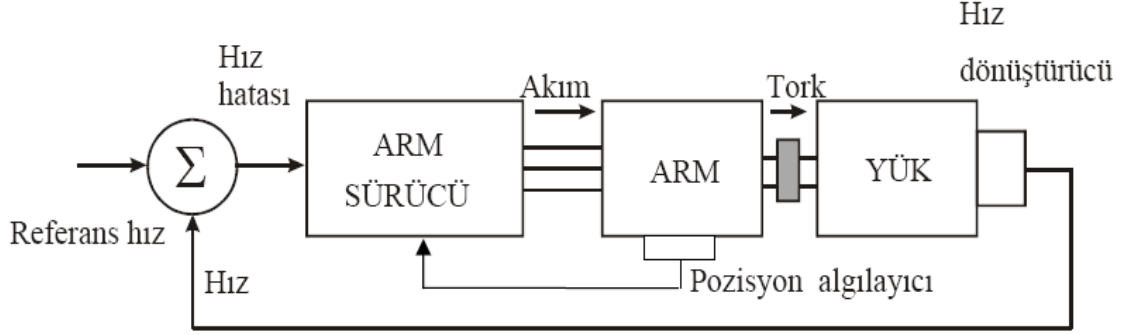
Bu bölümde anahtarlamaalı relüktans motor sürücü devrelerinde kullanılan çevirici yapıları üzerinde durulacaktır. Her çevirici yapısının diğerlerine nazaran, maliyetine karşın sağladığı kontrol esnekliği bakımından farklılıkları vardır.

Temelde bütün ARM güç çeviricileri, akımın genliğini ve hatta dalga şeklini biçimlendirerek tork ve hız gereksinimlerini karşılamak için fazlara seri olarak bağlanmış yarı iletken anahtarlara ihtiyaç duyar. Aynı zamanda faz değişimleri esnasında, bir önceki faza ait sargılar üzerinde depolanan enerjinin motor üzerinde negatif tork oluşturmaması için, hızlı bir şekilde kaynağa döndürülebilmesi için hızlı geri dönüşüm diyotlarına sahip olmalıdır.

Son yıllardaki yarı iletken teknolojisinde meydana gelen hızlı gelişmelerden hem güç elektroniği elemanları, hem de mikrodenetleyiciler olumlu yönde etkilenmişlerdir. Şöyle ki, tek bir yarı iletken anahtar, kontakları arasına uygulanan bin voltun üzerindeki potansiyel farkı nano saniyeler mertebesinde açıp kapatabilmekte ve bu süre zarfında akıttığı akım değerleri yüzlerce amperle ifade edilmektedir. Aynı zamanda mikrodenetleyicilerin performansları ile birlikte kapasiteleri de artmış ve motor kontrol devrelerinin vazgeçilemez özeliği olan PWM gibi birçok fonksiyonu donanımsal olarak desteklemekte ve programsal olarak da kullanıcıya birçok kolaylıklar sağlamaktadırlar.

ARM sürücünün yapısı AC ve DC sürücü yapılarına benzemektedir. Şekil 4.1’de kapalı döngü kontrol sistemi ile yüke bağlanmış anahtarlamaalı relüktans motorunun blok diyagramı görülmektedir. ARM girişi akım, çıkışı tork ve pozisyon bilgisi olan bir kutu olarak düşünülebilir. Akım bütün faz akımlarını içermekte ve dalga biçimi saf DC veya AC olmadığından ve hem hız ve hem de yükü değiştirdiğinden dalga biçiminin de

kontrolünün yapılması gerektiği anlaşılmaktadır. ARM Sürücüsünün hangi faz veya fazları tetiklemesi gerektiği, motor miline akuple edilmiş olan pozisyon sensörleri ile algılanır. Bu işlem faz akımlarının ölçülmesi ile sensörsüz olarak da yapılabilir. Fakat bu tasarımda kontrolünün basit ve maliyetinin düşük olmasında dolayı pozisyon sensörleri kullanılmıştır.



Şekil 3.1. ARM kontrol sisteminin yapısı.

ARM'lerde kullanılacak dönüştürücüler iki temel özelliği karşılamalıdır;

- ARM'de her faz diğerinden bağımsız olarak ilettime geçmelidir.
- ARM motor olarak çalışırken, generatör çalışma bölgesine geçmemelidir.

Bunların yanı sıra ARM'nin toplam performansını arttırmak için kullanılacak olan dönüştürücü ek olarak aşağıdaki özellikleri de sağlamalıdır;

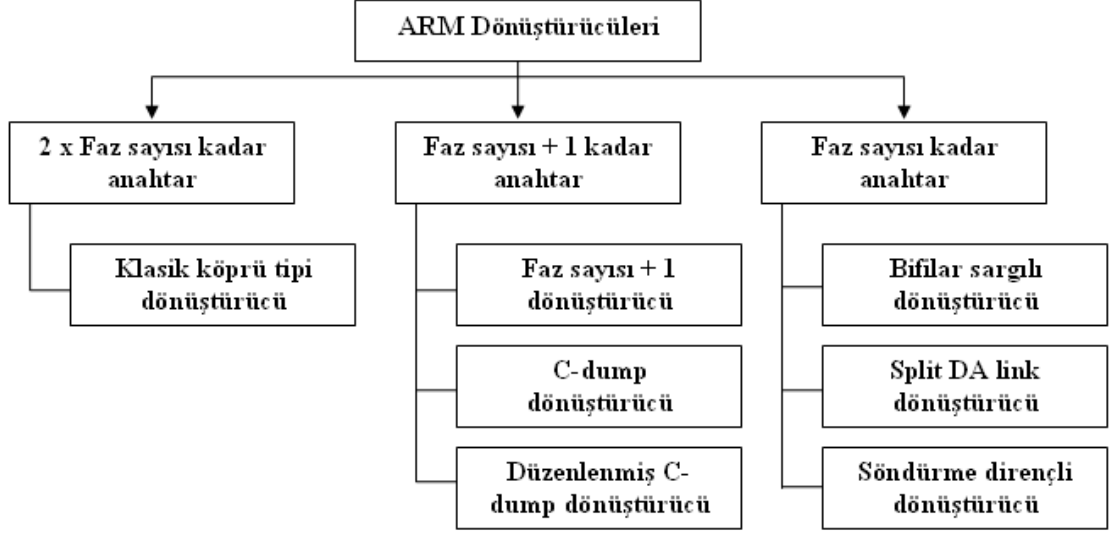
- Fazlardan biri tamamen kesime gitmeden diğer faz ilettime geçirilmeli,
- Dönüştürücü, kesime götürülen faz sargısında depo edilen enerjiyi kaynağa ya da ilettime geçirilecek bir sonraki faza aktarabilmeli,
- Komütasyon süresini kısa tutabilmeli,
- Kıyıcı olarak çalışma esnasında anahtarlama serbest dolaşım sağlayabilmelidir.

3.2. Çevirici Devreleri

ARM'lerin döndürme momenti akımın yönüne değil sadece genliğine bağlıdır. Dolayısıyla motorun sürücü devresinde kullanılacak yarı iletken sayısı diğer sürücülere nazaran daha azdır. Bunun yanında tork değeri indüktansın değişimine bağlı olduğundan, eğer akım indüktansın artma yönünde uygulanırsa döndürme momenti pozitif olurken, akımın indüktansı azaltma yönünde olması durumunda ise negatif

olacaktır. Dolayısıyla akım darbelerinin, indüktans değişiminin hangi bölgelerinde uygulanacağını tespit edilmesi ve bu bölgelere ait rotor konumunun bilinmesi gerekmektedir.

ARM'lerde kullanılan dönüştürücü devrelerini kullanılan anahtar sayısına göre sınıflandırabiliriz [36]. Şekil 3.2'de bu sınıflandırma gösterilmektedir.



Şekil 3.2. ARM'lerde kullanılan dönüştürücülerin anahtar sayısına göre sınıflandırılması.

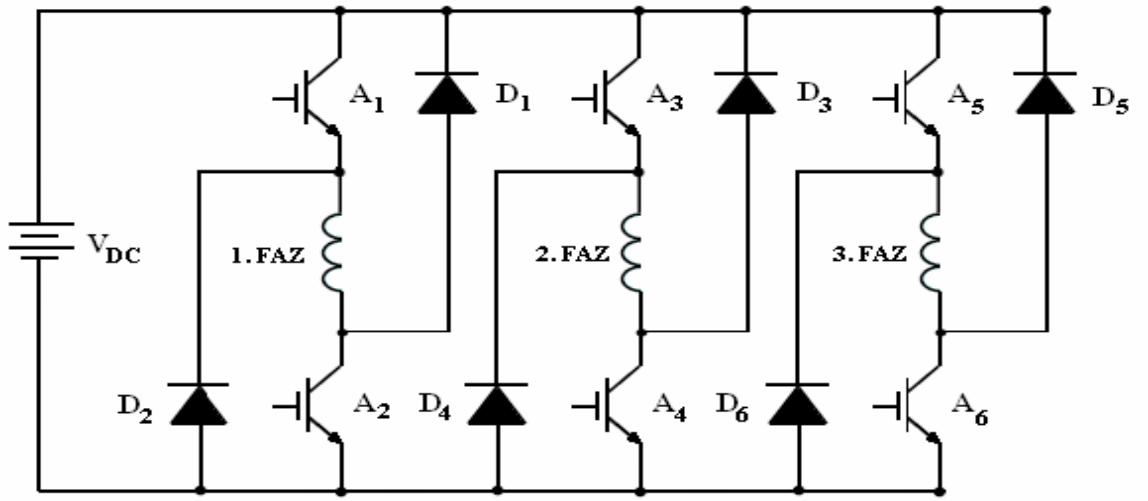
ARM'lerde üretilen tork, akımın yönünden bağımsız olduğundan ARM çeviriciler diğer motorlar için kullanılan çeviricilere göre birtakım avantajlara sahiptir. Bunlardan birkaçı şu şekilde sıralanabilir:

- Her bir faz için sadece tek bir anahtar elemanının kullanılmasının yeterli olması,
- Motorda yer alan fazlar birbirlerinden bağımsız olduklarından herhangi bir fazın devre dışı kalması durumunda bile diğer fazların bu durumdan bağımsız olarak çalışmalarına devam edebilmesi,
- ARM'nin sıfır kısa devre akımı ve sıfır açık devre voltajına sahip olması sebebiyle herhangi bir hata karşısında minimum aşırı voltaj ve ısınma problemlerine sahip olunmaması.

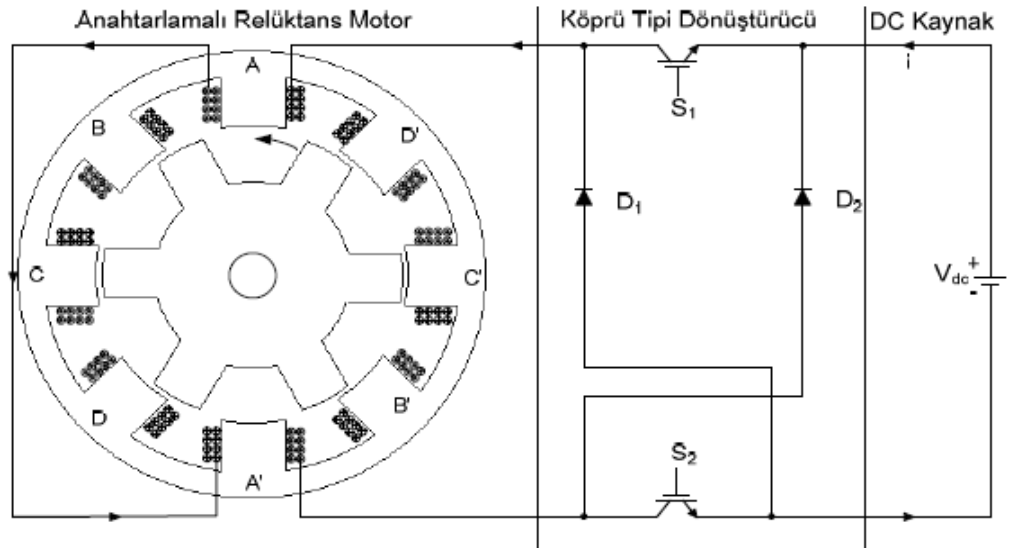
ARM'ler için kullanılan çevirici devreler, genelde ARM'nin sahip olduğu faz sayısına karşılık içerdikleri anahtarlama elemanları ve serbest diyot elemanlarının sayılarına göre

çeşitli yapı topolojilerine ayrılmaktadır. İleriki kısımlarda bu amaçla sıkça kullanılmakta olan devre yapıları verilecektir.

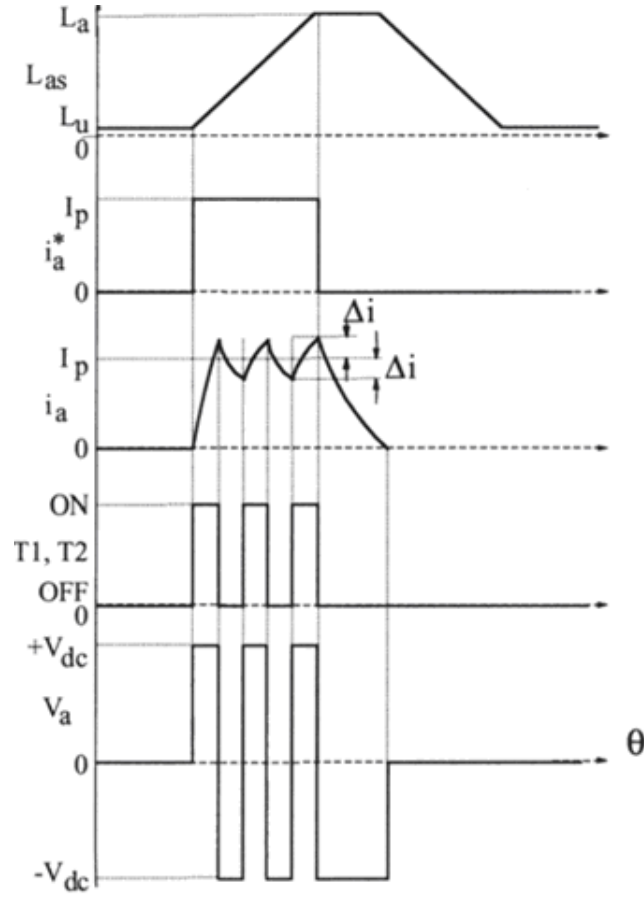
ARM'nin sahip olduğu faz sayısının iki katı kadar anahtar elemanı içeren ($2n$ tipi) klasik köprü tipi çevirici devrelerinde fazlar birbirlerinden bağımsız olduğundan her fazın ayrı ayrı kontrol edilebilmesi mümkün olmakta ve kullanılan anahtarlar düşük gerilime maruz kalmaktadır [37]. Şekil 3.3.'de bir fazlı ve üç fazlı ARM'ler için $2n$ tipi köprü çevirici devreleri gösterilmiştir.



Şekil 3.3.a. Üç fazlı bir ARM için $2n$ tipi klasik köprü çevirici devresi.



Şekil 3.3.b. Bir faz için ARM uyarım devresi.



Şekil 3.3.c. Bir faz için ARM dalga şekilleri.

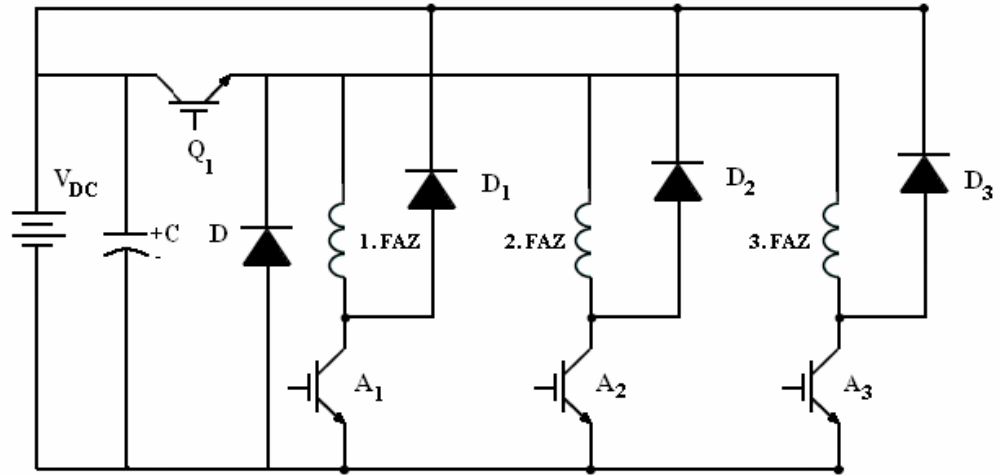
ARM çevirici devresinin görevi kaynaktan gelen enerjiyi kontrol devresinden gelen sinyaller eşliğinde fazlara dağıtmaktır. Şekil 3.3.a'dan da görüleceği gibi her faz için iki adet yarı iletken anahtar (IGBT) ve iki adet diyot kullanılmıştır. Bu çevirici devresinde enerji verilecek olan fazın alt koldaki IGBT sürekli iletimde tutulurken üst koldaki IGBT'ye PWM sinyali uygulanır. Böylece gerekli voltaj regülasyonu yapılarak o faz enerjilendirilmiş olur. Üst koldaki IGBT iletimde iken akım her iki IGBT üzerinden de geçerek devreyi tamamlar [29].

Birinci fazı ele alacak olursak S1 ve S2 IGBT'leri iletimdedir ve bu anda diyotlar üzerinden herhangi bir akım akmayacaktır. Üst koldaki IGBT kesimde iken ise o anda birinci faz üzerinde depolanan akım sadece alt koldaki IGBT üzerinden de geçerek devreyi diyot üzerinden tamamlayacaktır. Yani D1 diyotu ve S2 IGBT'si iletimdedir ve bu anda D2 diyotu üzerinden herhangi bir akım akmayacaktır. İlgili fazın enerjisi kesilmek istendiğinde ise her iki IGBT'nin aynı anda kesime gitmesi sağlanır. Bu

durumda ise faz üzerinde depolanan akım D1 ve D2 diyotları üzerinden devreyi tamamlayarak kaynağa geri dönecektir.

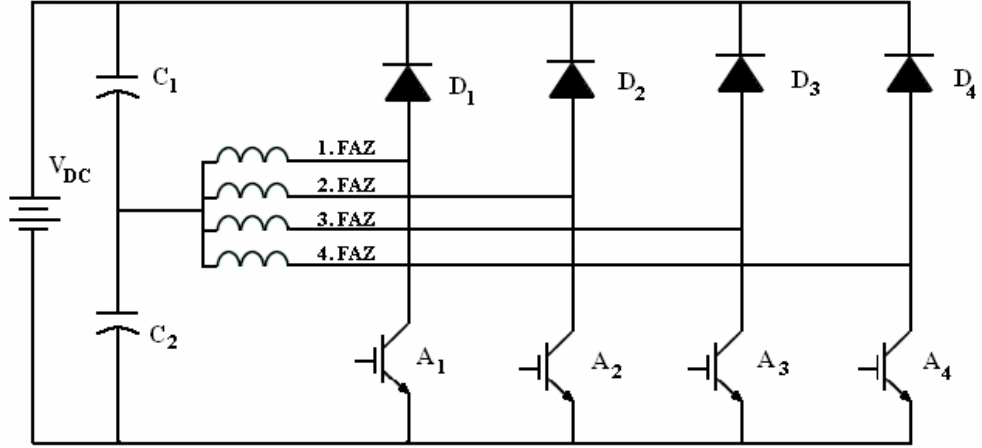
Burada dikkat edilmesi gereken en önemli durum bir fazın enerjisi kesilip diğer faz enerjilendirileceği zaman bir önceki fazda hali hazırda depolanmış olan enerjinin çok kısa bir süre içerisinde boşaltılarak frenleme torqu etkisi yapmasına engel olmaktır. Bunun için kullanılan IGBT'lerin ve Diyotların hızlarının yeterli olmasına dikkat edilmelidir.

Düşük hızlı sürücülerde bütün hız aralığı boyunca darbe genişlik modülasyonu (Pulse Width Modulation: PWM) kontrolü kullanılmaktadır. Bu durumda ARM çevirici devresindeki anahtar elemanlarının sayısının azaltılabilmesi mümkün olmaktadır. Böylece bütün fazlar için kıyıcı olarak ortak tek güç anahtarı kullanılabilir. N fazlı bir sistem için faz sayısının bir fazlası kadar anahtar ve diyot elemanı gerektiren n+1 topolojisindeki çevirici devresi Şekil 3.4' de gösterilmiştir.



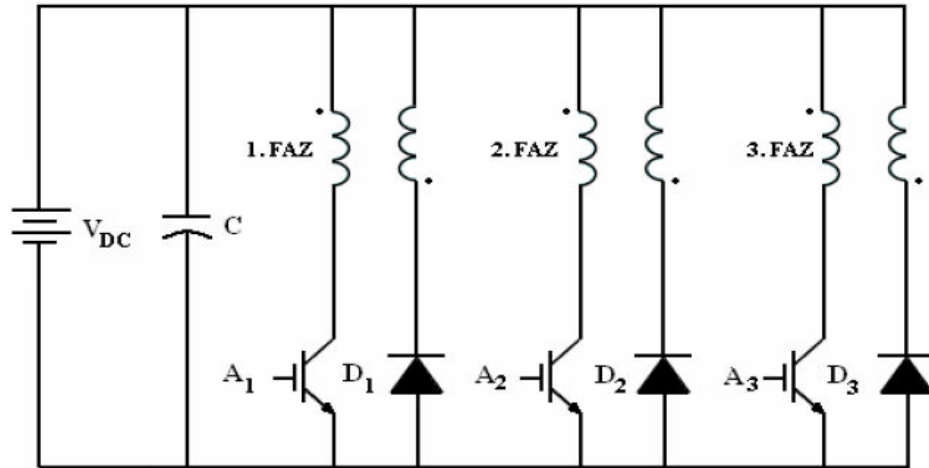
Şekil 3.4. n+1 topolojisindeki ARM çevirici devresi.

Tek kutuplu sürme devresi kullanmanın bütün avantajlarından faydalanmak için anahtar sayısını faz sayısına indirmeye yönelik başka devreler de geliştirilmiştir. Ancak eleman sayısı faz başına indirildiğinde fazlardan pasif elemanlar gerekmemekte ya da kontrol sınırlamalarından dolayı bazı problemler ortaya çıkmaktadır. Şekil 3.5' de Tasc Drives Ltd. tarafından GTO (Gate Turn-Off) Thyristor elemanları kullanılarak gerçekleştirilen split-link devresi gösterilmiştir [37].



Şekil 3.5. Split DC çevirici devresi.

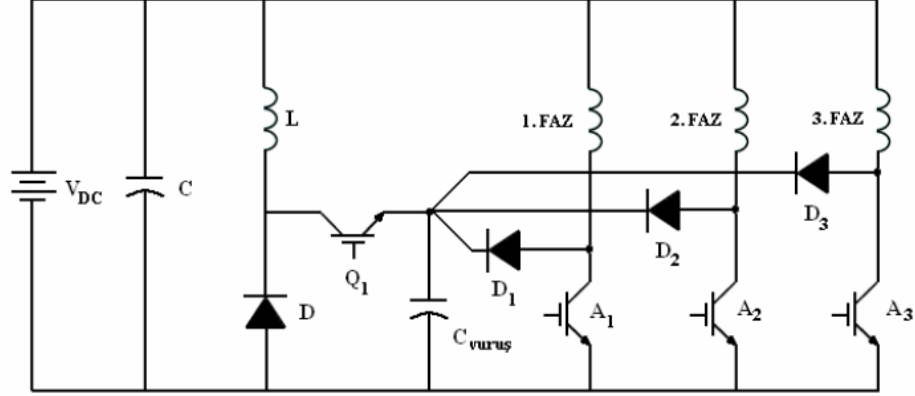
Bunun yanında yine faz başına tek bir anahtarlama elemanının yeterli olduğu bifilar (çift tel) sargılı çevirici devrelerinde, bifilar sargı bağlantı sayısını ikiye katlamakta ve bakırın verimsiz biçimde kullanılmasına neden olmaktadır. Ayrıca, sargılar arasında eşit olmayan etkileşimden doğan gerilim sıçramaları sebebiyle problemler ortaya çıkabilmektedir. Şekil 3.6' da sözü edilen bifilar sargılı çevirici devresi gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Üç faz ARM için bifilar sargılı çevirici devresi.

Şekil 3.7' de gösterilen C-vuruşlu çevirici devresinde, depolanmış enerjiyi boşaltma kapasitörü C'den kaynağa step-down (azaltıcı) kıyııcı devresi ile iletecek eleman dahil eleman sayısı $n+1$ olmaktadır. Ortalama kapasitör gerilimi, komutasyondan sonra hızlı boşalmaya izin vermek için kaynak geriliminden yüksek tutulmaktadır. Bu devrenin verimi yüksek olmasına karşın, kontrolü karmaşıktır ve ilave elemanlar gerektirir. Enerji

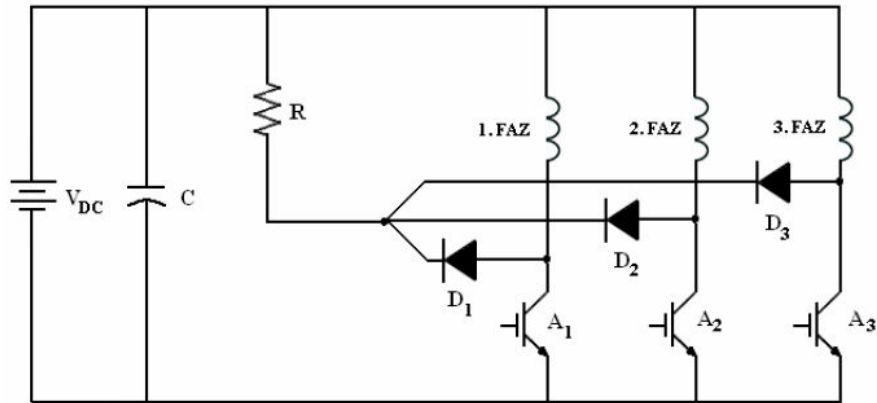
deşarj devresindeki bir kontrol hatası boşalma kapasitöründe hızlı bir şarj oluşumuna yol açmakta ve eğer koruyucu tedbirler alınmaz ise bütün çevirici devre elemanları yüksek gerilime maruz kalıp zarar görebilmektedir.



Şekil 3.7. Üç faz ARM için C-vuruş tipi çevirici devresi.

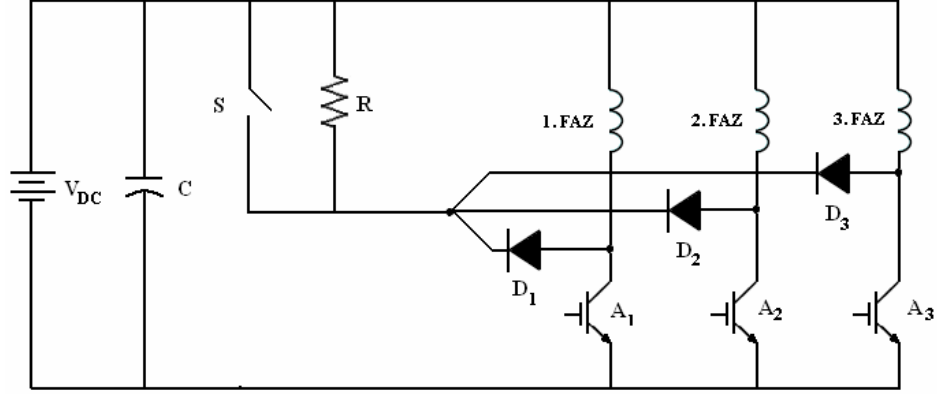
Çevirici düzenekleri içerisinde en ekonomik olan devre söndürme dirençli çevirici devresidir. Bu devre düşük performans ve maliyet istenilen uygulamalar için iyi bir seçenek olup kontrol edilmesi de oldukça basittir [37]. Bu çeviricide her bir faz için bir diyot ve bir anahtar yeterlidir. Depolanan enerji serbest dönüşüm esnasında R direnci üzerinde harcanmaktadır.

Şekil 3.8' de üç fazlı bir sistem için söndürme dirençli çevirici devresi gösterilmiştir. Bu şekilde gösterilen söndürme dirençli çevirici devresinde R direncinin değeri büyük önem arz etmektedir. Direncin küçük değerde olması durumunda, hız yüksek iken bozucu tork üretimine sebep olur ve dolayısıyla da verim düşer. Direncin büyük değerlikli olması durumunda ise komütasyondaki faza bağlı anahtarda yarı iletken elemanlar için tehlikeli olan büyük değerlikli gerilim sıçramaları oluşur.



Şekil 3.8. Üç fazlı ARM için söndürme dirençli çevirici devresi.

Söndürme dirençli çevirici devresinin bu dezavantajlarından dolayı Şekil 3.9’ da gösterilen çift eğimli çevirici devresi tasarlanmıştır[37].



Şekil 3.9. Üç faz ARM için çift eğimli çevirici devresi.

Söndürme dirençli çevirici devresine paralel bir anahtar eklenerek elde edilen bu devre, düşük gerilimli uygulamalar için çok elverişlidir. Sürücü boyutlarının küçük ve faz başına eleman sayısının az olması bu çeviricinin avantajları arasındadır. Düşük hızlı çalışmalarda istenilen torku elde edebilmek için faz akımı sabit tutulmaktadır. Serbest dönüşüm anahtarı, kısıyıcı işlem aralığında enerjiyi sönmü direncinde tutmak yerine sargıda tutar. Serbest dönüşüm anahtarının uygun kontrol edilmesi vasıtasıyla faz komütasyonundan sonra enerji depolamak mümkün olmaktadır [33, 37].

4. BÖLÜM

2 x 6/4 DİSK TİPİ ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTOR TASARIMI

4.1. Giriş

Anahtarlamaalı relüktans motor 1980'li yılların başlarında yaygın olarak bilinmeden önce teknolojisini gizemlerle örtülü idi. Performansı ve çalışma karakteristikleri hakkında yapılan iddialara o zamanlarda inanılması çok zor gözüküyordu. Tasarım işlemlerine herkes ulaşamıyor ve firmalar iddiaların doğrulanma vasıtasına veya bunları geliştirme fırsatına sahip değildiler. Bundan dolayı prototiplerinin satın alınabilmesi veya testler sonucu hızlıca fabrikasyonunun yapılabilmesi yavaş ilerleme kaydetmiştir [38].

Tasarım probleminin bir parçası olarak ARM'de klasik DC ve AC motorlarda kullanılan klasik tasarım teknikleri kullanılmaz. Tasarım mühendisi, kararlı duruma sahip olmayan, aşırı lokal doyuma sahip ve geleneksel olmayan güç elektroniği konvertörü gerektiren bir makine ile karşı karşıyadır. Geometrisi oldukça basit ve ilk bakışta motor kontrolü hakkındaki her şey tasarımcıya çok basit gözükmektedir.

Anahtarlı relüktans motor için temel tasarım ölçütleri ile ilgili ilk yayını Lawrenson yapmıştır [39]. Bu makalede, ARM'de stator ve rotor kutup sayısı, stator kutup yayı uzunluğu ve rotor kutup yayı uzunluğu seçimi için formüller verilmiştir. ARM'nin optimum tasarımı ile ilgili birçok çalışmadan biri de Miller tarafından yapılmıştır[40]. Gürültüyü azaltmak ve momentte dalgalanmayı önlemek için yapılan anahtarlı relüktans motor tasarımlarında birçok kıstası dikkate alarak en uygun seçimi yapmak gerekir.

ARM'lerin çalışması ve tasarımının anlaşılmasındaki zorlukların çoğu çift çıkıntılıktan kaynaklanır; ne rotor ve ne de stator hava aralığında düzgün bir silindirik yüzeye sahip olmayıp çıkıntılı kutupları ve dişleri barındırır. Bu özelliğinden dolayı saf bir kararlı durum yoktur. Kararlı durum çalışması geçici durumların bir dizisi olup, bu geçici durumlarda faz sargılarının indüktif devre parametreleri hem pozisyon ve hem de

akımın değişken fonksiyonudur. Akımla değişme kısmi olarak örtüşen kutupların yoğun doyumunu ile ilişkili olup, sonlu eleman yazılımı olmaksızın detaylı olarak hesaplama yapılması zordur.

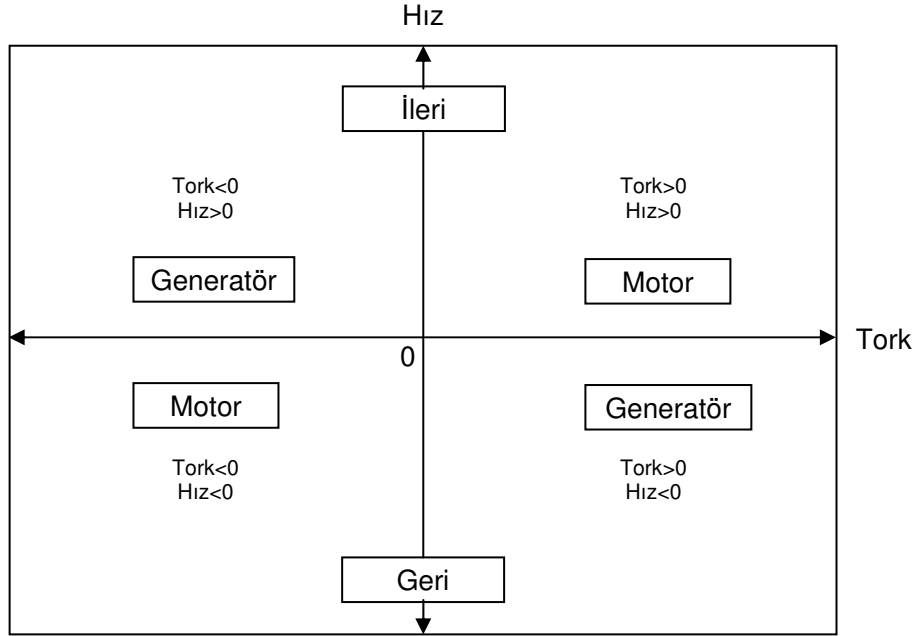
4.2. Tasarım İşlemi

İstenilen özellikler tork ve hız gibi gereksinimler ile sıcaklık yükselmesi, kaynak gerilimi ve boyutlar gibi sınırlamalardan oluşmaktadır. Bir tasarım motoru ve kontrolörü tanımlayan parametrelerden ibarettir ve malzemelerin özelliklerini ile üretim işlemlerini içerir. Eğer bu istenmiyorsa, tasarımdaki birinci işlerden biri boyutun bir başlangıç tahmininin yapılmasıdır. Muhafaza boyutları bilindikten sonra dahili boyutların tahminleri muhafaza boyutlarının bir oranı ile başlatılabilir, elbette ki bu tahmin yapılırken standart orantılardan başlanması tercih edilmelidir [38].

Başlangıç boyutlandırmasını, tasarım parametrelerinde istenilmeyen kısımlar atılarak tasfiye işlemi takip edilmelidir. Bu süreçte tasarımcı, tasarımının performans ve kalitesini aşamalı olarak geliştirir. Tasfiye işlemi uygun bir bilgisayar işlemi, prototiplerden test verisi ve hepsinin üzerinde deneyimlerle kolaylaştırılır.

İstenilen özellikler tam ve eksiksiz olmalıdır. Mümkün olduğu yerde kullanıcı ve tasarımcı en iyi tasarımın elde edilmesi öncesinde istenilen özellikleri görüşmelidir. Son kullanıcılardan yalıtılmış olarak özellikle ayarlanabilir hızlı sürücüye sahip motorların tasarımılanması doyurucu olmamaktadır. İstenilen özelliklerin fazladan belirtilmesi yani gereğinden fazla veya uygun olmayan özelliklerin konulması hata olarak değerlendirilir.

İstenilen özelliklerde en temel gereksinimler Tablo 4.1'de verildiği gibi tork, hız, yük faktörü ve belsime gerilimidir. Motorun her iki yönde döndürülüp döndürülmemesi gereği ve frenleme veya generatör opsiyonunun gerekli olup olmadığının belirtilmesi temel öğelerdir. Bu durum Şekil 4.1.'de görüldüğü gibi motorun çalıştırılacağı çeyrekleri ilgilendirir[38].



Şekil 4.1. Hız-tork diyagramının dört çeyreği.

Stator ve rotor nüvelerinin her ikisi de, imalat uygunluğu ve demir kaybını azaltmak için, ince yaprak halinde lamine saçlardan imal edilirler. Faz sargıları statordaki çıkık kutupların üzerine ince telle ve yoğun olarak sarılır. Rotorunda ise sargı, kısa devre halkası veya mıknatıs bulunmamaktadır. Statorda karşılıklı kutuplardaki sargılar seri veya paralel bağlanarak faz sargılarını oluşturmaktadır.

Tablo 4.1’de örnek bir ARM için istenilen özellikler verilmiştir.

Tablo 4.1. Örnek bir ARM için istenilen özellikler.

	Gereksinim veya Sınırlama	Örnek
Bütün tasarımlar için belirtilmelidir	Maksimum Tork	10 lbf-in veya 1,13 Nm
	Hız	2000 d/dak
	Yük Faktörü	%50
	Kaynak Gerilimi	24 V
	İleri/Geri Dönüş	EVET
	Motor/Generatör Çalışma	HAYIR
Belirtilmesi istenilir	Sıcaklık Artışı	
	Muhafaza Boyutları	
	Aşırı Yükleme Oranı/Zaman	
	Standartlara Uygunluğu	
Diğer gereksinim ve sınırlama örnekleri	Muhafaza Tipi	
	Maksimum Gürültü Seviyesi	
	Maksimum Harmonik Akımı	
	Maksimum EMI/RFI	
	Çalışma Ömrü	
Çevresel Faktörler		

4.3. 2 x 6/4 Disk Tipi Anahtarlama Relüktans Motor

ARM'lerin birçok üstünlüklerine karşılık en önemli dezavantajı momentindeki dalgalanmanın büyük olmasıdır. Momentindeki bu dalgalanma motorun rulmanlarına zarar vermekte olup akustik gürültüye sebep olmaktadır. Motorda oluşan bu moment dalgalılığını azaltmak için ya motorun kontrol devresi ya da motorun manyetik devresinin esas alınabileceğinden daha önceki bölümlerde bahsedilmiştir.

Bu çalışmada motorun manyetik devresi esas alınarak motor tasarımında yapılacak değişikliklerle momentindeki dalgalanmanın azaltılması amaçlanmış ve "2 x 6/4 Disk Tipi Anahtarlama Relüktans Motor" tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Tasarlanan yeni tip ARM aslında 6/4 ARM'nin çift yanlı olan türüdür. Dış kısımlarında Şekil 4.8'de de görüldüğü gibi sargıları tam karşılıklı pozisyona gelecek şekilde 2 stator ve arasında çift yanlı, rotor saç paketleri birbirleri ile 45'er derecelik açı yapacak şekilde yerleştirilmiş 2 rotordan oluşmaktadır.

Klasik tip 6/4 bir ARM'de stator sargıları 60'ar derece, rotor üzerinde bulunan saç paketleri ise 90'ar derece açı yapacak şekilde yerleştirilmektedir. Bu nedenle stator sargılarının ve rotor saç paketlerinin geniş adım olmasından dolayı motorun ürettiği tork değerindeki dalgalanmalar yüksek olmaktadır. Oluşan dalgalanmanın azaltılabilmesine yönelik, klasik tip 6/4 bir ARM'ye aynı mil ekseninde, 2 rotor üzerinde bulunan saç paketleri birbirine 45'er derecelik açı yapacak şekilde yerleştirilmiştir. Burada, başlangıç anında birinci stator sargısının enerjilendirilmesiyle birinci rotorun minimum relüktans konumuna hareket ettirilmesi, birinci rotorun stator sargısından ayrılmaya başlamasıyla yani oluşan tork değerinin düşmeye başlamasıyla ikinci stator sargısının enerjilendirilerek ikinci rotorun minimum relüktans konumuna hareket ettirilmesi amaçlanmıştır. Böylece sargıların karşılıklı olarak sırayla enerjilendirilmesi sağlanmakta ve torkun düşmeye başladığı durumlarda stator sargıları karşılıklı olarak birbirini desteklemektedir.

Söz konusu ARM'nin sürekli tork üretebilmesi için en önemli husus akım darbelerinin, indüktans değişiminin hangi bölgelerinde uygulanacağını tespit edilmesi ve bu bölgelere ait rotor konumunun bilinmesidir. Bu nedenle ilgili rotor pozisyonu bilgisinin elde edilebilmesi için Şekil 2.4'te verilen motor pozisyon sensörü kullanılmıştır. Eğer

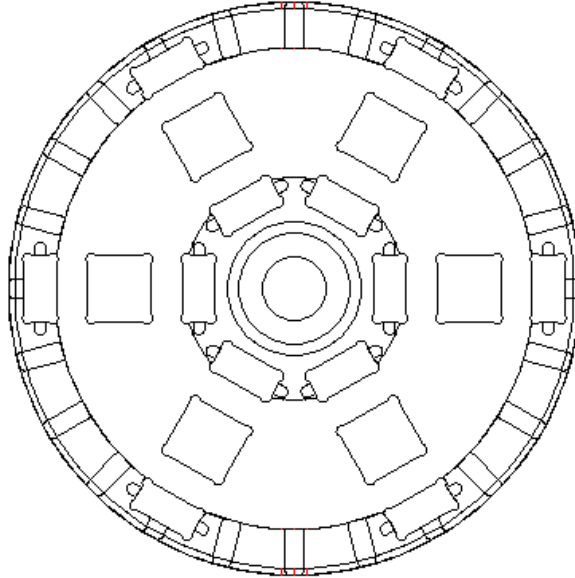
akım indüktansın azaldığı bölgede halen uygulanıyor ise motor generatör çalışma moduna geçecek ve negatif tork üretmeye başlayacaktır. Bu durum motor çalışma modundaki ARM'ler için istenmeyen bir durumdur.

Tablo 4.2'de tasarımı yapılan 2 x 6/4 disk tipi ARM'ye ait parametreler ve değerleri verilmiştir.

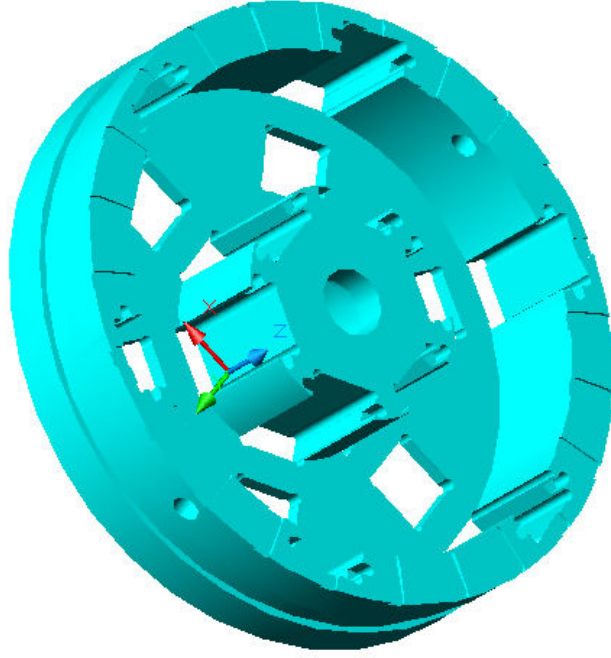
Tablo 4.2. Tasarlanan 2 x 6/4 disk tipi ARM'nin parametreleri ve değerleri.

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Stator çapı	D_s	0,180	m
Rotor çapı	D_r	0,180	m
Hava aralığı	g	0,5	mm
Stator kutup sayısı	N_s	2 x 6	-
Rotor kutup sayısı	N_r	2 x 4	-
Faz sayısı	q	3	-

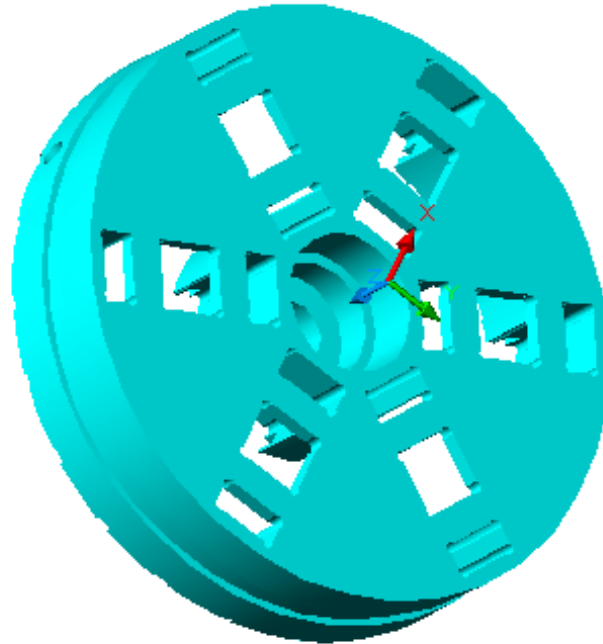
4.4. Tasarımı Yapılan 2 x 6/4 Disk Tipi ARM'ye Ait Teknik Resimler



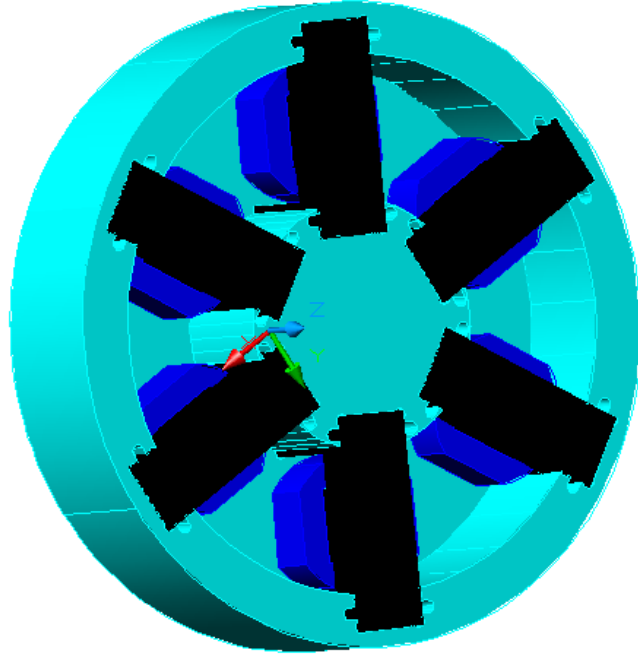
Şekil 4.2.a. Tasarımı yapılan 2 x 6/4 disk tipi ARM'ye ait statorun kesit görünümü.



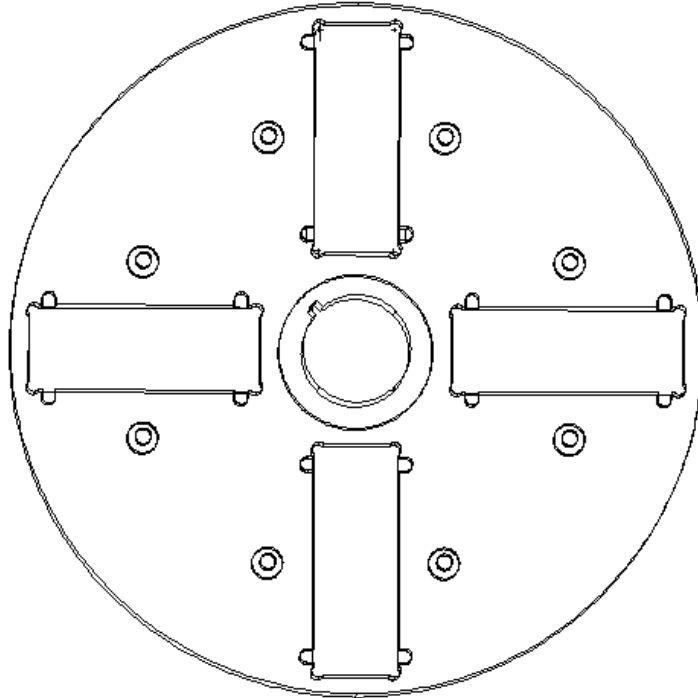
Şekil 4.2.b. Statorun üç boyutlu önden görünümü.



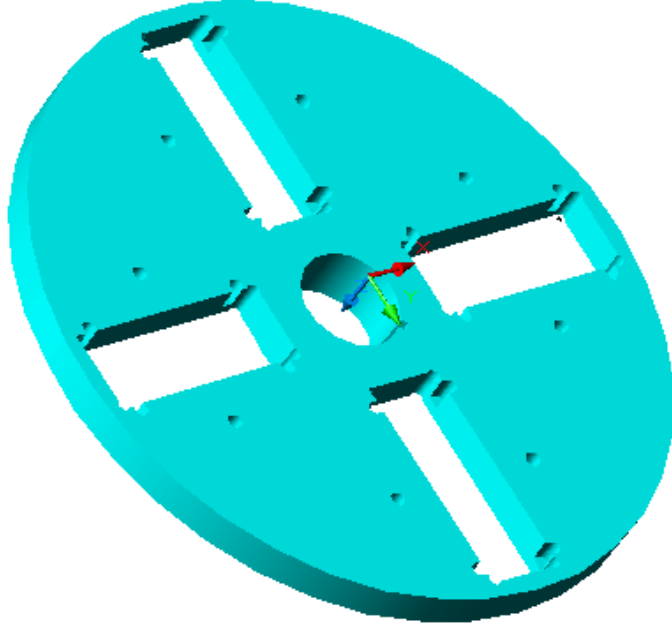
Şekil 4.2.c. Statorun üç boyutlu arkadan görünümü.



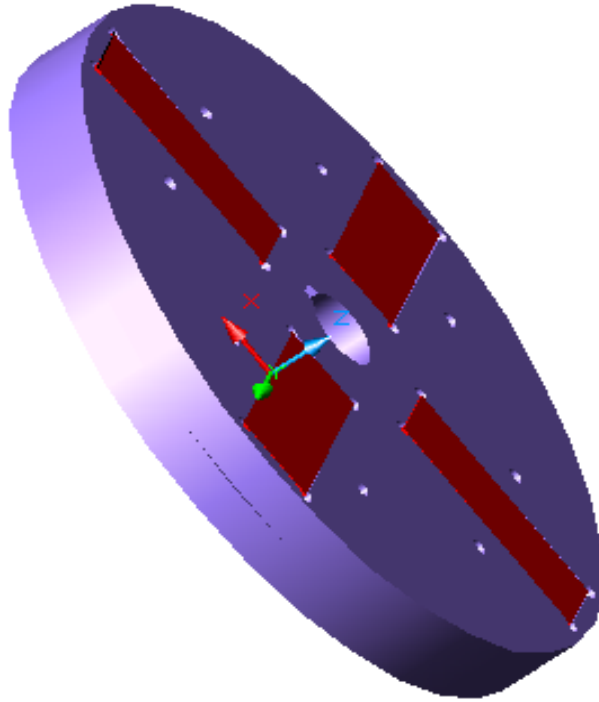
Şekil 4.3. Stator sargılarının yerleşimi.



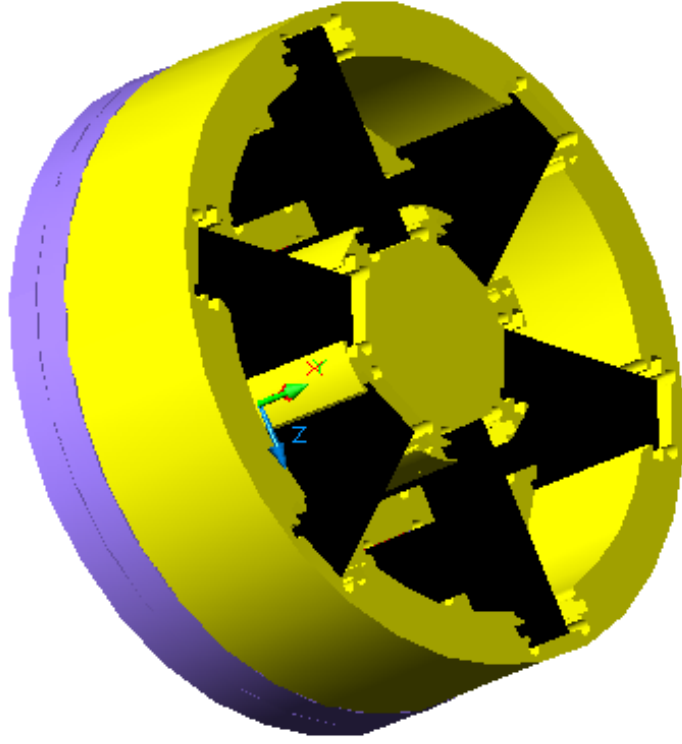
Şekil 4.4.a. Tasarımı yapılan 2 x 6/4 disk tipi ARM'ye ait rotorun kesit görünümü.



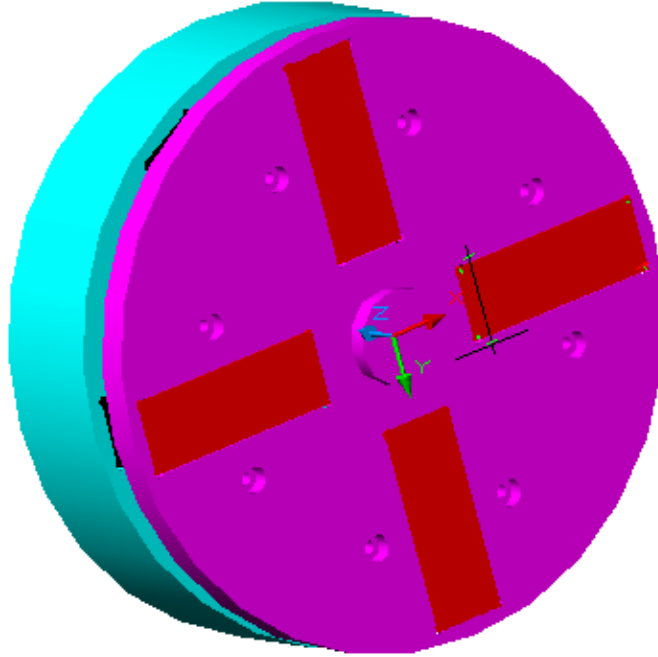
Şekil 4.4.b. Rotorun üç boyutlu görünümü.



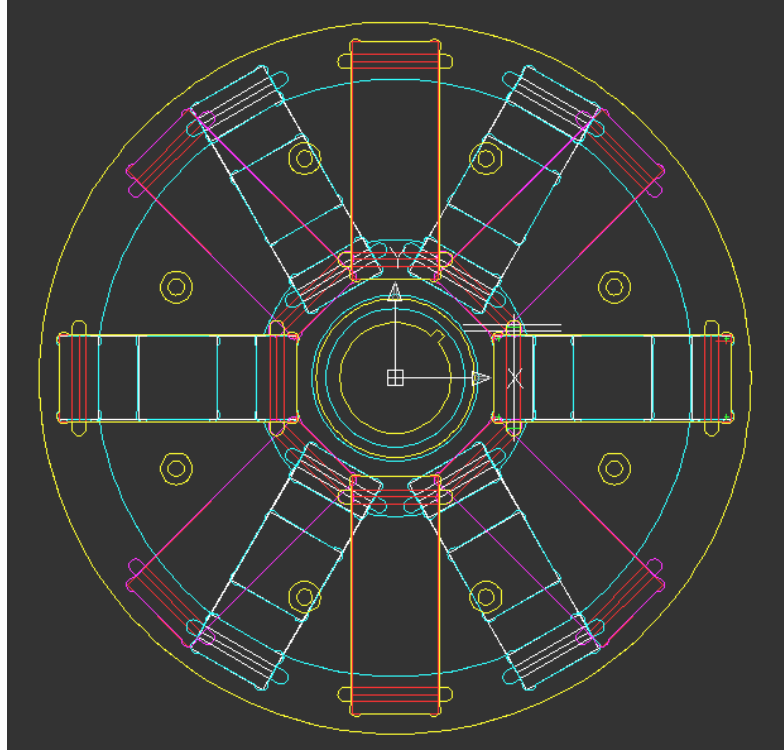
Şekil 4.5. Rotora saç paketinin yerleşimi.



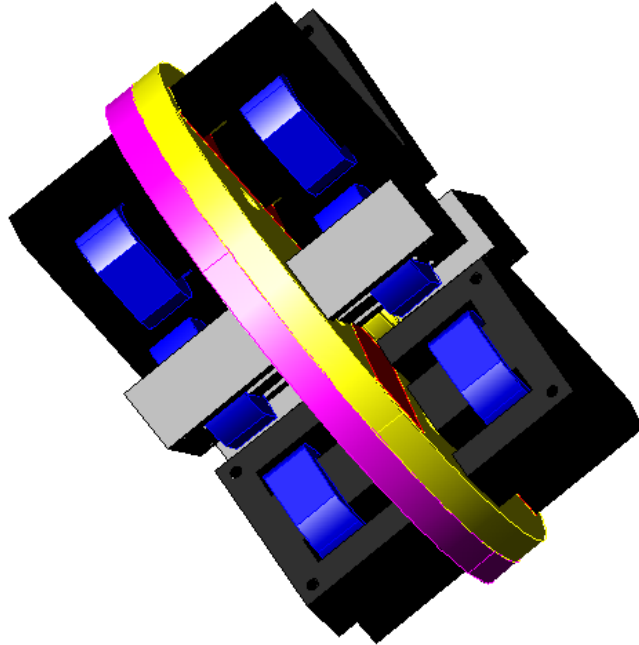
Şekil 4.6.a. Tek taraflı stator ile rotorun birleşiminin önden görünümü.



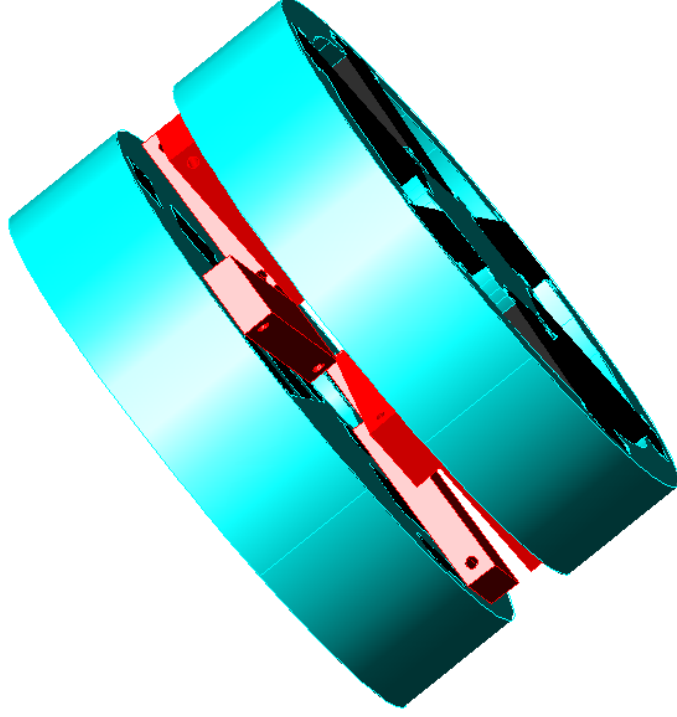
Şekil 4.6.b. Tek taraflı stator ile rotorun birleşiminin arkadan görünümü.



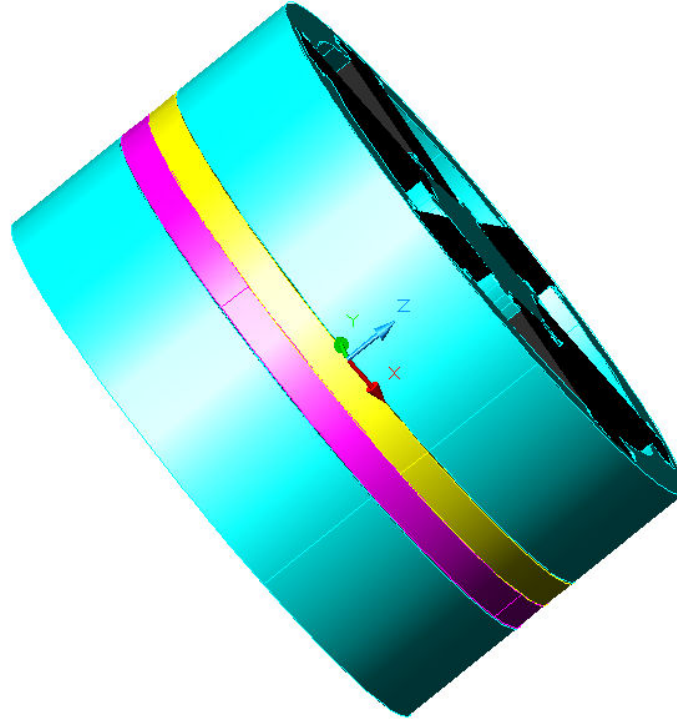
Şekil 4.7. Çift taraflı stator ile rotorun birleşiminin kesit görünümü.



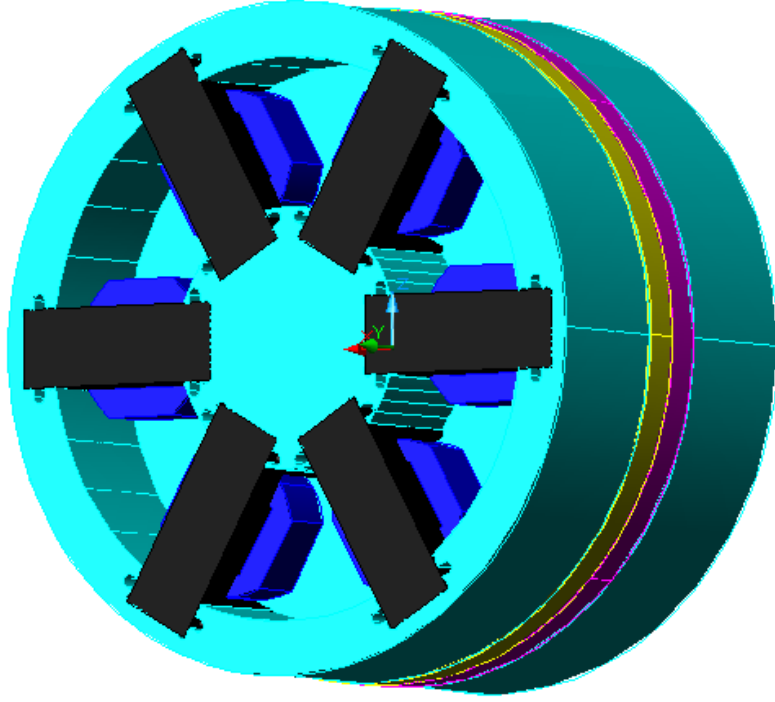
Şekil 4.8. Stator sargıları ile rotorun görünümü.



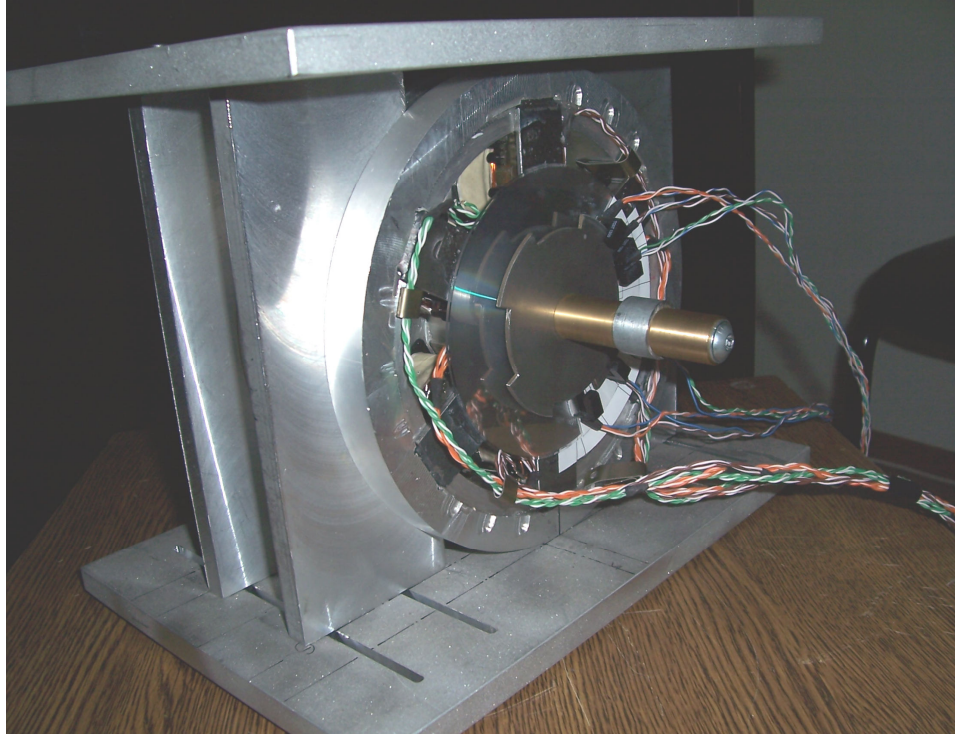
Şekil 4.9. Stator ile rotor saç paketinin görünümü.



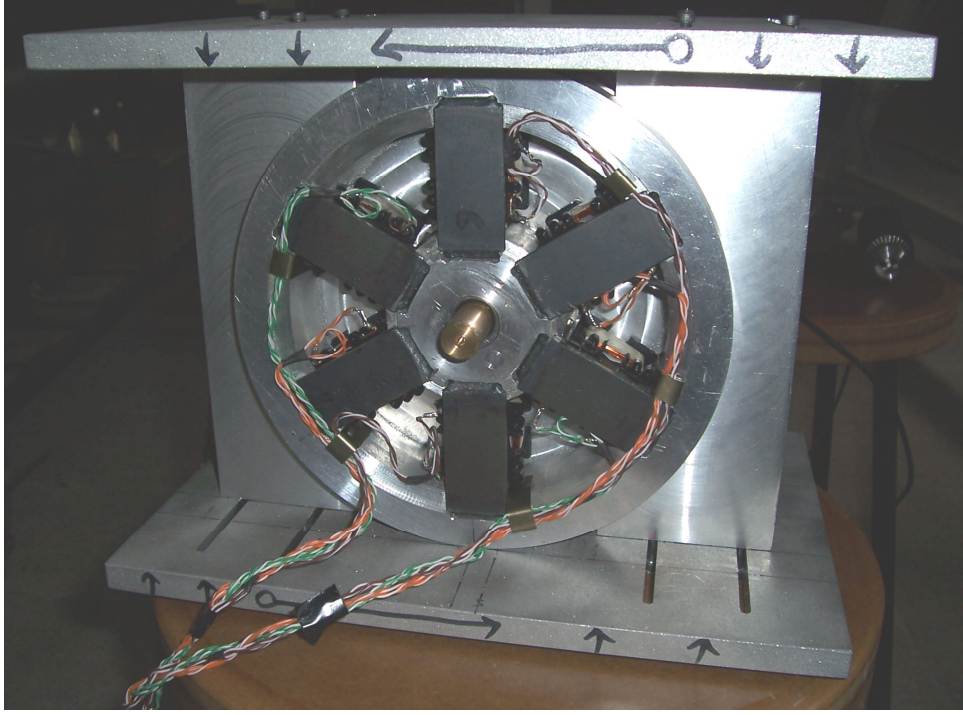
Şekil 4.10. Tasarımı yapılan 2 x 6/4 disk tipi ARM'nin üç boyutlu yandan görünümü.



Şekil 4.11. Tasarımı yapılan 2 x 6/4 disk tipi ARM'nin üç boyutlu önden görünümü.



Şekil 4.12. Tasarımı yapılan 2 x 6/4 disk tipi ARM'nin önden görünümü.



Şekil 4.13. Tasarımı yapılan 2 x 6/4 disk tipi ARM'nin arkadan görünümü.

5. BÖLÜM

BENZETİM SONUÇLARI VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, benzetim sonuçları ve deneysel çalışmalar olmak üzere iki kısım ele alınmıştır. Buna göre, ilk olarak motoru tanımlayan statik manyetik karakteristikleri ile elde edilen benzetim sonuçları verilerek daha sonra da tasarımı yapılan “2 x 6/4 Disk Tipi ARM” için bir deney düzeneği gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Son kısımda ise, benzetim sonuçları ile deney düzeneğinden elde edilen sonuçların karşılaştırması yapılmıştır.

5.1. Benzetim Sonuçları

Bu kısımda, ARM öncelikle Maxwell 3D alan simülatörü ile Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’de de görüldüğü üzere manyetik olarak tasarımlanmış ve bilgisayar destekli 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle statik manyetik analizleri yapılmıştır.

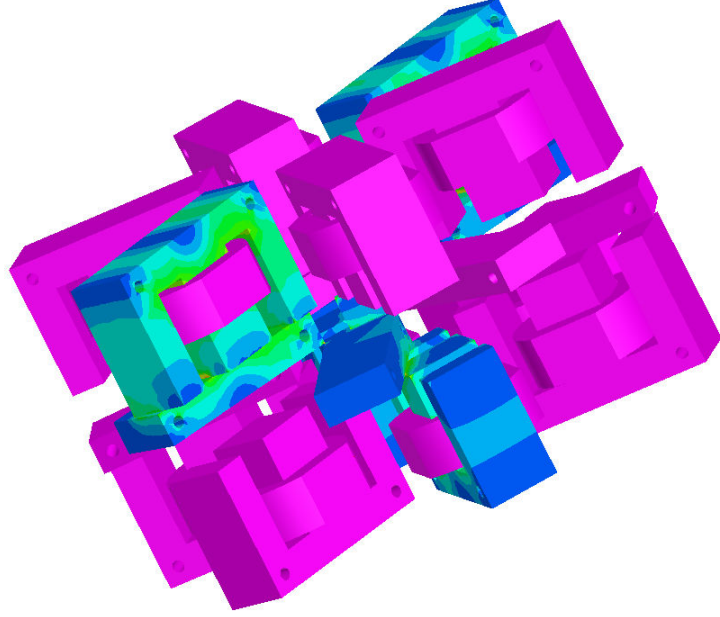
Simülasyon çözümlerinde motorun statik karakteristikleri elde edilmiş ve ardından motorun ideal akım dalga şeklinde çalıştığı varsayılarak dinamik tork dalgalanması elde edilmiştir. Bir faz birbirine paralel 2 sargıdan oluşmaktadır ve her sargı tek sarımlı olarak tasarlanmıştır. Bu nedenle de faz uyarım değeri magnetomotor kuvvet (*mmk*) olarak verilmiş olup, sargı başına 250 Ampertur (*mmk*), faz başına ise $2 \times 250 = 500$ Ampertur uygulanmıştır.

Maxwell 3D alan simülatörü programı etkileşimli bir yazılım paketidir. 3 boyutlu elektrostatik, statik manyetik ve eddy akımları problemlerini, sonlu elemanlar yöntemini (FEM) kullanarak çözer [41].

Maxwell 3D alan simülatörü;

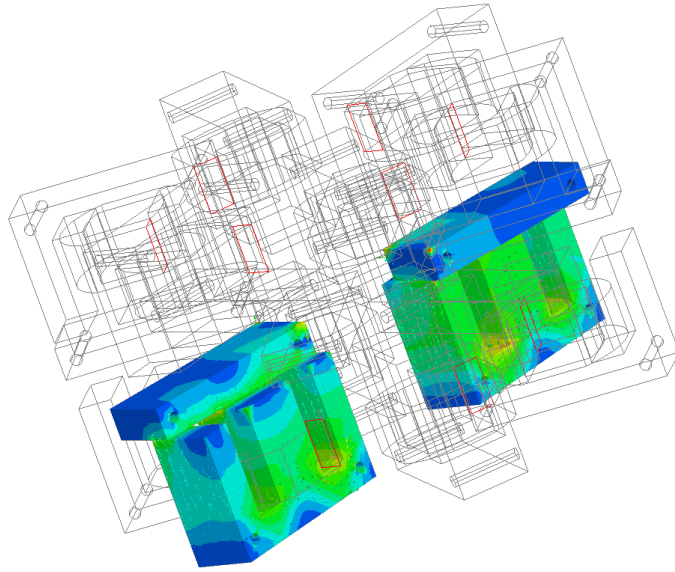
1. Statik elektrik alanları, kuvvet, tork ve gerilim dağılımlarının ve şarjların sebep olduğu kapasitansların hesaplanmasında,

2. Statik manyetik alanların, kuvvet, tork ve statik harici manyetik alanların ve sabit mıknatısların oluşturduğu endüktansların hesaplanmasında,
3. Doğrusal ve doğrusal olmayan malzemelerin kullanıldığı yapılardaki alanların simülasyonlarının yapılmasında,
4. Sıcaklık ve ısı akısı gibi termal büyüklüklerin hesaplanmasında kullanılmaktadır.



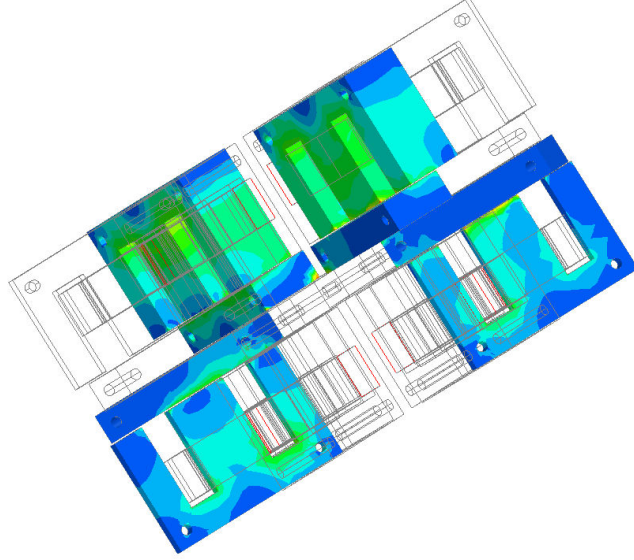
Şekil 5.1. Maxwell 3D alan simülatörü ile ARM'nin modellenmesi.

Şekil 5.1'de Maxwell 3D alan simülatörü ile tasarlanan 2 x 6/4 disk tipi ARM'ye ait modelleme örneği görülmektedir.



Şekil 5.2. Maxwell 3D alan simülatörü ile R2 (rotor 2) devrede iken akı dağılımı.

Şekil 5.2’de Maxwell 3D alan simülatörü ile sadece R2 (rotor 2) devrede iken yani stator 2’nin enerjilendirilmesi durumunda akı dağılımı görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi bu durumda stator 1 ve rotor 1 devrede değildir.



Şekil 5.3. Maxwell 3D alan simülatörü ile R1 (rotor 1) ve R2 (rotor 2) devrede iken akı dağılımı.

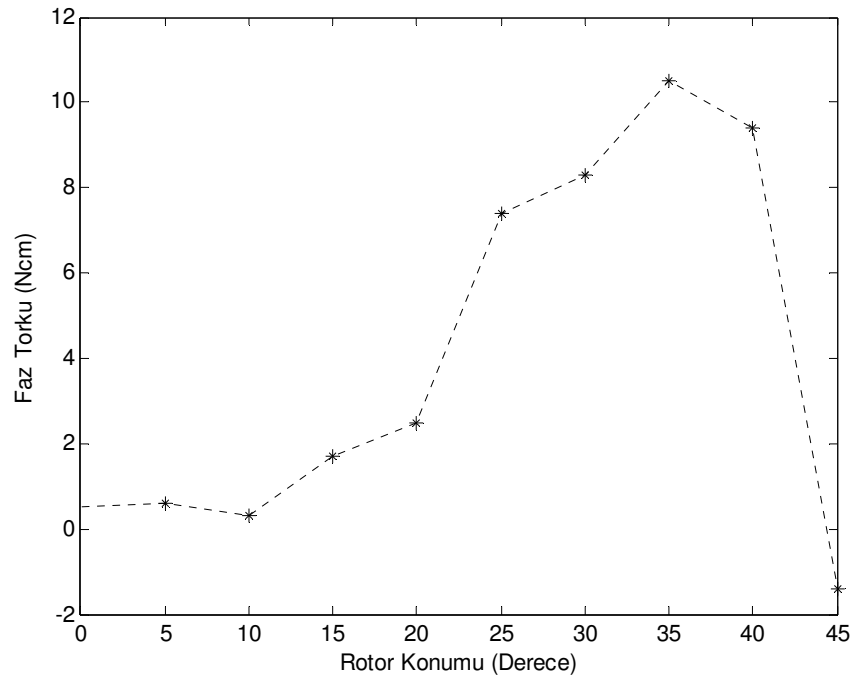
Şekil 5.3’de ise Maxwell 3D alan simülatörü ile R1 ve R2 devrede iken yani hem stator 1 hem de stator 2 enerjilendirilmiş durumdayken akı dağılımı verilmiştir. Burada stator kutuplarının karşılıklı olarak generatör çalışma moduna yani frenlemeye geçmemesi için Şekil 5.3’de de görüldüğü gibi her defasında R2’ye ait sargının enerjisi kesildiğinde R1’e ait bir önceki stator sargısı enerjilendirilmektedir. Motorun dönebilmesi için bu işlem (R2 fazına ait stator sargısından sonra R1, R1 fazına ait stator sargısından sonra ise R2 enerjilendirilmekte) sürekli olarak uygulanmaktadır. Böylece sargıların karşılıklı olarak sırayla enerjilendirilmesi sağlanmakta ve torkun düşmeye başladığı durumlarda stator sargıları karşılıklı olarak birbirini desteklemektedir.

Rotor tam örtüşmeyen pozisyondan örtüşen pozisyona ($0^\circ - 45^\circ$) arasında beşer derecelik açılarla mil ekseninde saat yönünün tersine (CCW) döndürülerek her pozisyondaki ani tork değerleri kestirilmiştir. Tablo 5.1’de Maxwell 3D alan simülatöründe; R1, R2 ve her ikisi devrede iken 5’er derecelik açılarla elde edilen ortalama tork değerleri verilmiştir.

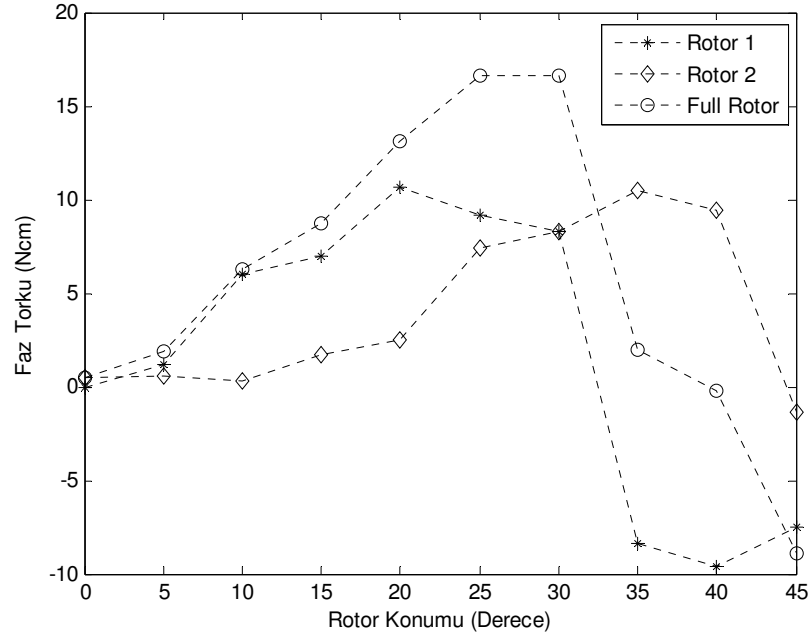
Tablo 5.1. Maxwell 3D alan simülöründe R1, R2 ve her ikisi devrede iken ortalama tork değerleri

Konum	500 AT		Toplam (Ncm)
	R1 (Ncm)	R2 (Ncm)	
0	-0.01	0.5	0.5
5	1.2	0.6	1.88
10	6	0.3	6.3
15	7	1.7	8.77
20	10.7	2.5	13.1
25	9.2	7.4	16.6
30	8.3	8.3	16.6
35	-8.4	10.5	2
40	-9.6	9.4	-0.2
45	-7.5	-1.4	-8.9

Şekil 5.4’de Tablo 1’de de verilen sadece R2 devrede iken elde edilen statik tork grafiği verilmiştir. Burada pozitif olarak üretilen tork değerleri motorun motor çalışma modunu, negatif elde edilen tork değerleri ise generatör çalışma modunu (frenleme) temsil etmektedir. Buna göre 5’er derecelik açılarla elde edilen ortalama tork değerlerine göre; motor çalışma modunda maksimum tork değerinin yaklaşık 35 derece civarında 10.5 Ncm olduğu, yaklaşık 43 dereceden sonra ise generatör çalışma (frenleme) moduna geçtiği görülmektedir.

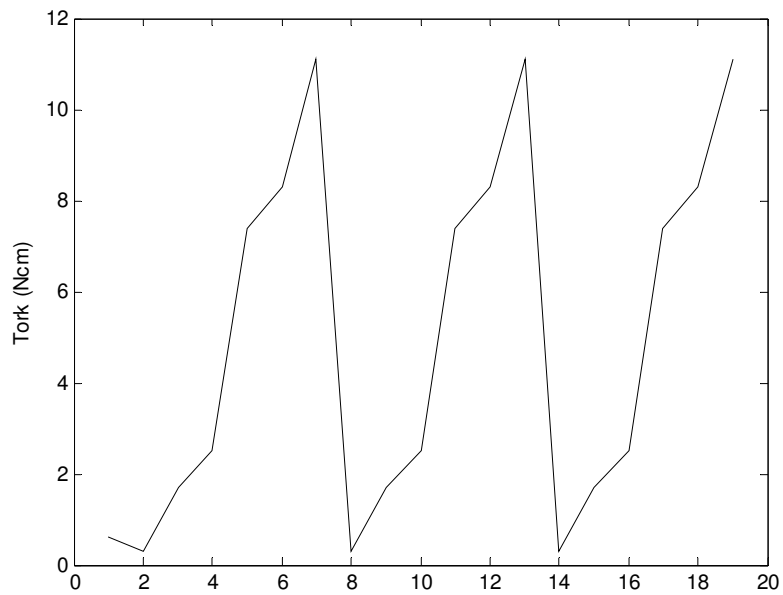


Şekil 5.4. R2 devrede iken statik tork grafiği.

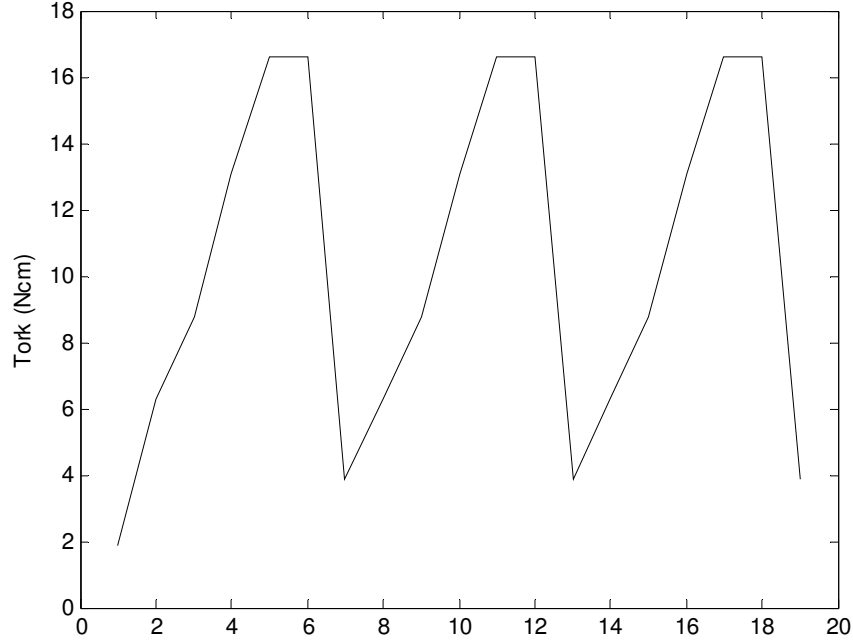


Şekil 5.5. R1 ve R2 devrede iken motora ait statik tork grafiği.

Şekil 5.5’de R1, R2 ve her iki rotor devrede iken elde edilen statik tork grafikleri verilmiştir. Buna göre 5’er derecelik açılarla elde edilen ortalama tork değerlerine göre; motor çalışma modunda maksimum tork değerinin yaklaşık 30 derece civarında 16.6 Ncm olduğu, yaklaşık 35 dereceden sonra ise R1’in negatif tork üretmesinden dolayı ARM’nin de generatör çalışma (frenleme) moduna geçtiği görülmektedir.



Şekil 5.6. 5-35 derece çalıştırma durumu için R2’ye ait tork dalgalanması.



Şekil 5.7. 5-35 derece çalıştırma durumu için iki rotora ait tork dalgalanması.

Şekil 6 sadece R1 ve Şekil 7’de ise her iki rotor (R1 ve R2) devrede iken motorun pozitif moment ürettiği 5-35 derece çalışma durumu için tork dalgalanmasının grafiği verilmiştir. Buna göre elde edilen dalgalanmalar aşağıda hesaplanmıştır.

$$R2_{ort} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}} = \frac{10.5 - 0.3}{10.5} = \% 97.14$$

$$RT_{ort} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}} = \frac{16.6 - 3.88}{16.6} = \% 76.62$$

Rotor 2 Ortalama Tork Değeri = 4.974 Ncm

Full Rotor Ortalama Tork Değeri = 10.402 Ncm

Benzetim sonuçlarının değerlendirilmesi yapıldığında;

- Şekil 5.4’e bakıldığında motorun 5-35 derece çalıştırma durumu için pozitif tork ürettiği, ancak 35 dereceden sonra özellikle R1’in generatör çalışma durumuna geçmesinden dolayı tork değerinde düşme olduğu,
- Rotor 2’ye ait dalgalanmanın %97 (Şekil 5.6), ortalama tork değerinin 4.974 Ncm olduğu,

- Hem R1 hem R2 devrede iken ise dalgalanmanın %76 (Şekil 5.7), ortalama tork değerinin 10.402 Ncm olduğu,
- Her iki rotor devrede iken tekli çalışmaya göre tork dalgalanmasındaki iyileşmenin yaklaşık %20'ler civarında olduğu,
- Ayrıca her iki rotor devrede iken tork dalgalanmasında elde edilen iyileşmeye paralel olarak ortalama tork değerinde de iyileşmenin gerçekleştiği ortaya konulmuştur.

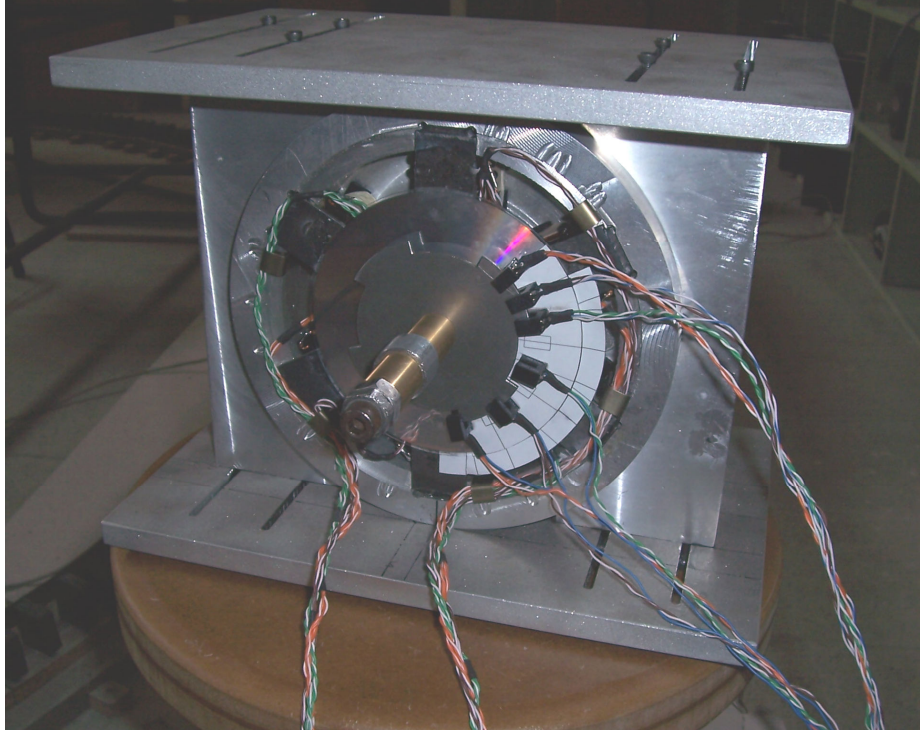
5.2. Deneysel Çalışmalar-1

Bu kısımda, moment dalgalılığını enazlamaya yönelik benzetim sonuçlarından elde edilen sonuçların uygulanabilirliği araştırılmıştır. Bu amaca uygun olarak bir deney düzeneği gerçekleştirilmiş, devamında deney düzeneğine ilişkin ayrıntılar ve yapılan deneysel çalışmanın sonuçları verilmiştir.

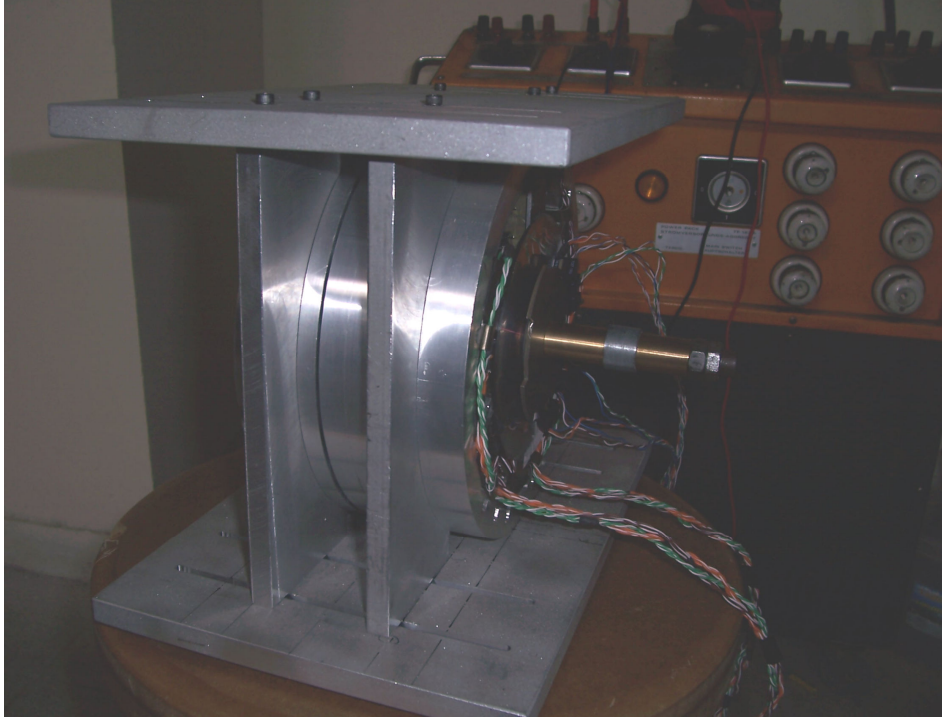
Birinci çalışmada, motora ait R1'e ait hava aralığı 0,5mm, R2'ye ait hava aralığı 1,5mm olarak ölçülmüş, ancak R2'ye ait hava aralığında gerekli düzeltmeler yapılmadan önce (olması gereken 0,5mm), yüksek hava aralığının ne gibi sonuçlar oluşturacağını incelemek amacıyla deneysel çalışmalar-1 gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmada kontrol devresi sadece 3 fazlı bir motoru kontrol edebilecek düzeyde olduğundan, konum sensörleri sadece R2 (rotor 2)'ye yerleştirilmiş olup, sadece R2 devrede iken (Şekil 5.2) ortalama tork değeri veya her iki stator da aynı anda devrede iken (Şekil 5.3) ortalama toplam tork değerleri elde edilmiştir.

Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da deney çalışmalarına ait resimler görülmektedir. Burada dinamik tork ölçüm sistemi oluşturulamadığından deneysel çalışmaların tümü statik tork ölçülmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir.



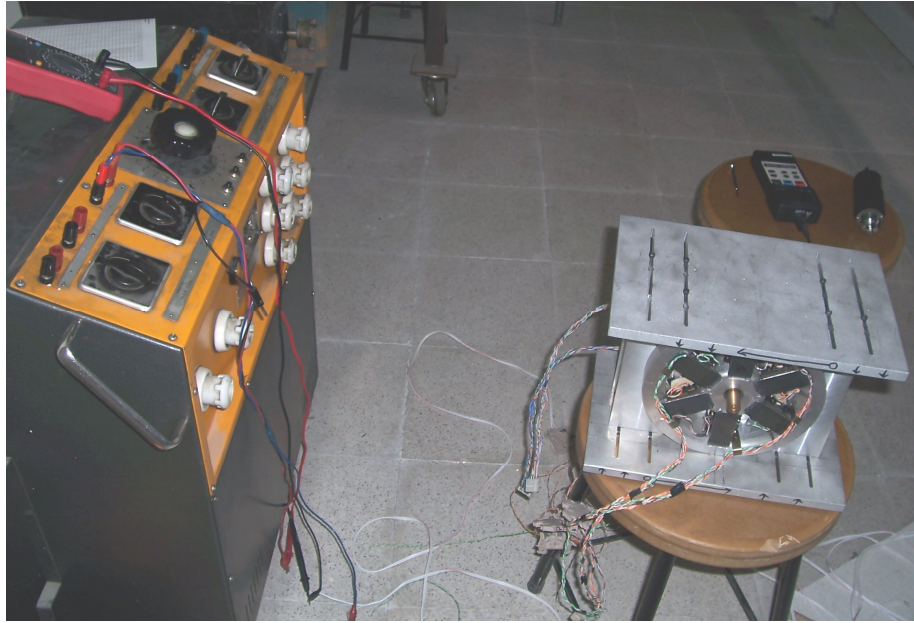
Şekil 5.8. Tasarımı yapılan 2 x 6/4 disk tipi ARM için tork ölçüm noktasının görünümü.



Şekil 5.9. Tasarımı yapılan 2 x 6/4 disk tipi ARM'nin yandan görünümü.



Şekil 5.10.a. Tasarımı yapılan 2 x 6/4 disk tipi ARM'ye ait deney düzeneği-1.

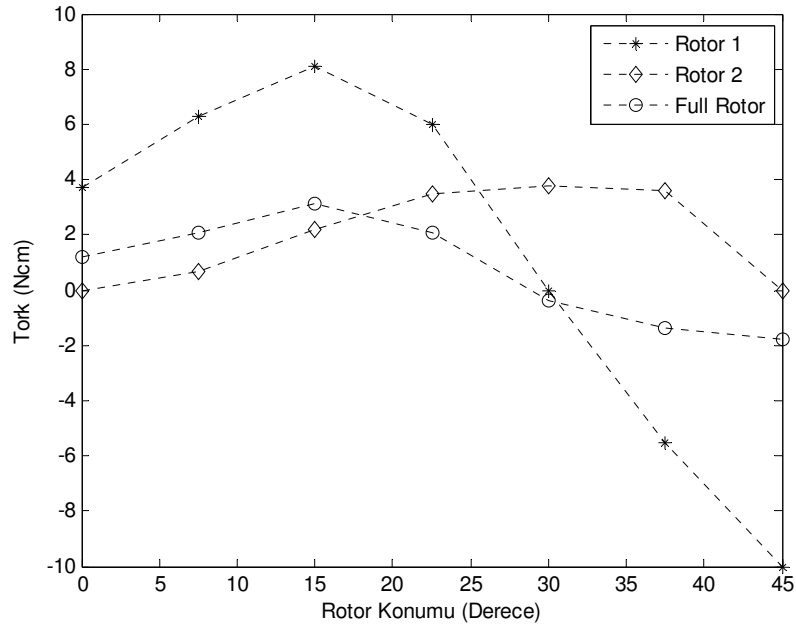


Şekil 5.10.b. Tasarımı yapılan 2 x 6/4 disk tipi ARM'ye ait deney düzeneği-2.

Oluşturulan deney düzeneğinde referans akım değeri sargı başına 5 A, faz başına ise 10A olarak belirlenmiş ve buna göre elde edilen sonuçlar Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Toplam 10 A akım değerinde ölçülen deneysel değerler-1

	10 A	10 A	
Konum	R1 (Ncm)	R2 (Ncm)	Toplam (Ncm)
0	3.7	0	1.2
7.5	6.3	0.7	2.1
15	8.1	2.2	3.1
22.5	6.0	3.5	2.1
30	0	3.8	-0.4
37.5	-5.5	3.6	-1.4
45	-10	0	-1.8



Şekil 5.11. Toplam 10A için statik tork grafiği-1.

Tablo 5.2 ve Şekil 5.11 incelendiğinde, R2'ye ait hava aralığının yüksek olmasından dolayı motorun özellikle de R2'nin istenilen torku üretmediği görülmektedir.

Deneysel çalışmalar-1'e ait sonuçların değerlendirilmesi yapıldığında;

- Şekil 5.11'e bakıldığında motorun 0-30 derece çalışma durumu için pozitif tork ürettiği, ancak 30 dereceden sonra özellikle R1'in generatör çalışma durumuna geçmesinden dolayı tork değerinin negatif olduğu,
- Rotor 2'ye ait hava aralığının 1,5 mm olmasından yani R2'ye ait hava aralığının büyük değerde olması endüktans değerinin düşük olmasına dolayısı ile moment değerinin düşük olmasına neden olmakta ve bu nedenle de hava aralığının azaltılması gerektiği tespit edilmiştir.

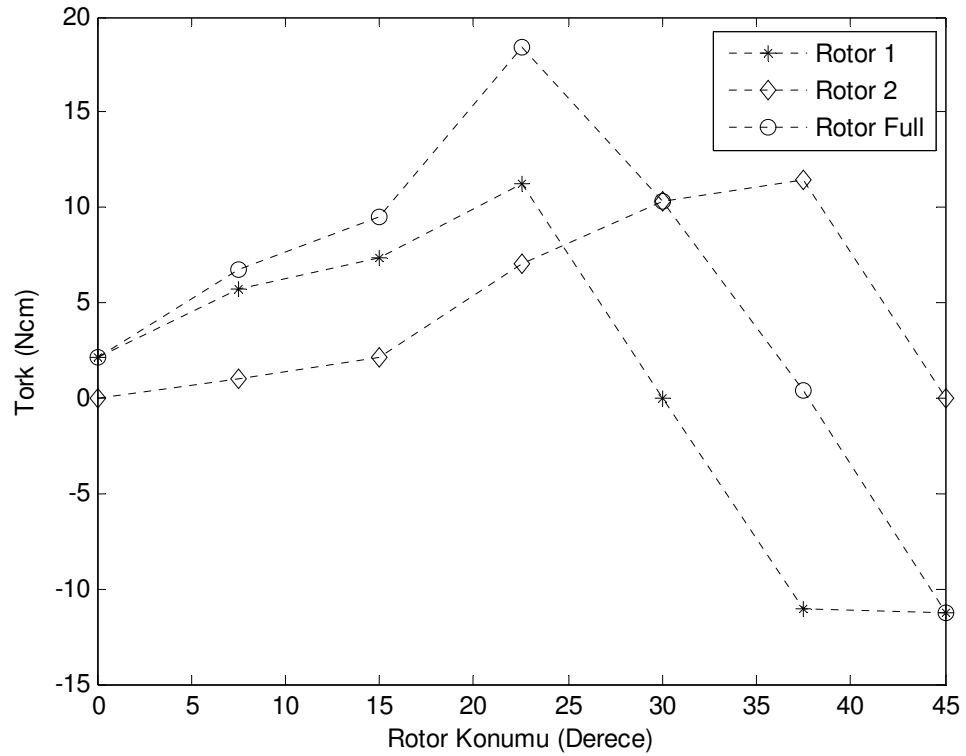
5.3. Deneysel Çalışmalar-2

İkinci çalışmada ise R2'ye ait hava aralığı 0,5mm olacak şekilde tasarım düzeltmesi yapılmış, R1 ile R2'nin hava aralıklarının eşit olması sağlanmış ve bu durumda elde edilen sonuçların irdelemesi yapılmıştır.

Burada deney çalışmaları-1'de oluşturulan deney düzeneği kullanılmış ve yine referans akım değeri faz başına 10A olarak belirlenmiştir. Buna göre elde edilen sonuçlar Tablo 5.3'de, elde edilen grafik ise Şekil 5.12'de verilmiştir.

Tablo 5.3. Toplam 10 A akım değerinde ölçülen deneysel değerler-2

Konum	10 A		Toplam (Ncm)
	R1 (Ncm)	R2 (Ncm)	
0	2.1	0	2.1
7.5	5.7	1.0	6.7
15	7.4	2.1	9.5
22.5	11.3	7.1	18.4
30	0	10.3	10.3
37.5	-11.1	11.5	0.4
45	-11.3	0	-11.3



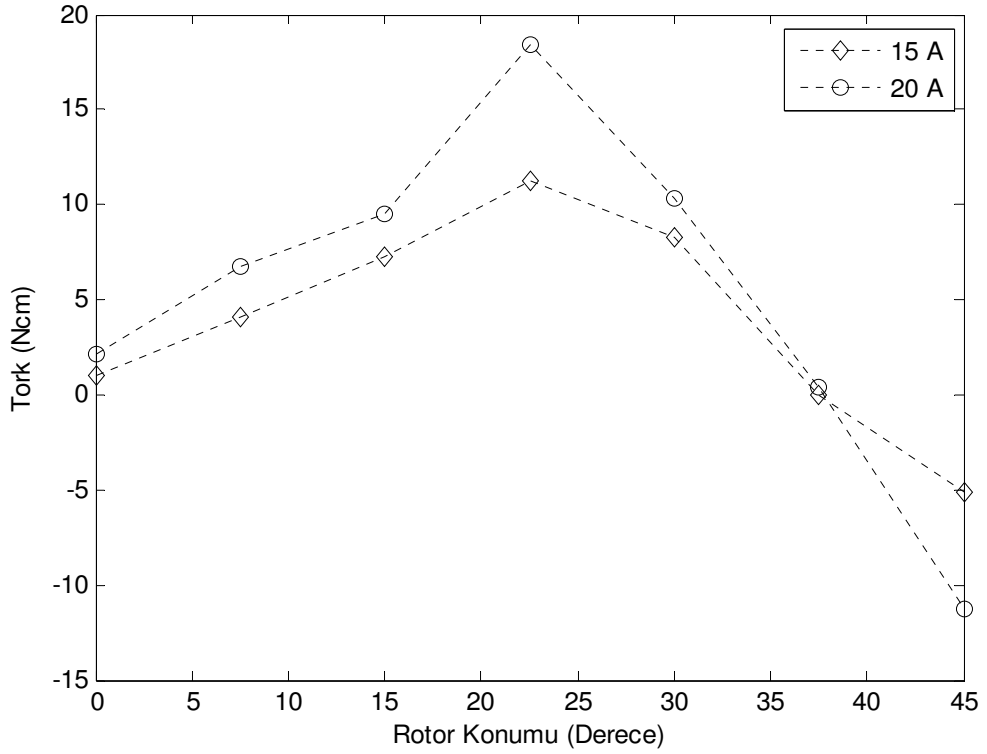
Şekil 5.12. Toplam 10A için statik tork grafiği-2.

Deneysel çalışmalar-2’de her iki rotor devrede iken akımın tork değerine etkisi de incelenmiştir. Buna göre her iki rotor devrede iken her bir faza toplam 15 A ve 20 A uygulanmış, elde edilen değerle Tablo 5.4’de verilmiştir.

Tablo 5.4. Toplam 15 A - 20 A akım değerlerinde ölçülen deneysel değerler-3

	15 A	20 A
Konum	Toplam (Ncm)	Toplam (Ncm)
0	1.0	2.1
7.5	4.1	6.7
15	7.3	9.5
22.5	11.3	18.4
30	8.3	10.3
37.5	0	0.4
45	-5.1	-11.3

Her iki rotor devrede iken toplam 15 A - 20 A akım değerleri için ölçülen statik tork grafiği Şekil 5.13’de verilmiştir.



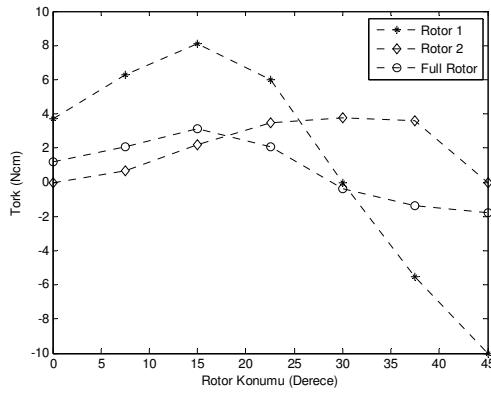
Şekil 5.13. R1 ve R2 devrede iken toplam 15 A - 20 A akım değerleri için ölçülen statik tork grafiği-3.

Deneysel çalışmalar-2'ye ait sonuçların değerlendirilmesi yapıldığında ise;

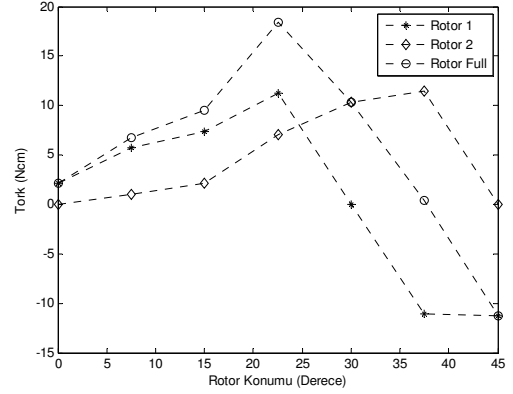
- Şekil 5.12'ye bakıldığında motorun 0-35 derece çalıştırma durumu için pozitif tork ürettiği, ancak 35 dereceden sonra özellikle R1'in generatör çalışma durumuna geçmesinden dolayı tork değerinin negatif olduğu,
- Hava aralıklarının eşitlenmesinden dolayı her iki rotor devrede iken tekli çalışmaya göre ortalama tork değerinde iyileşmenin gerçekleştiği ortaya konulmuş,
- Şekil 5.13'den görüldüğü gibi akım değerinin artırılmasıyla ortalama tork değerinde artış olduğu görülmektedir.

5.4. Deneysel Çalışmalar-1 ile Deneysel Çalışmalar-2'nin Karşılaştırılması

İki çalışma arasındaki tek fark, deneysel çalışmalar-1'de R2'ye ait hava aralığının 0,5mm yerine 1,5mm olmasıdır. Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'de verilen sonuçlar ve grafikleri incelendiğinde, hava aralığının ARM'ler için çok önemli bir kriter olduğu görülmektedir. Buna göre hava aralığının beklenenden yüksek olması durumunda elde edilen tork değerinde hava aralığının değerine de bağlı olarak kayda değer bir düşme olduğu ve motorun istenilen torku üretmediği tespit edilmiştir. Değerlendirmeye ait grafikler Şekil 5.14'te verilmiştir.



(a)

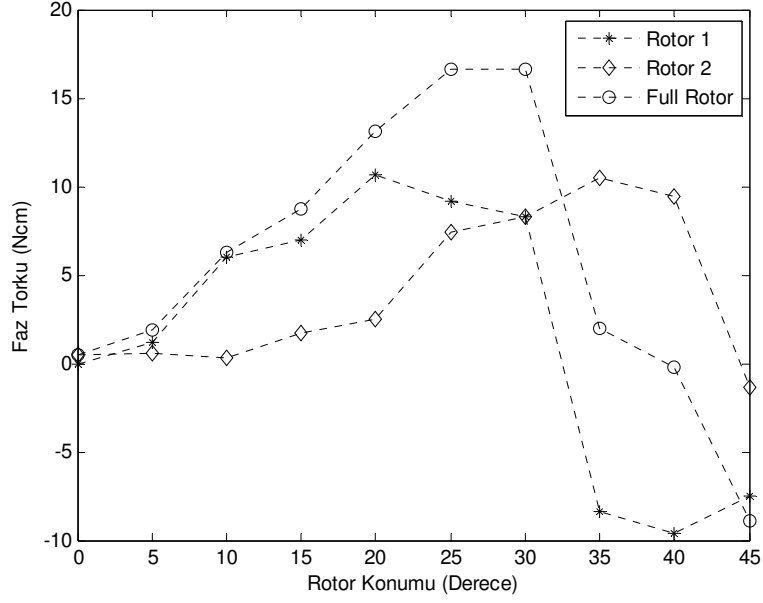


(b)

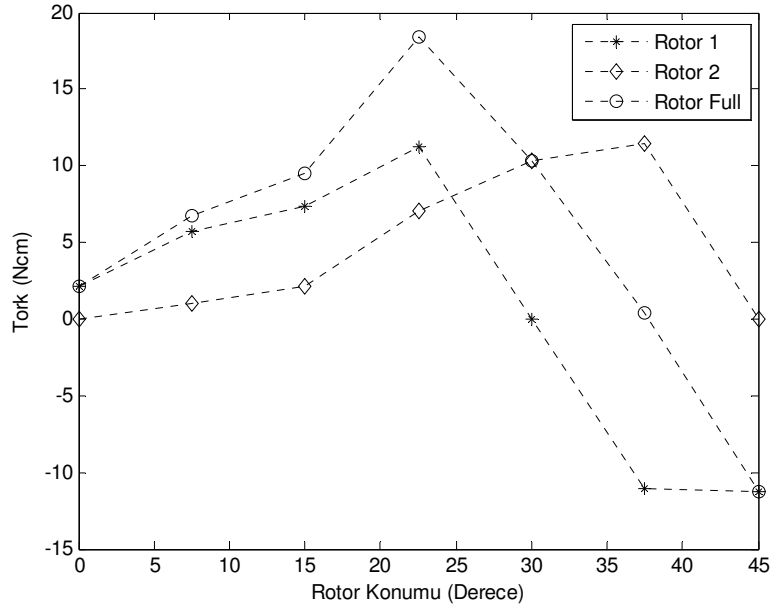
Şekil 5.14. Deneysel çalışmalar-1 ile deneysel çalışmalar-2'nin karşılaştırılması.
(a) Hava aralığı 1,5mm (b) Hava aralığı 0,5mm

5.5. Benzetim Sonuçları ile Deneysel Çalışmaların Karşılaştırılması

Kolay bir karşılaştırma yapabilmek için benzetim sonuçları, deneysel sonuçlar ile aynı bölümde olacak şekilde düzenlenmiştir. Bilgisayar ortamında oluşturulan ARM modelinin benzetiminden elde edilen sonuçlar ile hava aralıklarının eşit olması ile elde edilen sonuçların (deneysel çalışmalar-2) tutarlı olduğu Şekil 5.15’de görülmektedir.



(a) Maxwell 3D alan simülasyonu ile R1 ve R2 devrede iken motora ait statik tork grafiği.



(b) Toplam 10A için ölçülen deneysel verilere ait statik tork grafiği.

Şekil 5.15. Benzetim sonuçları ile deneysel çalışmalar-2'nin karşılaştırılması.

6. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

ARM basit yapılı, üretim maliyeti düşük, hata toleransı yüksek ve güvenilir bir motordur. Diğer birçok elektrik motorundan farklı olarak bir güç elektroniği devresine gereksinim duymaktadır. Hız-moment kontrolü gerektiren uygulamalarda kullanılmak üzere uygun bir seçenek olarak ortaya çıkmaktadır.

Birçok avantaja sahip olmalarına rağmen en temel sorunu, titreşimli moment üretmesi ve yüksek akustik gürültü ile çalışmasıdır. Bu sorunlara yönelik gerçekleştirilen iyileştirme çalışmaları; ARM'nin manyetik yapısında yapılan değişiklikler ile ARM'nin kontrol devresi ve kontrol tekniğinde yapılan değişiklikler olmak üzere iki ana grupta toplanmaktadır.

Bu çalışmada, ARM'lerde moment dalgalılığını oluşturan nedenler incelenerek, motorun manyetik devresi esas alınarak motor tasarımında yapılacak değişikliklerle momentindeki dalgalanmanın azaltılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, "2 x 6/4 Disk Tipi Anahtarlama Relüktans Motor" tasarımı gerçekleştirilmiş ve motorun bilgisayar destekli 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle statik manyetik analizleri yapılmıştır.

DeneySEL çalışmalar ile farklı hava aralıklarında elde edilen tork grafikleri incelendiğinde (Şekil 5.14), hava aralığının ARM'ler için önemli bir kriter olduğu, hava aralığının beklenenden yüksek olması durumunda elde edilen ortalama toplam tork değerinde, hava aralığının değerine de bağlı olarak, kayda değer bir düşme olduğu tespit edilmiştir.

Tasarımı yapılan çift yanlı ARM için önemli bir diğer husus ise, birbirini karşılıklı olarak destekleyen stator sargılarının motor pozisyon sensörleri vasıtasıyla karşılıklı olarak sırayla uygun zamanda enerjilendirilmesi zorunluluğudur. Elde edilen tüm grafikler incelendiğinde (Şekil 15), özellikle 35 dereceden sonra motorun generatör

çalışma moduna (frenleme) geçtiği ve negatif tork ürettiği tespit edilmiştir. Bu durum motor modunda çalışan ARM'ler için istenmeyen bir durumdur.

Bu çalışma ile;

- Tasarımı yapılan motor için, sayısal benzetim sonuçlar ile deneysel ölçümlerin karşılaştırması yapıldığında elde edilen ortalama statik tork değer değişimlerinin tutarlı olduğu,
- Hava aralığının yüksek tork üretmesi istenen ARM'ler için önemli bir kriter olduğu, hava aralığının istenilenden yüksek olması durumunda hava aralığına da bağlı olarak olumsuz sonuçları ortaya çıkardığı,
- Faz sargılarının enerjilendirme sürelerinin motordan elde edilmek istenen momente doğrudan etkisinin olduğu,
- Yeni tasarım çift yanlı ARM ile tek yanlı disk tipi ARM'nin üretilen moment değerleri karşılaştırıldığında, çift yanlı yapıya sahip motorun moment değerinin tek yanlı yapının sağladığı moment değerinin çok üzerinde olduğu,
- Yine çift yanlı yapının tek yanlı disk tipi ARM'ye göre tork dalgalanmasını belirli bir oranda azalttığı, yapılan benzetimlerde ilgili yapı için bu iyileşmenin yaklaşık %20'ler civarında olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak önerilen yeni tasarım çift yanlı ARM ile tek yanlı disk tipi ARM karşılaştırıldığında, hem yüksek ortalama tork değerine sahip hem de düşük tork dalgalanması sağlayan yeni bir disk tipi motor yapısı gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Krishnan, R., Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications, London, CRC Press, 2001.
2. Miller, T.J.E., Switched Reluctance Motors and Their Control, Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford, 1-199, 1993.
3. Polloc, C. and Williams, B.W., Power Converter Circuits for Switched Reluctance Motors with the Minimum Number of Switches, IEE Proceedings , 374-384, 1990.
4. Nasar, S.A., Ofsenani, R., D.C. Switched Reluctance Motor, In Proceedings of the Institution Electrical Engineers, 116(6), 1048, 1969.
5. Bedford, B.D., US Patent No : 3678352 and 3679953, 1972.
6. Unnewehr, L.E. and Koch, W.H., An Axial Air-Gap Reluctance Motor for Variable Speed Applications, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 367-376, 1974.
7. Bausch, H. and Reike, B., Speed and Torque Control of Thyristor-Fed Reluctance Motors, Proceedings ICEM, Vienna, 128.1-128.10, 1978.
8. Lawrenson, P.J., Stephenson, J.M., Blenkinsop, P.T., Corda, J. and Fulton N.N., Variable Speed Switched Reluctance Motors, IEE Proceedings Electrical Power Applications, 253-265, 1980.
9. Srinivas, K.N., Arumugam, R., Static and Dynamic Vibration Analyses of Switched Reluctance Motors Including Bearings, Housing, Rotor Dynamics, and Applied Loads, IEEE Transactions on Magnetics, Volume 40, Issue 4, Part 1, 1911-1919, 2004.
10. Cameron, D.E., Lang, J.H., Umans, S.D., The Origin and Reduction of Acoustic Noise in Doubly Salient Variable-Reluctance Motors, IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 28, Issue 6, 1250 – 1255, Nov.-Dec. 1992.
11. Diril, O., Anahtarlamalı Relüktans Motorda Moment Dalgacılığını Enazlama Üzerine Bir Çalışma, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2000.
12. ÖZOĞLU, Y., Anahtarlamalı Relüktans Motorunda Kutup Başlarına Şekil Vererek Moment Dalgalanmasının Azaltılması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1999.

13. Le Chadenec, J.Y., Geoffroy, M., Multon, B. and Mouchoux, J.C., Torque Ripple Minimisation in Switched Reluctance Motors by Optimisation of Current Waveforms and of Tooth Shape with Copper Losses and 'V.A. Silicon' Constraints, International Conference on Electrical Machines, 3559–3564, 1994.
14. Blaabjerg, F., Nielsen, P., Andersen, L., and Kjaer P.C. : Investigation and Reduction of Acoustical Noise from Switched Reluctance Drives in Current and Voltage Control, International Conference on Electrical Machines, 3589-3594, 1994.
15. Inanç, N., Derdiyok, A., Ozbulur, V. Torque Ripple Minimization of a Switched Reluctance Motor Including Mutual Inductances Via Sliding Mode Control Technique, 1024–1028, 1997.
16. Fahimi, B., Suresh, G., Rahman, K.M., Ehsani, M., Mitigation of Acoustic Noise and Vibration in Switched Reluctance Motor Drive Using Neural Network Based Current Profiling, IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 715-722, 1998.
17. Sanada, M., Morimoto, S., Takeda, Y.: Novel Rotor Pole Design of Switched Reluctance Motors to Reduce the Acoustic Noise, IEEE, 107–113, 2000.
18. Lee, W., Kim, H.S., Kwon, B.I., Kim, B.T., New Rotor Shape Design for Minimum Torque Ripple of SRM Using FEM, IEEE Transactions On Magnetics, 40(2), 754–757, 2000.
19. Rahman, K.M., Steven Schulz, E., Design of High-Efficiency and High-Torque-Density Switched Reluctance Motor for Vehicle Propulsion, IEEE Transactions on Industry Applications, 38(6), 1500–1507, 2002.
20. Nakata, K., Hiramoto, K., Sanada, M., Morimoto, S. ve Takeda, Y., Noise Reduction for Switched Reluctance Motor with a Hole, IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 971-976, 2002.
21. Balaji, M., Vaithilingam, C.A., Kamaraj, V., Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives, Sri Venkateswara College of Engineering, India, 104–107, 2004.
22. Naayagi R.T., Kamaraj V., Minimization of Torque Ripple in Switched Reluctance Machine for Direct Drive Applications, Proceedings of the IEEE Symposium, 388-392, 2005.

23. Xue, X.D., Cheng, K.W.E., Ho, S.L., A Control Scheme of Torque Ripple Minimization for SRM Drives Based on Flux Linkage Controller and Torque Sharing Function, ICPEA '06. 2nd International Conference, 79–84, 2006.
24. Yan Cai Chao Gao, Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Based on BP Neural Network, ICIEA 2007. 2nd IEEE Conference, 1198–1202, 2007.
25. Khalili, H., Afjei, E., Najafi, A., Torque Ripple Minimization in SRM Drives Using Phase/Current Profiles, ACEMP '07. International Aegean Conference, 273–275, Bodrum, 2007.
26. Gobbi, R., Ramar, K., Practical Current Control Techniques for Torque Ripple Minimization in SR Motors, PECon 2008 IEEE 2nd International, 743-748, 2008.
27. Divandari, M., Brazamini, R., Dadpour, A., Jazaeri, M., A Novel Dynamic Observer and Torque Ripple Minimization Via Fuzzy Logic for SRM Drives, ISIE 2009. IEEE International Symposium, 847-852, 2009.
28. Gobbi, R., Ramar, K., Optimisation Techniques for a Hysteresis Current Controller to Minimise Torque Ripple in Switched Reluctance Motors, IEEE, 453–460, 2009.
29. Mutlu, Ü., Anahtarlı Relüktans Motor Sürücü Devre Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, 2006.
30. FENERCİOĞLU, A., Helisel Yapılı Anahtarlama Relüktans Motorun Tasarımı ve Analizi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, 2006.
31. Gizlier, E., Anahtarlı Relüktans Motorunun Manyetik Analizi ve Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2001.
32. Bal, G., Özel Elektrik Makinaları, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 155-175 (2004).
33. Ehsani, M., Husain, I., Ramani, K.R., Galloway, Dual-Decay Converter for Switched Reluctance Motor Drives in Low-Voltage Applications, IEEE Transactions on Power Electronics, 224-230, 1993.
34. Barnes, M., Pollock, C., Power Electronic Converters for Switched Reluctance Drives, IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 13, No. 6, November 1998.
35. Şahin, F., Ertan, H.B., Leblebicioglu, K., Optimum Geometry for Torque Ripple Minimization of Switched Reluctance Motors, IEEE Transactions on Energy Conversion, 15(1):30-39 (2000).

36. Yigit, T., Genetik Uyarlamalı Denetleyici İle Anahtarlamaalı Reluktans Motorun Hız Denetiminin Gerçekleştirilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-100 (2005).
37. Sefa, İ., Sliding Mode Yaklaşımı ile Anahtarlamaalı Relüktans Motorun Hız Kontrolü, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 1997.
38. Gürdal, O., Elektrik Makinalarının Tasarımı, Nobel Yayın, İstanbul, 2003.
39. Lawrenson, P.J., Stephenson , J.M., Blenkinsop, P.T., Corda, J., Fulton, N.N. (1980). Variable Speed Switched Reluctance Motors , IEE Proc., 127(4), 253-265.
40. Miller, T. J. E. (2002). Optimal design of switched reluctance motors, IEEE Trans. Ind. Electronics, 49(1), 15-27.
41. Ansoft Corporation, Maxwell 3D – Technical Notes, 656-718 (2002).

ÖZGEÇMİŞ

Aykut EMİRE 1978 yılında Zonguldak'ın Çaycuma ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Amasra'da tamamladı. 1992 yılında Bartın Endüstri Meslek Lisesi Elektronik Bölümünü kazandı ve 1995 yılında mezun oldu. 1996 -1998 yılları arasında Marmara Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Elektronik Bölümünde okudu. 1998'de kazandığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümünden 2003 yılında mezun oldu. 2004 yılında Kara Kuvvetleri Komutanlığı'na bağlı 8'nci Ana Bakım Merkezi Komutanlığı'nda askerlik görevini tamamladı. 2005 yılında Mühendis Subay olarak Hava Kuvvetleri Komutanlığı'na katıldı ve aynı yıl 2'nci HİBM K.lığına atandı. Eylül 2007 tarihinde Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Halen aynı bölümde eğitimine devam etmektedir.

Adres : 2'nci HİBM.K.lığı
Uçak FASBAT Müdürlüğü
38070 - KAYSERİ

Telefon : 0 352 351 21 06 - 5142

e-posta : emireemire@yahoo.com.tr