

**5-FAZLI U-TİPİ SEGMENTAL ROTORLU BİPOLAR UYARTIMLI
10/8 ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN TASARIMI VE
UYGULAMASI**

Durmuş UYGUN

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NİSAN 2012
ANKARA**

Durmuş UYGUN tarafından hazırlanan “5-FAZLI U-TİPİ SEGMENTAL ROTORLU BİPOLAR UYARTIMLI 10/8 ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN TASARIMI VE UYGULAMASI” adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Güngör BAL

Tez Danışmanı, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Güngör BAL

Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.



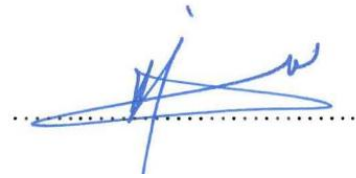
Doç. Dr. Ramazan BAYINDIR

Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.



Doç. Dr. İres İSKENDER

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.



Doç. Dr. İbrahim SEFA

Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.



Doç. Dr. Aydın ÇETİN

Elektronik-Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.

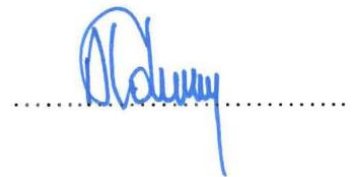


Tarih: .../.../2012

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Durmuş UYGUN

**5-FAZLI U-TİPİ SEGMENTAL ROTORLU BİPOLAR UYARTIMLI
10/8 ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN TASARIMI VE
UYGULAMASI
(Doktora Tezi)**

Durmuş UYGUN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Nisan 2012

ÖZET

Bu tez çalışmasında, 5-fazlı 10/8 kutup konfigürasyonlu yeni bir segmental tip anahtarlama relüktans motor (ST-ARM) tasarlanmış ve üretilmiştir. Tasarlanan ST-ARM; eşit aralıklı çıkık kutupları olan bir stator ve alüminyum içerisine gömülmüş U şeklinde çekirdeklere sahip bir rotordan oluşmaktadır. ST-ARM'nin çalışması; bitişik kutupların kısa akı yolları oluşturarak her anda sırasıyla enerjilendirilmesi prensibine dayanmaktadır. Tasarlanan prototipin performans karakteristikleri sonlu elemanlar metodu (SEM) ile incelenmiştir. Elektrik makinalarının üretiminde izlenen tasarım ve benzetim prensipleri sırasıyla klasik ARM ve tasarlanan ST-ARM'ye uygulanmıştır. Bahsi geçen yapıya ve faz enerjilendirme şemasına sahip ST-ARM aynı boyuttaki klasik ARM'nin yaklaşık 2,10 katı moment üretmiştir. Sonuç olarak, tasarlanan yeni ARM'nin karşılaştırmada kullanılan çıkış momenti, toplam ağırlık, birim güç yoğunluğu gibi kıstaslarda daha üstün olduğu ve amaçlanan modelin uzay ve askeri uygulamalar gibi yüksek moment gereksinimi olan ve ağırlığın önem arz ettiği uygulamalarda uygun olacağı kanıtlanmıştır.

Bilim Kodu : 626.01.01
Anahtar Kelimeler : Segmental rotor, iki faz enerjilendirme, anahtarlama.
Sayfa Adedi : 157
Tez Yöneticisi : Prof.Dr. Güngör BAL

**DESIGN AND APPLICATION OF 5-PHASE BIPOLAR EXCITED 10/8
SWITCHED RELUCTANCE MOTOR WITH U-TYPE SEGMENTAL
ROTOR PAIRS
(PhD. Thesis)**

Durmuş UYGUN

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
April 2012**

ABSTRACT

In this thesis study, a novel 5-phase segment-type switched reluctance motor (ST-SRM) with 10/8 pole configuration has been designed and produced. The designed ST-SRM includes a stator having evenly spaced salient poles and a rotor having segmental U-type cores which are embedded in aluminum block. The operation of ST-SRM depends on exciting two adjacent phases respectively at all times by creating short flux loops. The performance characteristics of the designed prototype are investigated by finite element method (FEM). The design and simulation principles considered while designing electrical machines, are applied to conventional SRM and designed ST-SRM, respectively. The ST-SRM having foregoing structure and phase excitation scheme substantially provides 2,10 times more output torque than a same-sized conventional SR motor. As a result, it is proved that the novel SRM is superior among the criterias used in comparison such as output torque, total weight and unit power density and the purposed model is particularly well suited for high torque and weight constrained applications like aerospace and military applications.

Science Code : 626.01.01
Key Words : Segmental rotor, two-phase excitation, switching.
Number of Pages : 157
Adviser : Prof.Dr. Güngör BAL

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren sayın hocam Prof. Dr. Güngör BAL'a, yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım hocam Doç. Dr. Erdal BEKİROĞLU'na, değerli arkadaşlarım Yakup GÜNGÖR ile Cemil OCAK'a ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan biricik aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xx
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR KAPSAMI, ÇALIŞMANIN KONUSU VE BİLİME KATKISI....	3
2.1. Anahtarlamaalı Relüktans Motorun Tarihçesi ve Konu ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	3
2.2. Anahtarlamaalı Relüktans Motorun Yapısı ve Temel Çalışma Prensibi	8
2.2.1. Temel özellikler.....	8
2.2.2. Temel çalışma prensibi.....	10
2.2.3. Çalışma prensibinin rotor konumlarına bağlı olarak açıklanması.....	13
2.2.4. ARM’de moment üretimi, endüktans ve momentin rotor konumu ile bağıntısı	15
2.3. Anahtarlamaalı Relüktans Motorların Avantaj ve Dezavantajları	19
2.4. Anahtarlamaalı Relüktans Motorların Diğer Motorlarla Karşılaştırılması ve Kullanım Alanları.....	21
2.5. Tezin Amacı ve Bilime Katkısı	23
3. KLASİK VE TASARLANAN ANAHTARLAMAalı RELÜKTANS MOTORLARIN MODELİ VE MANYETİK EŞDEĞERİ	24

Sayfa

3.1. 5-Fazlı Klasik Anahtarlamaalı Relüktans Motor Modeli.....	24
3.2. 5-Fazlı U-Tipi Segmental Rotorlu Bipolar Uyartımlı 10/8 Anahtarlamaalı Relüktans Motorun Modeli	27
3.3. 5-Fazlı Segmental Tip ARM'nin Doğrusal Modeli	29
3.4. 5-Fazlı Segmental Tip ARM'nin Görünür Endüktans Profilleri.....	33
3.5. 5-Fazlı Segmental ARM'de Moment Üretimi.....	36
3.6. Sonuç	37
4. 5-FAZLI 10/8 SEGMENTAL TİP ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN TASARIMI	38
4.1. Giriş.....	38
4.2. Yeni 5-fazlı Segmental Tip ARM'nin Tasarım Prosedürü	40
4.2.1. Hava aralığının seçimi ve “ k_l ” ve “ k_g ” katsayılarının doğrulanması....	40
4.2.2. Rotor ve stator kutup açıları	41
4.2.3. Stator ve rotor kutuplarının yay genişliği, stator boyunduruğunun kalınlığı ve stator kutup uzunluğu	42
4.2.4. Kutup geometrisi ve kutup yayları	43
4.2.5. B-H karakteristiği	45
4.2.6. Sargı tasarımı.....	45
4.2.7. Çakışık ve çakışık olmayan durumlardaki endüktans değerlerinin hesaplanması	47
4.3. Sonuç.....	48
5. TASARLANAN MOTORUN SONLU ELEMANLAR METODU (FINITE ELEMENTS METHOD) İLE MANYETİK ANALİZİ.....	50
5.1. Giriş.....	50
5.2. Tasarımın Son Durumu	55

Sayfa

5.3. 5-Fazlı 10/8 Konfigürasyonlu Segmental ARM Modelinin 3D Manyetik Analizi	56
5.4. 5-Fazlı 10/8 Konfigürasyonlu Segmental ARM Modelinin 2D Manyetik Analizi ve Klasik 5-Faz ARM ile Karşılaştırılması	58
5.4.1. Akı dağılımlarının karşılaştırılması.....	59
5.4.2. Benzetim sonuçları	65
5.5. Sonuç ve Değerlendirme	72
6. 5-FAZLI 10/8 KONFIGÜRASYONLU SEGMENTAL TİP ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN FABRİKASYONU	74
6.1. Giriş.....	74
6.2. Fabrikasyon Süreci.....	75
6.2.1. Silisli sacların işlenmesi	75
6.2.2. Alüminyum blok prosesi ve presleme işlemleri	78
6.2.3. Mil prosesi ve kalite kontrol işlemleri.....	78
6.2.4. Statorun paketlenmesi, sarımı ve motorun son hali	81
6.3. Sonuç.....	83
7. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLARDA KULLANILAN DÖNÜŞTÜRÜCÜLER VE KONFIGÜRASYONLARI.....	84
7.1. ARM’lerde Kullanılan Dönüştürücü Konfigürasyonları	84
7.1.1. Asimetrik köprü dönüştürücü	85
7.1.2. Sönümleme dirençli (R-Dump) dönüştürücü	87
7.1.3. Bifilar tip dönüştürücü	88
7.1.4. Ayrık beslemeli dönüştürücü	89
7.1.5. “q” anahtar ve “2q” diyot konfigürasyonlu dönüştürücüler	90

Sayfa

7.1.6. Bağımsız akım kontrollü “q” anahtar ve “2q” diyot konfigürasyondaki dönüştürücüler.....	91
7.1.7. “q+1” anahtar ve diyot konfigürasyonlu dönüştürücüler	92
7.1.8. İki seviyeli dönüştürücüler	95
7.1.9. Bipolar ARM sürücüleri için dönüştürücü çözümleri	97
8. SÜRÜCÜ DEVRE TASARIMI	102
8.1. Kontrol Sisteminin Genel Yapısı	102
8.2. Transformator ve Besleme Devresi.....	105
8.3. Dönüştürücü Devresi.....	107
8.4. Kontrol ve Programlama Devresi.....	109
8.4.1. RS232 iletişim protokolü ve özellikleri	112
8.5. MOSFET Sürücü Devresi	114
8.6. Rotor Pozisyonunu Algılamada Kullanılan Optik Sensörler	116
8.7. Akım Algılama Devresi	119
9. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve KARŞILAŞTIRMA.....	121
9.1. Boşta Çalışma Deneyi	122
9.2. Yüklü Çalışma Deneyleri.....	125
9.2.1. 35 V bara geriliminde elde edilen sonuçlar.....	127
9.2.2. 75 V bara geriliminde elde edilen sonuçlar.....	129
9.3. Motor Sürücü Devresinde Hata Takibi	130
9.4. Deney Sonuçları ile Benzetim Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	131
10. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	134
KAYNAKLAR	137

Sayfa

EKLER.....	150
EK-1 FEMM 4.0 LUA Scripting Programında Klasik ARM için Yazılan 0-90 Derecelik Dönme Scripti.....	151
EK-2 Klasik ARM İçin Yazılan A-Fazı Akım Fonksiyonu	152
EK-3 Yeni Segmental ARM için Yazılan 0-90 Derecelik Dönme Scripti	153
EK-4 Yeni Segmental ARM İçin Yazılan Akım Fonksiyonları.....	154
ÖZGEÇMİŞ	155

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. ARM'nin diğer motorlarla karşılaştırılması.....	22
Çizelge 3.1. Fazların dönme açısına bağlı olarak çalışma durumları	33
Çizelge 4.1. Başlangıç parametreleri	39
Çizelge 4.2. Tasarım sabiteleri	40
Çizelge 4.3. Fiziksel tasarım parametreleri.....	43
Çizelge 5.1. Tasarımların performans karşılaştırmaları	54
Çizelge 5.2. 90 derecelik dönüş boyunca fazlardaki akım yönlerinin değişimi	56
Çizelge 5.3. Klasik ve segmental tip ARM'nin moment ve manyetik alan enerjisi	65
Çizelge 5.4. Klasik ARM ve Yeni Parçalı Tip ARM çıkış değerleri	72
Çizelge 6.1. Üretimi tamamlanan 5-faz 10/8 konfigürasyonlu bipolar uyarımlı segmental tip ARM'nin son parametreleri	83
Çizelge 7.1. ARM dönüştürücü konfigürasyonlarının sınıflandırılması.....	85
Çizelge 8.1. 90 derecelik dönüş boyunca fazlardaki akım yönlerinin değişimi ..	108
Çizelge 8.2. Lojik sensör çıkışlarına bağlı olarak motor fazlarının durumu.....	118
Çizelge 9.1. Faz akımının değişimine bağlı olarak motorun benzetim ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması	133

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. 8/6 4-fazlı klasik ARM'nin kesit görünüşü	10
Şekil 2.2. Anahtarlama relüktans motorun nüve yapısı baz alınarak basit gösterimi ve manyeto motor kuvvet-akı eğrileri	11
Şekil 2.3. Artan mekanik enerji	12
Şekil 2.4. Stator-rotor çakışık durumda iken fazların durumu ve stator-rotorda oluşan manyetik akı yollarının dağılımı	13
Şekil 2.5. Stator-rotor çakışık olmayan durumda iken fazların durumu ve stator-rotorda oluşan manyetik akı yollarının dağılımı	14
Şekil 2.6. Faz endüktansının rotor konumuna göre değişimi	15
Şekil 2.7. ARM endüktans eğrisi	16
Şekil 2.8. Bir rotor kutup adımı için endüktans, faz akımı ve moment değişimleri	18
Şekil 3.1. 10/8 Konfigürasyonlu 5-fazlı klasik ARM'nin kesit görünüşü	25
Şekil 3.2. Sadece "D" fazı enerjilendirildiğinde 5-fazlı klasik ARM'de ortaya çıkan akı dağılım durumu	26
Şekil 3.3. Yeni 5-fazlı 10/8 Kutuplu ARM'nin kesitsel gösterimi	27
Şekil 3.4. Sadece A ve B fazları uygun polarite oluşturacak şekilde enerjilendirildiğinde yeni ARM'de oluşan akı yollarının durumu	28
Şekil 3.5. Tasarlanan ARM'nin manyetik eşdeğeri	30
Şekil 3.6. İdeal akım kaynakları kullanıldığında yeni ARM'nin eşdeğer devresi ..	33
Şekil 3.7. Sadece B ve C fazları enerjilendirildiğinde eşdeğer devrenin durumu...	34
Şekil 3.8. Sadece B ve C fazları enerjilendirildiğinde eşdeğer devrenin basitleştirilmiş hali	34
Şekil 4.1. ARM'lerde kullanılan kutup geometrilerinin ayrıntıları	44
Şekil 4.2. İlk tasarım parametreleri kullanıldıktan sonra statorun son durumu	44

Şekil	Sayfa
Şekil 4.3. M530-50A silisli sacın B-H karakteristiği	45
Şekil 4.4. Sarım alanının hesaplanması	47
Şekil 5.1. Stator-rotor etkileşim alanındaki akı çizgisi	52
Şekil 5.2. Tasarım 1 ve hava aralığındaki akı yoğunluğunun değişimi	52
Şekil 5.3. Tasarım 2 ve hava aralığındaki akı yoğunluğunun değişimi	53
Şekil 5.4. Tasarım 3 ve hava aralığındaki akı yoğunluğunun değişimi	53
Şekil 5.5. Tasarım 4 ve hava aralığındaki akı yoğunluğunun değişimi	54
Şekil 5.6. Rotorun boyutlandırılmasının ardından modelin son durumu ve sargıların harf-rakam kombinasyonu ile ifade edilmesi	55
Şekil 5.7. Tasarlanan motorun 3D Maxwell katı modeli	56
Şekil 5.8. B-C fazları enerjili iken kuvvet çizgilerinin durumu (ön görünüş)	57
Şekil 5.9. B-C fazları enerjili iken kuvvet çizgilerinin durumu (üst görünüş).....	57
Şekil 5.10. B-C fazları enerjili iken manyetik alan enerjisinin dağılımı.....	58
Şekil 5.11. Klasik 5-faz ARM'nin çakışık olmayan durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu.....	59
Şekil 5.12. Klasik 5-faz ARM'de rotorun çakışık olmayan durumdan statora sadece 2° yaklaştığı durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu	60
Şekil 5.13. Klasik 5-faz ARM'de rotorun çakışık olmayan durumdan statora 4° yaklaştığı durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu	60
Şekil 5.14. Klasik 5-faz ARM'de rotorun çakışık olmayan durumdan statora 6° yaklaştığı durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu	61
Şekil 5.15. Klasik 5-faz ARM'de rotorun çakışık olmayan durumdan statora 8° yaklaştığı durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu	61
Şekil 5.16. Klasik 5-faz ARM'de rotorun çakışık olmayan durumdan statora 10° yaklaştığı durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu	61
Şekil 5.17. Klasik 5-faz ARM'nin tam çakışık durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu.....	62

Şekil	Sayfa
Şekil 5.18. Segmental tip ARM'nin çakışık olmayan durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu.....	62
Şekil 5.19. Segmental tip ARM'de rotorun çakışık olmayan durumdan statora sadece 2° yaklaştığı durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu	63
Şekil 5.20. Segmental tip ARM'de rotorun çakışık olmayan durumdan statora 4° yaklaştığı durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu	63
Şekil 5.21. Segmental tip ARM'de rotorun çakışık olmayan durumdan statora 6° yaklaştığı durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu	64
Şekil 5.22. Segmental tip ARM'de rotorun çakışık olmayan durumdan statora 8° yaklaştığı durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu	64
Şekil 5.23. Segmental tip ARM'de rotorun çakışık olmayan durumdan statora 10° yaklaştığı durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu	64
Şekil 5.24. Segmental tip ARM'nin tam çakışık durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu.....	65
Şekil 5.25. Akım profilleri	66
Şekil 5.26. Klasik ARM'nin sadece B fazı enerjili iken ürettiği statik moment profili.....	67
Şekil 5.27. Klasik ARM'nin sadece B fazı enerjili iken endüktans profilinin dağılımı	68
Şekil 5.28. Klasik ARM'nin akım-akı değişim profili.....	68
Şekil 5.29. Tasarlanan yeni ARM'nin rotor 16°-36° arasında ve E - A fazları enerjili iken elde edilen moment karakteristiği	69
Şekil 5.30. Tasarlanan yeni ARM'nin 15°-58° arasında ve E - A fazları enerjili iken elde edilen endüktans karakteristiği	69
Şekil 5.31. Segmental tip ARM'nin akım-akı değişim profili	70
Şekil 5.32. Klasik ve segmental ARM'nin 15°-36° arasında moment değişimleri.....	70
Şekil 5.33. Klasik ve segmental ARM'nin 15°-58° arasında endüktans değişimleri	71

Şekil	Sayfa
Şekil 5.34. Segmental ARM'nin yük akımına bağlı olarak çıkış gücündeki değişimi	71
Şekil 5.35. Segmental ARM'nin endüktans değişimine bağlı olarak çıkış gücündeki değişimi	72
Şekil 6.1. Motor parçalarının 3D görünümleri.....	74
Şekil 6.2. Sargılarla birlikte motorun katı görünümü	75
Şekil 7.1. Asimetrik köprü dönüştürücünün bir faz gösterimi	86
Şekil 7.2. SCR kullanılan asimetrik köprü dönüştürücü devresi	87
Şekil 7.3. Sönümleme dirençli (R-Dump) Dönüştürücü	87
Şekil 7.4. Bifilar sargı kullanan dönüştürücü.....	88
Şekil 7.5. Ayırık beslemeli dönüştürücü yapısı.....	89
Şekil 7.6. “q” anahtar “2q” diyot yapısına sahip dönüştürücü konfigürasyonu.....	90
Şekil 7.7. Bağımsız akım kontrollü “q” Anahtar ve “2q” diyot konfigürasyondaki dönüştürücü yapısı	91
Şekil 7.8. Ortak anahtarlı dönüştürücüler	93
Şekil 7.9. C-Dump Dönüştürücü.....	94
Şekil 7.10. ARM sürücüler için ayarlanabilir DC gerilimli dönüştürücü topolojisi.....	95
Şekil 7.11. ARM kullanılarak gerçekleştirilen enerji dönüşümü şeması.....	96
Şekil 7.12. İki seviyeli güç dönüştürücüsü	97
Şekil 7.13. H-köprü bipolar dönüştürücü topolojisi.....	98
Şekil 7.14. Asimetrik köprü ile H-köprü dönüştürücünün kombinasyonu	99
Şekil 7.15. Ortak anahtarlı ve H-köprü konfigürasyonlu dönüştürücü	100
Şekil 7.16. Sargıları yıldız bağlı ARM'lerde kullanılan bipolar dönüştürücü topolojisi.....	101

Şekil	Sayfa
Şekil 8.1. Sürücü devresinin blok diyagramı	103
Şekil 8.2. Transformator ve besleme devresi	105
Şekil 8.3. +5V/maksimum 3A çıkış sağlayan LM2576 ile yapılmış besleme devresi	106
Şekil 8.4. Motorun sürülmesinde kullanılan 5-fazlı bipolar topolojiye sahip H-köprü dönüştürücü devresi	107
Şekil 8.5. Bir faz için basitleştirilmiş H-köprü dönüştürücü devresi	108
Şekil 8.6. PIC18F452 ile tasarlanan programlama ve kontrol devresi.....	111
Şekil 8.7. Seri kablo aracılığı ile bilgisayar-mikroişlemci arasındaki veri alış-verişi.....	113
Şekil 8.8. IR2110 sürücü entegrelerinin tipik kullanımı	114
Şekil 8.9. IR2110 sürücü entegrelerinin motor sürücülerinde kullanımına örnek ..	114
Şekil 8.10. MOSFET sürücü devre bloğu (sadece bir faza ait).....	115
Şekil 8.11. Optik sensör yerleşim parçaları	116
Şekil 8.12. Optik transdüserlerin devre uygulaması	117
Şekil 8.13. 180 derecelik dönüş boyunca sensör çıkışlarının rotor konumuna bağlı olarak değişimi ve faz anahtarlama işaretlerinin değişimi	119
Şekil 9.1. Motora uygulanan gerilim ile motor akımının değişimi	123
Şekil 9.2. Motora uygulanan gerilim ile motor devir sayısının değişimi.....	123
Şekil 9.3. Zamana bağlı olarak motor hızının arayüz görünümü	124
Şekil 9.4. Geliştirilen arayüz aracılığı ile zamana bağlı olarak motor hızı ile motor faz akımlarının değişimi.....	124
Şekil 9.5. C-faz akımının zamana bağlı olarak değişimi	125
Şekil 9.6. Akım dalga şekilleri.....	126
Şekil 9.7. 35V besleme geriliminde artan/azalan yük durumuna göre motor momentinin değişim grafiği	127

Şekil	Sayfa
Şekil 9.8. 35V'ta yüklenmeye bağlı olarak hızın zaman göre değişimi.....	128
Şekil 9.9. Yük akımına bağlı olarak motor devir ve momentinin değişimini gösteren grafikler (35 V'ta)	128
Şekil 9.10. 75V besleme geriliminde artan/azalan yük durumuna göre motor momentinin değişim grafiği	129
Şekil 9.11. 75V'ta yüklenmeye bağlı olarak hızın zaman göre değişimi.....	129
Şekil 9.12. Yük akımına bağlı olarak motor devir ve momentinin değişimini gösteren grafikler (75 V'ta)	130
Şekil 9.13. MOSFET'leri zarar görmüş fazların çektiği akımların dalga şekilleri .	131
Şekil 9.14. Motorun A fazına ait akımın dönme açısına bağlı olarak değişimi (benzetim)	132
Şekil 9.15. Motorun A fazına ait akımın zamana bağlı olarak değişimi (deneysel)	132
Şekil 9.16. Faz akımı ile momentin değişim sonuçları	133

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 6.1. İşlenmemiş stator sacı (M530-50A Silisli sac) ve özellikleri	76
Resim 6.2. Stator ve rotor çekirdekleri için üretilen M530-50A parçacıkları	76
Resim 6.3. Stator ve rotor saclarının kalıplarda basılması	77
Resim 6.4. Ütüleme işlemi	77
Resim 6.5. İşlenen alüminyum blok	78
Resim 6.6. Rotor sacı presleme parçaları	79
Resim 6.7. Paketlemenin ardından son şeklini alan parçalı rotor	79
Resim 6.8. Mil işleme	80
Resim 6.9. Mil ve bilyelerin yerleştirilmesi ile elde edilen rotor	80
Resim 6.10. 150 mm çap ve 120 mm’lik boyunduruğu olan stator ve faz sargıları	81
Resim 6.11. Motorun “100 Tip Ø150” gövdesine oturtulduktan sonraki son durumu	81
Resim 6.12. Motorun kapak takılmadan önceki son görünüşü ve dış sargı bağlantıları	82
Resim 6.13. Prototip 5-faz 10/8 konfigürasyonlu bipolar uyartımlı segmental tip ARM	82
Resim 8.1. Sürücü devre blokları	104
Resim 8.2. Transformator ve besleme devresi	106
Resim 8.3. Kontrol ve programlama devresi fotoğrafı	112
Resim 8.4. Akım algılama devresi	120
Resim 9.1. Test standı	121
Resim 9.2. DA kaynak (240V, 8A) ve yükler	122

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış tüm simgeler ve kısaltmalar açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A	Elektriksel yükleme, A/mm
a_r	Kutup adımı, rad
B	Manyetik akı yoğunluğu, T
B_m	Motorun çakışık konumda aldığı maksimum akı yoğunluğu değeri, T
β_r	Rotor kutup yay açısı, rad
β_s	Stator kutup yay açısı, rad
CW_s	Statorun boyunduruk kalınlığı, mm
d	Görev saykılı
D	Rotor dış çapı, mm
D_o	Stator dış çapı, mm
D_i	Stator iç çapı, mm
D_{sh}	Motor mil çapı, mm
e	Zıt elektromotor kuvvet, V
F	Manyeto motor kuvvet, AmperTur
ϕ	Akı, Wb
g	Hava aralığı, mm
i	Faz akımı, A
I_{rms}	Maksimum akım değeri, A
J	Manyetik akım yoğunluğu, A/mm ²
λ	Gerçek akı değeri, Wb
k_2	Rotor kutup açısının rotor kutupları arasındaki mesafeye oranı
k_1	Motor uzunluğunun rotorun dış çapına oranı

Simgeler**Açıklama**

k_3	Stator kutup yay açısının rotor kutup yay açısına oranı
k_{th}	Stator boyunduruk kalınlığının stator kutup yay genişliğinin yarısına oranı
L_a	Çakışık konum faz endüktansı, mH
L_{max}	Maksimum faz endüktansı, mH
L_{min}	Minimum faz endüktansı, mH
L_u	Çakışık olmayan konum faz endüktansı, mH
M	Ortak endüktans, mH
m	Faz sayısı
μ	Manyetik geçirgenlik, mH/m
n	Motor hızı, d/d
N	Sarım sayısı
N_{cl}	Bir fazda birbirine seri bağlı sargıların sayısı
P_r	Rotor kutup sayısı
P_s	Stator kutup sayısı
θ	Rotor konumu, derece
T_e	Üretilen moment, Nm
TH_s	Bir stator kutbunun uzunluğu, mm
TW_r	Bir rotor kutbunun yay uzunluğu, mm
TW_s	Bir stator kutbunun yay uzunluğu, mm
t_{u-a}	Çakışık olmayan konumdan çakışık konuma geçiş zamanı, ms
V_{coil}	Sargı gerilimi, V
V_s	Uygulanan gerilim, V
W_f	Sargıda depolanan enerji, Joule
W_m	Dönüştürülen enerji, Joule
W_e	Toplam enerji, Joule
W_c	Koenerji, Joule

Kısaltmalar	Açıklama
AA	Alternatif Akım
ARM	Anahtarlamalı Relüktans Motor
CW	Saat Yönü
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
D	Diyot
DA	Doğru Akım
DAM	Doğru Akım Makinesi
EIA	Elektronik Endüstrileri Birliği
EMK	Elektro Motor Kuvvet
FEM	Sonlu Elemanlar Metodu
I/O	Giriş/Çıkış
MMK	Manyeto Motor Kuvvet
PIC	Programlanabilir Denetleyici Devresi
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu
RAM	Rastgele Erişilebilir Bellek
R-Dump	Sönümlleme Dirençli
SCR	Silikon Kontrollü Doğrultucu
T	Tristör
VA	VoltAmper

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesine paralel olarak insan hayatını kolaylaştırıcı makinaların, ürünlerin tasarlanması ve kullanılması kaçınılmaz bir durum haline gelmiştir. Özellikle motor ve generatörlerin rotor ve stator kutup geometrileri ve güç elektroniği çevirici yapıları üzerine yapılan araştırmalar sonucunda günümüzde imalatının basit ve ucuz olması ve çevirici güç elektroniği devresinde diğer elektrik makinelerine oranla daha az anahtarlama elemanına ihtiyaç duyulması gibi üstünlükleri sayesinde anahtarlama relüktans motoru (ARM) özellikle değişken hızlı (genellikle yüksek hızlı) ve yüksek momentli uygulamalarda pay sahibi olmaya başlamıştır.

Elektrik motorlarının güç elektroniği devreleri ile kontrol edildiklerinde döndürme momenti, hız ve ivmelenmesi iyileştirilebilmekte ve verimliliği artırılabilir. Ancak kullanılacak kontrol devresine karşılık elde edilecek üstünlükler; maliyet, boyut ve devre karmaşıklığının artışı nedeniyle her alanda kullanılmaz. Bu nedenle elektronik kontrollü elektrik motorlarının kullanım alanları sınırlı kalmıştır. Bu tür motorların geniş kullanım alanı bulabilmesi için basit, ucuz ve güvenilir kontrol devreleri gerekir. Son yıllarda üzerinde çok durulan Anahtarlama Relüktans Motoru (ARM), hem yapısının hem de onu sürececek yarı iletken dönüştürücünün basit oluşu nedeni ile bu gereksinime cevap verecek aday konumundadır.

Gerçekleştirilen araştırma ve geliştirme çalışması toplam 10 bölümden oluşmaktadır. Bölüm 2’de çalışmanın konusu ve kapsamı ile anahtarlama relüktans motorlar hakkında literatürde gerçekleştirilen çalışmalar ve bu motorların klasik motorlarla olan farkları ile kullanım alanlarından bahsedilmiş ve tezin bilime olan katkısı üzerinde durulmuştur.

Bölüm 3’te tasarlanan motorun matematiksel modeli çıkartılarak aynı faz sayısına sahip klasik anahtarlama relüktans motordan daha fazla moment üretme sebepleri açıklanmıştır.

Bölüm 4'te motorun tasarım sürecinden bahsedilmiştir. Tasarımdan önce belirlenen parametreler yardımı ile motorun ana boyutlarını belirleyecek fiziksel parametreler çıkartılmış ve motor tasarımında kullanılan katsayılar yardımı ile doğrulamalar yapılmıştır.

Bölüm 5'te motorun analitik tasarımı sonlu elemanlar metodu ile doğrulanmıştır. İdeal akım kaynakları ve akım scriptleri yardımı ile 90 derecelik açı ile döndürülen modellerin her anda elde edilen moment, akı, manyetik alan enerjisi, çıkış gücü gibi değerleri kayıt altına alınmıştır.

Bölüm 6'da prototip üretimi tamamlanan motorun fabrikasyon sürecinden bahsedilmiştir. Motorun üretim aşamaları ve prototip üretiminde karşılaşılan zorluklar ile bu zorlukların çözümü için geliştirilmiş olan teknikler anlatılmıştır.

Bölüm 7'de anahtarlama relüktans makinelerde kullanılan dönüştürücü teknolojilerinden bahsedilmiş uygulamamız için seçilmiş olan dönüştürücü tipinin özelliklerine değinilmiştir.

Bölüm 8'de motorun çalışması için çok önemli yere sahip olan sürücü devresinden ve tasarımından bahsedilmiştir. Bu bölümde bir önceki bölümde tasarımına göz attığımız dönüştürücü devresi, kontrol devresi ve güç devresinin tasarımı üzerinde durulmuştur.

Bölüm 9'da tasarlanan 5-fazlı 10/8 konfigürasyonlu bipolar segmental tip ARM üzerinde yapılan deneysel çalışmalara yer verilmiştir. Motorun analitik, benzetim ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçları karşılaştırılmış ve sunulmuştur.

10. ve son bölümde ise çalışmada elde edilen sonuçların değerlendirilmesine ve gelecekte bu konuda yapılabilecek çalışmalara ışık tutması açısından tavsiye edilen noktalara yer verilmiştir.

2. LİTERATÜR KAPSAMI, ÇALIŞMANIN KONUSU VE BİLİME KATKISI

2.1. Anahtarlama Relüktans Motorun Tarihçesi ve Konu ile İlgili Yapılan Çalışmalar

ARM'ler; 1980'den daha önce makinenin yapısından kaynaklanan, hava aralığındaki relüktans değişimi prensibini temel aldıklarından ve faz endüktanslarının değişken olmasından dolayı önceleri relüktans motor ya da değişken relüktanslı motorlar olarak adlandırılmakta idi. Daha sonra, çevirici güç elektroniği devresi sayesinde ortaya çıkan çalışma prensipleri (faz sargılarının yarı iletken anahtar elemanlar tarafından devreye alınıp çıkarılması) göz önünde bulundurularak Anahtarlama Relüktans Motor adı daha yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Literatürde anahtarlama relüktans motorlarla ilgili birçok bilgi bulunmakta olup burada sadece ARM tasarımına yönelik çalışmalar incelenecektir.

Anahtarlama relüktans motorlara duyulan endüstriyel ilgili 1800'lü yıllara dayanmaktadır [1]. Anahtarlama relüktans makinası ilk kez İskoçya'da 1838 yılında Dawidson tarafından bir lokomotif hareket ettirmek için kullanılmıştır [2, 3]. 1920'lerde ise C.L.Walker tarafından bu günkü ARM'lerin özelliklerini taşıyan bir adım motoru icat edilmiştir. 1969 yılında S.A. Nasar klasik ARM'nin ilk temel özelliklerini ortaya koymuştur [4]. 1971 ve 1972'de Bedford ve Hoft rotor konumuna eş zamanlı olarak stator sargı akımlarını anahtarlayarak bu günkü modern ARM'lerin şekillenmesini sağlamış ve ARM teknolojisinde yarıiletken elemanların etkili bir şekilde kullanılmasında öncü olmuştur [5, 6]. Ayrıca rotor ve stator kutup geometrileri ve güç elektroniği çevirici yapıları üzerine de araştırmalarda bulunmuşlardır [7].

1979 yılında mühendis Corda tarafından 0,75 kW gücündeki doğrusal ARM tasarımı gerçekleştirilerek motorun çalışma sonuçları elde edilmiştir [8]. Aynı yıl Ray ve Davis tarafından az sayıda anahtarlama elemanı kullanılarak ARM'nin dönüştürücü devresi gerçekleştirildi. ARM tasarım öncülerinden sayılan Ray 1987 yılında Bass'ta

6/4 kutuplu 2,5 kW'lık bir motor tasarlamıştır. Ray bu çalışmasında anahtarlamalı relüktans motoru açık çevrim döngüsünde kontrol etmeye çalışmıştır. Konum sensörü yerine akım darbe genişliğini modüle ederek sonuçları karşılaştırmıştır [9].

1988 yılında Tohumcu ve Ertan tarafından 1 kW gücünde 1500 d/d'lık bir ARM tasarlanmıştır [10]. 1990 yılında Dirk tarafından imal edilen 1 kW'lık ARM akım kontrollü güç dönüştürücüsü ile kontrol edilmiştir. Dirk bu çalışmasında motora uyguladığı ön mıknatıslama sayesinde motorun iyilik faktöründe %18'lik bir artış sağlayarak büyük bir başarıya imza atmıştır [11]. Miller 1991 yılında ARM tasarımına bilgisayar destekli tasarım yaklaşımını getirerek optimum tasarım parametreleri üzerinde çalışmıştır [12]. 1991 yılında Miles tarafından yüksek gerilimle çalışan 6/4 kutup oranlı bir ARM tasarlanmıştır [13]. 1993 yılında Materu ve Krishnan üretilen 6/4 kutup konfigürasyonlu prototip ARM'nin kayıplarını bulmaya çalışmış, stator akım ile gerilim dalga şekillerini elde edilerek genel ifadeler üretilmeye çalışmıştır. 2000 yılında Khwaja M.Rahman tarafından üretilen 100 HP gücündeki ARM hibrit araçlar için kullanılmıştır. Tasarlanan ARM'nin hızlanma zamanının aynı güçteki asenkron motordan çok daha iyi olduğu gözlemlenmiştir [14]. Yine aynı yıl B. Lee tarafından sonlu elemanlar yöntemine göre 4.8 m uzunluğunda 2 adet doğrusal ARM tasarlanmış, modellerden elde edilen verilerle deney sonuçları karşılaştırılmıştır [15]. David A. Torney tarafından 2002 yılında 6 kW gücünde 24/16 kutup oranlı otomobil uygulamalarına yönelik bir anahtarlamalı relüktans generatör tasarlanmış ve generatör kontrolü DSP ile gerçekleştirilmiştir [16]. Ritcher ve Eike 1988 yılında uzay ve uçak endüstrisinde kullanılmak üzere hafif ve 500 dereceye kadar dayanabilen motor uygulamalarına bir adım atmışlardır [17]. Anahtarlamalı relüktans motorlar alanında birçok çalışması bulunan Krishnan, Bharadwaj ile birlikte ileri mühendislik uygulamaları için 1988 yılında sonlu elemanlar metodunu anahtarlamalı relüktans motor üzerinde denemiştir [18]. Aynı yıl bu motorlarla ilgili olarak halen kullanılmakta olan bir tasarım prosedürü geliştirmişlerdir [19]. Harris ve Miller; 1989 yılında tasarım ver performans açısından klasik indüksiyon motorları ile yeni tasarım anahtarlamalı relüktans motorlarını karşılaştırmış ve her iki alanda da anahtarlamalı relüktans motorların üstün özellikleri olduğunu ispatlamışlardır [20]. 1989 yılında MacMinn ve Jones

tarafından geliştirilen hava araçları için tasarlanmış yüksek hızlı dişlisiz (doğrudan sürülebilir- direct-drive) anahtarlama relüktans motor türünün ilk örneklerindendir [21]. 90'lı yılların başında Jack, Finch ve Wright; uyarlamalı ağ yöntemini anahtarlama relüktans motora uygulamış ve ilk kez makine bilgilerine bağlı olarak sınır kaynağı, materyal verisi, eşitlik çözümleri otomatik olarak hesaplanmıştır [22]. 1995'te Ferreira, Jones ve Heglund 30 kW'lık bir anahtarlama relüktans starter/generatör sistemi geliştirmişler ve komple sistem verimini %80 olarak bulmuşlardır [23]. Faiz ve Finch tarafından 1993'te gerçekleştirilen çalışmada anahtarlama relüktans motor için bir tasarım optimizasyon yöntemi geliştirilmiştir [24]. Tasarım optimizasyonu üzerine gerçekleştirilen çalışmalar 1994 yılında Radun ile devam etmiştir [25]. 1994 yılında Ferreira, Jones ve Heglund tarafından gerçekleştirilen çalışmada bir gaz türbini için 5 HP'lık 12500 d/d'lık bir anahtarlama relüktans sürücü sistemi gerçekleştirilmiş ve pozisyon algılama için elektronik algılama sistemi kullanılmıştır [26]. Yine 1994 yılında Green, Khater, Williams, El-Shanawany ve Hassanein tarafından ilk 5-fazlı anahtarlama relüktans motor uygulaması gerçekleştirilmiştir [27]. 1995 yılında Michaelides ve Pollock tarafından yüksek verimli 5-fazlı anahtarlama relüktans motor tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiştir [28]. Richardson, Pollock ve Flower 1995 yılında entegre bir motor/pervane sisteminde kullanılmak üzere 6/20 kutup konfigürasyonuna sahip bir anahtarlama relüktans motor tasarlamıştır [29]. 1995'te Low, Lin, Chen ve Chang hard disk sürücü olarak kullanılmak üzere mini bir anahtarlama relüktans motor tasarlamıştır [30]. Uematsu ve Wallace 1995 yılında elektrikli araçlarda kullanılmak üzere 100 kW'lık yeni bir anahtarlama relüktans motor tasarlamıştır. Tasarlanan sistem gelecekte kullanılacak elektrik araç motor uygulamalarında çok büyük bir öneme sahiptir [31]. 1996 yılında yine Michaelides ve Pollock çalışmamızın temelini oluşturan iki faz enerjilendirme metodunun ilk uygulamasını gerçekleştirmişlerdir [32]. 1996 yılında Tang ve Kline tarafından gerçekleştirilen çalışma; anahtarlama relüktans motorun sınır elemanları analizi ve benzetimi alanında çok büyük öneme sahiptir [33]. Chang 1996'da otomobil uygulamalarında kullanılan anahtarlama relüktans motor için bir tasarım prosedürü geliştirmiş ve geliştirilen bu prosedür 1996'dan sonra tasarlanan prototiplere önderlik etmiştir [34]. Anahtarlama relüktans motorlar ile ilgili optimal tasarım çalışmaları

1997 yılında Koibuchi, Ohno ve Sawa ile devam etmiştir [35]. Aynı yıl Tang tarafından gerçekleştirilen çalışmada anahtarlama relüktans motor tasarım çalışmalarına karakterizasyon, gelişmiş nümerik hesaplamalar ve termal analiz seçenekleri eklenmiştir [36]. 1998 ile 2004 yılları arasında anahtarlama relüktans motor tasarımlarında ciddi gelişmeler kaydedilmiş, özellikle stator yapısında elde edilen tasarım optimizasyon sonuçları 2004 yılından sonra ortaya konan ilginç tasarımlara önderlik edecek nitelikler kazanmıştır [37-56].

2005 yılında Khor ve Sotudeh; 12/10 kutup yapısına ve iki faz enerjilendirme metoduna sahip asimetrik bir anahtarlama relüktans motor sunmuştur [57]. Aynı yıl Ju Hwan ve Kwon anahtarlama relüktans motorların en büyük problemlerinden biri olan tork dalgalıklarını azaltmak ve buna bağlı olarak çıkış gücünü arttırmak için yeni bir rotor kutup tasarımı geliştirmiştir [58]. Kutup şekillerinde yapılan değişikliklerin motor performansına olan etkilerine ait çalışmalar 2005 yılında Pandey ve Rajagopal ile devam etmiştir [59]. 2005 yılında Edrington, Krishnamurthy ve Fahimi tarafından gerçekleştirilen kapsamlı çalışmada otomobil uygulamalarında kullanılan bipolar anahtarlama relüktans motorlar ele alınmış ve kaydadeğer çıktılar elde edilmiştir [60]. Anahtarlama relüktans motor tasarımında elde edilen önemli gelişmeler bu motorların robotik uygulamalarda da yerini almasına neden olmuştur. İlk önemli çalışma 2006 yılında Ashok ve Tesar tarafından gerçekleştirilmiştir [61]. [62]'de anahtarlama relüktans motor tasarımında sonlu elemanlar metodunun etkili bir çalışması görülmektedir. Bu yıllarda otomotiv sektöründe yer almaya başlayan anahtarlama relüktans motor doğrudan tahrikli dış rotorlu sistemlerde kullanılmaya başlanmıştır [63-65]. 2007 yılında Seok-Gyu Oh ve Krishnan iki fazlı ters-akı mantığına dayanan bir tasarım ile literatürdeki yerini almıştır [66]. Aynı yıl Krishnan önderliğinde gerçekleştirilen çalışmada “E” tipi stator yapısına sahip iki fazlı bir anahtarlama relüktans motor tasarlanmış ve deneysel sonuçları elde edilmiştir [67]. Aynı yıllarda anahtarlama relüktans motorlar yavaş yavaş ev aletlerinde de yer edinmeye başlamıştır. 2007’de Ekram, Ravi, Rajagopal ve Mahajan tarafından gerçekleştirilen çalışmada bir çırpıcı uygulaması görülmektedir [68]. 2007-2009 yılları arasında otomobil sektöründe tahrik mekanizmalarında gerçekleştirilen anahtarlama relüktans uygulamalarına rastlamak mümkündür [69-75]. 2009 yılında

Franke, Brutscheck ve Schmucker tarafından tekerlek (rolling) rotorlu anahtarlamaalı relüktans motor uygulaması göze çarpmaktadır [76]. 2009 yılında Daldaban ve Ustkoyuncu MagLev etkisi altında çalışan yeni bir doğrusal anahtarlamaalı relüktans motor uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Bu uygulama günümüz doğrusal anahtarlamaalı relüktans motor asansör uygulamalarının temelini oluşturmaktadır [77]. [78-83]'de anahtarlamaalı relüktans motora ait ev aletleri ve otomotiv uygulamalarına rastlamak mümkündür. 2010'da Krishnamurthy önderliğinde gerçekleştirilen çalışmada rotor kutup sayısının stator kutup sayısından büyük olduğu bir anahtarlamaalı relüktans motor uygulaması gerçekleştirilmiş ve önemli sonuçlar elde edilmiştir. Uygulama; anahtarlamaalı relüktans motorun kullanım çeşitliliğini desteklemesi açısından çok büyük bir öneme sahiptir [84]. 2010 yılında Ruba, Bentia ve Szabo gerçekleştirdikleri çalışmada kritik güvenlik katsayısı olan uygulamalarda sürme hassasiyeti çok yüksek olan anahtarlamaalı relüktans motoru kullanarak bu motorun 5 farklı sargısında hata olmasına rağmen çalışmasını sürdürmesini öne sürerek motorun bu tarz uygulamalarda tercih edilme nedenlerini ortaya koymaya çalışmıştır [85]. Labak ve Kar 2010 yılında gerçekleştirdikleri pancake tip anahtarlamaalı relüktans motor uygulamasında motorun hafiflik, sıcaklık adaptasyonu ve hata tolerans kapasitesine bağlı olarak performansına değinmiş ve etkili sonuçlar elde etmiştir [86].

Klasik anahtarlamaalı relüktans motor yapı ve performansında elde edilen başarılı sonuçların yanında çalışmamızın temelini oluşturan segmental (parçalı rotorlu) ve iki faz enerjilendirme esasına dayanan anahtarlamaalı relüktans motorlar üzerinde yapılan çalışmalarda da önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Bu konu ile ilgili ilk çalışma literatürde 1964 yılında Lawrenson ve Agu tarafından gerçekleştirilmiştir [87]. 1967 yılında yine Lawrenson ve Gupta tarafından gerçekleştirilen çalışmada [88] ilerleme kaydedilse de anahtarlamaalı relüktans motorun sürülmesinde karşılaşılan zorluklar ile yarı iletken teknolojisinin henüz ilerleme kaydedememesinden dolayı bu alanda yapılan çalışmalar 90'lı yılların başlarına kadar sekteye uğramıştır. 1990'da Toliyat ve Lipo tarafından gerçekleştirilen çalışmada yüksek torklu 5 fazlı anahtarlamaalı relüktans motor tasarlanmıştır [89]. Yine 1990'da Krishnan, Abouzeid ve Mang tarafından gerçekleştirilen çalışmada eksenel alanlı anahtarlamaalı relüktans motorlar

için bir tasarım prosedürü geliştirilmiştir [90]. 1992 yılında Horst tarafından alınan patentte yalıtılmış segmental anahtarlama relüktans motorun tasarımı sunulmuştur [91]. 1996 ile 2004 yılları arasında Mecrow önderliğinde gerçekleştirilen çalışmalarda segmental tip anahtarlama relüktans motorlarla ilgili çok önemli sonuçlar elde edilmiştir [94-96, 98-100]. Aynı şekilde segmental anahtarlama relüktans motorlarla ilgili yaptıkları çalışmalarla ün salan Oyama, Higuchi ve Abe hibrit yapıli anahtarlama relüktans motor alanında da birçok çalışmaya imza atmıştır [92, 97, 101, 103]. Edrington, Krishnamurthy ve Fahimi ile bipolar anahtarlama relüktans motorlar alanında yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Özellikle otomotiv sektörüne yönelik gerçekleştirdikleri yeni bipolar teknoloji kaydadeğerdir [102]. 2008 yılında Vattikuti, Rallabandi ve Fernandes tarafından gerçekleştirilen çalışmada yüksek torklu motor hacmine ve ağırlığına göre tork üretme kapasitesi çok yüksek olan yeni bir segmental anahtarlama relüktans motor tanıtılmıştır [104]. Bu alanda en son çalışmalar 2010 yılında Xiaoyuan ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda; parçalı rotoru olan yeni tasarım tiplerine örnekler verilmiştir [105, 106].

2.2. Anahtarlama Relüktans Motorun Yapısı ve Temel Çalışma Prensibi

Bu kısımda anahtarlama relüktans motorun temel özellikleri, çalışma prensibi ile konum ve endüktansa bağıli olarak ürettiğı moment ifadesinden bahsedilmiş ve anahtarlama relüktans motor diğeri motor tipleri ile karşılaştırılmıştır.

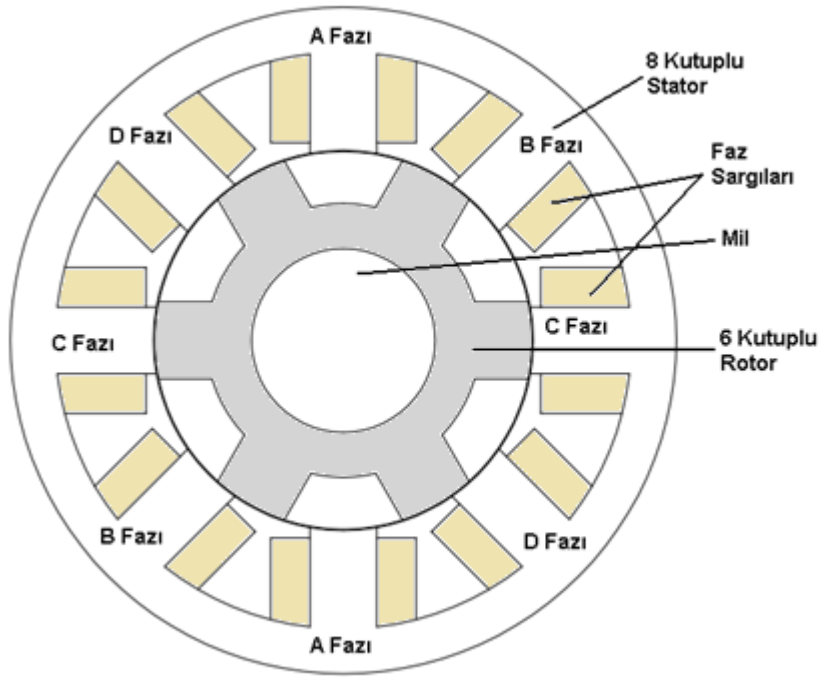
2.2.1. Temel özellikler

Anahtarlama relüktans motor; esas olarak senkron makine olan relüktans motorunun yarı iletken anahtarlarla kontrol etmeye elverişli olarak yapılan bir çeşididir. Bu motorun hem statorunda hem de rotorunda çıkık kutuplar var olup sadece statorunda sargı bulunmaktadır. Bu yüzden motor bazen çift çıkıntılı motor olarak ta adlandırılmaktadır. Rotorlarında herhangi bir mıknatıs, sargı ya da kısa devre halkası bulunmayıp sadece masif demir veya sac paketi içermektedir [107]. Statorun ise basit eş merkezli kutuplardan oluşan bir yapısı bulunmaktadır. ARM'ler

stator/rotor kutup oranlarına göre de sınıflandırılmaktadır. Şekil 2.1’de 4-fazlı klasik bir anahtarlamaalı relüktans motora ait yapı gösterilmektedir. 8/6 4-fazlı ARM olarak adlandırılan motor 8 çıkıntılı stator, 6 çıkıntılı rotor kutbundan oluşmaktadır. ARM’lerde her bir çıkık kutup çifti bir fazı oluşturduğundan bahsi geçen 8/6 ARM 4-fazlı bir makinedir. Stator kutup sayılarının rotor kutup sayılarından farklı olmasının sebebi; herhangi bir konumda kalkış yapabilme ve sürekli dönme eylemlerinin yerine getirilme gerekliliğinden kaynaklanmaktadır. Aynı eksen üzerinde bulunan karşılıklı iki bobin bir faz sargısını oluşturmak için seri olarak bağlanmaktadır. Sarımlar yapılırken faz sargılarının aynı yönde yapılmasına dikkat etmek gerekmektedir.

Yüksek hız gerektiren ARM uygulamalarında, rotor kutup sayısı genelde stator kutup sayısından daha küçük olurken yüksek moment gerektiren uygulamalarda ise rotor kutup sayısı stator kutup sayısına yakın seçilir [108]. Tasarıma başlamadan önce uygulama gereksinimleri göz önünde bulundurularak öncelikle bu durumun dikkate alınması gerekmektedir.

Anahtarlamaalı relüktans motor; temel olarak rotordaki bir çıkık kutbun statordaki sargı ile uyarılan kutup tarafından elektromıknatısta olduğu gibi manyetik relüktansın minimum olacağı konuma çekilmesi ile döner. Stator kutupları sırasıyla uyarılır ve her seferinde başka kutuplar çekilerek dönme devam eder. Bu çekme işlemi; uyarma akımının her seferinde aynı yönde uygulanması ile yapılabildiğinden ve kullanılacak dönüştürücüde akım yönünün değiştirilmesine gerek olmadığından, dönüştürücüdeki yarı iletken anahtar sayısı diğer elektronik kontrollü motorlara göre yarı yarıya azalır. Fakat tasarlanan ve tez çalışmasının temelini oluşturan 5-fazlı bipolar ARM’de bu durumun göz ardı edilmesi gerekmektedir. Çünkü motordan geçen akımın yönü her an için değişebildiğinden kullanılacak olan anahtarlama elemanının sayısı da buna bağlı olarak artacaktır. Ayrıca ARM’lerde motor çıkış gücünün yüksek olması, özellikle sistemin yüksek verimi ve maliyet avantajı ile alternatif ve doğru akım motorlarının karşısında güçlü bir seçenek oluşturmaktadır.

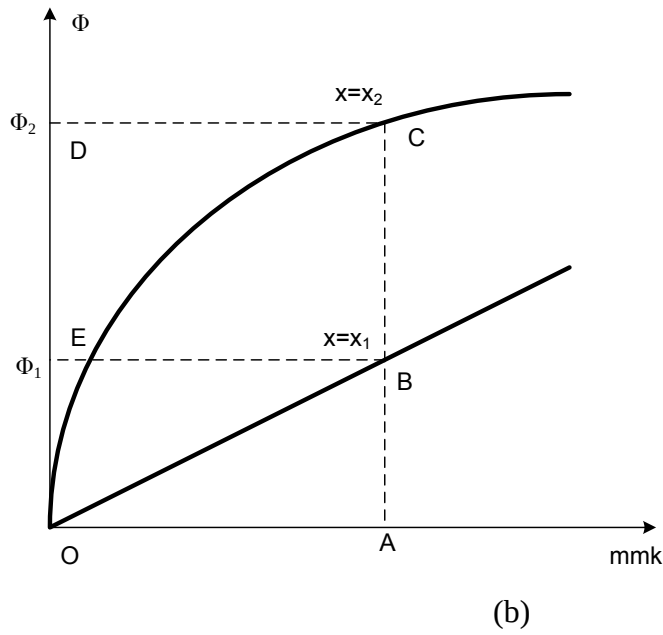
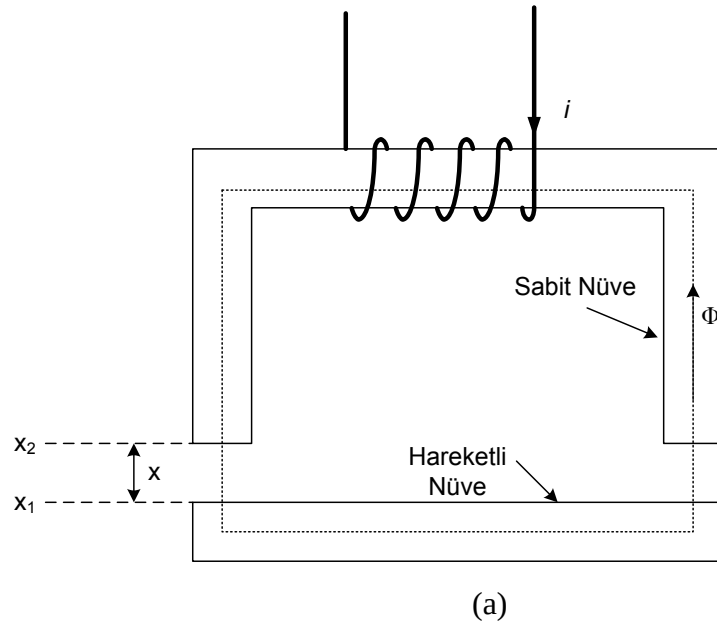


Şekil 2.1. 8/6 4-fazlı klasik ARM'nin kesit görünüşü

2.2.2. Temel çalışma prensibi

ARM'nin temel çalışma ilkesini açıklamak için temel elektromekanik enerji dönüşüm prensiplerini gözden geçirmekte fayda vardır. Şekil 2.2 (a)'da şekilde yer alan selenoid i akımı ile uyarıldığında bir Φ akısı üretecektir. Sargılardan geçirilen uyarım akımı arttırıldığında, hareketli nüve; sabit olan ve üzerinden akı geçişi meydana gelen hareketsiz nüveye doğru hareket edecektir.

Hava aralığının x_1 ve x_2 değerleri için Şekil 2.2 (b)'de üretilen manyeto motor kuvvete (mmk) göre akının değişimi verilmektedir. x_1 için çizilen akı-mmk değişimi; manyetik yolda hava aralığının relüktans değişimi göz önüne alınarak manyetik devrede akının daha küçük olma sonucu ortaya çıktığı için doğrusaldır [109].



Şekil 2.2. Anahtarlamalı relüktans motorun nüve yapısı esas alınarak basit gösterimi ve manyeto motor kuvvet-akı eğrileri

- (a) Basit nüve yapısı
(b) Nüve karakteristiği

Nüvede indüklenen elektro motor kuvvet (emk) “e” ve manyeto motor kuvvet (mmk) “F” olarak ifade edilirse motordaki toplam elektrik enerjisi girişi (W_e);

$$W_e = \int e i dt = \int i dt \frac{dN\phi}{dt} = \int N i d\phi = \int F d\phi \quad (2.1)$$

Olarak elde edilir. Sargıda depolanan enerji W_f ve mekanik işe çevrilen enerji W_m toplamı toplam elektrik enerjisine eşit ise;

$$W_e = W_f + W_m \quad (2.2)$$

x_1 durumu göz önüne alındığında mekanik iş yapılmadığı zaman depolanan alan enerjisi Eş. 2.1'de verilen toplam elektrik enerjisine eşittir. Bu da Şekil 2.2 (b)'de verilen OBE üçgensel alanına denk gelmektedir. Alan enerjisinin tamamlayıcı koenerji (W_c) olarak tanımlanır ve matematiksel olarak $\int \phi dF$ ile ifade edilir. OBA üçgensel alanına denk gelmektedir. Bu arada gerçekte koenerji diye bir şey olmadığını ve bu ifadenin sadece alan enerjisinin tamamlayıcı olarak kullanıldığını belirtmekte fayda vardır. Benzer şekilde x_2 durumu göz önüne alındığında alan enerjisi OCD üçgensel alanına denk gelir. Tamamlayıcı ise OCA bölgesidir.

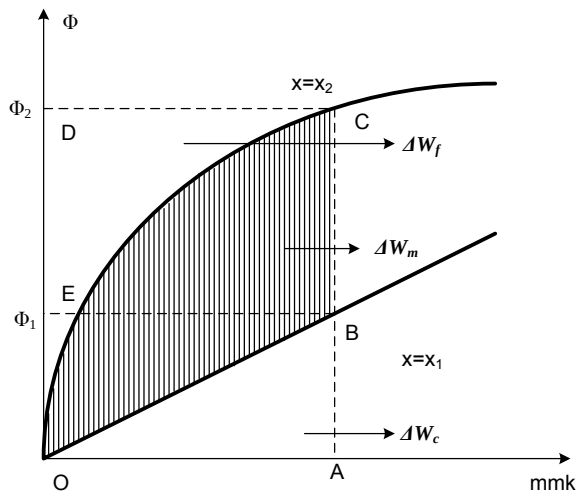
A çalışma noktası göz önüne alındığında, sabit bir F_1 uyarımı için farklı enerjileri şu şekilde ifade etmek mümkündür:

$$\Delta W_e = \int_{\phi_1}^{\phi_2} F_1 d\phi = F_1(\phi_2 - \phi_1) = \text{alan}(BCDE) \quad (2.3)$$

$$\Delta W_f = \Delta W_f \Big|_{x=x_2} - \Delta W_f \Big|_{x=x_1} = \text{alan}(OCD) - \text{alan}(OBE) \quad (2.4)$$

Bu denklemler kullanılarak Şekil 2.3'de gösterilen artan mekanik enerji Eş. 2.5 ile ifade edilebilir:

$$\Delta W_m = \Delta W_e - \Delta W_f = \text{alan}(OBC) \quad (2.5)$$

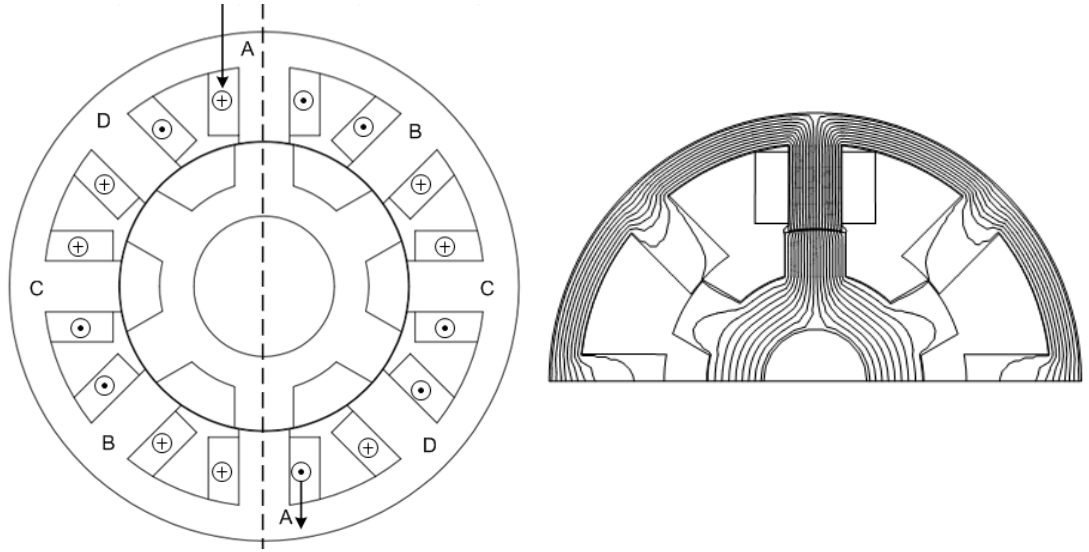


Şekil 2.3. Artan mekanik enerji

2.2.3. Çalışma prensibinin rotor konumlarına bağlı olarak açıklanması

Çakışık (Aligned) Konum

Rotor kutuplarından birisi stator kutuplarından birisiyle tam olarak karşı karşıya geldiğinde bu durum ilgili faz için çakışık (aligned) ya da doğrultulu konum olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.4'te görüldüğü üzere rotor bu konumdayken çakışık bulunduğu stator kutup sargılarından akım geçirilmesi halinde (A fazı sargılarından akım geçirildiği düşünülmüştür) bir moment üretilmez.

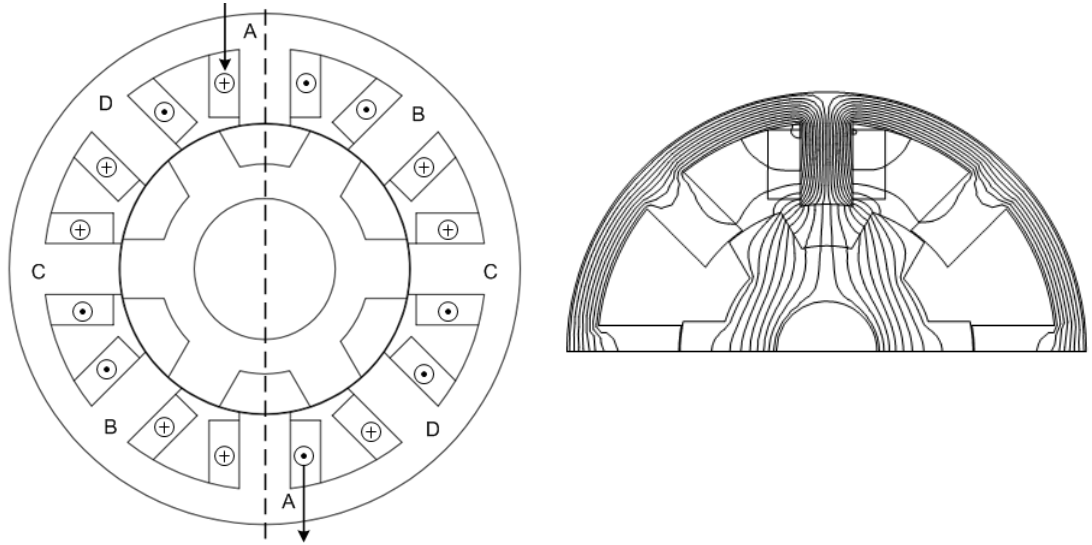


Şekil 2.4. Stator-rotor çakışık durumda iken fazların durumu ve stator-rotorda oluşan manyetik akı yollarının dağılımı

Rotorun çakışık konumda bulunduğu stator kutbunun sargılarından akım geçirilirken rotor döndürülerek çakışık konumdan uzaklaştırılırsa tekrar bu konuma döndürücü yönde bir moment meydana gelecektir. Çakışık konumda manyetik relüktansın en küçük değerinde olması nedeniyle relüktans ile ters orantılı olan faz endüktansı en büyük değerini alır. Düşük akı seviyelerinde relüktansın nerede ise tamamı hava aralığında ortaya çıkar. Ancak karşılıklı iki kutbu birbirine bağlayan stator boyunduruğunun oluşturduğu uzun manyetik yolda da önemli ölçüde manyeto motor kuvvet (mmk) tüketilir bu da çakışık konumdaki endüktansı azaltıcı bir etki yapar.

Çakışık olmayan (Unaligned) Konum

Bir stator kutbu ile ardı ardına dizilmiş iki rotor kutbunun radyal eksenlerinin açılımlarının çakıştığı Şekil 2.5'te gösterilen konuma çakışık olmayan (unaligned) ya da doğrultulu olmayan konum adı verilir. Rotorun bu konumunda da moment üretilmez. Eğer rotor çakışık olmayan konumdan bir miktar uzaklaştırılırsa rotoru çakışık konuma getirmek üzere bir moment meydana gelecektir. Çakışık olmayan konum, rotorun kararsız bir durumudur. Bu konumda faz endüktansı en küçük değerini almaktadır. Bunun sebebi rotor ve stator arasındaki büyük hava aralığından dolayı relüktansın en büyük değerinde olmasıdır. Hava aralığının relüktansı, çelik malzemeninkine göre çok büyüktür.



Şekil 2.5. Stator-rotor çakışık olmayan durumda iken fazların durumu ve stator-rotorda oluşan manyetik akı yollarının dağılımı

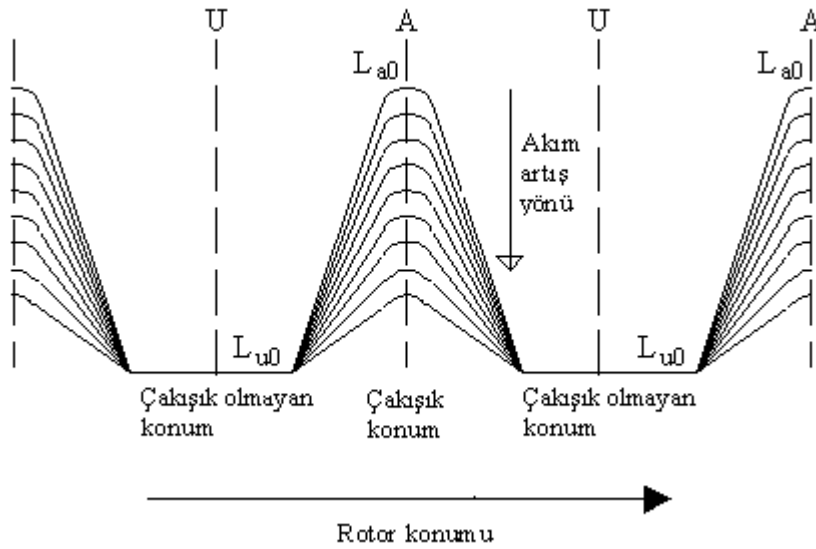
Çakışık olmayan konumda çakışık konumdakinin aksine belirgin bir doyma etkisi görülmez. Bunun sebebi çakışık olmayan konumda büyük miktarda kaçak akının meydana çıkması veya manyetik yolun ağırlığını hava aralığının oluşturmasıdır.

Rotorun Ara Konumları

Rotorun çakışık ve çakışık olmayan konumlar arasındaki konumları için ortaya çıkan mıknatıslanma eğrileri çakışık ve çakışık olmayan konumların mıknatıslanma eğrilerinin arasında yer alır. Mıknatıslanma eğrileri ARM'nin momentinin

hesaplanmasında, sargı ve saç paketlerinin boyutlandırılmasında kullanılan önemli bir parametredir. Faz endüktansının değeri rotor konumu ve faz akımına bağlı olarak büyük miktarda değişim göstermektedir.

Anahtarlama relüktans motorunun teorisinde yer alan en anlamlı iki endüktans değeri, doymasız durumda çakışık konumdaki faz endüktansı değeri (L_{a0}) ve yine doymasız halde çakışık olmayan konumdaki faz endüktans (L_{u0}) değeridir. λ gerçek akı değeri olmak üzere faz endüktansı λ/i şeklinde tanımlanırsa, rotor konumuna bağlı olarak değişim gösteren bir endüktans eğrisi elde edilir. Şekil 2.6'da akım parametre seçilerek elde edilen eğri takımı gösterilmiştir.

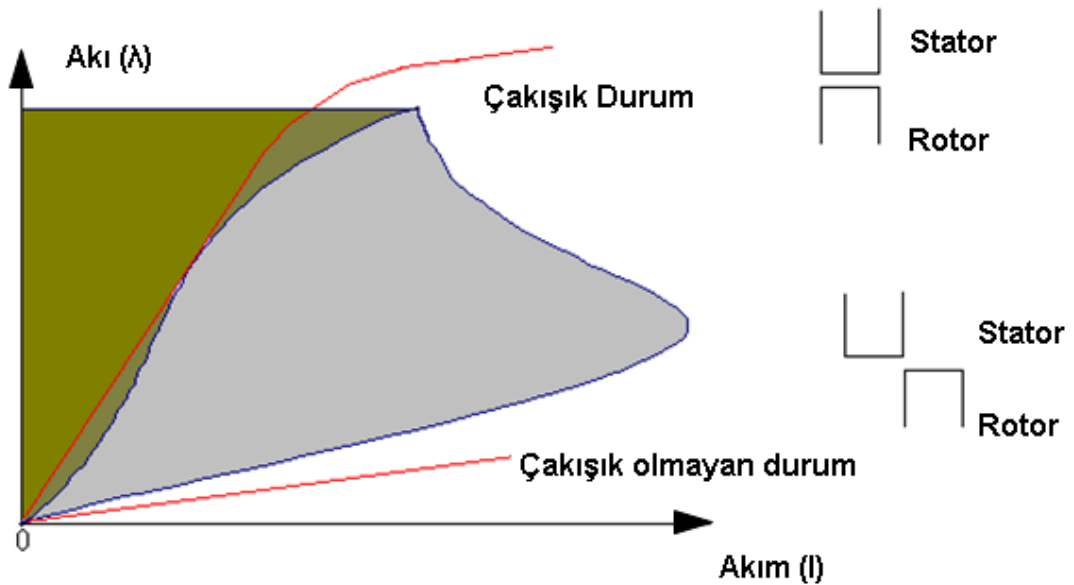


Şekil 2.6. Faz endüktansının rotor konumuna göre değişimi

2.2.4. ARM'de moment üretimi, endüktans ve momentin rotor konumu ile bağıntısı

Stator fazlarından birinden akım akmaya başladığında, o faz ile bir rotor kutbunun çakışık konumda olmaması koşuluyla, rotor üzerinde bir moment meydana gelir. Bu moment; rotoru, relüktansın azaldığı diğer bir deyişle faz endüktansının arttığı yöne doğru döndürmeye çalışır. Hareket, endüktansın en büyük değerini aldığı çakışık konuma kadar devam eder. Devre simetrik çıkıntılara sahip olduğundan ve demirin

mıknatıslılığının manyetik alanın yönünden bağımsız olmasından dolayı moment stator kutbundaki akımın yönüne bağımlı olmamaktadır. Moment, rotoru daima en yakın çakışık konuma doğru hareket ettirecek yöndedir. Pozitif moment (motor çalışma) ancak çakışık olmayan konum ile bir sonraki çakışık konum arasındaki rotor pozisyonlarında üretilebilir. Diğer bir deyişle makine faz endüktansının büyüdüğü yönde pozitif moment üretebilmektedir. Eğer rotor faz endüktansının büyüdüğü yönün aksine dönüyorsa moment işaret (yön) değişir. Bu durum ise frenleme veya generatör çalışmaya karşılık düşer. ARM tarafından üretilen moment rotorun bir konumdan diğerine hareket ettiği aralıktaki koenerjinin değişim oranı ile orantılıdır. Şekil 2.7’de koyu yeşil ile gösterilen ve enerji üretimi konusunda bahsedilmiş olan alan elektromanyetik enerjiyi ifade etmektedir. Depo edilen manyetik enerji gri ile gösterilen alana eşit olmaktadır. Depo edilen enerji dönüştürücünün tipine göre ya tekrar kaynağa döndürülmekte ya da kaybolmaktadır. Toplam alan ise elektrik enerjisini temsil etmektedir. Toplam enerji; motorun çakışık olmayan konumdan çakışık konuma hareketi esnasında kaynaktan çekilmektedir.



Şekil 2.7. ARM endüktans eğrisi

Motorlarda; T_e üretilen elektromanyetik moment ve θ rotor konumundaki değişim olmak üzere artan mekanik enerji Eş. 2.6 ile ifade edilebilir;

$$\Delta W_m = T_e \Delta \theta \quad (2.6)$$

Sabit uyartım durumunda mmk sabit iken artan mekanik enerji koenerjideki değişime eşittir ($\Delta W_m = \Delta W_c$). İfade genişletilirse;

$$W_c = \int \phi dF = \int \phi d(Ni) = \int (N\phi) di = \int \lambda(\theta, i) di = \int L(\theta, i) i di \quad (2.7)$$

Burada ifade edilen L endüktansı ile λ sargı akısı; rotor konumu ile akımın bir fonksiyonudur. Koenerjideki değişim θ_1 ve θ_2 olarak tanımlanabilecek iki konum arasında meydana gelmektedir. Açıklamalara göre rotor konumu ve akımın bir fonksiyonu olarak temsil edilen koenerji ifadesi ile tanımlanan hava aralığı momenti ifadesi;

$$T_e = \frac{\Delta W_m}{\Delta \theta} = \frac{\Delta W_c}{\Delta \theta} = \frac{\Delta W_c(\theta, i)}{\Delta \theta} \Big|_{i=\text{sabit}} \quad (2.8)$$

Verilen bir akım değeri için endüktansın rotor konumu ile doğrusal olarak değiştiği ideal olarak düşünüldüğünde hava aralığı momenti;

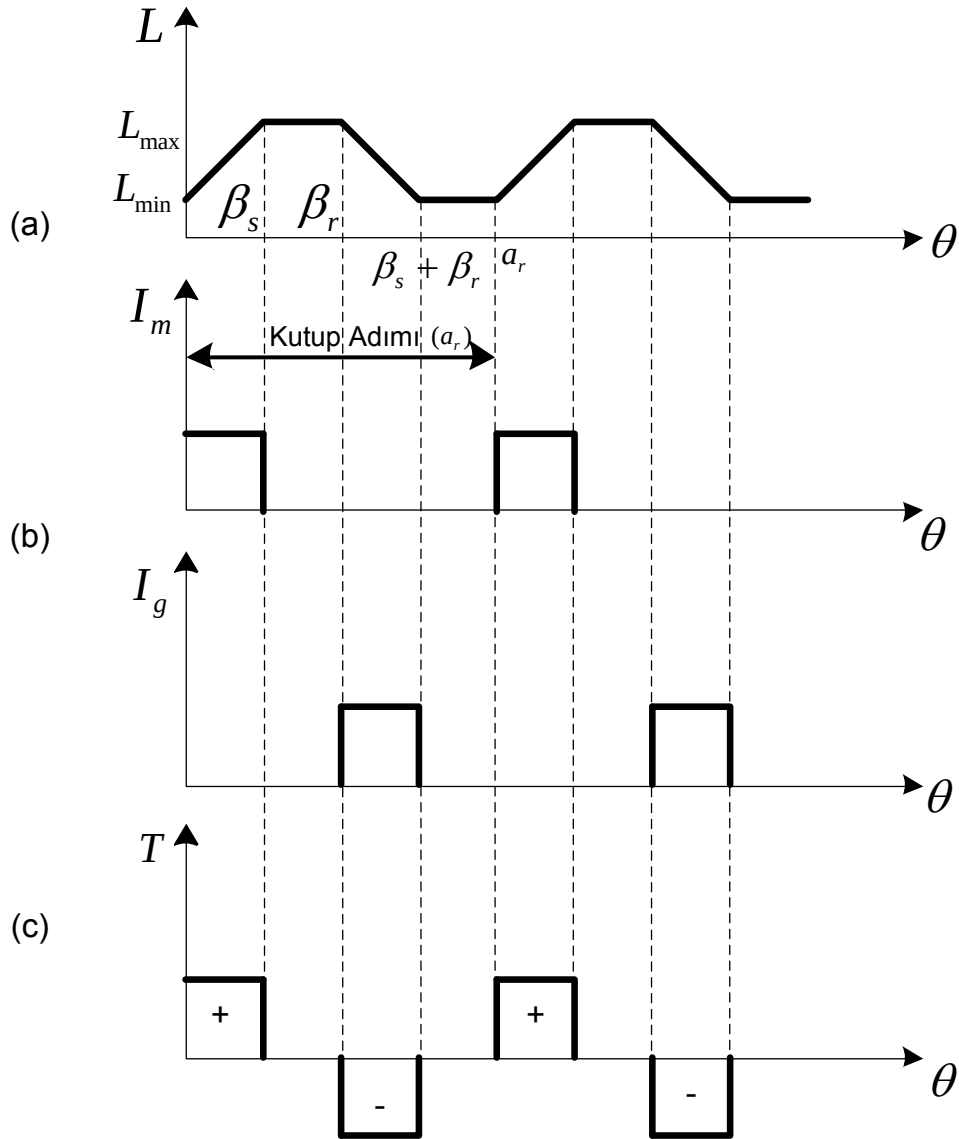
$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (2.9)$$

olarak ifade edilebilir.

Örneğin sadece “C” fazı enerjilendirildiğinde motorun moment eşitliğini Eş. 2.10’deki gibi basitleştirmek te mümkündür:

$$T_e = \frac{1}{2} \frac{dL_{cc}}{d\theta} i_c^2 \quad (2.10)$$

Bu eşitliğe bağlı kalarak motora uygulanan gerilim ve motor fazlarından geçen akım bilindiğine göre motor momentinin hesaplanabilmesi için rotor konumuna bağlı değişen faz endüktanslarının hesaplanması gerekmektedir. Faz endüktansının bir rotor kutup adımı için ideal endüktans profili Şekil 2.8’de verilmiştir. Rotor kutup adımı boyunca dört bölge tanımlanmaktadır.



Şekil 2.8. Bir rotor kutup adımı için endüktans, faz akımı ve moment değişimleri
 (a) Bir faza ait idealleştirilmiş endüktans değişimi
 (b) Motor ve generatör çalışma için faz akımları
 (c) Motor ve generatör çalışma için moment üretilmesi

Birinci bölge 0'dan β_s 'ye kadar, ikinci bölge β_s 'den β_r 'ye kadar, üçüncü bölge β_r 'den $\beta_s + \beta_r$ 'ye kadar, dördüncü bölge $\beta_s + \beta_r$ 'den kutup adımı a_r 'ye kadar olan bölgedir. Burada β_s stator kutup yay açısı, β_r rotor kutup yay açısı, a_r ise rotor kutup adımını göstermektedir.

Birinci bölgede rotor kutuplarının stator kutuplarına yanaşmaya başladığı ve dönmeye bağlı olarak endüktansın doğrusal olarak artarak 0'da stator ve rotor kutuplarının tamamen çakıştığı ana kadar devam ettiği ve maksimum değeri olan L_{max} 'a ulaştığı bölgedir. Eğer makine motor olarak çalıştırılmak isteniyorsa, fazlar bu bölgede uyarılmalıdır. İkinci bölge rotor ve stator kutuplarının tamamen çakışık olduğu bölgedir. β_s 'den β_r 'ye kadar $L = L_{max}$ ve $T = 0$ 'dır. Bu bölge genellikle “ölü bölge” olarak adlandırılır. β_s 'den $\beta_s + \beta_r$ 'ye kadar endüktans doğrusal olarak minimum değeri olan L_{min} 'e iner. Eğer makine generatör olarak çalıştırılmak veya frenlenmek isteniyorsa fazlar bu bölgede uyarılmalıdır. $\beta_s + \beta_r$ 'den a_r 'ye kadar rotor ve stator kutupları çakışmamakta ve $L = L_{min}$ değerinde sabit kalmaktadır.

Stator ve rotor kutupları tümüyle çakışık ise endüktans maksimum ve relüktans minimumdur. Stator ve rotor kutupları hiç çakışık değilse endüktans minimum ve relüktans maksimumdur.

N_s stator kutup sayısını, N_r rotor kutup sayısını ifade etmek üzere kutup adım açısı Eş. 2.11 ile bulunur.

$$a_r = \frac{360 \cdot (N_s - N_r)}{N_s \cdot N_r} \quad (\text{derece}) \quad (2.11)$$

Her rotor konumunda, motorun en az bir fazının dönme momenti üretmesini garanti etmek için artan endüktans bölgesinin bitişik iki fazın endüktansları arasındaki açısal kaymadan daha büyük olacak şekilde uzatılması gerekmektedir. Bu ihtiyaç $\beta_s > a_r/q$ olacak şekilde ARM'nin tasarımı ile karşılanmaktadır. Burada q motor faz sayısıdır.

2.3. Anahtarlamalı Relüktans Motorların Avantaj ve Dezavantajları

ARM'ler diğer DA ve AA motorlarla karşılaştırıldıklarında aşağıdaki üstünlükleri göstermektedir [110].

- ❖ Rotor sadece laminasyon çeliğinden üretilmiş olup üzerinde herhangi bir mıknatıs ya da sargı bulumamaktadır. Bu yüzden yüksek hızlı uygulamalarda rotor dayanıklılığı ön plana çıkmaktadır.

- ❖ Sargılar sadece statorda bulunmaktadır. Diğer AA ve DA motorlara kıyasla daha basit, sadece kutup etrafına sarılmış ve seri bağlı sargı tipi kullanılmaktadır.
- ❖ Yukarıdaki özellikleri dolayısı ile tasarımı ve fabrikasyonu diğer makinelere göre çok daha kolaydır.
- ❖ Isının çoğunluğu sargıları barındıran stator üzerinde ortaya çıkmaktadır. O yüzden sadece statorun soğutulması yeterlidir.
- ❖ Yapısının sağlam olması ve ısı probleminin olmaması nedeni ile kirli ve sıcak ortamlarda kullanılmaya elverişlidir.
- ❖ Moment doğrudan faz akımının karesi ile orantılı olduğu için kalkış momentleri çok yüksektir.
- ❖ Sargılar elektriksel olarak birbirinden bağımsızdır. Bu yüzden sargılar arasındaki ortak kuplaj olayı diğer motorlara oranla çok azdır ve herhangi bir sargı grubunda meydana gelen arıza diğer grupları etkilemez.
- ❖ Fazların bazılarında arıza meydana gelmesine rağmen daha düşük çıkış gücü oluşturarak motor çalışmasına devam eder.

Tüm bu avantajların yanında ARM'nin dezavantajlarını şu şekilde izah etmek mümkündür:

- ❖ Özellikle düşük hız uygulamalarında moment dalgalanması yüksektir.
- ❖ Akustik gürültüsü yüksektir (moment dalgalanmasından dolayı).
- ❖ Motorun dönmesi için mutlaka rotorun konum bilgisine ihtiyaç vardır. Bu yüzden mutlaka optik ya da manyetik sensörler kullanılmalı veya sensörsüz kontrol algoritmalar geliştirilmelidir.
- ❖ Kendi kendilerine çalıştırılmazlar. Çalışmaları için mutlaka dönüştürücü teknolojisine gerek duyarlar.
- ❖ Stator sargı endüktansının büyük oluşu ve anahtarlama esnasında sargı endüktansının uçlarında büyük gerilim oluşturması diğer bir dezavantajdır.

2.4. Anahtarlama Relüktans Motorların Diğer Motor Tipleri İle Karşılaştırılması ve Kullanım Alanları

Günümüzde kullanılan başlıca elektrik motorları asenkron motor, senkron motor ve doğru akım motorlarıdır. Bu motorların hepsinin elektronik devrelerle kontrol edilerek mekanik çıkışları iyileştirilebilir. Doğru akım makinesinin kontrolü en kolay olan motor olmasına rağmen fırça ve kolektörlerinin zamanla aşınması, bakım gerektirmesi ve boyutunun diğer motorlardan büyük olması, maliyeti ve patlayıcı ortamlarda kullanılamaması nedeniyle gittikçe yerini asenkron ve senkron motora bırakmaktadır. Bu iki motor türüne genel olarak alternatif akım motorları denir. Elektronik kontrol devreleriyle asenkron alternatif akım motorlarının çalışmaları iyileştirilebilmesine karşın bu motorların karmaşık yapıda ve pahalı olmasının yanında hız ve moment kontrollerinin zor olması nedeniyle uygulamada problem yaşanmaktadır.

Geniş uygulama alanı bulabilecek elektronik kontrollü motorlar için motor kadar elektronik devrenin de basit olması gerekmektedir. Son yıllarda üzerinde yoğun bir şekilde çalışmalar yapılan anahtarlama relüktans motorları, hem yapısının, hem de onu sürececek olan yarıiletken dönüştürücünün basit oluşu nedeniyle bu gereksinime cevap verebilecek durumdadır. Motorun dezavantajları ekonomik biçimde ortadan kaldırılabildiği takdirde birçok alanda halen kullanılan motorların yerini alabileceği, hatta maliyet ve güvenilirlik açısından daha üstün olabileceği görülmektedir.

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

ARM' nin diğer motorlarla karşılaştırılması Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. ARM'nin diğer motorlarla karşılaştırılması

	Asenkron Motor	Senkron Motor	DA Motoru	Fırçasız DAM	Adım Motoru	ARM
Besleme Şekli	Alternatif Gerilim	Alternatif Gerilim	Doğru Gerilim	Doğru Gerilim	Doğru Gerilim	Doğru Gerilim
Uyarma Durumu	Uyarma Gerekmez	Doğru Gerilimle Uyarma	Doğru Gerilimde Uyarma	Uyarma Gerekmez	Uyarma Gerekmez	Uyarma Gerekmez
Dönüştürücü	Değişken Hız Uygulaması Gerekir	Değişken Hız Uygulaması Gerekir	Değişken Hız Uygulaması Gerekir	Daima Gerekir	Daima Gerekir	Daima Gerekir
İşletme ve Bakım Masraf	Yok Denebilir	Kısmen Bakım Gerekir	Bakım Gerekir	Yok Denebilir	Yok Denebilir	Yok Denebilir
Motor Maliyeti	Ucuz	Pahalı	Pahalı	Pahalı	Orta	Ucuz
Dönüştürücü Maliyeti	Pahalı	Pahalı	Orta	Pahalı	Orta	Pahalı
Verim	Orta	Orta	Orta	İyi	Orta	İyi
Çalışma Ortamı	Her Ortamda Çalışır	Her Ortamda Çalışır	Patlayıcı Ortamlarda Kullanılmaz	Her Ortamda Çalışır	Her Ortamda Çalışır	Her Ortamda Çalışır
Stabilite	İyi	İyi	İyi	İyi	İyi	İyi

Bununla birlikte ARM'lerin kullanıldığı uygulama alanlarından başlıca olanları aşağıdaki gibi sıralanabilir [111, 112]:

- ❖ Elektrikli otomobil ve motosikletler,
- ❖ Raylı ulaşım araçları,
- ❖ Çamaşır makineleri, elektrikli süpürgeler gibi elektrikli ev cihazları,
- ❖ Yazıcılar,
- ❖ Endüstride hassas konum gerektiren CNC vb. gibi uygulamalar.

2.5. Tezin Amacı ve Bilime Katkısı

Literatürde 1800’lü yıllardan bu yana anahtarlamalı relüktans motorlarla ilgili hem tasarım, hem sürücü devresi geliştirme hem de optimizasyon konularında birçok çalışma yapılmıştır. “Anahtarlamalı Relüktans Motorun Tarihçesi ve Konu ile İlgili Yapılan Çalışmalar” kısmında bahsedildiği gibi bipolar sürülen yani sargılardan geçen akım yönünün zamana ve rotordan gelecek olan konum bilgilerine bağlı olarak değişebildiği ve yüksek moment uygulaması gerektiren alanlarda tercih edilen anahtarlamalı relüktans motorlar ile ilgili daha az çalışmaya ulaşılmıştır.

Bunun yanında son yıllarda motordan elde edilen momentin motor ağırlığına oranını arttırmak amacıyla üzerinde sadece birkaç çalışma gerçekleştirilmiş olan segmental anahtarlamalı relüktans motorlar bipolar sürüldüklerinden bu iki ilgi çekici konunun çok fazlı bir motor konfigürasyonu ile birleştirilmesi düşünülmüştür. Bu düşünce çerçevesinde literatürde önemli bir yere sahip olacağı düşünülen 5-fazlı bipolar uyarımlı segmental bir anahtarlamalı relüktans motor tasarlanmıştır. Motorun rotorunda yapılan köklü değişim ile geleneksel ARM’lerden farklı bir stator kutup yapısı seçiminin klasik ARM’lerle karşılaştırıldığında ne tür etkiler ortaya koyacağı araştırılarak elde edilen analitik, sonlu elemanlar metodu ile elde edilen benzetim ve deneysel çalışma sonuçları karşılaştırılmıştır.

3. KLASİK VE TASARLANAN ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLARIN MODELİ VE MANYETİK EŞDEĞERİ

Sistemlerin çalışmasının çok daha iyi kavranabilmesi amacıyla benzetim ve deneysel çalışmalarının gerçekleştirilebilmesi için matematiksek modellerinin çıkartılması gerekmektedir.

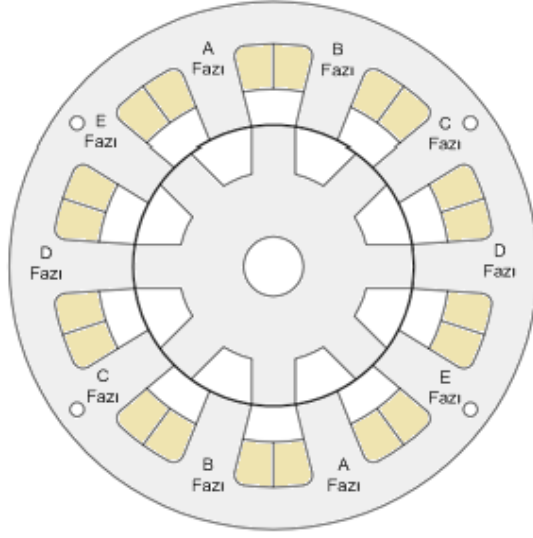
Bu bölümde daha önce matematiksel modeline rastlanmamış yeni tasarım 5-fazlı segmental anahtarlamaalı relüktans motorun [113] çalışması temel alınarak ve temel motor denklemleri kullanılarak matematiksel modeli çıkartılmıştır. Motorun boyutuna göre ürettiği momentin ve moment/ağırlık oranının klasik 5-faz anahtarlamaalı relüktans motora göre üstünlüğü kanıtlanmıştır.

3.1. 5-Fazlı Klasik Anahtarlamaalı Relüktans Motor Modeli

Şekil 3.1’de tasarlanan yeni bipolar uyartımlı kısa akı yollarını kullanan segmental tip ARM ile performans karşılaştırmalarında kullanılmak üzere tasarlanmış olan 5-fazlı 10/8 konfigürasyona sahip anahtarlamaalı relüktans motorun kesit görünüşü verilmiştir. 5 fazlı klasik ARM’nin faz akımları ve endüktansları cinsinden manyetik akı değişimi Eş. 3.1’deki matris formunda verilebilir.

$$\begin{pmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_d \\ \lambda_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} & M_{ad} & M_{ae} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} & M_{bd} & M_{be} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} & M_{cd} & M_{ce} \\ M_{da} & M_{db} & M_{dc} & L_{dd} & M_{de} \\ M_{ea} & M_{eb} & M_{ec} & M_{ed} & L_{ee} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ i_e \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Verilen manyetik akı eşitliğinde kullanılan L sembolü fazların kendi endüktanslarını, M sembolü ise ortak endüktansları ifade etmektedir. Endüktans değeri motorun açısıl pozisyonuna göre değişim gösterdiğinden elde edilen akı değeri hem motor akımına hem de motor pozisyonuna göre değişmektedir.



Şekil 3.1. 10/8 Konfigürasyonlu 5-fazlı klasik ARM'nin kesit görünüşü

Motorda üretilen alan enerjisinin tamlayanı olarak ifade edilen koeenerji hem rotor konumunun hem de uyarım akımının bir fonksiyonudur. Akıma ve açığa bağlı olarak manyetik akının integrali alınarak Eş. 3.2 yardımıyla hesaplanır:

$$W_c = \int_0^i \lambda(i, \theta) di \quad (3.2)$$

Eş. 3.1'de verilen matris eşitliği Eş. 3.2'de yerine konursa;

$$W_c = \frac{1}{2} (L_{aa}i_a^2 + L_{bb}i_b^2 + L_{cc}i_c^2 + L_{dd}i_d^2 + L_{ee}i_e^2) + i_a i_b M_{ab} + i_a i_c M_{ac} + i_a i_d M_{ad} + i_a i_e M_{ae} + i_b i_c M_{bc} + i_b i_d M_{bd} + i_b i_e M_{be} + i_c i_d M_{cd} + i_c i_e M_{ce} + i_d i_e M_{de} \quad (3.3)$$

elde edilir. Ani rotor konumunda manyetik akı ile akım arasındaki ilişki, manyetik nonlineerlik ihmal edildiğinde doğrusal olarak değişmekte ve eğimi de endüktansı vermektedir. Böylece $\lambda = L i$ olmaktadır. ARM temel bilgilerinde bahsedildiği gibi açısız değişim dikkate alındığında değişen koenerjiye bağlı olarak motorun ürettiği moment için eşdeğer ifadeyi Eş. 3.4 ile yazmak mümkündür:

$$T(\theta, i) = -\frac{\partial W_c(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (\lambda = \text{sabit}) \quad (3.4)$$

Verilen Eş. 3.4; Eş. 3.3 ile genişletilirse;

$$T = \frac{1}{2} \left(\frac{dL_{aa}}{d\theta} i_a^2 + \frac{dL_{bb}}{d\theta} i_b^2 + \frac{dL_{cc}}{d\theta} i_c^2 + \frac{dL_{dd}}{d\theta} i_d^2 + \frac{dL_{ee}}{d\theta} i_e^2 \right) + i_a i_b \frac{dM_{ab}}{d\theta} + i_a i_c \frac{dM_{ac}}{d\theta} + i_a i_d \frac{dM_{ad}}{d\theta} + i_a i_e \frac{dM_{ae}}{d\theta} + i_b i_c \frac{dM_{bc}}{d\theta} + i_b i_d \frac{dM_{bd}}{d\theta} + i_b i_e \frac{dM_{be}}{d\theta} + i_c i_d \frac{dM_{cd}}{d\theta} + i_c i_e \frac{dM_{ce}}{d\theta} + i_d i_e \frac{dM_{de}}{d\theta} \quad (3.5)$$

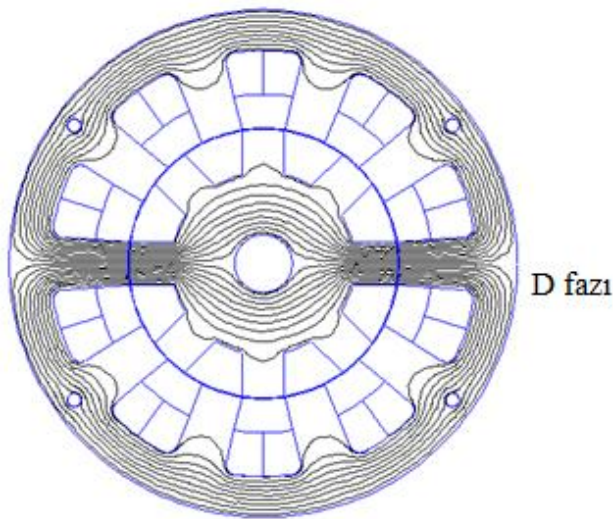
elde edilir. Klasik ARM sürülürken yaygın olarak her anda sadece bir faz enerjili kaldığı için Eş. 3.5'te yer alan ortak endüktanslar ihmal edilebilir. Buna göre elde edilen eşitlik;

$$T = \frac{1}{2} \left(\frac{dL_{aa}}{d\theta} i_a^2 + \frac{dL_{bb}}{d\theta} i_b^2 + \frac{dL_{cc}}{d\theta} i_c^2 + \frac{dL_{dd}}{d\theta} i_d^2 + \frac{dL_{ee}}{d\theta} i_e^2 \right) \quad (3.6)$$

olur. Örneğin sadece “D” fazı enerjilendirildiğinde motorun moment eşitliğini Eş. 3.7'deki gibi basitleştirmek te mümkündür:

$$T = \frac{1}{2} \frac{dL_{dd}}{d\theta} i_d^2 \quad (3.7)$$

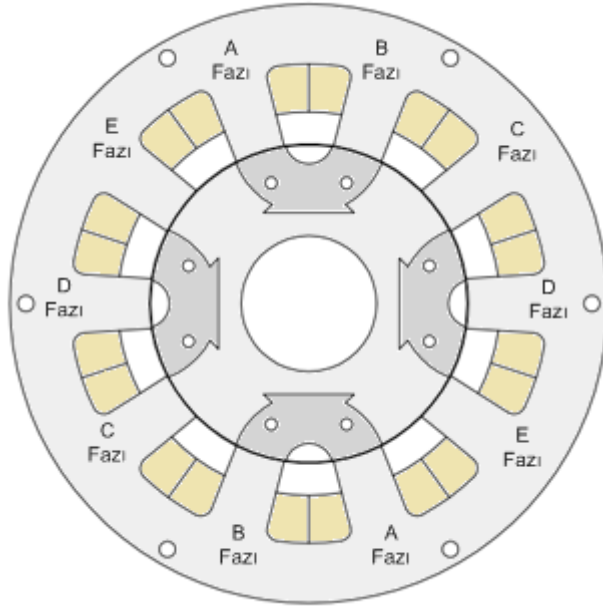
Bu fazın enerjilendirilmesi durumunda ortaya çıkan durum Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Sadece “D” fazı enerjilendirildiğinde 5-fazlı klasik ARM’de ortaya çıkan akı dağılım durumu.

3.2. 5-Fazlı U-Tipi Segmental Rotorlu Bipolar Uyarımlı 10/8 Anahtarlama Relüktans Motorun Modeli

Tasarlanan yeni 5-fazlı ARM'nin karşılaştırmada kullanılan klasik ARM'den farkı rotor yapısının tamamen değiştirilmiş olması ve uyarma yönteminde farklılıklar içermesidir. Aynı kaynağın kullanılması durumunda faz başına her iki motorun sargıları tarafından üretilen akı dağılımları ve buna bağlı üretilen moment miktarları sargıların endüktansları ve fazlar arasında oluşan ortak endüktans değerlerine bağlı olarak değişim göstermektedir. Analiz çıkış noktası olarak bu durumun kabul edilmesi gerekmektedir. Aynı motor yapısı kullanılıp sadece motorun sargı şekli değiştirilerek gerçekleştirilen daha önceki çalışmalarda [113, 114] uzun akı yollarını kullanan klasik ARM ile kısa akı yollarını kullanan ARM karşılaştırılmış, kısa akı yollarını kullanan ARM'nin daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 3.3'te tasarlanan yeni 5-fazlı 10/8 kutuplu bipolar uyarımlı ARM'ye ait kesit görünümü verilmiştir.

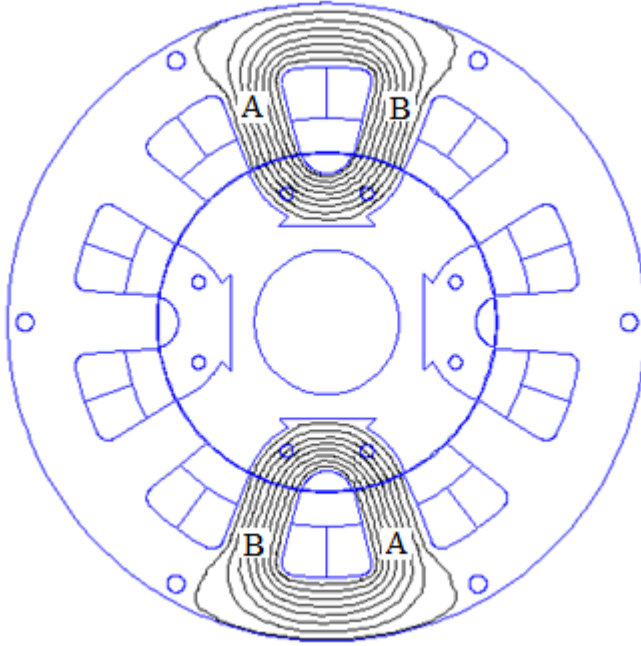


Şekil 3.3. Yeni 5-fazlı 10/8 Kutuplu ARM'nin kesitsel gösterimi

5-fazlı yeni ARM'nin faz akımları ve endüktanslar cinsinden manyetik akı değişimi Eş. 3.8'deki matris formunda verilebilir (Klasik ARM ile aynı durum).

$$\begin{pmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_d \\ \lambda_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} & M_{ad} & M_{ae} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} & M_{bd} & M_{be} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} & M_{cd} & M_{ce} \\ M_{da} & M_{db} & M_{dc} & L_{dd} & M_{de} \\ M_{ea} & M_{eb} & M_{ec} & M_{ed} & L_{ee} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ i_e \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

Verilen manyetik akı eşitliğinde kullanılan L sembolü fazların kendi endüktanslarını, M sembolü ise ortak endüktansları ifade etmektedir. Endüktans değeri motorun açılal pozisyonuna göre değişim gösterdiği için elde edilen akı değeri hem motor akımına hem de motor pozisyonuna göre değişmektedir. Bu durumda sadece A ve B fazları uygun polarite sağlayacak şekilde enerjilendirilirse, klasik ARM'den farklı olarak Şekil 3.4'te ince siyah çizgilerle gösterilen akı yolları oluşur.



Şekil 3.4. Sadece A ve B fazları uygun polarite oluşturacak şekilde enerjilendirildiğinde yeni ARM'de oluşan akı yollarının durumu

Statik analizden anlaşılacağı gibi yeni ARM klasik ARM'den farklı olarak uzun akı yolları yerine kısa akı yolları kullanarak çalışmaktadır. Her anda iki faz enerjili kaldığı için, fazlar arasında ortak endüktans meydana geldiği ve bu durumun

motorun doğrusal olmayan modelinin ortaya çıkartılmasında karmaşıklık oluşturacağı açıktır.

Eş. 3.4 kullanılarak makinenin ürettiği moment hesaplanırsa;

$$T = \frac{1}{2} \left(\frac{dL_{aa}}{d\theta} i_a^2 + \frac{dL_{bb}}{d\theta} i_b^2 + \frac{dL_{cc}}{d\theta} i_c^2 + \frac{dL_{dd}}{d\theta} i_d^2 + \frac{dL_{ee}}{d\theta} i_e^2 + \right) + i_a i_b \frac{dM_{ab}}{d\theta} + i_a i_c \frac{dM_{ac}}{d\theta} + i_a i_d \frac{dM_{ad}}{d\theta} + i_a i_e \frac{dM_{ae}}{d\theta} + i_b i_c \frac{dM_{bc}}{d\theta} + i_b i_d \frac{dM_{bd}}{d\theta} + i_b i_e \frac{dM_{be}}{d\theta} + i_c i_d \frac{dM_{cd}}{d\theta} + i_c i_e \frac{dM_{ce}}{d\theta} + i_d i_e \frac{dM_{de}}{d\theta} \quad (3.9)$$

elde edilir. Şekil 3.4'deki durum temel alınarak yani sadece A ve B fazlarının enerjili olduğu düşünülürse eşitlik;

$$T = \frac{1}{2} \left(\frac{dL_{aa}}{d\theta} i_a^2 + \frac{dL_{bb}}{d\theta} i_b^2 + \right) + i_a i_b \frac{dM_{ab}}{d\theta} \quad (3.10)$$

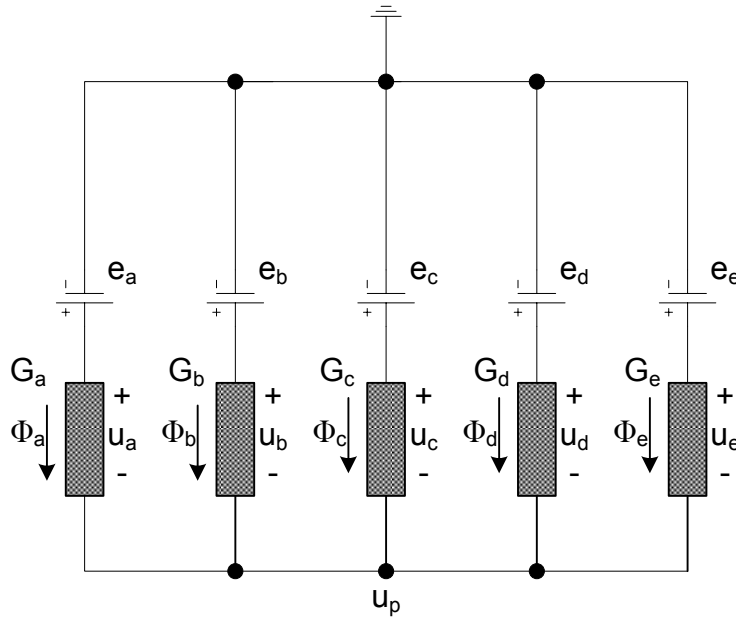
halini alacaktır. Buradan yeni tasarlanan ARM'de üretilen momentin sadece faz akımına bağlı olmadığı fazların kendi endüktanslarının yanında bitişik faz ile arasındaki ortak endüktansa da bağlı olduğu açıkça görülmektedir.

3.3. 5-Fazlı Segmental Tip ARM'nin Doğrusal Modeli

Bu model tasarlanan yeni ARM'nin aynı şartlar altında klasik ARM'den daha fazla moment üretebilme yeteneğine sahip olduğunu kanıtlamak için geliştirilmiştir. Tasarım gerçekleştirilirken şu varsayımlar kabul edilmektedir:

- ❖ Farklı polaritede olan fazların herhangi birinin ürettiği akı hava aralığından geçerek doğrudan diğer faz üzerinden kısa yoldan devresini tamamlamaktadır. Kaçak akı durumu ihmal edilmiştir.
- ❖ Stator ve rotor çeliklerinin manyetik iletkenliği (permeance) sonsuz kabul edilmiştir ($\mu = \infty$).
- ❖ İletkenlik stator ve rotor kutuplarının çakışık olduğu durumda maksimumdur.

Şekil 3.5'te, tasarlanan 5-fazlı motora ait manyetik eşdeğer devre verilmiştir.



Şekil 3.5. Tasarlanan ARM'nin manyetik eşdeğeri

Kirşofun akı kuralına göre şu eşitlik yazılabilir:

$$\phi_a + \phi_b + \phi_c + \phi_d + \phi_e = 0 \quad (3.11)$$

ϕ_x ($x=a, b, c, d, e$ olmak üzere) faz akılarını temsil etmektedir. Manyetik iletkenliğe bağlı olarak her bir faza ait akı değişimi (ϕ_x ($x=a, b, c, d, e$ olmak üzere)) Eş. 3.12'deki gibi ifade edilmektedir:

$$\phi_x = G_x(\theta)u_x \quad (3.12)$$

Burada ifade edilen G_x ($x=a, b, c, d, e$ olmak üzere) fazların manyetik geçirgenliğini temsil ederken u_x ($x=a, b, c, d, e$ olmak üzere) gerilim düşümünü temsil etmektedir.

Ayrıca kaynakların değerleri Eş. 3.13'teki gibi hesaplanır:

$$e_x = Ni_x \quad (3.13)$$

e_x ($x=a, b, c, d, e$ olmak üzere) kaynağın değerini, N her faza ait sarım sayısını ve i_x ($x=a, b, c, d, e$ olmak üzere) her faza ait akımı ifade etmektedir. u_p potansiyelinin değeri olarak göz önünde bulundurulursa;

$$u_x = e_x - u_p \quad (3.14)$$

elde edilir. Genişletilmiş ifadeyle faz akıları Eş. 3.15'teki gibi hesaplanabilir;

$$\phi_x = G_x(\theta)(e_x - u_p) \quad (3.15)$$

Her bir faza ait akı bağıntıları şu şekilde ifade edilebilir;

$$\lambda_x = N \phi_x \quad (3.16)$$

Eş. 3.11 akı bağıntısı için kullanılırsa,

$$\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c + \lambda_d + \lambda_e = 0 \quad (3.17)$$

olarak yazılır. Fazların manyetik geçirgenlikleri faz endüktanslarının bir fonksiyonu olarak ifade edilirse (x=a, b, c, d, e olmak üzere);

$$G_x = \frac{L_x}{N^2} \quad (3.18)$$

elde edilir. Fazlara ait akı bağıntıları bu ifadeye bağlı olarak genişletildiğinde (x=a, b, c, d, e olmak üzere);

$$\lambda_x = L_x(\theta) \left(\frac{e_x - u_p}{N} \right) \quad (3.19)$$

olur. $i_p = \frac{u_p}{N}$ olmak üzere keyfi bir akım tanımlanırsa (x=a, b, c, d, e olmak üzere);

$$\lambda_x = L_x(\theta)(i_x - i_p) \quad (3.20)$$

elde edilir. Elde edilen bu eşitlik Eş. 3.17’de yerine konursa;

$$L_a(\theta)(i_a - i_p) + L_b(\theta)(i_b - i_p) + L_c(\theta)(i_c - i_p) + L_d(\theta)(i_d - i_p) + L_e(\theta)(i_e - i_p) = 0 \quad (3.21)$$

olur. Bu eşitlikten i_p değeri çekilirse;

$$i_p = \frac{L_a(\theta)i_a + L_b(\theta)i_b + L_c(\theta)i_c + L_d(\theta)i_d + L_e(\theta)i_e}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \quad (3.22)$$

elde edilir. Eş. 3.20; Eş. 3.22’ye göre tekrar düzenlenirse A fazı için Eş. 3.23 elde edilebilir:

$$\lambda_a = \left(L_a(\theta) - \frac{L_a^2(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \right) i_a - \left(\frac{L_a(\theta)L_b(\theta)i_b + L_a(\theta)L_c(\theta)i_c + L_a(\theta)L_d(\theta)i_d + L_a(\theta)L_e(\theta)i_e}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \right) \quad (3.23)$$

Bu ifade diğer fazlar için de aynı şekilde yazılabilir. İfadeden rahatlıkla anlaşılacağı gibi A fazına ait öz-endüktans değeri;

$$L_{aa} = L_a(\theta) - \frac{L_a^2(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \quad (3.24)$$

olarak görülmektedir. Aynı şekilde ortak endüktans değerleri ise;

$$M_{ab} = -\frac{L_a(\theta)L_b(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \quad (3.25)$$

$$M_{ac} = -\frac{L_a(\theta)L_c(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \quad (3.26)$$

$$M_{ad} = -\frac{L_a(\theta)L_d(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \quad (3.27)$$

$$M_{ae} = -\frac{L_a(\theta)L_e(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \quad (3.28)$$

$$M_{bc} = -\frac{L_b(\theta)L_c(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \quad (3.29)$$

$$M_{bd} = -\frac{L_b(\theta)L_d(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \quad (3.30)$$

$$M_{be} = -\frac{L_b(\theta)L_e(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \quad (3.31)$$

$$M_{cd} = -\frac{L_c(\theta)L_d(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \quad (3.32)$$

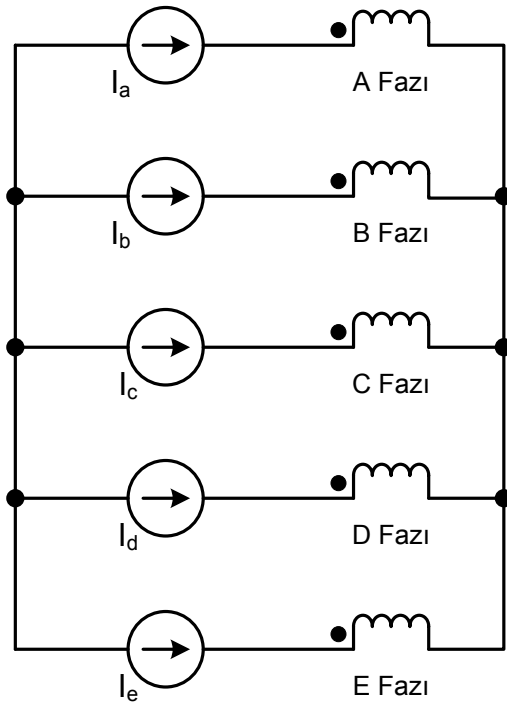
$$M_{ce} = -\frac{L_c(\theta)L_e(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \quad (3.33)$$

$$M_{de} = -\frac{L_d(\theta)L_e(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \quad (3.34)$$

olarak bulunur. Bu değerler matematiksel olarak ifade edilmelerine rağmen pratik çalışmada sadece bitişik fazlar dikkate alınacağı için örneğin A fazı ile D fazı ya da B fazı ile E fazı arasında herhangi bir ortak endüktans olmasının imkânı yoktur. Durumun daha açık şekilde kavranabilmesi için görünür endüktans profillerinin incelenmesi gerekmektedir.

3.4 5-Fazlı Segmental Tip ARM'nin Görünür Endüktans Profilleri

Bu analiz yönteminde yeni ARM'nin fazlarının ideal akım kaynağı ile sürüldüğü düşünülerek her anda farklı fazların durumları ortaya konarak endüktansların değerleri hesaplanacaktır. Bu hesaplama yönteminde faz dirençleri ihmal edilmiş fazlar Şekil 3.6'daki gibi yıldız olarak bağlanmıştır.

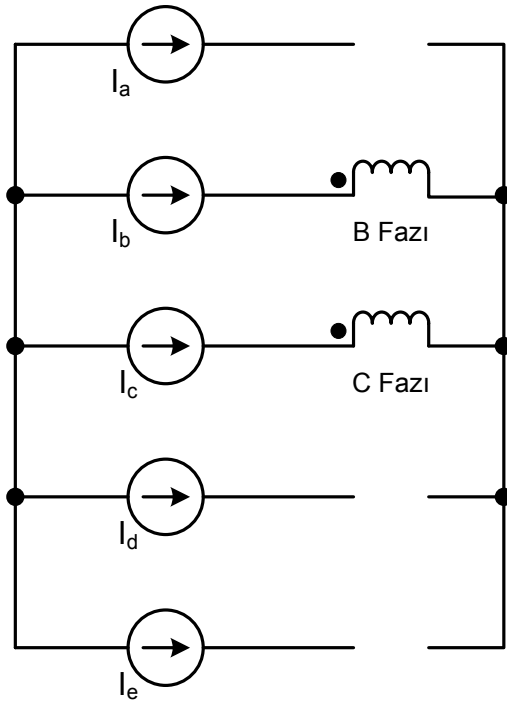


Şekil 3.6. İdeal akım kaynakları kullanıldığında yeni ARM'nin eşdeğer devresi

Tasarlanan motorun herhangi bir çalışma anında Çizelge 3.1'de verilen fazları birlikte çalışacaktır. Buna göre ilk anda sadece B ve C fazlarının enerjilendirildiği düşünülürse Şekil 3.7'deki devre elde edilecektir.

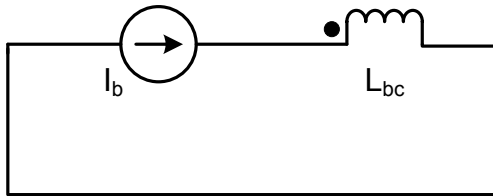
Çizelge 3.1. Fazların dönme açısına bağlı olarak çalışma durumları

	0-18	18-36	36-54	54-72	72-90
A Fazı	0	+	0	-	0
B Fazı	-	0	0	+	0
C Fazı	+	0	-	0	0
D Fazı	0	0	+	0	-
E Fazı	0	-	0	0	+



Şekil 3.7. Sadece B ve C fazları enerjilendirildiğinde eşdeğer devrenin durumu

Hatta en basit hali ile eşdeğer devre Şekil 3.8'deki devreye de dönüştürülebilir.



Şekil 3.8. B ve C fazları enerjilendirildiğinde eşdeğer devrenin basitleştirilmiş hali

B ve C fazları enerjilendirilirse;

$$\begin{aligned}
 i_b &= -i_c \\
 i_a &= 0 \\
 i_d &= 0 \\
 i_e &= 0
 \end{aligned}
 \tag{3.35}$$

eşitlik grubu elde edilebilir. Akı bağıntıları tekrar bu enerjilendirme durumu için yazılırsa;

$$\lambda_b = \left(\frac{L_b(\theta) - \frac{L_b^2(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} + \frac{\frac{L_b(\theta)L_c(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)}}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \right) i_b \quad (3.36)$$

$$\lambda_c = \left(\frac{L_c(\theta) - \frac{L_c^2(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} + \frac{\frac{L_b(\theta)L_c(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)}}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \right) i_b \quad (3.37)$$

A fazından hava aralığı aracılığı ile B fazına akan akının değeri $\lambda_{ab} = \lambda_a - \lambda_b$ olduğu için Eş. 3.36 ve Eş. 3.37 tekrar derlenirse;

$$\lambda_{bc} = \left(\frac{L_b(\theta) + L_c(\theta) - \frac{L_b^2(\theta) + L_c^2(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} + \frac{\frac{2L_b(\theta)L_c(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)}}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \right) i_b \quad (3.38)$$

Yukarda ifade edilen akı ifadesi kullanılarak L_{ab} olarak adlandırılan “görünür” endüktans değeri $L = \lambda/i$ eşitliği kullanılarak hesaplanabilir.

$$L_{bc} = L_b(\theta) + L_c(\theta) - \frac{L_b^2(\theta) + L_c^2(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} + \frac{\frac{2L_b(\theta)L_c(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)}}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \quad (3.39)$$

Aynı işlem $i_a = -i_e$, $i_d = -i_c$, $i_b = -i_a$ ve $i_e = -i_d$ olacak şekilde tekrarlanırsa görünür tüm endüktans değerleri hesaplanabilir. Buna göre;

$$L_{ae} = L_a(\theta) + L_e(\theta) - \frac{L_a^2(\theta) + L_e^2(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} + \frac{2L_a(\theta)L_e(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \quad (3.40)$$

$$L_{dc} = L_d(\theta) + L_c(\theta) - \frac{L_d^2(\theta) + L_c^2(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} + \frac{2L_d(\theta)L_c(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \quad (3.41)$$

$$L_{ba} = L_b(\theta) + L_a(\theta) - \frac{L_b^2(\theta) + L_a^2(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} + \frac{2L_b(\theta)L_a(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \quad (3.42)$$

$$L_{ed} = L_e(\theta) + L_d(\theta) - \frac{L_e^2(\theta) + L_d^2(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} + \frac{2L_e(\theta)L_d(\theta)}{L_a(\theta) + L_b(\theta) + L_c(\theta) + L_d(\theta) + L_e(\theta)} \quad (3.43)$$

elde edilir.

3.5. 5-Fazlı Segmental ARM'de Moment Üretimi

Aynı şekilde sadece B ve C fazlarının enerjilendirildiği düşünülür ve $i_b = -i_c$ durumu göz önünde bulundurulursa Eş. 3.9'daki moment ifadesi her iki faz için şu eşitlikleri alır;

$$T = \frac{1}{2} \left(\frac{dL_{bb}}{d\theta} i_b^2 + \frac{dL_{cc}}{d\theta} i_c^2 \right) + i_b i_c \frac{dM_{bc}}{d\theta} \quad (3.44)$$

$$T = \frac{1}{2} \left(\frac{dL_{bb}}{d\theta} i_b^2 + \frac{dL_{cc}}{d\theta} i_b^2 \right) - i_b i_b \frac{dM_{bc}}{d\theta} \quad (3.45)$$

$$T_{bc} = \left(\frac{1}{2} \left(\frac{dL_{bb}}{d\theta} + \frac{dL_{cc}}{d\theta} \right) - \frac{dM_{bc}}{d\theta} \right) i_b^2 \quad (3.46)$$

Eş. 3.39'daki B ve C fazları için verilen görünür endüktans eşitliği kullanılırsa;

$$L_{bc}(\theta) = L_{bb}(\theta) + L_{cc}(\theta) - 2M_{bc}(\theta) \quad (3.47)$$

elde edilir. Bu eşdeğer endüktans ile elde edilen moment değeri;

$$T_{bc} = \frac{1}{2} \frac{dL_{bc}}{d\theta} i_b^2 \quad (3.48)$$

$$T_{bc} = \frac{1}{2} \frac{d(L_{bb}(\theta) + L_{cc}(\theta) - 2M_{bc}(\theta))}{d\theta} i_b^2 \quad (3.49)$$

$$T_{bc} = \left(\frac{1}{2} \left(\frac{dL_{bb}}{d\theta} + \frac{dL_{cc}}{d\theta} \right) - \frac{dM_{bc}}{d\theta} \right) i_b^2 \quad (3.50)$$

3.6. Sonuç

Bu kısımda tasarlanan 5-fazlı segmental tip motor ve klasik anahtarlama relüktans motora ait matematiksel modeller çıkartılmıştır. Aynı besleme kaynaklarının kullanılması durumunda faz başına her iki motorun sargıları tarafından üretilen akı dağılımları ile buna bağlı üretilen moment miktarlarının; sargıların endüktansları ve fazlar arasında oluşan ortak endüktans değerlerine bağlı olarak değişim gösterdiği ispatlanmıştır. Tasarlanan anahtarlama relüktans motor yapısının karmaşıklığını basite indirgemek ve klasik motorlara göre farkını daha açık şekilde kavrayabilmek için sistemin görünür endüktans profilleri incelenmiştir. Yeni ARM'nin fazlarının ideal akım kaynağı ile sürüldüğü düşünülerek her anda farklı fazların durumları ortaya konarak endüktanslar değerleri hesaplanmıştır. Modeller yardımı ile tasarlanan motorun aynı faz sayısına sahip klasik anahtarlama relüktans motordan niçin daha fazla moment ürettiği Eş. 3.50'de açıkça görülmektedir.

4. 5-FAZLI 10/8 SEGMENTAL TİP ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN TASARIMI

4.1. Giriş

ARM'nin tasarım parametrelerinin belirlenmesi motorun kullanılacağı uygulama alanına göre farklılık gösterebilir. Örneğin bir roket projesinde türbin tahrik motoru olarak kullanılacak bir ARM ile otomobil endüstrisinde ya da sanayi tip bir elektrik süpürgesinde kullanılacak ARM'ler arasında birçok tasarım parametresi farklılık gösterecektir. Fakat genel anlamda üretim ve analizden önce gözden geçirilmesi gereken tasarım parametreleri aşağıda verilmiştir [110]:

- Çalışma hızı,
- Çalışma hızındaki anma gücü,
- Stator kutup sayısı,
- Rotor kutup sayısı,
- Faz sayısı,
- Maksimum akım ve gerilim değerleri vb.

Fakat bazen tasarımda karşılaşılan zorluklar bu parametrelerin tasarıma başlamadan önce belirlenememesine neden olabilir. Gerçekleştirilen çalışmada 5-fazlı segmental tip ARM'nin motor gövdesinin üretimi ek bir maliyet (kalıp masrafları gibi) gerektirdiği için piyasada hali hazırda bulunan klasik asenkron motor gövdesinin kullanımına karar verilmiştir. Ankara Etimesgut'ta motor üretimi yapan Elsan A.Ş. (EMTAŞ Elektrik Motorları) ile yapılan görüşmeler sonucunda projeye sanayi kaynaklı desteğin de alınması sağlanmıştır. Fabrikanın kullanmakta olduğu 100 tip adını alan asenkron motor gövdesi 150 mm'lik stator dış çapı ve 120 mm'lik motor uzunluğu (stack length) ile düşük güçlü makinelerde tercih edilen gövde tipidir. Aynı şekilde kalıba gerek kalmadan tasarım işlemlerinin daha kolay ilerleyebilmesi için statorun iç çapının IEC standartlarına uygun olacak şekilde 80 mm ve motor mili dış

çapının fabrika standartlarına göre en küçük boyut olan 34 mm olarak seçilmesine karar verilmiştir.

Tasarımdan önce verilen bu ölçüler bazı noktalarda diğer tasarım parametrelerinin daha kolay hesaplanmasını sağlarken diğer yandan klasik tasarım yöntemi izlenmediği için karmaşıklığa da yol açmıştır.

Üretim ve analizden önce gözden geçirilmesi gereken tasarım parametreleri göz önünde bulundurularak Çizelge 4.1'deki başlangıç parametreleri verilebilir:

Çizelge 4.1. Başlangıç parametreleri

TASARIM PARAMETRESİ	DEĞERİ
Stator dış çapı (D_o)	150 mm
Stator iç Çapı (D_i)	80 mm
Motor uzunluğu (L)	120 mm
Motor mil çapı (D_{sh})	34 mm
Motor hızı (n)	1200 d/d
Besleme gerilimi (V_s)	75 V
Stator kutup sayısı (P_s)	10
Rotor kutup sayısı (P_r)	8
Faz sayısı (m)	5

Çizelge 4.1'de verilen parametrelerin yanında klasik anahtarlama relüktans motorda tasarıma yardımcı olması açısından aralıkları verilen sabiteler vardır [34]. Bu sabiteler ve değer aralıkları Çizelge 4.2'de verilmiştir. Hesaplanan parametrelerin kontrolünde ve hesaplanamayan bazı parametrelerin hesaplanmasına yardımcı olmada bu sabitelerin önemi çok büyüktür.

Literatürde bahsi geçen sabite ya da katsayıların sayısı oldukça fazladır. Fakat tasarlanacak olan yeni ARM özellikle rotor yapısı bakımından klasik ARM'lere göre çok büyük farklılıklar gösterdiği için katsayıların hepsinin kullanılmasına gerek yoktur.

Çizelge 4.2. Tasarım sabiteleri

SABİTE	TASARIM ARALIĞI	AÇIKLAMA
k_2	0,36-0,43	Rotor kutup açısının (β_r) rotor kutupları arasındaki mesafeye (τ_r) oranıdır.
k_3	0,67-1	Stator kutup açısının (β_s) rotor kutup açısına (β_r) oranıdır.
k_l	0,4-3	Motor uzunluğunun (L) rotorun dış çapına oranıdır.
k_g	50-120	Rotor kutupları arasındaki mesafenin (τ_r) hava aralığına olan oranıdır.
A	25-90 Amper/mm	Elektriksel yükleme olarak adlandırılır.
J	3-5 A/ mm ²	Akım yoğunluğudur. Motor tasarımlarında anma yükü ile çalışma durumunda mutlaka göz önünde bulundurulması gerekmektedir.
N_{cl}	1 ya da 2	Bir fazda bulunan birbirine seri bağlı sargıların sayısıdır.
B_m	1,35-1,8 T	Motor çakışık konumda iken aldığı maksimum akı yoğunluğu değeridir.
k_{th}	2,2-2,6	Stator boyunduruk kalınlığının (CW_s) stator kutup yay genişliğinin (TW_s) yarısına oranıdır. Tek faz ve iki faz uyarımlı ARM'lerde değeri farklıdır.

4.2. Yeni 5-fazlı Segmental Tip ARM'nin Tasarım Prosedürü

5-fazlı 10/8 kutuplu segmental tip ARM'nin tasarlanmasında katsayılardan ve başlangıç parametrelerinden faydalananarak aşağıda verilen başlıkları kullanmanın faydalı olacağı düşünülmüştür.

4.2.1. Hava aralığının seçimi ve “ k_l ” ve “ k_g ” katsayısının doğrulanması

Hava aralığı çok küçük güçlü makinelerde 0,18–0,25 mm aralığında seçilirken orta güç ve yüksek güçlü makineler için 0,3–0,5 mm aralığı tercih edilmektedir [110]. Hava aralığının küçük ya da büyük seçilmesi makine momentini ters orantılı olarak etkileyeceğinden çok yüksek hava aralıklarının da seçilmemesi tavsiye edilmektedir. Bu verilere göre tasarlanacak motor çok güçlü ve büyük olmadığı için göre hava aralığının 0,3 mm seçilmesine karar verilmiştir.

Statorun iç çapı rotor çapı ve hava aralığı ifadeleri ile bulunabildiğine göre;

$$D_i = D + 2g \quad (4.1)$$

elde edilir. Buradan rotor dış çapı $D = 79,4 \text{ mm}$ olarak bulunur. Başlangıçta motor uzunluğu (L) değerinin 120 mm olduğu belirtilmişti. Motor uzunluğunun (stack length) rotor dış çapına oranı;

$$k_l = L/D \quad (4.2)$$

olduğundan, $k_l = 1,51$ elde edilir. Böylece 0,4-3 aralığı tam ortalama sayılabilecek şekilde doğrulanmıştır.

Aynı şekilde hava aralığı;

$$g = \frac{\pi D}{P_r k_g} \quad (4.3)$$

ile ifade edilmektedir. Hava aralığı değeri bilindiğine göre k_g katsayısı 103,8 olarak bulunur. Bu değer 50–120 aralığını sağlamaktadır.

4.2.2. Rotor ve stator kutup açıları

Tasarım esnasında bazen Çizelge 4.2’de yer alan katsayılardan yararlanmak gerekmektedir. Örneğin $k_2 = 0,39$ (0,36-0,43 ortalaması) ve $k_3 = 0,95$ (bu katsayının normal değer aralığı 0,67-1 arası olup ortalaması da 0,84’tür. Fakat tasarlanan motor segmental tip olduğu için uyarım değişimlerinde rotor hareketini kolaylaştırmak amacıyla rotor kutup yayını statora oranla biraz daha yüksek seçmekte fayda vardır) alındığında rotor ve kutup yayları sırasıyla;

$$\beta_r = k_2 \frac{2\pi}{2P_r} \quad (4.4)$$

$$\beta_s = k_3 \beta_r \quad (4.5)$$

olarak ifade edilir ve değerleri $\beta_r = 0,33 \text{ rad}$ (19°) ve $\beta_s = 0,314 \text{ rad}$ (18°) olarak bulunur.

4.2.3. Stator ve rotor kutuplarının yay genişliği, stator boyunduruğunun kalınlığı ve stator kutup uzunluğu

Stator yay açısı ve stator iç çapına bağlı olarak statorun bir kutbunun yay uzunluğu;

$$TW_s = D_i \sin\left(\frac{\beta_s}{2}\right) \quad (4.6)$$

ile ifade edilir ve değeri de $TW_s = 12,51\text{mm}$ olarak hesaplanır. $k_{th}=2,4$ (değeri 2,2-2,6 arasındadır. Ortalama olarak 2,4 alınmıştır) ve TW_s değerlerine bağlı olarak statorun boyunduruk kalınlığı;

$$CW_s = k_{th} \frac{TW_s}{2} \quad (4.7)$$

eşitliğine göre hesaplanır ve $CW_s = 15\text{mm}$ bulunur.

Benzer şekilde rotor kutbunun yay açısı ve rotor dış çapına bağlı olarak rotor yay uzunluğu;

$$TW_r = D \sin\left(\frac{\beta_r}{2}\right) \quad (4.8)$$

ile ifade edilir ve değeri de $TW_r = 13,1\text{mm}$ olarak hesaplanır.

Statorun dış çapı, boyunduruk kalınlığı ve iç çapı bilindiğine göre bir stator kutbunun boyu kolaylıkla hesaplanabilir:

$$TH_s = \frac{D_o - (D_i + 2CW_s)}{2} \quad (4.9)$$

olarak elde edilir ve değeri $TH_s = 20\text{mm}$ 'dir.

Tasarıma başlamadan önce bilinen ve hesaplanan değerlere tekrar göz atmak gerekirse Çizelge 4.3'te verilen fiziksel parametreler tablosu elde edilebilir. Bu parametreler gözden geçirildiğinde motorun rotor yapısı ve sargı düzeni hariç diğer yapıları için taslak CAD tabanlı bir çizim oluşturulacağı kolaylıkla görülebilir.

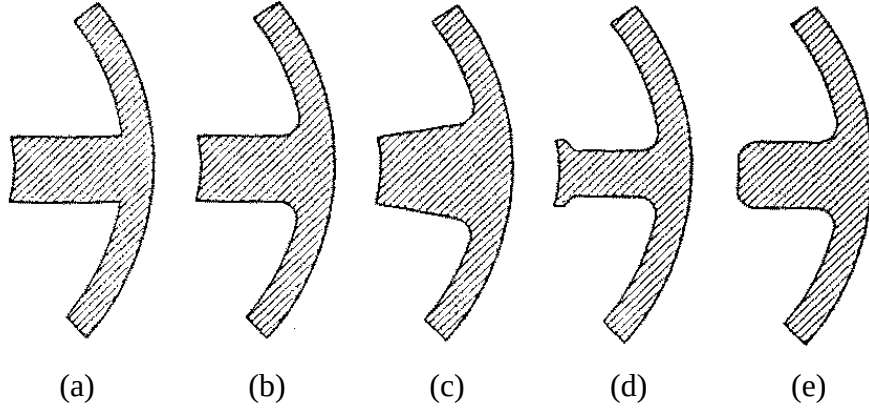
Çizelge 4.3. Fiziksel tasarım parametreleri

Tasarım Parametresi	Değeri
Stator dış çapı (D_o)	150 mm
Stator iç Çapı (D_i)	80 mm
Motor uzunluğu (L)	120 mm
Motor mil çapı (D_{sh})	34 mm
Rotor dış çapı (D)	79.4 mm
Hava aralığı (g)	0.3 mm
Stator kutup yay açısı (β_s)	18°
Rotor kutup yay açısı (β_r)	19°
Stator kutup yayının uzunluğu (TW_s)	12.51 mm
Rotor kutup yayının uzunluğu (TW_r)	13.1 mm
Statorun boyunduruk kalınlığı (CW_s)	15 mm
Bir stator kutbunun uzunluğu (TH_s)	20 mm

CAD çizimini gerçekleştirmeden önce kullanılacak kutup geometrisinin seçimine de göz atmak gerekmektedir.

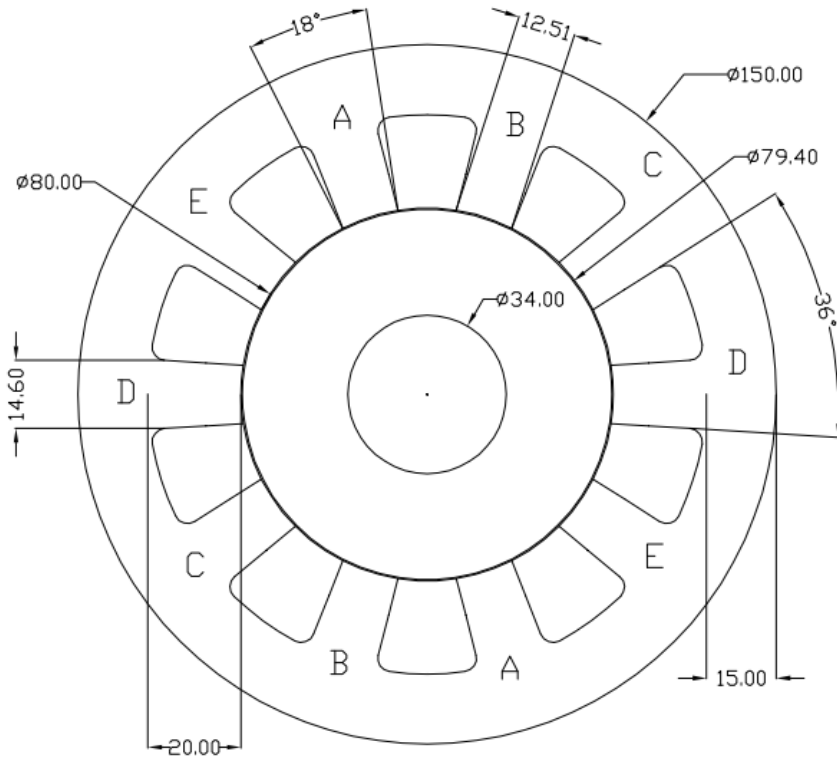
4.2.4. Kutup geometrisi ve kutup yayları

Şekil 4.1’de verilen kutup geometrilerinin farklı işlevleri bulunmaktadır. (a)’da yer alan geometri ARM tasarımında genel olarak kullanılan bir kutup geometrisidir. (b)’deki tasarım; köşeler yumuşatıldığı için kutbu yanal sapmaya karşı bükülmez hale getirir. (c)’de ise, manyetik doyum hava aralığına yakın yerlerde yoğunlaştırılır ve kutuptaki manyeto motor kuvvet (mmk) düşümü azaltılmış olur. (d) kutup takozlarının yerleştirilmesine yardımcı olmakla birlikte tutma momentinin de arttırılmasına yardımcı olmaktadır. (e)’de ise tork tepkisinin yumuşatılması amaçlanmıştır [115].



Şekil 4.1. ARM'lerde kullanılan kutup geometrilerinin ayrıntıları

Gerçekleştirilen çalışmada; (c) seçeneğinde verilen tasarım uygun görülmüş, stator ve rotor kutup yaylarının birbirine yakın olması ve yüksek verimli bir tasarım için oyuk alanının arttırılması amaçlanmıştır. Bu seçime bağlı kalarak stator kutup başları sabit kalmak üzere kutup ayakları ortalama 2 mm arttırılmıştır. Bu tanımlara göre elde edilen motor geometrisi Şekil 4.2'de verilmektedir.

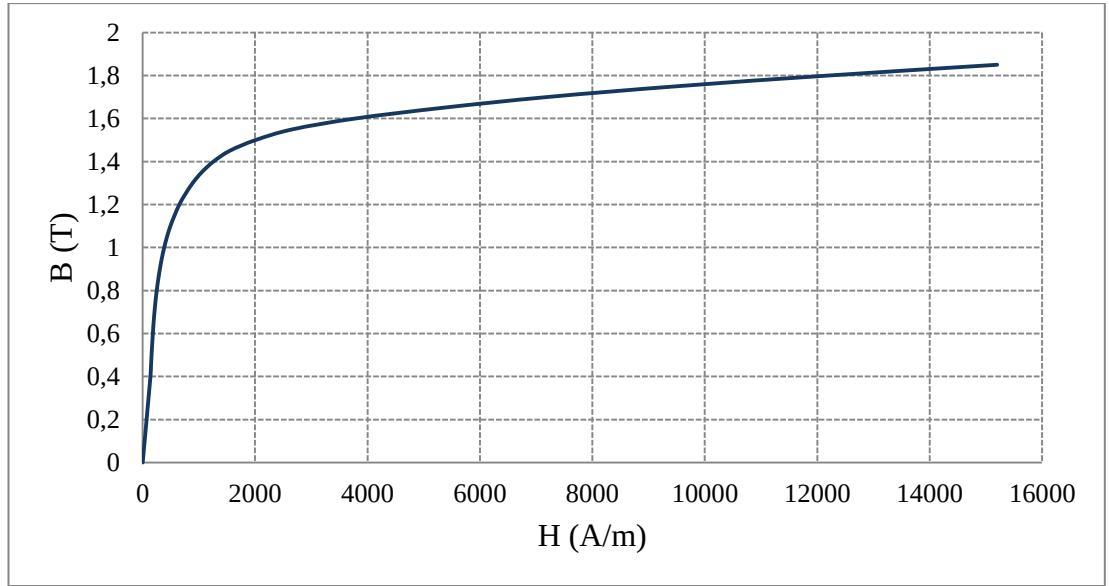


Şekil 4.2 İlk tasarım parametreleri kullanıldıktan sonra statorun son durumu

Rotor kutup yaylarının açısı ve uzunluğu hesaplanmış olmasına rağmen rotora son şekil verilmediğinden bu çizimde gösterilmemiştir.

4.2.5. B-H karakteristiği

B-H karakteristiği; tasarımda dikkat edilmesi gereken önemli konulardan birisidir. Bu aslında kullanılacak olan malzemenin özelliği itibarı ile tasarıma dâhil edilmesi gereken bir parametredir. B-H karakteristiği; stator ve rotor laminasyonlarında kullanılacak olan silisli sacın (M530-50A tipi) manyetik akı yoğunluğu B(T) değerinin manyetik alan şiddeti H(A/m) değerine bağlı olarak değişimini gösteren eğridir.



Şekil 4.3 M530-50A silisli sacın B-H karakteristiği

4.2.6. Sargı tasarımı

Motor sargılarını besleyecek gerilimin değeri baştan belirtildiği ve faz başına iki sargı grubu bulunduğu için seri sargıların her biri üzerindeki gerilim düşümü;

$$V_{coil} = \frac{V_s}{2} \quad (4.10)$$

elde edilir. Bu değer de 37,5V olarak hesaplanır. Bir sargının sarım sayısı Eş. 4.11 yardımı ile bulunmaktadır;

$$N_p = \frac{V_{coil}}{D_i L B_m n k_o} \quad (4.11)$$

Bu eşitlikten bir sargının sarım sayısı yaklaşık 50 sarım, faz başına sarım sayısı 100 sarım olarak bulunur (Verilen k_o katsayısının değeri 0,05236'dır).

Faz başına sarım sayısını hesapladığımıza göre bu sargılardan geçecek akımın maksimum değerini bulmak gerekmektedir:

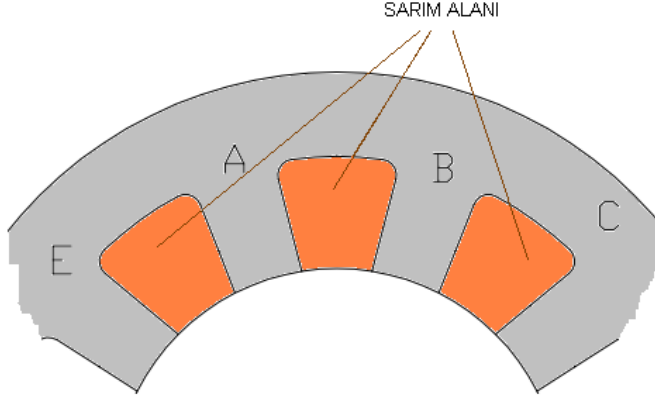
$$I_{rms} = 4,44 \frac{N_{cl} P_{out}}{2 m V_s} \quad (4.12)$$

Maksimum akım değeri $I_{rms} \cong 5A$ olarak elde edilir. İletken çapının hesaplanmasında sargının akım yoğunluğu $J=4 A/mm^2$ olarak alınmıştır. Motorlarda bu değer çalışma esnasında iki katına kadar da çıkabilir fakat tasarım yaparken değeri küçük tutmakta fayda vardır. Yukarda hesaplanan akım değerine göre iletken çapı;

$$D_w = 2 \sqrt{\frac{I_{rms}}{\pi J}} \quad (4.13)$$

Böylece iletken çapı 0,1mm'lik yalıtım malzemesi payı ile birlikte $D_w \cong 1,25mm$ olarak hesaplanır.

Hesaplanan iletken çapına bağlı olarak stator oluklarının 100 sarımlık sargı için yeterli alana sahip olup olmadığını kontrol etmek gerekmektedir. Bu işlem için en kolay yol; CAD çizimlerinin yapıldığı AutoCAD'de reg(region) komutu kullanarak seçilmiş alanın otomatik hesabının çıkartılması ve 100 sarımlık iletken kesiti ile karşılaştırılmasıdır.



Şekil 4.3. Sarım alanının hesaplanması

Şekil 4.3'te turuncu ile gösterilen alanlar iletkenlerin yer alacağı alanları göstermektedir. AutoCAD'de yapılan hesaplamaya göre her bir sargı alan 348 mm^2 'lik yer tutmaktadır. Motorlarda oluk doluluk oranı genellikle % 42-45 arasında değişmektedir. % 42'lik bir doluluk oranı 146 mm^2 'lik bir alana denk gelmektedir. 100 sarım ise $((100 \cdot \pi \cdot (D_w/2)^2))$ 'den $122,65 \text{ mm}^2$ 'lik yer tutmaktadır. Buna göre sargılar hiç zorluk çekilmeden hatta dışarıda sarılıp yerleştirilebilir.

4.2.7. Çakışık ve çakışık olmayan durumlardaki endüktans değerlerinin hesaplanması

Çakışık Durum Endüktansının (Aligned Inductance) Hesaplanması

Bu değerın hesaplanabilmesi için öncelikle stator kutup alanının bilinmesi gerekmektedir. Stator kutup alanı kaçak akı ve paketleme faktörü ihmal edilerek Eş. 4.14 kullanılarak hesaplanır;

$$A_s = \frac{1}{2} D L \beta_s \quad (4.14)$$

ve $A_s = 0,0015 \text{ m}^2$ olarak bulunur. Bu değer stator kutbundaki akı değeri hesaplanırken kullanılacaktır. İki fazın aynı andan enerjili olduğu durumda stator kutbundaki akı değeri;

$$\phi_s = 2B_s A_s \quad (4.15)$$

ile hesaplanır ve $\varphi_s = 0,00315$ wb olarak bulunur. Burada dikkat edilmesi gereken husus stator kutbundaki B_s manyetik akı yoğunluğunun B_m ile karıştırılmaması gerektiğidir. Bu değer klasik makinelerde 1,5T olarak alınırken segmental ARM’de 1,06T (sonlu elemanlar yöntemine başvurulmuştur) olarak alınmalıdır. Ayrıca ARM’nin akı eşitliğinde (Eş. 4.15) yer alan $\frac{1}{2}$ ifadesinin kaldırılması gerektiğini de unutmamak gerekir.

Bu değerler hesaplandıktan sonra motorun çakışık durumdaki endüktansı;

$$L_a = \frac{N_p \varphi_s}{i_{\max}} \quad (4.16)$$

$L_a = 63,6$ mH olarak bulunur.

Çakışık Olmayan Durum Endüktansının (Unaligned Inductance) Hesaplanması

Bu endüktans değerinin hesaplanmasında farklı yollar kullanmak gerekmektedir. Motorun anma hızı (1200 d/d) bilindiğine ve stator kutup yay açısı radyan cinsinden hesaplandığına göre (0,314 rad) motor çakışık durumdan çakışık olmayan duruma gelmek için;

$$t_{u-a} = \frac{\beta_s}{n \cdot 0,105} \quad (4.17)$$

($n \cdot 0,105$ d/d’yı radyan/sn dönüştürmek için kullanılmıştır) $t_{u-a} = 3$ ms gerekecektir.

[34]’te verilen volt-saniye (volt-second) ilişkisine göre;

$$\{L_a - L_u\}i = V_s t \quad (4.18)$$

$L_u = 18,6$ mH olarak hesaplanır.

4.3. Sonuç

Bu bölümde yeni segmental tip ARM’nin tasarım prosedürü tanıtılmıştır. Öncelikle ARM’nin tasarım parametrelerinin belirlenmesinin öneminden bahsedilmiş, tasarım parametrelerinin motorun kullanılacağı uygulama alanına göre farklılık gösterebileceği vurgulanmış ve analizden önce gözden geçirilmesi gereken tasarım

parametreleri verilmiştir. Motorun tasarımında karşılaşılan zorluklara yer verilmiş ve kısıtlamalar sunulmuştur. Tasarımdan önce verilen birkaç ölçünün bazı noktalarda diğer tasarım parametrelerinin daha kolay hesaplanmasını sağladığı, diğer yandan klasik tasarım yöntemi izlenmediği için karmaşıklığa yol açtığı gösterilmiştir.

Motorun fiziksel boyut hesapları gerçekleştirilmiştir. Kullanılan M530-50A silisli motor sacının akı yoğunluğu bilgilerine dayanarak motora ait sargı tasarımı yapılmıştır ve bu bilgilerden faydalanarak anahtarlamalı relüktans motorun en önemli parametrelerinden çakışık olan ve çakışık olmayan durumlardaki endüktans değerleri elde edilmiştir.

5. TASARLANAN MOTORUN SONLU ELEMANLAR METODU (FINITE ELEMENTS METHOD) İLE MANYETİK ANALİZİ

5.1. Giriş

Sonlu Elemanlar Yöntemi ya da Sonlu Elemanlar Metodu, kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilen veya fonksiyonel olarak formüle edilebilen problemleri çözmek için kullanılan nümerik bir tekniktir [116]. Günümüzde karmaşık mühendislik problemlerinin hassas olarak çözülmesinde etkin olarak kullanılan bir sayısal metot halini almıştır. İlk defa 1956 yılında uçak gövdelerinin gerilme analizi için geliştirilmiş olan sonlu elemanlar yöntemiyle, katı mekaniği, sıvı mekaniği, akustik, elektromanyetizma, biyomekanik, ısı transferi gibi alanlarda birçok uygulamayı analiz etmek mümkün hale gelmiştir.

Sonlu elemanlar metodundaki temel düşünce, karmaşık bir probleme, problemi basite indirgeyerek bir çözüm bulmaktır. Esas problemin daha basit bir probleme indirgenmiş olması nedeni ile kesin sonuç yerine yaklaşık bir sonuç elde edilmekte, ancak bu sonucun çözüm için daha fazla çaba harcayarak iyileştirilmesi ve kesin sonuca çok yaklaşılması, hatta kesin sonuca ulaşılması mümkün olmaktadır.

Yapılan çalışmada da sayısal olarak hesaplanan değerlerin doğruluğunu kanıtlamak için bu yöntemi kullanan paket programlar tercih edilmiştir. Motorun 3 boyutlu statik analizleri için Maxwell V12, dinamik 2 boyutlu ve klasik 5-fazlı motor karşılaştırma analizleri için FEMM 4.2 paket programı tercih edilmiştir. Tasarlanan prototip motorun rotor yapısına karar vermek için sayısal teknik yerine manyetik analizler tercih edilmiştir.

Manyetik analizler yapılmadan problem tanımlamada izlenen yolları tarif etmekte fayda vardır:

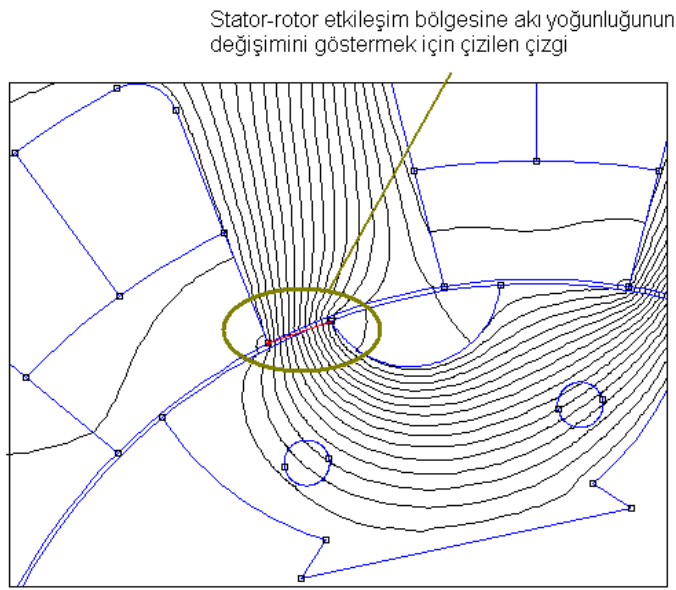
- ❖ Analizi yapılacak modellerin CAD çizimlerinin oluşturulması,
- ❖ Çizimlerin uzantıları *.dxf olacak şekilde program içerisine aktarılması,

- ❖ Problemin ana tanımlamalarının (problem çözümleyicisinin adı, model derinliği-yani motorun uzunluğu, varsa frekans değeri vb.),
- ❖ Sınır koşullarının belirtilmesi,
- ❖ Çizim içerisindeki alanların (stator, rotor, sargı gruplar vb.) belirtilmesi,
- ❖ Sarım şemasının oluşturularak sarım sayıları ile birlikte çizime uygulanması,
- ❖ Problemin ağ (mesh) haritasının çıkartılması,
- ❖ Analizin gerçekleştirilmesi,
- ❖ Sonuçların elde edilmesi ve karşılaştırma işlemlerinin gerçekleştirilmesi.

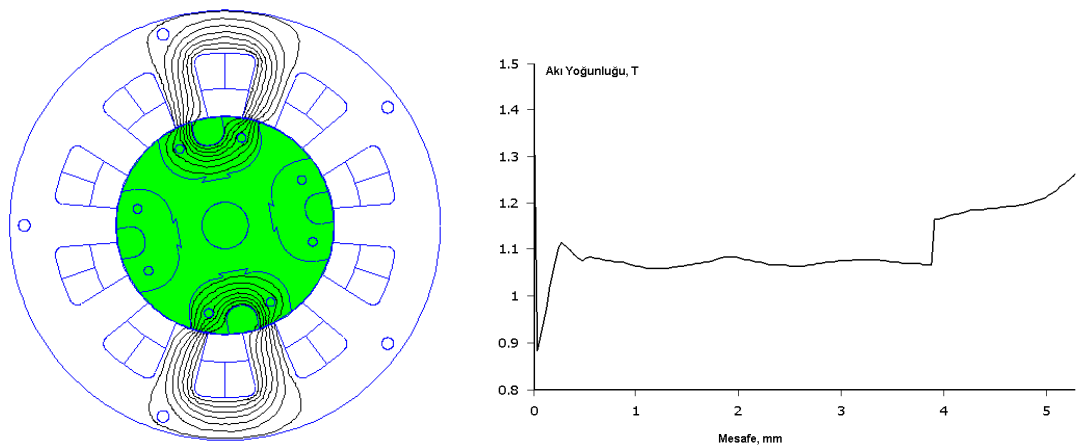
Çalışmanın giriş bölümünde şu ana kadar segmental tip ARM'ler ile ilgili çok fazla çalışmanın olmadığından bahsedilmiştir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde birkaç tür motor yapısının kullanıldığı görülmüştür. Bu çalışmalarda verilen rotor yapıları dikkate alınarak ve yukarda verilen analiz sırasına bağlı kalarak motor rotorunun belirlenmesinde bir önceki bölümde hesaplanan rotor kutup yay açısı göz önünde bulundurularak 4 adet rotor modeli geliştirilmiş ve analizleri yapılmıştır. Bu arada çalışmanın başından bu yana “segmental” olarak adlandırılan kısım olan ve analizlerde etkisinin gözle görülür bir şekilde anlaşılabileceği alüminyum blok hakkında da kısaca bilgi vermekte fayda vardır:

- a. Alüminyum manyetik özelliği olmayan bir metaldir, dolayısı ile oluşan manyetik alanı sınırlama özelliğine sahiptir. Bu özelliği ile klasik anahtarlama relüktans makinelerde tercih edilen akı bariyeri görevini başarılı ile yerine getirebilir.
- b. Alüminyum motor yapılarında kullanılan diğer metallere (örneğin paslanmaz çelik vb.) göre çok daha hafif bir metaldir. Böylece motorlarda dikkate alınan Nm/kg ağırlık başına üretilen moment değeri otomatik olarak arttırılmış olacaktır.
- c. Ayrıca alüminyum yine diğer metallere göre çok daha ucuz bir metaldir. Bu durum da prototip üretimi esnasında göz önünde bulundurulabilecek diğer bir kriterdir.

Şekil 5.2-5.5’de gerçekleştirilen bu analizlerle manyetik alan akı dağılım profilleri ile rotor-stator etkileşim bölgesindeki akı yoğunluğunun değişimi ve motorların yeşil ile boyalı bölge yani rotor üzerindeki döndürme kuvvetleri ve ürettikleri manyetik alan enerjisi gösterilmiştir. Bu değişimi göstermek için Şekil 5.1’de yeşil yuvarlak içerisine çizilmiş kırmızı bir çizgi kullanılmıştır.

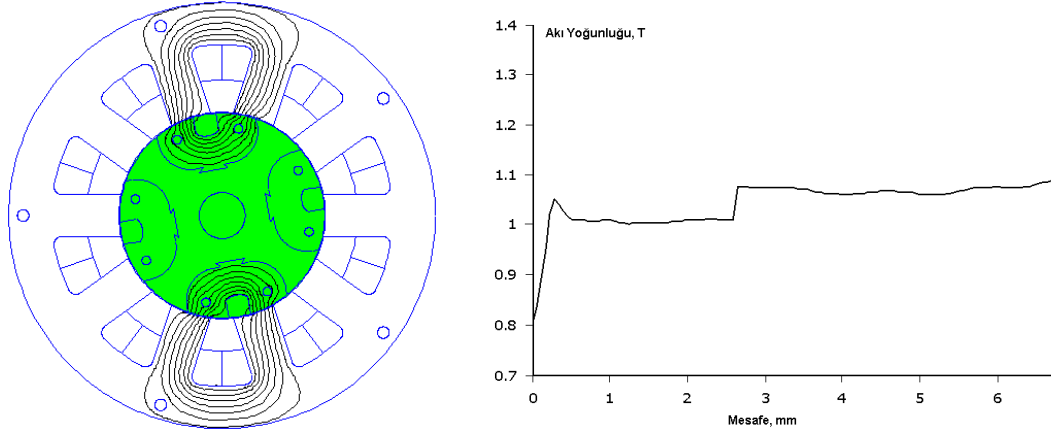


Şekil 5.1. Stator-rotor etkileşim alanındaki akı çizgisi



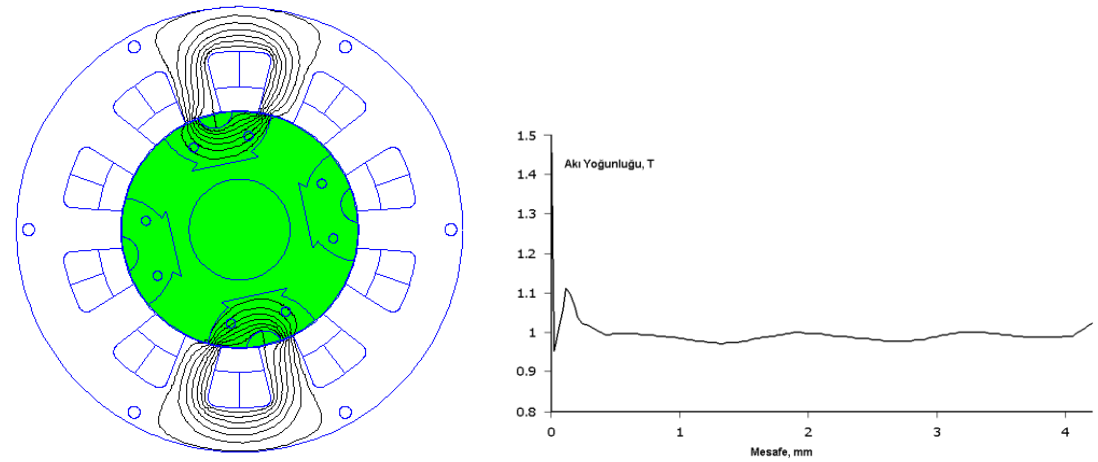
Şekil 5.2. Tasarım 1 ve hava aralığındaki akı yoğunluğunun değişimi

Şekil 5.2'deki tasarımda; akı, hava aralığının belirli bir bölgesinde yoğunlaşmıştır ve hava aralığı akısı 1 T değerinden biraz yüksektir. Ayrıca, rotor çekirdekleri tasarım açısından daha karmaşık bir yapıya sahiptir.



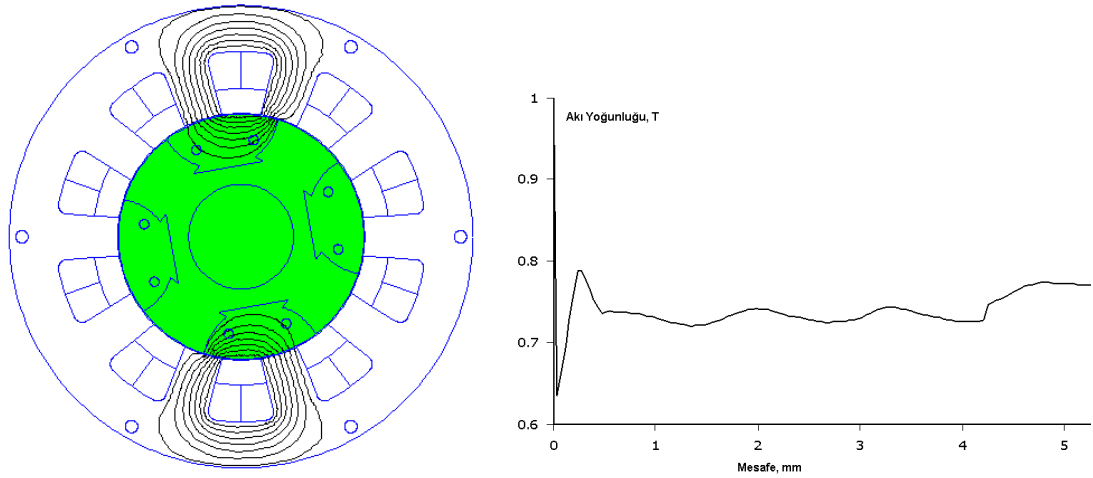
Şekil 5.3. Tasarım 2 ve hava aralığındaki akı yoğunluğunun değişimi

Şekil 5.3'deki tasarımda; rotor çekirdekleri aynı fakat stator yapısı akıyı kutup altında yoğunlaştıracak şekilde tasarlanmamıştır. Aynı şekilde hava aralığı akısı 1 T değerinden biraz yüksek ve düzensizdir.



Şekil 5.4. Tasarım 3 ve hava aralığındaki akı yoğunluğunun değişimi

Şekil 5.4'teki tasarımda; rotor çekirdekleri mekanik dayanımı arttırıcı şekilde tasarlanmıştır. Manyetik akı kutup altında daha düzgün bir şekilde dağılım göstermektedir ve değeri istenilen 1 T civarındadır.



Şekil 5.5. Tasarım 4 ve hava aralığındaki akı yoğunluğunun değişimi

Şekil 5.5'teki Tasarım 4'ün Tasarım 3'ten tek farkı rotorda herhangi bir soğutma kanalının bulunmamasıdır. Ağırlığı daha fazla olup hava aralığında manyetik akı değişimi düzensiz ve 0.75 T civarındadır.

Çizelge 5.1 Tasarımların performans karşılaştırmaları

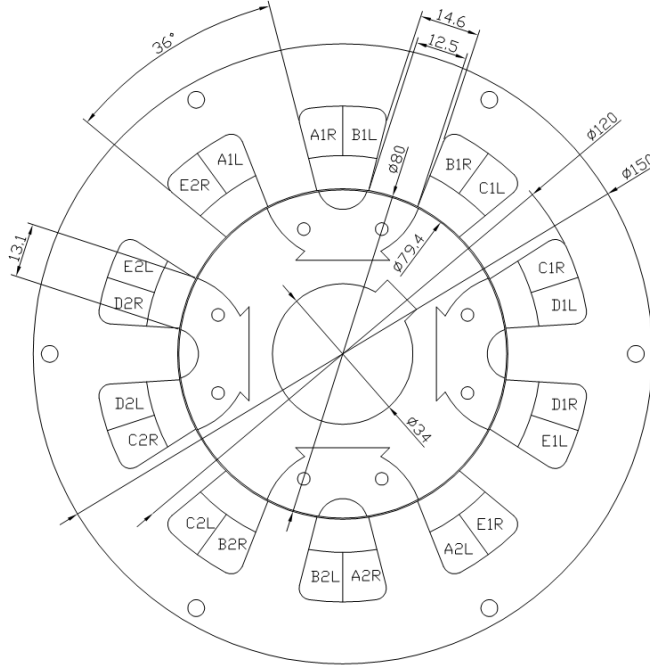
	Moment (Nm)	Manyetik Alan Enerjisi (J)
Tasarım-1	2.33	0.12
Tasarım-2	1.93	0.14
Tasarım-3	2.31	0.122
Tasarım-4	2.01	0.11

Çizelge 5.1'de ve Şekil 5.2-5.5'te verilen hava aralığındaki akı dağılım durumları incelendiğinde gerek akının hava aralığı ve kutup altlarındaki dağılımı gerekse üretilen manyetik alan enerjisi ve toplam moment açısından 3. tasarımın en ideal tasarım olacağı kanısına varılmıştır.

1. tasarım, 3. tasarıma göre daha fazla döndürme kuvveti uygularken rotor yapıları incelenirse 1. tasarımın rotor bloklarının alanının daha geniş olduğu ve bunun makine toplam ağırlığında fark yaratacağı açıktır. Ayrıca 34 mm'lik çapa sahip olan milin fabrikasyon esnasında 1. tasarım için rotorda daha az dayanıklılığa sebebiyet vereceği düşünülmüştür.

5.2. Tasarımın Son Durumu

Rotor yapısının da belirlenmesi ile motor model olarak son şeklini almış durumdadır. Sargılar dâhil motorun son durumunu Şekil 5.6'daki gibi vermek mümkündür.



Şekil 5.6. Rotorun boyutlandırılmasının ardından modelin son durumu ve sargıların harf-rakam kombinasyonu ile ifade edilmesi

Analizler yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan birisi sargı kombinasyonlarına dikkat edilmesidir. Şekil 5.6'da görüldüğü gibi stator sargıları kısa adımlı olarak sadece kutuplar çevresine sarılmıştır ve kutup çevresine sarılmış olan karşılıklı her iki sargı grubu ana sargıyı oluşturmuştur. Sargı bağlantılarının düzgün bir şekilde yapılabilmesi için karşılıklı kutuplar A1, A2 vb. ve buna müteakip kutbun solunda kalan sargı kenarı A1L, B1L vb., sağında kalan sargı kenarı A1R, B1R vb. olarak adlandırılmış ve ana A sargısını oluşturabilmek için A1R ile A2L uçları birbirine bağlanmıştır. Gerek 3D gerekse 2D analizlerde her uyarım anında Çizelge 5.2'de verilen bilgilere bağlı kalınarak motorun kısa akı yolları oluşturabilmesi için çalışmanın temellerinden biri olan bitişik fazlardan uygun olanının polaritesinin değiştirilmesi gerekmektedir (bipolar uyarım).

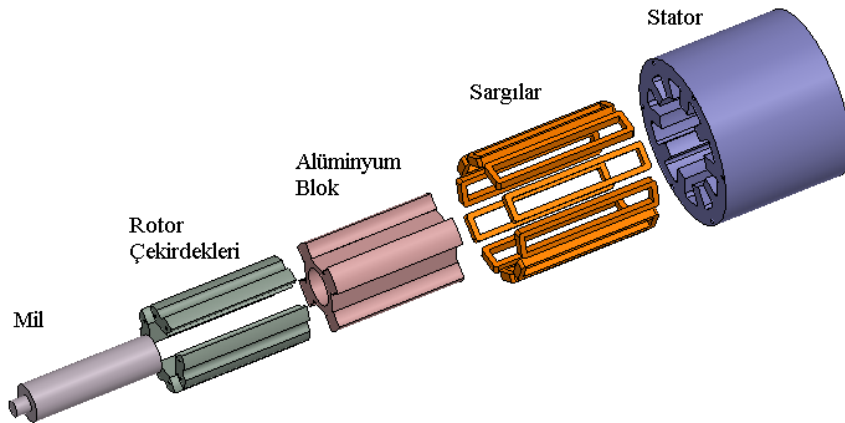
Çizelge 5.2. 90 derecelik dönüş boyunca fazlardaki akım yönlerinin değişimi

	0-18	18-36	36-54	54-72	72-90
A Fazı	0	+	0	-	0
B Fazı	-	0	0	+	0
C Fazı	+	0	-	0	0
D Fazı	0	0	+	0	-
E Fazı	0	-	0	0	+

5.3. 5-Fazlı 10/8 Konfigürasyonlu Segmental ARM Modelinin 3D Manyetik Analizi

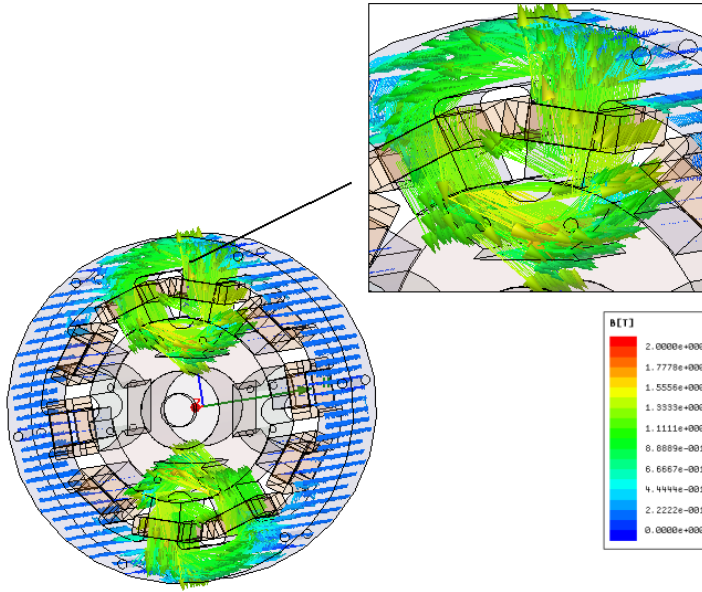
Tasarlanan ARM'nin statik 3D analizleri Maxwell V12 paket programı ile gerçekleştirilmiştir. 3D analizler manyetik akı yollarının ve manyetik alan şiddetinin yüzeyler üzerinde dağılımı ile ilgili olarak daha detaylı bilgi vermektedir. Karşılaştırma hesaplarının (endüktans, akı bağıntıları ve moment vb.) gerçekleştirilmesi 2D programlarda süre açısından kolaylık sağladığı için 3D analizlerde herhangi bir hesaplama yoluna gidilmemiştir.

Tasarımın katı modeli AutoCAD ile oluşturulup *.sat uzantısı ile Maxwell V12 içerisine alınmış ve gerekli akım, sınır koşulları, malzeme özellikleri tanımları yapılmıştır. Katı modeli oluşturulan motor parçalarının görünüşü Şekil 5.7'de verilmektedir.

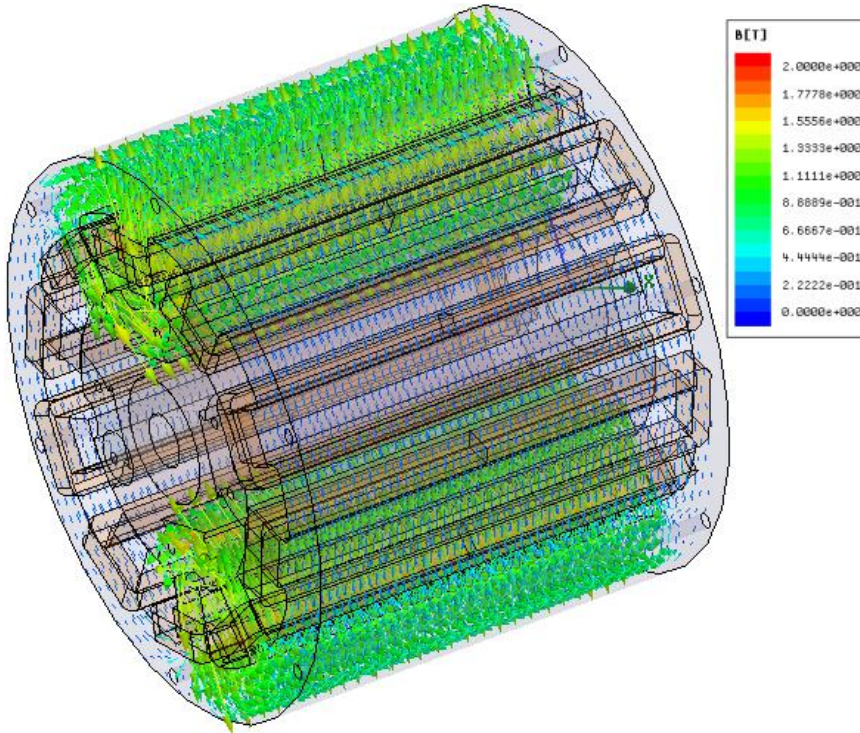


Şekil 5.7 Tasarlanan motorun 3D Maxwell katı modeli

Şekil 5.8- 5.10'da motorun sadece B ve C fazları enerjili iken (çizelgeye göre B fazının polaritesi değiştirilecek şekilde uyarıldığında) motorun 3D kuvvet çizgileri dağılım, akı yoğunluğu ve manyetik alan enerjisi dağılım şekilleri görülmektedir.

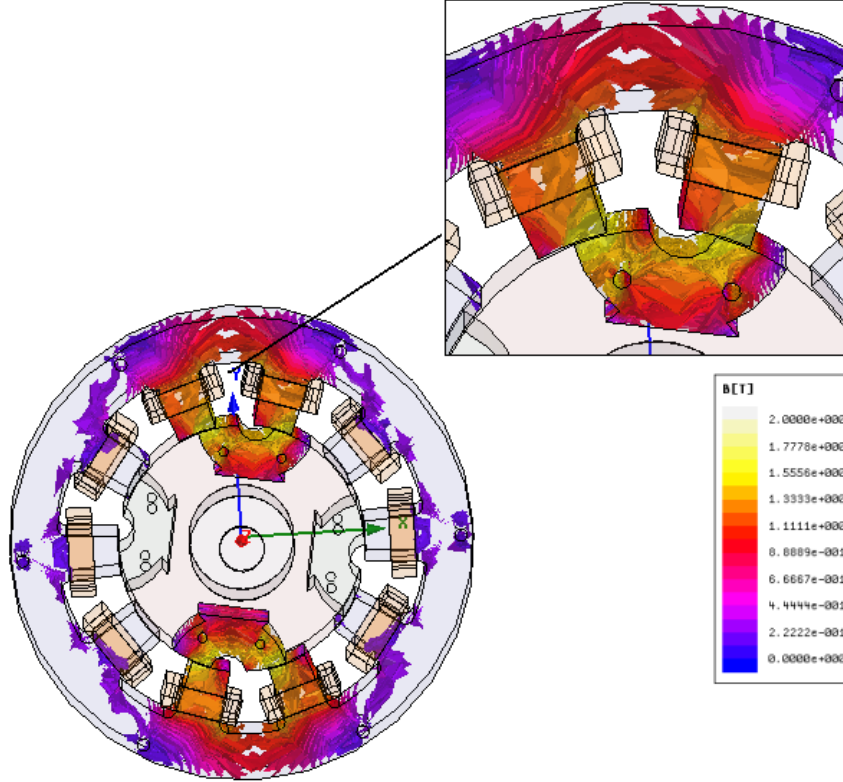


Şekil 5.8. B-C fazları enerjili iken kuvvet çizgilerinin durumu (ön görünüş)



Şekil 5.9. B-C fazları enerjili iken kuvvet çizgilerinin durumu (üst görünüş)

Motor tasarımları dikkate alındığında hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun 0,9-1 T civarında olması istenen bir tasarım ölçütüdür. Şekil 5.8 ve Şekil 5.9 incelendiğinde “yeşil” renk ile gösterilen kuvvet çizgilerinin 1-1,1 T civarında manyetik akı yoğunluğu oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 5.10. B-C fazları enerjili iken manyetik alan enerjisinin dağılımı

Sadece B ve C fazları enerjili iken tasarlanan model yarı çakışık konumda (semi-aligned) gayet düzgün bir manyetik alan enerjisi dağılımı vermektedir.

5.4. 5-Fazlı 10/8 Konfigürasyonlu Segmental ARM Modelinin 2D Manyetik Analizi ve Klasik 5-Faz ARM ile Karşılaştırılması

Bu kısımda gerçekleştirilen çalışmada; hem klasik 5-faz ARM hem de yeni tasarım 5-faz segmental tip ARM, FEMM 4.2 programında ideal akım kaynakları ile 5A’lık anma akımı altında uyarılmış ve ortaya çıkan akı, endüktans, moment profilleri karşılaştırılmıştır.

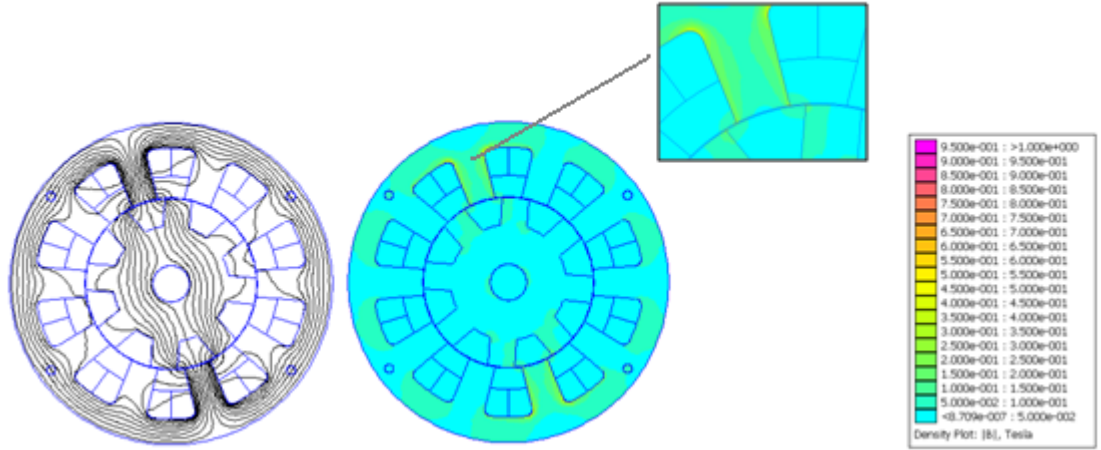
5.4.1. Akı dağılımlarının karşılaştırılması

Motorların çakışık olmayan konumdan başlanarak aynı dönme açılarına denk gelecek şekilde çeşitli konumlarda (2° - 4° - 6° - 8° - 10° 'lik konumlarda ve tam çakışık konumda) akı profilleri ve akı çizgilerinin stator-rotor yüzeylerinde dağılımlar elde edilmiştir. Bu durumlar aynı açılarda modellerin manyetik alan enerjileri ve ürettikleri momentleri kolaylıkla kavrayabilmek açısından çok büyük önem teşkil etmektedir.

Klasik ARM'deki Akı Dağılımları

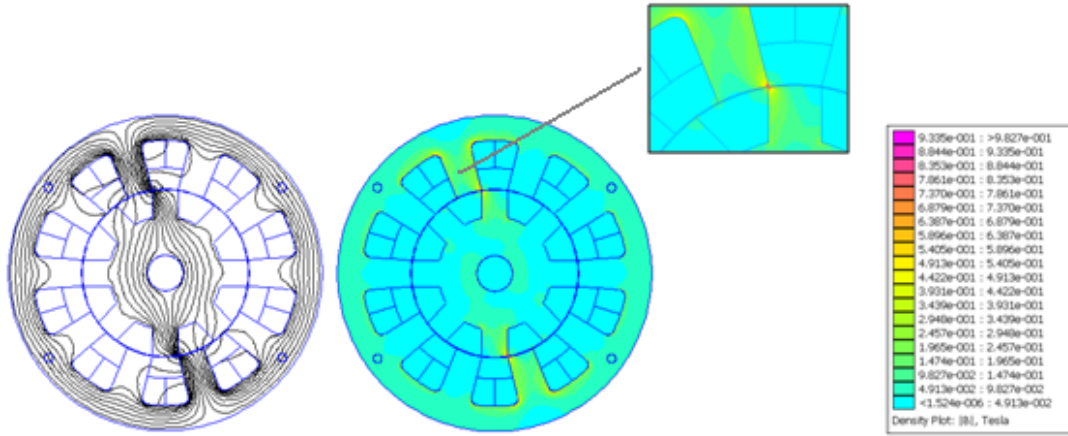
Şekil 5.11-5.17 klasik ARM'deki akı dağılımlarını göstermektedir.

Şekil 5.11'de çakışık olmayan durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu verilmiştir. Bu durumda akının rotor kutupları üzerindeki dağılımı düzensizdir. Motorun hareket etmesi için gerekli akı yoğunluğu yok denecek kadar az olup endüktans minimum durumdadır ve rotoru döndürecek herhangi bir moment üretilmemektedir.



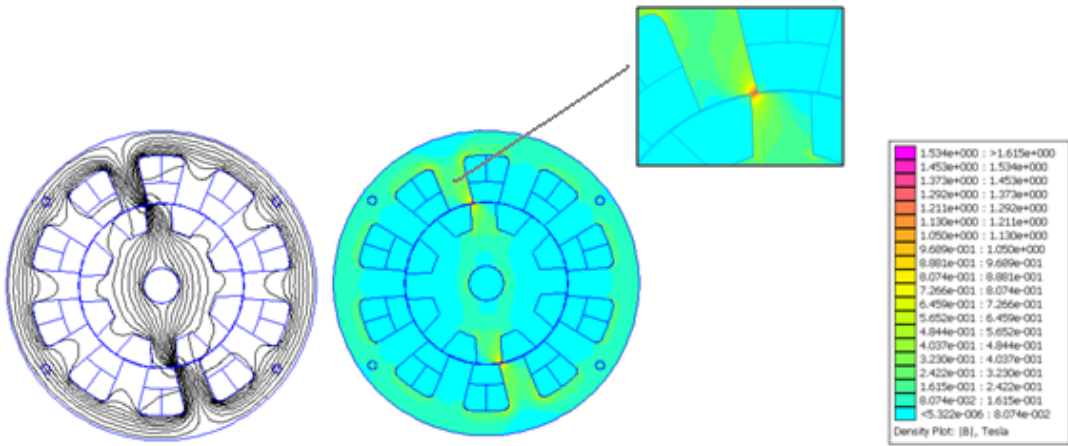
Şekil 5.11. Klasik 5-faz ARM'nin çakışık olmayan durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu

Şekil 5.12'de klasik 5-faz ARM'de rotorun çakışık olmayan durumdan statora sadece 2° yaklaştığı durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu verilmiştir. Motor bu durumda moment üretmeye başlamıştır. Stator ve rotorun etkileşim alanında yaklaşık 1 T'lık manyetik akı yoğunluğu elde edilmiştir.



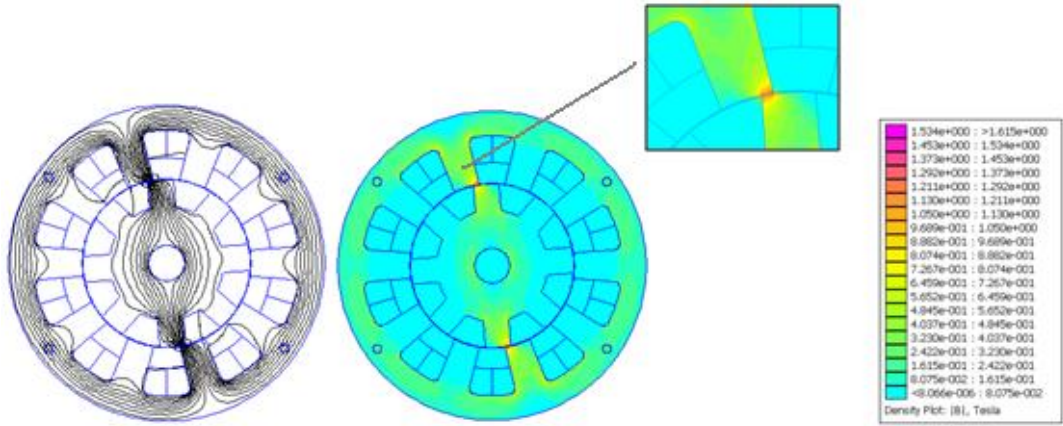
Şekil 5.12. Klasik 5-faz ARM’de rotorun çakışık olmayan durumdan statora sadece 2° yaklaştığı durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu

Şekil 5.13’te de durum aynıdır. Klasik 5-faz ARM’de rotorun çakışık olmayan durumdan statora sadece 4° yaklaştığı durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu verilmiştir. Motor bu durumda moment üretimine devam etmektedir. Stator ve rotorun etkileşim alanında yaklaşık 1,1 T’lık manyetik akı yoğunluğu elde edilmiştir.

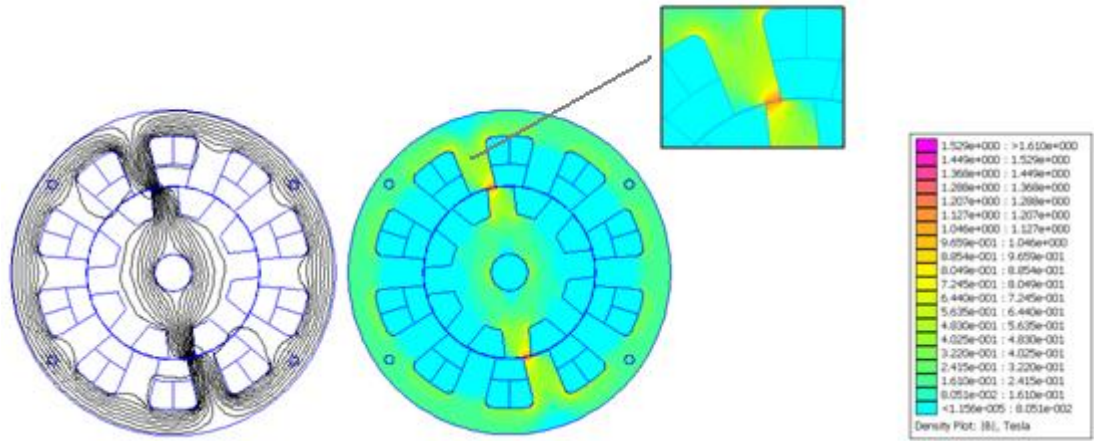


Şekil 5.13. Klasik 5-faz ARM’de rotorun çakışık olmayan durumdan statora 4° yaklaştığı durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu

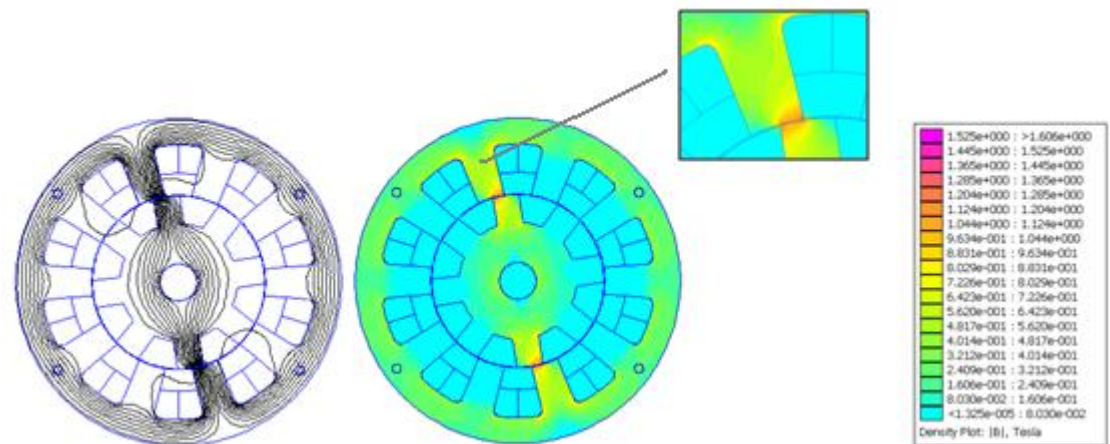
Şekil 5.14-5.17’de manyetik akının dağılımında aynı yorumları yapmak mümkündür.



Şekil 5.14. Klasik 5-faz ARM’de rotorun çakışık olmayan durumdan statora 6° yaklaştığı durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu

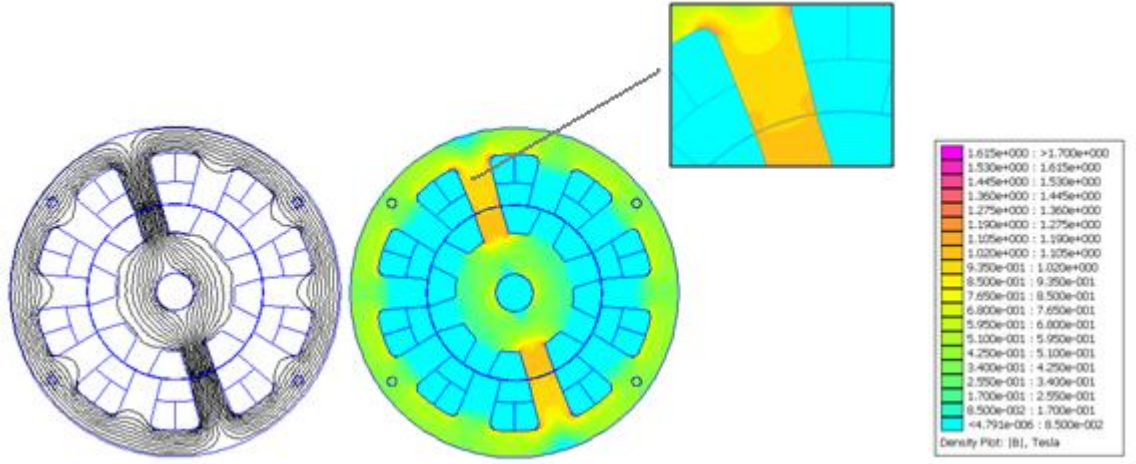


Şekil 5.15. Klasik 5-faz ARM’de rotorun çakışık olmayan durumdan statora 8° yaklaştığı durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu



Şekil 5.16. Klasik 5-faz ARM’de rotorun çakışık olmayan durumdan statora 10° yaklaştığı durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu

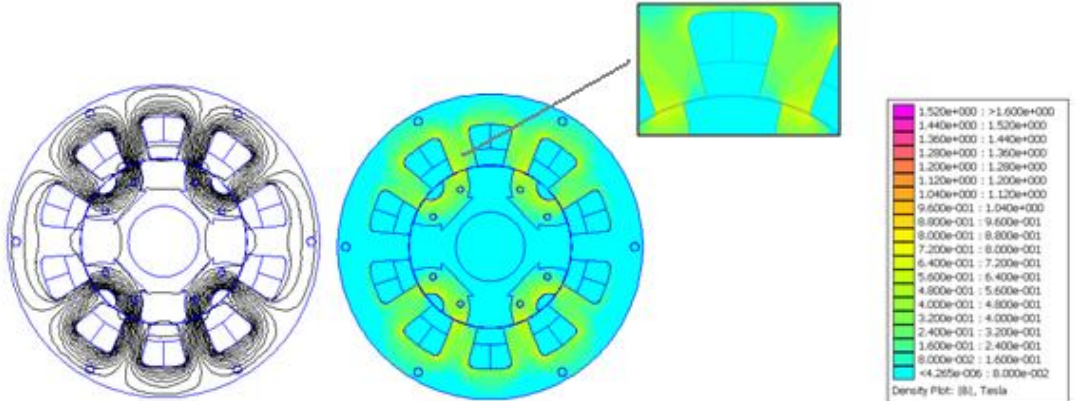
Şekil 5.17’de klasik 5-faz ARM’nin tam çakışık durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu verilmiştir. Bu durumda endüktans maksimum değerini alır. Fakat karşılıklı iki kutbu birbirine bağlayan stator boyunduruğunun oluşturduğu uzun manyetik yolda da önemli ölçüde manyeto motor kuvvet tüketilir ve bu da çakışık konumdaki endüktansı azaltıcı bir etki yapar. Bu yüzden üretilen moment minimum değerini almaktadır.



Şekil 5.17. Klasik 5-faz ARM’nin tam çakışık durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu

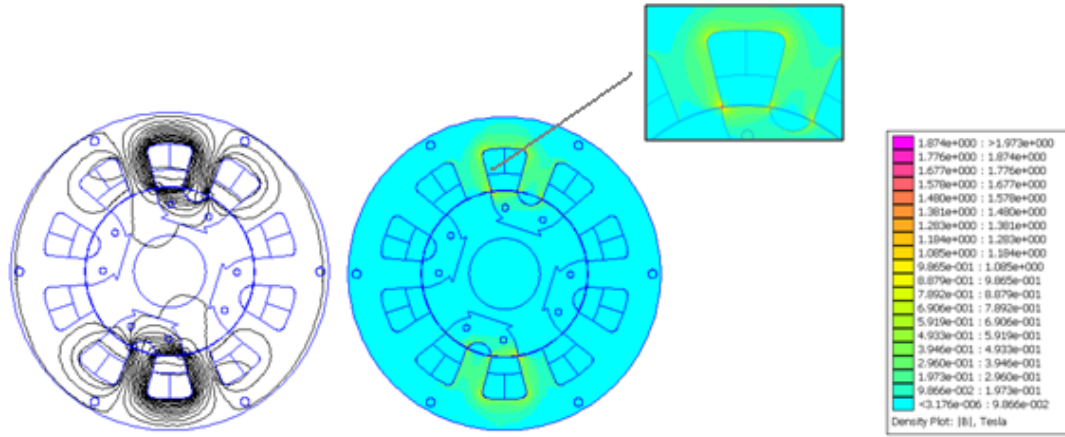
Tasarlanan 5-Fazlı Segmental Tip ARM’deki Akı Dağılımları

Şekil 5.18’de segmental tip ARM’nin çakışık olmayan durumdaki akı dağılımı ve yoğunluğu verilmiştir. Bu konumda, endüktans minimum durumdadır ve motor rotoru döndürecek herhangi bir moment üretememektedir.

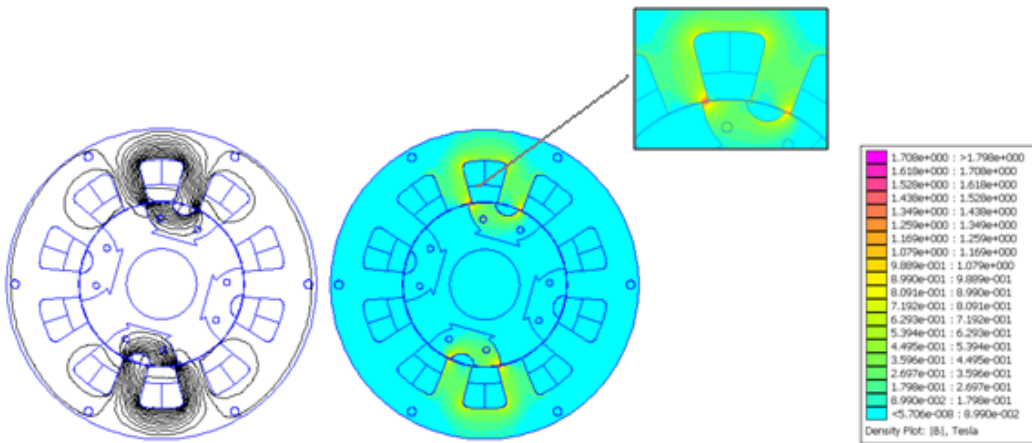


Şekil 5.18. Segmental tip ARM’nin çakışık olmayan durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu

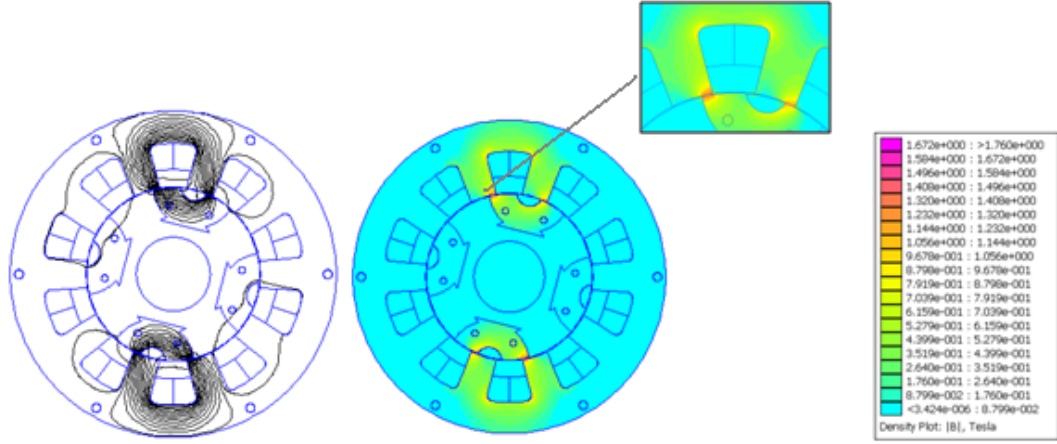
Şekil 5.19’da segmental tip 5-faz ARM’de rotorun çakışık olmayan durumdan statora sadece 2° yaklaştığı durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu verilmiştir. Motor bu durumda moment üretmeye başlamıştır. Stator ve rotorun etkileşim alanında yaklaşık 1 T’lık manyetik akı yoğunluğu elde edilmiştir. Şekil 5.19-5.23’te de aynı yorumları yapmak mümkündür.



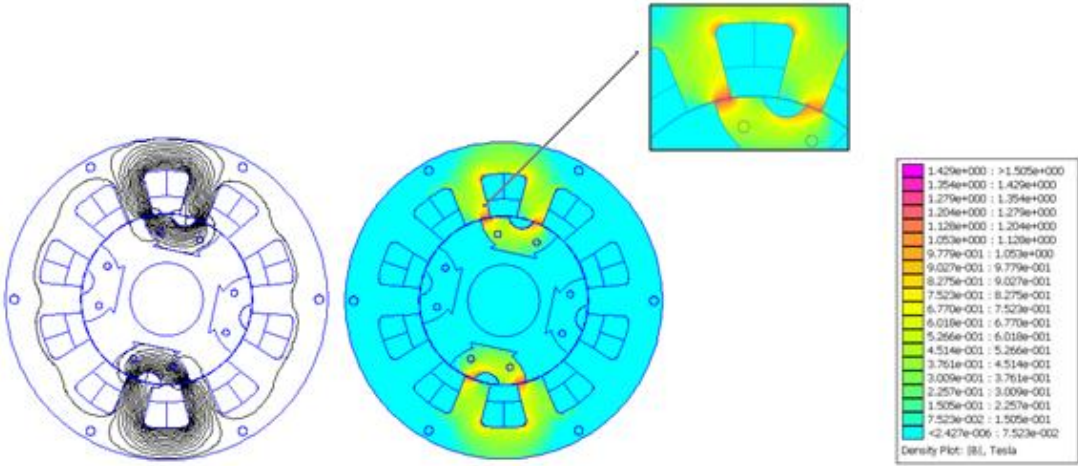
Şekil 5.19. Segmental tip ARM’de rotorun çakışık olmayan durumdan statora sadece 2° yaklaştığı durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu



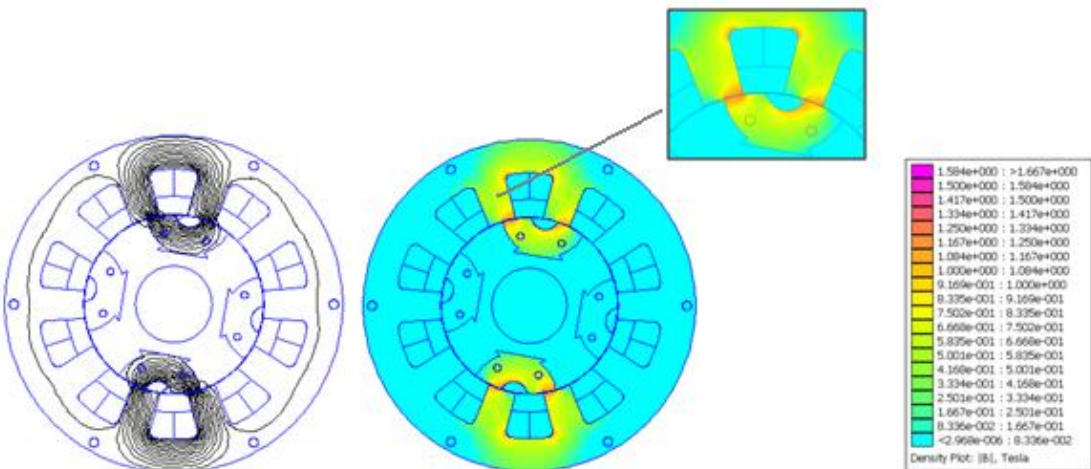
Şekil 5.20. Segmental tip ARM’de rotorun çakışık olmayan durumdan statora 4° yaklaştığı durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu



Şekil 5.21. Segmental tip ARM’de rotorun çakışık olmayan durumdan statora 6° yaklaştığı durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu

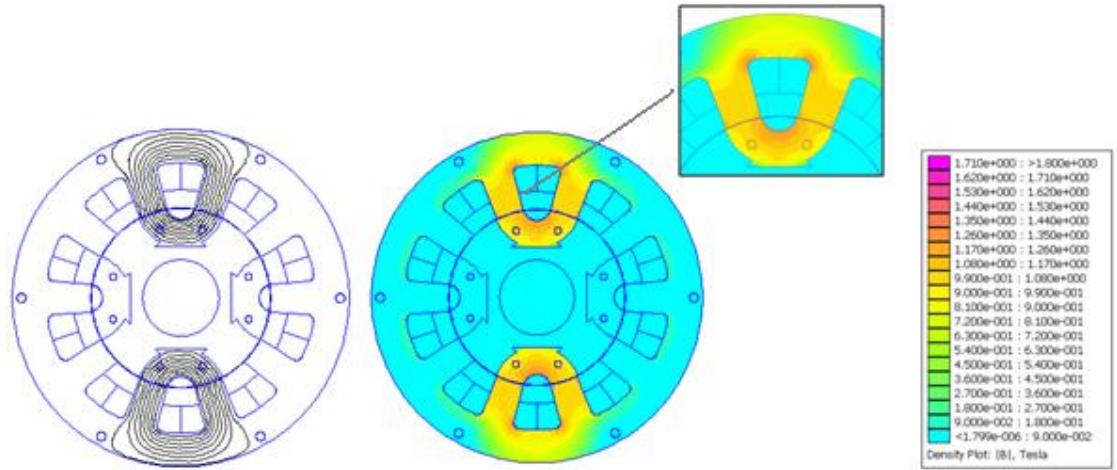


Şekil 5.22. Segmental tip ARM’de rotorun çakışık olmayan durumdan statora 8° yaklaştığı durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu



Şekil 5.23. Segmental tip ARM’de rotorun çakışık olmayan durumdan statora 10° yaklaştığı durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu

Şekil 5.24'te segmental tip 5-faz ARM'nin tam çakışık durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu verilmiştir. Bu durumda endüktans maksimum değerini alır. Fakat stator ve rotor kutupları manyetik yol üzerinde sanki kısa devre olmuş gibi davranırlar. Bu yüzden üretilen moment minimum değerini almaktadır.



Şekil 5.24. Segmental tip ARM'nin tam çakışık durumdaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu

5.4.2. Benzetim sonuçları

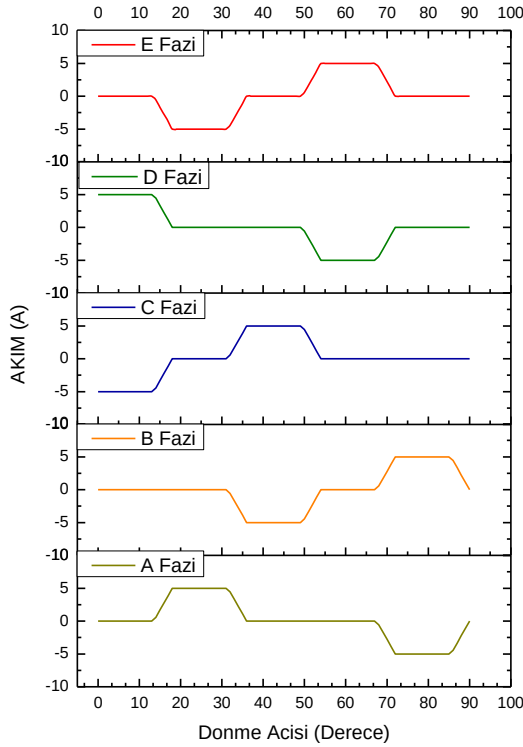
Yapılan analizler esnasında elde edilen moment ve manyetik alan enerjisi değerleri kaydedilerek Çizelge 5.3 oluşturulmuştur.

Çizelge 5.3. Klasik ve segmental tip ARM'nin moment ve manyetik alan enerjisi

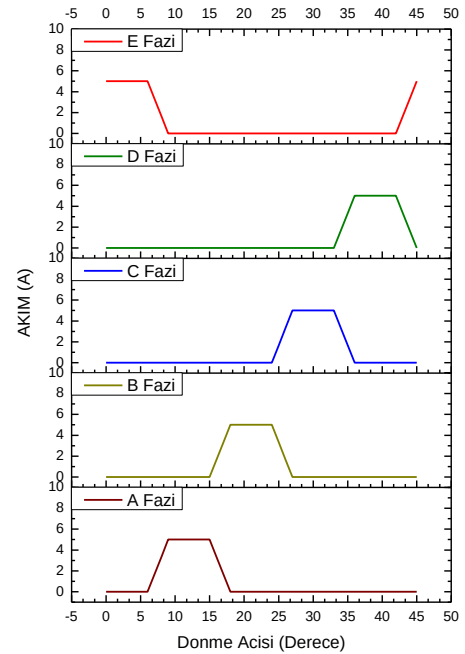
	Klasik 5-Faz ARM		Tasarlanan Segmental Tip ARM	
	Moment (Nm)	Manyetik Alan Enerjisi (J)	Moment (Nm)	Manyetik Alan Enerjisi (J)
Çakışık olmayan durum	0	0.05	0	0.32
2°	0.89	0.073	1.75	0.19
4°	1.13	0.11	2.17	0.26
6°	1.14	0.15	2.27	0.34
8°	1.145	0.19	2.30	0.42
10°	1.146	0.23	2.34	0.5
Çakışık durum	0	0.41	0	0.85

Çizelge 5.3 dikkatle incelenirse her iki motorun da çakışık ve çakışık olmayan konumlarda herhangi bir moment üretmediği görülmektedir. Rotorun ara konumlarında ise tasarlanan yeni ARM'nin bazı durumlarda klasik ARM'nin iki katından daha fazla moment ürettiği görülmektedir.

Konunun daha iyi anlaşılabilmesi için FEMM 4.2 programının kullanabileceği ve LUA yazılım dili ile geliştirilmiş bir script kullanılmıştır. Geliştirilen dönme scriptleri ile akım fonksiyonlarının kodları EK 1-4'te verilmektedir. Bu kod yardımı ile hem klasik ARM hem de yeni tasarım segmental tip ARM 0°'den 90°'ye kadar 1° açı ile döndürülmüş her dönme açısında motora ideal akım kaynakları ile uygulanan akımın fazlara göre dağılımı, motorun ürettiği statik moment, akı bağıntıları ve manyetik alan enerjileri bulunmuştur. Bu değerler kullanılarak motorların endüktans değerleri her an için hesaplanmış ve gerekli karşılaştırma verileri elde edilmiştir.



(a)



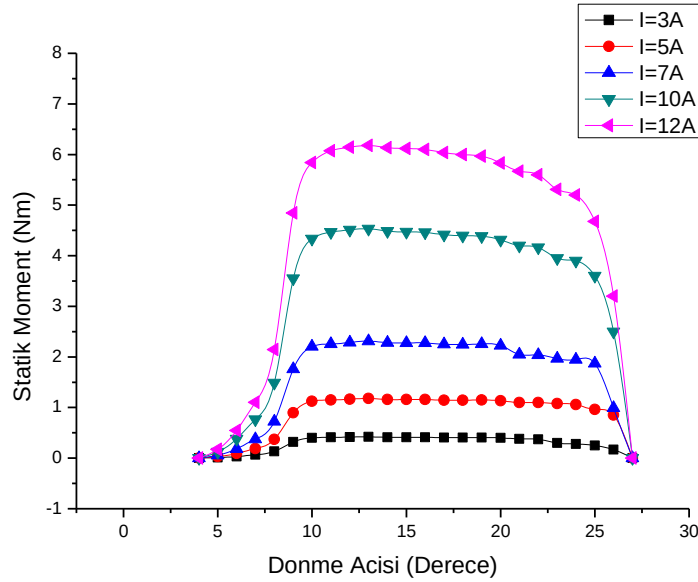
(b)

Şekil 5.25. (a) Yeni tasarım segmental tip ARM'nin 0–90°'de akım profillerinin fazlara göre dağılımı,
(b) Klasik ARM'nin 0–45°'de akım profillerinin fazlara göre dağılımı.

Şekil 5.25'deki grafiklerde görüldüğü gibi motorun her dönüş açısında klasik motorun sadece bir fazı enerjilendirilirken yeni tasarım motorun bitişik olan iki fazı ortak endüktans oluşturacak şekilde (fazlardan birisinin uyarım yönü değiştirilerek) enerjilendirilmiştir.

Klasik 5-Faz ARM'den Elde Edilen Sonuçlar

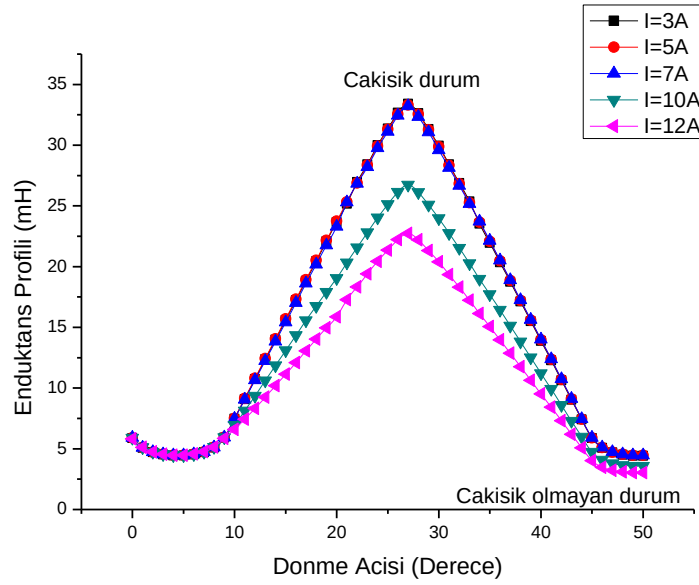
Şekil 5.26'da klasik ARM'nin sadece B fazı enerjili iken ürettiği statik momentin rotor konumu ve faz akımına bağlı olarak değişimi verilmektedir. Akımın artışına bağlı olarak endüktansın etkisi de göz önünde bulundurularak üretilen momentin arttığı gözlemlenmektedir.



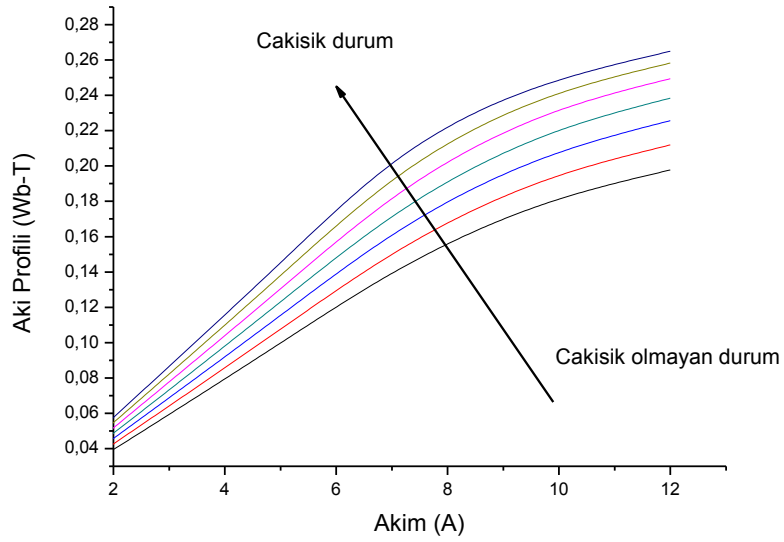
Şekil 5.26. Klasik ARM'nin sadece B fazı enerjili iken ürettiği statik moment profili

Şekil 5.27'de klasik ARM'nin sadece B fazı enerjili iken rotor konumu ve faz akımına bağlı olarak endüktans değişimi verilmektedir. Moment ifadesi dikkate alındığında akım ile endüktansın ters orantılı olarak değiştiğini unutmamak gerekmektedir. Şekil 5.28; akıma bağlı akı profilini vermektedir.

Buna göre akımın yüksek olduğu durumda endüktansın daha düşük, aynı zamanda çakışık olmayan konumdan çakışık konuma doğru gelindiğinde hava aralığı direncinin azalmasından dolayı endüktansın daha büyük değer aldığı görülmektedir.



Şekil 5.27. Klasik ARM'nin sadece B fazı enerjili iken endüktans profilinin dağılımı

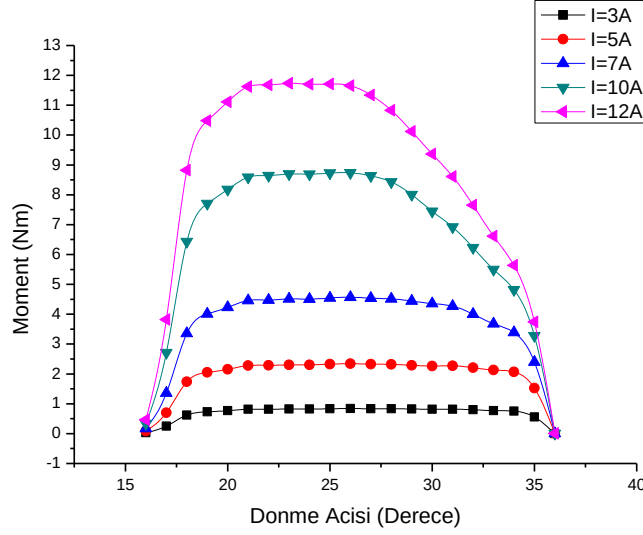


Şekil 5.28. Klasik ARM'nin akım-akı değişim profili

Tasarlanan Segmental Tip 5-Faz ARM'den Elde Edilen Sonuçlar

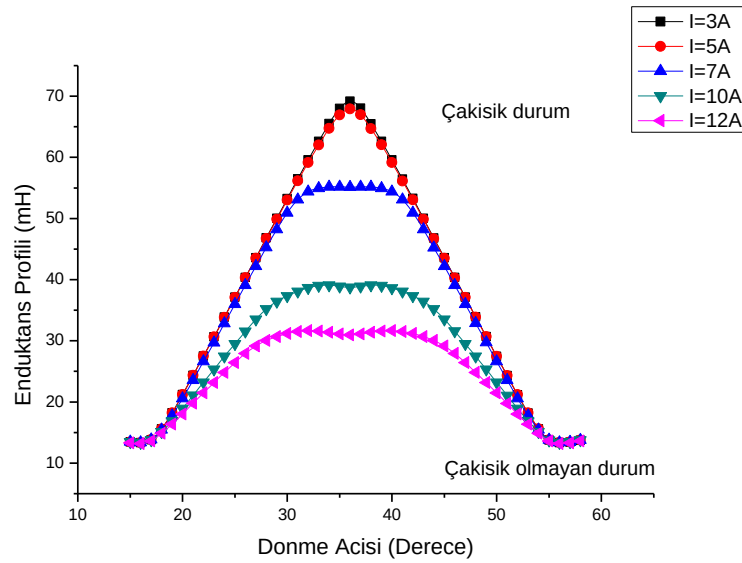
Şekil 5.29'da segmental ARM'nin 16°-36°'lik rotor konumlarında E - A fazları enerjili iken faz akımının değerine bağlı olarak elde edilen moment karakteristiği

verilmektedir. Akımın artışına bağlı olarak endüktansın etkisi de göz önünde bulundurularak üretilen momentin arttığı gözlemlenmektedir.

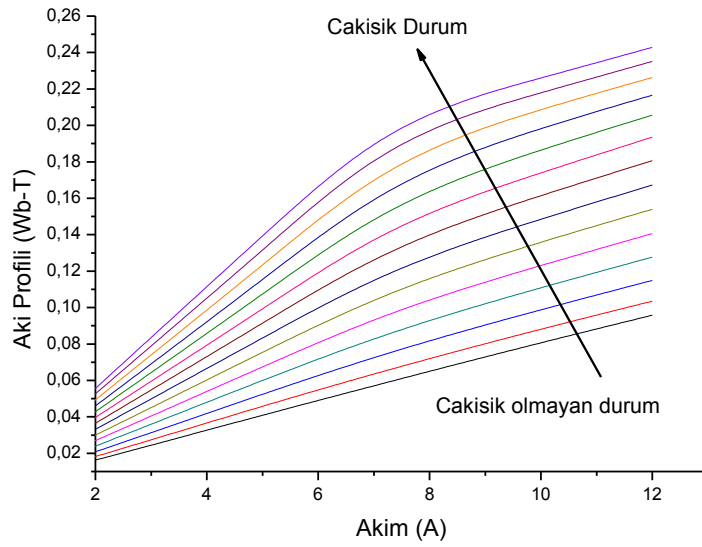


Şekil 5.29. Tasarlanan yeni ARM'nin rotor 16°-36° arasında ve E - A fazları enerjili iken elde edilen moment karakteristiği

Şekil 5.30'da segmental ARM'nin 15°-58° arasında elde edilen endüktans değişimi verilmiştir. Çakışık olmayan konumdan çakışık konuma doğru gelindiğinde hava aralığı direncinin azalmasından dolayı endüktansın daha büyük değer aldığı görülmektedir. Şekil 5.31; akıma bağlı akı profilini vermektedir.



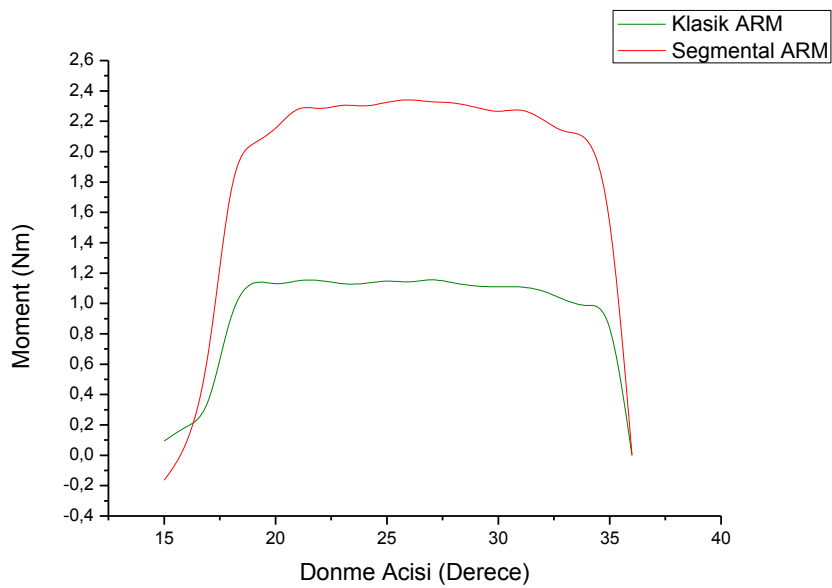
Şekil 5.30. Tasarlanan yeni ARM'nin 15°-58° arasında elde edilen endüktans karakteristiği



Şekil 5.31. Segmental tip ARM'nin akım-akı değişim profili

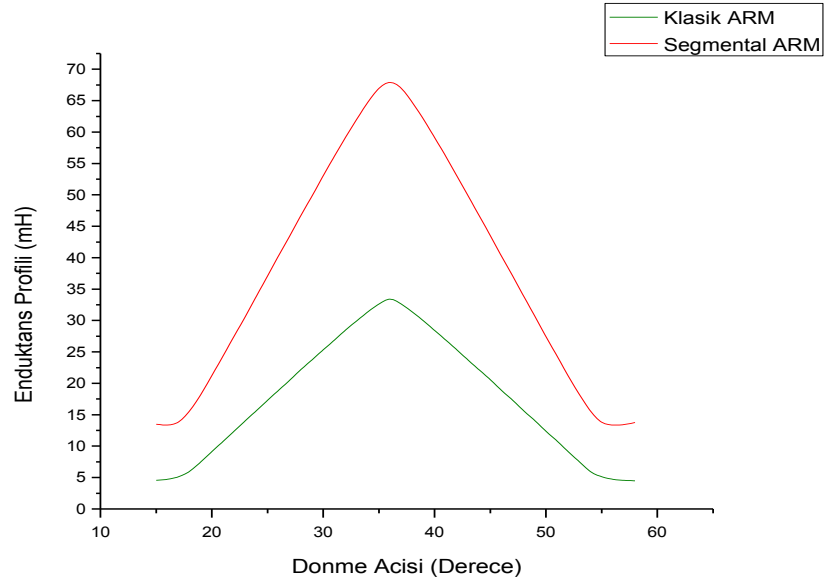
5-Faz Klasik ve Segmental ARM'nin Benzetim Sonuçlarının Karşılaştırılması

Benzetim sonuçları değerlendirildiğinde aynı koşullarda (boyut, ortam ve uyartım koşulları) ve aynı dönme açılarında Şekil 5.32'de segmental ARM'nin klasik ARM'ye göre aynı dönme açılarında iki faz enerjilendirme prensibine göre yaklaşık 2,10 kat daha fazla moment ürettiği görülmektedir.



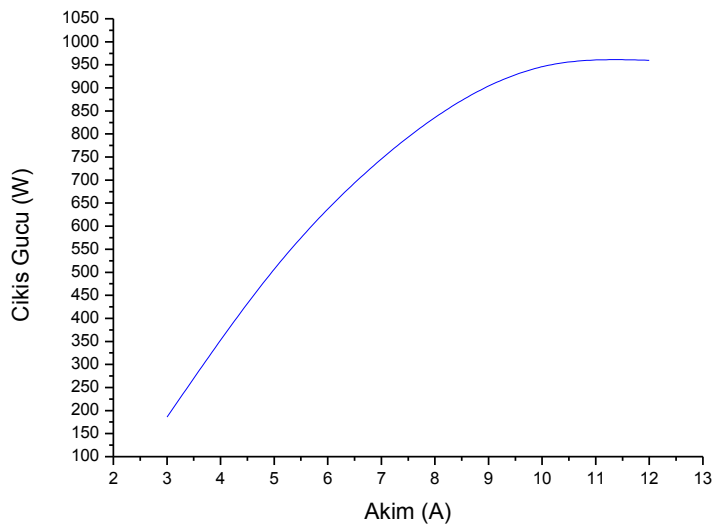
Şekil 5.32. Klasik ve segmental ARM'nin 15°-36° arasında moment değişimleri

Şekil 5.33'te gösterilen endüktans eğrisi de aynı anda iki fazın enerjilendirilmesi nedeniyle yeni segmental ARM için yaklaşık iki kat daha fazladır.

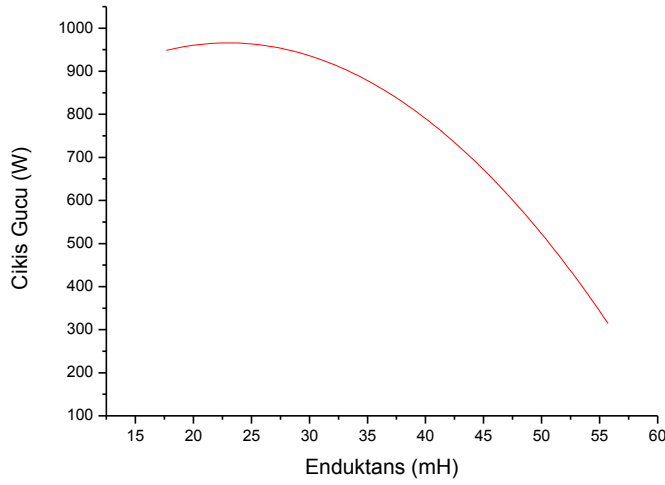


Şekil 5.33. Klasik ve segmental ARM'nin 15°-58° arasında endüktans değişimleri

Şekil 5.34 ve 5.35'te benzetim sonuçlarına göre tasarlanan 10/8 5-fazlı segmental ARM'nin yüke (yük akımına) ve endüktansa bağlı olarak çıkış gücündeki değişimleri verilmiştir.



Şekil 5.34. Segmental ARM'nin yük akımına bağlı olarak çıkış gücündeki değişimi



Şekil 5.35. Segmental ARM'nin endüktans değişimine bağlı olarak çıkış gücündeki değişimi

Çizelge 5.4. Klasik ARM ve Yeni Parçalı Tip ARM çıkış değerleri

Parametre	Segmental ARM	Klasik SRM
5 A'de maksimum moment (Nm)	2.34	1.15
Aktif M530-50A silikon çelik ağırlığı (kg)	9.90	11.47
Alüminyum blok ağırlığı (kg)	0.71	-
5 A'de manyetik alan enerjisi (Joule)	0.848	0.417
Moment/ağırlık oranı (Nm/kg)	0.22	0.1

Çizelge 5.4'te; benzetim sonuçlarına göre elde edilen segmental ve klasik ARM'nin bazı parametrelerine yer verilmiştir. Çizelge incelendiğinde iki faz enerjilendirme metodu ve rotorda uygulanan segment tekniğinin bir sonucu olarak segmental ARM'nin üretilen çıkış momenti, manyetik alan enerjisi ve motor momentinin motor ağırlığına oranı gibi parametrelerde üstün olduğu açıkça görülmektedir.

5.5 Sonuç ve Değerlendirme

Kısaca yapılan analiz sonuçlarının bir değerlendirmesi yapılırsa yeni segmental ARM'nin klasik ARM'ye başlıca şu farklarının olduğu görülebilir:

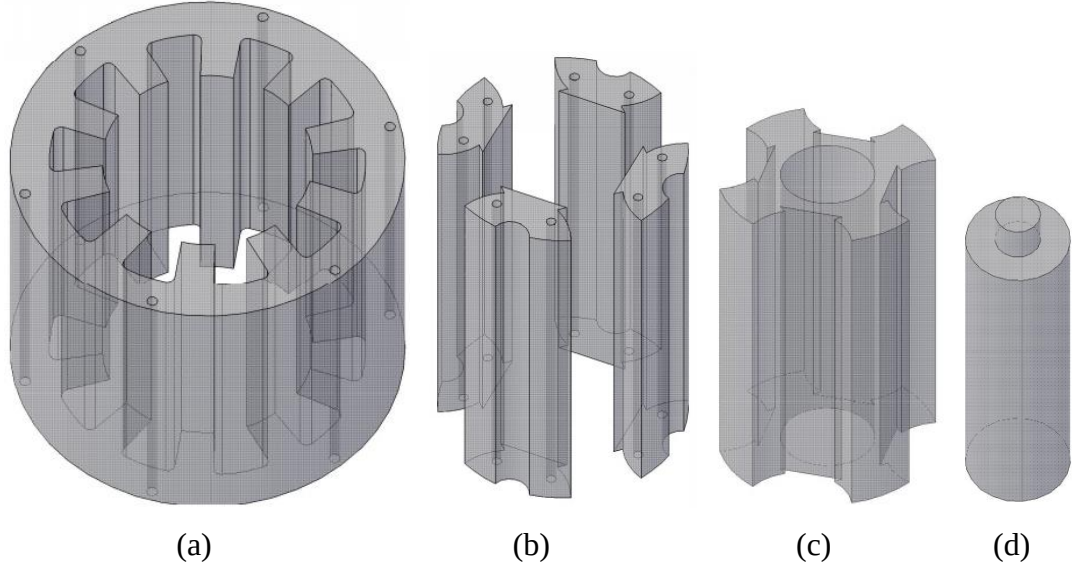
- ❖ 10/8 ARM klasik ARM'den farklı bir rotor yapısına sahiptir. Rotor hem silisli saclardan oluşturulmuş olan paketlerden hem de bu paketlerin yerleştirildiği alüminyum bir bloktan oluşmaktadır. Alüminyum blok kullanmanın nedenleri şu şekilde sıralanabilir:
 - Alüminyum manyetik özelliği olmayan bir metaldir, dolayısı ile oluşan manyetik alanı sınırlama özelliğine sahiptir. Bu özelliği ile klasik anahtarlamalı relüktans makinelerde tercih edilen akı bariyeri görevini başarılı ile yerine getirebilir.
 - Alüminyum motor yapılarında kullanılan diğer metallere (örneğin paslanmaz çelik vb.) göre çok daha hafif bir metaldir. Böylece motorlarda dikkate alınan Nm/kg ağırlık başına üretilen moment değeri otomatik olarak arttırılmış olacaktır.
 - Ayrıca alüminyum yine diğer metallere göre çok daha ucuz bir metaldir. Bu durum da prototip üretimi esnasında göz önünde bulundurulabilecek diğer bir kriterdir.
- ❖ Motor klasik ARM'de kullanılan tek faz enerjilendirme yönteminin yerine iki faz enerjilendirme yöntemi kullanılmıştır. Bu tarz bir yöntem kullanmanın sebepleri şunlardır:
 - Sargılar uygun şekilde yerleştirildiğinde ve aynı anda ARM iki fazı enerjilendirildiğinde motorun manyetik kutuplarının (tasarlanan makinede) kısa akı yollarını takip ettiği görülmüştür. Bu durum (akı yollarının kısalması) hem sac kayıplarının hem de motor saclarının sıcaklığı değerinin azalmasına neden olacaktır.
 - İki faz enerjilendirmenin bir sonucu olarak motorda üretilen moment değeri yapılan optimizasyonlar ile 2.10 katına kadar çıkartılmıştır.
- ❖ Ayrıca motorun stator yapısında da küçük değişiklikler yapılmıştır. Tercih edilen kutup şeklinin kullanılması ile manyetik doyumun hava aralığına yakın yerlerde yoğunlaştırılması ve kutuplardaki manyeto motor kuvvet (mmk) düşümünün azaltılması amaçlanmıştır.

6. 5-FAZLI 10/8 KONFIGÜRASYONLU SEGMENTAL TİP ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN FABRİKASYONU

6.1. Giriş

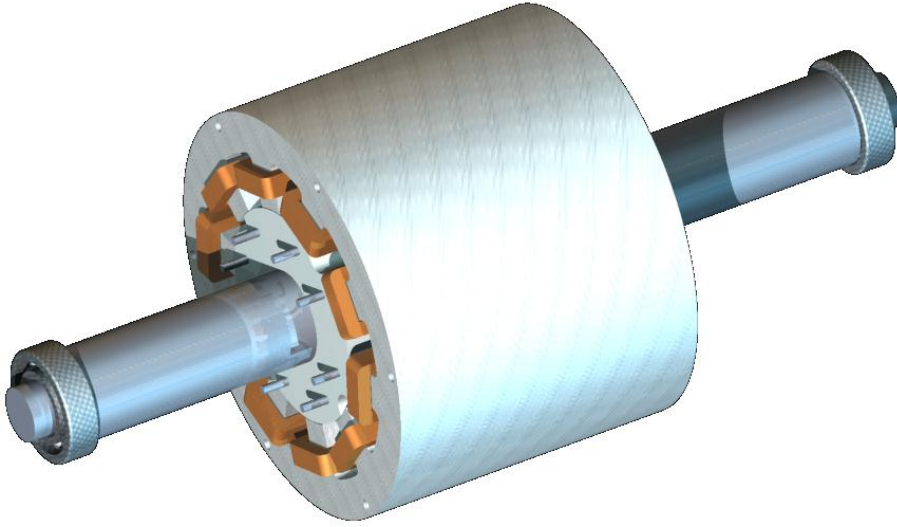
Bu bölümde prototip üretimi gerçekleştirilen motorun üretim aşamaları ve prototip üretiminde karşılaşılan zorluklar ile bu zorlukların çözümü için geliştirilmiş olan tekniklerden bahsedilecektir. Çalışmada gelinen noktayı kısaca özetlemek gerekirse aşağıdaki noktaları sıralamak mümkün olacaktır:

- ❖ Prototip üretimi planlanan 10 stator kutbuna ve 8 rotor kutbuna sahip olan anahtarlama relüktans motor parametreleri kullanılarak motor yapısını oluşturan temel boyutlar hesaplanmış ve doğrulanmıştır.
- ❖ Belirlenen parametreler doğrultusunda ARM'nin iki ve üç boyutlu çizimleri oluşturulmuştur. Üretim aşamasında oluşturulan 3D çizimler Şekil 6.1'de, motorun katı modeli Şekil 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Motor parçalarının 3D görünümüleri

- (a) Stator
- (b) Rotor çekirdekleri
- (c) Alüminyum blok
- (d) Mil



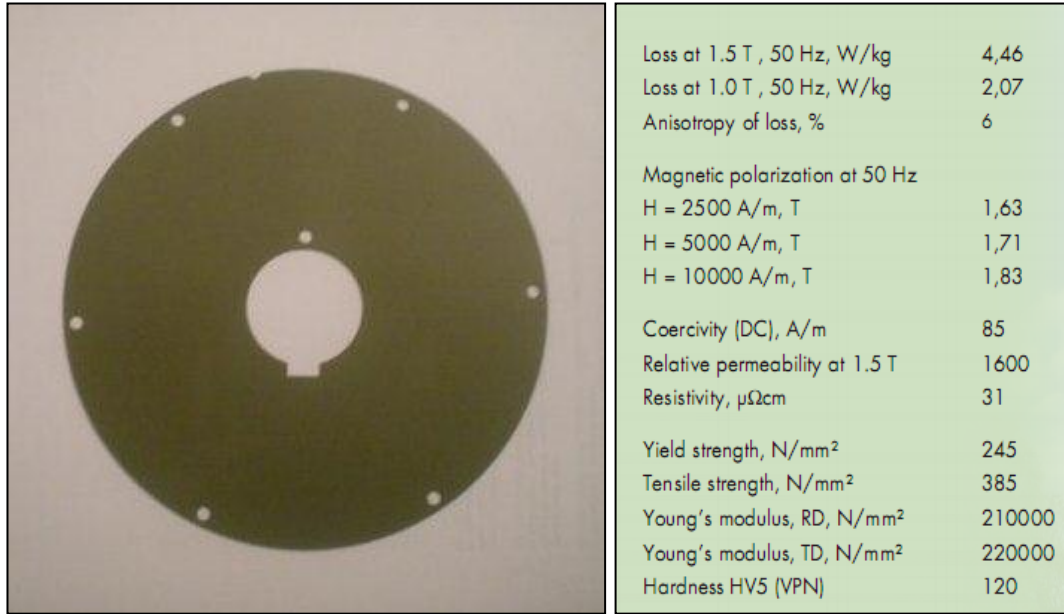
Şekil 6.2. Sargılarla birlikte motorun katı görünümü

- ❖ Çizimler sayesinde motorun 2D ve 3D modelleri sonlu elemanlar metodu kullanılarak çözülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Birkaç farklı programda gerçekleştirilen benzetimler ile programların güvenilirliği ve verdikleri sonuçların benzerliği karşılaştırılmış ve kanıtlanmıştır. Başlatılan projenin benzetimlerle desteklenmesi ve elde edilen sonuçların memnuniyet verici olması dolayısıyla motorun üretim aşamaları başlatılmıştır. Ankara Etimesgut'ta motor üretimi yapan Elsan A.Ş. (EMTAŞ Elektrik Motorları) ile yapılan görüşmeler sonucunda projeye sanayi kaynaklı desteğin de alınması sağlanmıştır.

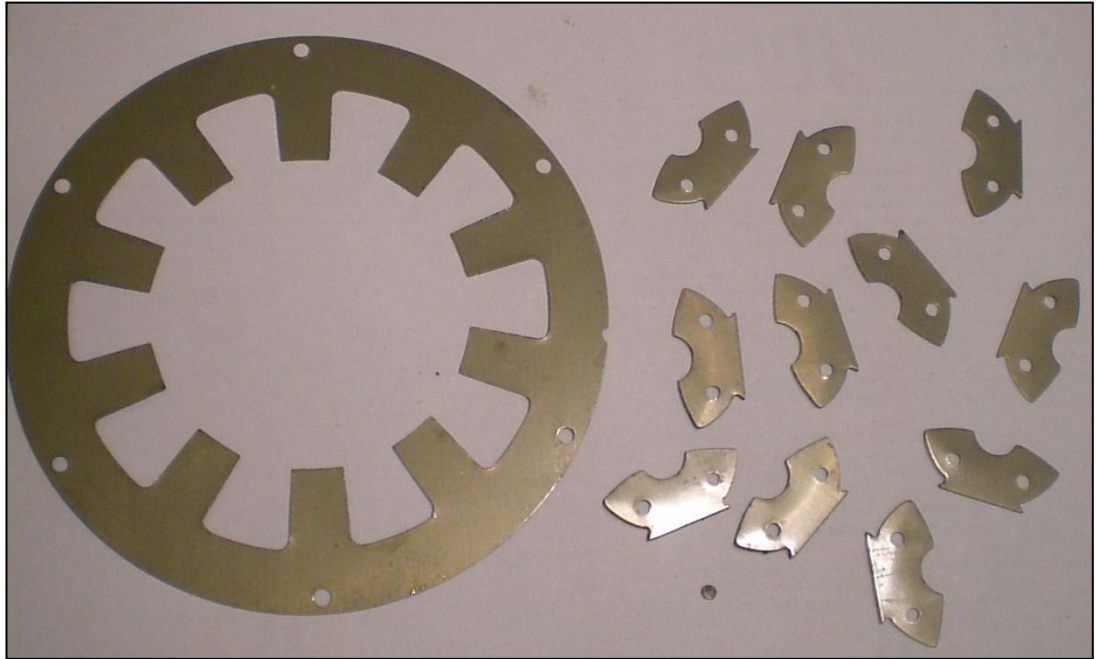
6.2. Fabrikasyon Süreci

6.2.1. Silisli sacların işlenmesi

Resim 6.1'de gösterilen ve Elsan A.Ş.'de küçük güçlü asenkron makineler için kullanılmakta olan motor sacı baz alınarak Resim 6.2'de gösterilen stator ve rotor çekirdeklerini oluşturacak olan küçük silisli saclar üretilmiştir.



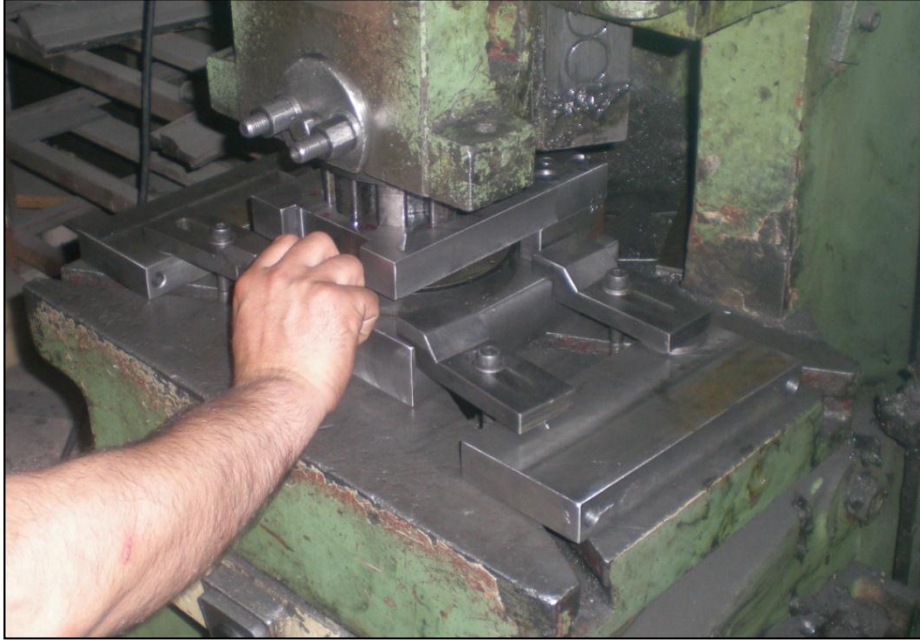
Resim 6.1. İşlenmemiş stator sacı (M530-50A Silisli sac) ve özellikleri



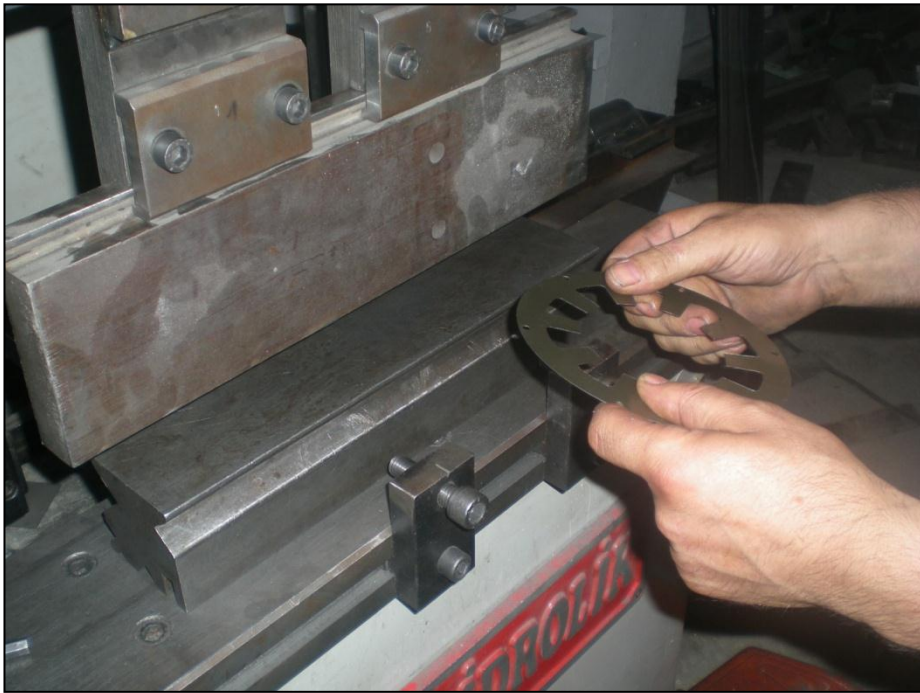
Resim 6.2. Stator ve rotor çekirdekleri için üretilen M530-50A parçacıkları

Stator ve rotor saclarının kalıplarda basılma işlemi Resim 6.3'te gösterilmektedir. Stator sacların kalıplarda basılması sonucunda ortaya çıkan ve çapak adı verilen küçük ve rahatsız edici çıkıntıların üstesinden gelmek için "ütüleme" adı verilen bir yöntem kullanılmıştır (Resim 6.3). Böylelikle presleme esnasında daha yüksek bir

paketleme oranı elde edilmiştir. Bu oran yaklaşık 0.945 civarındadır. Rotor çekirdeklerini oluşturacak küçük parçacıklar küçük güçlü elektrikli bir el zımparası ile pürüzsüzleştirilmiştir.



Resim 6.3. Stator ve rotor saclarının kalıplarda basılması



Resim 6.4. Ütöleme işlemi

6.2.2. Alüminyum blok prosesi ve presleme işlemleri

Daha önce bahsedildiği gibi mekanik dayanımı arttırmak, paketlenecek olan rotor çekirdeklerini muhafaza etmek ve motor kutuplarında oluşacak kısa devreli akı yollarının istikametinin kesin çizgilerle belirlenmesini kolaylaştırmak amacıyla CNC tezgâhında Resim 6.5'te gösterilen ve uçak gövde imalatında kullanılan EN AW-6061 tip dayanıklı alüminyum blok işlenmiştir.



Resim 6.5. İşlenen alüminyum blok

Resim 6.2'de gösterilen rotor saclarının paketlenme süreci projedeki en önemli ve en sıkıntılı noktalardan birisi olmuştur. Presleme işleminin temiz ve paketlenme oranının yüksek olması amacıyla Resim 6.6'da gösterilen presleme malzemeleri üretilmiştir.

Soldaki malzeme pres tezgâhına bağlanmış ve sağdakinin içerisine alüminyum blok ve paketlenen rotor sacları konulmuştur. Tezgâhın basınç miktarı 40 Mpa olunca preslenen rotor saclarının üzerine yenileri eklenmiştir. Böylelikle 0,93'lük paket oranına sahip rotor çekirdekleri elde edilmiştir.



Resim 6.6. Rotor sacı presleme parçaları

Presleme parçaları kullanılarak gerçekleştirilen presleme işleminin ardından Resim 6.7’de gösterilen parçalı tip (segmental) rotor üretilmiştir. Rotorda alüminyum kullanılması klasik rotorlara göre ağırlığın daha az olmasına, mekanik dayanımın daha yüksek olmasına ve alüminyumun akı yollarını engellemesi itibarı ile verimin artmasına yol açmaktadır.



Resim 6.7. Paketlemenin ardından son şeklini alan parçalı rotor

6.2.3. Mil prosesi ve kalite kontrol işlemleri

Motorun 34 mm'lik çapa sahip ve tamamen çelikten yapılmış olan mil parçası Elsan Motor A.Ş'de üretilmiş ve isteğe uygun şekilde işlenmiştir. Mil işleme prosesi Resim 6.8'de gösterilmektedir.



Resim 6.8. Mil işleme

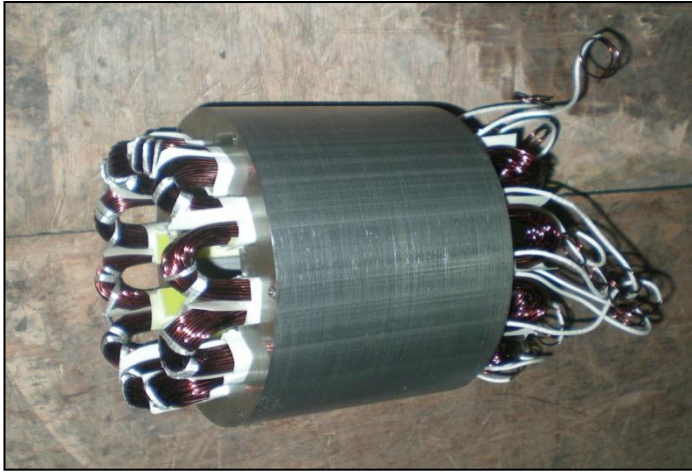
İşlenen mil rotor ile birleştirildiğinde Resim 6.9'da gösterilen parça elde edilmiştir. Aynı resimde rotorun denge ve kalite kontrol işlemlerinin yapıldığı da görülmektedir. Toplam 80 mm'lik çapa sahip rotor hava aralığı vermek amacıyla torna işlemine tabii tutulmuş ve hesaplanan parametreler doğrultusunda 79,4 mm'lik çap elde edilmiştir. Bu durumda hava aralığı 0,3 mm'dir.



Resim 6.9. Mil ve bilyelerin yerleştirilmesi ile elde edilen rotor

6.2.4. Statorun paketlenmesi, sarımı ve motorun son hali

Statorun preslenmesi; stator ölçülerinin fabrika standartlarında olması nedeniyle Elsan A.Ş’de gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.10’da preslenmiş ve faz sargıları sarılmış stator görülmektedir. Yine hesaplanan parametreler doğrultusunda her kutba 50 sarım sarılmış ve her faz sargısı 100 sarımdan oluşturulmuştur.



Resim 6.10. 150 mm çap ve 120 mm’lik boyunduruğu olan stator ve faz sargıları

Motorun statoru IEC standartlarında olan “100 Tip Ø150” gövdesine oturtulduğunda Şekil 6.11’deki motor elde edilir.



Resim 6.11. Motorun “100 Tip Ø150” gövdesine oturtulduktan sonraki son durumu

Motor statorunun gövdeye oturtulması ve akabinde dış bağlantıların yapılarak yatak ve kapakların birleştirilmesi ile elde edilen motorun son görünüşleri Resim 6.12 ve Resim 6.13'te verilmektedir. Çizelge 6.1; motor parametrelerini göstermektedir.



Resim 6.12. Motorun kapak takılmadan önceki son görünüşü ve dış sargı bağlantıları



Resim 6.13. Prototip 5-faz 10/8 konfigürasyonlu bipolar uyartımlı segmental tip ARM

Çizelge 6.1. Üretimi tamamlanan 5-faz 10/8 konfigürasyonlu bipolar uyarımlı segmental tip ARM'nin son parametreleri

No	Tasarım Parametresi	Değer
1	Faz sayısı	5
2	Stator/rotor konfigürasyonu	10/8
3	Stator dış çapı (mm)	150 mm
4	Rotor dış çapı (mm)	79.4 mm
5	Motor boyunduruğu (mm)	120 mm
6	Hava aralığı uzunluğu	0.3 mm
7	Stator kutup açısı (rad)	0.314 rad
8	Rotor kutup açısı (rad)	0.331 rad
9	Faz başına sarım sayısı	100
10	Stator/rotor materyali	M530-50A silikon çelik (0.5 mm kalınlığında)
11	Bakır tel çapı (mm)	1.25
12	Faz başına sargı direnci (Ω)	0.56
13	Maksimum faz indüktansı (mH)	67.91
14	Aktif silikon çelik ağırlığı (kg)	9.90
15	Alüminyum blok ağırlığı (kg)	0.71

6.3. Sonuç

Bu kısımda prototip üretimi gerçekleştirilen motorun üretim aşamaları tanımlanmış ve prototip üretiminde karşılaşılan zorluklar ile bu zorlukların çözümü için geliştirilmiş olan tekniklerden bahsedilmiştir. Üretim aşamalarını şu şekilde özetlemek mümkündür:

- Motorun katı görünüşünün elde edilmesi,
- Statoru oluşturacak silisli saclar için kalıpların oluşturulması ve sacların işlenmesi,
- Rotor çekirdeklerini tutacak yüksek dayanımlı alüminyum blok prosesi ve presleme kalıplarının oluşturulması,
- Rotorun oluşturulması ve mil işleme,
- Kalite kontrol işlemleri,
- Stator bloğunun oluşturulması yalıtımı ve sarım işlemleri,
- Motorun “100 Tip Ø150” gövdesine oturtulması ve dış bağlantılar.

7. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLARDA KULLANILAN DÖNÜŞTÜRÜCÜLER VE KONFIGÜRASYONLARI

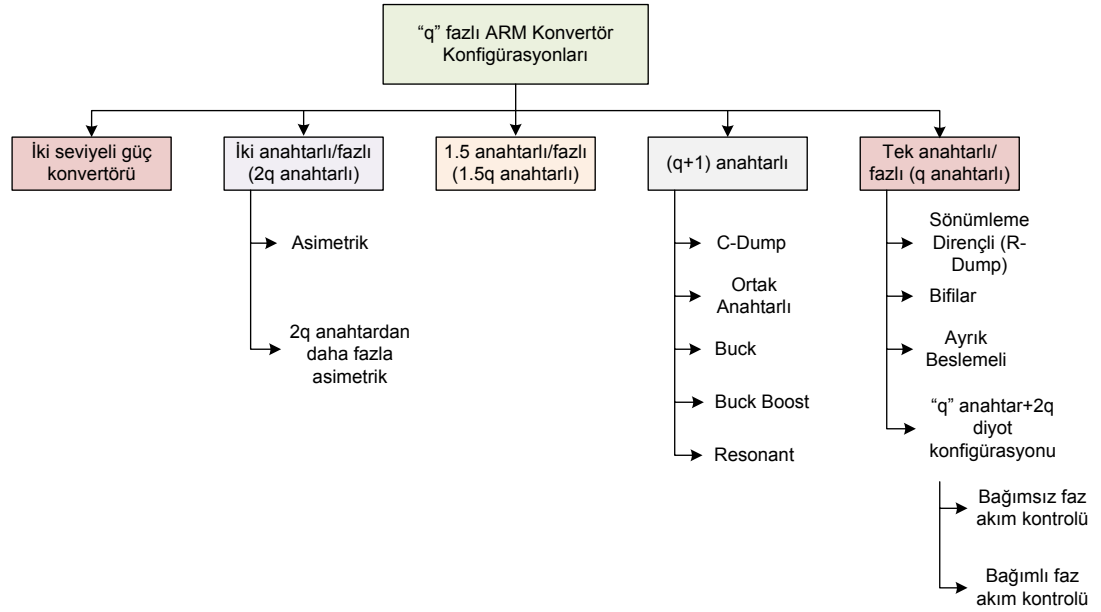
ARM’de üretilen moment uyartım akımının polaritesinden bağımsız olduğundan, ARM sürücüleri birkaç motor tipi hariç genelde her faz sargısı için sadece bir adet anahtarlama elemanına ihtiyaç duyarlar [1]. ARM’de kullanılan dönüştürücülerin teknolojisi ve standardı makine tasarımında elde edilen gelişmelere paralel olarak ilerleme kaydetmektedir. ARM’ler için şu ana kadar birçok dönüştürücü topolojisi geliştirilmiş olmasına rağmen henüz tam olarak bir standartlaşma sağlanamamıştır. İdeal bir ARM dönüştürücüsü güvenilir, kararlı, faz başına anahtar sayısı az, yüksek verimli, gürültü ve moment titreşimi düşük, VA oranı düşük, aynı zamanda akımı doğru ve çok hızlı kontrol edebilme özelliklerine sahip olmalıdır. Bütün bu özellikler sağlanabilirse, ARM dönüştürücüleri diğer makine tiplerinde kullanılan geleneksel dönüştürücülerle yarışabilecek pozisyona erişebilirler [108].

ARM fazları birbirinden bağımsızdır. Bu yüzden bir fazda hata ya da arıza meydana gelmesi durumunda, motor sürücüsünün çalışmayı kesmeden tetikleme sinyallerini göndermesi olasıdır. Bu durumda daha düşük bir çıkış gücü elde edilir. Bu kısımda ARM’de kullanılan bazı dönüştürücü topolojileri sunulmuş ve tartışılmıştır. Bu konfigürasyonlardan birçoğu bilinmesine ve kullanım alanı bulmuş olmasına rağmen, bir kısmı halen laboratuvar ortamında geliştirilme aşamasındadır.

7.1. ARM’lerde Kullanılan Dönüştürücü Konfigürasyonları

Anahtarlama relüktans motorlarda sargılar arasındaki ortak manyetik bağ ihmal edilebilir. Çünkü farklı sargı gruplarının aralarında herhangi bir manyetik bağının olması söz konusu değildir. Bu durum; kontrol ve moment üretiminde her bir faz sargısının bağımsız olarak kontrol edilmesine olanak sağlamaktadır. Fakat bu durum bir avantaj olarak ortaya çıkarken sargılar üzerinde meydana gelen manyetik alan enerjisinin bir şekilde çalışma esnasında ortadan kaldırılması gerekmektedir. Yoksa sargılar üzerinde gerilim yükselmeleri meydana gelecek ve elektronik tetikleme elemanlarının zarar görmesi durumu ortaya çıkabilecektir. Bu enerjinin

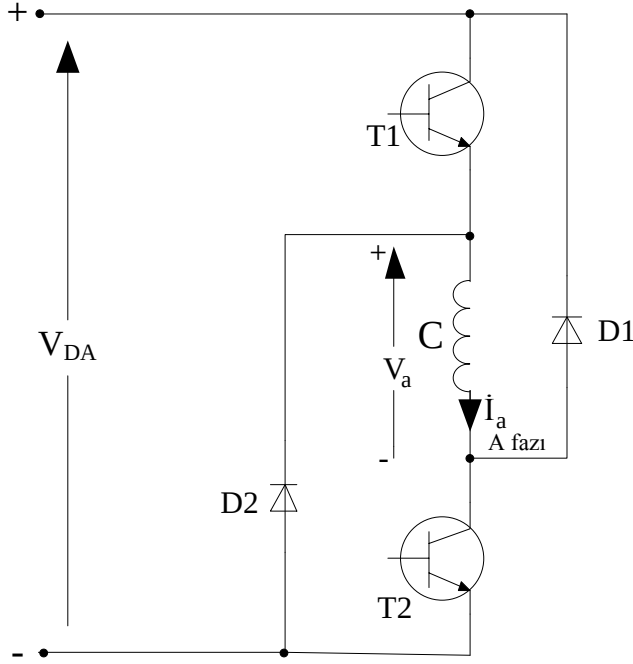
harcanmasının ya da yok edilmesinin birkaç yolu vardır. Enerji kısmi olarak mekanik/elektriksel enerjiye dönüştürülebilir ve motor sargılarında harcanabilir ya da bir şekilde kaynağa geri gönderilebilir. “q” motor faz sayısı olmak üzere verilen tüm bu seçenekler; q , $q+1$, $1.5q$ ve $2q$ dönüştürücü topolojilerinin temelini oluşturmaktadır. ARM kontrolünde kullanılan dönüştürücü konfigürasyonlarını Çizelge 7.1’de verilen şemada [1] göstermek mümkündür.



Çizelge 7.1. ARM dönüştürücü konfigürasyonlarının sınıflandırılması

7.1.1. Asimetrik köprü dönüştürücü

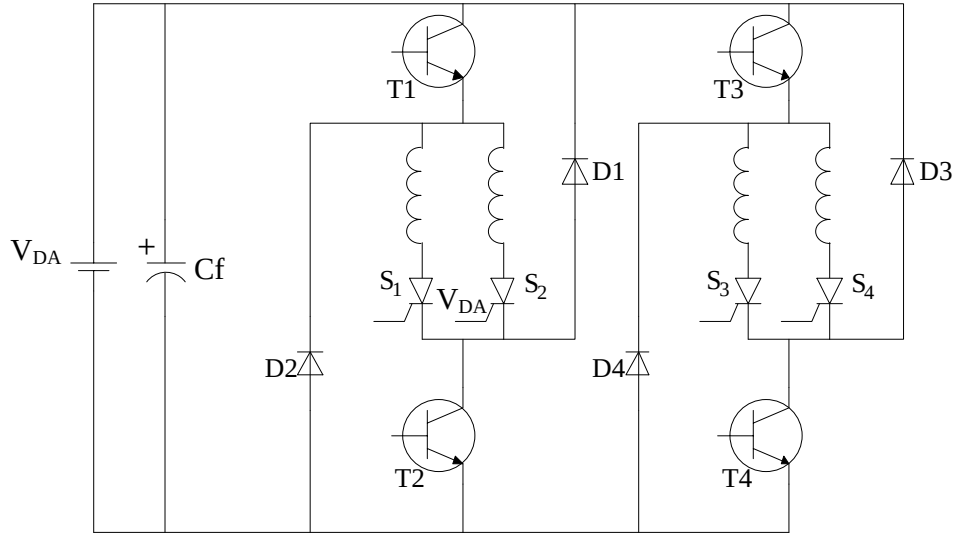
Bu dönüştürücü modeli 6-darbeli konvansiyonel AA dönüştürücüye benzemektedir [108]. Bu dönüştürücü yapısında motor sargıları birbirinden bağımsız olarak kontrol edilmekte olup fazları iletime sokmak amacıyla her faz için farklı polaritelere sahip kaynak gerilimi uygulanabilmektedir. Şekil 7.1’de asimetrik köprü dönüştürücünün bir faz gösterimi yer almaktadır. Diğer fazlar da benzer şekilde bağlanacaktır.



Şekil 7.1. Asimetrik köprü dönüştürücünün bir faz gösterimi

A fazı üzerinden akımın akışı T_1 ve T_2 transistörleri aracılığı ile gerçekleştirilmektedir. Akım verilen sınır değerin üzerine çıktığında T_1 ve T_2 kapalı konuma geçer. Motor sargılarında depolanan enerji tükenene kadar akımı aynı yönde tutulmaya çalışılacaktır. Bundan dolayı, D_1 ve D_2 diyotları kaynağı şarj etmek ya da enerjiyi kaynağa göndermek için aktif hale gelerek akımın istenen değerin altına düşmesine yardımcı olacaktır. Asimetrik köprü dönüştürücünün yapısında faz başına kullanılan anahtar sayısının fazla olması bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır.

Asimetrik köprü dönüştürücüde kullanılan güç elemanlarından (transistor, MOSFET, IGBT vb.) yararlanma görev saykılarının (duty cycle) kısa olmasından dolayı zayıftır. Eleman sayısını düşürerek bu durumu ortadan kaldırmak ve güç elemanlarından daha fazla istifade etmek için Şekil 7.2'deki gibi SCR (Silicon-Controlled Rectifiers) gibi faz kontrol elemanları [117] kullanmakta yarar vardır.

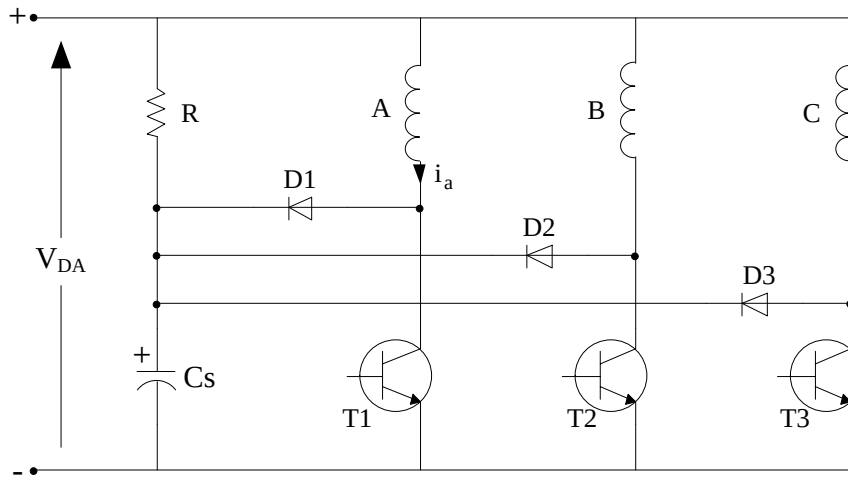


Şekil 7.2. SCR kullanılan asimetrik köprü dönüştürücü devresi

SCR'lerin dönüştürücü topolojilerinde kontrol elemanı amacıyla değil sadece akımı istenilen yöne yönlendirme amaçlı kullanıldıklarını unutmamak gerekmektedir.

7.1.2. Sönümlenme dirençli (R-Dump) dönüştürücü

R-Dump dönüştürücü; faz başına bir anahtar gerektiren dönüştürücü tiplerindendir. Sönümlenme direncinin anlamı sargılarda ortaya çıkan enerjinin R-Dump adı verilen direnç üzerinde harcanma geleneğinden ortaya çıkmaktadır. Şekil 7.3 bu dönüştürücü tipine ait bir yapıyı göstermektedir.



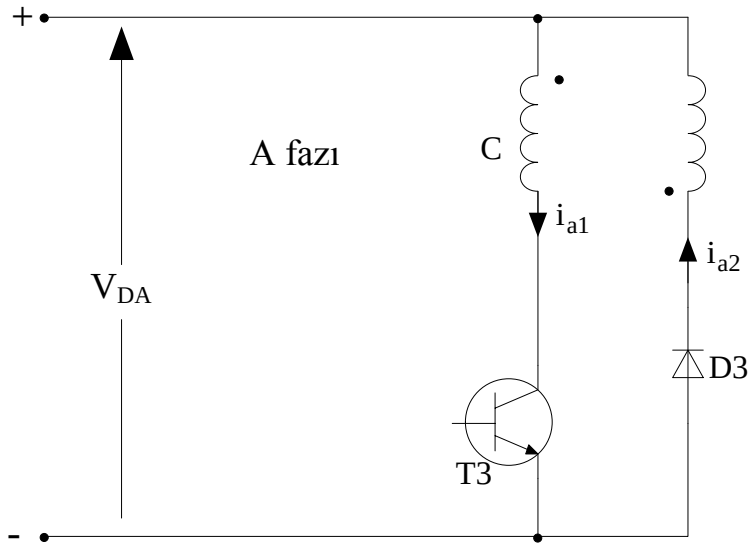
Şekil 7.3. Sönümlenme dirençli (R-Dump) Dönüştürücü

Sargılarda oluşan enerjinin sürekli aynı direnç üzerinde harcanması direncin zamanla çok fazla ısınmasına dolayısı ile büyük bir güç kaybı doğmasına ve sürekli direncin soğutulma gerekliliğinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu yüzden özellikle yüksek akımlı devrelerde pratik bir uygulama olarak gözükmemektedir.

7.1.3. Bifilar tip dönüştürücü

Bifilar sargı; yardımcı sargı anlamına gelmektedir. Şekil 7.4'te gösterilen bu sarım yönteminde yardımcı sargının 2/3'lük miktarı bir yönde ve geri kalan 1/3'lük miktarı ise aksi yönde sarılır. Bifilar yardımcı sargı içinde manyetik etkinin bir kısmı yok olur, ancak sargının etkin direnci değişmez.

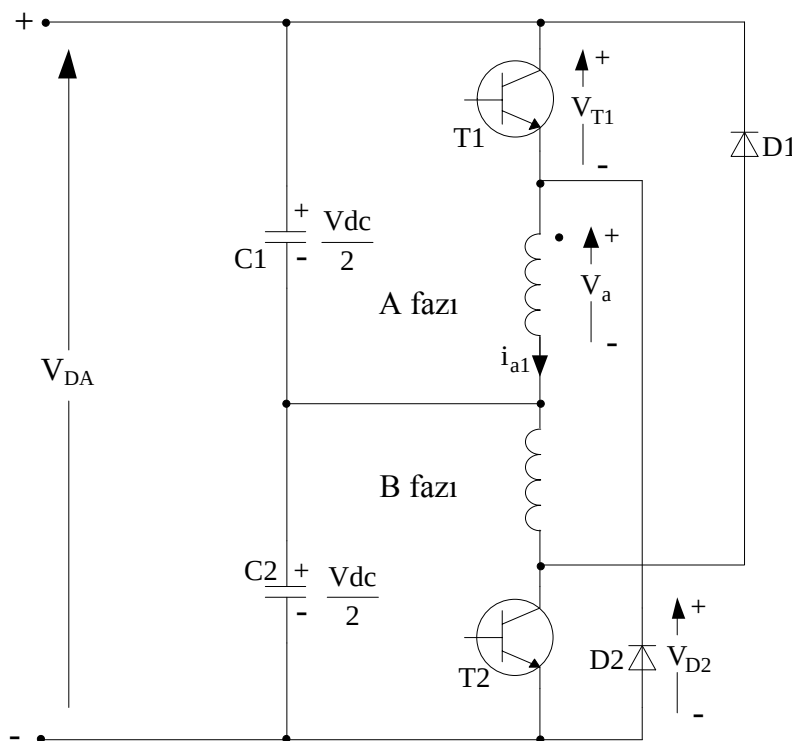
Bu tip bir sargı yönetimini kullanan dönüştürücü en eski dönüştürücü yapısına sahiptir. Düşük gerilimli uygulamalar için uygun iken sargı endüktansının yol açtığı yüksek gerilimler ve bu yüksek gerilimlerin zaman zaman DA bara geriliminin 4 katına kadar ulaşması bu tip dönüştürücüleri yüksek gerilimli uygulamalar için kullanışsız hale getirmiştir.



Şekil 7.4. Bifilar sargı kullanan dönüştürücü

7.1.4. Ayrık beslemeli dönüştürücü

Şekil 7.5'te gösterildiği gibi DA bara gerilimini ikiye bölerek sargıları besleyen bir yapısı vardır. Dönüştürücü yapısında her faz için sadece bir anahtara ihtiyaç duyulmaktadır. Bara geriliminin yarısı kullanıldığı için tam bara gerilimi ile çalışan ARM fazının yaklaşık iki katı kadar akım çekmesi durumu ortaya çıkmaktadır ve bu durum ısı ve güç kaybına neden olarak kayıpların artması sonucunu doğurur.

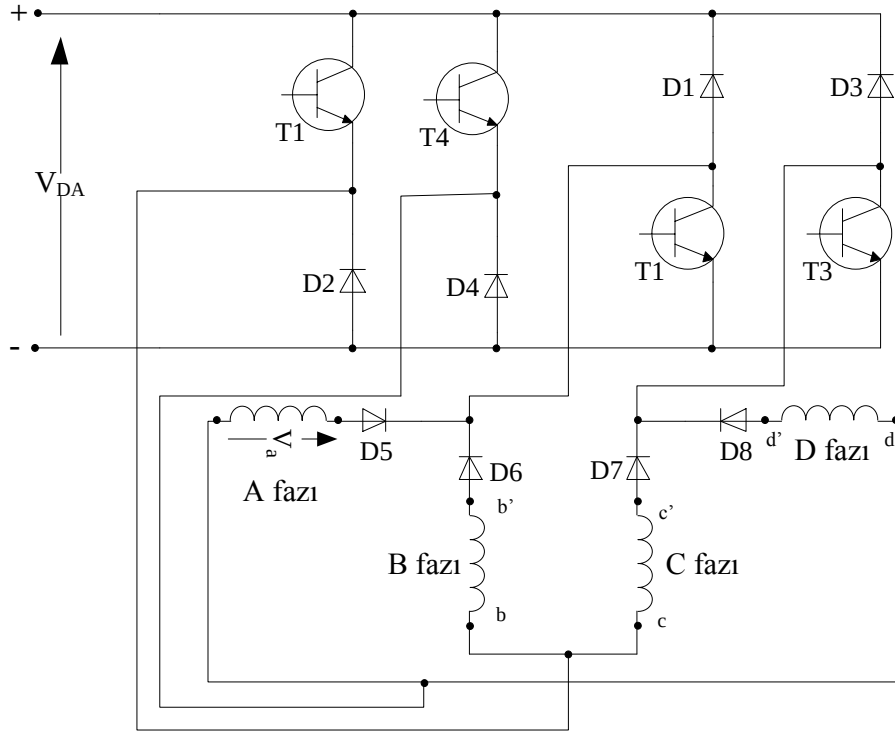


Şekil 7.5. Ayrık beslemeli dönüştürücü yapısı

A-fazı T_1 anahtarı tetiklenerek enerjilendirildiğinde, akım T_1 içersinden A fazı ve C_1 kondansatörü yolunu izleyerek akar. T_1 açıldığında, akım A fazı- C_2 kapasitörü ve D_2 diyotu üzerinden akmaya devam eder. Bu işlemde, C_2 şarj olarak A fazındaki enerji hızlı bir şekilde harcanır.

7.1.5. “q” anahtar ve “2q” diyot konfigürasyonlu dönüştürücüler

Bu dönüştürücü yapısı [118] diğer bir “faz başına bir anahtar yapısını” tarif etmektedir. Dönüştürücü yapısında D_1 , D_2 , D_3 ve D_4 diyotlarının hızlı, D_5 , D_6 , D_7 ve D_8 diyotlarının yavaş diyotlar olduğunu unutmamak gerekir.

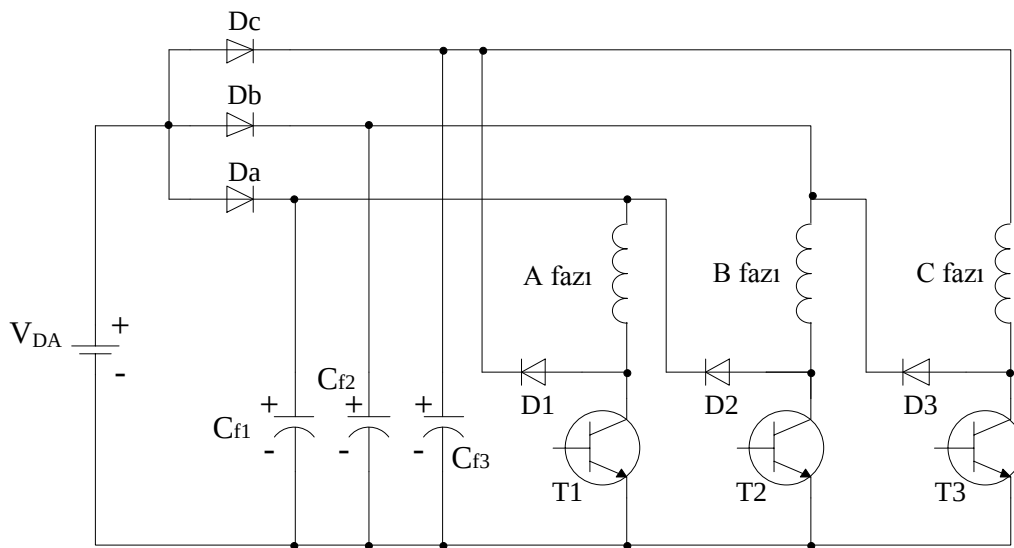


Şekil 7.6. “q” anahtar “2q” diyot yapısına sahip dönüştürücü konfigürasyonu

Şekil 7.6’da verilen dönüştürücünün çalışması esnasında, iki diyot ve bir anahtarın faz sargısı ile seri olarak bağlı olduğu görülmektedir. A-fazı akımı etkin iken, B-fazı iletime geçirilmek istenirse, T2 ve T1 anahtarlarının kapatılması gerekmektedir. T1 anahtarının kapatılması D1 diyotunun pasif hale gelmesine ve A-faz akımının A-fazı D5 diyotu, T1 anahtarı ve D4 diyotu üzerinden akmasına neden olacaktır. Bu durum A-fazı geriliminin sıfıra düşmesine sebebiyet verir. Başka bir deyişle A-fazı geriliminin sıfıra düşme süresi artar. Yani faz akımlarının üst üste binmesi (overlapping) durumunda, akımların bağımsız kontrolü ortadan kalkmış olur. Bu sebepten dolayı yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilmeyen bir yöntemdir.

7.1.6. Bağımsız akım kontrollü “q” anahtar ve “2q” diyot konfigürasyondaki dönüştürücüler

Şu ana kadar bahsedilen dönüştürücülerin özellikle bifilar sargı uygulamaları için özellikle endüktansının yol açtığı yüksek gerilimler ve bu yüksek gerilimlerin zaman zaman DC bara geriliminin 4 katına kadar ulaşması sonucunu doğurmaktadır. Bu dönüştürücülerin yüksek gerilimli uygulamalar için kullanışsız olması ve ayrık gerilimli sistemlerde bara geriliminin yarısını kullanmaları dolayısı ile tam bara gerilimi ile çalışan ARM fazının yaklaşık iki katı kadar akım çekmesi durumu ortaya çıkmasından ötürü çok verimli değiller idi. Tüm bu gereksinimleri sağlayan yeni bir dönüştürücü tipi geliştirilmiştir [119]. Şekil 7.7’de verilen dönüştürücü; faz sayısı kadar diyot ve DA bara kapasitörü gerektirmektedir. D_a , D_b ve D_c diyotları yavaş diyot olabilir. Devrede açıkça görüldüğü gibi bu diyotların işlevi her faz için ayrık DA bara gerilimi sağlamaktır.



Şekil 7.7. Bağımsız akım kontrollü “q” Anahtar ve “2q” diyot konfigürasyondaki dönüştürücü yapısı

A fazının enerjilendirildiği düşünülürse, T_1 anahtarının kapalı olması gerekmektedir. A faz akımı referans akımını geçerse, T_1 anahtarı açılır. A faz akımı; D_1 iyodu-C fazı ile DC kaynak arasına bağlanmış olan C_{f3} kapasitörü aracılığı ile akar. A fazının enerjisi C_{f3} 'e iletilerek V_{DC} gerilimi arttırılmış olur. bu değer neredeyse $2V_{DC}$ kadardır. T_1 kapalı iken A fazı üzerindeki gerilim; kaynak gerilimi ile C_{f3} geriliminin

farkına eşittir (negatif değerde). A faz akımı referans akımının altına düşerse T_1 anahtarı tekrar kapatılır ve A fazı akımı referans akıma yakın bir değerde tutulmuş olur. bu arada C_{f3} üzerindeki gerilimin C fazı iletimde iken harcandığını unutmamak gerekir.

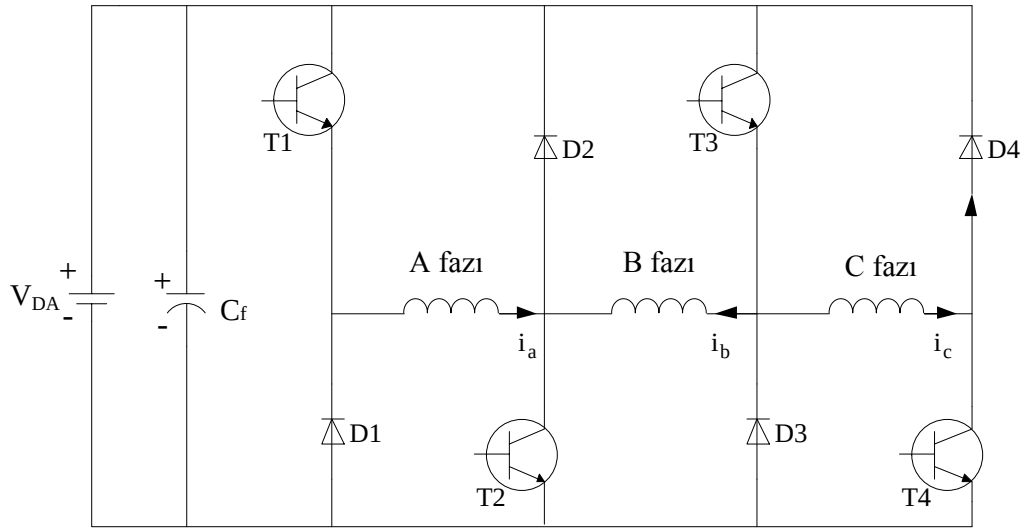
Bahsi geçen dönüştürücü yapısının avantajlarını şu şekilde sıralamak mümkündür:

- ❖ Diğer “faz başına tek anahtar” topolojilerinde görülen dezavantajları barındırmamakta ve her faz için sadece bir anahtar özelliğini kullanmaktadır.
- ❖ ARM’de bağımsız akım kontrolü özelliğini tamamen sağlamaktadır.
- ❖ Akım kontrolü esnasında enerji DA bara kapasitörlerine aktarılır ve motor fazlarının komütasyonu daha hızlı bir akım tepkisi verecek şekilde kullanılır. Böylece ARM’nin daha hızlı dinamik moment ve hız kontrolü sağlanmış olur.

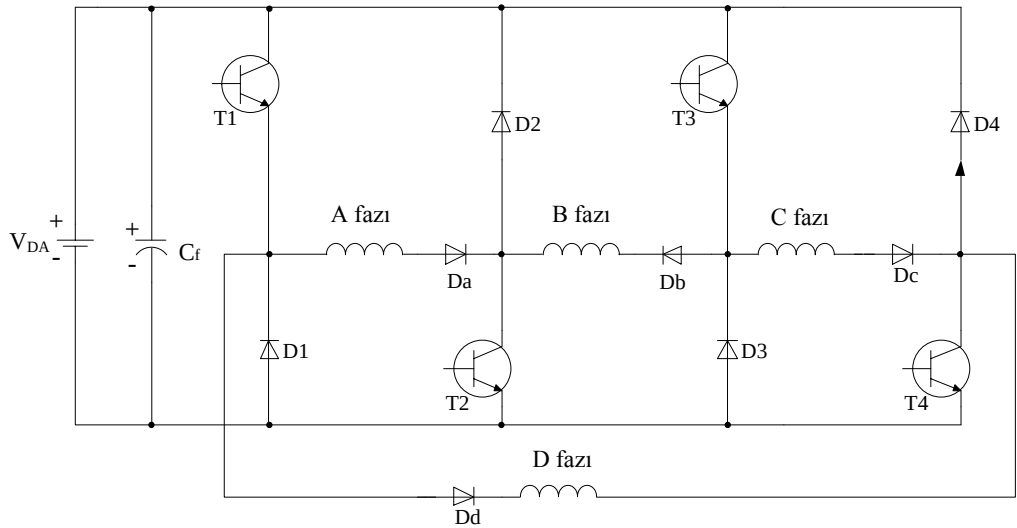
7.1.7. “q+1” anahtar ve diyot konfigürasyonlu dönüştürücüler

Ortak Anahtarlı Dönüştürücüler

Şekil 7.8 (a)’daki dönüştürücüde [120] kullanılan anahtar ve diyot sayıları faz sayısından bir fazladır (q+1 konfigürasyon). A-fazının enerjilendirildiği düşünülürse, T_1 ve T_2 anahtarları kapatılacaktır. DA bara gerilimi aynen A-fazı üzerinde görülecektir. Faz akımı referans akım değerini aştığında, T_1 ya da T_2 anahtarlarından birisi açılarak akımın D_1 ve T_2 ya da D_2 ve T_1 üzerinden akması sağlanır. Ya da hem T_1 hem de T_2 anahtarları açılarak A fazına $-V_{\text{DA}}$ uygulanması sağlanabilir. Bu yöntem diğerine göre çok daha etkilidir. Bu dönüştürücü devresi özellikle faz sayısı dörtten fazla olan ve fazları genellikle overlapping olayına maruz kalan ARM’ler için iyi bir tercihtir.



(a)



(b)

Şekil 7.8. Ortak anahtarlı dönüştürücüler

(a) Klasik (q+1) konfigürasyonlu ortak anahtarlı dönüştürücü

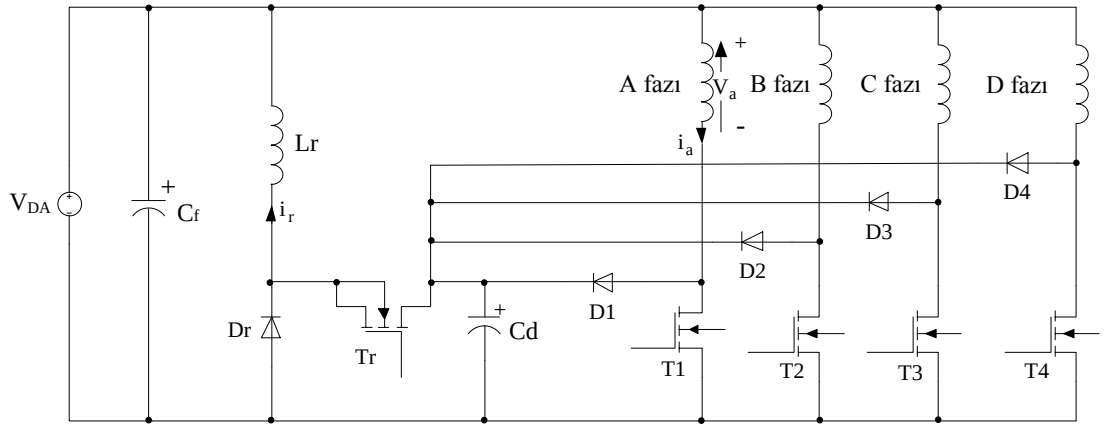
(b) Topolojisi değiştirilmiş ve q anahtar yapısına sahip ortak anahtarlı dönüştürücü konfigürasyonu [121]

Şekil 7.8 (a)'daki dönüştürücü faz akımlarının teker teker kontrolünde daha iyi bir kısıtlama sağlamakta ve daha uzun komütasyon süresi oluşturmaktadır. Dönüştürücüde; tüm anahtarlar her biri iki faz akımının toplamını taşıdığı için düzenli akım oranlarına sahiptir. Örneğin; sırasıyla T_2 ve T_4 iletime geçirilirse, T_1 hem A hem de B fazının akımını taşıyacaktır. Yalnız bu tip dönüştürücü yapısı sadece dört ya da dörtten daha fazla faz sayısı olan ve çift faz sayısına sahip

ARM'lerin kontrolünde tercih edilebilecek dönüştürücü yapısıdır. Uygun topoloji değişikliği ile bipolar kontrol yani fazlardan geçen akım yönünün değiştirilebildiği motorlarda kullanımı için de mümkündür.

Kondansatör Sönümlemeli (C-Dump) Dönüştürücü

Dönüştürücünün temeli R-dump dönüştürücüye benzer şekilde faz enerjilerinin depolanması için Şekil 7.9'da gösterilen bir C_d kondansatörünün kullanılmasına dayanmaktadır. [122, 123]'te açıklandığı gibi C_d kapasitörü içerisinde depolanan enerji T_r , L_r ve D_r 'den oluşan bir kıyıcı devresi kullanılarak DA kaynağa geri gönderilir.

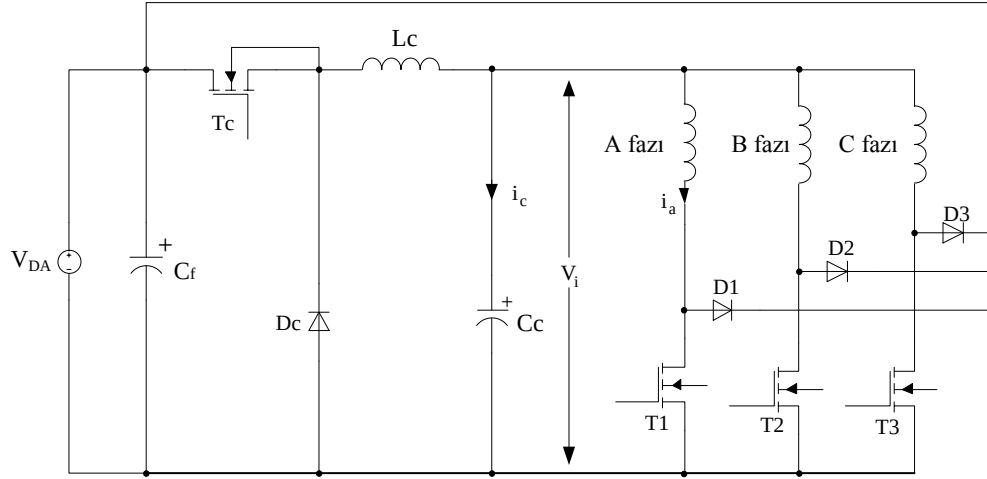


Şekil 7.9. C-Dump Dönüştürücü

(q+1) anahtar topolojisi kullanan bu devrenin en büyük avantajı minimum anahtar sayısı ile tam bağımsız faz akım kontrolü kullanıyor olmasıdır. Diğer bir avantajı C_d kondansatörü tepe gerilimine kadar şarj olduğu için herhangi bir snubber devresi gerektirmemekte ve bu durum her faz için bir anahtar kullanan dönüştürücülere göre avantaj oluşturmaktadır. Temel dezavantajı ise; akım komütasyonunun C_d ve DA bara gerilimi farkı ile sınırlandırılıyor olmasıdır. Akımın daha hızlı komüte edilebilmesi için daha yüksek v_0 gerilimine ihtiyaç vardır.

ARM Sürücüler için Ayarlanabilir DA Bara Gerilimli Dönüştürücü Topolojisi

(q+1) anahtar yapısına sahip diğer bir dönüştürücü çeşidi de ayarlanabilir DA bara gerilimli dönüştürücü konfigürasyonudur [1].

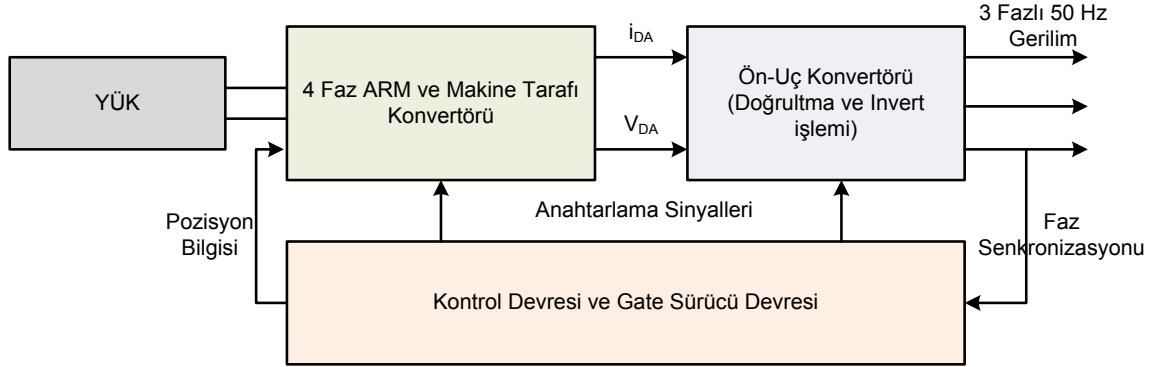


Şekil 7.10. ARM sürücüler için ayarlanabilir DA gerilimli dönüştürücü topolojisi

Şekil 7.10'da görülen dönüştürücü yapısında T_1 anahtarının kapatıldığı düşünülürse, V_i giriş gerilimi makinenin A-fazına uygulanacaktır. Sargıdaki akımı regüle etmek için T_1 anahtarı açılır ve akımın D_1 diyotu- V_{DA} kaynağı C_c kapasitörü içerisinde yönlendirilmesi sağlanır. Bu arada kıyıcı anahtarı olan T_c açık konumdadır. Böylece makinenin fazına V_{DA} ve V_i farkı kadar bir negatif gerilim uygulanacaktır. Gerilim V_i 'ye bağlı olarak ayarlı bir şekilde uygulanmıştır. T_c anahtarı açık konuma geldiği vakit C_c kapasitörü üzerindeki enerji bir sonraki fazın ihtiyacını karşılayacak düzeydedir. Bu şekilde makine fazları arasındaki bağımsız çalışma durumu da korunmuş olur.

7.1.8. İki seviyeli dönüştürücüler

İki seviyeli dönüştürücüler genellikle DA elektrik gücünün AA güce çevrilmesi esnasında (inverting) tercih edilen dönüştürücü tipleridir [124]. Şekil 7.11'deki gösterimde bu döngünün akış şeması verilmiştir.



Şekil 7.11. ARM kullanılarak gerçekleştirilen enerji dönüşümü şeması

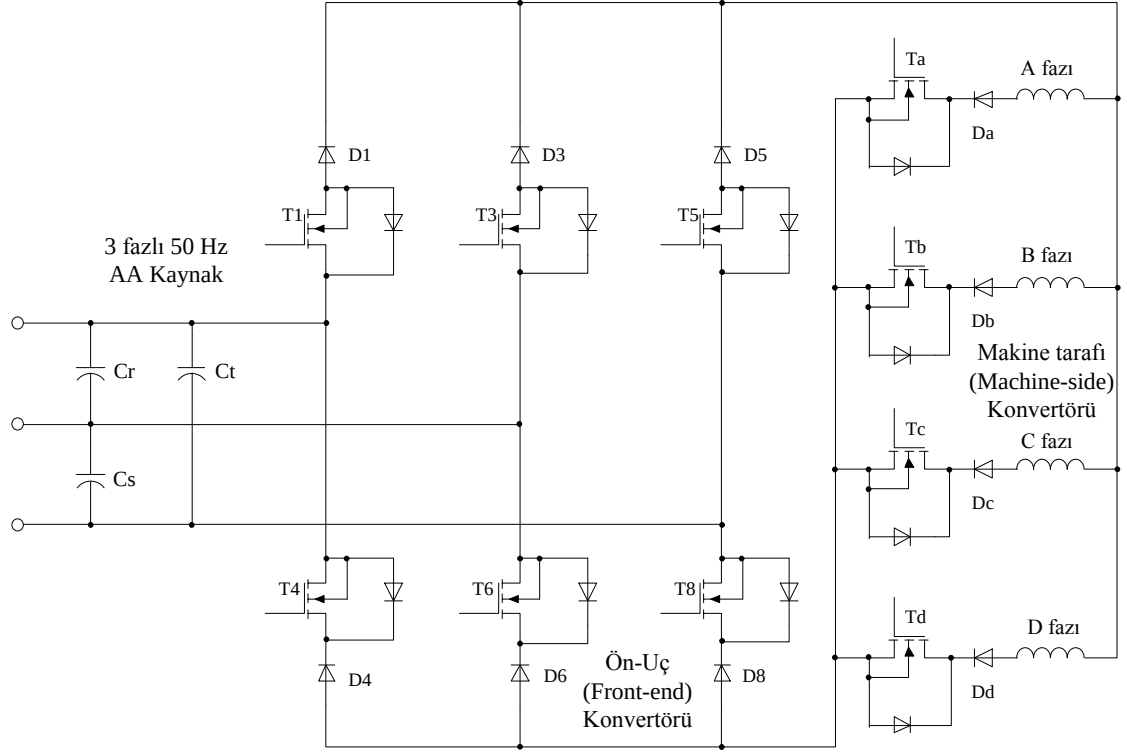
İki seviyeli güç dönüşümünün ilk seviyesi 6 anahtar ve diyottan oluşan kontrol edilebilir bir dönüştürücüden meydana gelmektedir. Bu dönüştürücünün 3 fazlı 50 Hz AA kaynak girişi ve tek fazlı değişken frekanslı AA çıkış ile ara yüzü bulunmaktadır. Bu seviye kontrollü doğrultucu/invertörden oluşmaktadır diğer güç seviyesi ise her faz sargısının enerjilendirildiği komütasyon seviyesidir.

Akü-kaynak durumları hariç ARM sürücülerinin çoğunluğu enerjiyi makineden kaynağa aktaramazlar. Bunun sebebi sistemde yer alan diyot köprüsü ve elektrolitik güç kondansatörlerinin akım sınırlarıdır. Bu yüzden kapasitörlerde sadece sınırlı miktarda bir enerji depolanır ve kullanılır. Sonuç olarak daha az verim sağlanarak DA baradaki gerilimi sınırlandırmak için kapasitöre bağlı ekstra bir dump-direncine ihtiyaç olabilir. Bu gibi durumlarda sık şarj ve deşarj olayı kapasitörün ömrünü etkilemektedir.

Fakat bu dönüştürücü makineden alınan gücü herhangi bir sınırlama olmadan ve DA bara kondansatörünü devre dışı bırakarak kaynağa iletme yeteneğine sahiptir. DA bara kondansatörünün devre dışı kalması maliyetin azalmasına ve güç yoğunluğunun artmasına neden olacaktır.

Devrenin tek dezavantajı; fazla sayıda güç anahtarı ve diyot gerektirmesidir. Bu da maliyetin tasarım boyutunda artmasına neden olur. Şekil 7.12'de gösterilen bu tip

dönüştürücü topolojileri; rüzgâr enerjisi üreten, sabit-frekans ve değişken hızlı sistemlerde uygulanabilme özelliğine sahiptir.



Şekil 7.12. İki seviyeli güç dönüştürücüsü

7.1.9. Bipolar ARM sürücüleri için dönüştürücü çözümleri

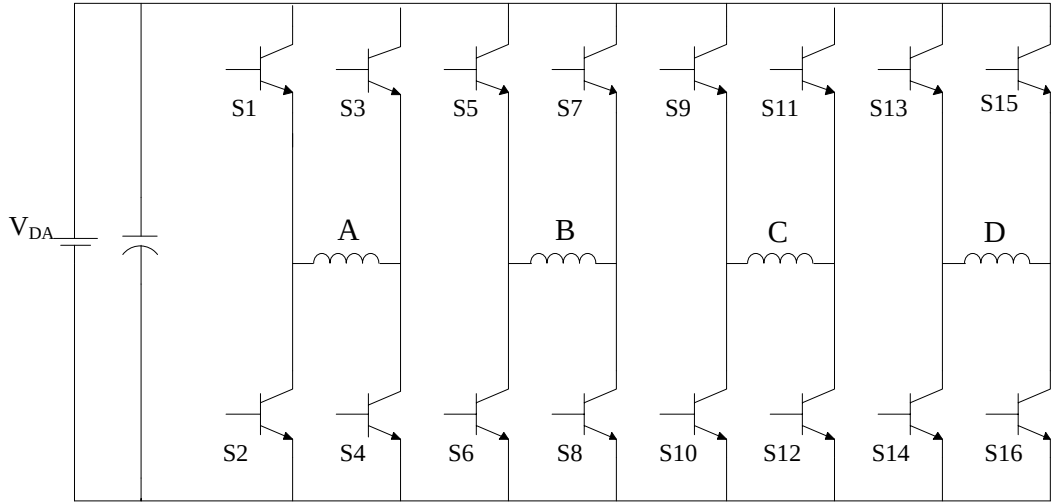
Anahtarlama relüktans motor tasarım ve bunun yanında sürücü teknolojisindeki gelişmeler ve bu alanda yapılan çalışmalar; ARM'lerin tek yönlü akım sağlayan dönüştürücüler kullanılarak sürülmesinin yanında bitişik iki fazın kısa akı yolları oluşturacak şekilde uyarılması temeline dayanan bipolar sürme tekniği ile verimli bir şekilde çalışabileceğini ortaya koymuştur.

Bu bağlamda şu ana kadar incelenen ve ARM fazlarından sadece tek yönlü akım geçişini sağlayan dönüştürücülerle birlikte çalışmamızın temelini oluşturan bipolar sürme tekniğinde kullanılan dönüştürücü çeşitlerini gözden geçirme zorunluluğu bulunmaktadır.

Yapılan araştırmalara göre şu ana kadar kullanılmış olan toplam 4 adet bipolar dönüştürücü tipi vardır.

H-Köprü Bipolar Dönüştürücü Topolojisi

Şekil 7.13'te gösterilen dönüştürücü tipi çalışma modlarının izlenmesinde ve üretilmesinde maksimum esneklik sağlayan dönüştürücü topolojisidir [125]. Sürücü hep modüler durumdadır ve fazların herhangi birinde meydana gelen hata otomatik olarak diğer fazlardan izole edilmektedir. Bu hata tolerans topolojisi özelliği ile otomobil uygulamalarında rahatlıkla kullanılabilir özelliktedir. Bir önceki konularda üzerinde durulan asimetrik köprü dönüştürücüsüne oranla örneğin 4-fazlı bir devre için 16 adet anahtara ihtiyaç duymaktadır. Bu ilk bakışta bir dezavantaj olarak öne çıkarken motorun fazlarından geçen akım yönünün değiştirilmesi göz önünde bulundurulduğunda önemli bir durumdur.

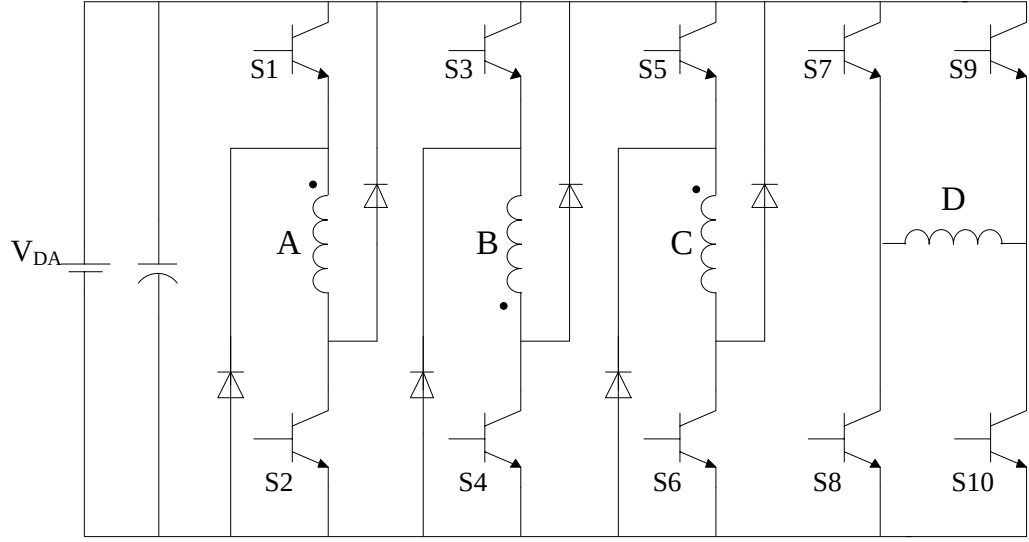


Şekil 7.13. H-köprü bipolar dönüştürücü topolojisi

Sunulan dönüştürücü topolojisi tez çalışmasında kullanılan 5-fazlı sürücü sisteminin temelini oluşturmaktadır. Tasarlanan devrede faz başına 4 adet olmak üzere toplam 20 adet MOSFET kullanılmıştır. Dönüştürücü devresi ile ilgili detaylı bilgi “Sürücü Devre Tasarımı” bölümünde verilmiştir.

Hibrit Konfigürasyonlu (Asimetrik ve H-Köprü) Bipolar Dönüştürücü Topolojisi

Şekil 7.14 asimetrik köprü dönüştürücü ile H-köprü dönüştürücünün bir kombinasyonunu sunmaktadır.

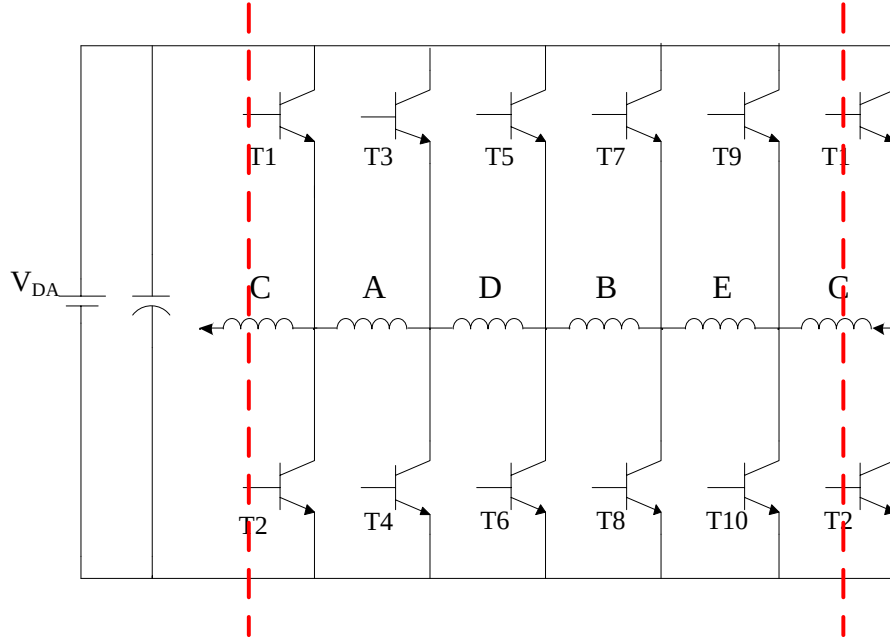


Şekil 7.14. Asimetrik köprü ile H-köprü dönüştürücünün kombinasyonu

Dönüştürücüde ilk üç fazın sargı yönleri değiştirilerek kısa akı yolları oluşturacak şekilde konfigüre edilmiştir. Sonuncu faz sargısı (D fazı) dört anahtar ile kontrol edildiği için polaritesinin H-köprü kontrol mantığına dayanarak elektriksel olarak değiştirilmesi gerekmektedir.

Ortak Anahtarlı ve H-Köprü Konfigürasyonlu Dönüştürücü Topolojisi

İlk bakışta Şekil 7.15'te verilen H-köprü dönüştürücüyü andıran bu dönüştürücü yapısı aynı anda ortak anahtar topolojisi de kullanmaktadır [126].

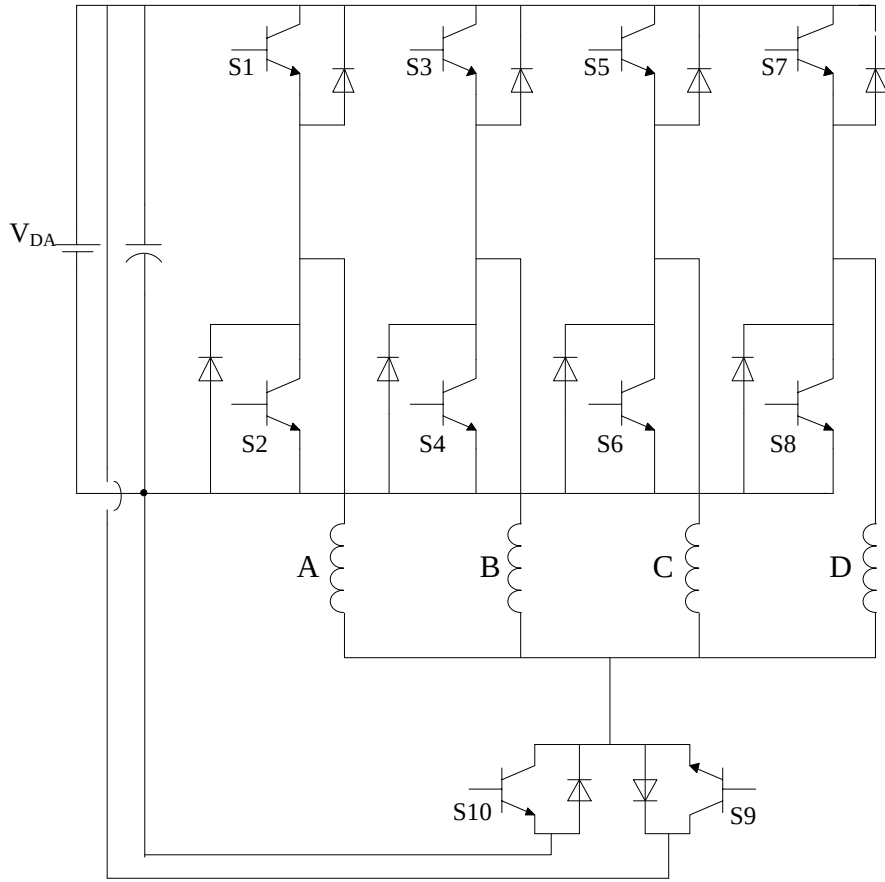


Şekil 7.15. Ortak anahtarlı ve H-köprü konfigürasyonlu dönüştürücü

Dönüştürücü temelde her faz için iki anahtar gerektirmektedir. Verilen bir anda akım herhangi iki faz üzerinden birbirine fazlar aracılığı ile bağlı olan iki anahtar aracılığı ile toprağa ulaşır. Örneğin; aynı anda T1, T4, T6 ve T7 anahtarlarının kapatıldığı düşünülürse, akım A ve B fazlarından geçecektir. Dikkat edilirse, bu durumda D fazının her iki düğüm noktasının potansiyellerinin birbirine eşit olduğu dolayısı ile üzerinden herhangi bir akım geçişi olmayacağı açıktır. Benzer olarak B-E ve C-A arası potansiyeller de birbirine eşit olduğundan E ve C fazlarından da akım geçişi olmayacaktır.

Sargıların Yıldız Bağlanması ile Elde Edilen Bipolar Dönüştürücü Topolojisi

En yeni bipolar dönüştürücü topolojisi olarak göze çarpmaktadır [125]. Dönüştürücünün kullanılabilmesi için kendi içerisinde faz sayısına bağlı olarak seri olarak bağlanmış olan motor sargılarının diğer sargı grupları ile mutlak suretle yıldız (star) bağlanması gerekmektedir.



Şekil 7.16. Sargıları yıldız bağlı ARM’lerde kullanılan bipolar dönüştürücü topolojisi

Şekil 7.16’da verilen dönüştürücü topolojisinde, sargıların yıldız bağlanmasına ek olarak yeni topolojide iki adet ek anahtar bulunmaktadır. Bu anahtarlar; tüm fazların akımlarının toplamı sıfıra eşit olmadığı sürece sürekli ilettime girip çıkarlar. Topolojide 4 faz için toplam 10 anahtar kullanılmıştır. Kısaca bu topoloji için fazlara göre kullanılabilir anahtar sayısı $(2q+2)$ olarak ifade edilebilir.

8. SÜRÜCÜ DEVRE TASARIMI

Bu bölümde anahtarlama relüktans motoru kontrol etmek için geliştirilen sürücü devresinden bahsedilecektir. Genel anlamı itibarı ile sürücü devresi; bir başka devreyi ya da elemanı kontrol etmek amacıyla tasarlanmış elektronik bileşen ya da elektriksel devre anlamını taşımaktadır.

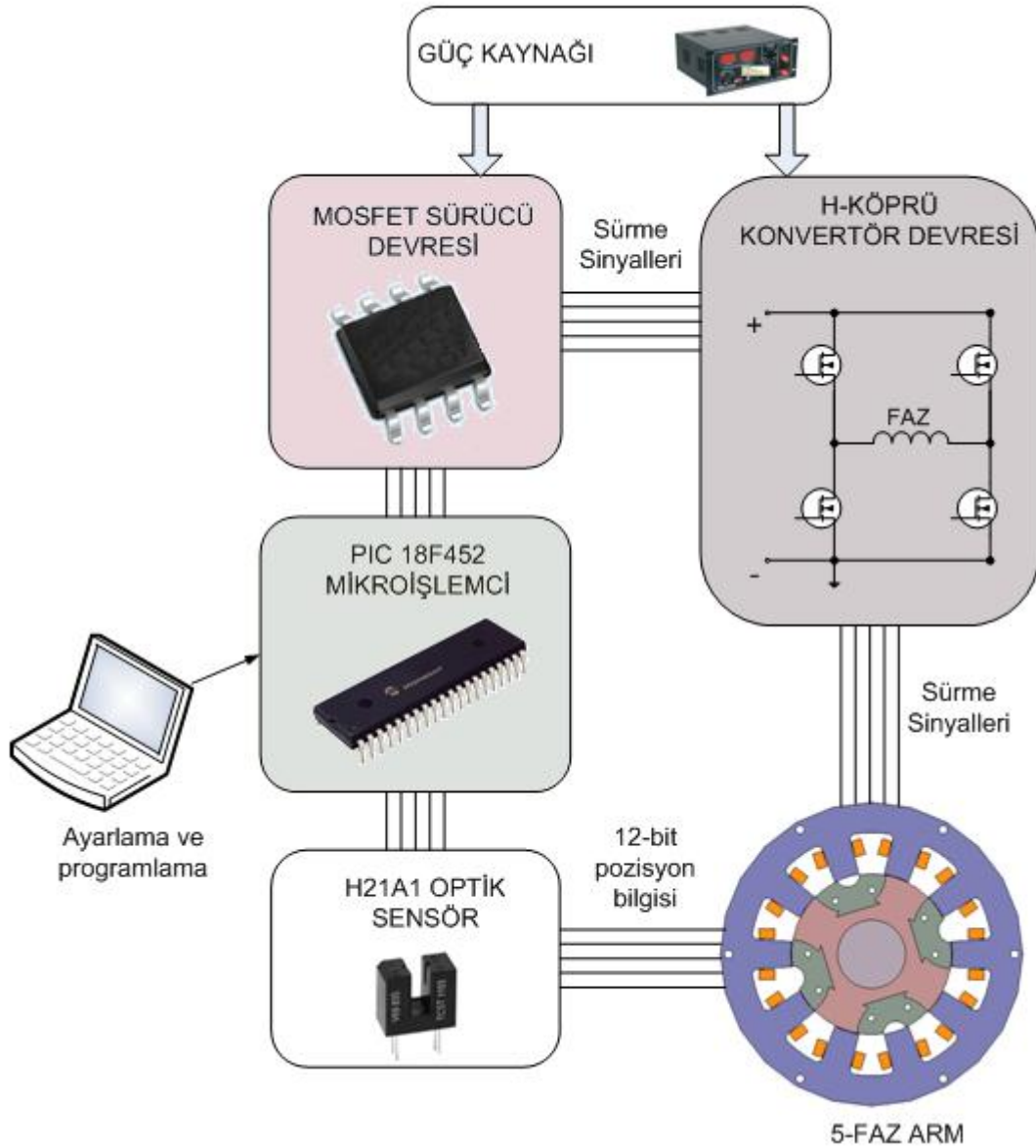
Daha önceki bölümlerde ARM, adım motor, fırçasız DA motor gibi özel elektrik makinelerinin doğrudan şebeke gerilimi ile çalıştırılmayacağı durumlar için mutlak suretle özel sürücü devrelerine ihtiyaç duyduklarından bahsedilmişti. Motorun çalışması için çok önemli yere sahip olan sürücü devresi ve tasarımının bahsedileceği bu bölümde bir önceki bölümde tasarımına göz atılan dönüştürücü devresi, kontrol devresi ve güç devresinin tasarımı üzerinde durulacaktır.

8.1. Kontrol Sisteminin Genel Yapısı

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 artmıştır. Motor kontrol devrelerinin vazgeçilemez özeliği olan PWM gibi birçok fonksiyonu donanımsal olarak desteklemekte ve programsal olarak da kullanıcıya birçok kolaylıklar sağlamaktadırlar [111].

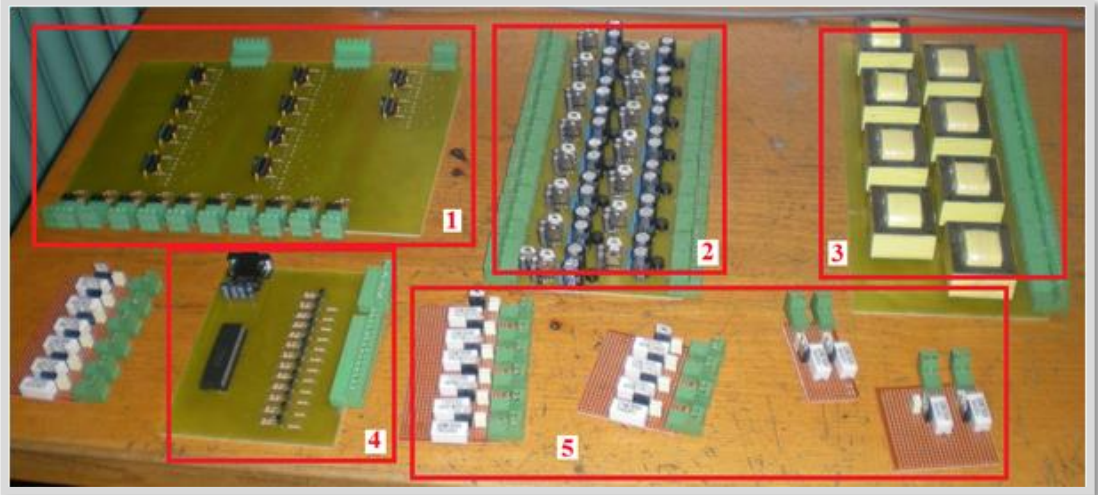
AA ve DA sürücü sistemlerinde olduğu gibi anahtarlama relüktans motor sürücü sistemlerinde de kapalı çevrim kontrol sistemi uygulanmaktadır. Motorun hangi fazlarının ne zaman tetikleneceği motor miline bağlanmış olan optik sensörler, sargılara akuple edilmiş olan manyetik sensörler ya da akımın algılanmasına bağlı olarak uygulanan sensörsüz kontrol algoritmalarının içeriğine bağlı olarak belirlenir.

Şekil 8.1’de verilen sürücü blok diyagramında açıkça görüldüğü gibi sürücü devresi; kontrol ve dönüştürücü devresini besleyen bir güç katı, kontrol devresi ve dönüştürücü devresi olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Devre kartlarının tasarımında kolaylık sağlaması açısından tasarlanan MOSFET sürücü devresi dönüştürücü devresi ile birlikte verilmiştir.



Şekil 8.1. Sürücü devresinin blok diyagramı

Şekil 8.1’de blok şeması verilen sürücü devresinin resmi Resim 8.1’de verilmiştir.



Resim 8.1. Sürücü devre blokları

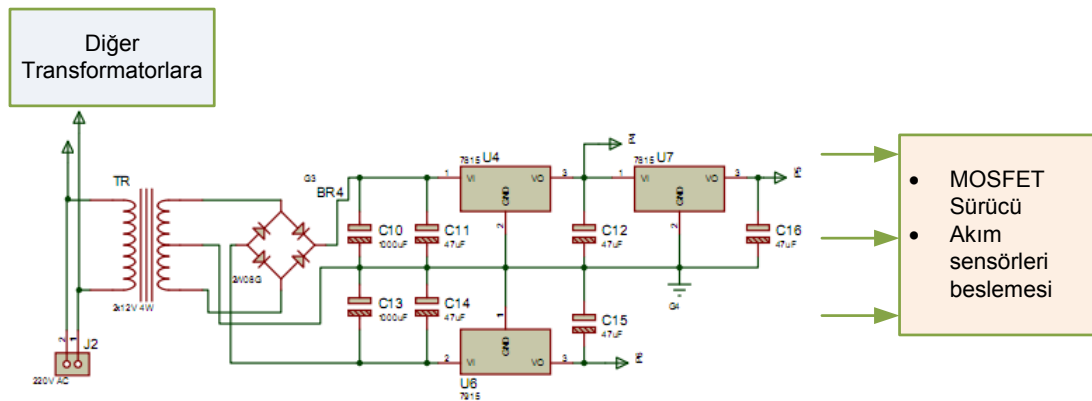
Resim üzerinde kısaca açıklama yapmak gerekirse;

1. *H-köprü sürücü ve dönüştürücü devresi*: Bu devre 10 adet IR2110 sürücü entegreleri ile bu sürücü entegrelerin kontrol ettiği 20 adet IRFP250 tipi MOSFETlerden oluşmaktadır.
2. *-15/+15/+5 V'luk besleme devresi*: Mikroişlemci devresi ile optokuplör devrelerin beslemesi için bir adet 0-5V ve IR2110 beslemeleri için ayrı ayrı 12 adet 0-15 V'luk besleme sağlayan devredir. Farklı kullanım amaçları için devreye -15V besleme seçeneği de konulmuştur.
3. *Transformator devresi*: 8 adet transformatorlardan oluşan ve 220/+18V (orta uçlu) çıkış sağlayan devredir.
4. *Kontrol devresi*: PIC18F452 mikroişlemcisi ve transistorlar ile gerçekleştirilmiş kontrol devresidir.
5. *Snubber devresi*: Motor sargılarında depolanan enerjinin baraya aktarılmasını (harcanmasını) sağlayan devredir.

8.2. Transformator ve Besleme Devresi

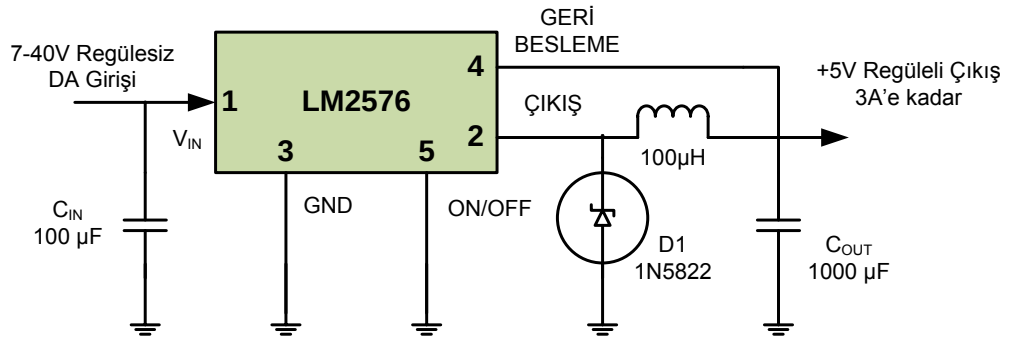
Transformator ve besleme devresi; kontrol devresinde kullanılan IR2110 entegrelerine +15V, motor akımlarını ölçmede kullanılan HAS50S akım transformatorlarına +/- 15V sağlamak amacıyla oluşturulmuş devrelerdir. Transformator ve besleme devresi çok büyük olduğu için Şekil 8.2’de tasarlanan devrenin sadece bir katı gösterilmiştir.

Her transformator grubunun 2x220/18 V AA çıkışı bulunmaktadır. Maksimum gerilimi 19.6 V olan çıkış köprü tipi doğrultucular, 35V 1000 μ F’lık kondansatörler ve 7915 (-15V gerilim sağlama amaçlı) ve 7815 (+15V gerilim sağlama amaçlı) entegreleri sayesinde -15V/0/+15 katına dönüştürülmüştür.



Şekil 8.2. Transformator ve besleme devresi

PIC18452 ve optokuplörlerin beslemesi PIC devresi üzerine konulan ve 5V/3A çıkış sağlayan, LM2576 entegresi kullanılarak tasarlanmış olan anahtarlamalı güç kaynağı ile gerçekleştirilmiştir. 5V’luk besleme sistemine ait tasarım devresi Şekil 8.3’te gösterilmektedir [127]. Resim 8.2; besleme devre bloğuna ait resimleri vermektedir.



Şekil 8.3. +5V/maksimum 3A çıkış sağlayan LM2576 ile yapılmış besleme devresi



(a)



(b)

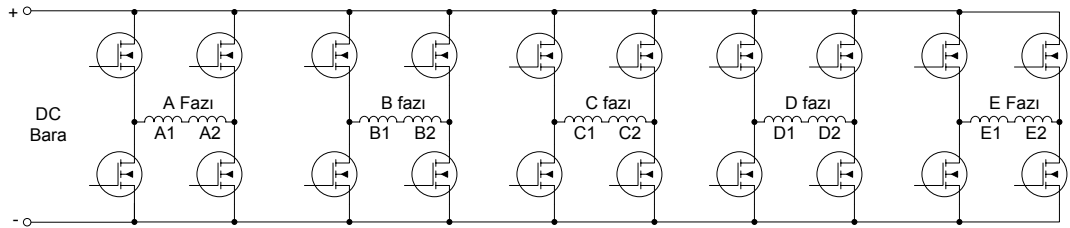
Resim 8.2. Transformator ve besleme devresi (a) Transformator devresi
(b) +/-15 V besleme devresi

8.3. Dönüştürücü Devresi

Sürücü devresinin en önemli katıdır. Motorun verimli ve güvenilir bir şekilde çalışabilmesi için seçilen dönüştürücü devresinin yüksek verim, kolay kontrol edilebilirlik ve yüksek hassasiyet gibi özellikleri taşıması gerekmektedir. Teknolojinin gelişmesine paralel olarak son yıllarda güç MOSFET'leri, IGBT gibi yarı iletken güç elemanları yardımı ile dönüştürücülerde karşılaşılan problemler kolaylıkla çözüme kavuşturulmakta, yüksek verimliliğe sahip devreler tasarlanabilmektedir. Tasarlanan motor çok yüksek gerilim ve akım şartlarında çalışmayacağı için uygulamada hem maliyet hem de iç direncinin IGBT anahtarlarına göre daha küçük olması sebebiyle yüksek anahtarlama hızı ve ideal kontrol özelliklerini bir arada barındıran MOSFET'ler tercih edilmiştir.

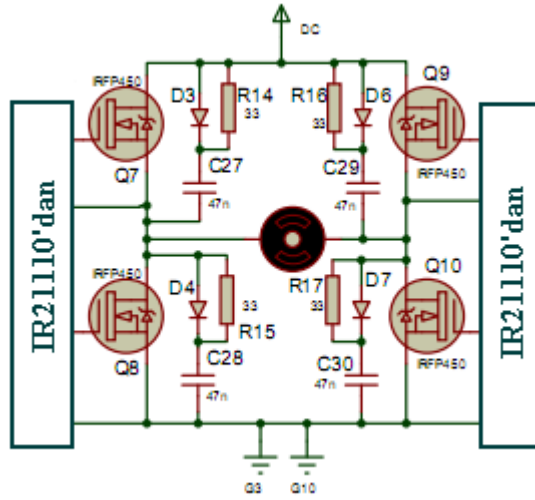
Dönüştürücü devresinin tasarımı IRFP250 tipi 200V, 33A'lık MOSFET ile gerçekleştirilmiştir.

Bir önceki bölümde bahsedildiği gibi motorun sürülmesinde fazları tamamen birbirinden ayırma topolojisini kullanan H-köprü dönüştürücü devresi tercih edilmiştir. Fazların herhangi birinde meydana gelen hata otomatik olarak diğer fazlardan izole edilmektedir. Motor kontrolü için tasarlanan H-köprü dönüştürücü devresi Şekil 8.4'te görülmektedir.



Şekil 8.4. Motorun sürülmesinde kullanılan 5-fazlı bipolar topolojiye sahip H-köprü dönüştürücü devresi

Dönüştürücü devresi sadece bir faz için basitleştirilirse Şekil 8.5'teki devre elde edilir.



Şekil 8.5. Bir faz için basitleştirilmiş H-köprü dönüştürücü devresi

Yukarıdaki faz için geçerli olan durum diğer tüm fazlar için de geçerlidir. Motor 5-fazlı olduğu ve kısa akı yolları yaratmak için komşu olan fazların birbirlerine göre ters polarite oluşturacak şekilde tetiklenmesi gerekmektedir. Tetikleme sinyallerinin frekansı motorun hızına bağlı olup motorun miline bağlanmış olan optik sensörlerden gelen bilgilere göre belirli bir düzen almaktadır. Durumu daha iyi kavrayabilmek için saat yönünde (CW) 90 derecelik dönüş boyunca her 18 derecede bir motor sargılarından geçen akımın yönü değiştiği için 5 döngülük tetikleme durumları Çizelge 8.1’de verilmiştir (şu anda sensör konumları dikkate alınmadığı için herhangi bir fazın durumundan başlanacaktır):

Çizelge 8.1. 90 derecelik dönüş boyunca fazlardaki akım yönlerinin değişimi

	0–18	18–36	36–54	54–72	72–90
A Fazı	0	+	0	-	0
B Fazı	-	0	0	+	0
C Fazı	+	0	-	0	0
D Fazı	0	0	+	0	-
E Fazı	0	-	0	0	+

Şekil 8.5’te verilen sargının A-fazına ait olduğu düşünülürse, bu fazın iletimde kalma aralığı 18–36 derece arasındadır. Bu durumda şekle göre faz sargısından varsayıma göre “+” yönde akım geçirmek için Q7 ve Q10 MOSFET’lerinin tetiklenmesi gerekmektedir. A-faz sargısının iletime geçtiği bir sonraki aralık 54–72 derece aralığıdır (“-” yönde). Fakat bu durumda bir öncekinin tersine sargıdan geçen akım yönünün değiştirilmesi gerektiğinden Q8 ile Q9 MOSFET’lerinin tetiklenmesi gerekmektedir. Çizelgede “0” olarak adlandırılan durumlar o faza ait sargı ya da sargı gruplarının iletimde olmadığı anlamını taşımaktadır.

Dönüştürücü devresinde kullanılan MOSFET’leri tetiklerken dikkat edilmesi gereken birkaç husus vardır:

- ❖ İlgili faz ya da fazlar enerjilendirilirken ya da enerjileri kesilirken hem her faza ait MOSFET gruplarının hem de farklı fazların aynı anda iletime geçirilmesi ya da kesime götürülmesi gerekmektedir. Fakat tasarlanan sistemde bunun önüne geçmek için çapraz sürülen MOSFET’ler aynı sürücü entegreye bağlanmış ve entegre tetiklendiğinde ya da enerjisi kesildiğinde bu durumun oluşmaması sağlanmıştır.
- ❖ Diğer bir durum da bir fazın enerjisi kesilip diğer faz enerjilendirileceği zaman bir önceki fazda ortaya çıkan depo enerjinin kısa süre içerisinde boşaltılarak tutma momenti oluşturmamasını sağlamaktır. Bu durumu garanti etmek için MOSFET’lerle birlikte RC snubber devresi kullanılmıştır.

8.4. Kontrol ve Programlama Devresi

Teknolojinin gelişmesi ve özellikle küçük yongaların birçok işi bir arada yapabilme yeteneğinin ortaya çıkması mikroişlemci ve mikrodenetleyicilerin kontrol sistemlerinin vazgeçilme elemanları olmasına yol açmıştır.

Bir bilgisayar içerisinde bulunması gereken temel bileşenlerden RAM, I/O ünitesinin tek bir yonga içerisinde üretilmiş biçimine mikrodenetleyici (mikrocontroller) denmektedir. Bilgisayar ve kontrol teknolojisi gerektiren uygulamalarda kullanılmak

üzere tasarlanmış olan mikrodnetleyiciler, mikroişlemcilere göre çok daha basit ve ucuzdur. Günümüz mikrodnetleyicileri otomobillerde, kameralarda, cep telefonlarında, faks-modem cihazlarında, fotokopi, radyo, TV, bazı oyuncak gibi sayılamayacak kadar pek çok alanda kullanılmaktadır.

Günümüz mikrodnetleyicileri birçok yonga üreticisi tarafından üretilmektedir. Her firma ürettiği yongaya farklı isimler vermektedir. Örneğin MICROCHIP firması ürettiklerine PIC adını verirken, INTEL'in ürettiği ve 1980'lerin başında piyasaya sürüldüğü 8051, bazen MCS-51 olarak ta adlandırılır. Kontrol devresinde MICROCHIP firması tarafından üretilen PIC18F452 mikrodnetleyicisi kullanıldığı için denetleyicilerin genel özelliklerinde bahsetmekte yarar vardır.

Bir Mikrodnetleyici içinde bulunabilen bazı özellikler şunlardır:

- Programlanabilir Dijital Giriş / Çıkış (I / O)
- Programlanabilir Analog Giriş
- Seri Giriş / Çıkış (I / O)
- Darbe (Pals) – PWM (Darbe genişlik modülasyonu) işareti çıkışı
- Harici hafıza bağlanabilme
- Dâhili hafıza seçenekleri (ROM, PROM, EPROM, EEPROM, Flash gibi)
- Kesme, Zamanlayıcı ve Sayıcı gibi özellikler.

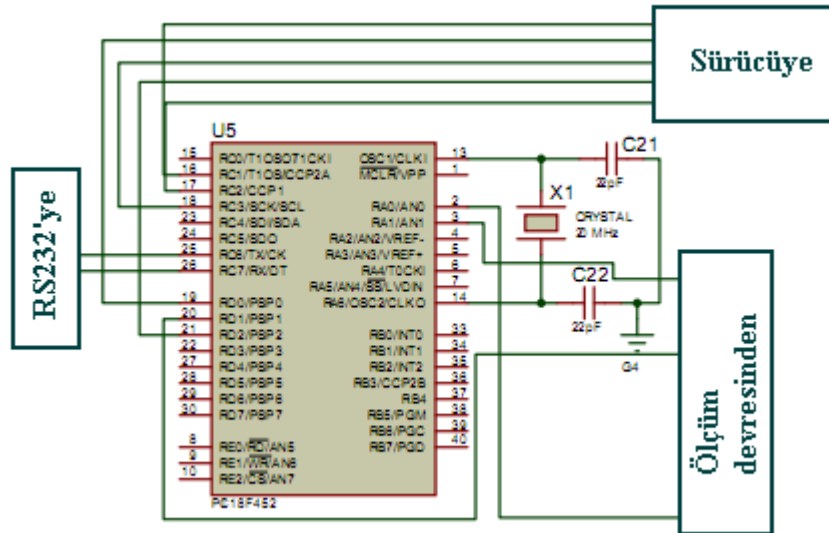
PIC Mikrodnetleyicilerin diğer avantajları:

- Destek Yazılımları internetten ücretsiz sağlanır.
- Çok yaygın ve ucuzdur. Hem profesyonel hem de amatör kullanıma uygundur.
- Çok az ve basit birkaç elemanlarla (direnc, kondansatör) donanımları kurulabilir.
- Komut sayısı az ve basittir.
- Daha üst seviye diller için (PIC C, PicBasic gibi) Derleyiciler'e (compiler) sahiptir.

PIC18F452 mikrodnetleyicisinin temel özellikleri kısaca özetlenmek gerekirse aşağıdaki temel parametrelere değinilebilir:

- Yüksek hızlı RISC işlemciye sahiptir;
- 40 Mhz'ye kadar işlemci hızına sahiptir
- 32Kbyte flash hafıza
- 256 byte eeprom bellek
- Power-on Reset (POR), Power-up Timer (PWRT)
- 10 bit analog/dijital çevirici
- 5 V'luk kaynak ile çalışma
- Düşük güç harcama
- RS232 desteği
- PWM 10 bit (3/1)
- Sayıcı (16 bit/8 bit)

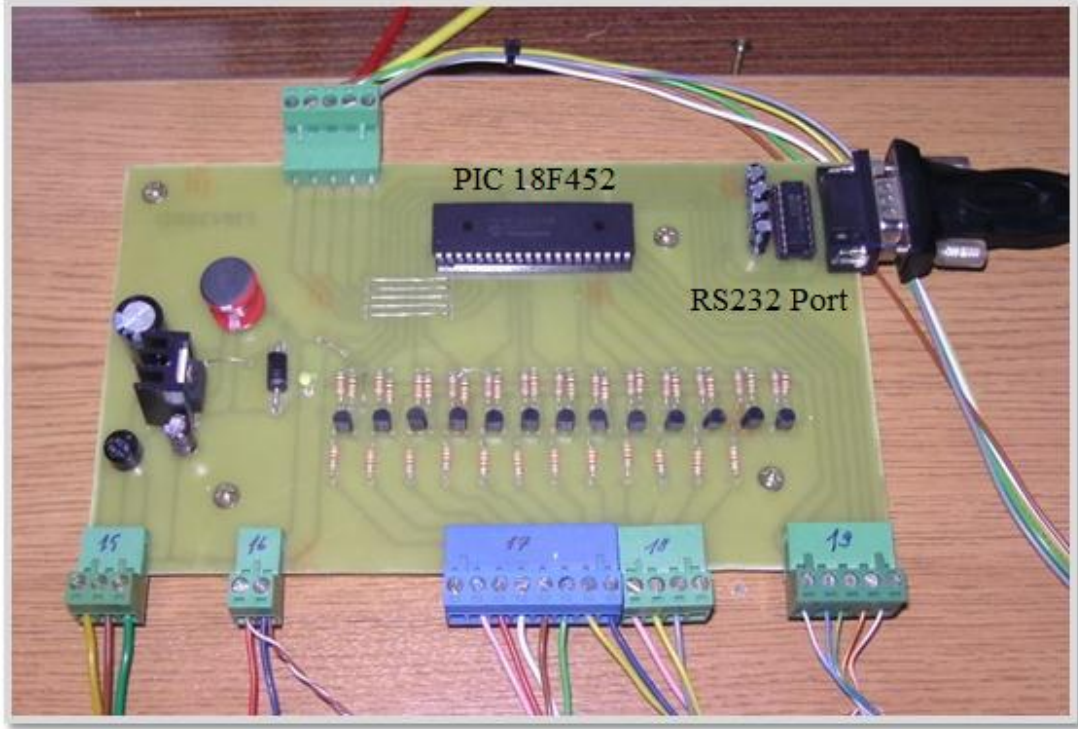
Mikrodnetleyicisi kullanılarak tasarlanan devre Şekil 8.6'da görülmektedir.



Şekil 8.6. PIC18F452 ile tasarlanan programlama ve kontrol devresi

Sistemin çalışması esnasında elde edilen akım, hız gibi değişkenlerin RS232 arayüzü aracılığı ile bilgisayarlar tarafından izlenebilmesi, motorun miline bağlanan 5 adet

optik sensörden gelen komutların işlenmesi ve MOSFET sürücülerin (IR2110) optik sensör bilgilerine bağlı kalınarak bilgisayardan gönderilen komutlar aracılığı ile IRFP250 tipi MOSFET'leri sürme şekilleri gibi birçok fonksiyon programlanan mikrodenetleyici aracılığı ile gerçekleştirilmektedir.



Resim 8.3. Kontrol ve programlama devresi fotoğrafı

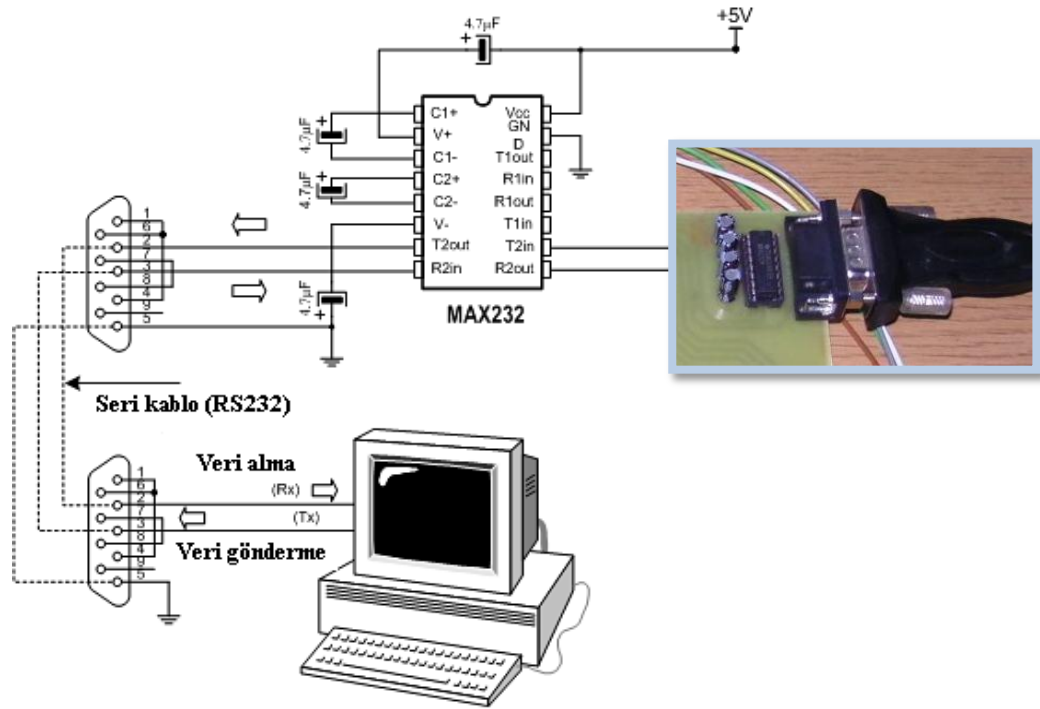
Resim 8.3'te görüldüğü gibi kontrol ve programlama devresi bir adet PIC18F452, RS232 seri port ara yüzü ve mikroişlemci sinyallerini sürücü devreye ulaştıran transistör devrelerinden oluşmaktadır.

8.4.1. RS232 iletişim protokolü ve özellikleri

Uygulamamızda diğer bir önemli donanım sunucu bilgisayar ile haberleşmeyi sağlayan ve verilerin çevrimiçi ve gerçek zamanlı olarak izlenmesine olanak sağlayan RS-232 seri iletişim protokolüdür. Kısaca bu protokolün yapısından ve işleyiş şeklinden bahsetmekte yarar vardır.

RS-232 standardı en çok bahsedilen ve veri haberleşme cihazlarının uyumluluğunu sağlamak amacıyla Electronic Industries Association (EIA) tarafından ortaya çıkarılmış standarttır. İlk olarak 1962 yılında ortaya çıkmıştır ve üçüncü versiyonu 1969 yılında RS-232C olarak adlandırılmıştır. RS-232 C ile kullanılan en yaygın konektör tipi DB25'dir. Fakat modern bilgisayarlarda 25 uca gerek kalmadığı için IBM DB-9 (9 uçlu) seri port konektörünü geliştirmiştir [128].

Seri link adını verdiğimiz iletişim protokolü; verici veya sürücü (kullanılan sistemde bilgisayar) belirli bir anda “1” bit olmak üzere bilgileri sırayla yollar. Özellikle üçten fazla bağlantının bulunduğu ve “ağ” adını alan sistemlerde çoğunlukla verici ve alıcılar aynı hattan iletişim sağlarlar [129]. Şekil 8.7’de tasarlanan sistemde seri veri akışı çift yönlü olarak gerçekleştirilmektedir. Bilgisayarlar aracılığı ile sıraya konulan veriler RS-232 portu sayesinde PIC18F452 mikroişlemcisine ve motor uçlarından elde edilen akım gerilim ve hız bilgileri de aynı şekilde RS-232 portu aracılığı ile izleme (monitoring) amaçlı bilgisayara gönderilmektedir.

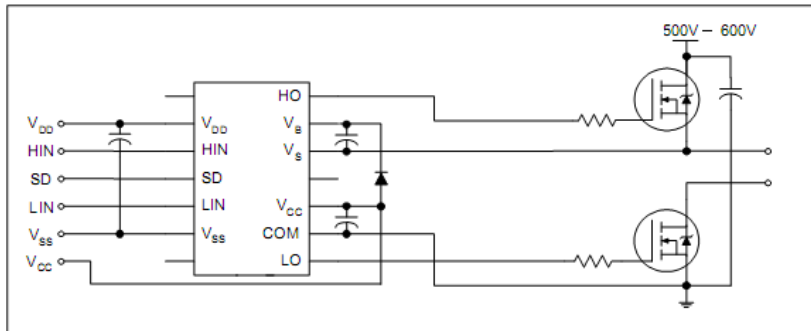


Şekil 8.7. Seri kablo aracılığı ile bilgisayar-mikroişlemci arasındaki veri alış-verişi

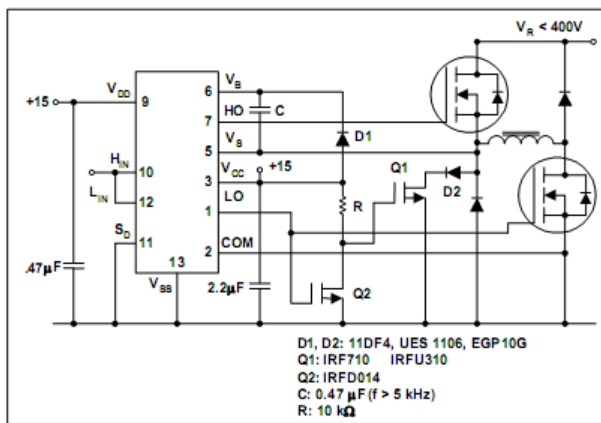
8.5. MOSFET Sürücü Devresi

MOSFET sürücü entegrelerinin görevi mikrodenetleyiciden gelen komutlara göre MOSFET'leri sürmektir. Tasarlanan devre; optik transistorlar ve IR2110 tipi MOSFET sürücüleri aracılığı ile gerçekleştirilmiş, PIC18F452 mikroişlemcisinden gelen sürme sinyallerini işleyerek bağlı bulundukları IRFP250 tipi MOSFET'leri ilettime geçiren devredir.

IR2110 sürücü entegrelerin uygulamada tercih edilmesinin temel sebepleri; az yer kaplamaları, hem alçak taraf (low-side) hem de yüksek taraf (high-side) MOSFET'leri sürebilmeleri ile 500 V'a kadar olan uygulamalarda rahatça kullanılabilmeleridir. Şekil 8.8 ve Şekil 8.9'da bu entegrelerin tipik uygulamaları ile anahtarlamalı relüktans motorlarda gerçekleştirilen uygulama tipleri görülmektedir.



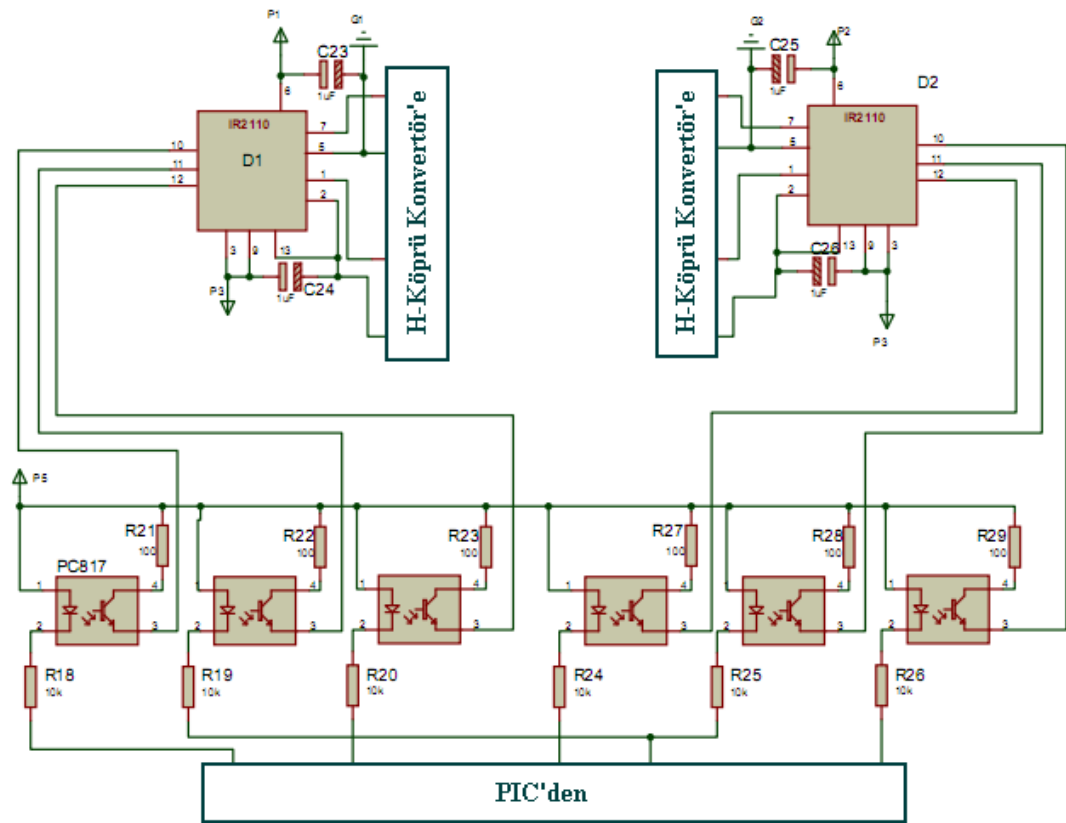
Şekil 8.8. IR2110 sürücü entegrelerinin tipik kullanımı



Şekil 8.9. IR2110 sürücü entegrelerinin motor sürücülerinde kullanımına örnek

Sistemde bulunan MOSFET'leri sürerken dikkat edilmesi gereken en önemli nokta; ilgili faz ya da fazlar enerjilendirilirken ya da enerjileri kesilirken hem her faza ait MOSFET gruplarının hem de farklı fazların aynı anda ilettime geçirilmesi ya da kesime götürülmesi gerektiğidir. Fakat tasarlanan sistemde bunun önüne geçmek için çapraz sürülen MOSFET'ler aynı IR2110 sürücü entegreye bağlanmış (bu sürücü entegreler hem alçak taraf (low-side) hem de yüksek taraf (high-side) MOSFET'leri sürebildikleri için) ve entegre tetiklendiğinde ya da enerjisi kesildiğinde bu durumun oluşmaması sağlanmıştır.

Şekil 8.10'da tasarlanan MOSFET sürücü devresinin bir faza ait gösterimi verilmiştir. Motor bipolar sürücü sistemi; verilen devrenin 5 katından oluşmaktadır.



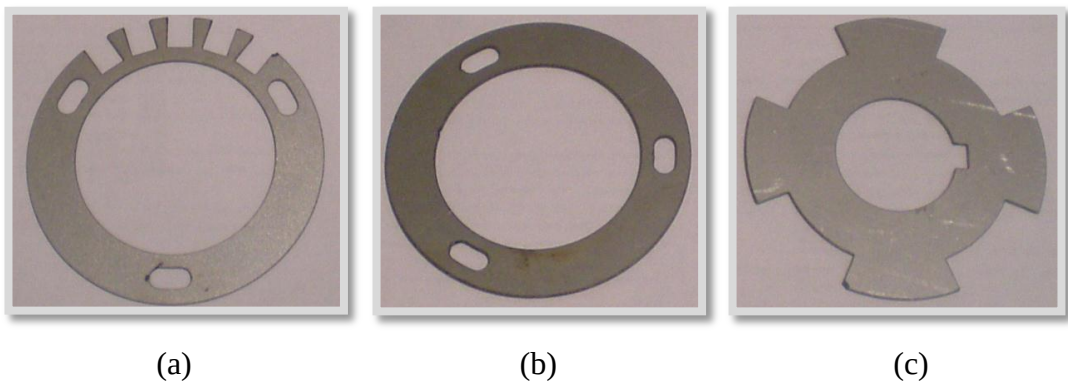
Şekil 8.10. MOSFET sürücü devre bloğu (sadece bir faza ait)

Dikkat edilmesi gereken diğer bir nokta da izolasyon oluşturması açısından mikrodnetleyici katı ile sürücü devre katı arasında mutlaka bir optokuplör kullanılması gerektiğidir. Optokuplör; elektriksel bir bağlantı olmadan düşük gerilimlerle yüksek gerilim ve akımları kontrol edebilen devre elemanıdır. Yapısında ise bir LED diyot ve onun yaydığı ışıktan etkilenecek ilettime geçen bir adet foto eleman bulunur. Devrede ise hem izolasyon hem de aynı zamanda sürücü görevini üstlenmektedir.

8.6. Rotor Pozisyonunu Algılamada Kullanılan Optik Sensörler

Motorun performansında en önemli yeri rotor pozisyon algılama sensörleri almaktadır. Anahtarlamalı relüktans motorların kontrolünde yaşanan en büyük sıkıntı pozisyonun anlık takip edilip edilmemesidir. Pozisyon sensörlerinin görevi rotorun konumunu doğru olarak algılama ve bu bilgiyi mikrodnetleyiciye ulaştırmaktır. Motor pozisyonunun doğru bir şekilde algılanması performans açısından çok önemlidir.

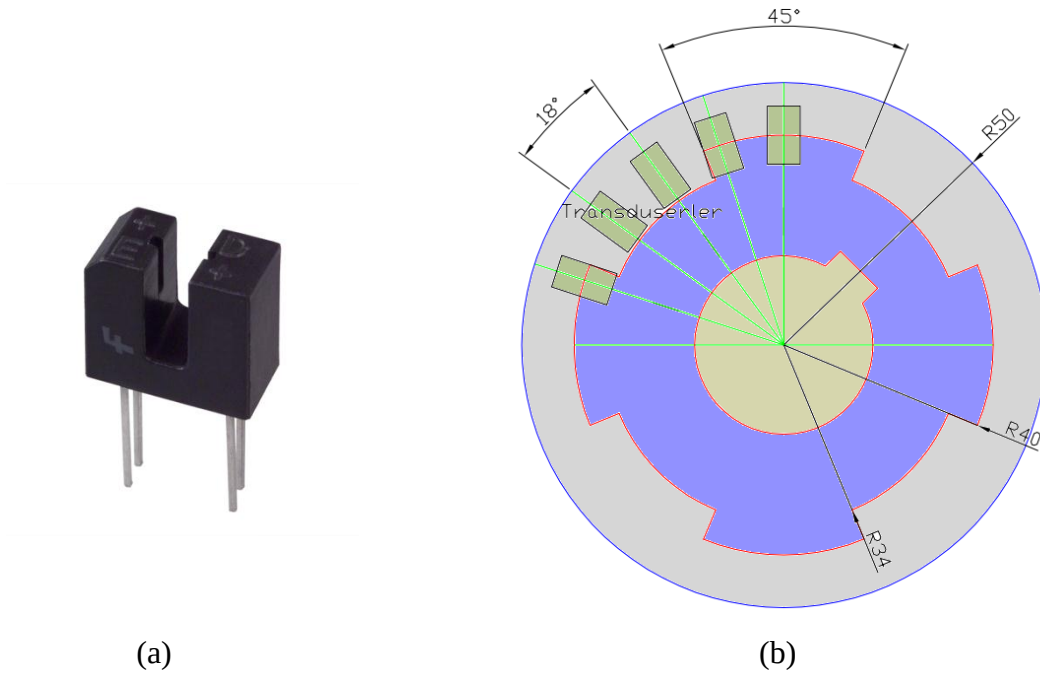
Tasarlanan ARM için kullanılan rotor pozisyon sensörü yerleşimi Şekil 8.11’de tasarlanmış olan plakalar sayesinde sağlanmıştır.



Şekil 8.11. Optik sensör yerleşim parçaları
 (a) Sensör yerleşim plakası
 (b) Motor gövdesi montaj plakası
 (c) Rotor miline takılan algılama levhası

Referans olarak alınan fazın statorları ile aynı hizada yerleştirilen ilk sensörden sonra diğer sensörler 18’er derece ara ile yerleştirilmiştir. Motor çakışık pozisyona

gelmeden 4,5 derece önce bir fazın enerjisi kesilip diğer fazın enerjilendirilmesi gerekmektedir. Böylece çakışık pozisyonda çok fazla akım çeken motorun performansı otomatik olarak artmış olacaktır. Şekil 8.12’de ise uygulamada tercih ettiğimiz ve plakalar üzerine yapıştırılarak kullanılan olan H22A1 optik transdüserleri ile bu transdüserlerin plakalar üzerine yerleşim şekilleri görülmektedir.



Şekil 8.12. Optik transdüserlerin devre uygulaması
 (a) Optik transdüserin görünüşü
 (b) 5 adet transdüserin plakalar yardımı ile motor miline bağlantısı

Optik transdüserlerin çalışma prensibi çok basittir. Motor miline bağlı olan levha (Şekil 8.11 (c)’de Şekil 8.12 (b)’de mavi ile gösterilen plaka) motor gövdesine sabitlenmiş olan transdüserlerin arasından geçerek sürekli döner. Transdüser; plaka çıkıntısı üzerine geldiğinde lojik 1 çıkışını verecektir (5V’luk gerilim üretir). Üretilen gerilim tamamen kare dalga olduğu için mikrodenetleyicinin analog girişine gerek kalmadan kolaylıkla işlenebilir. Sensörlerden gelen lojik 1 (+5V) ve lojik 0 (0V) verileri motorun çalışmasında yani fazlarının uyarılmasında çok büyük önem teşkil etmektedir. Çizelge 8.2’de lojik sensör çıkışlarına bağlı olarak motor fazlarının saat yönünde dönüş için (CW) tetiklenme durumları verilmiştir.

Çizelge 8.2 Lojik sensör çıkışlarına bağlı olarak motor fazlarının durumu

SENSÖRLER					MOTOR FAZLARI				
A	B	C	D	E	A Fazı	B Fazı	C Fazı	D Fazı	E Fazı
-	-	1	0	0	-	N	P	-	-
-	1	0	0	-	P	-	-	-	N
1	0	0	-	-	-	-	N	P	
0	0	-	-	1	N	P	-	-	-
0	-	-	1	0	-	-	-	N	P

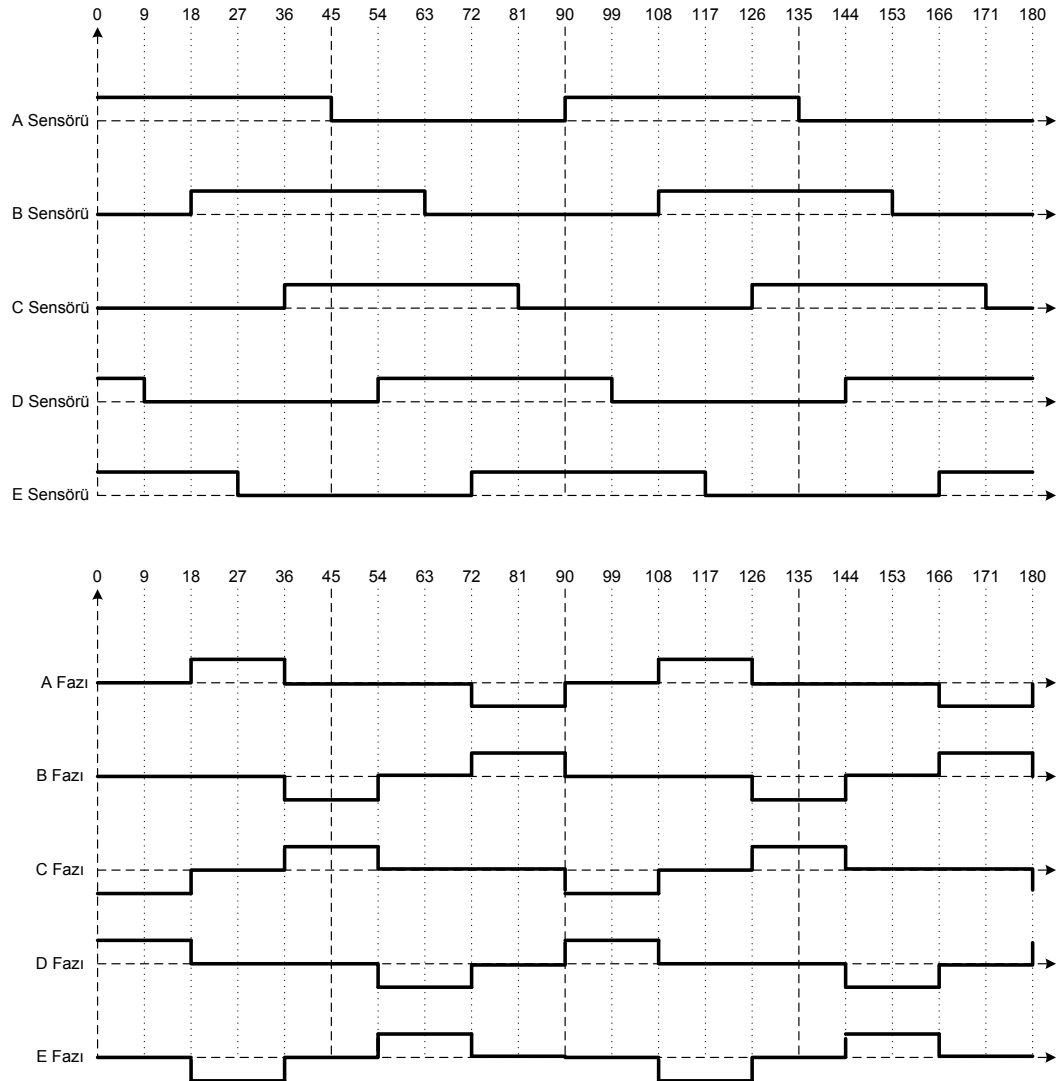
Çizelge 8.2’de her anda sadece 3 sensör durumunun göz önünde bulundurulduğu görülmektedir. Diğer sensör çıkışlarının lojik “1” ya da “0” olmasının önemi yoktur. Motor fazlarında “P” ifadesi motorun o fazından varsayıma göre “pozitif yönde” akım geçirilirken “N” ifadesi ilgili fazdan “negatif yönde” akım geçirildiği anlamını taşımaktadır. Örneğin yan yana bulunan B fazından negatif yönde, C fazından pozitif yönde akım geçirebilmek için mikrodenetleyici uçlarına mutlaka C sensöründen “1” (kapalı), D ve E sensörlerinden “0” lojik verilerinin alınması gerekmektedir. Bu durum kodlamada aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir:

```

*****//
if (SensC==1 && SensD==0 && SensE==0 && EU1==0 ) // C_P-B_N
{
    EU1=1;
    EU2=0;
    EU3=0;
    EU4=0;
    EU5=0;
    PORTA=0;
    PORTB=0;
    PORTC=0;
    PORTD=0;
    PORTE=0;
    DelayUs(100);
    PORTE=4;
    PORTC=8;
}
*****//

```

Şekil 8.13’teki grafikte de sensör çıkışlarının rotor konumu ile değişimi ve faz anahtar işaretlerinin değişimi gösterilmektedir.

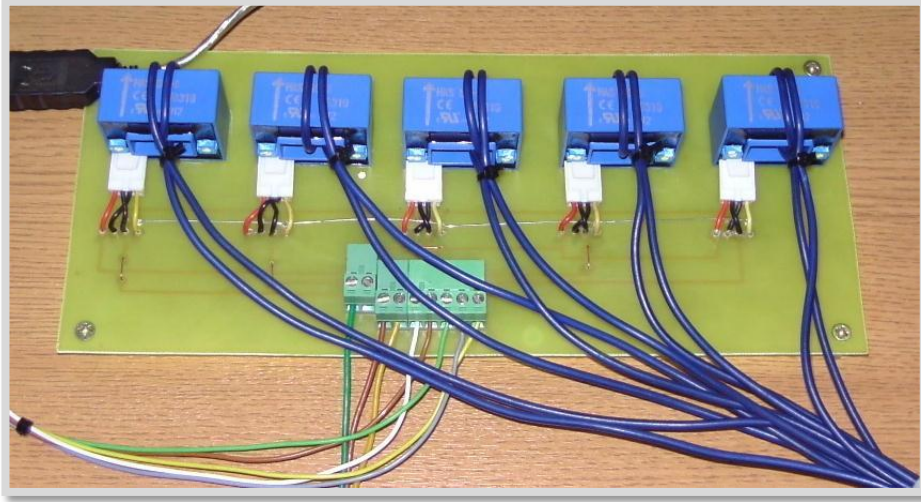


Şekil 8.13. 180 derecelik dönüş boyunca sensör çıkışlarının rotor konumuna bağlı olarak değişimi ve faz anahtarlama işaretlerinin değişimi

8.7. Akım Algılama Devresi

Resim 8.4'te tasarlanan devre; motor faz akımlarının izlenmesi, motorda oluşabilecek hatalara anında algılanarak müdahale edilebilmesi ve faz akımlarının aynı anda geliştirilen arayüz aracılığı ile görselleştirilebilmesi için kurulmuş olan devredir. Akım algılayıcı olarak devrede LEM firması tarafından geliştirilmiş olan ve 0-50 A aralığında akım okuma kapasitesine sahip HAS 50S akım sensörü kullanılmıştır. Bu akım sensörünün en büyük özelliği; çıkışına herhangi bir yükselteç bağlamaya gerek kalmadan okuduğu akıma bağlı olarak 0-5V aralığında çıkış

gerilimi üretebilmesidir. Hem DA hem de AA devrelerde rahatlıkla kullanılabilir. Özellikle tasarlanan ARM fazlarında her anda akımın yönü değişebildiği için hassas ayar yapıldığında faz akımlarını hem pozitif hem de negatif yönde %2'lik hata ile okumak mümkün olmaktadır.

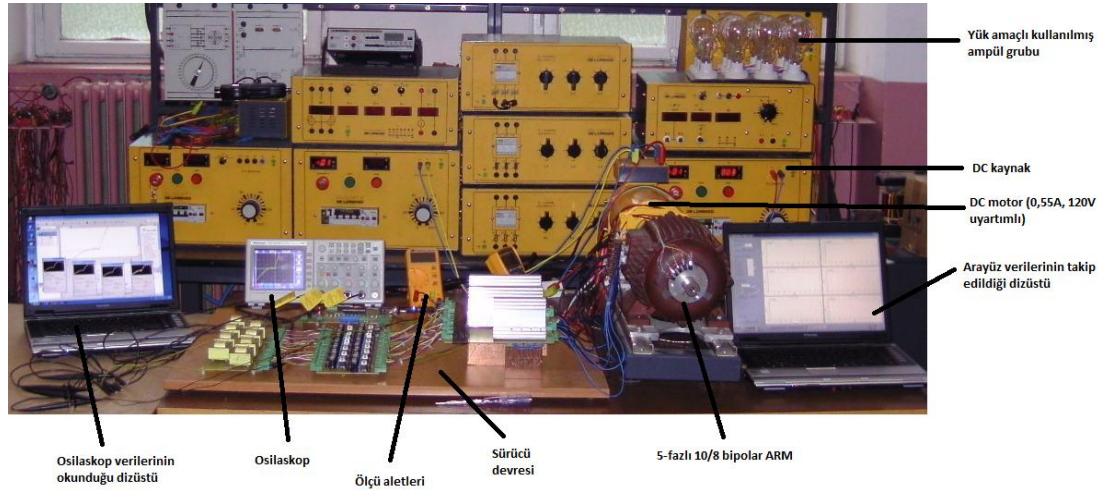


Resim 8.4. Akım algılama devresi

9. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve KARŞILAŞTIRMA

Bu bölümde tasarlanan 5-fazlı 10/8 konfigürasyonlu bipolar segmental tip ARM üzerinde yapılan deneysel çalışmalara yer verilmiştir. Yapılan çalışmalar birkaç adımdan meydana gelmektedir. Öncelikle Resim 9.1’de verilen deney seti kurulmuştur. Kurulan deney seti aşağıdaki donanımlardan meydana gelmektedir:

1. Motorun bara beslemesi ve motora akupple olarak bağlı olan DA generatör için 120V, 0.55A akım sağlayacak iki adet güç kaynağı (Maksimum: 240V, 8A-Şekil 8.2),
2. DA generatörünün besleme gerilimi ile uyartım akımının sürekli kontrolünü sağlayacak 2 adet; generatör uçlarına yük amaçlı bağlanmış olan 1000W’lık ampul grubunun (Resim 9.2) akım ve gerilimini ölçen 2 adet ölçü aleti,
3. Motor performansının izlenmesi için geliştirilmiş olan ara yüz yazılımının üzerinde koştuğu bir diz üstü bilgisayar ile Tektronix firmasına ait 4-kanallı osilaskop verilerinin izlenmesini sağlayan yazılımın üzerinde koştuğu bir diz üstü bilgisayar.



Resim 9.1. Test standı

10/8 konfigürasyonlu 5 fazlı bipolar ARM tasarlanan sürücü devre çıkışına ve motor gövdesine yerleştirilmiş olan motor pozisyon sensörleri de kontrol ve programlama devresinin girişine bağlanmıştır. Aynı anda motorun sürme kontrolü Visual Studio

C++ ile geliştirilmiş olan bir ara yüz ile sağlandığı için seri port aracılığı ile motor kontrol kartı ve bilgisayar arasında bir bağlantı gerçekleştirilmiştir.

Resim 9.2’de motorun beslenmesinde kullanılan DeLorenzo marka 240V, 8A’lık güç kaynağı ile DA generatörünün uçlarına yük amaçlı bağlanmış olan 1000W’lık ampul grubu görülmektedir.

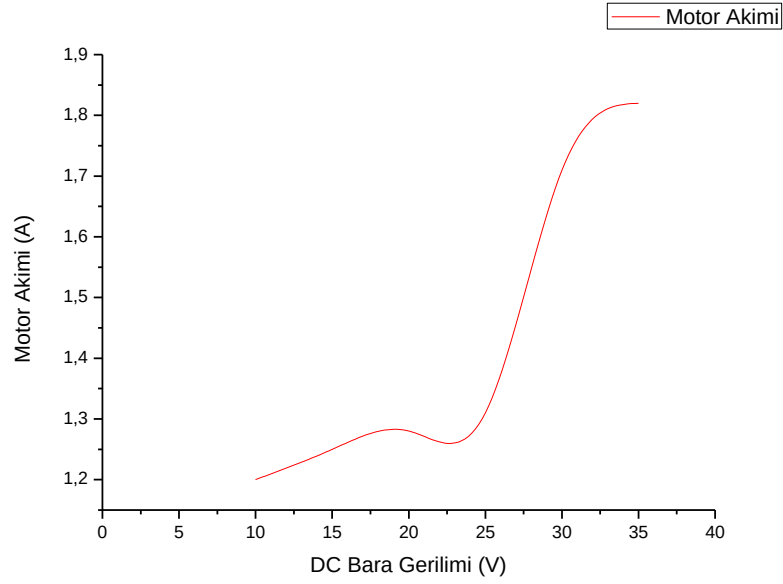


Resim 9.2. DA kaynak (240V, 8A) ve yükler

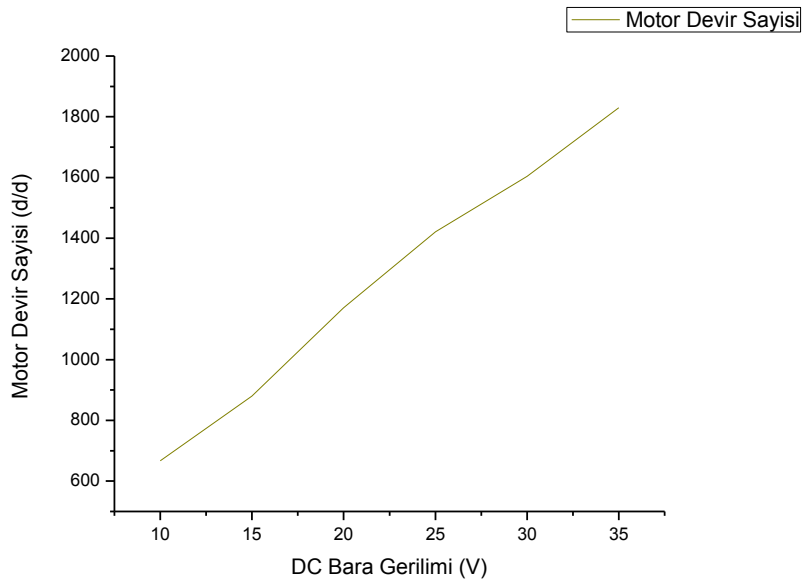
9.1. Boşta Çalışma Deneyi

Öncelikle motor boşta çalıştırılarak besleme gerilimi kademeli olarak arttırılmış ve buna bağlı olarak kontrollü motorun devreden çektiği akım ile hızın değişimi gözlemlenmiştir. Motor boşta çalıştırıldığı için hız gerilime bağlı olarak sonsuza doğru gideceğinden motor anma geriliminin yarısına kadar sürülmüştür. Boş çalışma

deneyleri ile ilgili olarak osilaskoptan ve ara yüz aracılığı ile elde edilen akım dalga şekillerine Şekil 9.1-9.6’da ulaşmak mümkündür.

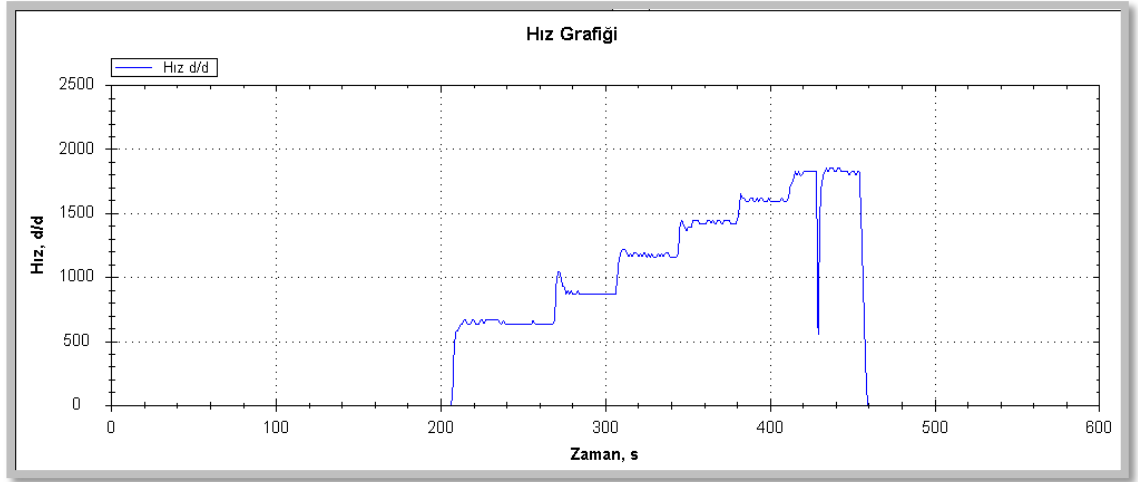


Şekil 9.1. Motora uygulanan gerilim ile motor akımının değişimi

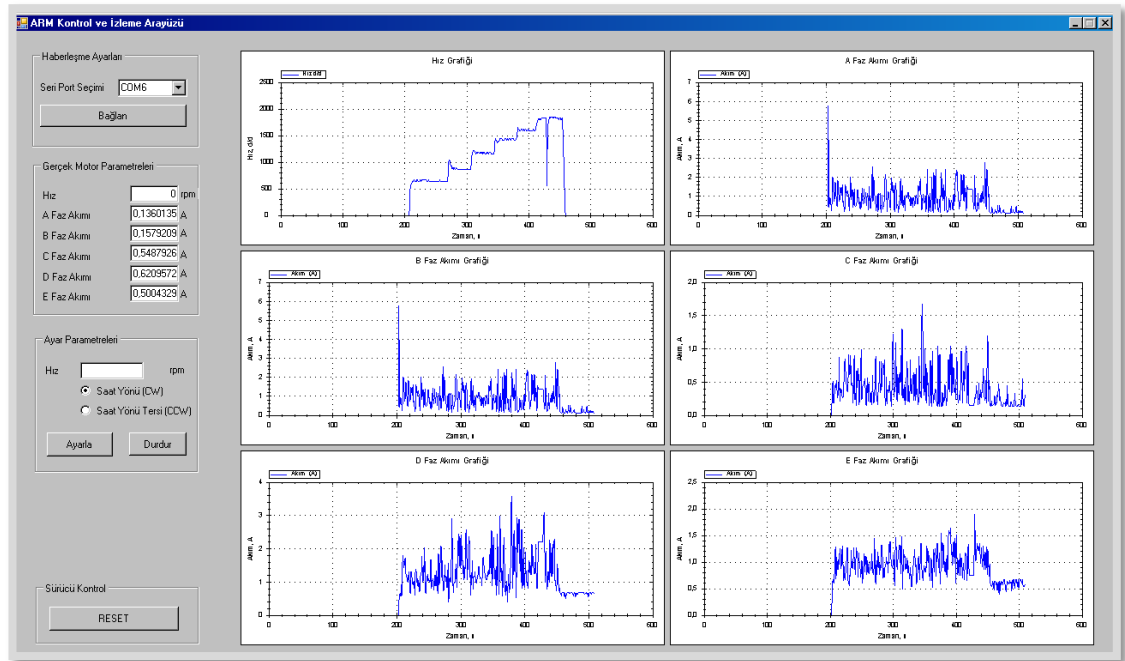


Şekil 9.2. Motora uygulanan gerilim ile motor devir sayısının değişimi

Şekil 9.1 ve Şekil 9.2’de verilen boşa çalışma grafikleri incelendiğinde, motor yüksüz çalıştırılırken artan motor gerilimine bağlı olarak motor devrinin arttığı ve buna bağlı olarak motor akımında küçük artışlar meydana geldiği gözlemlenmiştir.



Şekil 9.3. Zamana bağlı olarak motor hızının arayüz görünümü

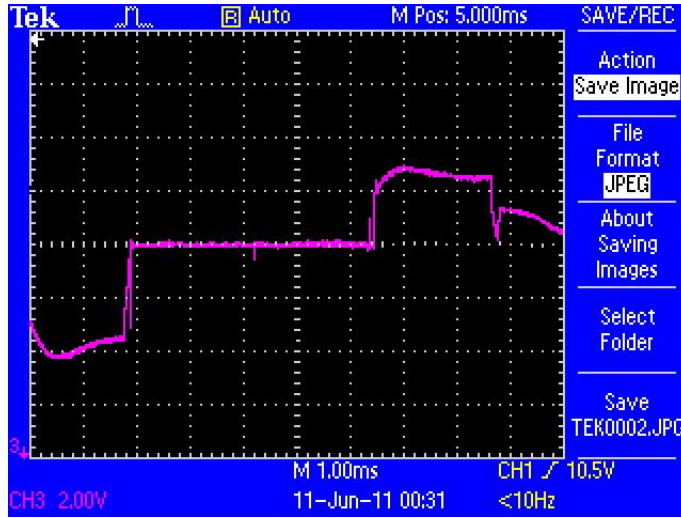


Şekil 9.4. Geliştirilen arayüz aracılığı ile zamana bağlı olarak motor hızı ile motor faz akımlarının değişimi

Şekil 9.3 ve Şekil 9.4’te ekran görüntüleri verilen ara yüzün amacı çalışan motor fazlarında herhangi bir hata olup olmadığını zamana bağlı olarak izleyebilmektir. Bu

yüzden motor faz akımları yön değiştirdiği ve negatif olabildiği halde ara yüzden okunan değerlerin yazılım yardımı ile sürekli pozitif değerde olması sağlanmış ve hata takibi kolaylaştırılmıştır. Motorun her anda hangi fazının ne kadar akım çektiği sol tarafta bulunan “text” alanlarından takip edilebilmektedir. Örneğin, 420. sn’de motorda meydana gelen bir hatadan dolayı hızın aniden düştüğü fakat sonradan motorun bu durumu sürücü devre yardımı ile toparladığı açıkça görülmektedir. Buna ek olarak kalkış anında sadece A ve B fazlarının enerjilendirildiği fazların diğer fazlara göre daha fazla akım çektiğinden rahatlıkla anlaşılabılır.

Şekil 9.5’te de boşa çalışan motorun C-faz akımının zamana bağlı olarak değişimi görülmektedir. Diğer faz akımları da Çizelge 8.2’de verilen sıraya göre benzer şekillerde ifade edilebilir.

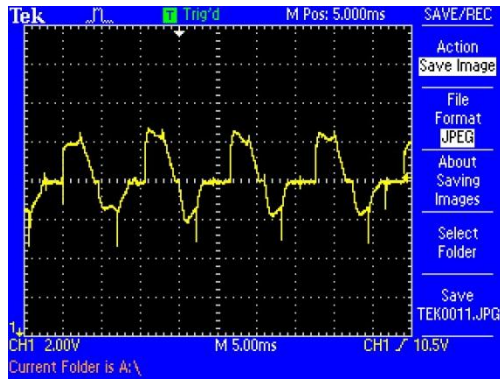


Şekil 9.5. C-faz akımının zamana bağlı olarak değişimi

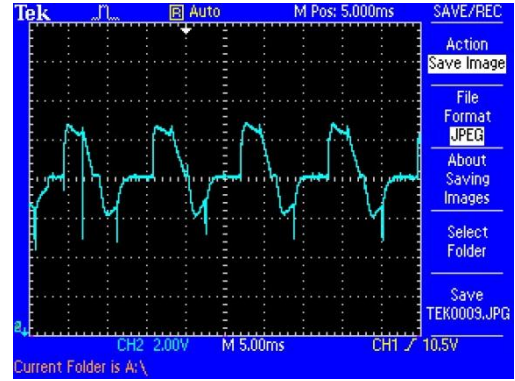
9.2. Yüklü Çalışma Deneyleri

Motorun yüklü çalışma deneyleri de birkaç aşamadan meydana gelmektedir. 35V’luk besleme (bara) geriliminden başlanarak motor gerilimi kademeli olarak arttırılmış (35–45–55–65–75–90V) ve her gerilim seviyesi bir süre sabit tutularak motora bağlı olan DA generatörü uçlarındaki yük (100W’lık ampullerden oluşan yük grubu) yavaş yavaş devreye sokulmuştur. Sistemi besleyen DA kaynağın maksimum akım

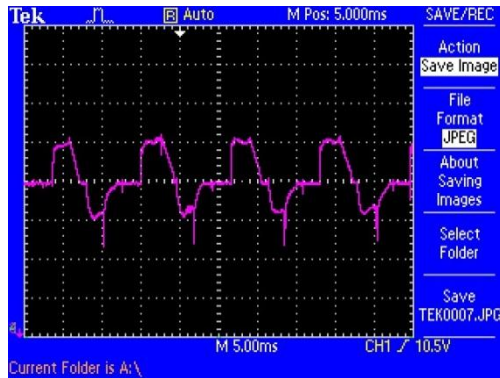
seviyesinin 8A olmasından dolayı motor anma akımının (5A) ancak yaklaşık %75'ine kadar çıkılabilmektedir. Şekil 9.6'daki osilaskop görüntülerinde motora ait 5-faz akımının değişimi verilmiştir. Akım dalga şekilleri farklı yük kademeleri ve hız değerleri için yaklaşık aynı olacağından sadece motorun %20 yüklü olma durumundaki dalga şekillerine yer verilmiştir.



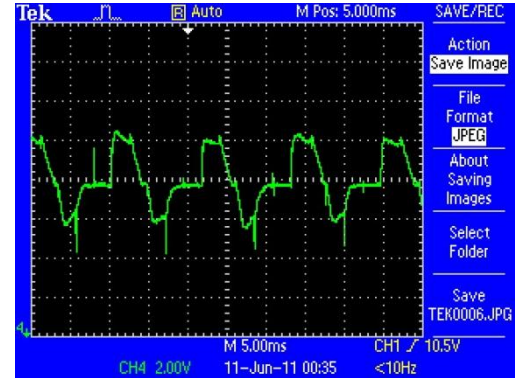
(a)



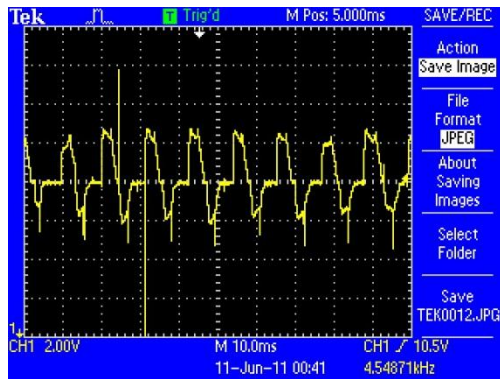
(b)



(c)



(d)



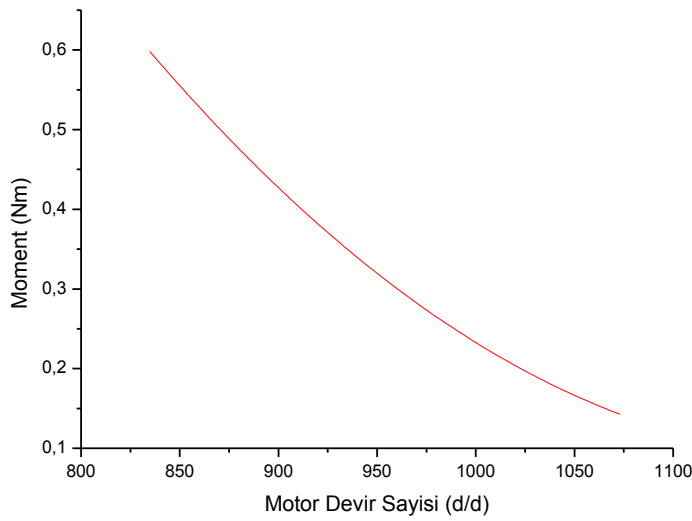
(e)

Şekil 9.6. (a) A-fazı akım dalga şekli (b) B-fazı akım dalga şekli (c) C-fazı akım dalga şekli (d) D-fazı akım dalga şekli (e) E-fazı akım dalga şekli

Osilaskop görüntüleri dikkatlice incelendiğinde motor gövdesine bağlı olan sensörlerden gelen bilgilere bağlı olarak her anda motorun sadece iki fazının enerjilendirildiği durumu göze çarpmaktadır. Çizelge 8.2'deki sensör çıkışlarına bağlı enerjilendirme sırası osilaskopta kolaylıkla takip edilebilir. Aynı şekilde bir fazdan pozitif yönde akım akarken diğer fazdan negatif yönde akım aktığı (bazı durumlarda fazlardan geçen akımların yönü aynı da olabilmektedir) da dikkat edilmesi gereken diğer bir noktadır.

9.2.1. 35 V bara geriliminde elde edilen sonuçlar

Her gerilim seviyesinin belirli bir süre sabit tutulup yükün kademeli olarak arttırıldığı belirtilmişti. Şekil 9.7'de belirli yük durumları için motor momentini ve hızın değişim grafiği verilmiştir.

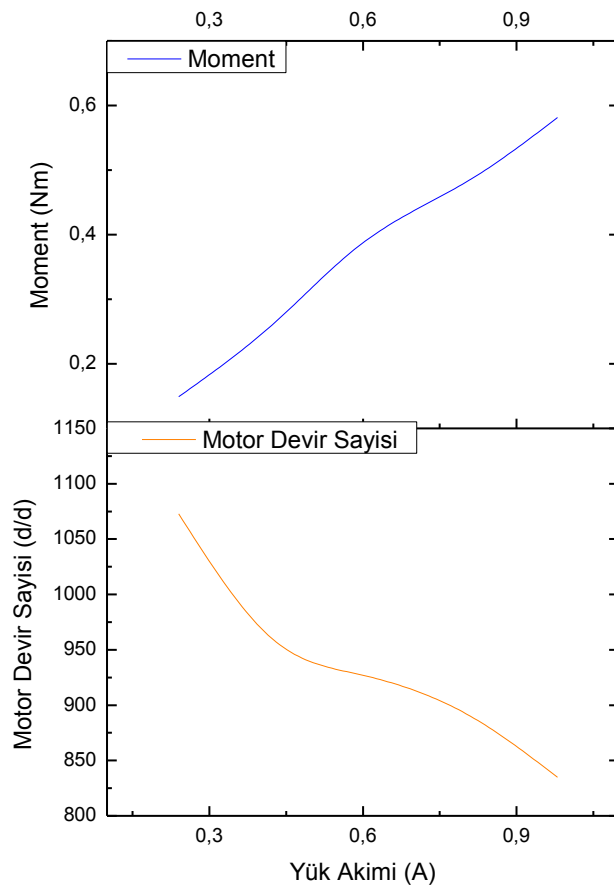


Şekil 9.7. 35V besleme geriliminde artan/azalan yük durumuna göre motor momentinin değişim grafiği

Aynı anda ara yüz aracılığı ile Şekil 9.8'de görüldüğü gibi hızın değişimini takip etmek mümkündür. Şekil 9.9'da verilen grafiklerde yük akımına bağlı olarak motor devir ve momentinin değişimi takip edilebilmektedir.



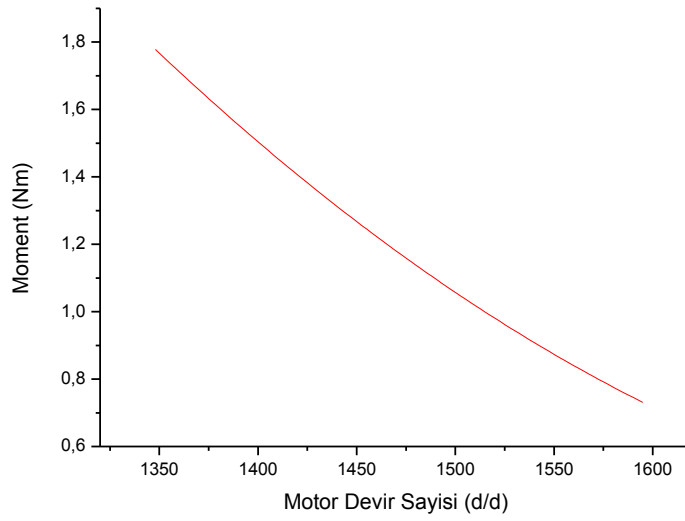
Şekil 9.8. 35V'ta yüklenmeye bağlı olarak hızın zaman göre değişimi



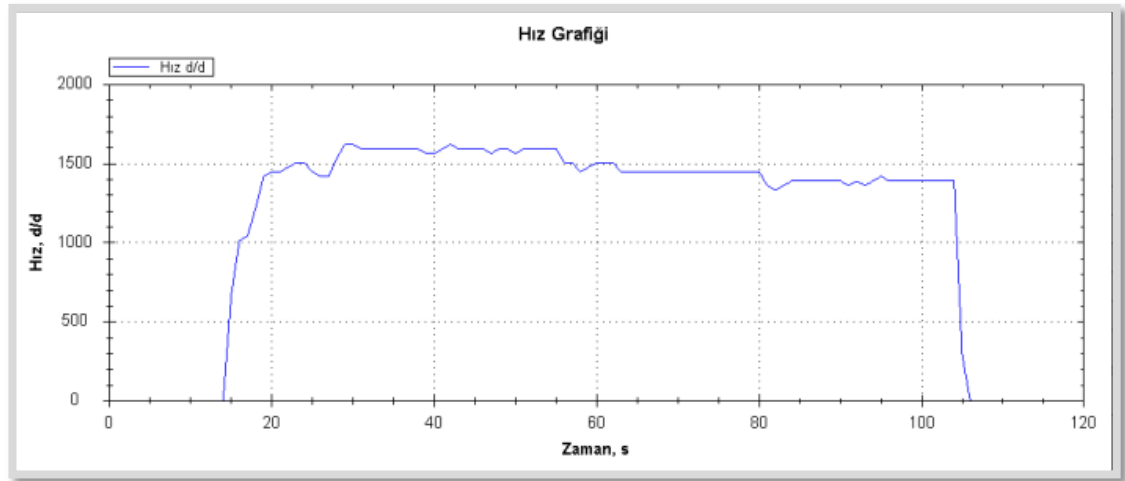
9.9. Yük akımına bağlı olarak motor devir ve momentinin değişimini gösteren grafikler (35 V'ta)

9.2.2. 75 V bara geriliminde elde edilen sonuçlar

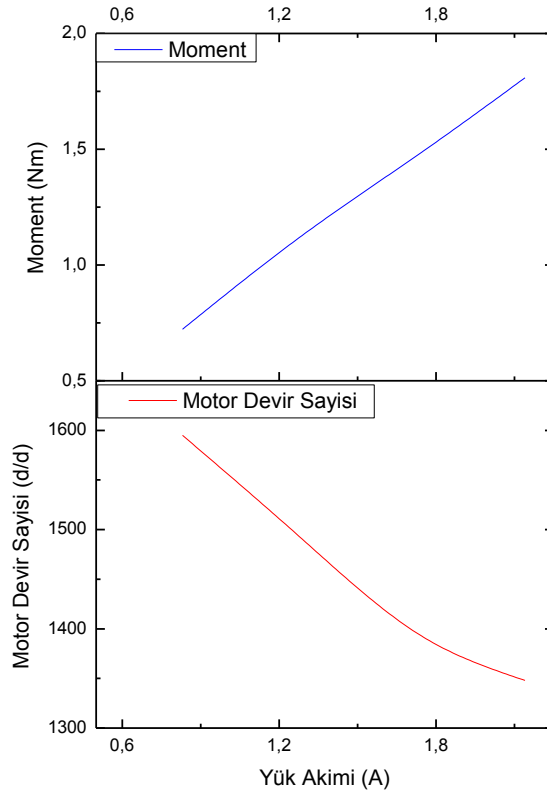
Gerilim seviyesi ne olursa olsun motor devri ile moment arasındaki değişim, yüke bağlı olarak motorun devrinde ve momentindeki değişim benzerdir. Bu değişimleri Şekil 9.10-9.12’de görmek mümkündür.



Şekil 9.10. 75V besleme geriliminde artan/azalan yük durumuna göre motor momentinin değişim grafiği



Şekil 9.11. 75V'ta yüklenmeye bağlı olarak hızın zaman göre değişimi

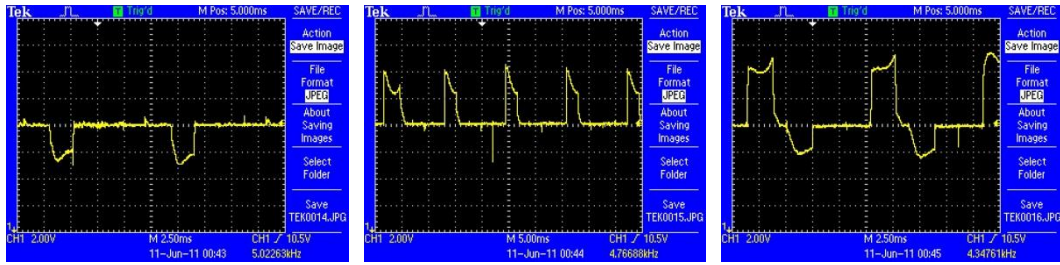


9.12. Yük akımına bağlı olarak motor devir ve momentinin değişimini gösteren grafikler (75 V'ta)

9.3. Motor Sürücü Devresinde Hata Takibi

Normal koşullarda motor farklı yük kademeleri için 35–45–55–65–75 ve 90V besleme gerilim seviyelerinde çalıştırılmıştır. Çalışmamızda sonuçlar sadece 35V ile 75V besleme gerilimi çalışma durumlarına göre verilmiştir.

Yeni tasarım ARM performansının daha iyi ölçülebilmesi ve motorun maksimum yük, moment, hız durumlarının da göz önünde bulundurulabilmesi için sistem 90-100V aralığında da çalıştırılmıştır. Bu sırada motor sürücü devresinde problem olduğu anlaşılmış, osilaskop görüntüleri de takip edilerek motorun hangi fazında sorun olduğu ve faza bağlı bulunan 4 MOSFET'ten hangisinde problem olduğu hata takibi ile ortaya konulmuştur. Bu durumda motorun sistemden dengesiz ve fazla akım çekerek çalışmasını sürdürdüğü gözlemlenmiştir.



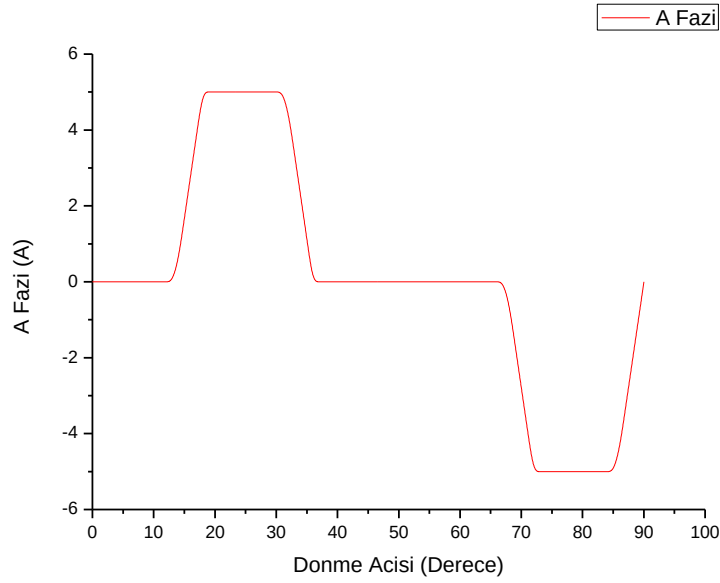
Şekil 9.13. MOSFET’leri zarar görmüş fazların çektiği akımların dalga şekilleri

Şekil 9.13’te verilen osilaskop görüntüleri dikkatlice incelenirse; motorun iki fazına ait MOSFET’lerde problem olduğu açıkça görülmektedir. Bir faza ait low-side ve high-side MOSFET grubunun tamamen devre dışı kaldığı o fazın tamamen unipolar yani tek yönlü olarak çalışmasını sürdürdüğü görülebilir. Aynı anda motor fazlarının zamana bağlı olarak yapmış olduğu işin paylaşılmasından dolayı hatalı fazlarla aynı anda çalışan diğer fazın kaynaktan dengesiz akım çektiği görülmektedir.

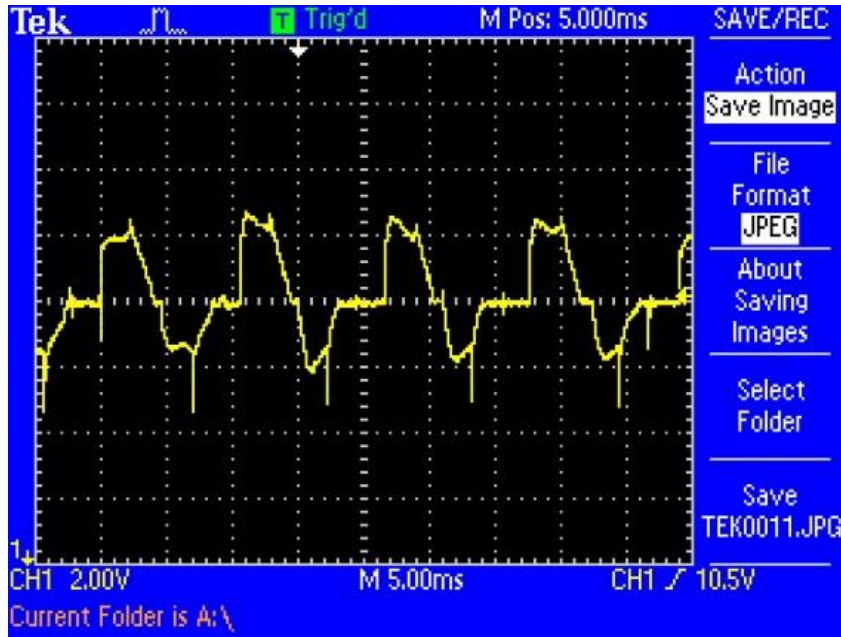
Bu durum aslında tasarımı zor olan çok fazlı ve bipolar çalışan sistemlerde hata takibinin daha kolay olmasının ve sistemin hatalı çalışmasına rağmen çalışmayı bir şekilde sürdürebildiğinin bir göstergesidir.

9.4. Deney Sonuçları ile Benzetim Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu kısımda, yüklü motor deneylerinden elde edilen değerler ile motorun benzetiminin gerçekleştirildiği FEMM 4.0 paket programından elde edilen çalışma değerlerinin karşılaştırılmasına yer verilmiştir. Motor performansının iki durum için karşılaştırılmasında literatürde geçen bilgilere dayanarak farklı yük ya da motor faz akımlarına göre motorun üretmiş olduğu moment değerlerine bakmak yeterli olacaktır. Fakat bu durumu karşılaştırmadan önce motor faz akımlarının Şekil 9.14’te verilen benzetim ve Şekil 9.15’te verilen deneysel olarak elde edilen grafiksel gösterimlerine göz atmak faydalı olacaktır.



Şekil 9.14. Motorun A fazına ait akımın dönme açısına bağlı olarak değişimi (benzetim)



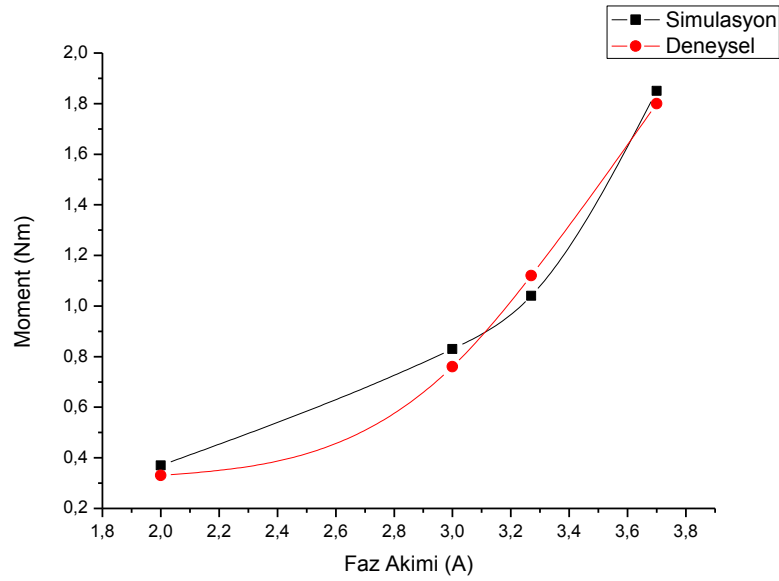
Şekil 9.15. Motorun A fazına ait akımın zamana bağlı olarak değişimi (deneysel)

İki grafik te incelendiğinde Şekil 9.14'te elde edilen akım dalga şekillerinin Şekil 9.15'te elde edilen akım dalga şekillerine göre ideale yakın olarak gözükmesine karşın iki grafiğin temelde aynı eğri şekline sahip olduğu açıkça görülmektedir. Çizelge 9.1'de verilen motorun benzetim ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılma

tablosunda da değerlerin yakınlığı göze çarpmaktadır. Faz akımının değişimine bağlı olarak elde edilen benzetim ve deneysel çalışmaların grafiksel değişimleri şekil 9.16’da verilmektedir.

Çizelge 9.1. Faz akımının değişimine bağlı olarak motorun benzetim ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması

Faz akımı (A)	5-Faz 10/8 ARM Benzetim	5-Faz 10/8 ARM Deneysel
	Moment (Nm)	Moment (Nm)
2	0.37	0.33
3	0.83	0.76
3.27	1.04	1.12
3.7	1.85	1.8



şekil 9.16. Faz akımı ile momentin değişim sonuçları

10. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Günümüzde anahtarlamalı relüktans motorların tasarım ve uygulamasına yönelik birçok araştırma ve çalışma gerçekleştirilmektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde akademik düzeydeki bu çalışmaların motorun yapısal tasarımı ve kontrol devresinin tasarımı üzerine yapıldığı sonucuna varılabilir.

Gerçekleştirilen bu kapsamlı çalışmada, günlük hayatımızda ve endüstride birçok alanda kullanımı günden güne artan anahtarlamalı relüktans motor yapısını temel alan; doğrudan tahrikli ve yüksek torklu sistemlerde kullanılması uygun görülen 5-fazlı 10 stator ve 8 rotor kutbuna sahip bipolar sürülen segmental tip yeni bir anahtarlamalı relüktans motor tasarlanmış ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Motorun tasarımı ve prototip çalışmalarının yanında sürücü devre çalışmaları da gerçekleştirilmiştir.

Motorun tasarım ve uygulaması aşamasında gerçekleştirilen işlemleri aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür:

- Öncelikle motor tasarımında bizi kısıtlayan etkenler ortaya konularak analitik hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Geometrik parametrelerin ARM üzerindeki etkileri adım adım incelenerek motorun performansını arttırmak için uygun değerlerin seçilmesi sağlanmıştır.
- Yapılan çalışmada analitik değerlerin doğruluğunu kanıtlamak için sonlu elemanlar yöntemi kullanan paket programlar tercih edilmiştir. Motorun 3 boyutlu statik analizleri için Maxwell V12, dinamik 2 boyutlu ve klasik 5-fazlı motor karşılaştırma analizleri için FEMM 4.2 paket programı tercih edilmiştir. Tasarlanan prototip motorun rotor yapısına karar vermek için sayısal teknik yerine manyetik analizler tercih edilmiştir.
- Elde edilen değerlerin aynı şartlar altında birbirine olan yakınlığını pekiştirmek amacıyla optimizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Her iki hesaplama ile tasarıma başlamadan önce motor ile elde edilen yenilikler şu şekilde aktarılabilir:
 - 10/8 ARM klasik ARM'den farklı bir rotor yapısına sahiptir. Rotor hem silisli saclardan oluşturulmuş olan paketlerden hem de bu paketlerin

yerleştirildiği alüminyum bir bloktan oluşmaktadır. Alüminyumun manyetik özelliği olmayan bir metal olmasından dolayı oluşan manyetik alanı sınırlama özelliğine sahiptir. Bu özelliği ile klasik anahtarlamalı relüktans makinelerde tercih edilen akı bariyeri görevini başarılı ile yerine getirmektedir. Alüminyum motor yapılarında kullanılan diğer metallere (örneğin paslanmaz çelik vb.) göre çok daha hafif bir metaldir. Böylece motorlarda dikkate alınan ağırlık başına üretilen moment değeri (Nm/kg) otomatik olarak arttırılmıştır.

- Bu çalışmada, klasik ARM’de kullanılan tek faz enerjilendirme yönteminin yerine iki faz enerjilendirme yöntemi kullanılmıştır. Sargılar uygun şekilde yerleştirildiğinde ve aynı anda ARM iki fazı enerjilendirildiğinde motorun manyetik kutuplarının kısa akı yollarını takip ettiği görülmüştür. Bu durum kayıpların azalmasına neden olmuştur.
- Ayrıca motorun stator yapısında da küçük değişiklikler yapılmıştır. Tercih edilen kutup şeklinin kullanılması ile manyetik doyumun hava aralığına yakın yerlerde yoğunlaştırılması ve kutuplardaki manyeto motor kuvvet (mmk) düşümünün azaltılması sağlanmıştır.
- Birkaç farklı programda gerçekleştirilen benzetimler ile programların güvenilirliği ve verdikleri sonuçların benzerliği karşılaştırılmış ve kanıtlanmıştır. Başlatılan projenin benzetimlerle desteklenmesi ve elde edilen sonuçların memnuniyet verici olması dolayısıyla motorun üretim aşamaları başlatılmıştır. Ankara Etimesgut’ta motor üretimi yapan Elsan A.Ş. (EMTAŞ Elektrik Motorları) ile yapılan görüşmeler sonucunda projeye sanayi kaynaklı desteğin de alınması sağlanmıştır.
- Prototip üretimi gerçekleştirildikten sonra motorun sürücü devresi çalışmalarına başlanmıştır. Çalışmalar sonucunda kontrol ve dönüştürücü devresini besleyen bir güç katı, kontrol devresi ve dönüştürücü devresi olmak üzere üç kısımdan oluşan bir sürücü sistemi gerçekleştirilmiştir. Devre kartlarının tasarımında kolaylık sağlaması açısından tasarlanan MOSFET sürücü devresi dönüştürücü devresi ile birlikte tasarlanmıştır. Ayrıca motora ait faz akımlarının takibini sağlamak için bir algılayıcı sistemi de tasarlanmıştır.

- Prototip ve sürücü devre tasarım çalışmalarının tamamlanmasının ardından deneysel çalışmalara başlanmıştır. Motorun analitik, benzetim ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçları karşılaştırılmış ve sunulmuştur.

Bunun yanında çalışmada esnasında eksik olduğu düşünülen ve gelecek çalışmalara ışık tutması açısından önemli olduğu öngörülen noktalara değinmekte fayda vardır:

- Tasarlanan motorun doğrusal olmayan (non-linear) durumları göz önünde bulundurularak motora ait parametreler geliştirilebilir.
- Bu özel tasarım için özellikle eddy akım kayıpları, histerezis kayıpları gibi parametrelerin hesabında özel yöntemler geliştirilip bu kayıpları minimize edecek sürücü devre, tasarım optimizasyonu, sarım özellikleri gibi başlıklar üzerinde durulabilir.
- Yukarda bahsi geçen kayıpların analitik ve deneysel doğrulamaları gerçekleştirilebilir.
- Yeni tasarım ARM için özel bir termal model geliştirilebilir. Bu termal model; motorun ısı kayıpları ile veriminin ve performansının arttırılmasına yönelik çalışmalara yardımcı olabilir.
- Anahtarlamalı relüktans motorların en problemli noktalarından biri olan akustik gürültü başlığı ayrıca bir tez olarak düşünülebilir. Akustik gürültünün azaltılmasında çok önemli bir yeri olan farklı geometrik şekillere sahip stator ve rotor kutup başları geliştirilebilir. Sürücü devresinin daha detaylı ve verimli tasarlanması ile bu problemi minimuma indirmede önemli adımlar atılabilir.
- Ayrıca tasarlanan yeni ARM'nin hız kontrolünde kullanılan optik sensörler yerine sensörsüz kontrol, resolver, manyetik sensör gibi çeşitli materyaller kullanılarak verim ve performans karşılaştırmaları gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. J. David Irwin; "Switched Reluctance Motor Drives; Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications", **Series Editor**, Auburn University, (2001).
2. Praveen Vijayraghavan; "Design of Switched Reluctance Motors and Development of a Universal Controller for Switched Reluctance and Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives", Doktora Tezi, **Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University**, Blacksburg, Virginia, (2001).
3. Miller, TJE, "Switched Reluctance Motors and their Control", **Magna Physics Publishing and Clarendon Press**, Oxford (1993).
4. Nasar, S.A., "DC Switched Reluctance Motor", **Proc. IEE**, 116 (6): 1048–1049 (1969).
5. Lawrenson, P.J., Stephenson, J.M., Blenkinsop, P.T., Corda, J. and Fulton, N.N., "Variable-speed Switched Reluctance Motors", **Proc. IEE**, 127 (4): 253–265 (1980).
6. Byrne, J. and Lacy, J.C.; "Electrodynamic system comprising a variable reluctance machine", **U.S. Patent** 3956678, May (1976).
7. N.Üstkoyuncu; "Anahtarlmalı Relüktans Motorlarda Torkun Kontrolü ve İyileştirilmesi ", Yüksek Lisans Tezi, **Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kayseri, 4–5 (2004).
8. Stephenson, J. Corda: "Computation of Torque and Current in Doubly Salient Reluctance Motors From Non-Linear Magnetization Data", **IEE Proceedings Electric Power Applications**, 126: 393–396 (1979).
9. W.E Ray, RM. Davis, RJ. Lamson, J.M. Stephenson, N.N. Fulton and R.J. Blake, "Switched reluctance motor drives for rail traction" **Pmc. IEE**, 131 (5): 220–225 (1984).
10. Tohumcu M., Ertan H.B.; "Prediction of performance of switched reluctance motor for design purposes", **International Conference on Electrical Machines**, Pisa, Italy, 2: 557–561 (1988).

11. Dirk Alexander Philips: "Switched Reluctance Drives: New Aspects", ***IEEE Transactions on Power Electronics***, 5 (4): 454-458 (1990).
12. T. J. E. Miller: "Electronic Control of Switched Reluctance Machines", ***Oxford: Newnes***, 48-56 (2001).
13. A.R.Miles, "Design of a 5 MW, 9000V Switched Reluctance Motor", ***IEEE Trans. Energy Conversion***, 6: 484-491 (1991).
14. Khwaja M. Rahman "Advantages of Switched Reluctance Motor Applications to EV and HEV: Design and Control Issues", ***IEEE Transactions on Industrial Applications***, 36 (1): 1-4 (2000).
15. B. Lee: "Design of a Linear Switched Reluctance Machine", ***IEEE Transactions on Industrial Applications***, 36 (6): 1-3 (2000).
16. D. Torney: "Switched Reluctance Generators and Their Control", ***IEEE Transaction on Industrial Electronics***, 49 (1): 1-6 (2002).
17. Richter, Eike; "High Temperature, Lightweight, Switched Reluctance Motors and Generators for Future Aircraft Engine Applications", ***American Control Conference***, 1846 - 1851 (1988).
18. Krishnan, R.; Bharadwaj, A.S.; Materu, P.N.; "Computer-aided design of electrical machines for variable speed applications", ***IEEE Transactions on Industrial Electronics***, 35: 560 – 571 (1988).
19. Krishnan, R.; Arumugan, R.; Lindsay, J.F.; "Design procedure for switched-reluctance motors", ***IEEE Transactions on Industry Applications***, 24: 456 – 461 (1988).
20. Harris, M.R.; Miller, T.J.E.; "Comparison of design and performance parameters in switched reluctance and induction motors", ***Fourth International Conference on Electrical Machines and Drives***, 303 – 307 (1989).
21. MacMinn, S.R.; Jones, W.D.; "A very high speed switched-reluctance starter-generator for aircraft engine applications", ***NAECON Proceedings of the IEEE Aerospace and Electronics Conference***, 4: 1758 – 1764 (1989).

22. Jack, A.G.; Finch, J.W.; Wright, J.W.; “Adaptive mesh generation applied to switched reluctance motor design”, ***Conference Record of the 1990 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting***, 1: 230 – 233 (1990).
23. Ferreira, C.; Jones, S.R.; Heglund, W.S.; Jones, W.D.; “Detailed design of a 30-kW switched reluctance starter/generator system for a gas turbine engine application”, ***Industry Applications Society Annual Meeting***, 1: 97 – 105 (1993).
24. Faiz, J.; Finch, J.W.; “Aspects of design optimisation for switched reluctance motors”, ***IEEE Transactions on Energy Conversion***, 704 – 713 (1993).
25. Radun, A.V.; “Design considerations for the switched reluctance motor”, ***Industry Applications Society Annual Meeting***, 1: 290 – 297 (1994).
26. Ferreira, C.A.; Jones, S.R.; Drager, B.T.; Heglund, W.S.; “Design and implementation of a five horsepower switched reluctance, fuel-lube, pump motor drive for a gas turbine engine”, ***Applied Power Electronics Conference and Exposition***, APEC '94, 1: 56-62 (1994).
27. Green, T.C.; Khater, M.M.; Williams, B.W.; El-Shanawany, M.M.; Hassanein, A.A.; “A five-phase switched reluctance motor: design and performance”, ***IEE Colloquium on Stepper Motors and Their Control***, 7: 1 - 4 (1994).
28. Michaelides, A.; Pollock, C.; “Design and performance of a high efficiency 5-phase switched reluctance motor”, ***Seventh International Conference on Electrical Machines and Drives***, 266 – 270 (1995).
29. Richardson, K.M.; Pollock, C.; Flower, J.O.; “Design of a switched reluctance sector motor for an integrated motor/propeller unit”, ***International Conference on Electrical Machines and Drives***, 271 - 275 (1995).
30. Low, T.S.; Lin, H.; Chen, S.X.; Chang, K.T.; “Design and analysis of 4-phase (in-hub) mini-switched reluctance motor for spindle motor in hard disk drive”, , 1995., ***Proceedings of 1995 International Conference on Power Electronics and Drive Systems***, 2: 645 - 650 (1995).

31. Uematsu, T., Wallace, R.S., “Design of a 100 kW switched reluctance motor for electric vehicle propulsion”, ***Applied Power Electronics Conference and Exposition***, 1: 411 – 415 (1995).
32. Michaelides, A.M.; Pollock, C.; “Modelling and design of switched reluctance motors with two phases simultaneously excited”, ***IEE Proceedings on Electric Power Applications***, 143: 361 – 370 (1996).
33. Tang, Y.; Kline, J.A., Sr.; “Modeling and design optimization of switched reluctance machine by boundary element analysis and simulation”, ***IEEE Transactions on Energy Conversion***, 11: 673 – 680 (1996).
34. Liuchen Chang; “Design procedures of a switched reluctance motor for automobile applications”, 2: 947 – 950 (1996).
35. Koibuchi, K.; Ohno, T.; Sawa, K.; “A basic study for optimal design of switched reluctance motor by finite element method”, ***IEEE Transactions on Magnetism***, 33: 2077 - 2080 (1997).
36. Tang, Y.; “Characterization, numerical analysis, and design of switched reluctance motors”, ***IEEE Transactions on Industry Applications***, 33: 1544 – 1552 (1997).
37. Ohdachi, Y.; Kawase, Y.; Miura, Y.; Hayashi, Y.; “Optimum design of switched reluctance motors using dynamic finite element analysis”, ***IEEE Transactions on Magnetism***, 33: 2033 – 2036 (1997).
38. Fahimi, B.; Suresh, G.; Mahdavi, J.; Ehsami, M.; “A new approach to model switched reluctance motor drive application to dynamic performance prediction, control and design”, ***29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference***, 2: 2097 – 2102 (1998).
39. Matsui, N.; Kosaka, T.; Minoshima, N.; Ohdachi, Y.; “Development of SRM for spindle motor system”, ***IEEE Industry Applications Conference, Thirty-Third IAS Annual Meeting***, 1: 580 – 585 (1998).
40. Byeong-Seok Lee; Han-Kyung Bae; Vijayraghavan, P.; Krishnan, R.; “Design of a linear switched reluctance machine”, ***IEEE Industry Applications Conference***, 4: 2267 – 2274 (1999).

41. Fahimi, B.; Suresh, G.; Ehsani, M.; “Large switched reluctance machines: a 1 MW case study”, ***Electric Machines and Drives International Conference IEMD '99***, 84 – 86 (1999).
42. Sanada, M.; Morimoto, S.; Takeda, Y.; Matsui, N.; “Novel rotor pole design of switched reluctance motors to reduce the acoustic noise”, ***Industry Applications Conference, Conference Record IEEE***, 1: 107 – 113 (2000).
43. Rahman, K.M.; Fahimi, B.; Suresh, G.; Rajarathnam, A.V.; Ehsani, M.; “Advantages of switched reluctance motor applications to EV and HEV: design and control issues”, ***IEEE Transactions on Industry Applications***, 36: 111 – 121 (2000).
44. Hall, E. M.; Ramamurthy, S. S.; Balda, J. C.; “Analysis, Dimensional Sizing, and Configuration Comparison of Switched Reluctance Motors Operating under Multiphase Excitation”, ***IEEE Power Engineering Review***, 22: 48 – 49 (2002).
45. Jiang, Q.; Bi, C.; Low, T.S.; “Numerical design and analysis of switched reluctance motors”, ***The Fourth International Conference on Computation in Electromagnetics*** (2002).
46. Hall, E.M.; Ramamurthy, S.S.; Balda, J.C.; “Analysis, dimensional sizing and configuration comparison of switched-reluctance motors operating under multiphase excitation”, ***IEEE Transactions on Energy Conversion***, 17: 325 – 331 (2002).
47. Lin Mingyao; Cheng Ming; Zhou E; “Design and performance analysis of new 12/8-pole doubly salient permanent-magnet motor”, ***Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems***, 1: 21 – 25 (2003).
48. Rizk, J.; Nagrial, M.H.; Hellany, A.; “Design and performance of switched reluctance motors”, ***ICEMS 2003 Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems***, 1: 211 – 216 (2003).
49. Higuchi, T.; Fiedler, J.O.; De Doncker, R.W.; “On the design of a single-phase switched reluctance motor”, ***IEEE International Electric Machines and Drives Conference***, 1: 561 – 567 (2003).
50. Long, S.A.; Schofield, N.; Howe, D.; Piron, M.; McClelland, M.; “Design of a switched reluctance machine for extended speed operation”, ***IEEE***

- IEMDC'03. International Electric Machines and Drives Conference**, 1: 235 – 240 (2003).
51. Hur, J.; Kang, G.H.; Lee, J.Y.; Hong, J.P.; Lee, B.K.; “Design and optimization of high torque, low ripple switched reluctance motor with flux barrier for direct drive”, **IEEE Industry Applications Conference, 39th IAS Annual Meeting**, 1: 401-408 (2004).
 52. Jin Woo Lee; Hong Seok Kim; Byung Il Kwon; Byung Taek Kim; “New rotor shape design for minimum torque ripple of SRM using FEM”, **IEEE Transactions on Magnetics**, 40: 754 – 757 (2004).
 53. Min-Tsun Khor; Sotudeh, R.; Lee, D.; “Switched reluctance motor based on short flux path control method”, **39th International Universities Power Engineering Conference**, 2: 559 – 562 (2004).
 54. Jong-Han Lee; Eun-Woong Lee; Jun-Ho Kim; “Design of the single phase SRM for the blower considering self-starting”, **Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems**, 1: 667 – 670 (2005).
 55. Shang-Hsun Mao; Mi-Ching Tsai; “A novel switched reluctance motor with C-core stators”, **IEEE Transactions on Magnetics**, 41: 4413 – 4420 (2005).
 56. Momen, M.F.; Husain, I.; “Design and performance analysis of a switched reluctance motor for low duty cycle operation”, **IEEE Transactions on Industry Applications**, 41: 1612 – 1618 (2005).
 57. Khor, M.T.; Sotudeh, R.; “A 3-phase 12/10 asymmetrical switched reluctance motor”, **European Conference on Power Electronics and Applications**, 1-9 (2005).
 58. Ju Hwan Oh; Byung Il Kwon; “New rotor shape design of SRM to reduce the torque ripple and improve the output power”, **Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems**, 1: 652 – 654 (2005).
 59. Pandey, K.; Rajagopal, K.R.; “Novel pole shapes for improved performance of switched reluctance hub motors”, **INTERMAG IEEE International Magnetics Conference**, 749 – 750 (2005).

60. Edrington, C.S.; Krishnamurthy, M.; Fahimi, B.; “Bipolar Switched Reluctance Machines: A Novel Solution for Automotive Applications”, ***IEEE Transactions on Vehicular Technology***, 54: 795 – 808 (2005).
61. Ashok, P.; Tesar, D.; “Computer Aided Design of Switched Reluctance Motors for Use in Robotic Actuators”, ***World Automation Congress, WAC***, 1 – 7 (2006).
62. Ohyama, K.; Nashed, M.N.F.; Aso, K.; Fujii, H.; Uehara, H.; “Design using Finite Element Analysis of Switched Reluctance Motor for Electric Vehicle”, ***2nd Information and Communication Technologies - ICTTA '06***, 1: 727 – 732 (2006).
63. Fujishiro, Satoshi; Ishikawa, Kazumi; Kikuchi, Shinki; Nakamura, Kenji; Ichinokura, Osamu; “Design of outer-rotor-type multipolar switched reluctance motor for electric vehicle”, ***Journal of Applied Physics***, 99: 08R324 - 08R324-3 (2006).
64. Cakir, K.; Sabanovic, A.; “In-wheel motor design for electric vehicles”, ***9th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control***, 613 – 618 (2006).
65. Kachapornkul, S.; Jitkreeyarn, P.; Somsiri, P.; Tungpimolrut, K.; Chiba, A.; Fukao, T.; “A design of 15 kW switched reluctance motor for electric vehicle applications”, ***ICEMS International Conference on Electrical Machines and Systems***, 1690 – 1693 (2007).
66. Seok-Gyu Oh; Krishnan, R.; “Two-Phase SRM With Flux-Reversal-Free Stator: Concept, Analysis, Design, and Experimental Verification”, ***IEEE Transactions on Industry Applications***, 43: 1247 – 1257 (2007).
67. Cheewoo Lee; Krishnan, R.; Lobo, N.S.; “Novel Two-phase Switched Reluctance Machine using Common-Pole E-Core Structure: Concept, Analysis, and Experimental Verification”, ***IEEE Industry Applications Conference, 42nd IAS Annual Meeting***, 2210 – 2217 (2007).
68. Ekram, S.; Ravi, N.; Rajagopal, K.R.; Mahajan, D.; “Design and Development of a High Efficiency Switched Reluctance Motor for a Mixer-Grinder Application”, ***IECON IEEE Industrial Electronics Society***, 193 – 197 (2007).

69. Chunyan Ma; Zhenmin Wang; Gengxin Li; Yan Chen; Xiahui Liu; “Design of a novel switched reluctance planar motor”, ***ICEMS International Conference on Electrical Machines and Systems***, 3370 – 3373 (2008).
70. Bolognesi, P.; “Design and manufacturing of an unconventional variable reluctance machine”, ***PEMD 4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives***, 45 – 49 (2008).
71. Li Weili; Sheng Man; Huo Fei; “Optimal design and finite element analysis of switched reluctance motor for electric vehicles”, ***IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference***, 1 – 5 (2008).
72. Jazdzynski, W.; Majchrowicz, M.; “An approach to find an optimum designed SRM for electric vehicle drive”, ***ICEM 18th International Conference on Electrical Machines***, 1-6 (2008).
73. Cheewoo Lee; Krishnan, R.; “New Designs of a Two-Phase E-Core Switched Reluctance Machine by Optimizing the Magnetic Structure for a Specific Application: Concept, Design, and Analysis”, ***IEEE Transactions on Industry Applications***, 45: 1804 – 1814 (2009).
74. Labak, A.; Kar, N.C.; “A novel five-phase pancake shaped switched reluctance motor for hybrid electric vehicles”, ***IEEE VPPC Vehicle Power and Propulsion Conference***, 494 – 499 (2009).
75. Martis, C.; Oprea, C.; Viorel, I.A.; Gyselinck, J.; “Design of a fault-tolerant 6-phase switched reluctance motor for electric power-assisted steering systems”, ***IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC '09***, 993 – 998 (2009).
76. Franke, M.; Brutscheck, M.; Schmucker, U.; “Modeling and simulation of a rolling rotor switched reluctance motor”, ***International Spring Seminar on Electronics Technology***, 1–6 (2009).
77. Brauer, H.J.; Kasper, K.A.; De Doncker, R.W.; “Design and analysis of a pancake switched reluctance machine for use in household applications”, ***International Conference on Power Electronics and Drive Systems***, 1050 – 1055 (2009).

78. Daldaban, F.; Ustkoyuncu, N.; “A new linear switched reluctance motor with MagLev effect”, *ELECO International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, 420 - 422 (2009).
79. Labak, A.; Kar, N.C.; “A novel five-phase pancake shaped switched reluctance motor for hybrid electric vehicles”, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, VPPC '09, 494 – 499 (2009).
80. Jin-Woo Ahn; Huynh Khac Minh Khoi; Dong-Hee Lee; “Design and analysis of high speed 4/2 SRMs for an air-blower”, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 1242 – 1246 (2010).
81. Yoneoka, Yasuei; Akatsu, Kan; “A study of high-efficiency Switched Reluctance Motor with single phase input operation”, *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 1681 – 1686 (2010).
82. Yang, Wen; Quan, Li; Zhu, Xiaoyong; Chen, Dajian; Du, Yi; “Design and research of a new dual-rotor switched reluctance motor for hybrid electric vehicles”, *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 829 – 833 (2010).
83. Kunz, J.; Siwei Cheng; Yao Duan; Mayor, J.R.; Harley, R.; Habetler, T.; “Design of a 750,000 rpm switched reluctance motor for micro machining”, *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 3986 – 3992 (2010).
84. Desai, P.C.; Krishnamurthy, M.; Schofield, N.; Emadi, A.; “Novel Switched Reluctance Machine Configuration With Higher Number of Rotor Poles Than Stator Poles: Concept to Implementation”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57: 649 – 659 (2010).
85. Ruba, M.; Bentia, I.; Szabo, L.; “Novel modular switched reluctance machine for safety-critical applications”, *2010 XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 1 – 6 (2010).
86. Labak, A.; Kar, N.C.; “Development and analysis of a five-phase pancake shaped switched reluctance motor”, *XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 1-6 (2010).
87. P. J. Lawrenson and L. A. Agu, “Theory and performance of polyphase reluctance machine,” *Proc. Inst. Elect. Eng.*, 111 (8): 1435–1445 (1964).

88. P. J. Lawrenson and S. K. Gupta, "Developments in the performance and theory of segmental-rotor reluctance machines," *Proc. Inst. Elect. Eng.*, 114(5): 645–653(1967).
89. Toliyat, H.A.; Xu, L.; Lipo, T.A.; "A five phase reluctance motor, with high specific torque", *Conference Record of the 1990 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1: 207 – 213 (1990).
90. Krishnan, R.; Abouzeid, M.; Mang, X.; "A design procedure for axial field switched reluctance motors", *Industry Applications Society Annual Meeting*, 1: 241 – 246 (1990).
91. G. A. Horst, "Isolated Segmental Switched Reluctance Motor," *U.S. Patent no.* 5 111 096, May 5, 1992.
92. B. C. Mecrow, New winding configurations for doubly salient reluctance machines, *IEEE Trans. Ind. App.*, 32: 1996.
93. J. Oyama, T. Higuchi, T. Abe, K. Haraguchi, E. Yamada, F. Profumo, Hybrid Type Novel Switched Reluctance Motor, *29th IEEE PESC*, 857-863 (1998).
94. B. C. Mecrow, J. W. Finch, E. A. El-Kharashi and A. G. Jack: "The Design of switched reluctance motors with segmental rotors," *Conference Record of ICEM 2002*, 336: (2002).
95. Mecrow, B.C., Finch, J.W., El-Kharashi, E.A., and Jack, A.G.: 'Switched reluctance motors with segmental rotors', *IEE Proc., Electr. Power Appl.*, 149 (4): 245–254 (2002).
96. B. C. Mecrow, E. A. El-Kharashi, J. W. Finch, and A. G. Jack, "Segmental rotor switched reluctance machines with single tooth windings", *Proc. Inst. Elect. Eng., Electr., Power Appl.*, 150 (5): 591–599 (2003).
97. Oyama, J.; Higuchi, T.; Abe, T.; Koga, T.; "Efficiency and power-factor of novel hybrid type switched reluctance motor", *Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record*, 1: 1 – 5 (2002).

98. Mecrow, B.C.; El-Kharashi, E.A.; Finch, J.W.; Jack, A.G.; “Performance evaluation of switched reluctance motors with segmental rotors”, ***IEEE International Electric Machines and Drives Conference***, 1: 568 – 574 (2003).
99. Mecrow, B.C.; El-Kharashi, E.A.; Finch, J.W.; Jack, A.G.; “Segmental rotor switched reluctance motors with single-tooth windings”, ***Electric Power Applications, IEE Proceedings***, 150: 591 – 599 (2003).
100. Mecrow, B.C.; El-Kharashi, E.A.; Finch, J.W.; Jack, A.G.; “Preliminary performance evaluation of switched reluctance motors with segmental rotors”, ***IEEE Transactions on Energy Conversion***, 19: 679 – 686 (2004).
101. J. Oyama, T. Higuchi, T. Abe and N. Kifuji, “Fundamental Characteristics of a novel Switched reluctance motor with segmented core embedded in Aluminum rotor,” ***Papers of technical meeting on rotating machinery, IEE Japan***, 64: 43–48 (2005).
102. Chris S. Edrington, , Mahesh Krishnamurthy and Babak Fahimi, “Bipolar Switched Reluctance Machines: A Novel Solution for Automotive Applications”, ***IEEE Transactions On Vehicular Technology***, 54 (3): (2005).
103. J. Oyama, T. Higuchi, T. Abe and N. Kifuji, “Novel Switched reluctance motor with segmented core embedded in Aluminum rotor block,” ***Papers of technical meeting on rotating machinery, IEEJ Trans***, 126 (4): (2006).
104. Naresh Vattikuti, Vandana Rallabandi, B. G. Fernandes “A Novel High Torque and Low Weight Segmented Switched Reluctance Motor”, ***IEEE PESC Power Electronics Specialists Conference***, 1223 – 1228(2008).
105. Chen, Xiaoyuan; Deng, Zhiqian; Peng, Jingjing; Li, Xiangsheng; “Comparison of two switched reluctance motors with bipolar excitation”, ***5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010)***, 1 – 6 (2010).
106. Chen, Xiaoyuan; Deng, Zhiqian; Wang, Xiaolin; Peng, Jingjing; Li, Xiangsheng; “New designs of switched reluctance motors with segmental rotors”, ***5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010)***, 1 – 6 (2010).

107. Özoğlu, Y. “Anahtarlamaalı Relüktans Motorunda Kutup Başlarına Şekil Vererek Moment Dalgalanmasının Azaltılması”, Doktora Tezi, **Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ**, İstanbul, 5–7 (1999).
108. Çalık, H. “Anahtarlamaalı Relüktans Motorun Kontrolü”, Doktora Tezi, **Fen Bilimleri Enstitüsü, Marmara Üniversitesi**, İstanbul, 25–26 (2004).
109. Bal, G. “Özel Elektrik Makinaları”, **Seçkin Yayıncılık**, 4. Baskı, Ankara, (2011).
110. Bhiwakulpar, N.B. “Optimizing the Performance of Switched Reluctance machines by Including Non-linear Multi-phase Excitation”, Doctorate Thesis, **The Graduate Faculty of University of Minnesota**, USA, (2006).
111. Mutlu, Ü. “Anahtarlamaalı Relüktans Motor Sürücü Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, **Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi**, Kayseri, 3–4 (2006).
112. Geçit, İ. “Terslendirilmiş Anahtarlamaalı Relüktans Motor Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, **Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi**, Kayseri, 2–3 (2007).
113. Mutlu, R. “Modelling of the Short Flux Path Mutually Coupled Switched Reluctance Machine ”, Doctorate Thesis, **The Graduate Faculty of Rensselaer Polytechnic Institute**, USA, 9–18 (2004).
114. J.M: Kokernak, D.A. Torrey “Magnetic Circuit Model for the Mutually Coupled Switched Reluctance Machine”, **IEEE Transactions on Magnetism**, 36: 500–507 (2000).
115. Gürdal, O. “Elektrik Makinalarının Tasarımı”, **Nobel/Atlas Yayınevi**, Ankara, Türkiye, 2001.
116. İnternet: Sonlu Elemanlar Metodu,
http://tr.wikipedia.org/wiki/Sonlu_elemanlar_yöntemi.
117. Vukosavic, S., V.R. Stefanovic “SRM inverter topologies: a comparative evaluation”, **IEEE IAS**, 946-958 (1990).
118. Pollock, C., B.W. Williams “A unipolar converter for a switched reluctance motor”, **IEEE IAS**, 44-49 (1988).

119. Haris, W.A.; “Switched reluctance motor control circuit with energy, recovery capability”, **U.S. Patent No.**5,076,610, Dec. 24, 1991.
120. Pollock, C., B.W. Williams “Power converter circuits for switched reluctance with the minimum number of switches”, **IEEE Proc.**, 137 (6): 373-384 (1990).
121. Krishnan, R., P.Materu “Analysis and design of a new converter topology for switched reluctance motor drives”, **IEEE IAS**, 1118-1185 (1989).
122. Ehsani, M., J.T. Bass, T.J.E. Miller, R.L. Steigerwald “Development of a unipolar converter for variable reluctance motor drives”, **IEEE Trans., Ind. Appl.**, 23 (3): 545-553 (1987).
123. Miller, T.J.E et al. “Regenerative unipolar converters for switched reluctance motors using one switching device per phase”, **U.S. Patent No.** 4,684,867, Aug. 4, 1987.
124. Rim, G., R. Krishnan “Variable speed constant frequency power conversion with a switched reluctance machine”, **IEEE APEC**, 63-71 (1994).
125. M.Krishnamurthy, C.S. Edrington, A.Emadi, P.Asadi, M.Ehsani, B.Fahimi; “Making the case for the applications of switched reluctance motor technology in automotive products”, **IEEE Transactions on Power Electronics**, 21 (3): 659-668 (2006).
126. Krzysztof Bieńkowski, Bogdan Bucki, Adam Rogalski, Andrzej Pochanke “Five phase switched reluctance motor with short flux path for low speed applications and mechatronics”, **Institute of Electrical Machines Warsaw University of Technology** (2006).
127. İnternet: LM2576/LM2576HV Series SIMPLE SWITCHER 3A Step-down Voltage Regulator, <http://www.national.com/ds/LM/LM2576.pdf> .
128. Axelson, J.: “Serial Port Complete: Programming & Circuits for RS-232 & RS-485 Links & Networks”, **Lakeview Research**, , Madison, USA, 9-11(2001).
129. Uygun, D., “Hibrit Adım Motorunun Sayısal Kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, **Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 2006.

EKLER

EK-1. FEMM 4.0 LUA Scripting Programında Klasik ARM için Yazılan 0-90 Derecelik Dönme Scripti

```

open("Klasik_5_faz_SRM.FEM")
mi_saveas("temp.fem")

pi = 3.141592

Im = 5

step = 1 -- 1 -- derece olarak

dofile("Klasik_5_faz_SRM_Akim_dalga_sekilleri.lua"); -- akim dalga
şekil fonksiyonlarını yükle

mi_seteditmode("group")
mi_selectgroup(1)
mi_moverotate(0,0, -step )

for deg= 0, 45, step do          -- 0, 360, step do

    fi_A = fn_i_A(deg);
    fi_B = fn_i_B(deg);
    fi_C = fn_i_C(deg);
    fi_D = fn_i_D(deg);
    fi_E = fn_i_E(deg);

    i_A = fi_A* Im
    i_B = fi_B* Im
    i_C = fi_C* Im
    i_D = fi_D* Im
    i_E = fi_E* Im

    -- akimi belirle
    mi_modifycircprop("sargi_A",1,i_A)
    mi_modifycircprop("sargi_B",1,i_B)
    mi_modifycircprop("sargi_C",1,i_C)
    mi_modifycircprop("sargi_D",1,i_D)
    mi_modifycircprop("sargi_E",1,i_E)

    -- rotor pozisyonunu belirle
    mi_seteditmode("group")
    mi_selectgroup(1)
    mi_moverotate(0,0,step)

    mi_analyze(1)
    mi_loadsolution()

```

EK-2. Klasik ARM İçin Yazılan A-Fazı Akım Fonksiyonu

```
-- 0'dan 360 dereceye kadar olan faz akımlarının trapez akım
formudur.

-- aci1 ve aci2; tork ripple'nı azaltmak amacıyla yazılmış aç
değerleridir.

-- ===== A Fazı Akımı =====

function fn_i_A (angle)

local donme_acisi = angle
local deger = 0
local aci1 = -3
local aci2 = 0

    if ((donme_acisi>(9+aci1))and(donme_acisi<(18-aci2)))
        then
            if ( (donme_acisi>(9+aci1)) and (donme_acisi<(12+aci1)))
                then
                    deger = (1/3)*(donme_acisi-9-aci1) + 0

                elseif ( (donme_acisi>(15-aci2)) and (donme_acisi<(18-
aci2)) )
                    then
                        deger = -(1/3)*(donme_acisi-15+aci2) + 1

                    else
                        deger = 1
                    end

                end

            end

        return deger

    end -- function
```

EK-3. Yeni Segmental ARM için Yazılan 0-90 Derecelik Dönme Scripti

```

open("yeni_SRM.FEM")
mi_saveas("temp.fem")

pi = 3.141592

Im = 5

step = 1 -- 1 derecelik artışlar halinde dönecek

dofile("MODIFIYE_5_faz_SRM_Akim_dalga_sekilleri.lua"); -- akim
dalga şekil fonksiyonlarını yükle

mi_seteditmode("group")
mi_selectgroup(1)
mi_moverotate(0,0, -step )

for donme_acisi= 0, 90, step do          -- 0, 360, step do

    fi_A = fn_i_A(donme_acisi);
    fi_B = fn_i_B(donme_acisi);
    fi_C = fn_i_C(donme_acisi);
    fi_D = fn_i_D(donme_acisi);
    fi_E = fn_i_E(donme_acisi);

    i_A = fi_A* Im
    i_B = fi_B* Im
    i_C = fi_C* Im
    i_D = fi_D* Im
    i_E = fi_E* Im

    -- akimi belirle
    mi_modifycircprop("sargi_A",1,i_A)
    mi_modifycircprop("sargi_B",1,i_B)
    mi_modifycircprop("sargi_C",1,i_C)
    mi_modifycircprop("sargi_D",1,i_D)
    mi_modifycircprop("sargi_E",1,i_E)

    -- rotor pozisyonunu belirle
    mi_seteditmode("group")
    mi_selectgroup(1)
    mi_moverotate(0,0,step)

    mi_analyze(1)
    mi_loadsolution()
    --mo_showdensityplot(1,0,1.75,0,"mag")
    --mo_savebitmap(format("srm_%1$d.bmp",donme_acisi))

```

EK-4. Yeni Segmental ARM İçin Yazılan A-Fazı Akım Fonksiyonu

```
-- 0'dan 90 dereceye kadar olan faz akımlarının trapez akım
formudur.

-- acil ve aci2; tork ripple'nı azaltmak amacıyla yazılmış aç
değerleridir.

-- ===== A Fazı Akımı =====

function fn_i_A (angle)

local donme_acisi = angle
local deger = 0
local acil = -4.5
local aci2 = 0

    if ((donme_acisi>(18+acil))and(donme_acisi<(36-aci2)))
        then
            if ( (donme_acisi>(18+acil)) and
(donme_acisi<(22.5+acil)))
                then
                    deger = -(1/(4.5))*(donme_acisi-18-acil) + 0

                elseif ( (donme_acisi>(31.5-aci2)) and (donme_acisi<(36-
aci2)) )
                    then
                        deger = (1/(4.5))*(donme_acisi-31.5+aci2) - 1
                    else
                        deger = -1
                    end

                elseif ((donme_acisi>(72+acil))and(donme_acisi<(90-aci2)))
                    then
                        if ( (donme_acisi>(72+acil)) and
(donme_acisi<(76.5+acil)))
                            then
                                deger = (1/(4.5))*(donme_acisi-72-acil) + 0

                            elseif ( (donme_acisi>(85.5-aci2)) and (donme_acisi<(90-
aci2)) )
                                then
                                    deger = -(1/(4.5))*(donme_acisi-85.5+aci2) + 1
                                else
                                    deger = 1
                                end

                            end

                        return deger

                    end -- function
```


ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : UYGUN, Durmuş
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 26.04.1982 Köyceğiz/MUĞLA
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0090 (312) 297 62 00 / 0090 (530) 237 64 34
 Faks : 0090 (312) 299 20 88
 e-mail : durmusuygun@gmail.com.

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Marmara Üniversitesi / Elektrik Eğitimi	2006
Lisans	Gazi Üniversitesi / Elektrik Eğitimi	2004
Lise	Milas Anadolu Teknik Lisesi	2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
12.2004 – 05.2006	Cumhuriyet Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
05.2006 – 05.2007	Bozok Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
05.2007- Halen	Hacettepe Üniversitesi	Sistem Programcısı

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- Science Citation Index (SCI) / Engineering Index (EI) Tarafından Taranan Makaleler
- 1. D. Uygun, C. Akuner, "A New Control Method of Hybrid Step Motors For Educational and Industrial Applications Using Visual Basic 6.0", *in the Book "COMPUTER RESEARCH", Included in ISI/SCI Web of Science and*

Web of Knowledge, Issue 2, Volume 1, December 2006, ISSN 1991-8755 pp. 168–174.

2. G.Bal, D.Uygun, "An Approach to Obtain an Advisable Ratio between Stator and Rotor Tooth Widths in Switched Reluctance Motors for Higher Torque and Smoother Output Power Profile", *Gazi University Journal of Science, GU J S*, 23(4):457-463 (2010).
3. R. Bayindir, Y. Cetinceviz and D. Uygun, "Design and Simulation of an Internet-Based Interactive Controlling and Monitoring System for Educational Purposes using SCADA", *International Review on Computers and Software (IRECOS)*, September, Vol.6, N.5, 2011.

- **Uluslararası Konferans Bildirileri**

1. D. Uygun, C. Akuner, "A New Visual Basic Based Control Strategy of Hybrid Step Motors For Educational and Industrial Applications", *Proceedings of the 6th IASME Int. Conf. on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines*, Tenerife, Spain, December 16-18, 2006, pp. 88-94.
2. D. Uygun, C. Akuner, M. Yumurtacı, "A New Construction of Switched Reluctance Motor Improving Magnetic Field Energy and Torque Production", *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering*, Istanbul, Turkey, May 27-29, 2007, pp.178-182.
3. C. Akuner, D. Uygun, "Effects of Different Rotor and Stator Constructions on The Performance of Switched Reluctance Motors", *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering*, Istanbul, Turkey, May 27-29, 2007, p.183-188.
4. D. Uygun, "Hibrit Adım Motorlarının Eğitim ve Endüstriyel Uygulama Amaçlı Visual Basic Tabanlı Kontrol Yazılımı ve Uygulaması", 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (5th International Advanced Technologies Symposium)*, 13-15 Mayıs 2009, Karabük, TÜRKİYE.
5. G. Bal, D.Uygun, "A Novel Switched Reluctance Motor with U-type Segmental Rotor Pairs: Design, Analysis and Simulation Results", *ICCESSE*

- 2010 International Conference on Computer, Electrical, and Systems Science, and Engineering**, April 28-30, pp.686-690 (2010), Rome, Italy.
6. D. Uygun, M.F. Hertsch and S. Yıldız, "Variations and Additions for the E-Learning Source Moodle with a Perspective Towards the Turkish Education System", **International Conference on New Horizons in Education**, June 23-25, pp.927-931 (2010), Famagusta, North Cyprus.
 7. D.Uygun, K. Bozkurt, O.Sesveren; "An Efficient Visual ANN Interface for Estimation of Switched Reluctance Motor's Inductance Profile", **Second International Fuzzy Systems Symposium (FUZZYSS'11)**, Nov. 17-18, pp.229-232, 2011, Ankara, Turkey.
 8. Durmus Uygun, Cemil Ocak, Yucel Cetinceviz, Engin Demir and Yakup Gungor; "CAD-Based Design, Analysis and Experimental Verification of an Out-runner Permanent Magnet Synchronous Generator for Small Scale Wind Turbines", **IEEE 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering**, 18-25 May 2012, Venice, ITALY. (Accepted)
 9. Cemil Ocak, Durmus Uygun, Yucel Cetinceviz, Engin Demir and Yakup Gungor; "Performance Aspects and Verifications of In-runner and Out-runner Permanent Magnet Synchronous Generator Designs of the Same Magnet Structure for Low Speed Wind Systems", **IEEE 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering**, 18-25 May 2012, Venice, ITALY. (Accepted)

Hobiler

Halk Dansları, Bilgisayar, Internet, Dağ Yürüyüşü, Yüzme, Dalış.