

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KLASİK VE KARŞIT KUPLAJLI ANAHTARLAMALI
RELÜKTANS MOTORLARDA GEOMETRİK
PARAMETRELERİN ÇIKIŞ PERFORMANSINA ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Murat AYZ

Anabilim Dalı: Elektrik Eğitimi

Danışman: Dr. Kadir YILMAZ

KOCAELİ, 2008

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

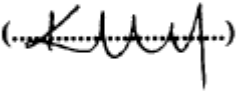
**KLASİK VE KARŞIT KUPLAJLI ANAHTARLAMALI RELÜKTANS
MOTORLARDA GEOMETRİK PARAMETRELERİN ÇIKIŞ
PERFORMANSINA ETKİLERİ**

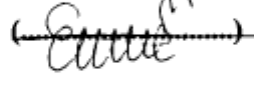
YÜKSEK LİSANS TEZİ

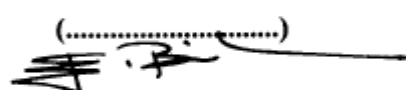
Murat AYZ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 23 Mayıs 2008

Tezin Savunulduğu Tarih : 09 Temmuz 2008

Tez Danışmanı
Dr. Kadir YILMAZ
()

Üye
Doç. Dr. Engin ÖZDEMİR
()

Üye
Yrd.Doç. Dr. Erdal BEKİROĞLU
()

KOCAELİ, 2008

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, klasik Anahtarlamalı Relüktans Motorlarda (ARM) ve sargı yapısı değiştirilerek elde edilen, aynı boyutlara sahip Karşıt Kuplajlı Anahtarlamalı Relüktans Motorlarda (KKARM) geometrik boyutlar değiştirilerek çalışma karakteristikleri üzerindeki etkileri ortaya koyulmaktadır. Ayrıca her iki makine üzerindeki etkileri karşılaştırılmaktadır. Bu doğrultuda her iki makine içinde tasarım açısından büyük öneme sahip olan hava aralığı değeri ile stator ve rotor kutup aç değeri belirlenen aralıklarda değiştirilerek oluşturulan yeni modeller sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmektedir.

Tez çalışmam esnasında yardım ve destekleri ile beni sürekli yönlendiren hocam ve tez danışmanım Dr.Kadir YILMAZ'a verdiği büyük destekten dolayı Yrd. Doç. Dr. Ali B. YILDIZ'a, tez çalışmasının yürütülmesinde yaptığı katkılardan dolayı Doç. Dr.Engin ÖZDEMİR'e, çalışmalarım esnasında destek olan aileme ve sevgili arkadaşım Seda ÇAVUŞOĞLU'na teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vii
SEMBOLLER.....	viii
ÖZET.....	x
İNGİLİZCE ÖZET.....	xi
1. GİRİŞ	1
1.2. Literatürde AR Motor Üzerine Yapılmış Çalışmalar	3
1.3. Çalışmanın Amacı	14
1.4. Çalışmanın Yapısı	16
2. KLASİK ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLARIN YAPISI, ÇALIŞMA İLKESİ VE MANYETOSTATİK ANALİZİ	17
2.1. Giriş.....	17
2.2. Tanımı ve Yapısı	18
2.3. ARM'un Temel Çalışma İlkesi	22
2.3.1. Karşılıklı (aligned) konum	22
2.3.2. Ortalanmış (unaligned) konum	23
2.3.3. Rotorun ara konumları	24
2.4. ARM'da Moment Üretimi	28
2.5. ARM'un Lineer Modeli	29
2.6. ARM'un Doymuş Modeli	33
2.7. Klasik ARM'un Manyetostatik Analizi	38
2.7.1. Analizi yapılan motorun genel özellikleri.....	39
2.7.2. Hava aralığı, stator ve rotor kutup boyutlarının değişim aralığının belirlenmesi ..	42
2.7.2.1. Hava aralığı değerinin değişim aralığının belirlenmesi	42
2.7.2.2. Stator ve rotor kutup açısı değerlerinin belirlenmesi.....	44
2.7.3. Sonlu elemanlar yöntemi ile modelin oluşturulması.....	47
2.7.3.1. Geometrinin modellenmesi	47
2.7.3.2. Kullanılan malzemenin tanımı	47
2.7.4. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması.....	48
2.7.5. Çözüm	49
2.7.6. Sonuçların değerlendirilmesi	49
2.8. Klasik AR Motorunun SEY ile Çalışma Karakteristiklerinin Elde Edilişi.....	49
2.8.1. Hava aralığı değişiminin klasik ARM'unun çalışma karakteristikleri üzerindeki etkileri	50
2.8.2. Stator ve rotor kutup açısı değişiminin klasik ARM'unun çalışma karakteristikleri üzerindeki etkileri.....	56

3. KARŞIT KUPLAJLI AR MOTORUNUN YAPISI, ÇALIŞMA PRENSİBİ VE SEY İLE MANYETOSTATİK ANALİZİ.....	62
3.1. Giriş.....	62
3.2. KKARM'nun Temel Çalışma İlkesi	63
3.3. KKARM'da Uyarma Yapıları.....	72
3.3.1. Tek yönlü (unipolar) uyarma yapısı.....	72
3.3.2. Çift yönlü (bipolar) uyarma yapısı.....	73
3.3.2.1. Çift yönlü (bipolar) üç fazlı uyarma yapısı	75
3.4. KKARM' da Sürücü Devrenin İncelenmesi	76
3.5. Karşit Kuplajlı Anahtarlamalı Relüktans Motorun Manyetostatik Analizi	78
3.6. Tek Yönlü (unipolar) Uyarma Altında Karşit Kuplajlı ARM'nun Çalışma Karakteristiklerinin Elde Edilmesi.....	78
3.6.1. Hava aralığı değişiminin KKARM'unun çalışma karakteristikleri üzerindeki etkileri	80
3.6.2. Rotor kutup açısı değişimlerinin KKARM'unun çalışma karakteristikleri üzerindeki etkileri	87
4. GEOMETRİK PARAMETRELERİNİN KLASİK VE KARŞIT KUPLAJLI ARM'UNA ETKİLERİNİN EŞİT ŞARTLARDA KARŞILAŞTIRILMASI	92
4.2. Klasik ARM ve KKARM'da Faz Sargı Dirençlerinin Belirlenmesi	92
4.2.1. Klasik ARM' unun üç boyutlu analizi	93
4.2.2. Karşit kuplajlı ARM'unun üç boyutlu analizi	94
4.3. Klasik ARM ve Karşit Kuplajlı ARM'unda Hava Aralığı ve Rotor Kutup Açısı Değerlerinin Çalışma Karakteristiklerine Etkilerinin Karşılaştırılması.....	96
4.3.1. Klasik ARM ve karşit kuplajlı ARM'da hava aralığı değişiminin çalışma karakteristikleri üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması	97
4.3.2. Klasik ARM ve karşit kuplajlı ARM'da rotor kutup açısı değeri değişiminin çalışma karakteristikleri üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması	103
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	110
KAYNAKLAR	113
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	121
ÖZGEÇMİŞ	122

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Üç fazlı 6/ 4 kutuplu ARM kesiti.....	19
Şekil 2.2: ARM’unda karşılıklı konum.....	22
Şekil 2.3: Mıknatıslanma eğrisi, akının akıma göre değişim eğrisi.	23
Şekil 2.4: ARM’unda ortalanmış konum.	23
Şekil 2.5: ARM’unda rotor kutbunun ara konumu.	24
Şekil 2.6: ARM’unda endüktansın rotor konumuna göre değişimi.	25
Şekil 2.7: ARM’da rotor konumuna göre moment değişimi.....	26
Şekil 2.8: ARM’unun moment-hız, güç-hız değişimi.....	27
Şekil 2.9: AR motoruna ait tahrik sistemi.....	28
Şekil 2.10: ARM’nun doğrusal modelde akı-akım ilişkisi.	30
Şekil 2.11: Lineer bölgede çalışan ARM’nun endüktans ve moment değişimi.....	32
Şekil 2.12: Manyetik doyma bölgesinde çalışan ARM’nun akı-akım ilişkisi.	34
Şekil 2.13: ARM’nun bir fazına ait eşdeğer devre.....	35
Şekil 2.14: Sabit akımda koenerji değişimi ve moment üretimi.	37
Şekil 2.15: Kısa kutup adımlı sargı yapısına sahip ARM.	38
Şekil 2.16: ARM’nun kesit görünüşü ve boyutları.	40
Şekil 2.17: Motorda kullanılan malzeme için B-H eğrisi.	41
Şekil 2.18: 6/4 ARM’unda hava aralığı değişimi.....	43
Şekil 2.19: 6/4 ARM için kutup açısı değer aralığı.....	45
Şekil 2.20: 2mm hava aralığına sahip 6/4 ARM kesit görünüşü ($\beta_s=30^\circ$).....	46
Şekil 2.21: 4mm hava aralığına sahip 6/4 ARM kesit görünüşü ($\beta_s=30^\circ$).....	46
Şekil 2.22: 2mm hava aralığına sahip 6/4 ARM kesit görünüşü ($\beta_s=31^\circ$).....	46
Şekil 2.23: ARM’nun SEY ile modellenmiş hali.....	48
Şekil 2.24: Klasik ARM halkalanma akısı-akım eğrisine hava aralığının etkisi.	50
Şekil 2.25: Üç fazlı 6/4 ARM’nun manyetik analiz sonuçları.	51
Şekil 2.26: Klasik ARM öz endüktans eğrisine hava aralığının etkisi (165A).	52
Şekil 2.27: Klasik ARM üç fazlı öz endüktans değişimi ($g=2\text{mm}$, 165A).	53
Şekil 2.28: Klasik ARM statik moment eğrileri ($g=2\text{-}3\text{-}4\text{mm}$).....	53
Şekil 2.29: Klasik ARM moment eğrisi (165 A, $g=2\text{mm}$).....	54
Şekil 2.30: Klasik ARM moment eğrisi (165 A, $g=3\text{mm}$).....	55
Şekil 2.31: Klasik ARM moment eğrisi (165 A, $g=4\text{mm}$).....	55
Şekil 2.32: Klasik ARM öz endüktans eğrisi.	56
Şekil 2.33: Klasik ARM halkalanma akısı-akım eğrisine rotor kutup açısı değerinin etkisi.	57
Şekil 2.34: Klasik ARM öz endüktans eğrisine rotor kutup açısı değerinin etkisi (165A).58	
Şekil 2.35: Klasik ARM statik moment eğrileri ($\beta_r =31^\circ -32^\circ -33^\circ$).....	59
Şekil 2.36: Klasik ARM moment eğrisi (165 A, $\beta_r =31^\circ$).	59
Şekil 2.37: Klasik ARM moment eğrisi (165 A, $\beta_r =32^\circ$).	60

Şekil 2.38: Klasik ARM moment eğrisi (165 A, $\beta_r = 33^\circ$).	60
Şekil 3.1: a: Klasik ARM sargı yapısı, b: KKARM'nun genel yapısı.	63
Şekil 3.2: KKARM sargı yapısı.	64
Şekil 3.3: 6/4 Karşıt Kuplajlı ARM üç faz sargı yapısı.	65
Şekil 3.4: Klasik ARM' da öz endüktans rotor konumu değişimi.	66
Şekil 3.5: Örtüşme uzunluğu β_L 'nin boyutu.	67
Şekil 3.6: KKARM' da akı rotor konumu değişimi.	68
Şekil 3.7: KKARM 'da karşıt ve öz endüktansın rotor konumuna bağlı değişimi.	69
Şekil 3.8: Klasik ARM ve KKARM'nun λ -i karakteristikleri.	70
Şekil 3.9: Tek yönlü (unipolar) uyarma yapısı ve endüktans değişimi.	73
Şekil 3.10: Çift yönlü iki fazlı uyarma yapısı ve endüktans değişimi.	74
Şekil 3.11: Çift yönlü üç fazlı uyarma yapısı ve endüktans değişimi.	75
Şekil 3.12: Asimetrik yarı köprü sürücü devresi.	76
Şekil 3.13: KKARM' da sargıların yıldız bağlandığı durum.	77
Şekil 3. 14: KKARM' da sargıların üçgen bağlandığı durum.	77
Şekil 3.15: KKARM ve tek yönlü (unipolar) uyarma yapısı.	79
Şekil 3.16: Unipolar uyarılmış 6/4 Karşıt Kuplajlı ARM'nun halkalanma akısı-akım eğrisine hava aralığının etkisi.	81
Şekil 3.17: Unipolar uyarılmış 6/4 KKARM'nun manyetik analiz sonuçları. Akı çizgileri dağılımı ($\theta=0^\circ$, $g=2\text{mm}$, $g=3\text{mm}$ ve $g=4\text{mm}$).	81
Şekil 3.18: Unipolar uyarılmış 6/4 KKARM'nun bir faza ait öz endüktans değişimi.	82
Şekil 3.19: Unipolar uyarılmış 6/4 KKARM'nun $M_{ac}-\theta$ değişimi.	83
Şekil 3.20: KKARM'da üç fazlı karşıt endüktans değişimi ($g=2\text{mm}$, 90A).	84
Şekil 3.21: Unipolar uyarılmış 6/4 KKARM'nun statik moment eğrileri ($g=2-3-4\text{mm}$).	84
Şekil 3.22: Unipolar uyarılmış KKARM'un moment eğrisi (90 A, $g=2\text{mm}$).	85
Şekil 3.23: Unipolar uyarılmış KKARM'un moment eğrisi (90 A, $g=3\text{mm}$).	86
Şekil 3.24: Unipolar uyarılmış KKARM'un moment eğrisi (90 A, $g=4\text{mm}$).	86
Şekil 3.25: Unipolar uyarılmış KKARM halkalanma akısı-akım eğrisine rotor kutup açısı değerinin etkisi.	87
Şekil 3.26: Unipolar uyarılmış KKARM öz endüktans eğrisi ($g=2\text{mm}$, 90A).	88
Şekil 3.27: Unipolar uyarılmış KKARM statik moment eğrileri ($\beta_r = 31^\circ - 32^\circ - 33^\circ$).	89
Şekil 3.28: Unipolar uyarılmış KKARM moment eğrisi (90 A, $\beta_r = 31^\circ$).	89
Şekil 3.29: Unipolar uyarılmış KKARM moment eğrisi (90 A, $\beta_r = 32^\circ$).	90
Şekil 3.30: Unipolar uyarılmış KKARM moment eğrisi (90 A, $\beta_r = 33^\circ$).	90
Şekil 4.1: Klasik ARM'unun üç boyutlu geometrisi.	93
Şekil 4.2: Klasik ARM'unun sargı yapısına ait oluşturulmuş 3D katı model.	94
Şekil 4.3: Karşıt kuplajlı ARM'unun üç boyutlu geometrisi ve sargının üç boyutlu katı modeli.	95
Şekil 4.4: Klasik ARM halkalanma akısı-akım eğrisine hava aralığının etkisi.	97
Şekil 4.5: Karşıt kuplajlı ARM halkalanma akısı-akım eğrisine hava aralığının etkisi.	98
Şekil 4.6: Klasik ARM öz endüktans eğrisi hava aralığının etkisi (165A).	99
Şekil 4.7: Karşıt kuplajlı ARM karşıt endüktans eğrisine hava aralığının etkisi (90A).	99
Şekil 4.8: Klasik ARM statik moment eğrileri ($g=2-3-4\text{mm}$).	100
Şekil 4.9: Unipolar uyarılmış 6/4 KKARM'nun statik moment eğrileri ($g=2-3-4\text{mm}$).	100
Şekil 4.10: Klasik ARM moment eğrisi (165 A, $g=2\text{mm}$).	102
Şekil 4.11: Unipolar uyarılmış KKARM'un moment eğrisi (90 A, $g=2\text{mm}$).	102

Şekil 4.12: Klasik ARM halkalanma akısı-akım eğrisine rotor kutup açısı değerinin etkisi.	104
Şekil 4.13: Karşıt kuplajlı ARM halkalanma akısı-akım eğrisine rotor kutup açısı değerinin etkisi.	104
Şekil 4.14: Klasik ARM öz endüktans eğrisine rotor kutup açısı değerinin etkisi (165A).	105
Şekil 4.15: Unipolar uyarılmış KKARM karşıt endüktans eğrisine rotor kutup açısı değerinin etkisi ($g=2\text{mm}$, 90A).	106
Şekil 4.16: Klasik ARM statik moment eğrileri ($\beta_r = 31^\circ - 32^\circ - 33^\circ$).	106
Şekil 4.17: Unipolar uyarılmış KKARM statik moment eğrileri ($\beta_r = 31^\circ - 32^\circ - 33^\circ$).	107
Şekil 4.18: Klasik ARM moment eğrisi (165 A, $\beta_r = 32^\circ$).	108
Şekil 4.19: Unipolar uyarılmış KKARM moment eğrisi (90 A, $\beta_r = 32^\circ$).	108

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1: ARM'unun boyutlarına ilişkin tablo.	40
Tablo 2.2: ARM'nun plaka değerleri.	41
Tablo 2.3: ARM'nun analiz sırasında değiştirilen boyutlarına ilişkin tablo.	42
Tablo 2.4: Klasik ARM moment dalgalılık oranları.	56
Tablo 2.5: Klasik ARM moment dalgalılık oranları.	61
Tablo 3.1: Unipolar uyarılmış KKARM'un moment dalgalılık oranları.	87
Tablo 3.2: Unipolar uyarılmış KKARM moment dalgalılık oranları.	91
Tablo 4.1: ARM'nun hacim artışlarına ilişkin tablo.	95
Tablo 4.2: Klasik ARM ve KKARM moment dalgalılık oranları.	103
Tablo 4. 3: Klasik ARM ve KKARM moment dalgalılık oranları.	109

SEMBOLLER

θ_0	: Ateşleme açısı
θ_c	: Komutasyon açısı
θ_D	: İletim açısı
μ	: Manyetik geçirgenlik
λ	: Motor akısı
ω	: Rotor açısal hızı
θ	: Rotor konumu
ε	: Stroke açısı
μ_0	: Mutlak manyetik geçirgenlik
β_r	: Rotor kutup açısı
β_s	: Stator kutup açısı
A	: Hava aralığı alanı
D_r	: Rotor çapı
d_r	: Rotor kutup yüksekliği
D_s	: Stator çapı
d_s	: Stator kutup yüksekliği
g	: Hava aralığı
i	: Faz akımı
L	: Sargı endüktansı
L_a	: Karşılıklı konumdaki faz endüktansı
L_u	: Ortalanmış konumdaki faz endüktansı
m	: Faz sayısı
m_d	: Motor derinliği
N	: Sarım sayısı
N_r	: Rotor kutup sayısı
N_s	: Stator kutup sayısı
P	: Motor gücü
R	: Sargı direnci
R_h	: Hava aralığı relüktansı
r_0	: Rotor boyunduruk yarıçapı
r_1	: Rotor yarıçapı
r_2	: Stator iç boyunduruk yarıçapı
r_3	: Stator dış boyunduruk yarıçapı
r_{sh}	: Motor mil yarıçapı
S/P	: Güç oranı
T	: Moment
t	: Zaman
T_d	: Moment dalgalılığı
T_{max}	: Moment eğrisindeki en büyük değer

T_{\min}	: Momenet eğrisinin kesişme değeri
t_r	: Rotor kutup genişliği
t_s	: Stator kutup genişliği
V	: sargı besleme gerilimi
W'_m	: Ko-enerji
W_m	: Manyetik devrede depolanan enerji
y_r	: Rotor boyunduruk kalınlığı
y_s	: Stator boyunduruk kalınlığı

Kısaltmalar

KKARM	: Karşıt Kuplajlı Anahtarlamaalı Relüktans Motor
ARM	: Anahtarlamaalı Relüktans Motor
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
AA	: Alternatif Akım
DA	: Doğru Akım
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi

KLASİK VE KARŞIT KUPLAJLI ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLARDA GEOMETRİK PARAMETRELERİN ÇIKIŞ PERFORMANSINA ETKİLERİ

Murat AYZ

Anahtar Kelimeler: Anahtarlmalı Relüktans Motor, Karşit Kuplajlı Anahtarlmalı Relüktans Motor, Hava Aralığı, Stator Kutup Açısı, Rotor Kutup Açısı.

Özet: Anahtarlmalı Relüktans Motorlar bilinen en eski elektrik makinesidir. Günümüzde Anahtarlmalı Relüktans Motorların performansını arttırmaya yönelik birçok araştırma ve çalışma yapılmaktadır. Bugüne kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde performansı arttırmaya yönelik yöntemlerden ilki motor kontrol devresi tasarımı, ikincisi ise motorun manyetik devresinin tasarımı olduğu görülmektedir. Bu çalışmada motorun geometrisi ve manyetik devresi esas alınarak çalışmalar ele alınmıştır.

Çalışmada Anahtarlmalı Relüktans Motor iki farklı sargı yapısında incelenmektedir. Birincisi klasik ARM (kısa adımlı) ikincisi ise karşit kuplajlı (tam adımlı) ARM'dur. Her iki sargı yapısı için, motorun geometrik boyutları değiştirilerek bu parametrelerin çalışma karakteristiklerine olan etkileri ortaya konulmaktadır. Bu doğrultuda her iki makine için tasarım açısından önemli bir parametre olan hava aralığı ile stator-rotor kutup açısı değerleri belirlenen aralıklarda değiştirilerek oluşturulan modeller sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmektedir.

Yapılan statik analizler sonucunda hava aralığı değişimi ile makinanın daha erken manyetik doymaya girdiği ve çıkış moment değerleri üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Yine belirlenen uygun stator-rotor kutup açılarında momentte oluşan pik değerlerinin genliğinin azaltılabildiği gösterilmektedir. Analizler sonucunda her iki makinedeki moment dalgalık oranları tespit edilerek giderilmesine yönelik önerilerde bulunmaktadır. Bu çalışma ile klasik ARM'unun moment dalgalılığını azaltmak için kullanılan yöntemlerin karşit kuplajlı ARM içinde kullanılabileceği sonucu ortaya konulmaktadır.

THE EFFECTS OF GEOMETRIC PARAMETERS ON OUTPUT PERFORMANCE OF SWITCHED RELUCTANCE AND MUTUALLY SWITCHED RELUCTANCE MOTORS

Murat A YAZ

Keywords: Switched Reluctance Motor, Mutually Coupled Switched Reluctance Motor, Air Gap, Stator and Rotor Pole Arcs.

Abstract: Switched Reluctance Motor (SRM) is the oldest electric machine. Many investigations on improving performance of SR motors have been performed so far. It is seen from the related literature that the first method used for performance improvement is the design of motor control circuit while the second method is the design of motor magnetic circuit have been taken into account.

This study investigates the SR motor for two different winding structures. The first one is classical SR (Short pitched) and the second one is mutually coupled SR (fully pitched) motor. For both winding structures the geometric dimensions of the motor have been changed, and the effects of these parameters on the motor characteristics have been determined. In this regard, for both motors the air-gap and stator-rotor pole arcs, which are important design parameters, have been varied in definite intervals. Then the developed models have been analysed using the Finite Element Method (FEM).

According to the resulting of the static analyses it has been found that the motor will reach the magnetic saturation earlier when the air gap is varied. It is seen that, for the properly determined stator-rotor pole arcs, the amplitude of torque peaks can be decreased using the analyses results the torque ripples ratios in both motors have been determined, and suggestions for eliminating them have been presented. It has been found that the methods used for decreasing torque ripple in classical SR motors can also be used in Mutually Coupled SR motors.

1. GİRİŞ

Anahtarlamaalı Relüktans (AR) Motor basit yapılı bir elektrik makinesidir. Yapısı itibari ile elektrik makineleri içerisinde en basit yapıya sahip olması bir özellik olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca dönen bir elektrik makinesi olarak hem motor hem de generatör olarak çalışabilmektedir. AR motor, aslında çift çıkık kutuba sahip, tek uyarımlı bir senkron makinedir. Stator ve rotor nüveleri bir tarafı yalıtkan bir tarafı iletken lamine saçlardan imal edilmektedir. Rotorunda herhangi bir sargı ve mıknatıs taşımamakta olup sadece statorunda sargı taşımaktadır. AR motorda elektriksel enerjinin mekanik enerji olarak kullanımı, döndürme momentini sağlayan relüktans kuvveti ile olmaktadır. Sürekli döndürme momentinin sağlanabilmesi, rotor kutbunun stator kutbuna göre konumu izlenerek uygun zamanlama ile faz sargılarının sırasıyla beslenmesi ile olmaktadır. Bunu sağlamak için bir güç elektroniği ve bir denetim elektroniği devresi kullanılması zorunludur. AR motor doğrudan doğru akım (DA) veya alternatif akım (AA) kaynağından beslenerek çalıştırılmaz. Güç elektroniği devreleri ile kontrol edilen elektrik makinelerinde döndürme momenti, hız ve ivmelenmesi iyileştirilerek verimliliği artırılabilir. Fakat kullanılacak kontrol devresine karşılık elde edilecek üstünlükler; fiyat, boyut ve devre karmaşıklığının artışı nedeni ile her alanda kullanılmaz. Bu nedenden dolayı elektronik kontrollü elektrik motorlarının kullanım alanları sınırlı kalmaktadır. Bu tip motorların geniş kullanım alanı bulabilmesi için ucuz, basit ve güvenilir kontrol devreleri gerekmektedir. Ancak AR motoru, hem yapısının hem de sürücü devresinin basitliği nedeniyle bu gereksinime cevap vermektedir.

AR motorunun çalışma prensibi, Wheatsone ve Davidson tarafından ilk kez 1840 yılında tanımlanmıştır. Fakat 1960'lı yılların sonlarına kadar çok küçük güçlerde imal edilen ve üzerinde pek durulmayan AR motor, yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte tekrar gündeme gelmiştir (Ray ve Davis, 1979, Davis ve Ray, 1980). Leeds Üniversitesinde Lawrenson ve ekibinin 1980 yılında relüktans motorlar üzerine

yaptıkları kapsamlı çalışmalardan sonra araştırmacılar bu motora yoğun ilgi göstermişlerdir. Ticari amaçlı ilk AR motor, 1983 yılında Oulton Drives Ltd. lisansı ile Tasc Drives tarafından İngiltere’de üretilmiştir. Başlangıçta bu motorlara, makinenin yapısından kaynaklanan, rotor hareketi ile relüktansın değişimi ve buna bağlı olarak faz endüktanslarının değişken olmasından dolayı Değişken Relüktanslı Motorlar denmekteydi. Motorun elektronik kontrol devresi ile birleştirilerek oluşturulan tasarımımdan sonra, faz sargılarının yarı iletken elemanlar tarafından anahtarlanarak devreye alınıp çıkarılmasından dolayı Anahtarlamalı Relüktans Motor adı daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

ARM’un basit yapısı ve yarıiletken teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte, hızı, momentini kontrol edilebilen ve istenilen temel özelliklere sahip bir tahrik sistemi oluşturmakta ve moment/hız kontrolü gerektiren birçok uygulamada yer almaktadır. Ayrıca ARM’un tercih edilmesinde, hata toleransının yüksek ve güvenilir motor olması önemli bir etkidir. ARM’un bu temel özelliklere sahip olmasından dolayı ve kullanım alanını arttırabilmek için bu motor üzerinde uygulamaya yönelik birçok çalışma yapılmaktadır.

ARM’larının diğer motor çeşitlerine göre üstünlükleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Rotorda sargı, mıknatıs veya kısa devre halkası bulunmaması ve stator sargısının basit olmasından dolayı maliyetinin düşük olması,
- Rotorda sargı ve fırça bulunmamasından dolayı yüksek hızlarda çalışmaya uygun oluşu,
- Rotor eylemsizlik momentinin düşük olması nedeniyle cevap süresinin küçük olması,
- Motor sargısının yarı iletken anahtarlara seri bağlı olması nedeni ile kısa devre tehlikesinin olmaması,
- Stator üzerindeki sargı yapısının basit oluşu ve sargıların aralarında bir elektriksel bağlantının bulunmaması,

- Motor fazlarının birbirinden bağımsız çalışabilmesi nedeni ile herhangi bir fazın arızalanması durumunda bile motorun dönebilmesi.

Bütün bu üstünlük özelliklerine karşın, motorun çok kullanışlı olmasını engelleyen etkenler aşağıdaki şekilde sıralanmaktadır:

- Stator sargı endüktansının büyük olması ve anahtarlama esnasında sargı endüktansının uçlarında büyük gerilim oluşması,
- Özellikle düşük hız uygulamalarında momentte büyük dalgalanmaların meydana gelmesi ve motorun gürültülü çalışması,
- Motorun dönebilmesi için belli bir anda hangi faza gerilim uygulanması gerektiğinin bilinmesi zorunluluğu nedeni ile mile bağlı bir algılayıcı ile rotor konum bilgisi alınarak, konvertörün kontrol edilmesi gerekir.

Günümüzde AR motorlar, endüstri işletmelerinin her alanında, özellikle hareketini dönme ve öteleme ile sağlayan servo sistemlerde, hafif raylı sistem araçlarında, ev aletlerinde, forkliftlerde, pompa tahrik sistemlerinde, elektrikli taşıt uygulamalarında gibi birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Bu uygulamalar içerisinde birçoğunda doğru akım motorları ve özellikle asenkron motorlar daha fazla kullanılmaktadır. Performans, maliyet, kontrol kolaylığı ve kullanışlılık açısından olaya bakıldığında, AR motorları diğer motorlar karşısında güçlü bir rakip olarak karşımıza çıkmaktadır.

1.2. Literatürde AR Motor Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Bugüne kadar relüktans prensibine göre çalışan elektrik makineleri üzerine yapılan son çalışmalar kısaca aşağıdaki şekilde sıralanmaktadır;

- Stator ve rotorunda çıkık kutuplar bulunan bir ARM'unun doymalı ve doymasız modeli oluşturularak moment ve akım değişimleri detaylı biçimde ortaya konularak iki model arasındaki farklar ortaya konulmaktadır (Stephenson ve diğ., 1979).

- Stator ve rotorunda çıkık kutuplar bulunan bir ARM'unun endüktans profili endüktans değerleri elde edilerek incelenmektedir. (Corda ve diğ., 1979).
- Anahtarlamalı relüktans motorunun lineer çalışma bölgesinde devre modeli oluşturularak geliştirilmiş düğüm methodu ve durum değişkenleri metodu ile analizi yapılmaktadır. Bu analizle motorun dinamik yapısı devre tabanlı olarak modellenerek çalışma karakteristiklerine etkileri incelenmektedir (Ayaz ve Yıldız, 2006a).
- ARM'nun 2-boyutlu sonlu elemanlar modeli ile manyetik analizi gerçekleştirilerek, motorun temel çalışma karakteristikleri olan akı-akım, moment-rotor konumu değişimleri manyetik alan çözümleri ile detaylı biçimde verilmektedir (Arumugam ve diğ., 1985).
- 8/6'lık ARM'nun tasarımı sırasında rotor kutbuna uygun profil vererek, $T=T(\theta)$ eğrisinin $T=k i \sin(\theta)$ biçiminde yapılarak ve motor akımının $i=I \sin(\theta)$ şeklinde değiştirilerek döndürme momentinin sabit yapılabileceği belirtilmektedir (Ray ve diğ., 1986).
- Anahtarlamalı relüktans motorunun devre tabanlı modeli kullanılarak lineer çalışma bölgesinde kontrol parametreleri ve sürücü topolojisi belirlenmektedir. Kullanılan devre modeli ile motorun kontrol parametreleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır (Ayaz ve Yıldız, 2006b).
- Anahtarlamalı relüktans makinelerde verimi arttırmak ve kayıpları azaltmak için optimum yapısal parametrelerin belirlenmesi incelenmektedir. Bu parametrelerin makinenin çalışma karakteristiklerine etkileri belirtilmektedir (Wichert ve diğ., 2001).
- Klasik anahtarlamalı relüktans motorda stator yapısı değiştirilerek yeni model oluşturulmaktadır. Bu yeni model ile klasik modelin analizleri yapılarak, çalışma karakteristikleri üzerindeki değişiklikler ortaya konmaktadır (Mao ve Tsai, 2005).

- 6/4 klasik anahtarlamalı relüktans motorunda değişik boyutlarda modellenerek çıkış karakteristiklerinin elde edilmesi ve karşılaştırılması yapılmaktadır (Low ve diğ., 1995).
- Yapılan çalışmada, klasik ARM'unda seçilen uygun hava aralığı değerinde stator ve rotor kutup genişliği değişikliğinin motor çalışma karakteristikleri üzerine etkileri ve optimum kutup genişliğinin seçim kriterlerinin belirlenmesi açıklanmaktadır (Faiz ve Finch, 1993).
- Anahtarlamalı relüktans motorlarında kutup yay genişliğinin kutup basamak değerine oranının değiştirilmesi ile motor çalışma karakteristikleri üzerindeki etkileri ortaya konulmaktadır (Arumugan ve diğ., 1988).
- Yapılan çalışmada, klasik anahtarlamalı relüktans motorlarda değişik stator kutup şekilleri ve boyunduruk yapıları modellenerek motorda oluşan titreşimlerin düşürülmesi amaçlanmaktadır (Hong ve diğ., 2002).
- Klasik anahtarlamalı relüktans motor ile karşıt kuplajlı anahtarlamalı relüktans motor sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri gerçekleştirilerek çalışma karakteristikleri karşılaştırılmaktadır (Xu ve Torrey, 2002).
- Anahtarlamalı relüktans motorda moment profilini iyileştirmek için üç yöntem uygulanarak analiz yapılmaktadır. İlk olarak mesh yapısı iyileştirilerek, ikinci olarak rotor kutup şekli değiştirilerek ve son olarak da stator kutup şekli değiştirilerek moment profili üzerindeki etkileri incelenmektedir (Srinivas ve Arumugam, 2000).
- Yapılan çalışmada, ARM'nun sürücü devresi detaylı olarak ele alınmaktadır. Sürücü devresinin en az sayıda anahtarlama elemanı kullanarak gerçekleştirilmesini amaçlayan bu çalışmada, geliştirilen anahtarlama devresi tek yönlü faz akımları ile çalışmaktadır. Sürücü devresinde gerçekleştirilen bu basitliğin maliyette sağladığı tasarruf açısından önemi vurgulanmaktadır (Ray ve Davis, 1979).

- Klasik anahtarlamalı relüktans motorlarında kayıplar göz önünde bulundurularak yapılan tasarım çalışmalarının motor performansı üzerindeki etkileri açıklanmaktadır (Finch ve diğ., 1992).
- ARM'larda momentte oluşan piklerin azaltılması için optimum tasarım parametrelerinin belirlenmesi ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılmaktadır (Ohdachi ve diğ., 1997).
- Düşük hız çalışma altında klasik ARM, karşıt kuplajlı ARM ve değişik rotor yapısına sahi bir ARM'unun statik moment karakteristikleri karşılaştırılarak en uygun motor yapısı ortaya konulmaktadır (Suriano ve Ong, 1993).
- ARM'nun moment karakteristikleri sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilmiş olup, elde edilen sonuçlar pratik olarak deneylerden sağlanan moment karakteristikleri ile karşılaştırılmaktadır. Ayrıca yapılan çalışmada, motorun doymalı yapısından dolayı dinamik modellemesinin karmaşık bir yapıya sahip olacağı belirtilmektedir (Dawson ve diğ., 1986).
- 8/6 iki katlı sargı düzenlemeli ve klasik ARM'ları için, çeşitli çevirici devrelerinin tasarımına ilişkin esaslar incelenerek, 8/6 ARM'lar için çift katlı sargı yapısının kontrol devresi açısından avantajları ortaya konulmaktadır. Motorun doymayı içeren modelinin önemli olduğu çalışmada belirtilmesine rağmen, yapılan analizlerde doğrusal model kullanılmış olup, bu modelde ortak endüktanslar ihmal edilmektedir (Davis ve Ray, 1980).
- Manyetik alan ile elektrik devrenin birleşik analizi, $d\lambda/dt$ ifadesini de modelde tanımlayacak şekilde gerçekleştirilerek dinamik çalışma şartlarının kısmen modellendiği iddia edilmiş olup, ARM'nun akı-akım eğrisi ve motor akım profili elde edilmektedir. Ayrıca deneysel sonuçlar ile önerilen yöntem karşılaştırılarak yapılan çalışmanın iyi sonuç verdiği ortaya konmaktadır (Xu ve Ruckstader, 1995).

- Hem statorunda, hem de rotorunda çıkık kutuplara sahip olan büyük bir 8/6 ARM'u imal edilerek, motorun doyma altındaki karakteristikleri ortaya konulmuş olup, doymanın momente olan etkisi ve enerji akışı incelenmektedir (Stephenson ve El-Khazendar, 1989).
- Verimi ve kaliteyi artırmak, maliyeti düşürmek için ARM'nun bilgisayar destekli analizi yapılarak tasarım aşamaları verilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan tasarım sonuçları, analitik olarak hesaplanan sonuçlarla karşılaştırılmaktadır (Krishnan ve diğ., 1988).
- Değişik rotor yapısına sahip iki fazlı karşıt kuplajlı ARM'unun dinamik simülasyon modeli oluşturularak elde edilen çıkış karakteristikleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılmaktadır (Reeve ve Pollock, 2001).
- ARM'u için yeni bir kontrol devresi geliştirilmiş olup, faz başına sadece bir anahtar kullanmanın yeterli olduğu ve devrenin tek yönlü (unipolar) akım ile çalışabileceği ortaya konmaktadır. Uyarılmış bir fazın enerjisi kesildiğinde, kontrol devresinin sargı üzerinde kalan enerjiyi kaynağa tekrar geri vermesinin çok ekonomik olduğu vurgulanmaktadır. Devrede enerji bir kondansatörde depo edilip geri aktarıldığı için, devre "C-Dump Çevirici" adını almaktadır (Bass ve diğ., 1985).
- ARM üzerine yapılan çalışmalarda ortak endüktans etkisi belirlenmeye çalışılmış olup motor çalışırken uyarılan faz ile diğer uyarılmamış fazların gerilimleri ölçülmüştür. Performansın ve farklı kontrol metotlarının doğruluğunun yükselmesi için, ortak endüktansların göz önüne alınması gerekmektedir (Davis ve Al-Bahadly, et al 1990).
- Klasik çıkık rotorlu ARM yapısı ile anizotrop yapıda rotoru bulunan relüktans motorunun moment performansları karşılaştırılarak eşit demir hacmine sahip, çıkık rotorlu motor anizotrop rotorlu motora göre %20 daha fazla moment üretmekte olduğu gösterilmektedir (Davis, 1988).

- ARM'nun rotor konumunu belirlemenin yolları incelenerek, yapılan çalışmada rotor konumunu belirlemek için sargılardan akan akımın dalga şekillerinden faydalanılmasına ilişkin geliştirilen yeni metotlar tanıtılmaktadır (Acarney ve diğ., 1985).
- ARM'da oluşan moment dalgalılığının hesabına ilişkin yapılan bu çalışmada, doyma altında çalışan motorun dinamik modelleme için hayli karmaşık bir problem oluşturduğu ifade edilmektedir (Corda, 1989).
- Aynı güçlerde farklı stator/rotor kutup sayılarına sahip ARM'larının manyetik analizleri yapılarak, performansları ortaya konulmaktadır. Yapılan çalışmada, faz ve kutup sayısının moment salınımlarına olan etkisi incelenmektedir (Corda, 1990).
- Teorik olarak ARM'u için ani moment kontrolünün temel prensipleri incelenerek ARM'nun sabit açısal hızda çalışması durumuna ilişkin matematiksel modeli doğrusal ve zamanla değişen sistem eşitlikleri ile ifade edilmektedir (Ilic-Spong ve diğ., 1987).
- Doyma altında ARM'nun çalışması analiz edilmiş olup, kontrol devresinin çalışma şartları ve makinenin moment-hız karakteristikleri de elde edilmeye çalışılmaktadır. Bu çalışmada analizlerde doymaya özellikle dikkat edilerek makinenin işletme koşullarının doymanın ihmal edildiği doğrusal analize göre öngörülenden daha düşük olduğu ortaya konulmaktadır. Ayrıca faz akımı için gerekli komutasyon açısını tespit etmeye yarayan bir formül geliştirilmektedir (Miller, 1985).
- Çift çıkık kutuplu ARM'larda akustik gürültünün sebepleri detaylı biçimde incelenerek, gürültünün azaltılması için yeni bir yöntem ortaya konulmaktadır (Cameron ve diğ., 1992).
- ARM'nun rotor yapılarının moment üzerine etkileri incelenerek, motorun lineer modeli için stator ve rotor farklı yapılarda tasarlanarak çıkış momenti üzerindeki etkiler ortaya konulmaktadır (Davis, 1992).

- Aynı anda birden fazla fazın uyarılması durumunda ortak endüktansların etkilerinin de göz önüne alındığı bir ARM için eşdeğer devre elde edilip sonlu elemanlar ile manyetik analiz sonuçları verilmektedir. İmal edilen 6/4 ARM'nun deneysel sonuçları ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmaktadır (Preston ve Lyons, 1991).
- 60 kW, 6000 d/d 'lık bir ARM'nun tasarımında hava aralığı değişiminin, rotor kutup genişliğinin ve rotor kutup yüzey profilinin moment üzerindeki etkileri incelenmektedir. Teorik olarak akı yoğunluğunun teğetsel bileşeninin testere şekilli kutup yüzeylerinde arttığı, bunun ise ortalama momentte bir artışa sebep olduğu, fakat aynı değişkenin radyal bileşen için söz konusu olmadığı vurgulanmaktadır (Moallem ve diğ., 1992).
- 2 fazlı sadece statorunda çıkık kutup bulunan bir relüktans motor ile 4 fazlı 8/6 kutuplu bir relüktans motoru ile karşılaştırılmış olup, sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılan incelemelerde önerilen relüktans motorundan 8/6 motora oranla daha büyük momentler elde edildiği ve bakır kayıplarının %75 oranında azaldığı ortaya konulmaktadır (Xu ve diğ., 1990).
- "Çift Çıkık Kutuplu ve Çift Uyarımlı Değişken Relüktanslı Motor" ismi ile 6/4 stator ve rotor kutup yapısına sahip makine, tam kutup adımlı sargı yapısı ile sarılarak motor performansı deneysel olarak elde edilmektedir. Sargı yapısının sağladığı üstünlük nedeni ile manyetik alandaki enerjinin kaynağa verilmek yerine makine içerisinde tutulduğu ve makine performansını arttırmak yönünde kullanıldığı belirtilmektedir. Yapılan çalışmada yüksek bir performans elde edilmesine rağmen, momentteki dalgalılık oranının da artmış olduğu gösterilmektedir (Li ve diğ., 1995).
- 4 kW'lık bir 8/6 ARM'nun momenti, hem akıma hem de rotor konumuna bağlı olarak elde edilmektedir. Bunun için ölçüm sonuçları kullanılarak en küçük moment dalgalanması elde edilecek şekilde fazlara uygulanan gerilim açısı iyileştirilmeye çalışılarak döndürme momentine karşılık gelen akım değerleri belirlenmektedir (Schramm ve diğ., 1992).

- ARM'nun moment dalgalılığını azaltmak için stator ve rotor kutup açıları değiştirilerek yeni motor modelleri oluşturularak, yapılan çalışmada "Silikon görünür güç" sınırlayıcısı metodu ile bakır kayıplarının da azaldığı deneysel çalışma ile gösterilmektedir (Chenadec ve diğ., 1994).
- Dönen kısmı olan ve elektrik devresi ile bağlantılı bir elektromanyetik sistemin, üç boyutlu dinamik analizi 6/4 kutuplu bir ARM örnek alınarak gerçekleştirilmiştir. Hareketli kısım Lagrange Sliding yöntemi ile modele dahil edilmiş olup önerilen yöntem ile ARM'nun akım profili de bu çalışmada ortaya konulmaktadır (Lai ve diğ., 1997).
- 2-boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiş ARM'nun manyetik analizi yapılarak, stator kutuplarındaki kuvvet dağılımı hesaplanmaktadır. Manyetik kuvvetlerin mekanik cevabını da inceleyen bu çalışma mekanik sistemin frekans cevabını ve harmonikleri göstererek deneysel sonuçlarla ortaya konmaktadır (Sadowski ve diğ., 1996).
- 6/4 kutuplu ARM'nun normal koşullar altındaki sürekli hal modeli oluşturularak motorun dinamik karakteristikleri elde edilmektedir. Doyma etkisinin de dikkate alındığı bu çalışmada faz endüktansları elde edilerek sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmalı olarak verilmektedir. Ayrıca karşılıklı endüktansların sisteme olan etkisi de incelenmektedir (Arkadan ve Kielgas, 1994).
- "Karşıt kuplajlı Anahtarlamalı Relüktans Motor (KKARM)" ismi ile tam kutup adımlı sargı yapısına sahip motor için manyetik devre modeli geliştirilmiştir. Karşıt kuplajlı Anahtarlamalı Relüktans Motorun performans tahmini için bir yöntem ortaya konarak sunulan modelde faz akımlarına dayalı olarak manyetik akı hesabı gerçekleştirildi. C++ programlama dili kullanılarak oluşturulan modelin sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılması yapılarak önerilen yöntemin geçerliliği ispatlanmaktadır (Kokernak ve Torrey, 2001).

- "Fractionally-Pitched Winding" ismi ile tam kutup adımlı ve kısa kutup adımlı sargının birlikte kullanıldığı yeni bir sargı yöntemi, Anahtarlama Relüktans Motoruna uygulandı. Pozitif moment, hem öz endüktansların hem de karşıt endüktansların, rotor konumuna göre değişim oranından elde edilmektedir. Klasik Anahtarlama Relüktans Motor ile karşılaştırıldığında makine veriminin yükseldiği, manyetik alan analizi ve deneysel çalışmalarla sunulmaktadır (Li ve diğ., 1997).
- Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ARM'nun moment dalgalılığı azaltılmaya çalışılmaktadır. Farklı rotor kutupları içeren motor modelleri, akustik gürültü ve moment dalgalılığı bakımından karşılaştırılarak daha az gürültü veren yeni modelin aynı zamanda bir asenkron motordan da düşük gürültü seviyesine sahip olduğu verilerle vurgulanmaktadır (Kim, 1997).
- Düşük hız uygulamaları için farklı yapılara sahip değişken relüktanslı motorlar statik moment kabiliyetleri bakımından karşılaştırılmaktadır. Sargı sonu ve çok kutupluluk etkisinin de dikkate alındığı bu çalışmada, klasik ARM'nun, ortak endüktanslı değişken relüktanslı motor ve anizotrop rotorlu değişken relüktanslı motor ile karşılaştırılması verilmektedir (Suriano ve Ong, 1996).
- ARM'nun tasarımı için analitik tasarım denklemleri çıkarılarak, motorun performans değerleri bu metotla elde edilmektedir. Geliştirilen analitik denklemlerle tasarlanan farklı motor yapıları moment performansı açısından karşılaştırılarak en uygun olan model elde edilmeye çalışılmış olup elde edilen analitik sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmaktadır (Radun, 1995).
- Üç fazlı köprü sürücü devresi, hem kısa kutup adımlı motor, hem de tam kutup adımlı sargı yapısına sahip motor için incelenerek verim ile maliyet açısından birbirleri ve asenkron motorla karşılaştırılmaktadır. Ayrıca akım algılama düzenekleri ve akımı istenilen seviyede kontrol etme üzerine, konum algılayıcı sensör sayısının etkisi incelenmektedir (Clothier ve Mecrow, 1999).

- ARM'nun statik ve dinamik analizleri sonlu farklar yöntemi ile gerçekleştirerek akı ve momentler virtual iş yönteminden yararlanarak elde edilmiş olup, doyma altında çalışan motorun dinamik davranışı ortaya konulmaktadır (Pelikant ve Wiak, 1996).
- Tam kutup adımlı Anahtarlamalı Relüktans Motorun konum algılayıcısız denetlenmesi ile ilgili bir çalışma yapılmıştır. Önerilen Bulanık Mantık tabanlı algoritma ile hem akı halkalanmasını hem de akımları kullanarak rotor konumunu belirlemek mümkün olmuştur. 400 W, 3000 d/dak 12/8 stator ve rotor kutup yapısına sahip motorda uygulanan bu algoritma ile oldukça iyi sonuçlar elde edilmektedir. (Kosaka ve Matsui, 2000).
- Yapılan çalışmada ARM'nun en uygun tasarımı için, dinamik sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiş olup, vektör kontrol yönteminde olduğu gibi akım iki bileşene ayrılarak momenti oluşturan bileşen, moment dalgalılığını azaltmak üzere kontrol edilmektedir. Ayrıca motorun kutup açıları değiştirilerek momentteki dalgalılığın büyük ölçüde azaltıldığı ortaya konulmaktadır (Ohdachi ve diğ., 1997).
- Ticari bir 7,5 kW'lık klasik ARM'nun sargıları sökülerek "Tam Kutup Adımlı" sargı ile tekrar sarılmış olup, değişik uyarma yapıları altında motor performansı deneysel olarak incelenmektedir. Ortalama çıkış momentinde sağlanan artış, eşit bakır kayıplarına dayalı olarak karşılaştırılmaktadır. Yeni sargı yapısına sahip motorun faz direncindeki artış oranı %60 olarak kabul edilmektedir. Elde edilen sonuçlar klasik ARM ile karşılaştırılarak yeni makinenin modellenmesindeki zorluk, önerilen bir dönüşüm denklem takımı ile aşılmaktadır (Mecrow, 1996).
- Sonlu elemanlar yöntemi ile, ARM'nun faz endüktansı hesaplanarak, motorun elektriksel devre tarafına ait denklem sisteminin çözümü yapılarak akım dalga şekli ortaya konulmaktadır. ARM'nun manyetik akı yoğunluğu bileşenlerinden hareketle, stator kutup açısı değeri değiştirilerek moment değerinin arttığı tespit edilmektedir (Koibuchi ve diğ., 1997).

- İki fazlı KKARM'nun sürücü devresi detaylı olarak ele alınarak değişik uyarma yapılarında sürücü devrelerin performansları ortaya konarak incelenmektedir. Güç elektroniği devre elemanlarının volt-amper ihtiyaçları açısından, klasik ARM'a göre daha avantajlı olduğu gösterilmektedir (Wale ve diğ., 1996).
- Kısa kutup adımlı sargı yapısına sahip klasik Anahtarlamalı Relüktans Motoru, çift uyarmalı yapı kullanılarak, karşıt kuplaj etkilerini de içeren bir model oluşturulmaktadır. Deneysel çalışmalar ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlar, fazlar arasında oluşan kuplajın incelenen 10/8 stator ve rotor kutup yapısına sahip makinede performansı yükselttiğini göstermektedir (Michaelidas ve Pollock, 1996).
- Klasik ARM'ı için kullanılan sürücülerin KKARM'da kayıpları artırdığı gösterilerek, bu kayıpları azaltan ve komütasyon sorununu çözen yeni bir sürücü devresi ortaya konmaktadır. Bu sürücü devresi ile yeni sargı yapısına sahip motorun daha büyük güç dönüştürücülerine ihtiyaç duymadığı gösterilmektedir (Mecrow, 1998).
- KKARM 'un çift yönlü (bipolar) uyarma yapısındaki davranışı ayrıntılı olarak analiz edilmektedir. 7,5 kW, 1500 d/dak değerlerine sahip bir KKARM, 10 kHz anahtarlama frekansına sahip IGBT 'li bir sürücü devre ile mikro denetleyiciden oluşan bir deney düzeneği ile tek yönlü (unipolar) ve çift yönlü (bipolar) uyarımlar altında makinenin verdiği cevap incelenmektedir. Elde edilen moment değerleri genlik ve dalgalılık oranı açısından birbirleri ile karşılaştırılmaktadır. Çift yönlü akım ile çalışmanın tek yönlü çalışmaya göre bir üstünlüğü olmadığı fakat klasik makineye karşı önemli bir üstünlüğe sahip olduğu gösterilmektedir (Barrass ve diğ., 1995).
- KKARM'nun temel çalışma ilkesini ve tüm çalışma karakteristiklerini ortaya koyan bir çalışma gerçekleştirilmektedir. Değişik uyarma yapılarının da incelendiği çalışmada, pozitif momentin uyarma yapılarına göre elde edilmiş şekilleri ve ortalama çıkış momentindeki artışı gösterilmektedir. Ayrıca tam kutup adımlı sargı yapısının adım motorlarına da uygulanabileceği belirtilmektedir (Mecrow, 1993).

- ARM'nun doyma modeli için, faz akımları ve tablo haline getirilmiş statik moment karakteristiğinden yararlanılarak motor momenti hesaplanarak konum bilgisi elde edildi. Daha sonra momentteki dalgalanmanın en aza indirilmesi için faz akımlarının nasıl bir profile sahip olması gerektiği irdelenmektedir (Corda ve diğ., 1993).
- "Manyetik Kuplajlı Sargılara Sahip Anahtarlamalı Relüktans Makinelerin Modellenmesi" ismi ile, tam kutup adımlı sargı yapısına sahip Anahtarlamalı Relüktans Motorunun modellenmesinde yaşanan zorluğu aşma yönünde önemli bir çalışma ortaya konulmaktadır. Akı halkalanmasının makinenin tüm fazlarının işlevi olmasından kaynaklanan yüksek miktarda doğrusal olmayan yapı, akı halkalanması ve akımın bir stator dişi başına düşen akı ve manyetomotor kuvveti olarak ayrıştırılması ve bunların basit bir look-up tablosu ile modele dahil edilmesi ile aşılmaktadır. Gerçekleştirilen deneysel çalışma ile oluşturulan modelin doğruluğu ispatlanmaktadır (Mecrow ve diğ., 2001).

ARM'lar üzerine yapılan bu çalışmalar her geçen gün artış göstermektedir. Bu çalışmalar, hem motorun tasarımı, kontrolü ve manyetik yapısını içermektedir.

1.3. Çalışmanın Amacı

Elektrik makinelerinin performansını ve verimini arttırmaya yönelik çalışmalar, her zaman araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Genellikle, tasarım esnasında yapılan bu çalışmalar ile performansını yükseltmek, başka bir deyişle elektrik makinesinden en iyi şekilde yararlanmak amaçlanmaktadır. Anahtarlamalı Relüktans Motorunun yapısının ve kontrol devresinin basit olmasından dolayı, son dönemlerde, endüstride kullanım alanı her geçen gün artmaktadır. Yoğun bir şekilde gerçekleştirilen kontrol temelli çalışmaların bir miktar doymaya ulaşması ile tasarım aşamasını temel alan ve motorun performansını arttırmaya yönelik çalışmalar hız kazandı. Bu çalışmalardaki genel amaç, hava aralığı akısından daha fazla faydalanmak ve bunu gerçekleştirmek için değişik stator ve rotor şekilleri kullanılmaktadır. Ayrıca sadece değişik stator ve rotor şekilleri

kullanmanın yanı sıra stator ve rotor kutup şekilleri üzerinde yapılan fiziksel değişiklikler ile de hava aralığı akısından daha fazla verim elde edilmiştir. Bu doğrultuda yapılan çalışmalardaki amaç, motorun olumsuz yönlerini gidermek ve verimini arttırmaktır.

Çalışmanın hedefi, klasik bir ARM'un fiziksel boyutları değiştirilerek hava aralığı ve stator, rotor kutup boyutları değişiminin motor temel parametreleri üzerindeki etkilerini değerlendirmektir. Ayrıca aynı klasik AR motorun tam kutup adımlı sarılarak elde edilen KKAR motor içinde aynı fiziksel değişiklikler yapılarak motor parametreleri üzerindeki etkiler değerlendirilmektedir ve eşit şartlarda klasik AR motor ile KKAR motor karşılaştırmaları yapılmaktadır. Bu amaçla, Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile fiziksel boyutları değiştirilen klasik AR motor ve KKAR motor modelleri oluşturulduktan sonra manyeto statik analizi gerçekleştirilerek motorlara ait temel karakteristikler çıkarılmaktadır. Klasik AR motor ve KKAR motor arasında karşılaştırma yapılırken fiziksel boyutlarının aynı olması, aynı manyetik çalışma noktasında veya eşit bakır kayıplarında karşılaştırma yapma zorunluluğu getirdiğinden bu çalışmada eşit bakır kayıpları dikkate alınarak karşılaştırmalar yapılmaktadır. Eşit bakır kayıplarında karşılaştırma yapabilmek için, gerekli olan bakır alanlarındaki hacim artış oranları SOLIDWORKS paket programı kullanılarak hesaplanmaktadır. Her iki makine sargı yapıları ile birlikte üç boyutlu çizilerek faz başına düşen bakır hacmindeki artış hesaplanıp bu artışlar yardımı ile faz direncindeki artış ortaya konmaktadır. Faz direncindeki artış oranının üç boyutlu analiz sonucu elde edilmesinin literatüre kazandırılan bir zenginlik olduğu düşünülmektedir. Karşıt kuplajlı anahtarlamalı relüktans motorda sargı direnci daha yüksek olacağından iki makineyi karşılaştırırken aynı akım değerinde karşılaştırma yapmak hatalı sonuçlar vereceğinden, her iki makine eşit bakır kayıplarını verecek akım değerleri hesaplanarak bu akım değerleri için manyetik karakteristikler Maxwell 2D programı ile elde edilmektedir.

1.4. Çalışmanın Yapısı

Çalışmanın amacına uygun olarak oluşturulan diğer tez bölümleri aşağıdaki gibi geliştirilmektedir.

İkinci bölümde, Klasik AR motorun tanımı ve genel yapısı, motor tipleri, olumlu ve olumsuz özellikleri, çalışma prensibi, motoru tanımlayan rotor konumuna göre endüktans değişimi, moment oluşumu konuları özet olarak verilmektedir. Daha sonra, ana boyutları belirlenmiş olan motorun elektromanyetik karakteristiklerinin tanımı ve nasıl belirleneceği açıklanmaktadır. AR motorunun en temel karakteristiği olan, halkalanma akısı-akım-rotor konumu değişiminin belirlenmesi için manyetik analizi yapılmaktadır. Hava aralığı ve stator, rotor kutup boyutları değişiminin temel motor parametrelerine olan etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Sayısal manyetik analiz için, doymayı da kapsayacak şekilde Sonlu Elemanlar Yöntemini (SEY) kullanan Maxwell 2D paket yazılımı kullanılarak sonuçlar sunulmaktadır.

Üçüncü bölümde, , klasik ARM'nun hiçbir parametresi değiştirilmeden tam kutup adımlı sarılması ile elde edilen KKARM 'un yapısı, motoru tanımlayan rotor konumuna göre endüktans değişimi, moment oluşumuna ilişkin konular verilmektedir. Daha sonra, ikinci bölümde klasik AR motor oluşturulan modellerin KKAR motor içinde yapılarak temel karakteristikleri paket program ile elde edilmiştir.

Dördüncü bölümde, aynı parametrelere sahip klasik AR motor ile KKAR motor arasında eşit şartlarda hava aralığı ve stator, rotor kutup boyutlarındaki değişikliğin temel parametrelere olan etkilerinin karşılaştırılması yapılmaktadır. Ayrıca iki motoru eşit kayıplar altında karşılaştırma yapabilmek için KKAR motorun sargı sonu etkisinden dolayı faz direncindeki artışı belirleme yöntemi kısaca özetlenmektedir.

Beşinci ve son bölümde ise, elde edilen sonuçlar detaylı bir değerlendirmesi yapılmaktadır. Ayrıca yapılan değerlendirmeler neticesinde bazı öneri ve yorumlar yer almaktadır.

2. KLASİK ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLARIN YAPISI, ÇALIŞMA İLKESİ VE MANYETOSTATİK ANALİZİ

2.1. Giriş

Günümüzde akademik ve ticari olarak yoğun bir şekilde üzerinde çalışılan Anahtarlamaalı Relüktans Motor (ARM) yapısı bakımından basit bir elektrik makinesidir. AR motorun çalışma prensibi ilk kez 1840'lı yıllarda Wheatstone ve Davidson tarafından tanımlanmıştır. Elektronik kontrollü olmasından dolayı, yarı iletken teknolojisinde 1970'li yıllarda başlayan gelişmelere kadar üzerinde pek fazla çalışma yapılamadı. 1980'li yılının başlarında Leeds Üniversitesinde Lawrenson ve çalışma gurubunun relüktans motorlar üzerine gerçekleştirdikleri geniş kapsamlı bir çalışmadan sonra araştırmacılar bu motor üzerine yoğun ilgi gösterdiler. İlk yapılan çalışmalarda bu motora yapısından kaynaklanan faz endüktansının değişken olmasından dolayı Değişken Relüktans Motorlar (Variable Reluctance Motor) denmekteydi. Fakat yarı iletken teknolojisindeki ve kontrol tekniklerindeki gelişmelere paralel olarak faz sargılarının yarı iletken anahtarlar ile devreye alınıp, çıkarılmasından dolayı motor, Leeds ve Nottingham Üniversitelerinde bulunan araştırmacılar tarafından, Anahtarlamaalı Relüktans Motoru (Switched Reluctance Motor) olarak isimlendirilmiştir.

Yarıiletken ve güç elektroniği teknolojisindeki gelişmelere eş zamanlı olarak güç elektroniği ile birleştirilerek AR motorlarının endüstride işlerlik kazanması, gücünün birkaç watt değerinden yüzlerce kilowatt'a kadar ulaşması ile sağlanmıştır. Ticari amaçlı olarak ilk Anahtarlamaalı Relüktans Motorları, 1983 yılında Oulton Drives Ltd. lisansı ile Tasc Drives tarafından İngiltere'de üretilmeye başlanmıştır.

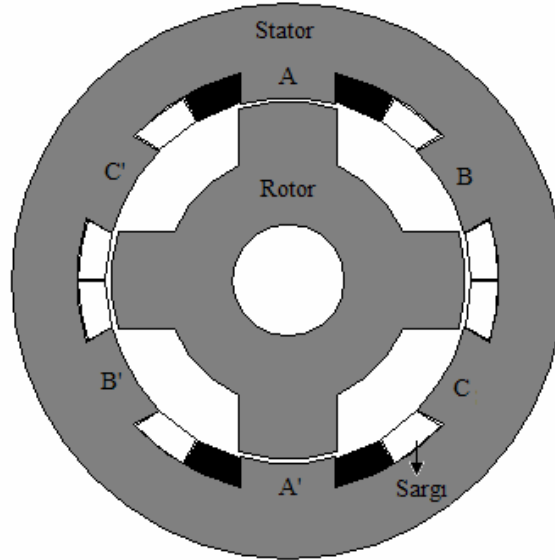
2.2. Tanımı ve Yapısı

Elektrik makinelerinde elektrik enerjisinin faydalı mekanik enerjiye dönüşümü, dönme hareketi yapan makinelerde döndürme kuvveti ile, öteleme hareketi yapan makinelerde ise öteleme kuvveti ile olmaktadır. Genel anlamda elektrik makinelerinde bu enerji dönüşümü iki şekilde meydana gelir, birincisi endüklenen moment, ikincisi relüktans moment olarak adlandırılabilir. Genelde bilinen birçok motor, örneğin asenkron veya senkron motorlar endüklenen momenti yararlı mekanik enerjiye dönüştürürler. Endüklenen moment için geleneksel motorlarda iki farklı sargıya sahiptirler ve bunlardan birisi statorda, diğeri ise rotor üzerinde bulunmaktadır. Moment üretimini sağlamak için bu sargıların her ikisinin de aynı anda uyarılması gerekmektedir ve bu sargıların manyetik olarak etkileşimi söz konusudur. Bu sargılardan birisi uyarma görevini üstlenerek faydalı manyetik akıyı oluştururken diğeri ise oluşturulan faydalı akıyı halkalayarak endükleme görevini yapar ve moment üretimini gerçekleştirmektedir (Diril, 2000).

Elektrik enerjisinin faydalı mekanik enerjiye veya işe dönüşümü anahtarlamalı relüktans motorlarında ise relüktans moment oluşumuyla gerçekleşir. Relüktans moment oluşumu prensip olarak birbirlerine göre belirli uzaklıkta yerleştirilmiş iki zıt kutuplu mıknatısın, manyetik akılarını tam olarak kavrayacak konuma gelinceye kadar aralarında oluşan kuvvetin momente dönüştürülmesi ile aynıdır. ARM'da ise statorda bulunan sargılar ile elektromıknatıslar oluşturulmakta ve rotor konumuna göre uygun sırayla akımları kontrol edilen bu elektromıknatıslar sürekli moment üretimini sağlamaktadırlar. Statorda ve rotorda kutup olarak adlandırılan bu elektromıknatıslar düzgün dairesel yapıda olmayıp çıkık bir yapıya sahiptir. Moment, karşılıklı stator kutbu üzerinde bulunan sargı çifti uyarılarak hava aralığında depolanan manyetik enerjinin rotor konumuna göre değişimiyle oluşur. Başka bir deyişle, stator ve rotor kutuplarının örtüşme oranlarına bağlı olarak relüktansın değişimi ile moment oluşmaktadır.

ARM'u yapı bakımından adım motorlarına ve çıkık kutuplu senkron motorlara benzer. ARM diğeri motorlara göre daha basit bir yapıya sahiptir ve hem rotorunda ve hem de

statorunda çıkık kutuplar yer almaktadır. Stator ve rotor nüvelerinin her ikisi de, imalat uygunluğu ve demir kaybını azaltmak için, ince yaprak halinde lamine saçlardan imal edilirler. Faz sargıları statordaki çıkık kutupların üzerine ince telle ve yoğun olarak sarılır. Rotorunda ise sargı, kısa devre halkası veya mıknatıs bulunmamaktadır. Statorda karşılıklı kutuplardaki sargılar seri veya paralel bağlanarak faz sargılarını oluşturmaktadır. ARM'ları stator/rotor kutup oranlarına göre sınıflandırılırlar. Şekil 2.1'de endüstride oldukça fazla uygulama alanı bulmuş üç fazlı 6/4 kutuplu ARM'unun kesiti verilmektedir.



Şekil 2.1: Üç fazlı 6/4 kutuplu ARM kesiti.

Şekil 2.1'deki üç fazlı ARM'unda 6 stator, 4 rotor kutbu olup, statordaki 6 bobin ile üç faz sargıları oluşturulmaktadır. ARM'unda rotorun bir tam dönüş yapabilmesi için faz sargılarının bir defadan fazla uyarılması gerekmektedir. Her bir faz sargısı uyarıldığında, rotor bir adım açısı (θ) kadar dönme hareketi yapar, m faz sayısı, Nr rotor kutup sayısı olmak üzere rotor $m \cdot N_r$ adımda bir tam dönüşü tamamlar ve mekanik adım açısı ile belirlenebilir.

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{mN_r} \quad (2.1)$$

ARM'da, kalkış sırasında rotor ataletini yenerken fazla titreşim oluşmasını ve akı değişiminin çok fazla değişmesini engellemek için asenkron motorlarda olduğu gibi, rotor hafif eksenel kayıklıkta imal edilmektedirler. ARM'larında sürekli bir dönme hareketinin oluşabilmesi için stator ve rotor kutup sayıları birbirine eşit değildir ve uygulamada stator kutuplarının sayısı rotor kutup sayılarından daha fazla olacak şekilde imal edilir. Rotor kutup sayısının stator kutup sayısına yakın değerlerde olması veya daha az sayıda olması uygulama amacına göre değişir. Yüksek moment istenen uygulamalarda rotor kutup sayısı stator kutup sayısına göre yakın seçilirken, yüksek hız istenen uygulamalarda ise rotor kutup sayısı stator kutup sayısına göre daha az seçilir. Ayrıca faz sargıları uyarıldığında oluşan manyetik alandan daha fazla fayda sağlanabilmesi ve sargı alanını daha geniş tutulabilmesi için stator kutupları rotor kutuplarına göre daha dar imal edilir. Rotor kutup genişliğinin stator kutup genişliğine göre daha büyük olması negatif moment üretimini de engelleyecektir. Oluşturulan tahrik sisteminin özelliğine bağlı olarak stator ve rotor kutuplarının ve genişliklerinin seçimi yapılmaktadır.

Birçok uygulamada, anahtarlamalı relüktans motorlu tahrik sistemleri aşağıda şekilde belirtilen olumlu özelliklerinden dolayı diğer tahrik sistemlerine karşı bir seçenek olarak sunulmaktadır (Diril, 2000).

ARM'un Önemli Özellikleri;

- Rotorunda herhangi bir sargı olmadığından basit yapılı, sağlam ve az bakım gerektirir.
- Rotorunda herhangi bir sargı olmadığından basit yapılı, sağlam ve az bakım gerektirir.
- Üretim maliyeti düşüktür.
- Güç/ağırlık oranı yüksektir, aynı güçteki asenkron motora göre daha hafif ve daha küçüktür.
- Rotorunda sargı yoktur, eylemsizlik momenti küçüktür.

- Yüksek hızlarda çalışma olanaklıdır.
- Dört bölgede çalışması olanaklıdır. Yüksek kalkış momenti verebilir.
- Diğer motorlarda olduğu gibi sargı oluk atlamaz dolayısıyla sargı dönüş uzunluğu küçüktür.
- Rotor kaybı düşüktür.
- Isınmaya karşı daha az duyarlıdır.
- Hatalara karşı toleransı yüksektir. İşleme sırasında oluşabilecek sargı yanması veya kısa devresi gibi hatalarda bir faz devreden çıksa da çalışmasını devam ettirebilir.

Buna karşılık, anahtarlamalı relüktans motorun aşağıda belirtilen olumsuz özelliklerinden dolayı son on yıl içerisinde yoğunlaşan araştırma çalışmaları, anahtarlamalı relüktans motorun işletme ve tasarım iyileştirilmesine yönelik olmuştur (Diril, 2000).

ARM'un Olumsuz Özellikleri;

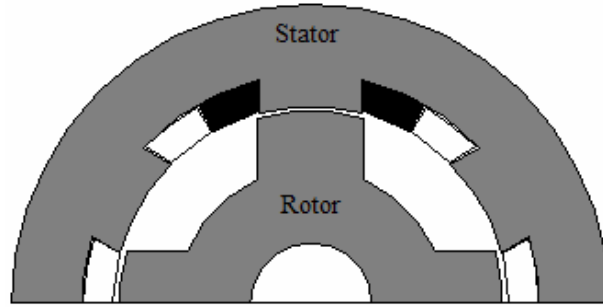
- Çıkık kutuplu yapı gürültü ve moment dalgalılığına neden olmaktadır,
- Mil çapı küçüktür,
- Yüksek hızlarda çıkık rotor yapısından dolayı hava sürtünme kayıpları yüksektir,
- Akım yoğunluğunun büyük olduğu durumlarda ısınma açısından daha büyük sargı alanına ihtiyaç göstermektedir,
- Rotor konum bilgisine ihtiyaç bulunmakta ve bunun için ayrı bir konum algılayıcı gerekmektedir. Algılamasız denetim için yazılım algoritmasında ve donanımında özel önlemler alınarak daha pahalı ve karmaşık düzenlere ihtiyaç göstermektedir,
- Doğrudan yol alamamakta ve bir sürücü güç elektroniği devresine ihtiyaç göstermektedir.

2.3. ARM'un Temel Çalışma İlkesi

ARM'un çalışma ilkesinin açıklanması ve moment oluşumu açısından rotorun bir faz stator kutbuna göre üç temel konumu söz konusudur. Birincisi, stator kutup eksenini ile rotor kutup ekseninin üst üste olduğu karşılıklı (aligned) rotor konumu, ikincisi, stator kutup eksenini ile rotor kutup eksenlerinin orta noktasının üst üste olduğu ortalanmış (unaligned) rotor konumu ve karşılıklı konumdan ortalanmış konuma gelinceye kadarki olan ara konumlardır.

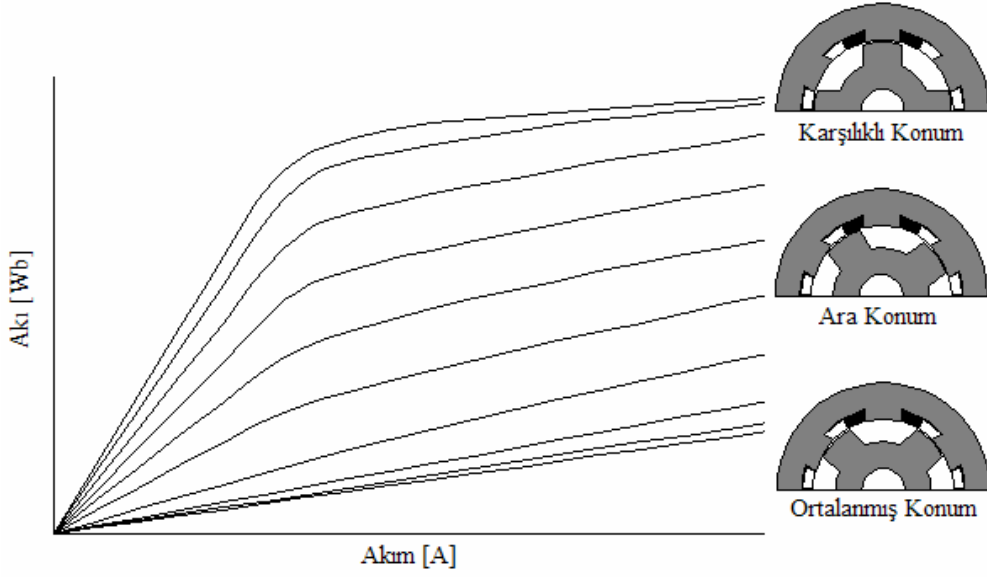
2.3.1. Karşılıklı (aligned) konum

Karşılıklı konum, stator ve rotor kutuplarının tam olarak karşı karşıya geldiği durum olarak adlandırılır.



Şekil 2.2: ARM'unda karşılıklı konum

Bu konumda iken stator ve rotor arasındaki hava aralığı en küçük değerdedir ve bu konumda hava aralığının küçük olmasından dolayı relüktans değeri de küçük olacaktır. Ancak endüktans, relüktans ile ters orantılı olduğundan en büyük değerinde olacaktır. Bu durumda rotor kutbu, karşı karşıya geldiği stator kutbu üzerindeki faz sargıları uyarıldığında motorda bir moment üretilmez. Şekil 2.3'deki mıknatıslama eğrisinden de görüldüğü gibi karşılıklı konumda akı yolu, özellikle stator ve rotor boyundurukları manyetik doymanın etkisi altındadır. Karşılıklı konumdaki faz endüktansı L_a ile gösterilir ve doymuş endüktans olarak adlandırılır.

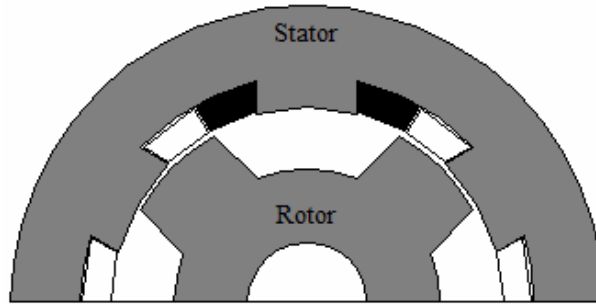


Şekil 2.3: Miknatıslanma eğrisi, akının akıma göre değişim eğrisi.

Şekil 2.3’de verilen halkalama akısının akım ile değişim eğrileri, momentlerin hesaplanmasında, sargı ve saç laminasyonlarının tasarımında büyük önem taşıyan motorun temel karakteristiğidir.

2.3.2. Ortalanmış (unaligned) konum

Ortalanmış konum, bir stator kutbu iki rotor kutbunun tam ortası ile karşı karşıya geldiği durum olarak adlandırılır (Şekil 2.4).



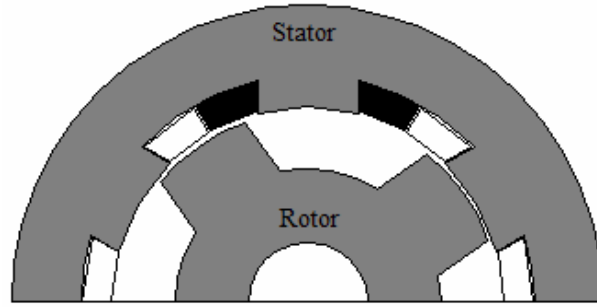
Şekil 2.4: ARM’unda ortalanmış konum.

Bu konumda iken stator ve rotor arasındaki hava aralığı en büyük değerdedir ve bu konumda hava aralığının büyük olmasından dolayı relüktans değeri de büyük olacaktır.

Ancak endüktans, relüktans ile ters orantılı olduğundan en küçük değerinde olacaktır. Bu durumda faz sargıları uyarılacak olursa motorda bir moment üretimi gerçekleşmez. Ortalanmış konumda rotor ve stator arasındaki hava aralığının büyük olmasından dolayı kaçak akılar meydana gelmektedir ve bu nedenle, bu konumdaki manyetik doymanın etkisi karşılıklı konuma göre daha azdır. Ortalanmış konumdaki mıknatıslanma eğrisinde, manyetik doymanın etkisi görülmez. Ortalanmış konumdaki faz endüktansı L_u ile gösterilir ve doymamış endüktans olarak adlandırılır.

2.3.3. Rotorun ara konumları

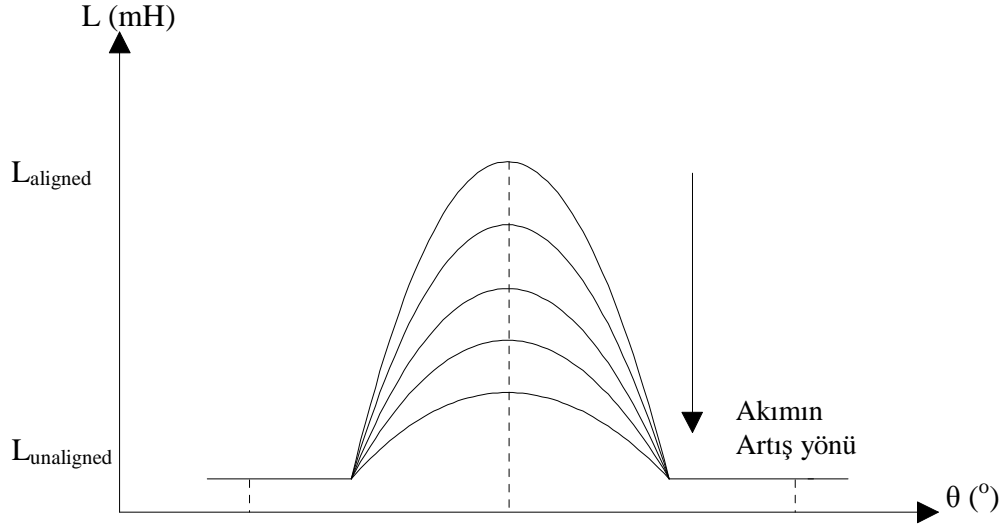
Rotorun ara konumları, rotor kutbunun karşılıklı konumdan ortalanmış konuma gelinceye kadar olan konumlar olarak adlandırılır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5: ARM'unda rotor kutbunun ara konumu.

Rotorun bu ara konumlarında elde edilen halkalanma akısı eğrileri karşılıklı ve ortalanmış konumda elde edilen eğriler arasında yer almaktadır (Şekil 2.3). Stator ve rotor kutupları örtüşmeye başladığı andan itibaren kutup köşelerinde yerel manyetik doymalar oluşmaktadır. Kutuplarda örtüşme arttıkça manyetik doyma da giderek artacaktır.

Sargı endüktansının rotor konumuna göre değişimi Şekil 2.6' de verilmiş olup, endüktans değeri en küçük (L_{min}) ve en büyük (L_{max}) arasında değişmektedir. Bu en büyük ve en küçük sargı endüktans değerleri oranı AR motor performansını belirleyen önemli büyüklüklerden biridir (Davis ve Al-Bahadly, 1990).



Şekil 2.6: ARM’unda endüktansın rotor konumuna göre değişimi.

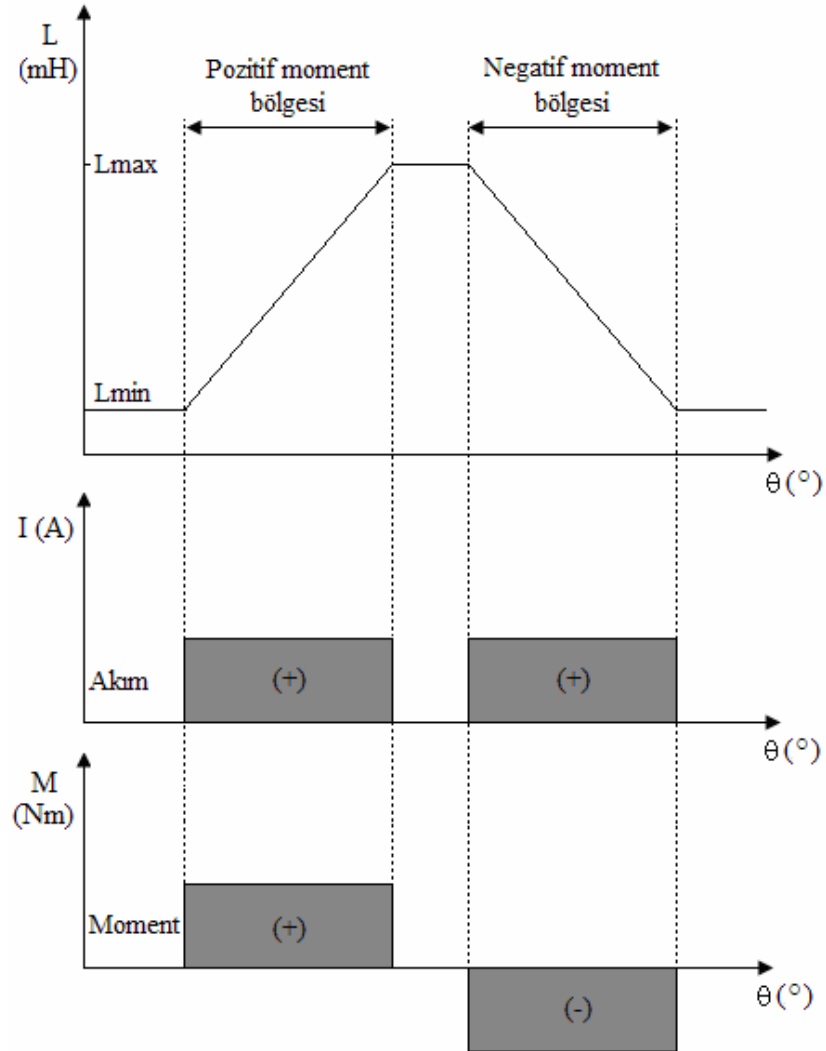
ARM’da faz sargılarından biri uyarıldığında, meydana gelen manyetik alan, uyarılan stator kutbuna en yakın rotor kutbuna relüktansı küçültecek yönde kuvvet uygular. Oluşan bu kuvvet, eğer rotor dönüyor ve döndükçe relüktans azalıyor ise dönüşü katkı sağlarken relüktans artıyor ise dönüşü engeller. Döndürme momenti uyarma akımının yönüne bağlı değildir ve rotor dönüş yönüne göre momentin yön değiştirmesi sadece rotor konumuna göre relüktansın artma veya azalma eğiliminde olmasına bağlıdır. Şekil 2.7’de gösterildiği gibi akım yön değiştirmedeği halde, relüktansın azalma veya endüktansın artma eğiliminde olduğu bölgede rotor dönüş yönüne göre pozitif döndürme momenti, relüktansın artma veya endüktansın azalma eğiliminde olduğu bölgede rotor dönüş yönüne göre negatif moment üretilmektedir. θ rotor konumu, L sargı endüktansı ve I sargı akımı olmak üzere lineer manyetik devrede M üretilen momentin genel ifadesi denklem 2.2’de verilmektedir.

$$M = \frac{1}{2} I_a^2 \frac{dL_a}{d\theta} + \frac{1}{2} I_b^2 \frac{dL_b}{d\theta} + \frac{1}{2} I_c^2 \frac{dL_c}{d\theta} + I_a \cdot I_b \frac{dM_{ab}}{d\theta} + I_b \cdot I_c \frac{dM_{bc}}{d\theta} + I_c \cdot I_a \frac{dM_{ca}}{d\theta} \quad (2.2)$$

ARM’da faz sargıları adımli olarak sarıldıkları için fazlar arasında manyetik kuplaj bulunmamaktadır. Dolayısı ile fazlar arasındaki ortak endüktanslar ihmal edilebilir. Bu durumda denklem 2.2 ile verilen genel moment ifadesi denklem 2.3’deki hali alır.

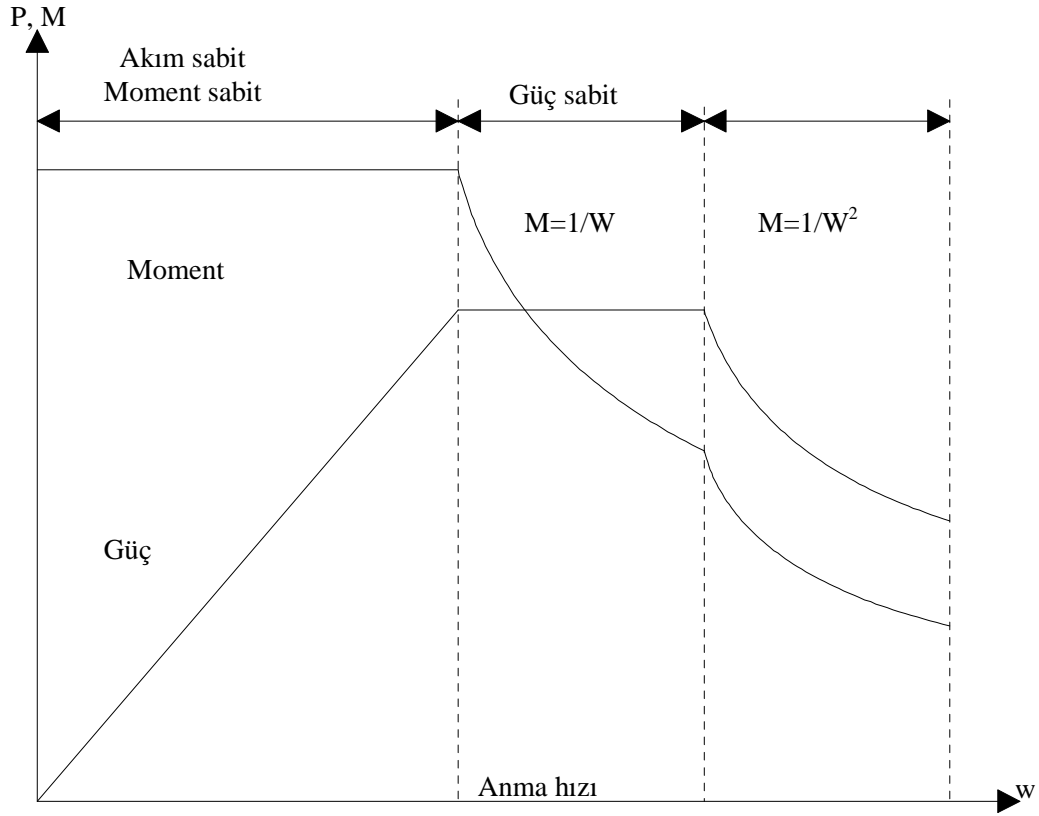
$$M = \frac{1}{2} I_a^2 \frac{dL_a}{d\theta} + \frac{1}{2} I_b^2 \frac{dL_b}{d\theta} + \frac{1}{2} I_c^2 \frac{dL_c}{d\theta} \quad (2.3)$$

Bu ifadeden anlaşılacağı üzere, üretilen moment akımın karesi ve sargı endüktansının rotor konumuna göre değişim hızı ile orantılıdır. Dolayısıyla, üretilen moment akımın yönünden bağımsızdır ve sargı, endüktansının alabileceği en büyük ve en küçük değerlerinin oranı (L_{\max} / L_{\min}) üretilen moment açısından büyük önem taşımaktadır.



Şekil 2.7: ARM'da rotor konumuna göre moment değişimi.

Motor veya generatör olarak çalışmada enerji dönüşümü için faz sargılarının rotor konumuna göre uygun sırayla ve süreyle uyarılması gerekmektedir. Motor çalışmada döndürme momenti yönü ise uyarma akımının rotor konumuna göre başlangıç anı denetlenerek, değeri ise uyarma akımı denetlenerek değiştirilebilir. Bunu sağlayabilmek için ARM, rotor konumuna göre uygun faz sargılarını besleyerek uyarma akımını denetleyebilecek bir güç ve kontrol katı devresine gereksinim duymaktadır. Uygun bir güç ve kontrol katı ile denetlenen ARM'un moment-hız ve güç-hız değişimi genel olarak Şekil 2.8' de gösterildiği gibidir.

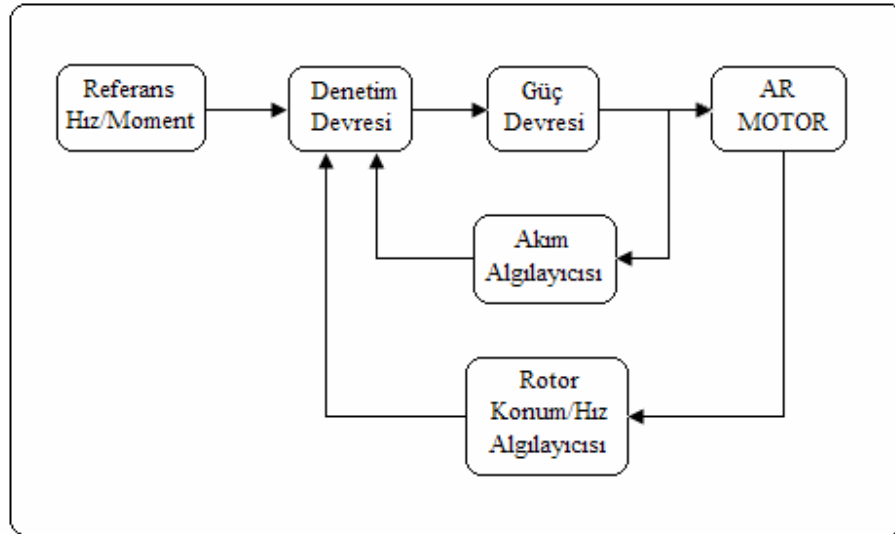


Şekil 2.8: ARM'unun moment-hız, güç-hız değişimi.

Moment-hız değişimi temel olarak üç bölgede incelenebilir. Birinci bölge, akımın sabit tutulduğu momentin anma hızına kadar sabit kaldığı bölgedir. Anma hızından sonra hızın kendisi ve hızın karesi ile ters orantılı değişen iki bölge mevcuttur. Anma hızına kadar faz sargılarının besleme süresi ve rotor konumuna göre başlangıç anı sabit tutularak, uyarma akımı ile moment denetimi yapılabilmektedir. Anma hızından sonra

faz sargılarının besleme süresi, rotor konumuna göre başlangıç anı ayarlanarak hız denetimi gerçekleştirilmektedir (Diril, 2000).

ARM doğrudan bir doğru akım kaynağından (D.A.) veya alternatif akım (A.A.) kaynağından beslenemez, bundan dolayı bir güç elektroniği devresine ihtiyaç vardır ve ARM'ı bu güç elektroniği devresi ile birlikte bir tahrik sistemi oluşturulmaktadır. Şekil 2.9'da bir ARM'una ait tahrik sistemi verilmiştir. Bu şekilde, bir denetim devresi ve bir güç devresi bulunmaktadır. Güç devresi, bir elektronik komütatör gibi çalışarak faz akımını denetlemekte ve sürekli hareketi sağlamaktadır. Denetim devresi, akım ve rotor konum bilgisini alarak, doğru faz sargısının beslenebilmesi için güç devresine anahtarlama işareti göndermektedir. Denetim devresi aynı zamanda referans hız/moment bilgisi ile motor hız/moment denetimini gerçekleştirmektedir.



Şekil 2.9: AR motoruna ait tahrik sistemi.

2.4. ARM'da Moment Üretimi

ARM'da, önceki ayıttta açıklandığı üzere ortalananmış rotor konumu ile karşılıklı rotor konumu arasındaki relüktans değişiminden yararlanarak manyetik enerjinin mekanik

enerjiye dönüşümü ile moment oluşumu gerçekleşmektedir. Moment oluşumu, enerji dönüşümü yöntemi ile açıklanabilir ve bunun için ARM'un faz sargısının halkaladığı akının rotor konumuna göre değişimi incelenebilir. Doymuş malzeme (lineer olmayan manyetik malzeme) kullanan AR motorda halkalanma akısının sargı akımına göre, farklı rotor konumlarındaki $\psi(i,\theta)$ değişimi (Bkz. Şekil 2.3)'de gösterildiği gibidir.

Burada ortalananmış rotor konumundan başlayarak stator kutbu ile rotor kutbunun örtüşmeye başladığı rotor konumuna kadar $\psi(i,\theta)$ değişimi yaklaşık doğrusaldır, bundan dolayı bu durum sargı endüktansının bu bölge içinde sabit kalmasını açıklamaktadır. Stator ve rotor kutuplarının örtüşmeye başladığı konumdan karşılıklı konuma kadar olan bölgede halkalanma akısı rotor konumu ile artmakta ve lineer olmayan manyetik malzemenin etkisi ile $\psi(i,\theta)$ doğrusallıktan uzaklaşmaktadır. Bu nedenle, karşılıklı rotor konumunda doymuş çalışmadaki endüktans, lineer çalışmadaki endüktanstan daha küçük olabilmektedir. Başka bir ifade ile akımın artması ile faz sargı endüktansının en büyük değeri küçülmekte ve çalışma koşullarına göre farklı değerler alabilmektedir.

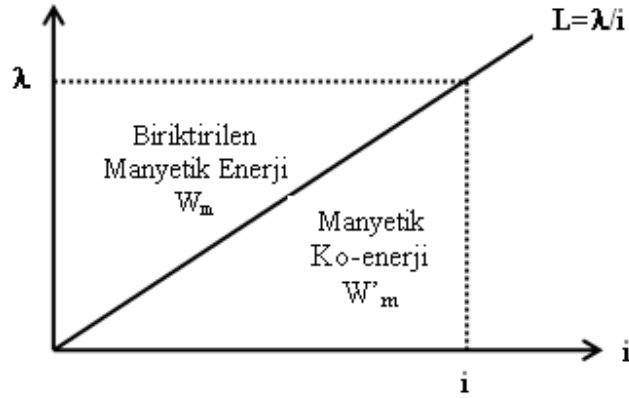
Stator sargılarından herhangi bir faz uyarılması durumunda, pozitif moment elde etmek için akım endüktansın artma yönünde, negatif moment elde etmek için ise endüktansın azalma yönünde uygulanması gerekmektedir.

2.5. ARM'un Lineer Modeli

ARM'un çalışması, bir faz sargısı uyarıldığı anda uyarılan faza karşılık gelen rotor kutup çifti manyetik akı devresinin manyetik direncini (relüktansını) minimum yapmak için enerjilenmiş faz sargısına doğru çekilir. Uygun anahtarlama devreleri kullanılarak, faz sargıları ard arda ve her defasında aynı yönde uyarılarak sürekli dönüş sağlanır. Böylece motor, dönme yönüne bağlı olarak uygun sıra içerisinde, her iki yönde de sağlanabilen dönme momenti ile hareket eder. ARM doğru gerilim ile beslendiğinden sargılara uygulanan gerilimin, aynı sargının tekrar enerjilenmesine kadar geçen süre içerisinde bir direnç üzerinden veya kaynağa geri verilerek boşaltılması gerekmektedir. Anahtarlama Relüktans Motoru çıkık stator ve rotor kutup yapısından dolayı gereği değişken bir hava

aralığına sahiptir ve iki farklı rotor konumu arasında endüktans değeri büyük farklılık gösterir. Enerjilenen hareketli kısmı maksimum endüktans konumuna çekecek şekilde moment oluşur. Bu da artan endüktans bölgesinde momentin üretilmesi olarak tanımlanmıştır. Kutupların karşılıklı olduğu konumda hava aralığı çok küçük bir değer almaktadır ve bu durumda motor manyetik doyma altında çalıştırılabilir.

ARM'u manyetik doyma bölgesinde çalışırken, manyetik devrede depolanan enerjisi (W_m), koenerjisinden (W_m') daha küçüktür. Bundan dolayı ARM'u kaynaktan aldığı enerjinin büyük bir bölümünü mekanik enerji olarak milinden verebilir. İdeal olarak AR motor manyetik doyma bölgesinde çalışırken, kaynaktan aldığı enerjinin tamamını mekanik enerji olarak miline verebilir. Fakat lineer olarak çalışan ARM, aldığı enerjinin yarısını mekanik enerji olarak miline verirken yarısını da kaynağa aktarır. Motor küçük yüklerde küçük akımlar çekeceğinden dolayı stator ve rotor kutuplarının karşılıklı olduğu konumlarda ve ortalanmış konumlarda akı ile akım arasındaki ilişki doğrusal olacaktır. Şekil 2.10'de motorun lineer modeli için geçerli olan akı ile akım arasındaki ilişkisi verilmektedir.



Şekil 2.10: ARM'nun doğrusal modelde akı-akım ilişkisi.

Lineer modelde faz sargısından geçen akım ile motorda oluşan akı arasındaki ilişki doğrusal olduğundan bu ilişki denklem 2.4'deki gibi yazılabilir;

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

Şekil 2.10'deki eğrinin eğimi endüktans değerini verir. ARM doğrusal olarak çalıştığı için, L stator sargı endüktansı, θ rotor konumunun veya t zamanının bir fonksiyonu olabilir. Ancak akımın fonksiyonu olamaz. Şekil 2.10'deki eğrinin üzerinde kalan alan manyetik alanda depolanan enerjiyi, altında kalan alan ise koenerjiyi göstermektedir. Motordaki koenerji mekanik güce dönüşen enerji olarak kabul edilir. Başka bir ifade ile moment üretimi koenerji ile gerçekleşir.

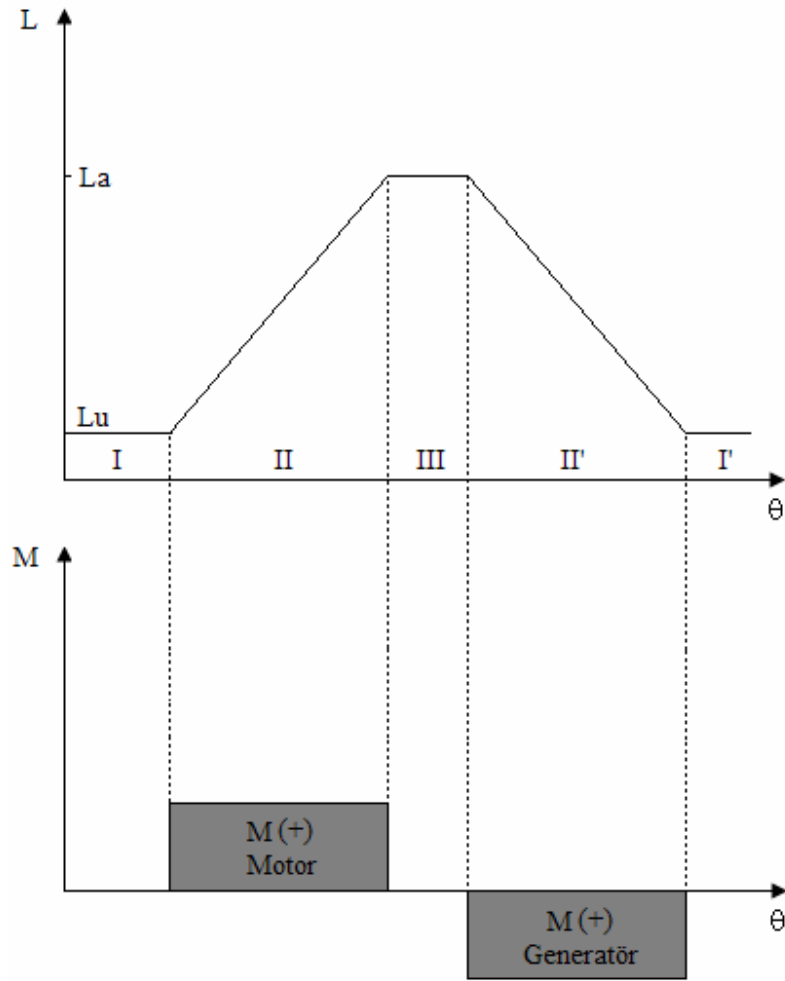
Doğrusal çalışma bölgesinde manyetik alanda depolanan enerji ile koenerji birbirine eşittir ($W_m=W_m'$). Sisteme verilen enerji eğrinin altındaki ve üstündeki alanların toplamına eşittir. Enerjiler arasındaki bu ilişkiden dolayı denklem 2.5 yazılabilir.

$$W_m=W_m'=1/2 i^2 L(\theta). \quad (2.5)$$

Burada $L(\theta)$ sargı endüktansı olup sadece rotor konumunun bir fonksiyonudur. Buradan hareketle motora ait moment ifadesi ise aşağıdaki gibi yazılır;

$$M= 1/2 i^2 d L(\theta)/d\theta \quad (2.6)$$

Görüldüğü üzere moment ifadesi sargılardan akan akımın karesi ile orantılı olup akımın yönünden bağımsızdır. ARM'un lineer bölgede çalışmasında, sargı endüktansının ve momentin rotor konumuna göre değişim eğrileri Şekil 2.11'de verilmektedir. Motor lineer bölgede iken $dL/d\theta$ oranının sabit olduğu bilindiğinden, eğer akımın değeri de sabit tutulursa sabit değerde moment elde edilebilir. (II) nolu bölgeden pozitif moment üretimi ile ARM motor olarak çalışmakta (II') bölgesinde ise negatif bir moment elde edilerek ARM generatör olarak çalışmaktadır.



Şekil 2.11: Lineer bölgede çalışan ARM'nun endüktans ve moment değişimi.

Endüktans eğrisinden görüleceği üzere, stator ve rotor kutupları ortalanmış konumda iken endüktans değeri en küçük değerinde, karşılıklı konumda ise en büyük değerindedir. Diğer yandan rotor kutbu stator kutbuna yaklaşıp çakışmaya başladıkça endüktans değeri en küçük değerden artmaya başlamaktadır. Aynı şekilde rotor kutbu stator kutbundan uzaklaştıkça endüktans değeri en büyük değerden azalmaya başlamaktadır. Şekil 2.11'deki bölgeler ve bu bölgelerdeki gerilim ile moment ifadeleri genel olarak aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

- (I.Bölge) : Ortalanmış konum, endüktansın en küçük olduğu bölge,

$$V=R.i+L_u di/dt \quad (2.7)$$

$$M=0$$

- (II.Bölge) : Endüktansın doğrusal arttığı bölge,

$$W=R.i+L(\theta) di/dt + \omega \partial L/\partial \theta i \quad (2.8)$$

$$M= + \frac{1}{2} i^2 \partial L/\partial \theta \quad (2.9)$$

- (III.Bölge) : Karşılıklı konum, endüktansın en büyük olduğu bölge,

$$V=R.i+L_a di/dt \quad (2.10)$$

$$M=0$$

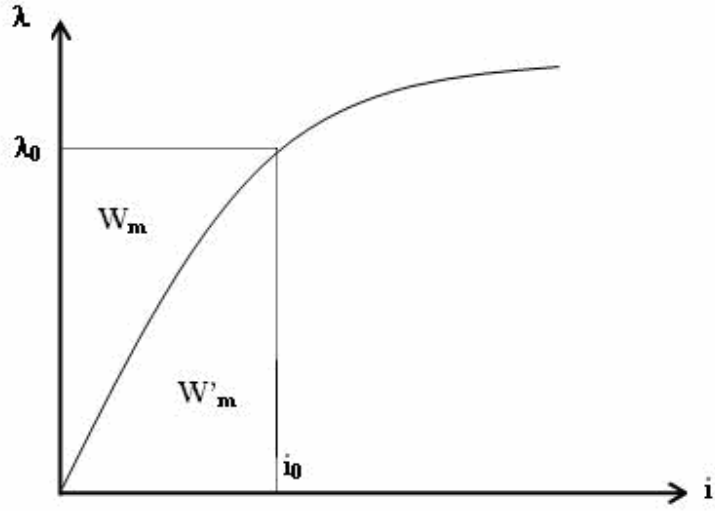
- (II.Bölge) : Endüktansın doğrusal azaldığı bölge,

$$W=R.i+L(\theta) di/dt - \omega \partial L/\partial \theta i \quad (2.11)$$

$$M= - \frac{1}{2} i^2 \partial L/\partial \theta \quad (2.12)$$

2.6. ARM'un Doymuş Modeli

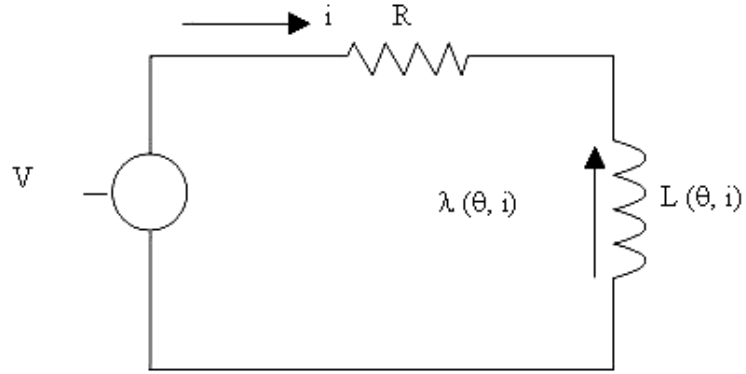
ARM'nun lineer modelinde endüktansların doğrusal olarak değiştiği kabul edilir. Ancak gerçekte yüksek değerli faz akımları için ARM'nun saç malzemesi hemen hemen neredeyse her zaman manyetik doymada olacaktır. Manyetik doyma etkisinin motora oldukça fayda sağladığı görülebilir. Manyetik doyma bölgesindeki ARM'nun halkalanma akısı-akım ilişkisini gösteren eğrilerini inceleyerek manyetik doymanın faydalarından biri açıklanabilir.



Şekil 2.12: Manyetik doyma bölgesinde çalışan ARM'nun akı-akım ilişkisi.

Şekil 2.12'de motorun lineer olmayan çalışma bölgesinde manyetik alanda depolanan enerji (W_m) ile mekanik enerjiye dönüştürülen (W'_m) koenerji arasındaki ilişki görülmektedir. ARM manyetik doyma bölgesinde çalışırken koenerjisi manyetik alanda depolanan enerjisinden daha büyüktür. Bir başka ifade ile manyetik doyma bölgesinde çalışan bir ARM'u kaynaktan aldığı enerjinin büyük bir kısmını mekanik enerji olarak motor milinden verebilir (Özoğlu, 1999).

Manyetik akı doğrusal bölgede çalışan ARM'de sadece rotor pozisyonun fonksiyonu iken, doğrusal olmayan bölgede ise hem rotor pozisyonunun hem de akımın bir fonksiyonudur. İdeal olarak ARM manyetik doyma bölgesinde çalışırken, doğrusal bölgede çalışan bir ARM'una göre iki kat daha büyük mekanik momenti olmalıdır. İdeal olarak manyetik doymada çalışan bir ARM'u aldığı enerjinin tamamını mekanik enerji olarak çıkışta verebilir. Ancak doğrusal çalışmada ARM'u aldığı enerjinin %50'sini mekanik enerji olarak, %50'sini de kaynağa geri aktarır. Doğrusal bölgede çalışan bir ARM'nun, manyetik doymada çalışan bir ARM'una göre daha büyük kAV/kW ihtiyacı olduğu dikkate alınır, manyetik doyma bölgesinde çalışan bir ARM'u doymasız bölgede çalışan ARM'una göre daha küçük güçlü bir çeviriciye ihtiyaç duyduğu söylenebilir.



Şekil 2.13: ARM'nun bir fazına ait eşdeğer devre.

ARM'nun bir fazına ait eşdeğer devresi incelenerek motorun manyetik doyma bölgesindeki çalışması sırasında denklemlerin nasıl değiştiği elde edilebilir. Motorun bir fazına ait eşdeğer devresi Şekil 2.13'de verilmiştir.

Stator sargısının halkaladığı akı;

$$\lambda(\theta, i) = L(\theta, i)i \quad (2.13)$$

Stator sargı endüktansı, rotor çıkık kutbu tam karşısına geldiği anda en büyük değere sahiptir. Ayrıca bu endüktans manyetik malzemenin manyetik doyma özelliğinden dolayı sadece θ dönme açısı ile değişmeyip, sargıdan geçen akıma da bağlı genel olarak $L=L(\theta, i)$ şeklinde gösterilir.

Motor uçlarındaki gerilim;

$$V = R.i + \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.14)$$

$$V = R.i + \frac{d}{dt}[L(\theta, i)i] \quad (2.15)$$

$$V = R.i + \frac{dL(\theta, i)}{dt}.i + L(\theta, i), \frac{di}{dt} \quad (2.16)$$

$$V = R.i + \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \cdot i + \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial i} \cdot \frac{di}{dt} \cdot i + L(\theta, i) \cdot \frac{di}{dt} \quad (2.17)$$

$$V = R.i + \left[L(\theta, i) + \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial i} \cdot i \right] \frac{di}{dt} + \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \cdot i \quad (2.18)$$

$$V = R.i + l_{\text{artan}}(\theta, i) \frac{di}{dt} + E(\theta, i) \quad (2.19)$$

Son denklemde $l_{\text{artan}}(\theta, i)$ artan endüktansı ve $E(\text{emk})(\theta, i)$ zıt elektromotor kuvvettir. Birinci terim sargı direncindeki gerilim düşümü, ikinci terim akım değişmelerine karşı oluşan gerilim, üçüncü terim ise hızla orantılı olarak oluşan gerilimdir. Motorun çalışma durumlarında verilen ifadelerde bazı ihmaller yapılabilir. Eğer akım çok küçükse $\left(\frac{\partial L}{\partial i}\right) \cdot i$ ihmal edilebilir. Hızın çok küçük olduğu durumlarda ise e ihmal edilebilir. Genel olarak doymuş durumda depolanan enerji ve koenerji ifadeleri aşağıda verilen denklemlerle tanımlanabilir.

$$W_m = \int_0^{\lambda} i(\lambda, \theta) d\lambda \quad (2.20)$$

$$W'_m = \int_0^i \lambda(i, \theta) di \quad (2.21)$$

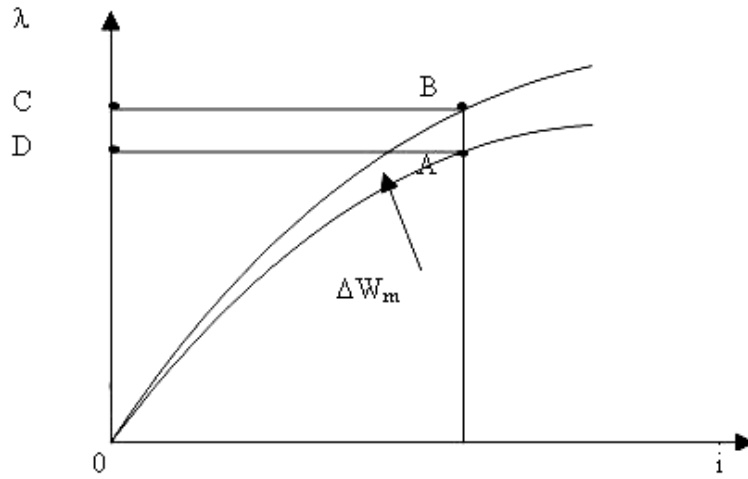
Bulunan koenerji ifadesinden manyetik doyma çalışma bölgesindeki motorun moment ifadesi aşağıdaki şekilde bulunur.

$$M = \frac{\partial W'_m}{\partial \theta} \quad (2.22)$$

Elde edilen bu moment ifadesi ARM'una ait en genel moment ifadesidir. Bundan dolayı moment değişimi Şekil 2.12'de gösterilen koenerji ile yakından ilişkilidir. Eğer sargı akımını sabit tutup rotoru $\Delta\theta$ kadar yer değiştirirsek ΔW_m miktarında enerji değişimi olur. Buradan moment şu şekilde yazılabilir;

$$M = \frac{\Delta W_m}{\Delta\theta} \quad (2.23)$$

Bu durum Şekil 2.14'da gösterilmektedir. Akımın sabit kalarak rotorun $\Delta\theta$ kadar yer değiştirmesi ile birlikte koenerjideki değişime eşit miktarda mekanik iş yapılır. Rotorun A konumundan B konumuna hareketi ile birlikte besleme ile yapılan enerji dönüşümü şu şekildedir;



Şekil 2.14: Sabit akımda koenerji değişimi ve moment üretimi.

$$\Delta W_e = (\text{Alan})_{ABCD} \quad (2.24)$$

Manyetik alanda depolanan enerjideki değişim miktarı;

$$\Delta W_m = (\text{Alan})_{OBC} - (\text{Alan})_{OAD} \quad (2.25)$$

Yapılan mekanik iş miktarı;

$$\Delta W_m = M. \Delta\theta \quad (2.26)$$

$$\Delta W_m = \Delta W_e - \Delta W_m \quad (2.27)$$

$$\Delta W_m = (\text{Alan})_{ABCD} - ((\text{Alan})_{OBC} - (\text{Alan})_{OAD}) \quad (2.28)$$

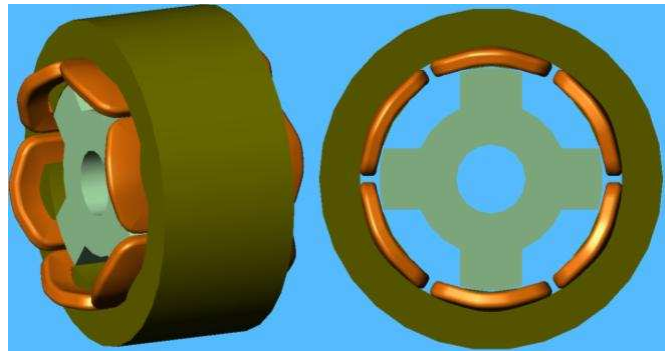
$$\Delta W_m = ((\text{Alan})_{ABCD} + (\text{Alan})_{OAD}) - (\text{Alan})_{OBC} \quad (2.29)$$

$$\Delta W_m = (\text{Alan})_{OAB} \quad (2.30)$$

Besleme kaynağından verilen enerjinin tümü mekanik işe çevrilmez. Manyetik alanda depolanan enerji boşa harcanmaz, ama A'dan B'ye yapılan hareket sırasında da enerji dönüşümü yapılmaz. Bu durum çeviricinin boyutlandırılmasında önemli bir etkidir.

2.7. Klasik ARM'un Manyetostatik Analizi

Bu bölümde kısa kutup adımlı sargı yapısına sahip anahtarlamalı relüktans motorunun tüm çalışma karakteristikleri sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile elde edilmektedir. Kısa kutup adımlı sargı yapısına sahip anahtarlamalı relüktans motoru Şekil 2.15'de verilmektedir.



Şekil 2.15: Kısa kutup adımlı sargı yapısına sahip ARM.

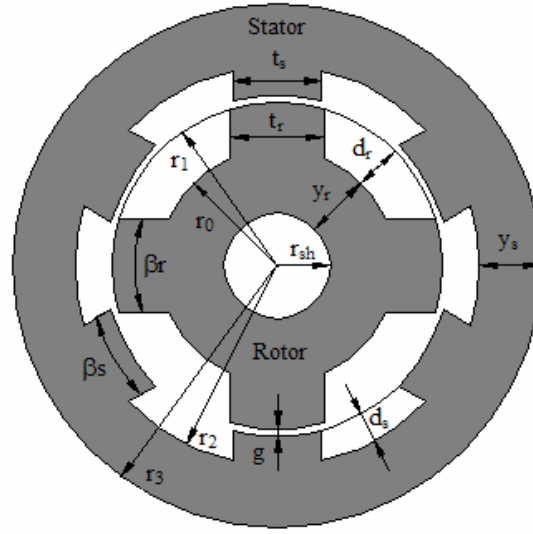
ARM'nun çalışma karakteristikleri hem doymuş hem de doğrusal bölgeler için tespit edilmektedir. Sonlu Elemanlar Yöntemi ARM'na uygulamak amacıyla Maxwell 2D sonlu elemanlar analiz programı kullanılmıştır. Manyetik analiz yazılımı iki boyutlu manyetostatik çözüm yapmakta ve doğrudan sargının halkaladığı akıyı hesaplayabilmektedir. Rotor pozitif moment bölgesi içerisinde, karşılıklı konumdan ortalanmış konuma kadar farklı ara konumlarda sabit tutulmakta ve her bir konumda farklı akım değerleri için manyetik analiz hesaplamalarıyla $\psi(i,\theta)$ değişimi belirlenmektedir.

Örneğin, üç fazlı (6/4) motor için ($0^\circ \dots 45^\circ$) aralığında 10 adet rotor konumu ve (15A...255A) aralığında 17 adet akım değeri için toplam 170 adet farklı hesaplama ile motora ilişkin $\psi(i,\theta)$ değişimi belirlenmektedir. Laminasyon üzerinde akı yoğunluğu belirlemek üzere bilgi sağlamak ve gerektiğinde tasarım aşamasında laminasyonun iyileştirilmesine yönelik çalışmalara izin vermektedir. Yapılan analizler iki boyutludur ve gerçek motorda sargı başlarında oluşan kaçak akıları hesaba katmamaktadır. Dolayısıyla iki boyutlu alan analiziyle elde edilen halkalanma akısı sonuçlarıyla gerçek motordaki halkalanma akısı arasındaki farkın bilinmesi önemlidir (Krishnan ve diğ., 1988, Lawrenson ve diğ., 1980).

Bugüne kadar yapılan çalışmalardan, stator çapına göre yeterince uzun paket boyuna sahip motorlar için, iki boyutlu analizin tatmin edici sonuçlar verdiği bilinmektedir. Bu farkın büyüklüğünün belirlenebilmesi ancak deneysel çalışmayla mümkündür (Moallem ve Ong, 1990).

2.7.1. Analizi yapılan motorun genel özellikleri

Çalışmada kullanılan 6 stator, 4 rotor kutup yapısına ve kısa kutup adımlı sargı yapısına sahip klasik ARM'una ait boyutlar ve motorun kesit görünüşü Şekil 2.16'de gösterilmektedir (Shyam, 2001).



Şekil 2.16: ARM'nun kesit görünüşü ve boyutları.

Tablo 2.1: ARM'unun boyutlarına ilişkin tablo.

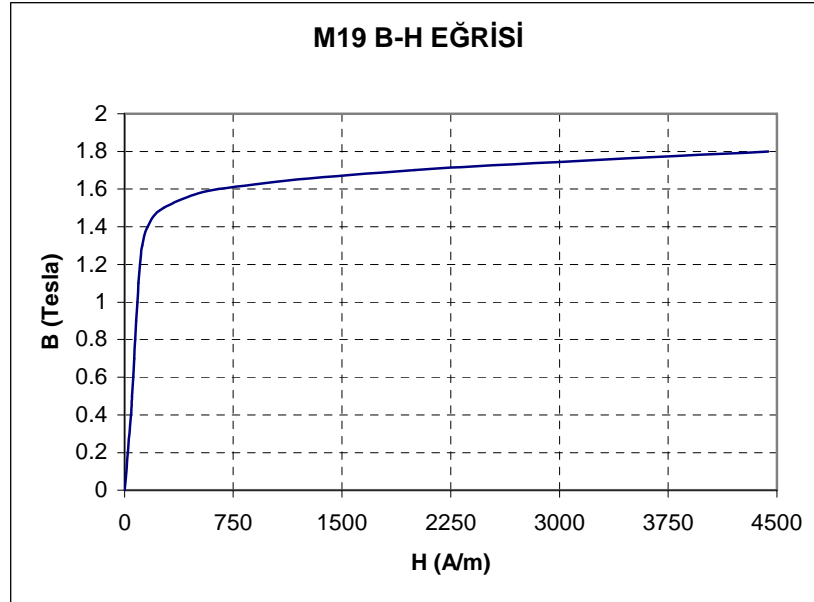
Parametrenin Adı	Sembolü	Değeri
Stator kutup yüksekliği	d_s	0,0265
Rotor kutup yüksekliği	d_r	0,0447
Motor derinliği	m_d	0,2981
Hava aralığı	g	0,0020
Satator kutup genişliği	t_s	0,07816
Rotor kutup genişliği	t_r	0,08214
Stator kutup sayısı	N_s	6
Rotor kutup sayısı	N_r	4
Stator boyunduruk kalınlığı	y_s	0,0546
Rotor boyunduruk kalınlığı	y_r	0,0575
Rotor boyunduruk yarıçapı	r_0	0,1043
Rotor kutup yarıçapı	r_1	0,1490
Stator iç boyunduruk yarıçapı	r_2	0,1775
Stator dış boyunduruk yarıçapı	r_3	0,2321
Mil yarıçapı	r_{sh}	0,0468
Stator kutup açısı	β_s	30
Rotor kutup açısı	β_r	32

Kullanılan ARM'nun geometrik boyutları ve bu boyutların değerleri Tablo 2.1'de verilmiştir. Birim sistemi olarak SI sistemi kullanılmış ve boyut değerleri de buna göre belirlenmiştir. Ayrıca motorun plaka değerleri Tablo 2.2'de verilmektedir.

Tablo 2.2: ARM'nun plaka değerleri.

Parametrenin Adı	Sembolü	Değeri
Maksimum güç	P_{\max}	34 kW
Sürekli güç	P_c	23 kW
D.A gerilim	V_{da}	300 V
Nominal hız	V_{nom}	1200 rpm
Maksimum hız	V_{\max}	6000 rpm

Rotor ve stator gövdesi doymuş saç malzemeden (M19) yapılmış olup malzemenin B-H eğrisi Şekil 2.17'da gösterilmektedir. Eğri incelendiğinde ARM'nun lineer olmayan bir malzeme karakteristiğine sahip olduğu görülmektedir. Bu karakteristiğin hatasız olarak tanımlanması, ilerleyen kısımlarda motorun davranışlarını doğru bir Şekilde elde etmek için son derece önemli etkindir.



Şekil 2.17: Motorda kullanılan malzeme için B-H eğrisi.

Bu çalışmada motorun bazı temel boyut değerleri Tablo 2.3' de belirtilen aralıklarda değiştirilerek her biri için ayrı ayrı analiz yapılmıştır. Değiştirilen bu boyutların (hava aralığı, stator ve rotor kutup açısı değerleri) seçim aralıkları ayrıntılı olarak bir başlık altında aşağıdaki kısımda yer almaktadır.

Tablo 2.3: ARM'nun analiz sırasında değiştirilen boyutlarına ilişkin tablo.

Parametrenin Adı	Sembolü	Değeri
Hava aralığı	g	0,0020
		0,0030
		0,0040
Rotor kutup açısı	β_r	31
		32
		33

2.7.2. Hava aralığı, stator ve rotor kutup boyutlarının değişim aralığının belirlenmesi

Bu çalışmada Tablo 2.4'de geometrik boyutları verilen 6/4 ARM'unun hava aralığı (g), stator ve rotor kutup açısı değerlerinin değişiminin çalışma eğrileri üzerindeki etkileri incelenmektedir. Bu doğrultuda ARM'unda sadece hava aralığı, stator ve rotor kutup açısı değerlerinin değişim aralığının belirlenmesi ayrı ayrı ele alınmaktadır.

2.7.2.1. Hava aralığı değerinin değişim aralığının belirlenmesi

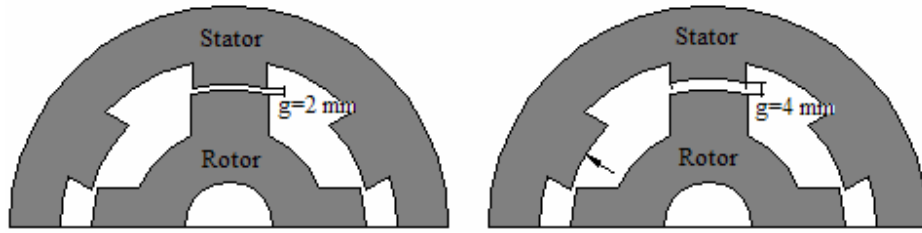
Anahtarlamalı relüktans motorlarda hava aralığı, çalışma karakteristiklerine etkisi bakımından önemli bir parametredir. Bundan dolayı ARM'da hava aralığının mümkün olduğunca küçük değerlerde olması istenmektedir. Hava aralığı değişimi ile hava aralığı relüktans değerinde doğru orantılı olarak değişmektedir. Denklem 2.31'de hava aralığı ile hava aralığı relüktansı arasındaki ilişki verilmektedir.

$$R_h = \frac{g}{\mu_0 A} \quad (2.31)$$

Hava aralığı relüktansı ile endüktans arasındaki ilişki ise denklem 2.32’de verilmektedir. Denklemden anlaşılacağı gibi hava aralığı relüktansının değeri ile endüktans değeri ters orantılı olarak değişmektedir. Dolayısı ile daha önce belirtildiği gibi endüktans değerindeki bu değişim moment değerinin de değişmesine yol açmaktadır. Buradan hareketle hava aralığı değişimi, ARM’unun en önemli çalışma karakteristiklerinden moment değerini değiştirmektedir.

$$L = \frac{N^2}{R_h} \quad (2.32)$$

Hava aralığı değerinin küçük olması momentin maksimum değerinin artmasını ve kullanılan sürücü devresinde akımın ve gerilimin minimum seviyede yeterli olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, faz akımının dengede kalabilmesi ve akustik gürültüyü minimum seviyede tutulabilmesi için düzgün bir hava aralığına ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak tasarım esnasında, milin esnemesi ve kullanılan malzemelerin sıcaklıktan dolayı genleşmesi göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bundan dolayı her türlü çalışma koşulu düşünülerek toleranslı bir şekilde seçim yapılmalıdır.



Şekil 2.18: 6/4 ARM’unda hava aralığı değişimi

Bu çalışmada hava aralığı şekil 2.18’de gösterildiği gibi ok yönünde stator kutupları daraltılarak değiştirilmektedir. Böylece motorun diğer geometrik boyutlarını değiştirmeden sadece stator kutuplarının, dolayısıyla sargı alanının daraltılmasıyla hava aralığı değişimi gerçekleştirilmektedir. Bu doğrultuda hava aralığı değeri 2mm, 3mm ve 4mm olacak şekilde incelenmektedir.

2.7.2.2. Stator ve rotor kutup açı değerlerinin belirlenmesi

ARM tasarımının stator ve rotor kutup açı değerlerinin seçimi önemli bir parçasıdır. Bu seçim işlemi yapılırken, atalet momentini yenebilme, statik moment şekli ve rotor pozisyon karakteristikleri gibi birçok nokta göz önünde bulundurulmaktadır. Kalkış esnasında atalet momentini yenebilmesi için stator ve rotor kutup açılarının mümkün olduğunca küçük olması istenir. Stator ve rotor kutup açı değerlerinin belirlenmesini üç madde olarak inceleyelim.

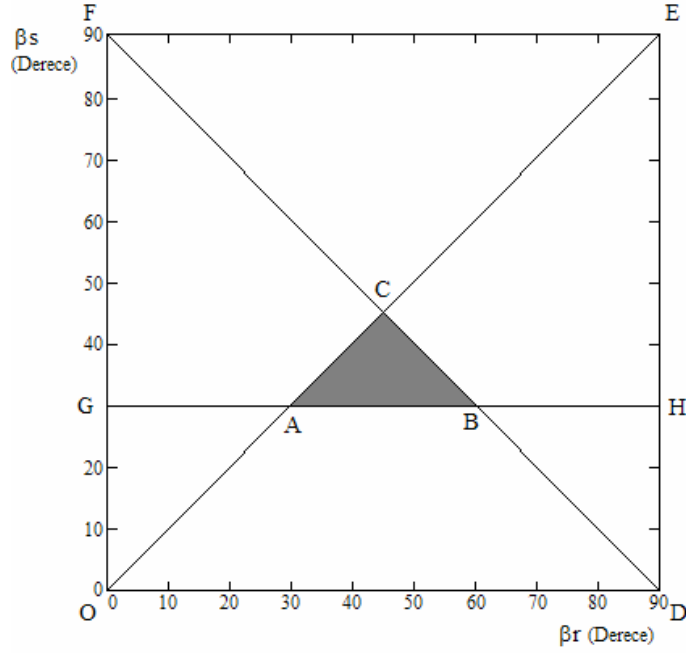
1. Pratikte stator kutup açı değeri (β_s), rotor kutup açı değerine (β_r) eşit ya da daha küçük olmalıdır ($\beta_s \leq \beta_r$).
2. Stator kutup açı değeri (β_s), adım açısına (ε) eşit ya da daha büyük olmalıdır ($\beta_s \geq \varepsilon$). Stator kutup açısı adım açısından küçük seçildiği zaman bazı rotor konumları için motorun ilk hareketi sağlanamaz. Adım açısı denklem 2.33'de verilmektedir.

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{mN_r} \quad (2.33)$$

Adım açısı değeri denklem 2.33'den de anlaşılacağı üzere motor rotor kutup sayısına (N_r) ve faz sayısına bağlıdır (m). Örneğin 6/4 ARM için adım açısı 30 derecedir. Buradan hareketle stator kutup açı değeri 30 dereceden küçük olarak seçilemez.

3. Maksimum kutup açı değerleri, stator ve rotor kutuplarının örtüştüğü durumda hesaplanır. Denklem 2.34 'de ifade edildiği gibi hesaplanabilir.

$$\beta_s < \frac{2\pi}{N_r} - \beta_r \quad (2.34)$$

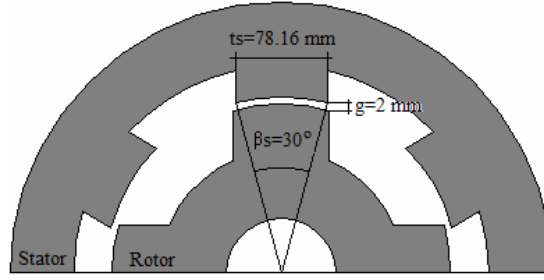


Şekil 2.19: 6/4 ARM için kutup açısı değer aralığı

Yukarıda belirtilen stator ve rotor kutup açısı değer seçim aralıklarını bir şekil üzerinde ifade etmek mümkündür. Bu doğrultuda, 6/4 ARM için stator ve rotor kutup açısı değerlerinin seçim aralıkları Şekil 2.19'da verilmektedir. Şekil dikkatlice incelendiğinde OE eğrisinin alt bölgesi 1. maddeyi, GH eğrisinin üstündeki bölge 2. maddeyi ve DF eğrisinin altındaki bölge ise 3. maddeyi göstermektedir. Bu bölgelerin kesiştiği alan ise stator ve rotor kutup açısı değerlerinin aralıklarını ifade etmektedir.

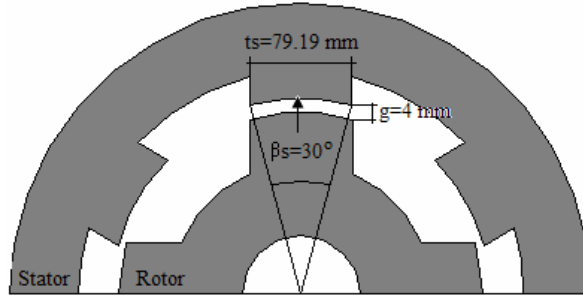
Bu çalışmada stator kutup açısı 30° ve rotor kutup açısı değeri ise 31° , 32° , 33° olacak şekilde seçilerek analiz yapılacaktır. Ayrıca daha öncede belirtildiği gibi hava aralığı değeri 2mm, 3mm ve 4mm seçilecektir.

Motor geometrisindeki hava aralığı değerinin değiştirilmesi ve buna bağlı olarak stator kutup açısı değerinin ise sabit tutulması Şekil 2.20, 2.21, 2.22 ile açıklanmaktadır. Şekil 2.20 ile 2mm hava aralığına ve 30° stator kutup açısına sahip 6/4 ARM'unun kesit görünüşü verilmektedir.

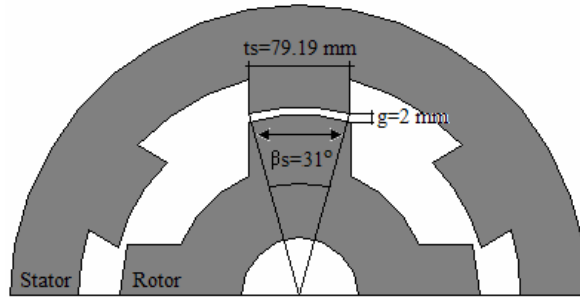


Şekil 2.20: 2mm hava aralığına sahip 6/4 ARM kesit görünüşü ($\beta_s=30^\circ$).

Şekil 2.21’de ise hava aralığı değeri, şekil üzerindeki ok yönünde, stator kutuplarının daraltılması ile 4mm olarak değiştirildiği gösterilmektedir. Ayrıca hava aralığı değeri artışının yanı sıra stator kutup genişlik değeri de (t_s) artış göstermektedir. Aynı zamanda hava aralığı sabit tutularak stator kutup açısı artırılarak da stator kutbundaki bu artış sağlanabilir. Bu durum Şekil 2.22 ile açıklanmaktadır. Buradan hareketle hava aralığı değişimi ve stator kutup açısının değişimi stator kutup genişliğinin değişmesini sağladığı söylenebilir.



Şekil 2.21: 4mm hava aralığına sahip 6/4 ARM kesit görünüşü ($\beta_s=30^\circ$).



Şekil 2.22: 2mm hava aralığına sahip 6/4 ARM kesit görünüşü ($\beta_s=31^\circ$).

Bu çalışmada hava aralığı değişimi ile analiz yapılacağı için stator kutup açısı değeri sabit tutularak modelleme yapılacaktır. Ayrıca önceki yapılan çalışmalar, stator kutup değişimi ile hava aralığı değişiminin ARM'unun çalışma karakteristikleri etkilerinin benzer olduğunu ortaya koymaktadır (Wichert ve diğ., 2001).

Motorun geometrik ve manyetik özelliklerinin verilmesi ile bundan sonraki kısımda ARM'unun SEY ile modellenmesi gerçekleştirilmektedir. Bu modellemeye ait işlem aşamaları kısaca ele alınmaktadır.

2.7.3. Sonlu elemanlar yöntemi ile modelin oluşturulması

Bu kısımda sonlu elemanlar yöntemi ile ARM modellenin oluşturulmasına ait aşamalar kısaca başlıklar halinde incelenmektedir.

2.7.3.1. Geometrinin modellenmesi

Analiz aşamasının bu bölümünde, motorun geometrisi boyutlarına uygun olarak oluşturulmaktadır. Çizim sonlu elemanlar programı tarafından gerçekleştirilebileceği gibi, herhangi bir CAD programı tarafından da çizilebilir ve IGES/DXF formatında transfer edilebilir. Fakat bu durumda toleranslara dikkat edilmelidir. Ancak sonlu eleman programları tam anlamıyla çizim programı olmadıkları için herhangi bir CAD programı kullanmak çizimde kolaylık sağlamaktadır.

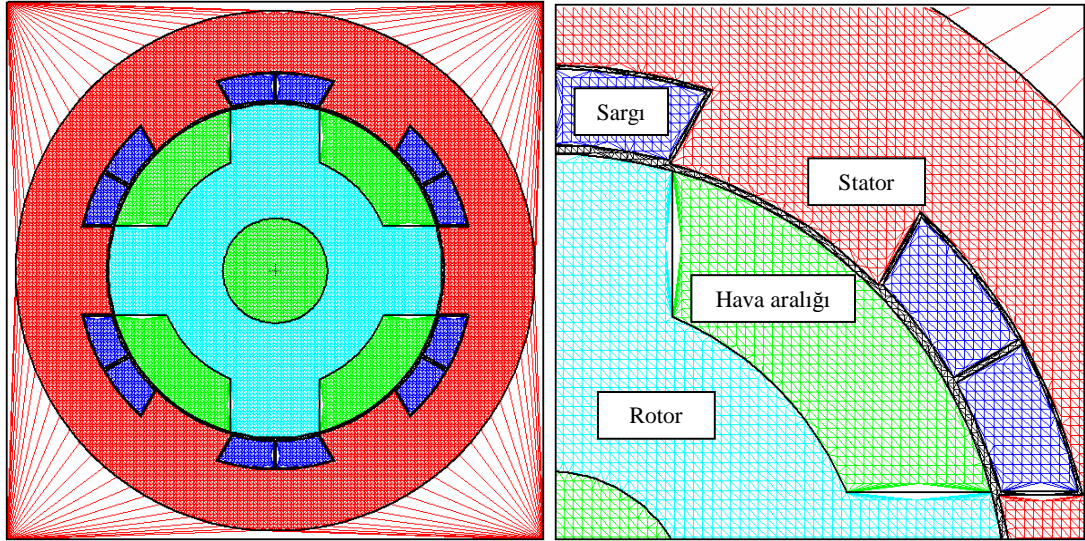
2.7.3.2. Kullanılan malzemenin tanımı

Modelde kullanılan malzeme özelliklerinin çok iyi bir şekilde tanımlanması, sonlu elemanlarda doğru analiz yapabilmek için çok iyi bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Motorda kullanılan, demirin mıknatıslanma eğrisi, bakır ve alüminyumun iletkenliği gibi doğrusal karakteristiğe sahip özellikleri tanımlamak oldukça basittir. Fakat doğrusal olmayan karakteristikteki malzemeyi tanımlamak oldukça güçtür. (Açıkgöz, 1998).

Motorun rotor ve statorunda kullanılan saç malzemenin mıknatıslanma eğrisi doğrusal değildir. Şekil 2.17’de sunulan manyetik doyma özelliğine sahip olan eğrinin yapısına uygun olarak, yapılan çalışmada hem doğrusal hem de doğrusal olmayan bölgelere ait değerler alınmaktadır.

2.7.4 Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması

Motor model geometrileri belirlenen boyutlarda çizildikten ve kullanılan malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra sonlu elemanlar modeli oluşturulabilir. Sonlu elemanlar oluşturulurken, dikkat edilmesi gereken en önemli nokta uygun eleman türünün seçilmesidir. Ayrıca ARM modeli oluşturulurken, sonuçların en doğru şekilde elde edilmesi için akı çizgilerinin yoğun olduğu bölgelerin çok iyi modellenmesi gerekmektedir. Dolayısıyla stator ve rotor kutupları arasında hassasiyet artırılmaktadır. ARM’nun sonlu elemanlar ile modellenmiş hali şekil 2.23’de gösterilmektedir.



Şekil 2.23: ARM’nun SEY ile modellenmiş hali.

Karşıt kuplajlı ARM, klasik ARM’una kıyasla daha fazla sargı sonu etkisine sahiptir. Model oluşturulurken sargı sonu etkileri ihmal edilmektedir. Sargı sonu etkisinden dolayı direncin %60 arttığı yapılan üç boyutlu analizler sonucunda literatüre uygun olarak bulunmaktadır (Mecrow, 1998, Clothier ve Mecrow, 1999).

2.7.5 Çözüm

Yapılan çözümler esnasında model bir bütün olarak ele alınmış yani simetri özelliğinden yararlanılmamıştır. Model, gerek manyetik özelliği gerekse elektriksel özelliği içerdiğinden birleşik model olarak da tanımlanabilir (Maxwell2D 2000). Rotorun 5'er derecelik her konumuna gelen çözümler, sabit akım uygulanarak gerçekleştirilmektedir. Yapılan statik analiz neticesinde hem elektriksel devreye hem de manyetik devreye ilişkin serbestlik dereceleri hesaplanmaktadır.

2.7.6 Sonuçların değerlendirilmesi

Sonlu elemanlar tabanlı manyetik analiz programları, her düğümde manyetik vektör potansiyelini çözümlenmektedir. İstenilen sonuçlara, elde edilen çözümlerin bir ara birim vasıtası ile değerlendirilmesiyle ulaşılır. Manyetik alan çözümlerinden genel olarak, kuvvet, moment, kayıplar, endüktans, direnç, akı v.b. büyüklükleri hesaplamak mümkündür. Bunların dışında model üzerinde, akı yoğunlukları, akı çizgileri, manyetik alan şiddeti, v.b. gibi dağılımlarda görülebilmektedir.

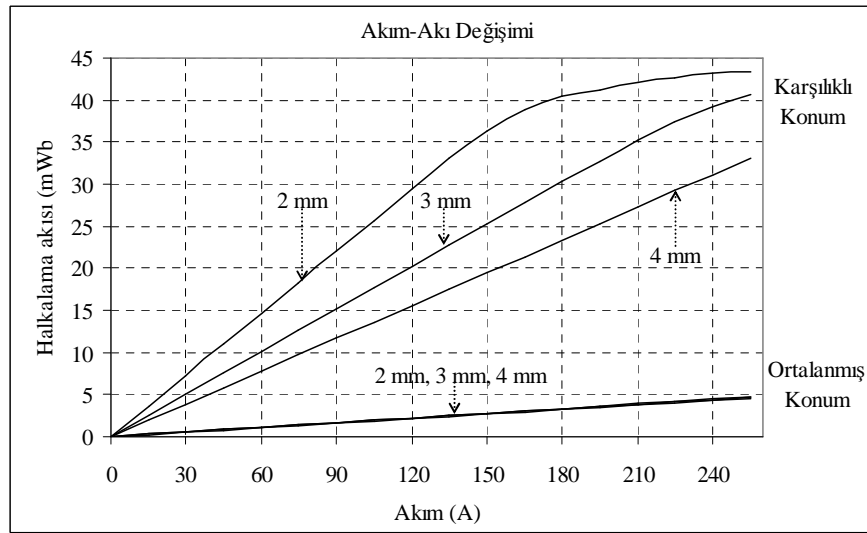
2.8 Klasik AR Motorunun SEY ile Çalışma Karakteristiklerinin Elde Edilişi

Bu kısımda klasik ARM'nun çalışma karakteristikleri çıkartılmaktadır ve geometrik parametrelerinin (hava aralığı, rotor kutup açısı) değişiminin çıkış karakteristiklerine etkileri incelenmektedir. Bu amaca uygun olarak hava aralığı değeri ve rotor kutup açısı değeri değiştirilerek 9 adet model oluşturulmaktadır. Hava aralığı değeri 2mm, 3mm, 4mm ve rotor kutup açısı değeri 31, 32 ve 33 derece seçilerek analizler yapılmaktadır. Ayrıca her analiz için ($0^{\circ}..45^{\circ}$) aralığında 10 adet rotor konumu ve (15A...255A) aralığında 17 adet akım değeri için toplam 170 adet farklı hesaplama yapılmaktadır. Bu parametre değerlerinin değişiminin klasik ARM'nun çalışma karakteristik etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için hava aralığı ve rotor kutup açısı değişimleri olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir.

2.8.1. Hava aralığı değişiminin klasik ARM'unun çalışma karakteristikleri üzerindeki etkileri

ARM'da hava aralığı, çalışma karakteristiklerine etkisi bakımından önemli bir parametredir. Daha önceki kısımda da belirtildiği gibi hava aralığı değişiminin, hava aralığı relüktansına, endüktans değerine ve dolayısıyla ARM'unun en önemli çalışma karakteristiklerinden moment değerine etki etmektedir.

Klasik AR Motorunda manyetik doymadan önce ve doymadan sonraki etkileri belirlemek için anma akım değerinin altında ve üstünde değerlerin alınması gerekmektedir. Bu kısımda çalışma karakteristiklerinden ilk olarak akı eğrisi her hava aralığı değeri için çizilerek karşılaştırılmaktadır. Daha sonra da klasik ARM'nun öz endüktans eğrisi ve moment eğrisi incelenmektedir. Şekil 2.24'de rotorun karşılıklı ($\theta=0^\circ$) ve ortalanmış ($\theta=45^\circ$) konumlarında, seçilen her hava aralığı değeri için anahtarlamalı relüktans motoruna ait halkalanma akısı-akım değişimi verilmektedir.

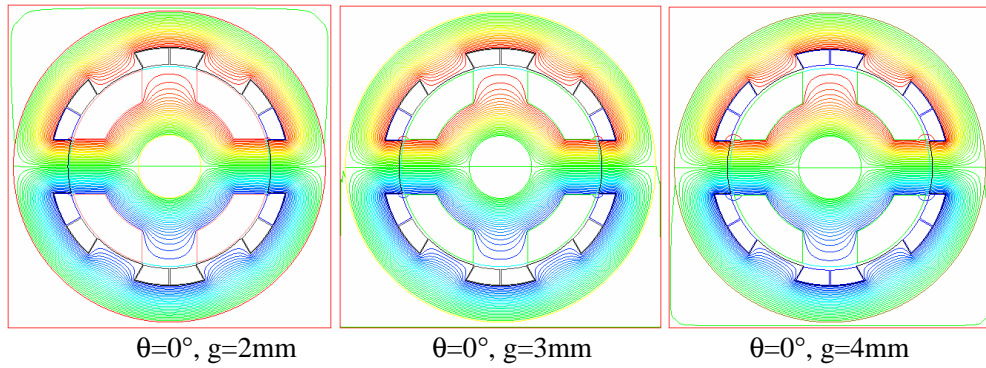


Şekil 2.24: Klasik ARM halkalanma akısı-akım eğrisine hava aralığının etkisi.

Şekil 2.24'de gösterilen akı eğrileri dikkatle incelendiğinde hava aralığı 2mm olarak seçildiğinde 165 A civarında, 3mm olarak seçildiğinde 225 A civarında manyetik doymanın başladığı görülmektedir. Ancak hava aralığı 4 mm olarak seçildiğinde ise manyetik

doymanın başlamadığı veya daha büyük akım değerlerinde manyetik doymanın başlayacağı görülmektedir. Manyetik doymanın başladığı akım değerinin altındaki değerler doğrusal bölgeye, üstündeki değerler ise doğrusal olmayan bölgeye aittir. Akı karşılıklı (aligned) konumda en büyük değere sahiptir. Buradan hareketle hava aralığı değeri küçük seçildiğinde ARM'un daha küçük akım değerleri için manyetik doymanın başladığı ve hava aralığı değeri büyüdükçe daha büyük akım değerlerinde manyetik doymanın meydana geleceği söylenebilir.

Üç fazlı ARM'nun manyetik analiz sonuçlarından örnek olarak seçilen, rotorun karşılıklı ($\theta=0^\circ$) konumuna ait akı çizgileri dağılımları Şekil 2.25'de verilmektedir.



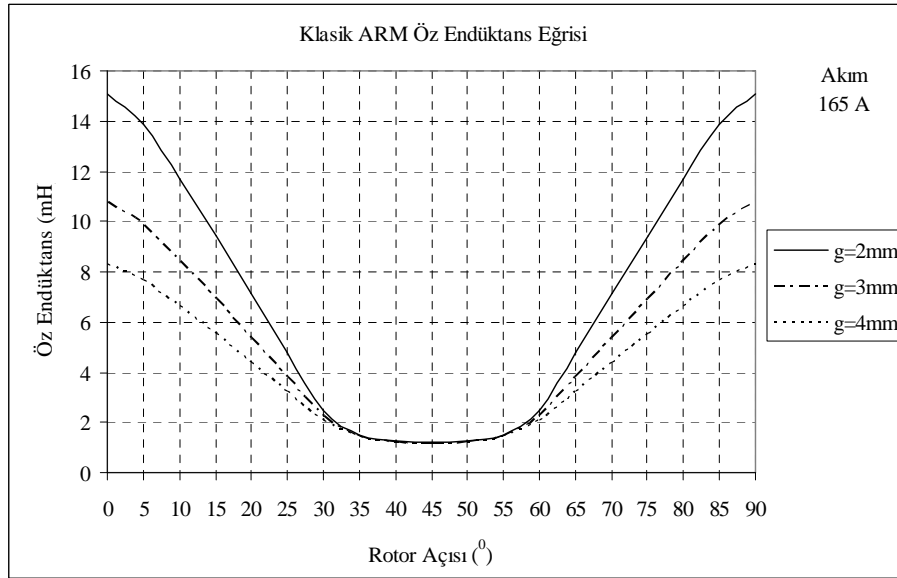
Şekil 2.25: Üç fazlı 6/4 ARM'nun manyetik analiz sonuçları.

Yukarıda yer alan Şekil 2.25 dikkatlice incelendiğinde hava aralığı değişimi ile kutup üzerindeki akı çizgilerinin yoğunlukları ve kaçak akı değerleri değişmektedir. Hava aralığı değeri arttıkça kaçak akı değeri de artmaktadır. Dolayısıyla kaçak akıdaki bu artış toplam faydalı akının azalmasına neden olmaktadır.

Şekil 2.26 ile her hava aralığı değerinde Klasik ARM için öz endüktans eğrisi verilmektedir. Klasik sargı yöntemine sahip endüktans eğrisi, ortalanmış konumda en küçük değeri, karşılıklı konumunda ise, en büyük değeri almaktadır.

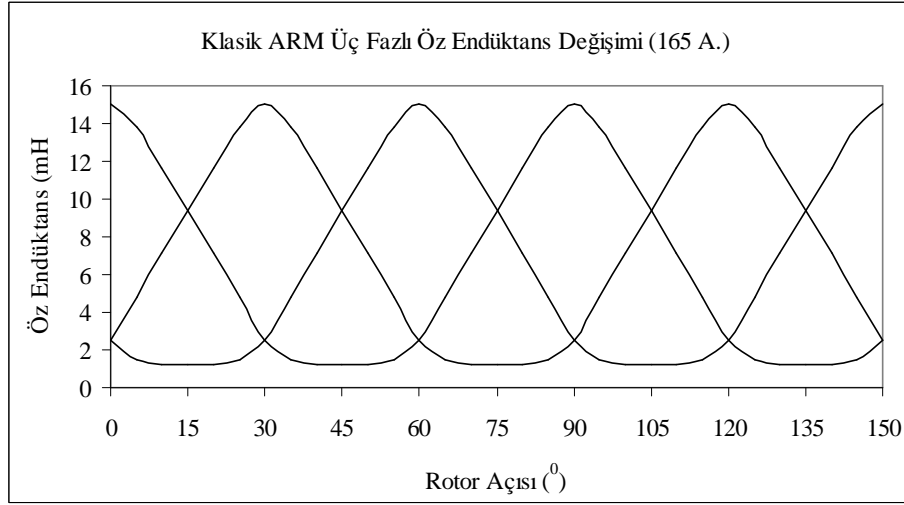
Öz endüktans eğrisi incelendiğinde hava aralığı değişimi ile endüktansın değerinin değiştiği ve her üç egride de yaklaşık 55° 'den başlayan ve 90° 'ye kadar süren bir artış

görülmektedir. Pozitif moment bu artış bölgesinde üretilmektedir. Eğer bu bölgenin bitiminde, uyarılan fazın enerjisi kesilmez ise motor negatif moment üretir. Uyarılan fazlar arasında 30° olduğu için üç fazlı öz endüktans eğrilerinin tepe noktaları arasında aynı derecede mesafe bulunması gerekmektedir. Şekil 2.27’de bu durum verilmektedir. Şekil gösterildiği gibi bir fazın endüktans eğrisi en yüksek seviyede iken diğer ikisi en düşük seviyededir. Öz endüktans eğrileri ile ilgili genel bir değerlendirme yapacak olursak; doğrusal bölgede endüktans eğrisi sabit bir akı değerine karşılık $L(\theta)$ şeklinde sadece rotor konumunun bir fonksiyonudur.



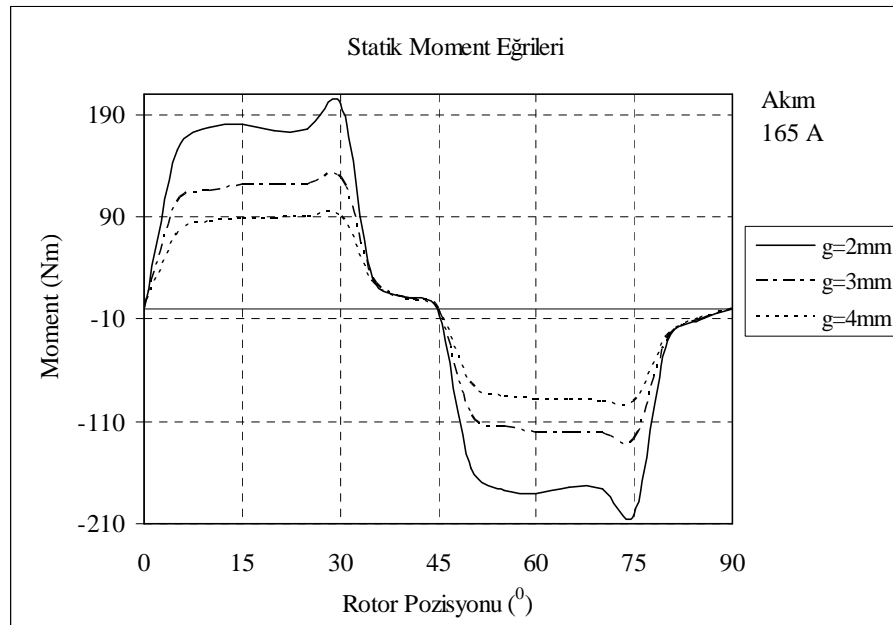
Şekil 2.26: Klasik ARM öz endüktans eğrisine hava aralığının etkisi (165A).

Ancak manyetik doymuş bölgede ise öz endüktans $L=f(i,\theta)$ şeklinde hem akımın hem de rotor konumunun fonksiyonudur. Karşıt kuplaj değeri ise klasik ARM’da fazlar arasındaki dekuplajdan dolayı ihmal edilecek seviyededir (Mecrow 1993, Wale 1996, Mecrow 1996). Ancak karşıt kuplajı ARM modeline dahil eden ve motor performansı üzerine etkinliğini araştıran bir çok yayın yapılmıştır.



Şekil 2.27: Klasik ARM üç fazlı öz endüktans değişimi ($g=2\text{mm}$, 165A).

En önemli çalışma karakteristiği moment eğrisidir ve daha öncede belirtildiği gibi moment ifadesi öz endüktansın rotor konumuna göre değişim oranı ve akımın karesi bileşenlerinden oluşmaktadır. Hava aralığı değişiminin endüktans değerine olan etkisi göz önüne alındığında, dolayısıyla moment değerini de etkileyeceği söylenebilir.

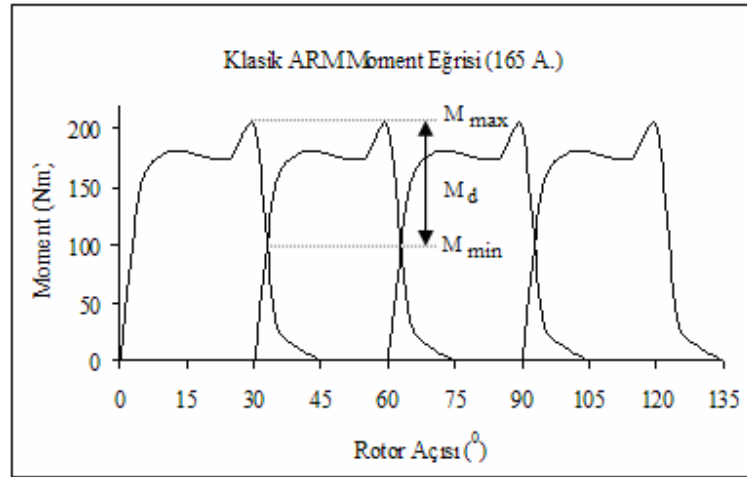


Şekil 2.28: Klasik ARM statik moment eğrileri ($g=2\text{-}3\text{-}4\text{mm}$).

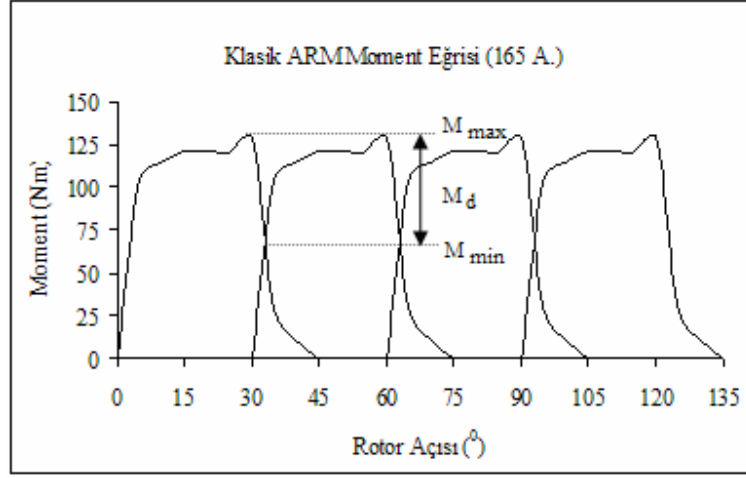
Manyetostatik analiz sonuçlarından elde edilen statik moment eğrileri Şekil 2.28 ile verilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere hava aralığı değişimi maksimum moment değerine ve düzgün moment oranına etki etmektedir. Aynı akım değerinde, hava aralığı büyüdükçe maksimum moment değeri düşmektedir.

Klasik ARM'un en olumsuz yönlerinden biride moment de meydana gelen çökmelerdir. Manyetik doyma ve faz komütasyonundan dolayı bu çökmeler oluşmaktadır. Moment eğrisinde oluşan bu çökmeler araştırmacıların yoğun bir şekilde çalıştığı konulardan birisidir. Moment eğrisinde oluşan bu çökmelerin daha iyi analiz edilebilmek ve hava aralığının değişiminin etkisini inceleyebilmek açısından hava aralığı 2mm, 3mm ve 4mm olan motor modeli ele alınarak inceleme ve karşılaştırma yapılmaktadır. Bu doğrultuda aşağıdaki eğrilerden moment dalgalılığını hesaplamak için, eğrilerin en yüksek değeri (M_{max}) ve en küçük değeri (M_{min}) bulunur. Elde edilen bu değerler denklem 2.35'de yerine yazıldığında % olarak moment dalgalılığı hesaplanmaktadır.

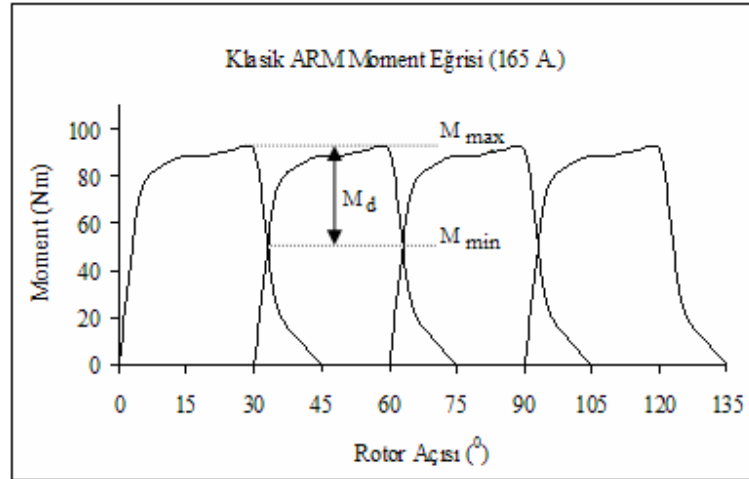
$$\% M_d = \frac{M_{max} - M_{min}}{M_{max} + M_{min}} * 100 \quad (2.35)$$



Şekil 2.29: Klasik ARM moment eğrisi (165 A, g=2mm).



Şekil 2.30: Klasik ARM moment eğrisi (165 A, $g=3mm$).



Şekil 2.31: Klasik ARM moment eğrisi (165 A, $g=4mm$).

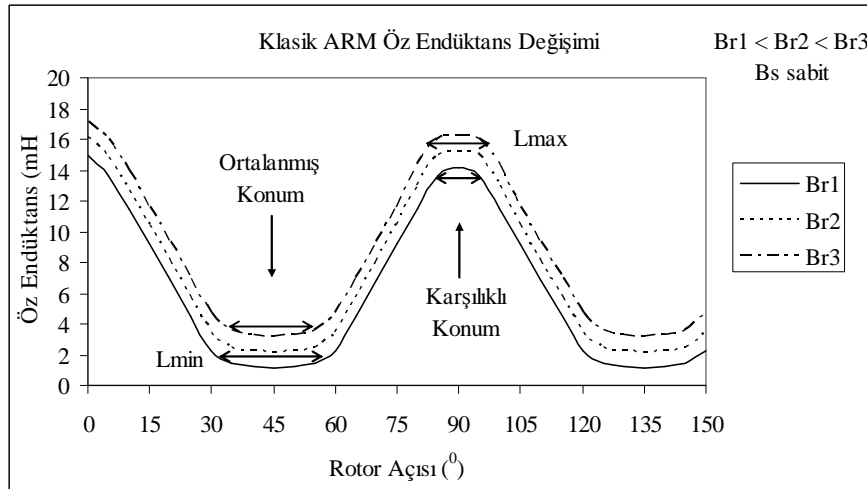
Anma akımı ve aynı zamanda hem lineer hem de manyetik doymuş bölgelere ait moment eğrileri elde edilmiş ve yine aynı dalgalılık hesabında kullanılan denkleme göre değerleri belirlenmektedir. Bu elde edilen sonuçlar Tablo 2.4’de verilmektedir. Elde edilen değerler incelendiğinde momentlerdeki dalgalılığın yüksek olduğu özellikle de doymuş çalışma bölgelerinde bu dalgalılığın daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca manyetik doyma bölgesinde, hava aralığı değişiminin moment dalgalılık oranına etkisi dikkate alınmayacak kadar azdır. Momentteki bu dalgalılık oranı uygun kontrol devresi kullanılarak azaltılabilir.

Tablo 2.4: Klasik ARM moment dalgalılık oranları.

Klasik ARM			
Akım (A)	% M_d (Dalgalılık Oranı)		
	g=2 mm	g=3 mm	g=4 mm
150	29,78	28,90	26,93
165	30,03	28,93	26,97
210	30,93	29,18	27,91
225	31,21	29,45	28,23
240	31,84	30,72	29,10

2.8.2 Stator ve rotor kutup açısı değişiminin klasik ARM'unun çalışma karakteristikleri üzerindeki etkileri

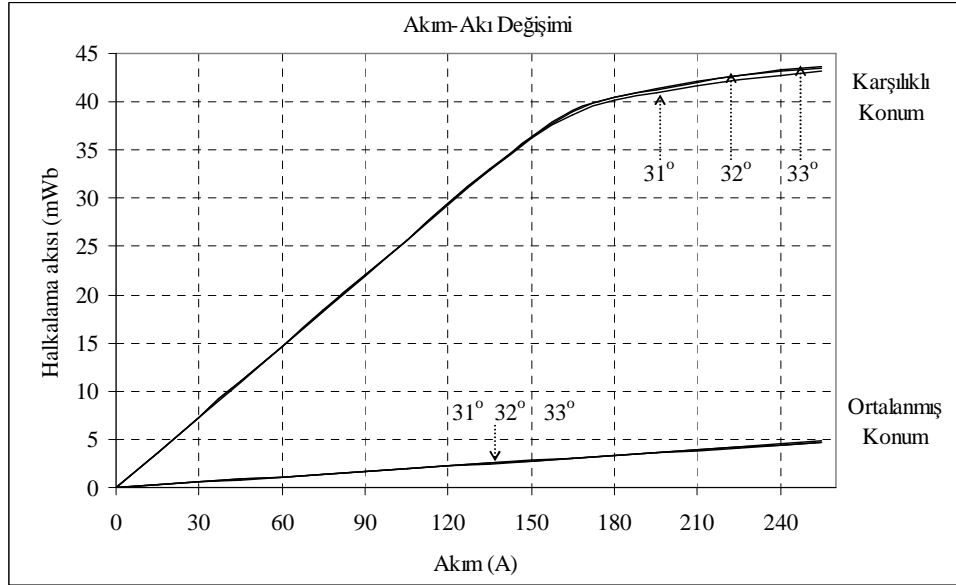
ARM tasarımının stator ve rotor kutup açısı değerlerinin seçimi önemli bir rol oynamaktadır. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi bu seçim işlemi yapılırken, atalet momentini yenebilme, statik moment şekli ve rotor pozisyon karakteristikleri gibi birçok nokta göz önünde bulundurulmaktadır. Kalkış esnasında atalet momentini yenebilmesi için stator ve rotor kutup açılarının mümkün olduğunca küçük olması istenir. Şekil 2.32'de sabit stator kutup açısına sahip, farklı rotor kutup açısı değerleri için klasik ARM'unun genel endüktans eğrisi verilmektedir.



Şekil 2.32: Klasik ARM öz endüktans eğrisi.

Şekil dikkatlice incelendiğinde karşılıklı konumda iken rotor kutup açısı büyüdükçe maksimum endüktansın sabit kalma durumu daha uzun sürmektedir. Ancak ortalanmış konumunda ise rotor kutup açısı büyüdükçe endüktansın minimum değerinde sabit kalması daha kısa sürmektedir. Buradan hareketle stator ve rotor kutup açısı değerlerinin endüktans karakteristiği üzerindeki etkileri göz önünde bulundurarak moment karakteristiğini de etkileyeceği söylenebilir.

Bu kısımda çalışma karakteristiklerinden ilk olarak akı eğrisi her rotor kutup açısı değeri için çizilerek karşılaştırılacaktır. Daha sonra da klasik ARM'nun öz endüktans eğrisi ve moment eğrisi incelenmektedir. Şekil 2.33'de rotorun karşılıklı ($\theta=0^\circ$) ve ortalanmış ($\theta=45^\circ$) konumlarında, seçilen her rotor kutup açısı değeri için anahtarlamalı relüktans motoruna ait halkalama akısı-akım değişimi verilmektedir.



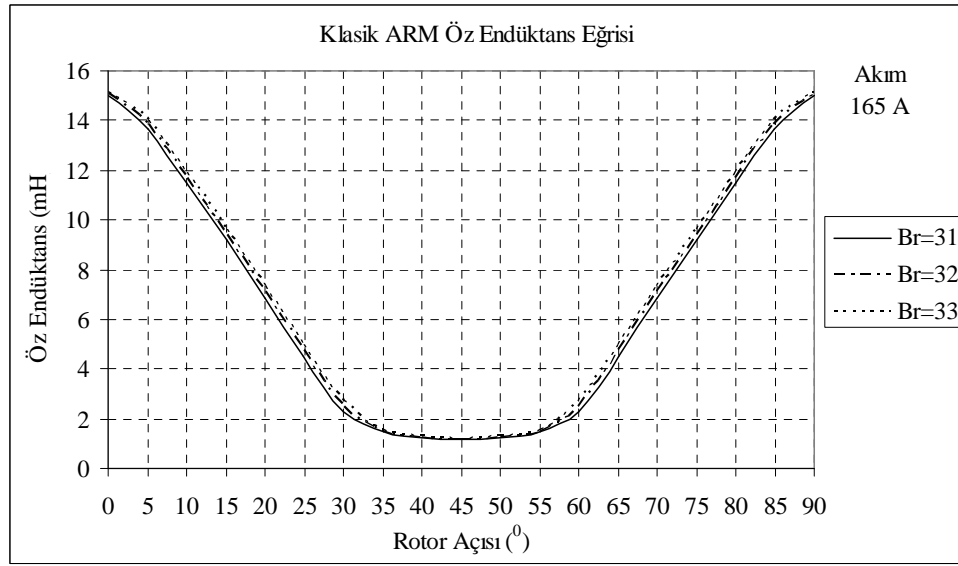
Şekil 2.33: Klasik ARM halkalama akısı-akım eğrisine rotor kutup açısı değerinin etkisi.

Şekil 2.33'de gösterilen akı eğrileri dikkatle incelendiğinde tüm rotor kutup açısı değerlerinde yaklaşık olarak 165 A civarında manyetik doymanın başladığı görülmektedir. Daha öncede belirtildiği gibi manyetik doymanın başladığı akım değerinin altındaki değerler doğrusal bölgeye, üstündeki değerler ise doğrusal olmayan bölgeye aittir. Akı karşılıklı konumda en büyük değere sahiptir. Şekil 2.33'de gösterildiği gibi rotor kutup açısı değerinin

değişmesinin klasik ARM'unun halkalanma akı eğrisine ihmal edilebilecek seviyede etki ettiği görülmektedir.

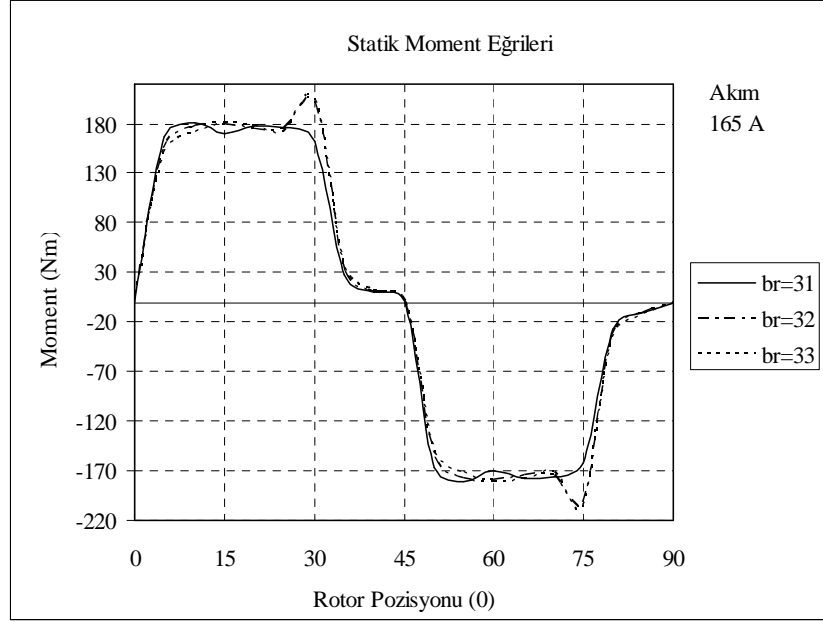
Şekil 2.34 ile tüm rotor kutup açısı değerinde Klasik ARM için öz endüktans eğrisi verilmektedir. Klasik sargı yöntemine sahip endüktans eğrisi, ortalanmış konumda en küçük değeri, karşılıklı konumunda ise, en büyük değeri almaktadır.

Öz endüktans eğrisi incelendiğinde rotor kutup açısı değişimi ile endüktans değerinin ihmal edilebilecek seviyede değiştiği ve rotor kutup açısı değerlerinin birbirine yakın seçilmesinden dolayı her üç eğride de, aralarında 1°'den daha az bir farkla yaklaşık 54-55°'den başlayan ve 90°'ye kadar süren bir artış görülmektedir.



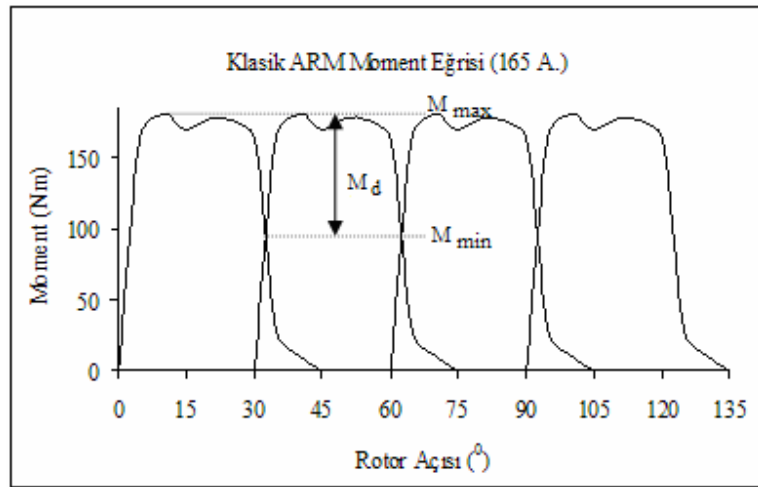
Şekil 2.34: Klasik ARM öz endüktans eğrisine rotor kutup açısı değerinin etkisi (165A).

Değişik rotor kutup açılara sahip manyeto statik analiz sonuçlarından elde edilen statik moment eğrileri Şekil 2.35 ile verilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere rotor kutup açısı değişimi, rotorun konumuna göre maksimum momente ve moment eğrisindeki pik değerlerinin genliğine etki etmektedir.

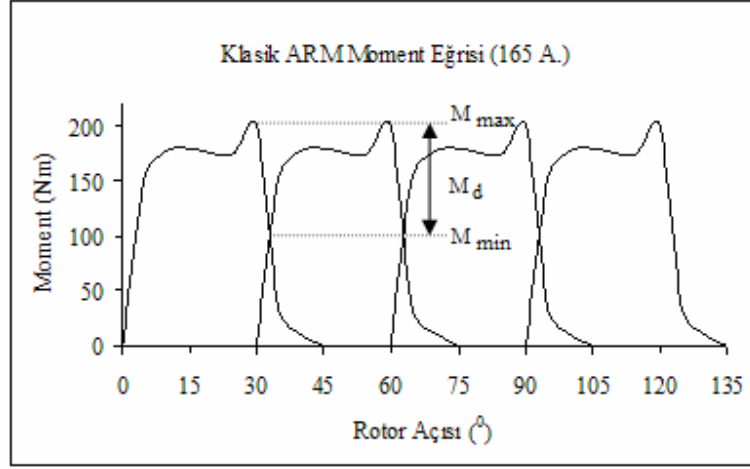


Şekil 2.35: Klasik ARM statik moment eğrileri ($\beta_r = 31^\circ - 32^\circ - 33^\circ$).

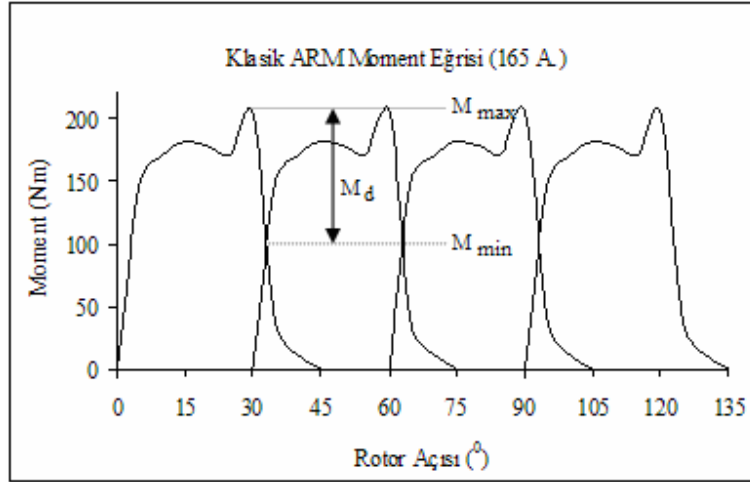
Moment eğrisinde çökmelerin daha iyi analiz edilebilmek ve rotor kutup açısı değişiminin etkisini inceleyebilmek açısından kutup açısı değerleri 31° , 32° ve 33° olan motor modeli ele alınarak inceleme ve karşılaştırma yapılmaktadır. Bu doğrultuda aşağıdaki eğrilerden moment dalgalılığını hesaplamak için, eğrilerin en yüksek değeri (M_{max}) ve en küçük değeri (M_{min}) bulunur. Elde edilen bu değerler denklem 2.35'de yerine yazıldığında % olarak moment dalgalılığı hesaplanmaktadır.



Şekil 2.36: Klasik ARM moment eğrisi (165 A, $\beta_r = 31^\circ$).



Şekil 2.37: Klasik ARM moment eğrisi (165 A, $\beta_r = 32^\circ$).



Şekil 2.38: Klasik ARM moment eğrisi (165 A, $\beta_r = 33^\circ$).

Daha önceki kısımlarda da açıklandığı üzere, anma akımı ve aynı zamanda hem lineer hem de manyetik doymuş bölgelere ait moment eğrileri elde edilmiş ve yine aynı dalgalılık hesabında kullanılan denkleme göre değerleri belirlenmiştir. Bu elde edilen sonuçlar Tablo 2.5’de verilmektedir. Elde edilen değerler incelendiğinde momentlerdeki dalgalılığın yüksek olduğu özellikle de doymuş çalışma bölgelerinde bu dalgalılığın daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca rotor kutup açısı değişimi moment dalgalılık oranına %5-10 civarında etkisi bulunmaktadır. Tablodaki veriler incelendiğinde rotor kutup açısı değeri 31° de iken moment dalgalılık oranı diğer değerlere göre daha düşüktür.

Tablo 2.5: Klasik ARM moment dalgalılık oranları.

Klasik ARM			
Akım (A)	% M_d (Dalgalılık Oranı)		
	$\beta_r = 31^\circ$	$\beta_r = 32^\circ$	$\beta_r = 33^\circ$
150	24,63	29,78	29,41
165	24,88	30,03	30,86
210	25,35	30,93	31,42
225	25,53	31,21	32,18
240	26,65	31,84	32,15

3. KARŞIT KUPLAJLI AR MOTORUNUN YAPISI, ÇALIŞMA PRENSİBİ VE SEY İLE MANYETOSTATİK ANALİZİ

3.1. Giriş

Günümüzde araştırmacılar tarafından Anahtarlama Relüktans Motorun performansını arttırmaya yönelik çalışmalar yapılmaktadır ve bu konu devamlı araştırmacıların gündeminde yer almaktadır. Gerek sürücü devre üzerine gerekse manyetik ve elektrik devre üzerine yapılan çalışmalarda, birçok yöntem denenerek AR motorun performansı iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalarda, hava aralığı açısından daha fazla yararlanmak amacıyla değişik stator ve rotor kutup şekilleri denenerek makine geometrisinde, elektrik devresinden daha fazla yararlanmak için sargı yapısı ve sürücü devresi üzerinde yapılan iyileştirmeler olarak gruplandırılabilir.

Bilindiği üzere, Anahtarlama Relüktans ve Adım Motorları her faz sargısının tek bir stator dişi etrafına sarılması ile oluşan kısa kutup adımlı sargı kavramı ile tanımlanmaktadır. Bu sargı yapısı ile fazlar arasındaki kuplaj tamamen ortadan kalkmakta ve moment uyarılan fazların öz endüktanslarının rotor konumuna göre değişim oranı ile üretilmektedir. Her faz sargısı öz endüktansın yükseldiği kısım ile pozitif momente zamanın en fazla bir yarısı kadar katkıda bulunabilmekte ve dolayısıyla elektrik devresinin kullanımı oldukça yetersiz kalmaktadır.

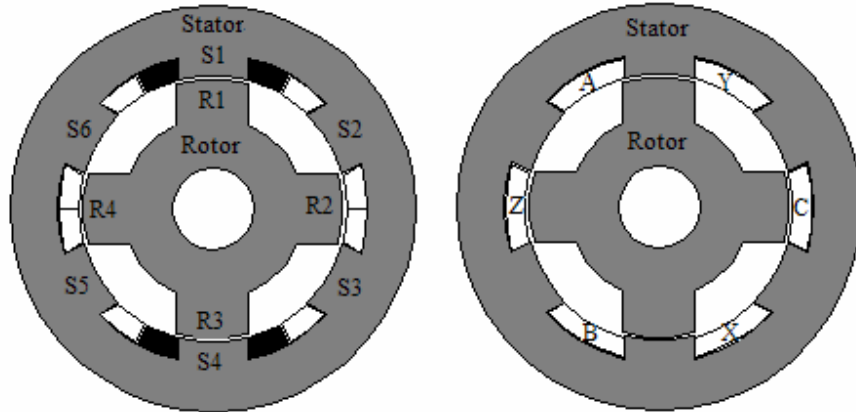
Bu yetersizliği gidermek için yapılan çalışmalarda ilk olarak yardımcı komütasyon sargıları kullanılarak, iletimdeki bir fazın manyetik enerjisinin bir diğer faza kısmi kuplajını sağlaması amaçlanmıştır. Kuplajın gerçekleştirilmesi için anahtarlama esnasında, manyetik enerjinin bir kısmı anahtarın açılması ile sonraki faza aktarılmaktaydı. Fakat sargı yapısından dolayı klasik ARM 'nda bu enerji kaynağa geri verilmekteydi. Bu amaçla bir ve iki yardımcı komütasyon sargılı makineler için

benzeşimler ve deneysel çalışmalar yapıldı. Sonuç olarak performansın yükseldiği fakat bununla birlikte moment dalgalılığının da arttığı belirlendi (Liang ve diğ., 1992).

Bu yöndeki çalışmalar, Mecrow tarafından ortaya konulan sargı şekli ile farklı bir boyut kazandı. İlave bir sargı kullanılmadan sarım şeklinin basitçe değiştirilmesi ile makinede, temel çalışma ilkelerinde değişiklikler meydana gelirken, performansında ise olumlu gelişmeler meydana geldi. Bu gelişim sonucunda makine fazlarının pozitif moment üretimine daha fazla katkıda bulunması sağlanarak elektrik ve manyetik devre daha verimli kullanılması sağlandı (Mecrow, 1993).

3.2 KKARM'nun Temel Çalışma İlkesi

Karşıt Kuplajlı Anahtarlamalı Relüktans Motor, Klasik ARM'nun sargılarının sarım şeklinin değiştirilmesi ile ortaya çıkmış bir motordur. Sargılarda yapılan bu değişiklik, klasik ARM'nun yapısal üstünlüklerini büyük ölçüde değiştirmemektedir. Sargı yapısının değişmesinden dolayı uyarma yapısında da değişiklikler meydana gelmektedir.



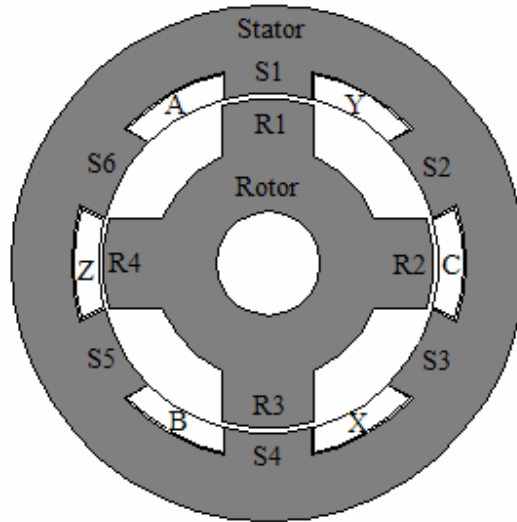
Şekil 3.1: a) Klasik ARM sargı yapısı, b) KKARM'nun genel yapısı.

Ayrıca sargı yapısı ve buna bağlı olarak uyarma yapısının değişmesi ile birlikte çalışma ilkesinde de önemli değişiklikler meydana gelmektedir.

Yeni oluşan bu makinede sargılar tam kutup adımlı sargı yapısına sahiptir ve tüm oluğu kaplamaktadır. Şekil 3.1.b'de gösterildiği gibi oluğu kaplayan sargıların karşılıklı olanları makinenin bir fazını oluşturmaktadır. Herhangi bir “t” anında makine fazlarından en az ikisi iletim konumundadır. Bu sargı yapısı 6/4 stator ve rotor kutup yapısına sahip motorda uygulanmış olsa da aynı sarım şekli diğer stator ve rotor kutup sayısına sahip motorlar için de uygulanabilmektedir.

Bir fazı uyarılmış klasik ARM sargı yapısı Şekil 3.1.a'da gösterilmektedir. Diğer iki fazın uyarılmasının S_1 ve S_4 stator kutupları üzerinde enerjilendirilmiş fazın akı halkalanması üzerine herhangi bir katkısı bulunmamaktadır (Mecrow 1996, Tang 1998).

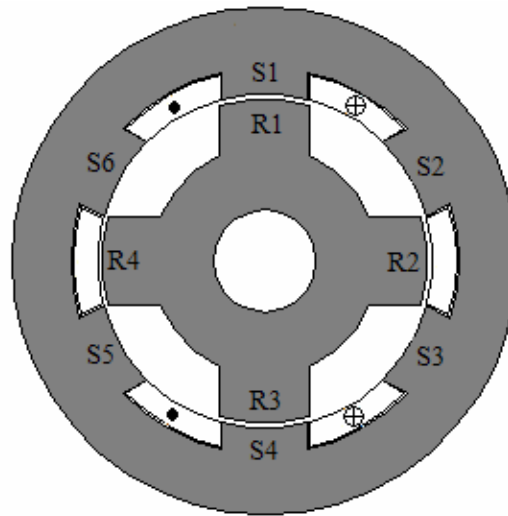
Fazlar arasında herhangi bir kuplaj olmadığı çok açık bir şekilde görülmektedir. Bundan dolayı, diğer bir ifade ile fazlar arasındaki nihai dekuplajdan dolayı, makinenin sargılarının ancak üçte biri S_1 ve S_4 stator dişleri üzerinde uyarılmasını sağlamak amacıyla kullanılabilir. Zaman açısından değerlendirecek olursak, makine dönerken pozitif momentin üretilmesini sağlamak için herhangi bir faz sargısı, dönme periyodunun ancak $1/3'$ ü oranında uyarılabilir.



Şekil 3.2: KKARM sargı yapısı.

Tam kutup adımlı ve yine stator dişleri S_1 ve S_4 'ü uyaracak sargı yapısı Şekil 3.2 de gösterilmektedir. Şekilden de anlaşıldığı gibi aynı stator kutuplarını uyarmak için iki faz iletimde bulunmaktadır. Başka bir deyişle akı halkalanmasına her faz dönme periyodunun $2/3$ 'ü kadar katkıda bulunmaktadır. Sargı yapısının gerçekleştirilmesi iki kat bakır alanını uyarmaya olanak sağlamaktadır. Bu sargı tipi iki şekilde gerçekleştirilebilir. Birincisi kısa adımlı sargının oluk içine yan yana yerleştirilmesi ile ikincisi ise oluğu kaplayacak tek parça stator sargısının tüm oluğu kaplayacak şekilde yerleştirilmesi ile gerçekleştirilir. Uyarma açısından ilk sarım şekli asimetrik bir yapıya sahip olacağı için tercih edilmemektedir (Mecrow ve diğ., 1988). Makine dönerken, her bir "t" zamanında pozitif momentin üretilmesini sağlamak için uygun stator diş çiftlerinden hangilerinin uyarılacağını kontrol etmek gerekmektedir. Üç fazlı makine için simetrik çalışma, tüm fazların tek yönlü akım taşımaları durumunda mümkündür. Dört fazlı makine için simetrik çalışma ancak çift yönlü akım yapısı ile elde edilmektedir. Uyarma yapıları ilerleyen kısımlarda incelenmektedir.

Rotor konumuna göre öz ve karşıt endüktanslarının değişiminin incelenmesi makinenin çalışma ilkesinin daha iyi anlaşılabilmesini sağlamaktadır. Şekil 3.3 de $6/4$ stator ve rotor kutup yapısına sahip KKARM'nun üç fazlı unipolar sargı düzenlemesini gösterilmektedir.

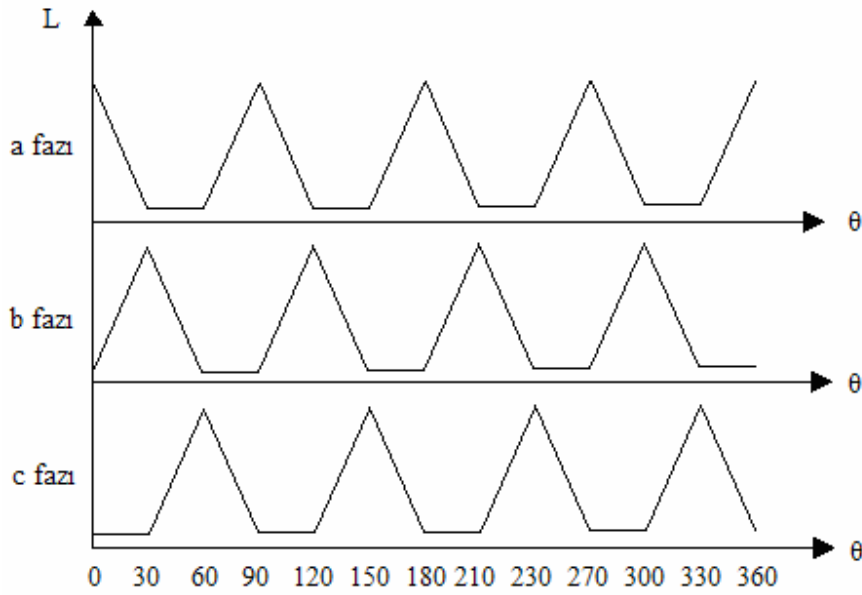


Şekil 3.3: $6/4$ Karşıt Kuplajlı ARM üç faz sargı yapısı.

Şekil 3.4’de tek yönlü uyarma (unipolar) ile oluşan öz endüktansın değişimi gösterilmektedir. Kolaylık sağlaması açısından, nüvede doymanın ihmal edildiği ideal durumu göz önüne alalım. Her 30° lik zaman periyodunda makine üç fazının öz endüktanslarından ilki azalma yönünde, ikincisi artma yönünde olduğu ve sonuncusunun ise sabit kaldığı görülmektedir. Herhangi bir faz sargısının endüktansı aşağıdaki ifade ile gösterilmektedir.

$$L_{\text{faz}} = L_1 + \mu_0 \frac{N^2 \alpha \beta_L}{2G} \quad (3.1)$$

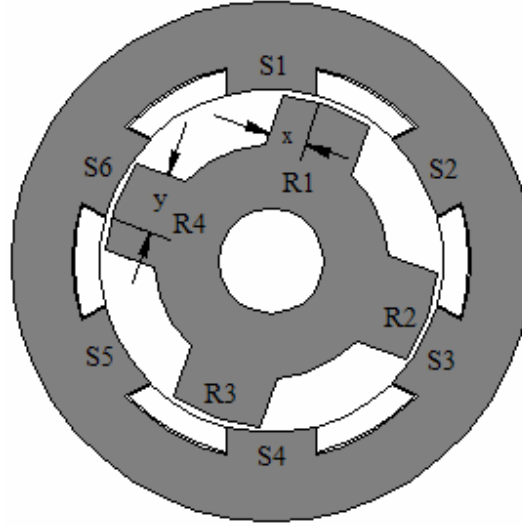
Bu ifade bir fazın toplam endüktansı L_{faz} , kaçak endüktansı L_1 , sarım sayısı N ile gösterilmektedir. β_L akımın akacağı fazın oluşturacağı akı yolu üzerindeki stator ve rotor dişlerinin örtüşme uzunluğu, g hava aralığı uzunluğudur.



Şekil 3.4: Klasik ARM’ da öz endüktans rotor konumu değişimi.

Denklem 3.1’de sargı sonu etkileri ve ateşleme ihmal edilerek basit bir yaklaşım yapılmaktadır. Şekil 3.5’de β_L ’nin boyutu belirli bir rotor konumu verilmektedir. Kolaylık sağlamak için, bu şekil stator diş genişliğinin rotor diş genişliğine ve stator diş

genişliğinin stator oluk genişliğine eşit olduğu kabul edilmektedir. 6/4 makine için β_L 'nin stator kutupları ile iki rotor kutbunun örtüşme uzunlukları olan x ve y 'nin toplamı olduğu görülmektedir (Kokernak, 1997).

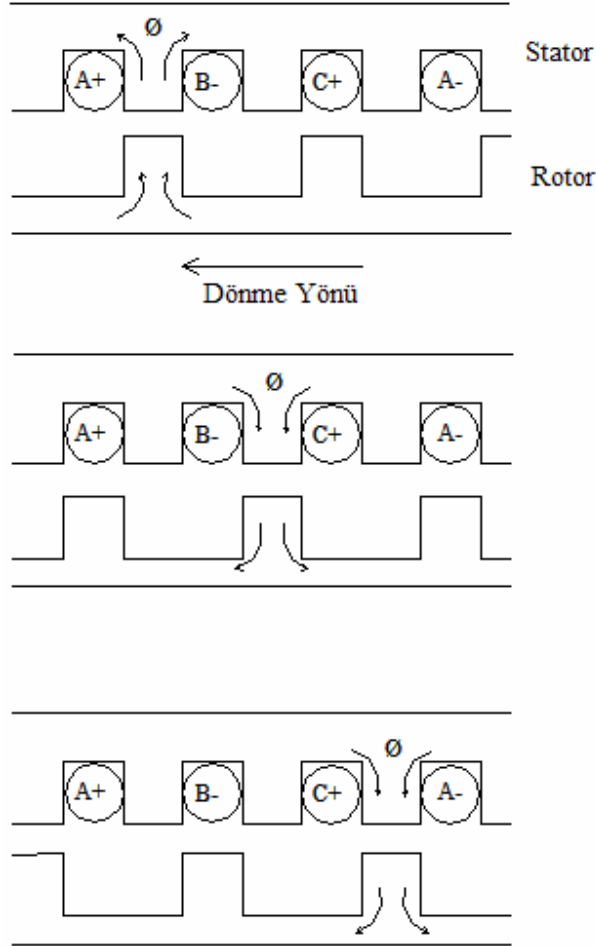


Şekil 3.5: Örtüşme uzunluğu β_L 'nin boyutu.

Rotor dönerken β_L 'nin değişimini incelersek açık bir şekilde görülmektedir ki, bir rotor kutbu çakışma konumuna girerken diğeri çıkmaktadır ve β_L rotor konumundan bağımsızdır. β_L her zaman bu makine için bir stator kutup genişliğine eşit olacaktır. Açıkça görüleceği üzere her fazın öz endüktansının, rotor konumu ile değişmemektedir ve klasik ARM'unda en büyük hizalanma değerine eşittir. Buradan hareketle fazlar arasındaki karşıt endüktans ifadesi de, öz endüktans ifadesine benzer şekilde çıkartılabilir. Örnek olarak M_{ab} karşıt endüktansını inceleyelim. Faz a'daki pozitif akım S_3, S_4, S_5 stator dişleri üzerinde dış eksenel tarzda bir mmk üretir. S_4 ve S_5 'teki akı b fazını negatif olarak halkalmasına karşın S_3 'teki akı pozitif olarak halkalar. Dolayısı ile $\beta_M = x-y$ 'dir. Benzer ifade karşıt kuplaj için de yazılabilir (Mecrow, 1993).

$$M_{ab} = \mu_0 \frac{N^2 \alpha \beta_M}{2G} \quad (3.2)$$

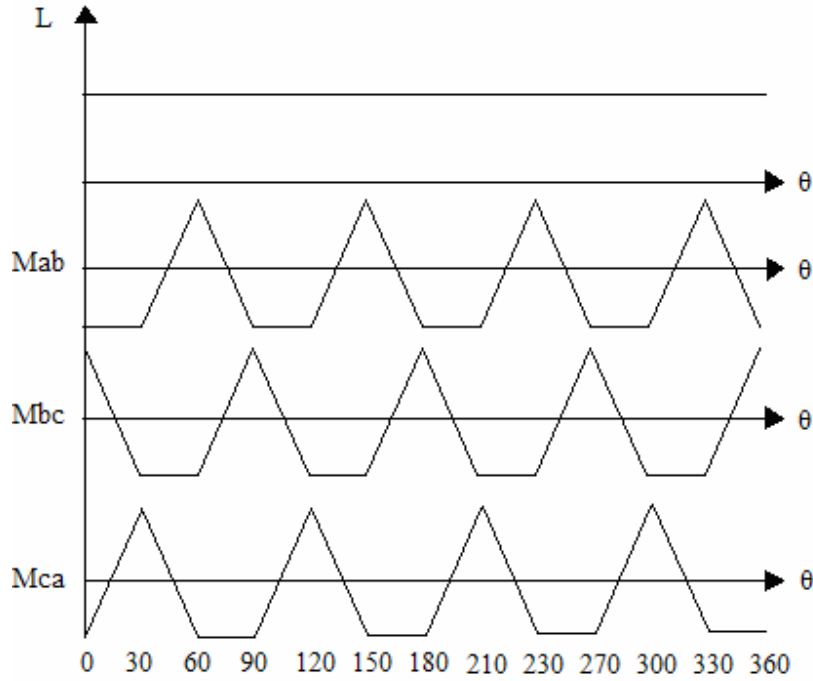
Denklem 3.2 ile elde edilen ifadede M_{ab} karşıt kuplaj endüktansının β_M 'den dolayı rotor konumu ile değiştiği görülmektedir. M_{ab} karşıt kuplaj endüktansının değişimi, akı halkalanması ile de açıklanabilir.



Şekil 3.6: KKARM' da akı rotor konumu değişimi.

Şekil 3.6 de stator ve rotor kutuplarının aksel olarak düzleme yatırıldığı konumda motor, a-b fazların iletimde olduğu durumu, başka bir deyişle M_{ab} 'nin elde edilmesi için akı değişimini gösterilmektedir. B fazının makine dönerken ilettime alınacağı ve pozitif yön olarak yukarıdan aşağıya doğru seçileceği kabul edilmektedir (Kokernak 2001). Şeklin en üst kısımda, B fazındaki akım nedeni ile A fazını halkalayan akı negatiftir. Bir sonraki çizimden görüldüğü gibi, hizalanmaya gelirken bile negatif halkalanma devam eder. Ancak son çizimde, stator rotor ile çakışmaya başlarken durum değişir ve A fazını

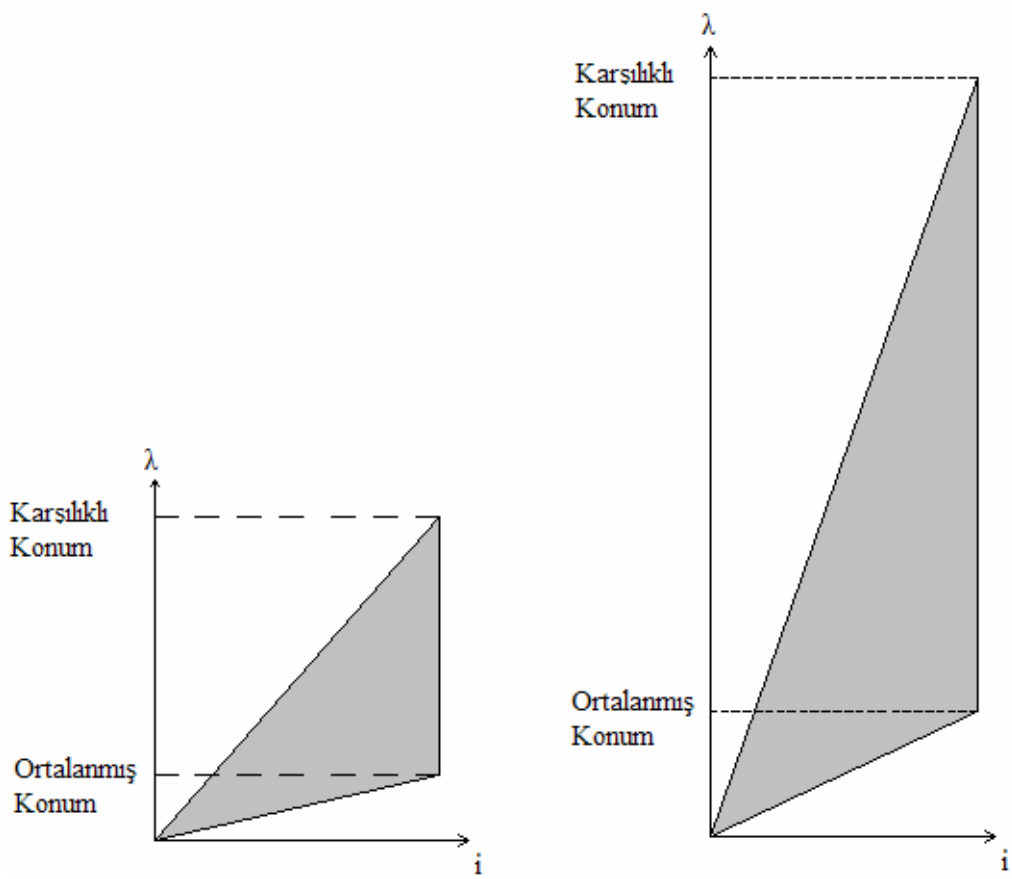
halkalayan akı pozitif değer alır. Tek yönlü bir akım tarafından oluşturulan akı, rotor konumuna göre bir fazı negatif olarak halkalarken diğer fazı pozitif olarak halkalayabilmektedir. Buradan hareketle karşıt endüktansın negatif ve pozitif değerler arasında değiştiği sonucuna varılır. Bu türde bir yaklaşım makinenin tüm karşıt endüktans eğrileri için diğer fazlara da uygulanabilir. İncelenen 6/4'lük makine örneğinde, Şekil 3.7'de gösterildiği gibi fazlar arasındaki karşıt endüktanslar 30°'lik dönüş için azalmakta, bir sonraki 30°'lik dönüşte sabit kalmakta, sonraki 30°'lik dönüşte ise, yükselmekte ve böylelikle periyodunu tamamlamaktadır.



Şekil 3.7: KKARM 'da karşıt ve öz endüktansın rotor konumuna bağlı değişimi.

Yeni sargı yapısına sahip olan bu motorda üretilen akı sadece bir fazın ve rotor konumunun işlevi değil aynı zamanda diğer fazların da işlevidir. Bundan dolayı makinenin analitik modeli oldukça karmaşık hale gelmektedir. Ayrıca, karşıt endüktansların rotor konumuna göre değişim oranı, öz endüktansın klasik ARM'da rotor konumuna göre değişim oranının yaklaşık olarak iki katı kadardır (Mecrow ve diğ., 2001, Preston ve Lyons, 1991).

Şekil 3.8’da Klasik ARM ile karşıt kuplajlı ARM’nun λ -i karakteristiklerinin karşılaştırıldıkları durum gösterilmektedir.



Şekil 3.8: Klasik ARM ve KKARM’nun λ -i karakteristikleri.

Aynı akım değerinde, klasik ARM ve karşıt kuplajlı ARM’nun λ -i karakteristikleri karşılaştırıldığında KKARM’dan daha yüksek akı elde edileceği görülmektedir.

Yeni sargı yapısı ile yukarıdaki bölümlerde açıklandığı üzere endüktans eğrisinde meydana gelen önemli değişikliklerden dolayı KKARM’ da moment üretme şekli, klasik ARM’ dan farklı bir yapıya sahiptir. Denklem 3.3’te üç fazlı bir Anahtarlamalı Relüktans Motorun en genel moment ifadesi verilmiştir. Klasik ARM’ da fazlar arasında oluşan kuplaj ihmal edilebilecek değerde olduğu için bu kuplajlardan elde edilecek moment üretimi de ihmal edilecek değeredir.

$$M = \frac{1}{2} I_a^2 \frac{dL_a}{d\theta} + \frac{1}{2} I_b^2 \frac{dL_b}{d\theta} + \frac{1}{2} I_c^2 \frac{dL_c}{d\theta} + I_a \cdot I_b \frac{dM_{ab}}{d\theta} + I_b \cdot I_c \frac{dM_{bc}}{d\theta} + I_c \cdot I_a \frac{dM_{ca}}{d\theta} \quad (3.3)$$

Dolayısı ile denklem 3.3'teki son üç terim genellikle ihmal edilebilecek düzeydedir ve ihmal edilir. Klasik ARM 'da moment ifadesi,

$$M = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (3.4)$$

haline gelir. Böylece üretilen moment, öz endüktansın rotor konumuna göre değişim oranı ile akımın bir fonksiyonudur. Buradan her bir stator fazının, pozitif moment üretimine ancak elektriksel periyodun 1/3'ü oranında katkıda bulunduğu sonucuna varılabilir. Bu durum, makinenin elektrik ve manyetik devresinin yeterince verimli kullanılmadığını açıkça göstermektedir.

KKARM'da ise, öz endüktansın rotor konumuna göre değişimi yaklaşık olarak sabit olduğu kabul edilirse denklem 3.3'teki ilk üç terim sıfır olacaktır. Dolayısı ile yeni sargı yapısına sahip motorun moment ifadesi Denklem 3.5'teki gibi olur.

$$M = I_a \cdot I_b \frac{dM_{ab}}{d\theta} + I_b \cdot I_c \frac{dM_{bc}}{d\theta} + I_c \cdot I_a \frac{dM_{ca}}{d\theta} \quad (3.5)$$

Bu durumda her bir faz, pozitif moment üretimine elektriksel periyodun 2/3'ü oranında katkı sağlamaktadır. Bu nedenle makinenin elektrik devresinden daha fazla yararlanmak mümkün olmaktadır. Motordan elde edilen moment, akımın ve fazlar arasında oluşan karşıt endüktansların rotor konumuna göre değişim oranının bir fonksiyonudur. Denklem 3.4 ve denklem 3.5 karşılaştırıldığında, ideal durumda KKARM'da üretilen moment klasik motorun tam dört katı olduğu görülmektedir. Ancak gerçekte doyma ve kayıplardan dolayı bu fark oldukça azalacak ve önceki yapılan çalışmalara göre %20-30 arasında bir değere düşmektedir (Mecrow 1993, Clothier ve Mecrow 1999). Bu değer, eşdeğer motorlar ile karşılaştırıldığında çok önemli bir üstünlük olarak öne çıkmaktadır.

Denklem 3.5'teki moment üretim mekanizmasının çalışması, motorun uyarma yapısına göre farklılık göstermektedir. Değişik uyarma yapıları ve bunlara ait momentin üretilmesine ait şekiller bundan sonraki kısımda incelenmektedir.

3.3 KKARM'da Uyarma Yapıları

KKARM'da momentin elde edilme şekli ve ortalama çıkış değeri kullanılan uyarma yapısına göre değişmektedir. Faz sargılarına uygulanan uyarma yapısı;

- Tek yönlü
- Çift yönlü iki fazlı
- Çift yönlü üç fazlı

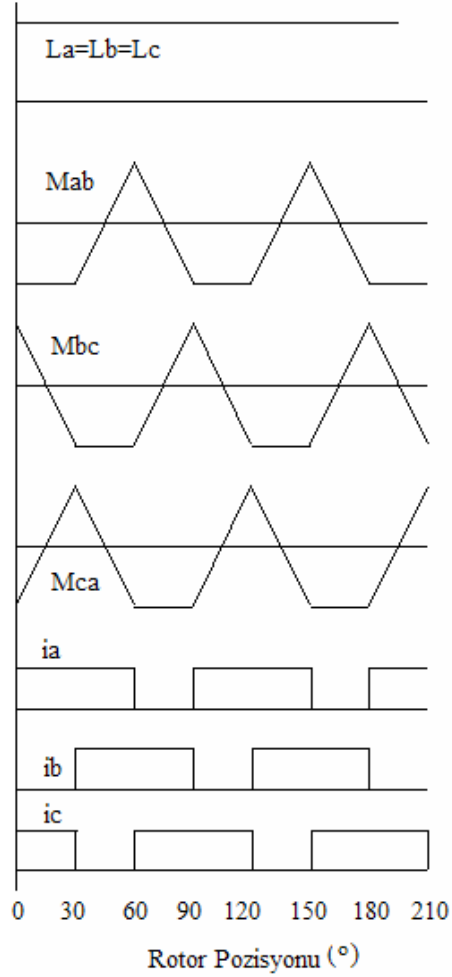
olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Her bir uyarma yapısının uygulanması durumunda akı dağılımı ve momentteki dalgalılık oranı değişmektedir. Bu uyarma yapıları KKARM'nun performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

3.3.1 Tek yönlü (unipolar) uyarma yapısı

Uyarma yapısı ve sargı yapısına göre endüktans değişimleri şekil 3.9'da verilmektedir. Şekilde de gösterildiği gibi herhangi bir "t" zamanında iletimde bulunan iki faz pozitif işaretlidir ve her faz 60° iletimde kalmaktadır. Denklem 3.5 ile KKARM 'da momentin elde edilmesine ilişkin bağıntı verilmişti. Bu denklem incelendiğinde faz akımlarının pozitif olması veya başka bir ifade ile aynı işaretli olması durumunda pozitif moment sadece karşıt kuplajların arttığı yani rotor konumuna göre türevinin pozitif olduğu bölgede üretilmektedir (Clothier ve Mecrow 1999).

İlk zaman aralığı olan 0-30° yi incelediğimizde a-c fazları iletimde olduğu görülmektedir ve bu iki faz arasında oluşan karşıt kuplajın rotor konumuna göre değişimi pozitif olduğu için pozitif moment bu bölgede elde edilmektedir. Ayrıca karşıt

kuplaj değişiminin negatif olduğu bölgede aynı fazlar uyarılmaya devam edilirse makine negatif moment üretmektedir.



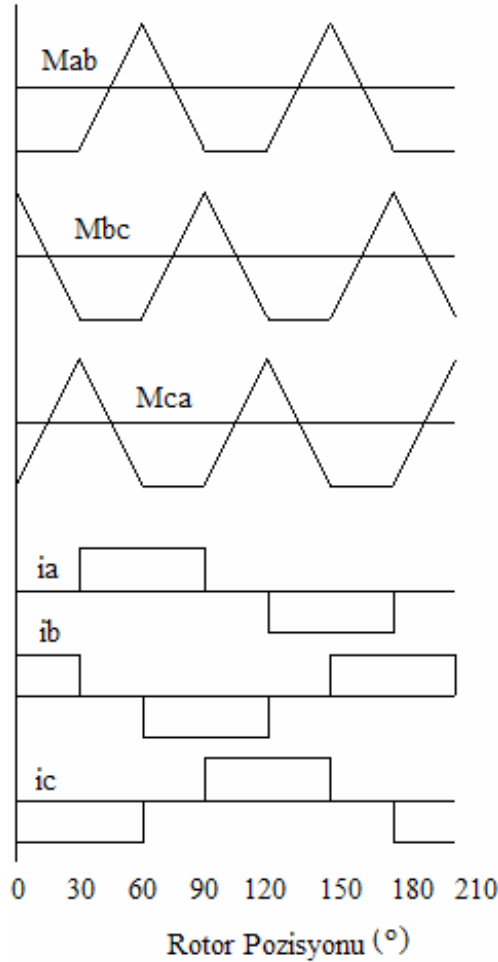
Şekil 3.9: Tek yönlü (unipolar) uyarma yapısı ve endüktans değişimi.

3.3.2 Çift yönlü (bipolar) uyarma yapısı

KKARM'unda herhangi bir t anında iki fazın iletimde olduğu ve fazlardan birisinin pozitif, diğerinin negatif akım taşıdığı uyarma yapısı, çift yönlü uyarma yapısı olarak bilinmektedir. İletimde bulunan fazlardan birisinin pozitif değerinin negatif işaretli olması durumunda pozitif momentin üretilmesi için farklı bir durum meydana gelmektedir.

Denklem 3.5 ele alındığında pozitif momentin üretilmesini sağlamak için karşıt kuplajın rotor konumuna göre değişim oranının türevi negatif olmalıdır. Tek yönlü uyarda endüktansın sadece yükselen kısmından pozitif moment üretilirken bu uyarma yapısında hem pozitif hem de negatif bölgeden pozitif moment elde edilebilir.

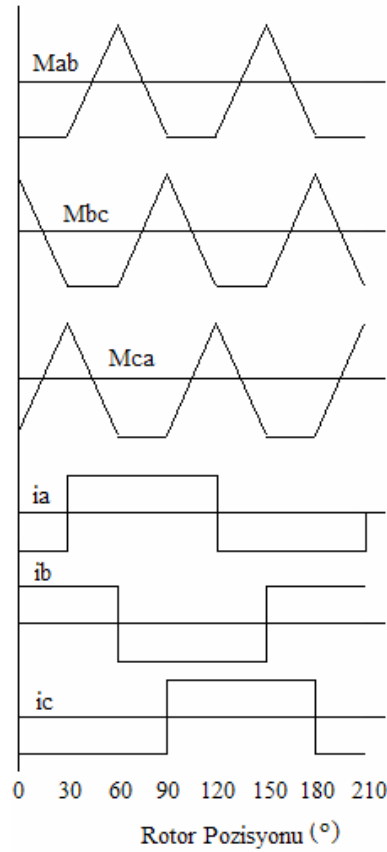
Çift yönlü uyarma yapısında akımlar 60° iletimde kalmakta, 30° kesimde kalmakta ve 60° ters polariteli olarak tekrar iletime girmektedir. Şekil 3.10 ile verilen uyarma yapısında ilk zaman aralığı $0-30^\circ$ 'yi incelediğimizde, b-c fazları iletimdedir ve pozitif moment M_{bc} karşıt endüktansından elde edilmektedir.



Şekil 3.10: Çift yönlü iki fazlı uyarma yapısı ve endüktans değişimi.

3.3.2.1 Çift yönlü (bipolar) üç fazlı uyarma yapısı

Bu uyarma yapısında akımlar 90° pozitif işaretli olarak iletimde kalmakta ve 90° negatif işaretli olarak tekrar iletime girmektedir. Pozitif momentin elde edilmesi bu uyarma yapısında da değişmektedir. Pozitif moment karşıt endüktansların rotor konumuna göre değişim oranı türevinin hem negatif olduğu hem pozitif olduğu bölgede elde edilebilmektedir (Barras et al 1995). İlk zaman aralığı olan $0-30^\circ$ yi ele aldığımızda a fazı negatif, b fazı pozitif ve c fazı yine negatif işaretli olarak iletimdedir. Şekil 3.11 ile KKARM'nun çift yönlü üç fazlı uyarma yapısı ve endüktans değişimi verilmektedir.

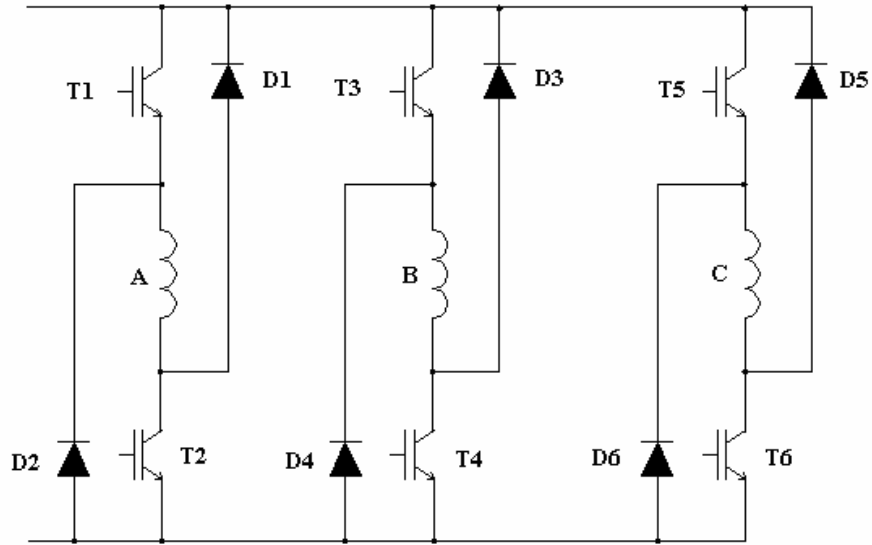


Şekil 3.11: Çift yönlü üç fazlı uyarma yapısı ve endüktans değişimi.

Denklem 3.5 ele alındığında pozitif moment, a-c fazları negatif olduğu için Mac karşıt endüktansının yükselen bölümüyle ve b-c faz akımları çarpımı negatif olduğu için Mbc karşıt endüktansının azalan kısmı ile üretilmektedir.

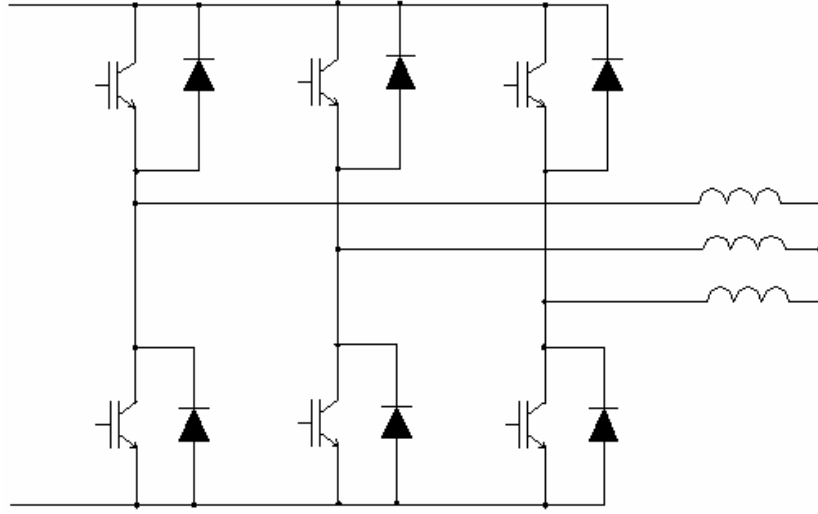
3.4 KKARM' da Sürücü Devrenin İncelenmesi

Anahtarlamaalı Relüktans Motor en fazla kullanılan sürücü devresi asimetrik yarı köprü devreli sürücüdür. KKARM'nun akım ve gerilim dalga şeklinde, periyodun ortasında gerilimin uygulanmadığı ancak akımın aktığı bir zaman aralığı bulunmaktadır. Bu aralıkta akan akım bir kontrollü güç elektroniği devre elemanı ve bir serbest geçiş diyodu üzerinden ilave kayıplar oluşturarak akar. Şekil 3.12 'de asimetrik yarı köprü sürücü devresi verilmiştir. Bu konu üzerine yapılan ayrıntılı araştırmalar neticesinde, bahsedilen sürücünün KKARM' da kullanılmasının kayıpların klasik ARM'dakine oranla yaklaşık olarak %100 artış göstermesine neden olduğu ortaya konulmaktadır ve kayıpları azaltmak amacı ile çeşitli sürücü devreler önerilmektedir (Clothier ve Mecrow 1999, Mecrow 1998).

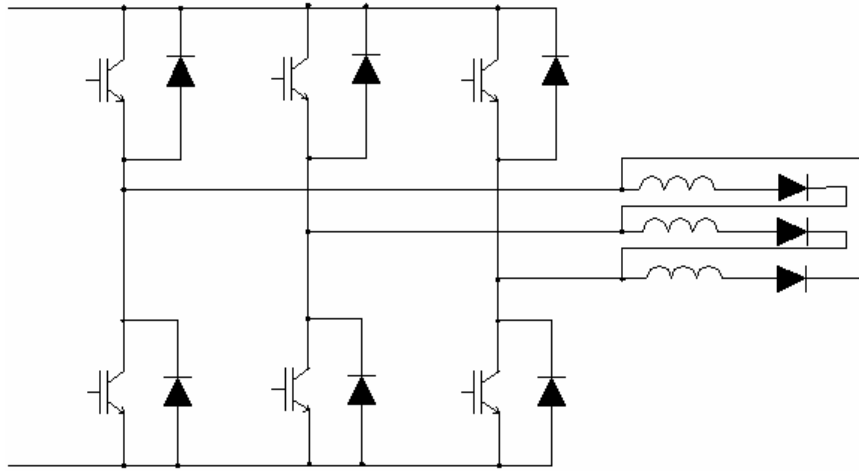


Şekil 3.12: Asimetrik yarı köprü sürücü devresi.

Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'de bunlara ait örnek devreler gösterilmektedir. Şekil 3.14'de gösterilen tam köprülü bu sürücü devresinde makine fazları üçgen ve diyotlar bu sargılara seri olarak bağlanmaktadır. Hat akımları faz akımlarının farkı olacağı için devre elemanlarından geçen akımın tepe değeri asimetrik yarı köprüden geçen akım değerine yakın olacaktır ve bundan dolayı kayıplarda benzer olacaktır (Yuntao, 2001).



Şekil 3.13: KKARM' da sargıların yıldız bağlandığı durum.



Şekil 3. 14: KKARM' da sargıların üçgen bağlandığı durum.

KKARM'nu ve klasik ARM'nu sürücü devreleri bakımından karşılaştıracak olursak aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir.

- Akım kontrollü çalışmada istenilen belirli bir moment değeri için, KKARM'da ihtiyaç duyulan faz başına mmk değeri klasik motordakinin yarısı kadar olacaktır.
- Gerilim kontrollü çalışmada ise KKARM için ihtiyaç duyulan akı değişimi tepe değeri, klasik ARM'dakinin iki katı kadar olacaktır.

- KKARM’da her faz periyodun 2/3 ‘ü kadar iletimde kaldığı için toplam dönüştürücü kayıplar yaklaşık olarak %100 fazla olacaktır.

3.5 Karşıt Kuplajlı Anahtarlama Relüktans Motorun Manyetostatik Analizi

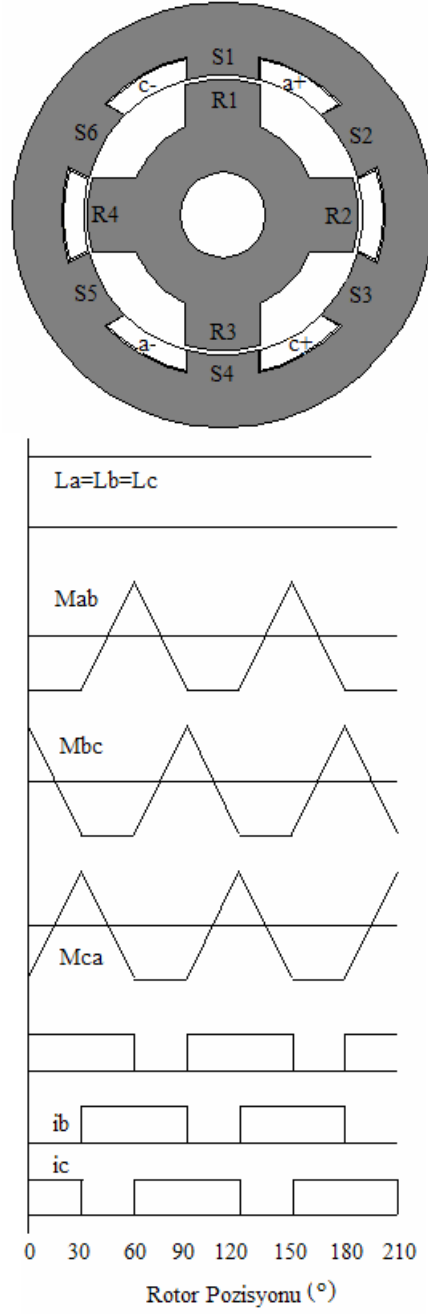
Bu kısımda iki boyutlu (2D) manyetostatik çözüm yapabilen MAXWELL 2D paket yazılım programı ile KKARM’nun performans karakteristikleri incelenmektedir. Kullanılan manyetik analiz yazılımı iki boyutlu manyetostatik çözüm yapmakta ve doğrudan sargının halkaladığı akıyı hesaplayabilmektedir. Rotor, pozitif moment bölgesi içerisinde karşılıklı konumdan ortalanmış konuma gelinceye kadar farklı ara rotor konumlarında sabit tutulmakta ve her bir konumda farklı akım değerleri için manyetik analiz hesaplamalarıyla $\lambda(i, \theta)$ değişimi belirlenmektedir.

Örneğin üç fazlı (6/4) KKARM’u için ($0^\circ \dots 45^\circ$) aralığında 10 adet rotor konumu ve (0A...255A) aralığında 17 adet akım değeri için toplam 170 adet farklı hesaplamada ise $\lambda(i, \theta)$ değişimi, öz ve karşıt endüktansların rotor konumu ile değişimleri ve momentin rotor konumu değişimleri farklı uyarma yapıları için belirlenmiştir.

3.6 Tek Yönlü (unipolar) Uyarma Altında Karşıt Kuplajlı ARM’nun Çalışma Karakteristiklerinin Elde Edilmesi

Şekil 3.15’de KKARM’u ve tek yönlü uyarma yapısı verilmektedir. Bu uyarma yapısı altında herhangi bir “t” anında iki faz uyarımda bulunmaktadır. Stator sargısı rotorun her 5’er derecelik konum değişikliğinde sabit akımla uyarılmıştır. Tek yönlü uyarım yapısında ilk zaman aralığında ($0-30^\circ$ arasında) iki faz iletimdedir (a ve c fazları). Uyarılmış bu iki fazın oluşturduğu karşıt kuplaj M_{ac} negatif bir değerden başlayıp tam 30° ’de en yüksek değerine erişmektedir. İlk zaman aralığında meydana gelen M_{ac} ’nin rotor konumuna göre değişiminden pozitif moment üretilmektedir. Fazlar arasında 30° ’lik bir fark olduğundan dolayı fazlar arasındaki karşıt kuplajlarda da aynı faz farkı oluşmaktadır ve bu şekilde motorun ürettiği üç fazlı moment eğrisi oluşur. Diğer yandan

fazlara ait öz endüktans değerinin ideal durumda sabit olarak kabul edilmektedir ve bu durum Şekil 3.15’da gösterilmektedir. Ayrıca öz endüktansın rotor konumuna göre değişimi sıfır olacağı için, öz endüktanstan kaynaklanan pozitif moment üretimi de olmamaktadır.



Şekil 3.15: KKARM ve tek yönlü (unipolar) uyarma yapısı.

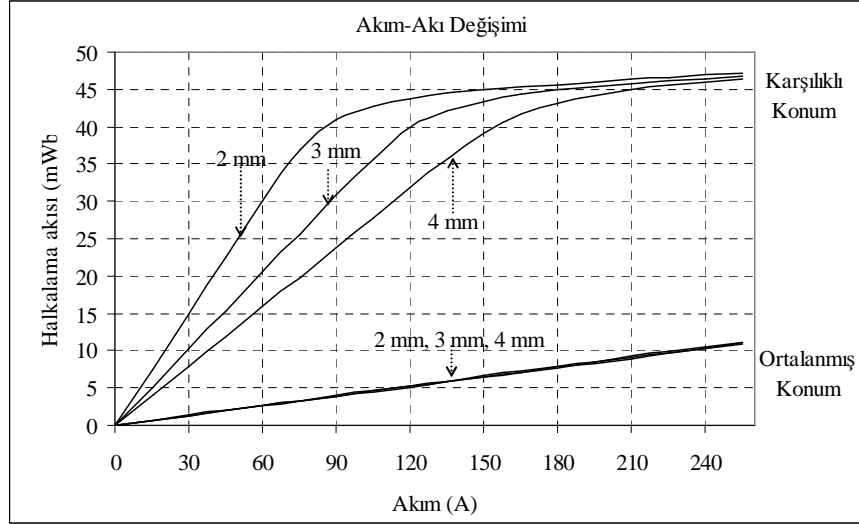
Bu kısımda KKARM'nun çalışma karakteristikleri çıkartılacaktır ve geometrik parametrelerinin (hava aralığı, rotor kutup açısı) değişiminin çıkış karakteristikleri etkileri incelenecektir. Bu amaca uygun olarak klasik ARM'da olduğu gibi hava aralığı değeri ve rotor kutup açısı değeri değiştirilerek 9 adet model oluşturulmaktadır. Hava aralığı değeri 2mm, 3mm, 4mm ve rotor kutup açısı değeri 31, 32 ve 33 derece seçilerek analizler yapılmaktadır. Ayrıca her analiz için ($0^\circ \dots 45^\circ$) aralığında 10 adet rotor konumu ve (15A...255A) aralığında 17 adet akım değeri için toplam 170 adet farklı hesaplama yapılmaktadır. Bu parametre değerlerinin değişiminin KKARM'nun çalışma karakteristikleri etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için klasik ARM analizinde olduğu gibi aynı şekilde hava aralığı ve rotor kutup açısı değişimleri olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir.

3.6.1 Hava aralığı değişiminin KKARM'unun çalışma karakteristikleri üzerindeki etkileri

KKAR Motorunda manyetik doymadan önce ve doymadan sonra belirlemek için anma akım değerinin altında ve üstünde değerlerin alınması gerekmektedir. Bu bölümde çalışma karakteristiklerinden ilk olarak akı eğrisi her hava aralığı değeri için çizilerek karşılaştırılmaktadır. Daha sonra da KKARM'nun diğer çalışma karakteristikleri incelenmektedir. Şekil 3.16'da rotorun karşılıklı ($\theta=0^\circ$) ve ortalanmış ($\theta=45^\circ$) konumlarında, seçilen her hava aralığı değeri için manyetik analiz ile hesaplanan $\lambda(i, \theta)$ değişimleri verilmektedir.

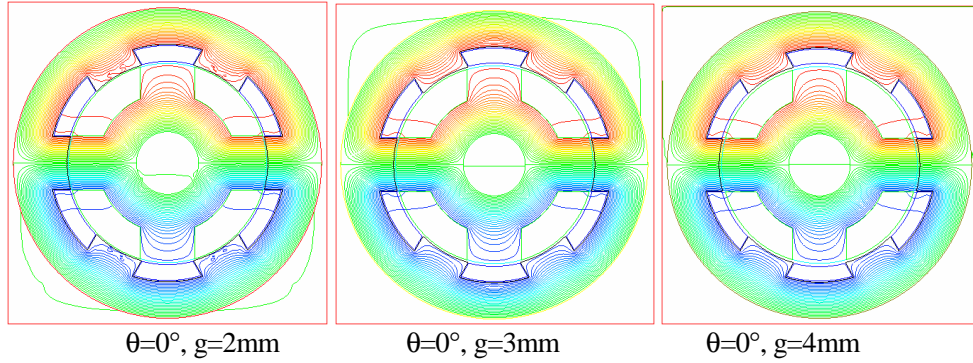
Şekil 3.16'da gösterilen akı eğrileri dikkatle incelendiğinde hava aralığı 2mm olarak seçildiğinde 90 A civarında, 3mm olarak seçildiğinde 120 A civarında, 4mm olarak seçildiğinde ise 180 A civarında manyetik doymanın başladığı görülmektedir. Daha öncede belirtildiği gibi manyetik doymanın başladığı akım değerinin altındaki değerler doğrusal bölgeye, üstündeki değerler ise doğrusal olmayan bölgeye aittir. Akı karşılıklı (aligned) konumda en büyük değere sahiptir. Buradan hareketle klasik ARM'unda olduğu gibi, hava aralığı değeri küçük seçildiğinde KKARM'un daha küçük akım değerleri için

manyetik doymanın başladığı ve hava aralığı değeri büyüdükçe daha büyük akım değerlerinde manyetik doymanın meydana geleceği söylenebilir.



Şekil 3.16: Unipolar uyarılmış 6/4 Karşıt Kuplajlı ARM'nun halkalanma akısı-akım eğrisine hava aralığının etkisi.

Unipolar uyarılmış 6/4 KKARM'nun manyetik analiz sonuçlarından örnek olarak seçilen, rotorun karşılıklı ($\theta=0^\circ$) konumuna ait akı çizgileri dağılımları Şekil 3.17'de verilmektedir.

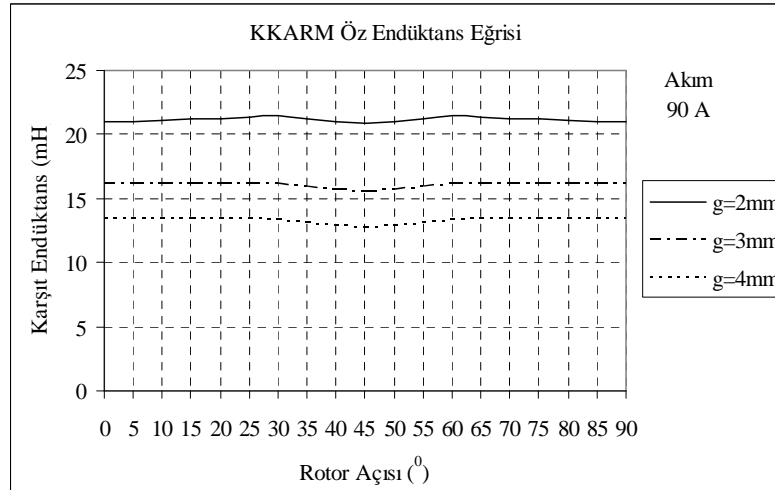


Şekil 3.17: Unipolar uyarılmış 6/4 KKARM'nun manyetik analiz sonuçları. Akı çizgileri dağılımı ($\theta=0^\circ$, $g=2\text{mm}$, $g=3\text{mm}$ ve $g=4\text{mm}$).

Yukarıda yer alan Şekil 3.17 dikkatlice incelendiğinde hava aralığı değişimi ile kutup üzerindeki akı çizgilerinin yoğunlukları ve kaçak akı değerleri değişmektedir. Hava aralığı

değeri arttıkça kaçak akı değeri de artmaktadır. Dolayısıyla kaçak akıdaki bu artış toplam faydalı akımın azalmasına neden olmaktadır.

Şekil 3.18 ile her hava aralığı değerinde bir faza ait KKARM için öz endüktans eğrisi verilmektedir. Şekil incelendiğinde öz endüktans eğrisi, rotor kutbu bir stator kutbundan ayrılırken, aynı zamanda diğer stator kutbu ile hizalanmaya girdiğinden dolayı yaklaşık olarak sabittir, yani rotor konumundan bağımsızdır. Öz endüktans değişimi eğrisi incelendiğinde çok küçük dalgalanmaların olduğu gözükmemektedir ve bu dalgalanmalardan küçük bir moment değeri elde edilmektedir. Ancak bu değerler karşıt endüktans yanında ihmal edilebilecek değerlerdir ve bugüne kadar konu üzerinde yapılan çalışmalarda öz endüktansın ideal olarak yaklaşık sabit kaldığı kabul edilmiştir (Mecrow, 1995).

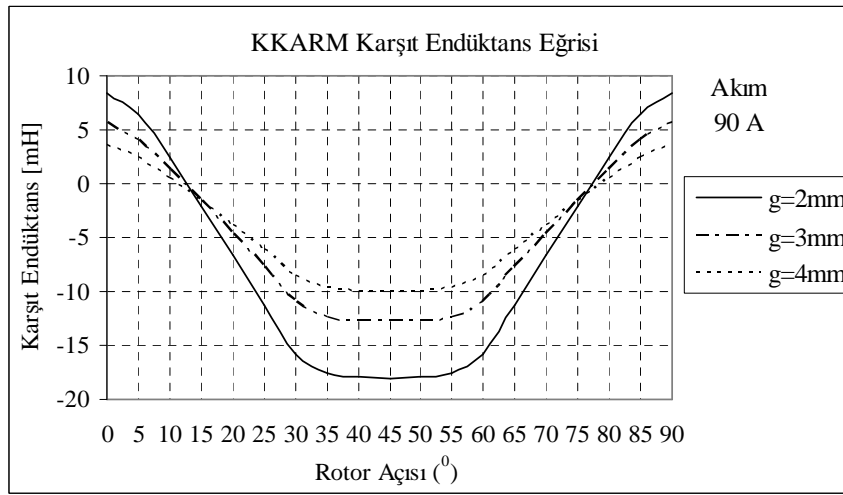


Şekil 3.18: Unipolar uyarılmış 6/4 KKARM'nun bir faza ait öz endüktans değişimi.

KKARM'de öz endüktansın rotor konumu ile değişmemesi ve sabit olarak kabul edilmesi, bu motoru çalışma ilkesi bakımından klasik ARM'undan ayıran en büyük farktır. Ayrıca daha öncede belirtildiği gibi yeni sargı yapısına sahip bu motorda moment üretimi, öz endüktanslardan değil fazlar arasındaki kuplajdan oluşan karşıt endüktanslardan kaynaklanmaktadır.

Unipolar uyarılmış KKARM'nun a-c fazlarına ait karşıt endüktansın değişimini şekil 3.19'da gösterilmektedir. Karşıt endüktans, klasik ARM'undaki öz endüktansın değişimi

gibi rotor konumu ile değişmektedir. Karşıt endüktans eğrisi incelendiğinde hava aralığı değişimi ile endüktansın değerinin değiştiği ve her üç eğride de yaklaşık 55° 'den başlayan yükselme 90° 'ye kadar sürmekte ve bu derecede en üst seviyeye ulaşmaktadır. Pozitif moment bu aralıkta üretilmekte ve makine motor olarak çalışmaktadır. Ayrıca karşıt endüktans eğrisinin sabit kaldığı bölgede ise fazlar enerjili olsa da herhangi bir moment üretimi olmayacaktır.

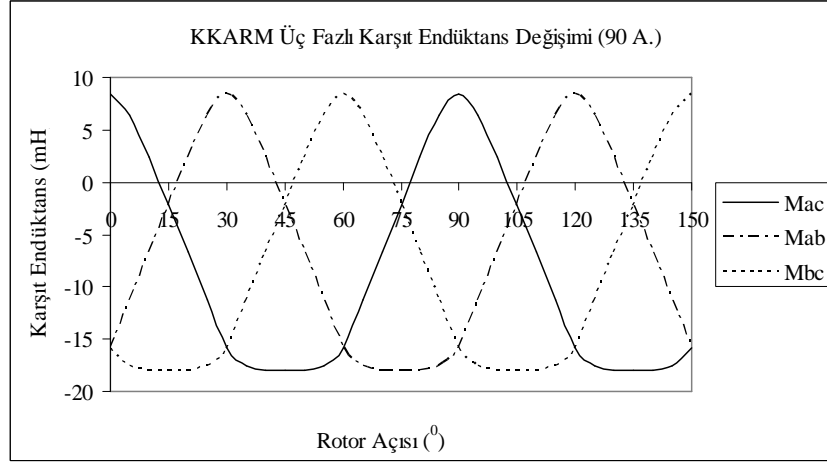


Şekil 3.19: Unipolar uyarılmış 6/4 KKARM'nun $M_{ac}-\theta$ değişimi.

Karşıt endüktans değeri, rotorun ortalanmış konumunda en küçük değerini karşılıklı konumunda ise en büyük değerini almaktadır.

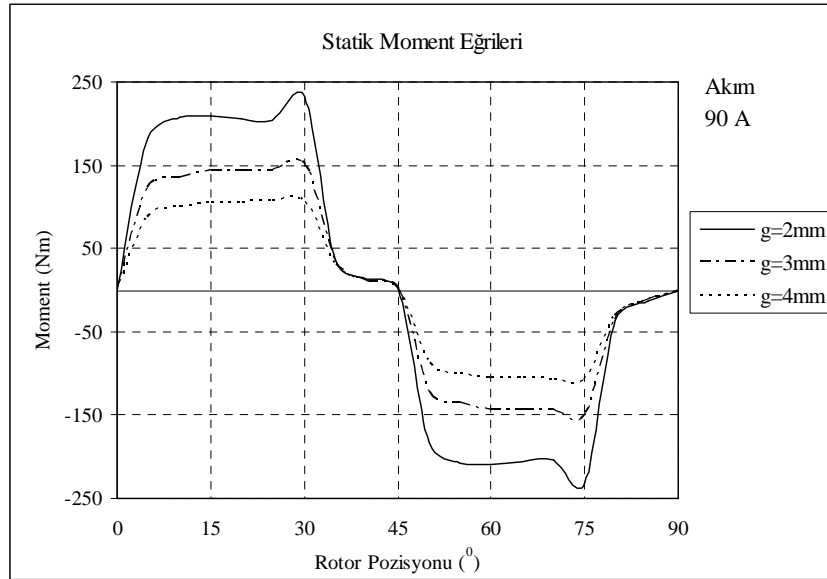
KKARM'nun yapısının simetrik olması karşıt endüktansların değişimine de yansımaktadır. Başka bir ifadeyle fazlar arasındaki 30° 'lik faz farkı aynı şekilde fazlar arasında oluşan karşıt endüktanslarda da görülmektedir. Bundan dolayı da aynı simetrik üç faza ait moment eğrileri de aynı simetrik yapıya sahip olacaktır. Motor manyetik doymamış bölgede çalışıldığı durumda karşıt endüktans, sadece rotor konumunun işlevi olacak, akıma bağlı olmayacak ve $M(\theta)$ şeklinde gösterilebilmektedir. Ancak motorun doğrusal olmayan bölgedeki çalışmada karşıt endüktans sadece rotor konumunun işlevi olmayacak, o anda iletimde bulunan her iki fazın da işlevi olacak ve $M(\theta, i_1, i_2)$ şeklinde gösterilebilmektedir.

KKARM'da tüm fazlara ait karşıt endüktansların değişimini Şekil 3.20'de gösterilmektedir.



Şekil 3.20: KKARM'da üç fazlı karşıt endüktans değişimi (g=2mm, 90A).

Motorun en önemli çalışma karakteristiklerinden birisi moment eğrisidir. Bu kısımda değişik hava aralığı değişiminin çıkış momentine olan etkisi incelenecektir. Manyetostatik analiz sonuçlarından elde edilen statik moment eğrileri 2D olarak Şekil 3.21 ile verilmektedir.

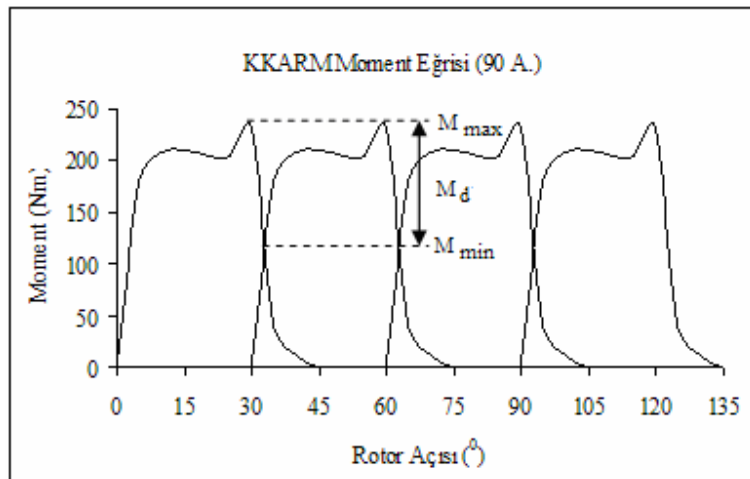


Şekil 3.21: Unipolar uyarılmış 6/4 KKARM'nun statik moment eğrileri (g=2-3-4mm).

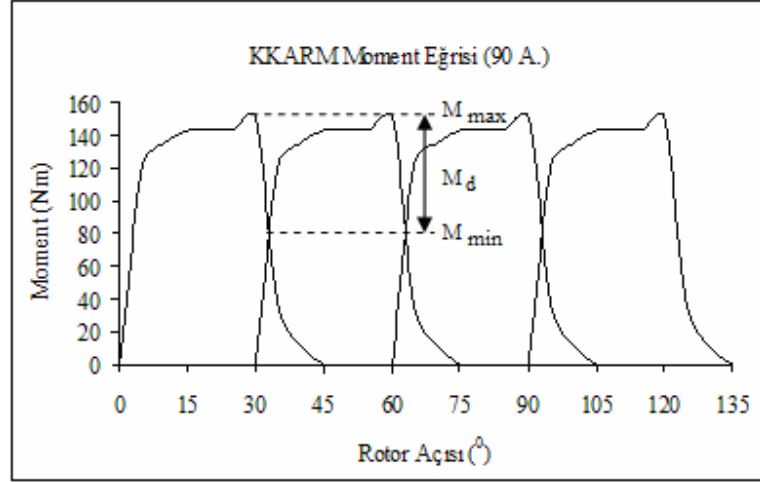
Hava aralığı değişiminin endükatans değerine olan etkisi göz önüne alındığında, dolayısıyla moment değerini de etkileyeceği söylenebilir. Şekil 3.21 dikkatlice incelendiğinde hava aralığı değişimi maksimum moment değerine ve düzgün moment oranına etki etmektedir. Ayrıca aynı akım değerinde, hava aralığı büyüdükçe maksimum moment değeri düşmektedir.

Aynı güçlere sahip KKARM ile klasik ARM ortalama çıkış momentini bakımından karşılaştırıldığı zaman, yeni sargı yapısına sahip KKARM'unun %20-30 civarında daha fazla bir değere sahip olduğu gözükmektedir. Ancak bu üstünlüğüne rağmen klasik ARM'unda olduğu gibi moment eğrisinde dalgalılık bulunmaktadır. KKARM'unun moment eğrisinde oluşan bu çökmeleri daha iyi analiz edilebilmek ve hava aralığının değişiminin etkisini inceleyebilmek açısından klasik ARM'unda olduğu gibi hava aralığı 2mm, 3mm ve 4mm olan motor modeli ele alınarak inceleme ve karşılaştırma yapılmaktadır. Bu doğrultuda aşağıdaki eğrilerden moment dalgalılığını hesaplamak için, eğrilerin en yüksek değeri (M_{max}) ve en küçük değeri (M_{min}) bulunur. Elde edilen bu değerler denklem 3.6'da yerine yazıldığında % olarak moment dalgalılığı hesaplanmaktadır.

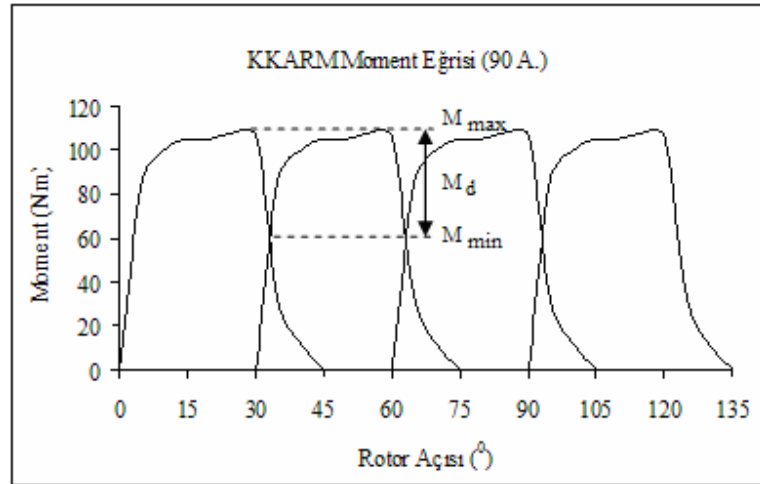
$$\%M_d = \frac{M_{max} - M_{min}}{M_{max} + M_{min}} * 100 \quad (3.6)$$



Şekil 3.22: Unipolar uyarılmış KKARM'un moment eğrisi (90 A, g=2mm).



Şekil 3.23: Unipolar uyarılmış KKARM'un moment eğrisi (90 A, g=3mm).



Şekil 3.24: Unipolar uyarılmış KKARM'un moment eğrisi (90 A, g=4mm).

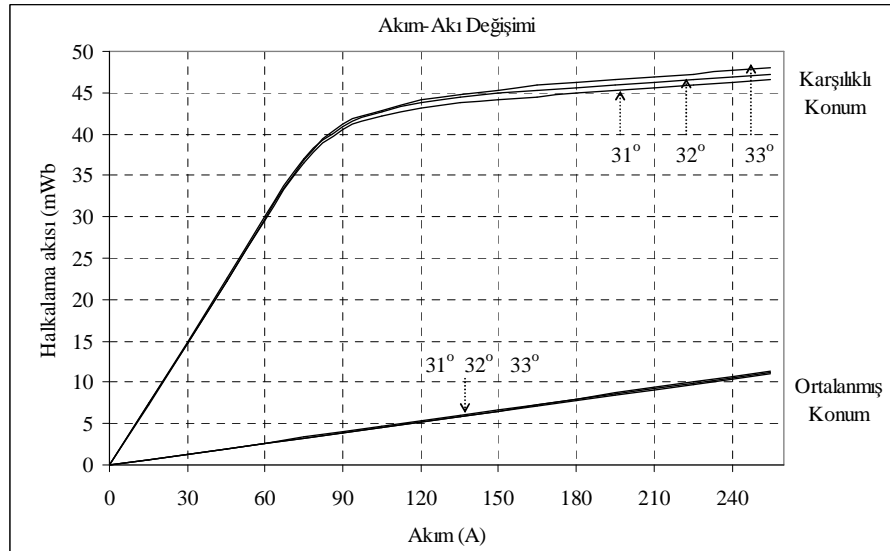
Anma akımı ve aynı zamanda hem lineer hem de doymuş bölgelere ait moment eğrileri elde edilmiş ve yine aynı dalgalılık hesabında kullanılan denkleme göre değerleri belirlenmiştir. Bu elde edilen sonuçlar Tablo 3.1'de verilmektedir. Elde edilen değerler incelendiğinde momentlerdeki dalgalılığın klasik ARM'unda olduğu gibi yüksek olduğu özellikle de doymuş çalışma bölgelerinde bu dalgalılığın daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca manyetik doyma bölgesinde, hava aralığı değişiminin moment dalgalılık oranına etkisi dikkate alınmayacak kadar azdır. Momentteki meydana gelen dalgalılık oranı uygun kontrol devresi kullanılarak azaltılabilir.

Tablo 3.1: Unipolar uyarılmış KKARM'un moment dalgalılık oranları.

KKARM			
Akım (A)	% M_d (Dalgalılık Oranı)		
	g=2 mm	g=3 mm	g=4 mm
60	31,07	29,83	29,75
90	31,49	31,21	30,49
120	32,13	31,99	31,18
150	34,11	32,64	31,93
180	34,63	33,43	32,33

3.6.2 Rotor kutup aç\u0131 de\u011fi\u015fimlerinin KKARM'unun \u00e7alı\u015fa karakteristikleri \u00fczerindeki etkileri

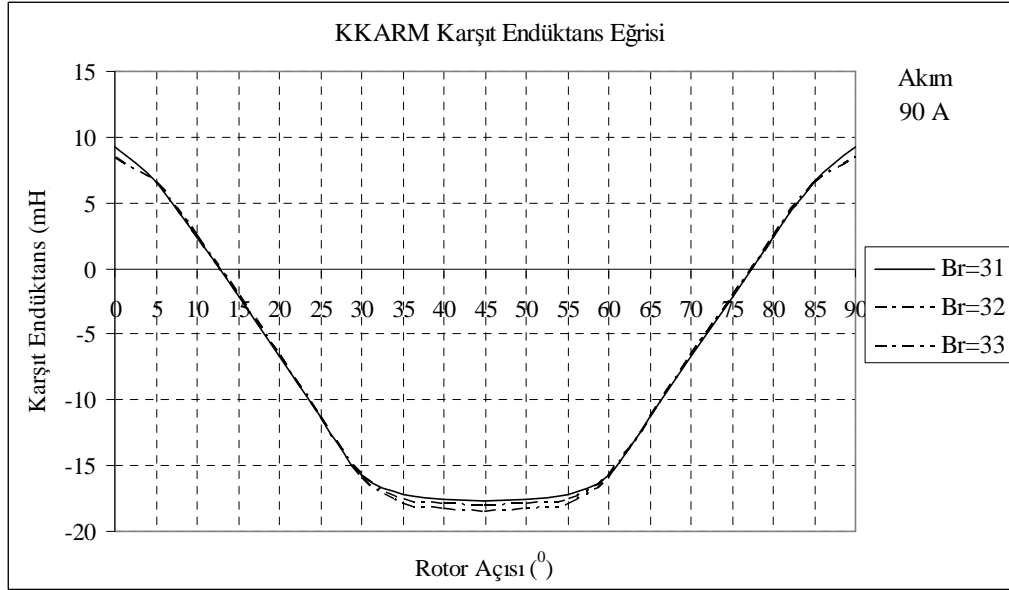
Bu kısımda KKARM'unun \u00e7alı\u015fa karakteristiklerinden ilk olarak akı e\u011fresi her rotor kutup a\u00e7\u0131 de\u011feri i\u00e7in \u00e7izilerek kar\u015fıla\u015ftırılacaktır. Daha sonra da KKARM'nun kar\u015fit end\u00fcktans e\u011fresi ve moment e\u011fresi incelenmektedir. \u015eekil 3.25'de rotorun kar\u015filıkl\u0131 ($\theta=0^\circ$) ve ortalanm\u0131\u015f ($\theta=45^\circ$) konumlarında, se\u00e7ilen her rotor kutup a\u00e7\u0131 de\u011feri i\u00e7in kar\u015fit kuplaj anahtarlamalı rel\u00fcktans motoruna ait halkalanma akısı-akım de\u011fi\u015fimi verilmektedir.



\u015eekil 3.25: Unipolar uyarılm\u0131\u015f KKARM halkalanma akısı-akım e\u011fresine rotor kutup a\u00e7\u0131 de\u011ferinin etkisi.

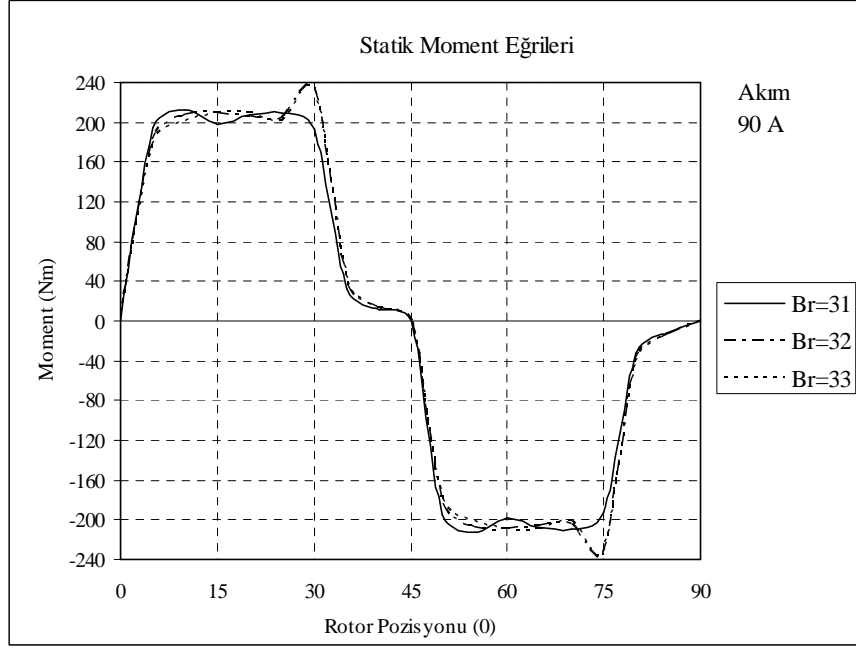
Şekil 3.25’de gösterilen akı eğrileri dikkatle incelendiğinde tüm rotor kutup açısı değerlerinde yaklaşık olarak 90 A civarında doymaya başladığı görülmektedir. Daha öncede belirtildiği gibi doymanın başladığı akım değerinin altındaki değerler doğrusal bölgeye, üstündeki değerler ise doğrusal olmayan bölgeye aittir. Akı karşılıklı (aligned) konumda en büyük değere sahiptir. Şekil 3.25 gösterildiği gibi rotor kutup açısı değerinin değişmesinin KKARM’unun halkalanma eğrisine ihmal edilebilecek seviyede etki ettiği görülmektedir.

Şekil 3.26 ile tüm rotor kutup açısı değerinde KKARM için karşıt endüktans eğrisi verilmektedir. Karşıt endüktans eğrisi incelendiğinde rotor kutup açısı değişimi ile endüktans değerinin ihmal edilebilecek seviyede değiştiği ve rotor kutup açısı değerlerinin birbirine yakın seçilmesinden dolayı her üç eğride de, aralarında 1°’den daha az bir farkla yaklaşık 54-55°’den başlayan ve 90°’ye kadar süren bir artış görülmektedir.



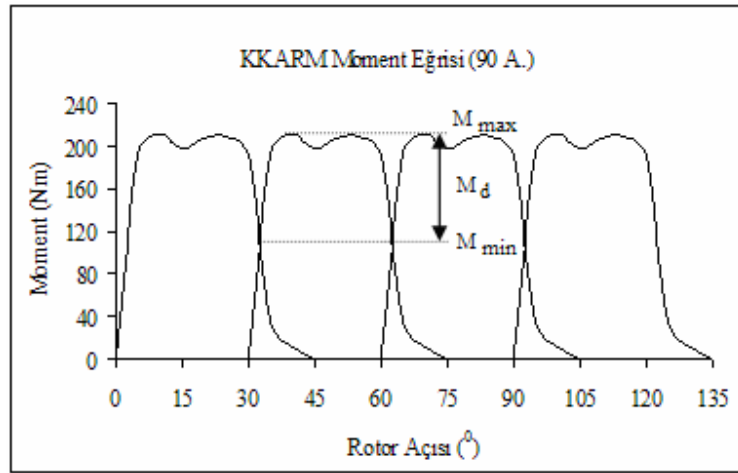
Şekil 3.26: Unipolar uyarılmış KKARM öz endüktans eğrisi (g=2mm, 90A).

Değişik rotor kutup açılara sahip manyeto statik analiz sonuçlarından elde edilen statik moment eğrileri Şekil 3.27 ile verilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere rotor kutup açısı değişimi, klasik ARM’unda olduğu gibi rotorun konumuna göre maksimum momente ve moment eğrisindeki pik değerlerinin genliğine etki etmektedir.

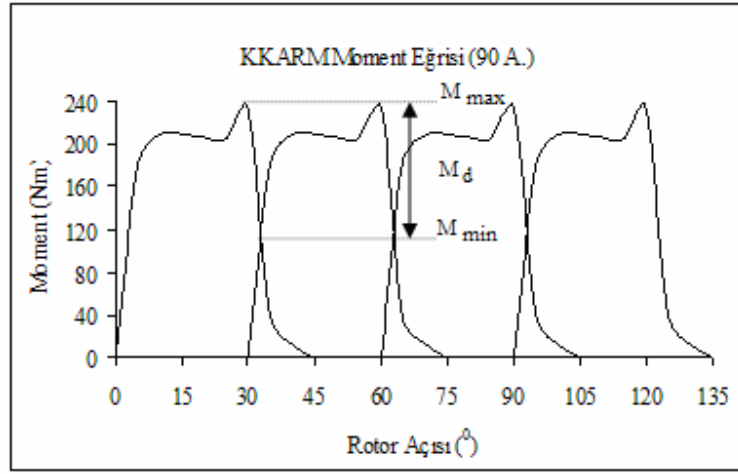


Şekil 3.27: Unipolar uyarılmış KKARM statik moment eğrileri ($\beta_r = 31^\circ - 32^\circ - 33^\circ$).

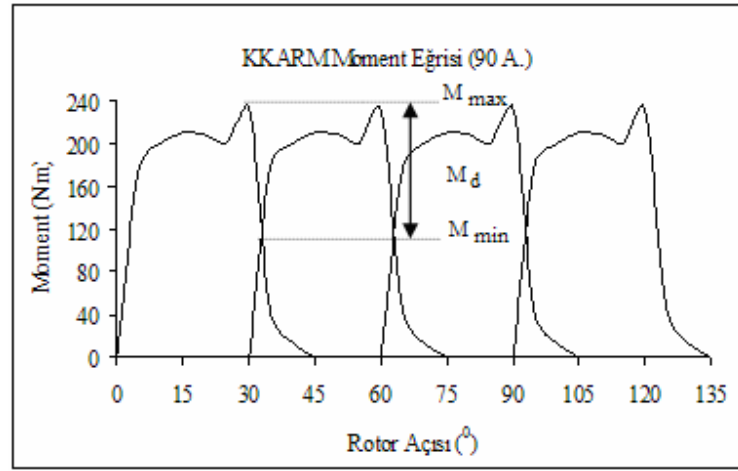
Rotor kutup açısı değişiminin moment eğrisindeki çökmelere etkisini inceleyebilmek açısından kutup açısı değerleri 31° , 32° ve 33° olan motor modeli ele alınarak inceleme ve karşılaştırma yapılmaktadır. Bu doğrultuda aşağıdaki eğrilerden moment dalgalılığını hesaplamak için, eğrilerin en yüksek değeri (M_{max}) ve en küçük değeri (M_{min}) bulunur. Elde edilen bu değerler denklem 3.6'da yerine yazıldığında % olarak moment dalgalılığı hesaplanmaktadır.



Şekil 3.28: Unipolar uyarılmış KKARM moment eğrisi (90 A, $\beta_r = 31^\circ$).



Şekil 3.29: Unipolar uyarılmış KKARM moment eğrisi (90 A, $\beta_r = 32^\circ$).



Şekil 3.30: Unipolar uyarılmış KKARM moment eğrisi (90 A, $\beta_r = 33^\circ$).

Daha önceki kısımlarda da açıklandığı üzere, anma akımı ve aynı zamanda hem lineer hem de doymuş bölgelere ait moment eğrileri elde edilmiş ve yine aynı dalgalılık hesabında kullanılan denkleme göre değerleri belirlenmiştir. Bu elde edilen sonuçlar Tablo 3.2’de verilmektedir. Elde edilen değerler incelendiğinde momentlerdeki dalgalılığın yüksek olduğu özellikle de doymuş çalışma bölgelerinde bu dalgalılığın daha fazla olduğu görülmektedir. Rotor kutup açısı değişimi klasik ARM’unda olduğu gibi moment dalgalılık oranına %5-10 civarında etkisi bulunmaktadır. Tablodaki veriler incelendiğinde rotor kutup açısı değeri 31° de iken moment dalgalılık oranı diğer değerlere göre daha düşüktür.

Tablo 3.2: Unipolar uyarılmış KKARM moment dalgalılık oranları.

KKARM			
Akım (A)	% M_d (Dalgalılık Oranı)		
	$\beta_r = 31^\circ$	$\beta_r = 32^\circ$	$\beta_r = 33^\circ$
60	27,05	31,07	31,63
90	27,19	31,49	32,23
120	26,46	32,13	33,68
150	28,27	34,11	35,93
180	28,96	34,63	36,21

4. GEOMETRİK PARAMETRELERİNİN KLASİK VE KARŞIT KUPLAJLI ARM'UNA ETKİLERİNİN EŞİT ŞARTLARDA KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde hava aralığı, β r parametrelerinin aynı geometrik ve elektriksel yapıya sahip klasik ARM ile Karşit Kuplajlı ARM'una etkilerinin karşılaştırılması yapılmaktadır. Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi KKARM'unun sargı yapısının klasik ARM'undan farklı olmasından dolayı eşit şartlar altında karşılaştırma yapabilmek için sargı dirençlerinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu nedenle aynı akım değerinde bir karşılaştırma yapmak doğru olmayacaktır. Karşılaştırma ya eşit bakır kayıpları altında ya da aynı manyetik çalışma noktasında yapılabilir. Aynı manyetik çalışma noktasını sağlamak için makinenin fiziksel boyutlarının değiştirilmesi gerekmektedir. Fakat bu çalışmada makinenin fiziksel boyutlarındaki değişimin çıkış parametrelerine olan etkileri incelendiğinden aynı fiziksel boyutlara sahip olması gerekmektedir. Bundan dolayı eşit bakır kayıpları göz önünde bulundurularak karşılaştırma yapılmaktadır.

4.2 Klasik ARM ve KKARM'da Faz Sargı Dirençlerinin Belirlenmesi

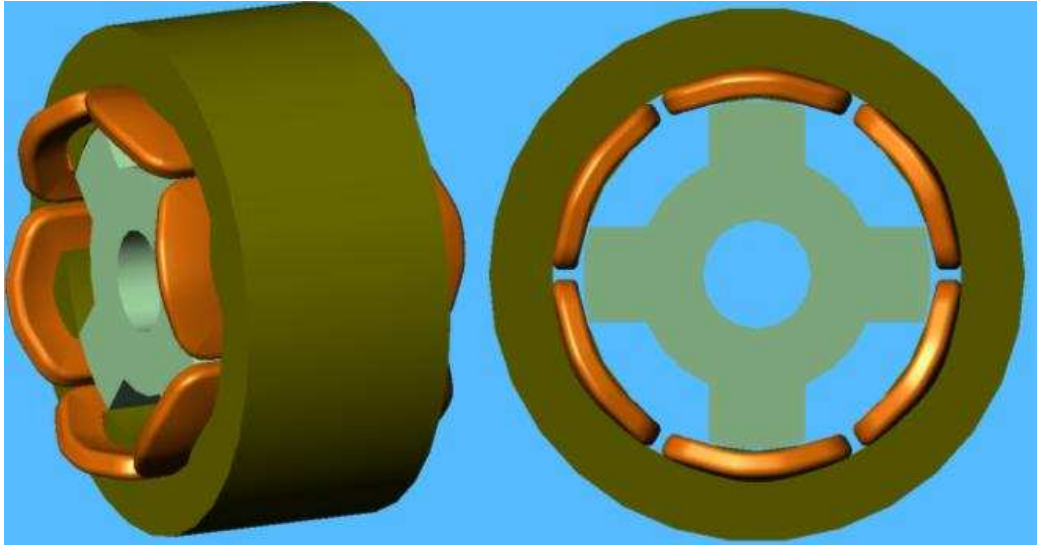
KKARM ve Klasik ARM'unun fiziksel boyutlarını değiştirmeden eşit şartlarda karşılaştırma yapabilmek için eşit bakır kayıpları altında değerlendirmek gerekmektedir. Daha önceki bölümlerde de açıklandığı gibi Klasik ARM'unun sargı yapısı tam kutup adımlı yapılar olarak KKARM'u elde edilir. Sargı yapısında yapılan bu değişiklik KKARM'unda faz sargı direncinde bir artışa neden olmaktadır. Eşit şartlar altında bu iki makineyi karşılaştırabilmek ve dolayısıyla eşit bakır kayıpları koşulunu sağlayabilmek için faz sargı direncindeki bu artışın incelenmesi gerekmektedir. Bu artışı bulabilmek için, üçüncü boyutu oluşturan sargı sonu etkisini de göz önünde bulundurarak üç boyutlu bir analiz yapılmaktadır. Bu doğrultuda üç boyutlu analiz yapmak için SOLID WORKS paket programı kullanılmaktadır. Bu kısımda, her iki makinenin hacim artış oranları bu

program ile üç boyutlu analiz sonucunda ortaya konularak hacimdeki artış oranlarından faz sargı dirençlerindeki artış oranı ortaya konulmaktadır.

Hacim artışı kesitin sabit kalmasından dolayı sadece sargı sonu etkisi ile sargı uzunluğunun değişmesine bağlıdır. Bu durumda hacimdeki bu artışın faz direncini lineer olarak arttırdığı söylenebilir (Garip, 2002).

4.2.1 Klasik ARM' unun üç boyutlu analizi

Şekil 4.1'de Klasik ARM'un kısa kutup adımlı sargıların oluklara yerleştirilmiş durumu ve üç boyutlu geometrisi gösterilmektedir.

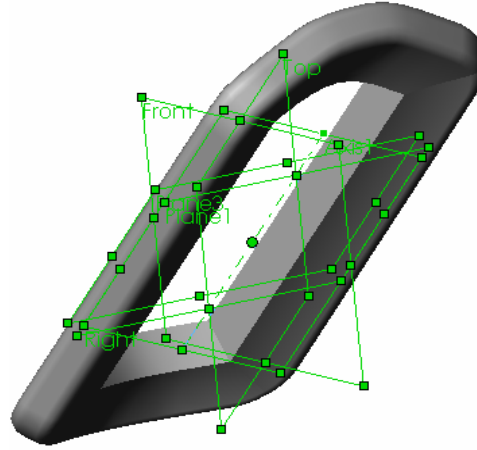


Şekil 4.1: Klasik ARM'unun üç boyutlu geometrisi.

Bu çalışmada katı modelleme yapan Solid Works paket programı ve yöntem olarak süpürme yöntemi kullanılmıştır. Şekil 4.2'de Solid Works ile oluşturulan model verilmektedir.

Kullanılan bu yöntemde, katının oluşturulması için çeşitli düzlemlerde oluşturulmuş kesit alanlar ile bu kesit alanları birleştiren bir eğri gerekmektedir. İlk olarak çeşitli açılarda, kesit alanların geometrilerinin üzerlerine oturtulacağı çizim düzlemleri

oluşturulmaktadır. Daha sonra ise sarım sayısı ve tel çapına bağlı olarak kesit alan bulunmakta, bu alan sabit kalmak koşuluyla, alan geometrileri, düzlemler üzerine, sargının o düzlemdeki kesit alan geometrisini oluşturacak biçimde çizilmektedir. Oluşturulan kesit alanlar bu yönerge boyunca süpürülmüş ve katı model oluşturulmaktadır.

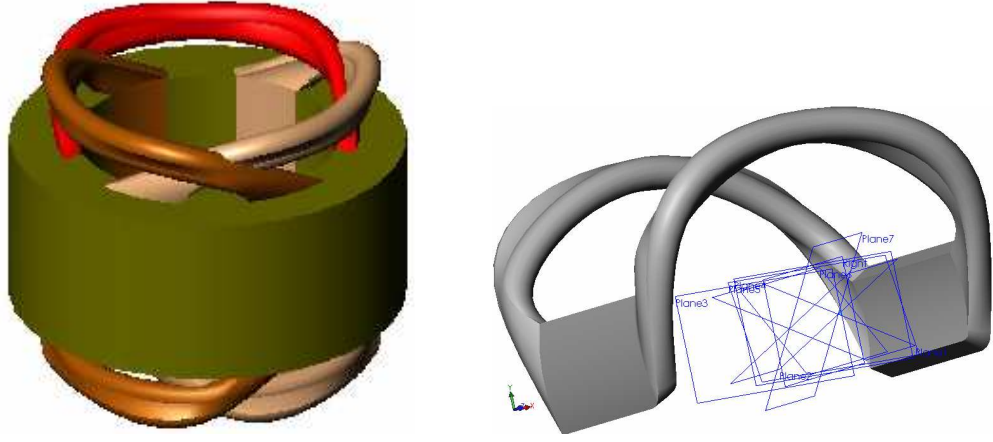


Şekil 4.2: Klasik ARM'unun sargı yapısına ait oluşturulmuş 3D katı model.

Farklı geometriler için sayısal hesaplamalar, paket programın “mass properties” komutu ile gerçekleştirilmektedir. Yapılan bu hesaplamalar neticesinde, Klasik ARM sargılarının 3950,4 mm³'lük bir hacim alanına sahip olduğu görülmektedir (Tablo 4.1). Hacim artışı kesitin sabit kalmasından dolayı sadece sargı sonu etkisi ile sargı uzunluğunun değişmesine bağlıdır. Bu durumda hacimdeki bu artışın faz direncini lineer olarak arttırdığı söylenebilir.

4.2.2 Karşıt kuplajlı ARM'unun üç boyutlu analizi

Şekil 4.3'de Karşıt kuplajlı ARM'un tam kutup adımli sargılarının oluklara yerleştirilmiş hali ve üç boyutlu geometrisi gösterilmektedir. Karşıt kuplajlı ARM'u tam adımli sargı yapısı ile klasik ARM'undan farklıdır. Sargı yapılarındaki bu farklılık sargı uzunluklarının farklı olmasına neden olacaktır. Bu nedenle iki makinanın eşit kayıplara dayalı analizi yapılırken faz dirençlerindeki artış oranının dikkate alınması gereklidir.



Şekil 4.3: Karşıt kuplajlı ARM'unun üç boyutlu geometrisi ve sargının üç boyutlu katı modeli.

Kullanılan katı modeller üzerinden hesaplanan hacim değerleri aşağıda verilmektedir.

Tablo 4.1: ARM'nun hacim artışlarına ilişkin tablo.

	Sargı sayısı	1 sargı hacmi (mm ³)	Toplam hacim (mm ³)
Klasik ARM	6	658,4	3950,4
KKARM	3	2106,43	6319,29
Hacim artış oranı			0,599

Bu hesaplamalar neticesinde, Klasik ARM'u ile KKARM'nun sargıları arasında, %59 - %62'lik bir hacim artışının olduğu gözlenmektedir. Burada hacim artışının kesitin sabit kalmasından dolayı sadece sargı sonu etkisi ile sargı uzunluğunun değişmesine bağlı olduğu gözükmektedir. Bu durumda hacimdeki bu artışın faz direncini lineer olarak arttırdığı söylenebilir (Garip, 2002).

Her fazın elektriksel periyodun 1/3' ü kadar iletimde olduğu klasik ARM'unda, her ne kadar dönen elektrik makineleri için demir kayıpları önemli olsa da eşit bakır kayıplarındaki karşılaştırmanın yeterli olacağı kabul edilmektedir (Mecrow, 1996). Denklem 4.1 ile Klasik ARM'unda faz başına kayıp güç ifadesi verilmektedir. Bu ifade I_k klasik ARM'unda faz akımı, R_k yine aynı motorda faz direnci, P_k ise bakır kayıplarını göstermektedir.

$$P_k = \frac{1}{3} \cdot I_k^2 \cdot R_k \quad (4.1)$$

Karşıt kuplajlı ARM'unda bakır kayıplarını veren ifade Denklem 4.2'de gösterilmektedir. Bu denklemde P_{kk} karşıt kuplajlı ARM'undaki bakır kayıplarını, I_k faz akımını, R_{kk} faz direncini temsil etmektedir.

$$P_{kk} = \frac{2}{3} \cdot I_k^2 \cdot R_{kk} \quad (4.2)$$

Denklem 4.1 ve 4.2 birbirine eşitlenerek faz dirençlerinde artış da dikkate alınarak, ilgili yerlerde yerine yazılıp denklem 4.3 elde edilir. Denklem 4.3 ile verilen ifadede, klasik ARM'daki faz akımının 0,559 katı bir akımla, karşıt kuplajlı ARM'nun uyarılması halinde, iki sargı türü arasında eşit şartlarda karşılaştırma yapabileceğimizi göstermektedir.

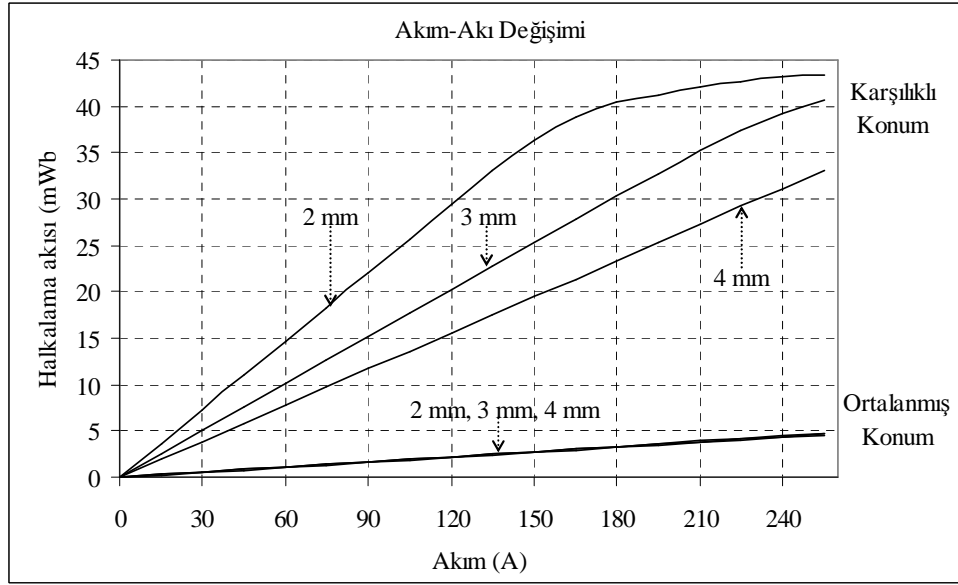
$$I_{kk} = 0,559 \cdot I_k \quad (4.3)$$

4.3 Klasik ARM ve Karşıt Kuplajlı ARM'unda Hava Aralığı ve Rotor Kutup Açısı Değerlerinin Çalışma Karakteristiklerine Etkilerinin Karşılaştırılması

Önceki bölümlerde geometrik parametrelerin (hava aralığı ve rotor kutup açısı) değişiminin her iki makine içinde çalışma karakteristikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kısımda eşit şartlar altında, geometrik parametrelerin değişiminin (hava aralığı ve rotor kutup açısı) klasik ARM'un çalışma karakteristikleri ile karşıt kuplajlı ARM'un çalışma karakteristikleri üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması yapılmaktadır. Karşılaştırmanın daha detaylı incelenebilmesi için hava aralığı ve rotor kutup açısı değişimi olarak iki başlık altında yapılacaktır. Çalışma karakteristikleri her iki makine için de anma akım değerinin altında ve üstünde değerlerin alınması ile çizdirilerek karşılaştırma yapılmaktadır.

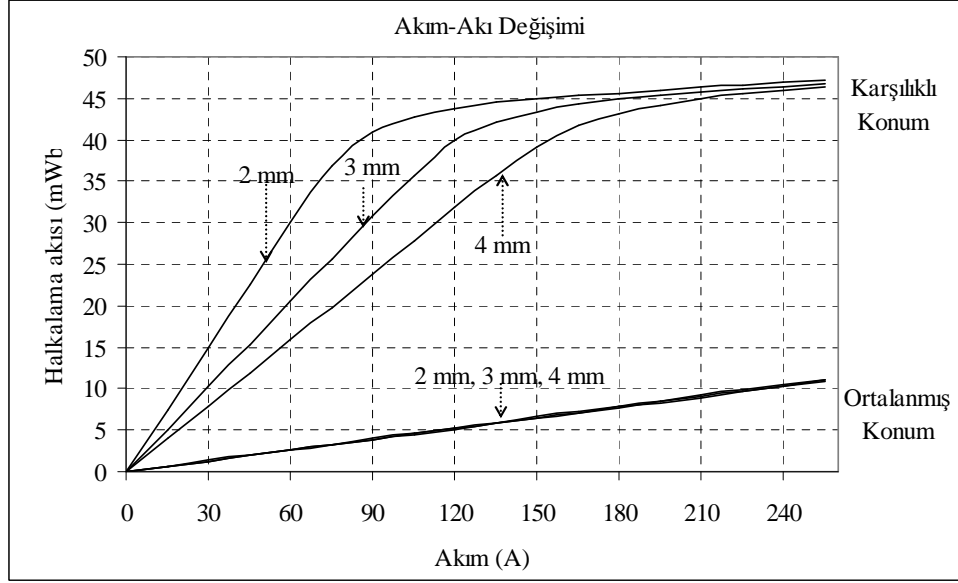
4.3.1 Klasik ARM ve karşıt kuplajlı ARM'da hava aralığı değişiminin çalışma karakteristikleri üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması

Klasik ARM ve karşıt kuplajlı ARM'un çalışma karakteristikleri çıkartmak amacı ile anma akım değerinin altında ve üstünde değerlerin alınması ile lineer olan ve olmayan bölgelerin özelliklerini belirlemek mümkün olmaktadır. Daha önceki kısımda da belirtildiği gibi klasik ARM'daki faz akımının 0,559 katı bir akımla, karşıt kuplajlı ARM'nun uyarılması halinde, iki sargı türü arasında eşit şartlarda karşılaştırma yapabileceğimizi göstermektedir. Bu doğrultuda çalışma karakteristikleri çıkartılarak karşılaştırma yapılmaktadır. Bu kısımda çalışma karakteristiklerinden ilk olarak akı eğrisi her hava aralığı değeri için çizilerek karşılaştırılacaktır. Daha sonra endüktans eğrileri ve moment eğrileri her hava aralığı değeri için çizilerek karşılaştırılacaktır. Şekil 4.4'de rotorun karşılıklı ($\theta=0^\circ$) ve ortalanmış ($\theta=45^\circ$) konumlarında, seçilen her hava aralığı değeri için klasik ARM'una ait halkalanma akısı-akım değişimi verilmektedir.



Şekil 4.4: Klasik ARM halkalanma akısı-akım eğrisine hava aralığının etkisi.

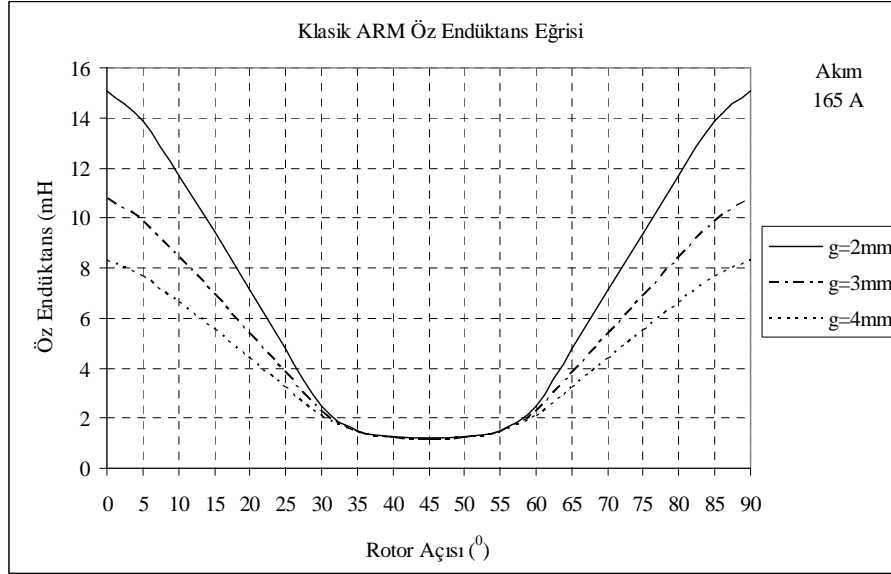
Şekil 4.5’de rotorun karşılıklı ($\theta=0^\circ$) ve ortalanmış ($\theta=45^\circ$) konumlarında, seçilen her hava aralığı değeri için karşit kuplajlı ARM’una ait halkalanma akısı-akım değişimi verilmektedir.



Şekil 4.5: Karşit kuplajlı ARM halkalanma akısı-akım eğrisine hava aralığının etkisi.

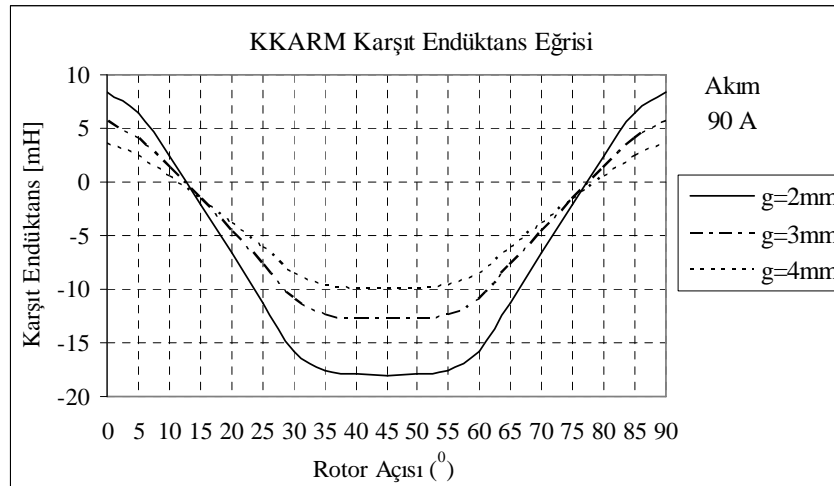
Yukarıda verilen her iki makineye ait halkalanma eğrileri incelendiğinde, hava aralığı değişimi ile doyuma gitme akım değerleri değişmektedir. Hava aralığı değeri büyüdükçe makinelerin doyuma ulaşması için gereken akım değeri de artmaktadır. Başka bir ifadeyle hava aralığı değişimi her iki makine için de anma akım değerlerini değiştirmektedir. Bundan dolayı hava aralığı değişiminin akı eğrisi üzerindeki etki her iki makine için de aynı olduğu söylenebilir.

Şekil 4.6 ile her hava aralığı değerinde Klasik ARM için öz endüktans eğrisi verilmektedir. Klasik sargı yöntemine sahip endüktans eğrisi, ortalanmış konumda en küçük değeri, karşılıklı konumunda ise, en büyük değeri almaktadır. Öz endüktans eğrisi incelendiğinde hava aralığı değişimi ile endüktansın değerinin değiştiği ve her üç egride de yaklaşık 55° den başlayan ve 90° 'ye kadar süren bir artış görülmektedir.



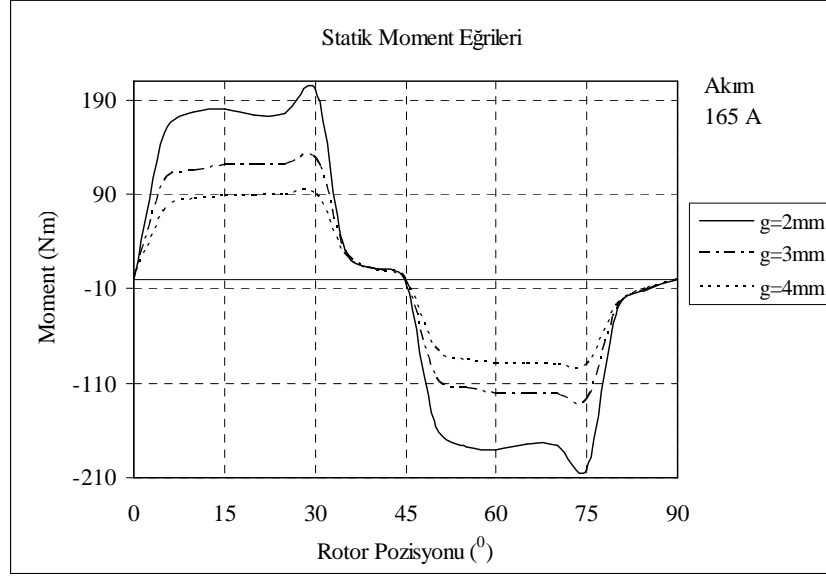
Şekil 4.6: Klasik ARM öz endüktans eğrisi hava aralığının etkisi (165A).

Unipolar uyarılmış KKARM'nun a-c fazlarına ait karşıt endüktansın değişimini şekil 4.7'de gösterilmektedir. Karşıt endüktans, klasik ARM'undaki öz endüktansın değişimi gibi rotor konumu ile değişmektedir. Karşıt endüktans eğrisi incelendiğinde hava aralığı değişimi ile endüktansın değerinin değiştiği ve her üç eğride de yaklaşık 55° 'den başlayan yükselme 90° 'ye kadar sürmekte ve bu derecede en üst seviyeye ulaşmaktadır.

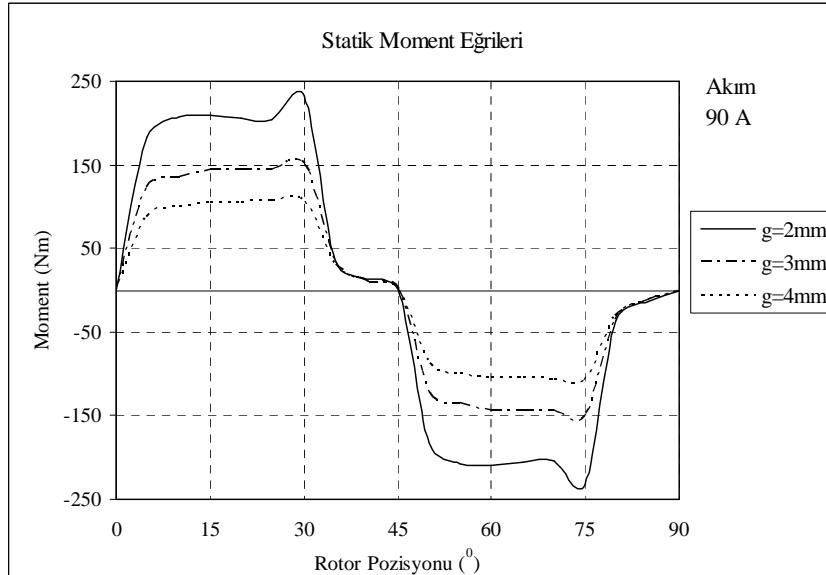


Şekil 4.7: Karşıt kuplajlı ARM karşıt endüktans eğrisine hava aralığının etkisi (90A).

Motorun en önemli çalışma karakteristiklerinden birisi moment eğrisidir ve manyetostatik analiz sonuçlarından elde edilen klasik ARM'una ait statik moment eğrileri Şekil 4.8 ile verilmektedir. Şekil 4.8'den de anlaşılacağı üzere hava aralığı değişimi maksimum moment değerine ve düzgün moment oranına etki etmektedir.



Şekil 4.8: Klasik ARM statik moment eğrileri (g=2-3-4mm).



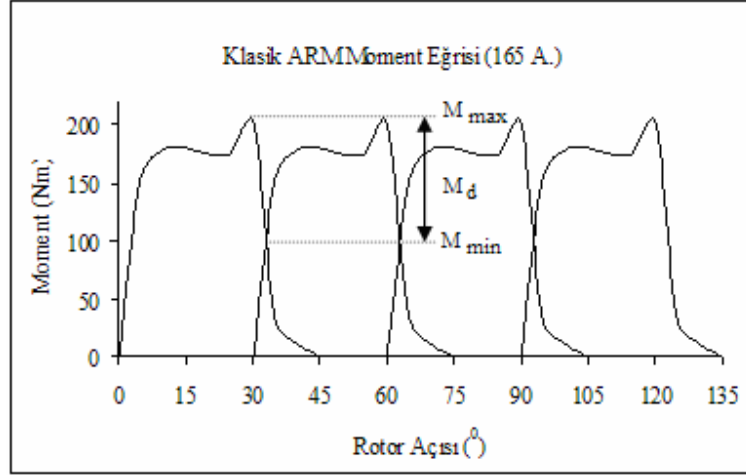
Şekil 4.9: Unipolar uyarılmış 6/4 KKARM'nun statik moment eğrileri (g=2-3-4mm).

Manyetostatik analiz sonuçlarından elde edilen karşıt kuplajlı ARM'una ait statik moment eğrileri Şekil 4.9 ile verilmektedir. Şekil 4.9 dikkatlice incelendiğinde hava aralığı değişimi klasik ARM'unda olduğu gibi maksimum moment değerine ve düzgün moment oranına etki etmektedir.

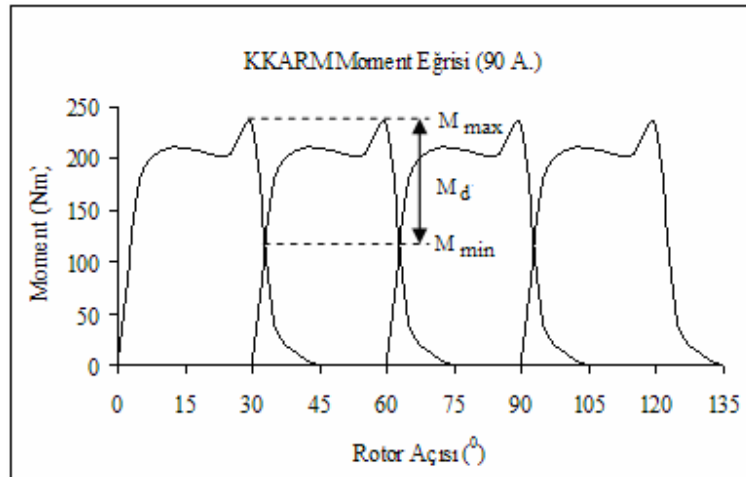
Ayrıca aynı güçlere sahip KKARM ile klasik ARM ortalama çıkış momenti bakımından karşılaştırıldığı zaman, yeni sargı yapısına sahip KKARM'unun %20-30 civarında daha fazla bir değere sahip olduğu gözükmektedir.

Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi manyetik doymadan ve faz komütasyonundan dolayı moment eğrisinde çökmeler oluşmaktadır. Hava aralığı değişiminin her iki makinede de moment dalgalılığına olan etkisini karşılaştırmak için, her hava aralığı değerinde anma akım değerinin altındaki ve üstündeki değerler alınarak moment eğrileri çizdirilmektedir. Daha önceki kısımda da belirtildiği gibi eşit bakır kayıpları göz önüne alındığında, karşıt kuplajlı ARM'un anma akım değeri, klasik ARM'un anma akım değerinin yaklaşık 0,559 katına tekabül etmektedir. Böylece aynı geometrik parametrelere sahip her iki makineyi de eşit şartlar altında karşılaştırma koşulu yerine getirilmiş olmaktadır. Şekil 4.10'da hava aralığı 2mm ve anma akım değeri 165 A olan klasik ARM ve Şekil 4.11'de hava aralığı 2mm olan anma akım değeri 90 A olan karşıt kuplajlı ARM'na ait moment eğrileri verilmektedir. Bu doğrultuda aşağıdaki eğrilerden moment dalgalılığını hesaplamak için, eğrilerin en yüksek değeri (M_{max}) ve en küçük değeri (M_{min}) bulunur. Elde edilen bu değerler denklem 4.4'da yerine yazıldığında % olarak moment dalgalılığı hesaplanmaktadır.

$$\% M_d = \frac{M_{max} - M_{min}}{M_{max} + M_{min}} * 100 \quad (4.4)$$



Şekil 4.10: Klasik ARM moment eğrisi (165 A, $g=2\text{mm}$).



Şekil 4.11: Unipolar uyarılmış KKARM'un moment eğrisi (90 A, $g=2\text{mm}$).

Anma akımı ve aynı zamanda hem lineer hem de doymuş bölgelere ait moment eğrileri elde edilmiş ve yine aynı dalgalılık hesabında kullanılan denkleme göre değerleri belirlenmiştir. Bu elde edilen sonuçlar Tablo 4.2'de verilmektedir. Elde edilen değerler incelendiğinde momentlerdeki dalgalılığın klasik ARM'unda olduğu gibi yüksek olduğu özellikle de doymuş çalışma bölgelerinde bu dalgalılığın daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca hava aralığı değişiminin moment dalgalılık oranına etkisi her iki makinede de aynı etkileri göstermektedir.

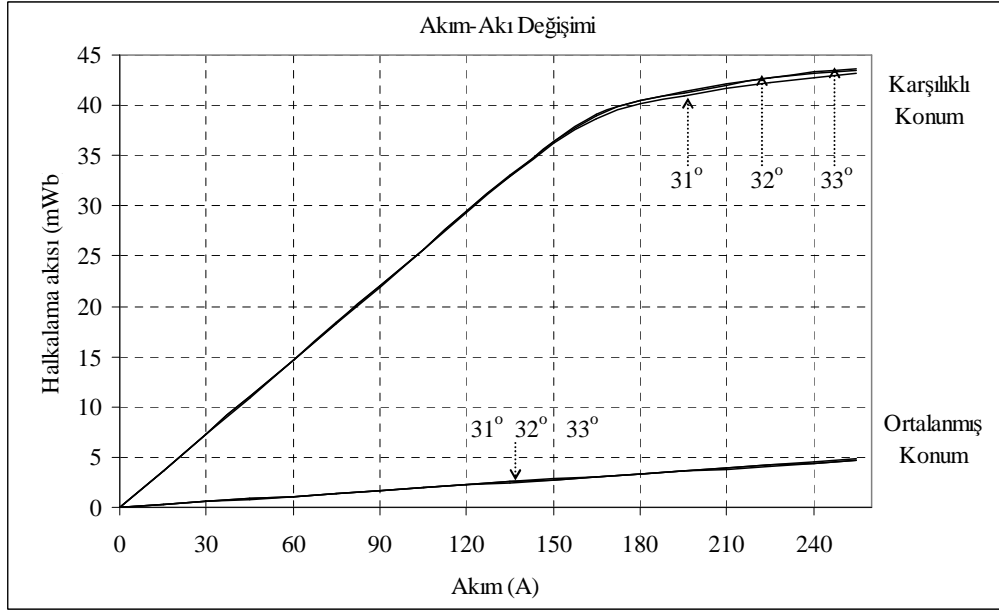
Tablo 4.2: Klasik ARM ve KKARM moment dalgalılık oranları.

Klasik ARM ve Karşıt Kuplajlı ARM							
Akım (A)		% M_d (Dalgalılık Oranı)					
		g=2mm		g=3mm		g=4mm	
ARM (I_k)	KKARM ($I_{kk} = 0.559 \cdot I_k$)	ARM (%)	KKARM (%)	ARM (%)	KKARM (%)	ARM (%)	KKARM (%)
75	45	28,83	30,87	27,90	29,16	26,88	28,69
120	60	29,24	31,07	28,29	29,83	27,12	29,75
165	90	30,03	31,45	28,90	31,21	26,97	30,49
195	105	30,87	31,70	28,93	31,35	27,08	30,82
210	120	30,93	32,13	29,18	31,99	27,91	31,18
240	135	31,84	33,61	30,72	32,10	29,10	31,65

4.3.2 Klasik ARM ve karşıt kuplajlı ARM'da rotor kutup açısı değeri değişiminin çalışma karakteristikleri üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması

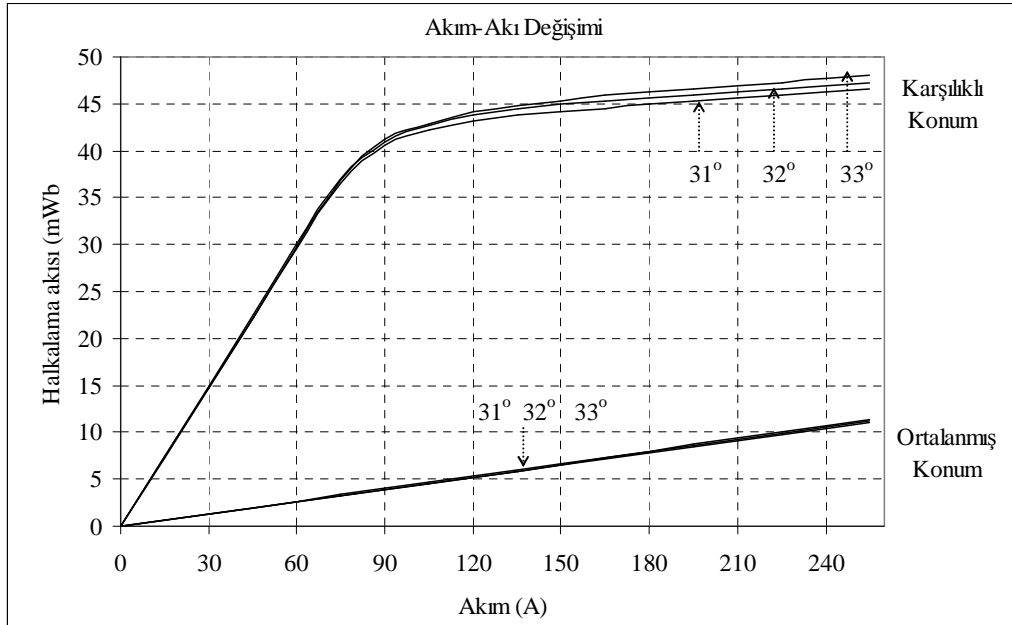
Klasik ARM ve karşıt kuplajlı ARM'un çalışma karakteristiğini çıkartmak amacı ile anma akım değerinin altında ve üstünde değerlerin alınması ile lineer olan ve olmayan bölgelerin özelliklerini belirlemek mümkün olmaktadır. Daha önceki kısımda da belirtildiği gibi klasik ARM'daki faz akımının 0,559 katı bir akımla, karşıt kuplajlı ARM'nun uyarılması halinde, iki sargı türü arasında eşit şartlarda karşılaştırma yapabileceğimizi göstermektedir. Bu doğrultuda çalışma karakteristikleri çıkartılarak karşılaştırma yapılmaktadır. Bu kısımda çalışma karakteristiklerinden ilk olarak akı eğrisi her rotor kutup açısı değeri için çizilerek karşılaştırılacaktır. Daha sonra endüktans eğrileri ve moment eğrileri her rotor kutup açısı değeri için çizilerek karşılaştırılacaktır.

Şekil 4.12'de rotorun karşılıklı ($\theta=0^\circ$) ve ortalanmış ($\theta=45^\circ$) konumlarında, seçilen rotor kutup açısı değeri için klasik ARM'una ait halkalanma akısı-akım değişimi verilmektedir.



Şekil 4.12: Klasik ARM halkalanma akısı-akım eğrisine rotor kutup açısı değerinin etkisi.

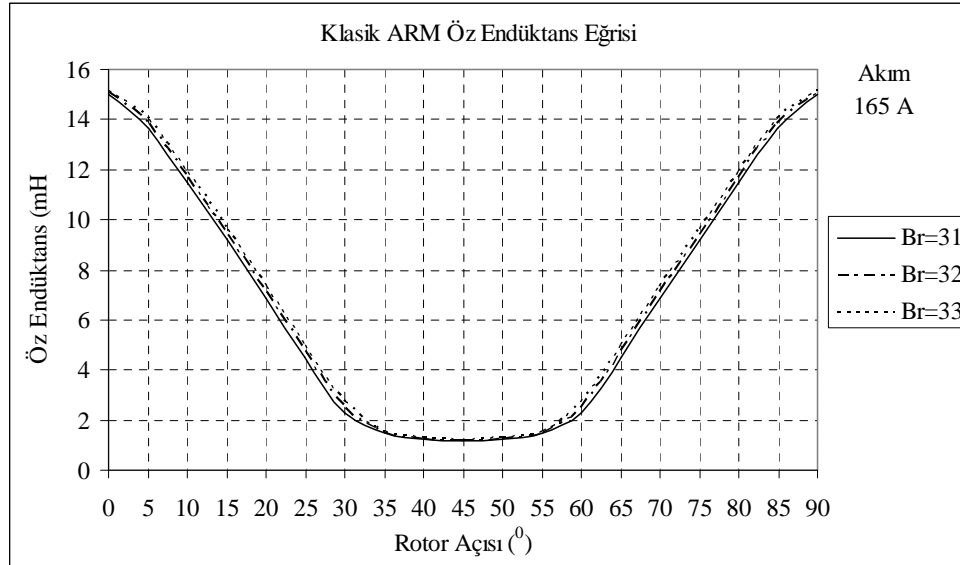
Şekil 4.13’de rotorun karşılıklı ($\theta=0^\circ$) ve ortalanmış ($\theta=45^\circ$) konumlarında, seçilen her rotor kutup açısı için karşıt kuplajlı ARM’una ait halkalanma akısı-akım değişimi verilmektedir.



Şekil 4.13: Karşıt kuplajlı ARM halkalanma akısı-akım eğrisine rotor kutup açısı değerinin etkisi.

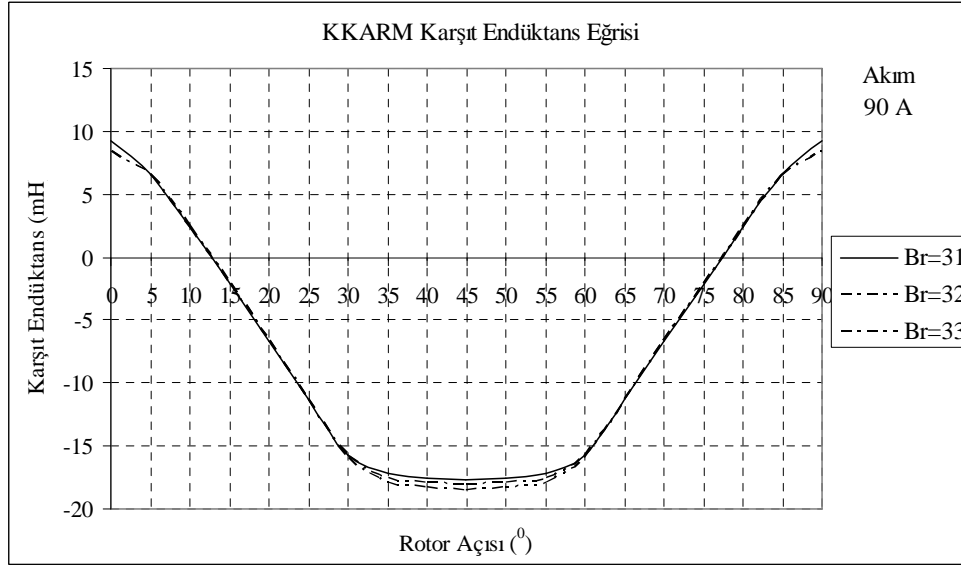
Yukarıda verilen her iki makineye ait halkalanma eğrileri incelendiğinde, rotor kutup açısı değişimi ile doyuma gitme akım değerleri değişmemektedir. Ayrıca rotor kutup açısındaki değer değişimi halkalanma eğrisi üzerinde herhangi bir etkiye sebep olmamaktadır ve her rotor kutup açısı için hemen hemen aynı karakteristiğe sahiptir. Bundan dolayı rotor kutup açısı değer değişiminin akı eğrisi üzerindeki etkisi her iki makine için de aynı olduğu söylenebilir.

Şekil 4.14 ile tüm rotor kutup açısı değerinde klasik ARM için öz endüktans eğrisi verilmektedir. Klasik sargı yöntemine sahip endüktans eğrisi, ortalanmış konumda en küçük değeri, karşılıklı konumunda ise, en büyük değeri almaktadır. Öz endüktans eğrisi incelendiğinde rotor kutup açısı değişimi ile endüktansın değerinin değiştiği ve her üç eğride de yaklaşık 55° 'den başlayan ve 90° 'ye kadar süren bir artış görülmektedir.



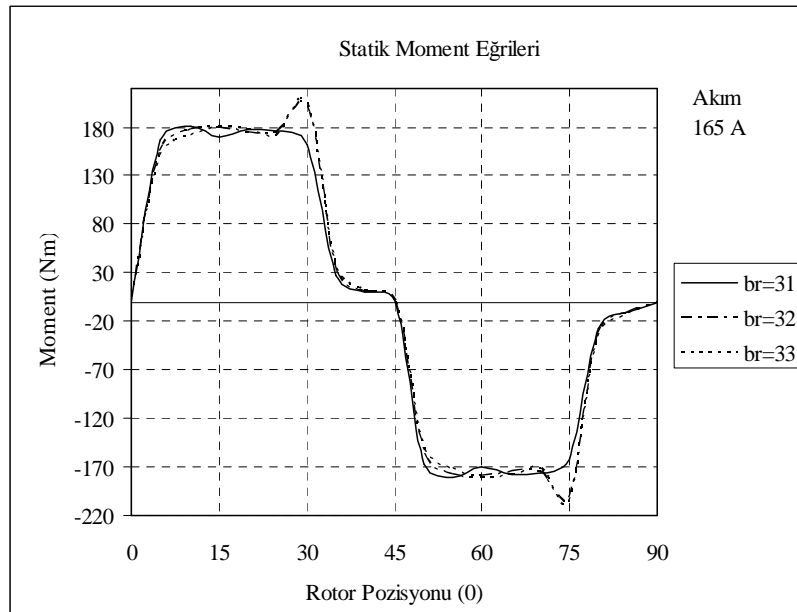
Şekil 4.14: Klasik ARM öz endüktans eğrisine rotor kutup açısı değerinin etkisi (165A).

Şekil 4.15 ile tüm rotor kutup açısı değerinde KKARM için karşıt endüktans eğrisi verilmektedir. Karşıt endüktans eğrisi incelendiğinde rotor kutup açısı değişimi ile endüktansın değerinin değiştiği ve her üç eğride de yaklaşık 55° 'den başlayan ve 90° 'ye kadar süren bir artış görülmektedir.



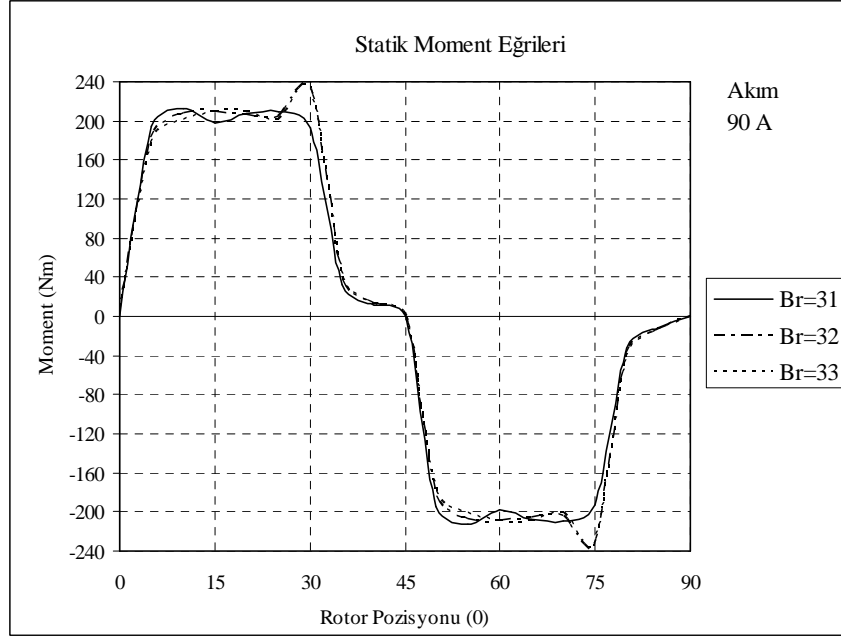
Şekil 4.15: Unipolar uyarılmış KKARM karşıt endüktans eğrisine rotor kutup açısı değerinin etkisi ($g=2\text{mm}$, 90A).

Değişik rotor kutup açılarında sahip manyeto statik analiz sonuçlarından elde edilen statik moment eğrileri Şekil 4.16 ile verilmektedir. Şekil 4.16'dan da anlaşılacağı üzere rotor kutup açısı değişimi, rotorun konumuna göre maksimum momente ve moment eğrisindeki pik değerlerinin genliğine etki etmektedir.



Şekil 4.16: Klasik ARM statik moment eğrileri ($\beta_r = 31^\circ - 32^\circ - 33^\circ$).

Manyetostatik analiz sonuçlarından elde edilen karşıt kuplajlı ARM'una ait statik moment eğrileri Şekil 4.17 ile verilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere rotor kutup açısı değişimi, klasik ARM'unda olduğu gibi rotorun konumuna göre maksimum momente ve moment eğrisindeki pik değerlerinin genliğine etki etmektedir.

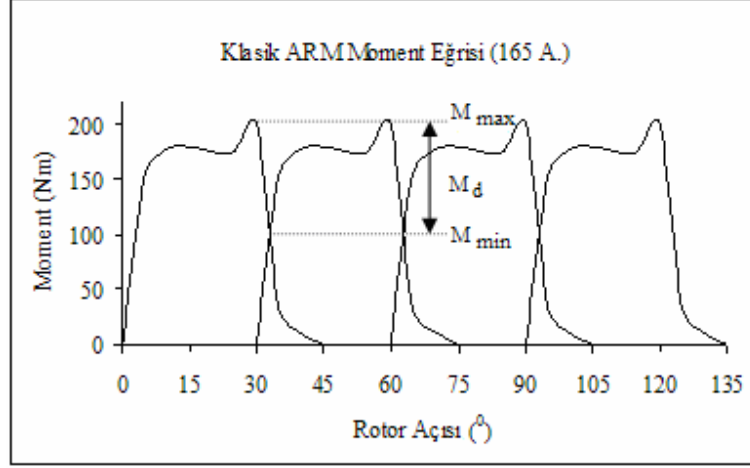


Şekil 4.17: Unipolar uyarılmış KKARM statik moment eğrileri ($\beta_r = 31^\circ - 32^\circ - 33^\circ$).

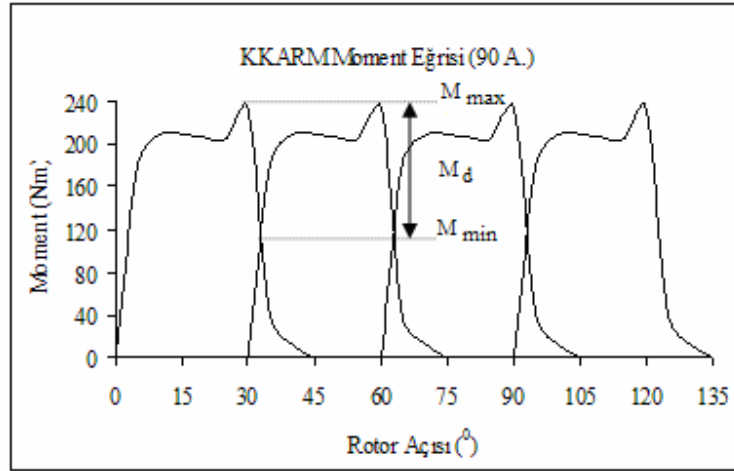
Rotor kutup açısı değişiminin moment eğrisindeki çökmelere etkisini inceleyebilmek açısından kutup açısı değerleri 31° , 32° ve 33° olan motor modeli ele alınarak inceleme ve karşılaştırma yapılmaktadır. Bu doğrultuda aşağıdaki eğrilerden moment dalgalılığını hesaplamak için, eğrilerin en yüksek değeri (M_{max}) ve en küçük değeri (M_{min}) bulunur. Elde edilen bu değerler denklem 4.4'de yerine yazıldığında % olarak moment dalgalılığı hesaplanmaktadır.

Anma akımı ve aynı zamanda hem lineer hem de doymuş bölgelere ait moment eğrileri elde edilmiş ve yine aynı dalgalılık hesabında kullanılan denkleme göre değerleri belirlenmiştir. Bu elde edilen sonuçlar Tablo 4.3'de verilmektedir.

Elde edilen değerler incelendiğinde momentlerdeki dalgalılığın klasik ARM'unda olduğu gibi yüksek olduğu özellikle de doymuş çalışma bölgelerinde bu dalgalılığın daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca rotor kutup aı değişiminin moment dalgalılık oranına etkisi her iki makinede de aynı etkileri göstermektedir.



şekil 4.18: Klasik ARM moment eğrisi (165 A, $\beta_r = 32^\circ$).



şekil 4.19: Unipolar uyarılmış KKARM moment eğrisi (90 A, $\beta_r = 32^\circ$).

Tablo 4. 3: Klasik ARM ve KKARM moment dalgalılık oranları.

Klasik ARM ve Karşıt Kuplajlı ARM							
Akım (A)		% M_d (Dalgalılık Oranı)					
		$\beta_r = 31^\circ$		$\beta_r = 32^\circ$		$\beta_r = 33^\circ$	
ARM (I_k)	KKARM ($I_{kk} = 0,559 \cdot I_k$)	ARM (%)	KKARM (%)	ARM (%)	KKARM (%)	ARM (%)	KKARM (%)
75	45	25,06	27,62	28,83	30,87	27,92	30,28
120	60	24,89	27,50	29,24	31,07	28,41	31,63
165	90	24,88	27,19	30,03	31,45	30,86	32,23
195	105	25,74	26,97	30,87	31,70	31,08	32,40
210	120	25,35	27,46	30,93	32,13	31,42	33,68
240	135	26,65	28,22	31,84	33,61	32,15	34,84

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde Anahtarlamaalı Relüktans Motorunun tasarımına yönelik birçok araştırma ve çalışma yapılmaktadır. Bugüne kadar ARM'unun tasarımına yönelik yapılan çalışmalar incelendiğinde genel olarak iki yöntem kullanıldığı görülmektedir. Bu yöntemlerden ilki, motor kontrol devresinin tasarımı, ikincisi ise motorun manyetik devresinin tasarımı olarak tanımlanabilir. Bu çalışmada ikinci yöntem kullanılarak, motorun geometrisi ve manyetik devresi esas alınarak incelemeler gerçekleştirilmektedir.

Bu çalışmada klasik ARM ve karşıt kuplajlı ARM'unun hava aralığı, stator ve rotor kutup açısı değerlerinin çalışma eğrileri üzerindeki etkileri incelenmektedir. Ayrıca bu parametrelerin her iki motorun çalışma karakteristikleri üzerindeki etkileri karşılaştırılmaktadır. Böylece bu geometrik parametrelerin ARM üzerindeki etkileri ortaya koyularak, motorun verim ve performansını arttırmak için uygun değerlerin seçilmesi sağlanmaktadır.

Bu çalışmada gerçekleştirilen işlemleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

- İlk olarak Anahtarlamaalı Relüktans Motorunun incelenmesi için belirlenen hava aralığı, stator ve rotor kutup açısı değerleri için ayrı ayrı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmektedir. Daha sonra oluşturulan bütün modeller için motorun temel çalışma karakteristikleri çıkartılmaktadır. Böylece hava aralığı değeri, stator ve rotor kutup açısı değeri değişiminin klasik ARM'u üzerindeki etkileri gösterilmektedir.

- Ayrıca klasik ARM'nun doğrusal ve manyetik doyma bölgelerindeki çalışma durumu için ayrı ayrı analizler yapılarak manyetik doymadan önce ve sonraki akım değerleri için momentteki dalgalılık oranları tespit edilmektedir.
- Klasik ARM için yapılan bütün modellemeler aynı şekilde unipolar uyarma yapısına sahip karşıt kuplajlı ARM için de yapılarak çalışma karakteristikleri çıkartılmaktadır. Ayrıca elde edilen statik moment eğrileri kullanılarak momentteki dalgalılık oranları belirlenmektedir.
- Daha öncede belirtildiği gibi karşıt kuplajlı ARM'un sargı yapısı klasik ARM'un sargı yapısından farklıdır. Bundan dolayı bu iki motoru eşit şartlar altında karşılaştırabilmek için sargıların kapladıkları hacimler üç boyutlu analiz yapabilen SolidWorksTM programı ile belirlenmektedir. Böylece hacimdeki artış oranlarından faz sargı dirençlerindeki artış oranı ortaya konulmaktadır.
- Klasik ARM ile KKARM'u eşit bakır kayıpları altında karşılaştırılarak hava aralığı, stator ve rotor kutup açısı değerlerinin çalışma karakteristikleri üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmektedir.

Yapılan bu analizlerde hava aralığı değerinin değiştirilmesi hem klasik ARM'unun hemde karşıt kuplajlı ARM'unun çalışma karakteristikleri üzerinde aynı etkileri göstermektedir. Hava aralığının büyük değerlerde seçilmesi endüktans değerinin düşük olmasına dolayısı ile moment değerinin düşük olmasına neden olmaktadır. Moment eğrisindeki dalgalılık oranı hava aralığı değişiminden çok fazla etkilenmemektedir ve belirtildiği gibi sadece moment değerinin değişmesine neden olmaktadır. Ayrıca büyük değerlerdeki hava aralığı kaçak akıların artmasına ve faydalı akının azalmasına neden olmaktadır. Akı-akım eğrisi göz önüne getirildiğinde, hava aralığı değeri büyüdükçe motorda manyetik doymanın başlaması için gereken akım değeri artmaktadır. Bu nedenlerden dolayı ARM'larında hava aralığı değeri mümkün olduğunca düşük değerlerde seçilmesi istenmektedir.

Stator ve rotor kutup açısı değerlerinin uygun değerlerde seçilmesi moment eğrisinde oluşan dalgalılık oranının %5-10 gibi bir değerde azaltılmasını sağlamaktadır. Ayrıca kutup açılarının değiştirilmesi ile motorun endüktans profili değiştirilmektedir ve böylece endüktans profilindeki ölü kısımlar azaltılarak daha fazla moment üretimi gerçekleştirilmektedir. Moment eğrisindeki dalgalılık oranının düşürülmesi motorda oluşan gürültü miktarının azalması anlamına gelmektedir.

Yapılan bu çalışma neticesinde, ayrıca neler yapılabileceği konusunda bazı önerilerde bulunmak mümkündür.

- Her iki makinede var olan ve uyarma yapısına bağlı olarak değişen moment dalgalılığı belirlenmiş optimum parametrelerle birlikte stator ile rotor uçlarında yapılacak tasarım değişiklikleriyle azaltılabilir.
- Bu çalışma neticesinde geometrik parametrelerin klasik ARM'ye olan etkileri KKARM'unda da aynı olduğu ortaya konmuş olup klasik ARM'deki moment dalgalılığını azaltmaya yönelik kullanılan yöntemler KKARM'da da uygulanabilir.

KAYNAKLAR

AÇIKGÖZ, H., “Üç fazlı Sincap Kafesli Asenkron Motorun ANSYS ve Flux2D Hazır Paket Programları ile Performanslarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi*, (1998).

ANSOFT CORP., *Maxwell 2D Ver.9 Theory Manual*, (2000).

ARKADAN, A. A., KIELGAS, B. W., “Switched Reluctance Motor Drive Systems Dynamic Performance Prediction and Experimental Verification”, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol.9,No. 1,pp. 36-44, (1994).

ARUMUGAM, R., LOWTHER, D. A., KRISHNAN, R. and LINDSAY, J. F., “Magnetic Field Analysis of a Switched Reluctance Motor Using a Two Dimensional Finite Element Model”, *IEEE Tran. on Magnetics*, Vol.Mag-21, pp. 1883-1885, (1997).

ARUMUGAM, R., LINDSAY, J. F., KRISHNAN, R., “Sensitivity of Pole Arc/Pole Pitch Ratio on Switched Reluctance Motor Performance”, *IEEE Tran. on Magnetics*, (1988).

ASHOUR, H., WILLIAMS, B., “Sliding Mode Control of a Shifted Fully Pitched Switched Reluctance Machine”, *Proc. 5th ICEMS'01*, Vol. 2, pp. 1042-1052, (2001).

AYAZ, M., YILDIZ, A. B., “An Equivalent Circuit Model for Switched Reluctance Motor”, *IEEE Conf. Proc., 13th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conf. (MELECON 2006)*, Spain, (2006a).

AYAZ, M., YILDIZ, A. B., “Control of Switched Reluctance Motor Containing a Linear Model”, *IEEE Conf. Proc., 14th IEEE Mediterranean Conf. on Control and Automation. (MED 2006)*, Italy, (2006b).

BARRASS, P. G., MECROW, B. C., CLOTHIER, A.C., “Bipolar Operation of Fully-Pitched Winding Switched Reluctance Drives”, *Electric Machines and Drives*, No. 412, pp. 433-437, Durham, U.K, (1995).

BLAKE, R. J., “New Applications and Developments in Switched Reluctance Drives”, *Conference on D/M/C*, Birmingham, pp. 4-19/4-24, (1988).

CAMERON, D. E., LANG, J. H., UMANS, S. D., “The Origin and Reduction of Acoustic Noise in Dably Salient Variable-Reluctance Motor”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 28, No. 6, (1992).

CAMERON, D.E., “The Origin of Acoustic Noise in Variable Reluctance Motors”, *Proc. IAS Conference*, pp. 108-115, San Diego, USA, (1989).

CLOTHIER, A.C., MECROW, B. C., “Inverter Topologies and Current Sensing Methods for Short Pitched and Fully Pitched Winding SR Motors”, *APEC 14th Annual Conference*, Vol. 1, pp. 416-423, Dallas, TX, USA, (1999).

CORDA, J. B., “Computation of Torque Pulsations of Switched Reluctance Drive”, *Proc. Of Conference on Electrical Machines and Drives*, pp. 308-311, London, UK, (1989).

DAVIS, R. M., RAY, W. F., “An Inverter Drive for a Switched Reluctance Motor”, *Proc. ICEM 80 Conference*, pp.1026-1213, (1980).

DAVIS, R. M. and AL-BAHADLY, L., “Experimental Evaluation of Mutual Inductances in a Ssvitched Reluctance Motor”, *IEE Conference on Povver Electronics and Variable Speed Drives*, No. 324, pp. 337-347, (1990).

DAVIS, R. M., “Variable Reluctance Rotor Structures-Their Infulence on Torque Production”, *IEEE Trans. on Industry Electronics*, Vol. 39, No. 2, pp. 168-174, (1992).

DAWSON, G. E., EASSTHAM, A. R. and MIZIA, J., “Switched Reluctance Motor Torque Characteristics Finite Element Method and Test Results”, *IEEE IAS Annual Meeting*, Part I, 86 CH 2272-3, pp 864-869, (1986).

DERDIYOK, A., “Anahtarlamalı Relüktans Motorun Dinamiğinin İncelenmesi ve Çıkış Performansının İyileştirilmesi”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi*, İstanbul, (1996).

DERDIYOK, A., İNANÇ, N., ÖZBULUR, V., ÖZOĞLU, Y., “Optimal Phase Current Profiling of SRM by Fuzzy Logic Controller to Minimize Torque Ripple”, *Proc. 12th IEEE-ISIC 97*, pp.77-82, (1997).

DİRİL, O., “Anahtarlamalı Relüktans Motorda Moment Dalgallılığını En Azlama Üzerine Bir Çalışma”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi*, İstanbul, Türkiye, (2000).

FAİZ, J., FINCH, J. W., “Aspects of Design Optimisation for Switchihed Reluctance Motors”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 8, No. 4, (1993).

FINCH, J. W., FAİZ, J., METWALLY, H. M. B., “Design Study of Switched Reluctance Motor Performance”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, (1992).

GARİP, M., “Tam Kutup Adımlı Anahtarlamalı Relüktans Motorun Kutup Başlarını Şekillendirerek Moment Dalgallılığının İyileştirilmesi“, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi*, İstanbul, Türkiye, (2002).

GOLDENBERG, A. A., LAMIADO, L., KUZAN, P., ZHOU, C., “Control of Switched Reluctance Motor Torque for Force Control Applications”, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol.4, No.4, pp.461-466, (1994).

GÜRDAL, O., “Elktromanyetik Alan Teorisi”, *Nobel Yayınları*, 385-398, (2000).

HONG, J. P., HA, K. H., LEE, J., “Stator Pole and Yoke Design for Vibration Reduction of Switched Reluctance Motor”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 38, No. 2, (2002).

KALENDERLI, Ö., “Sonlu Elemanlar Yöntemi Ders Notları“, *İstanbul Teknik Üniversitesi*, (1996).

KIM, K.B., “Field Analysis of Low Acoustic Noise Switched Reluctance Motor”, *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 33, No. 2, pp. 2026-2029, (1997).

KOIBUCHI, K., OHNO, T. and SAWA, K., “A Basic Study for Optimum Design of Switched Reluctance Motor by Finite Element Method”, *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol.33, No.2, pp.2077-2080, (1997).

KOKERNAK, J. M., “Performance Characterization Of A High Power Density Switched Reluctance Machine”. PhD Thesis, *Rensselaer Polytechnic Institute*, Troy, New York, USA, (1997).

KOKERNAK, J. M., Torrey, D. A., “Magnetic Circuit Model for the Mutually Coupled Switched Reluctance Machine”, *IEEE Tran. on Magnetics*, Vol. 36, No. 2, pp. 500-507, (2001).

KOSAKA, T., MATSUI, N., „Position Sensorless Control of General Purpose Inverter-Fed Fully-Pitched Winding Reluctance Motor Drives”, *Proc. Industry Applications Conference*, Vol. 3 pp.1745-1750, Roma, Italy, (2000).

KRISHNAN, R., ARUMUGAM, R. and LINDSAY, J.F., “Design Procedure for Switched Reluctance Motors”, *IEEE Trans. On Industry Applications*, Vol. 24, No. 3, pp. 454-460, (1988).

LAI, H.C., LEONARD, P.J., RODGER, D., AILEN, N., “3D Finite Element Dynamics Simulation of Electrical Machines Coupled to External Circuit”, *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 33, No. 2, pp. 2010-2013, (1997).

LAWRENSEN, P., “Switched-Reluctance Motor Drives”, *Electronics and Power*, pp.144-147, (1964).

LAWRENSEN, P., “Awitched Reluctance Drives-Applications and Potential”, *Seminar on Electrical Industrial Drives*, pp.B1-B7, Conventry, (1989).

LAWRENSON, P. J., STEPHENSON, J. M., BLENKINSOP, P. T., CORDA, J. and FULTON, N. N., "Variable Speed Reluctance Motors", *IEEE Proc. Inst. Elect. Eng.*, Vol. 127, pt. B, pp. 253-265, (1980).

LE CHENADEC, J.Y., GEOFFROY, M., MULTON, B. and MOUCHOUX, L.C., "Torque Ripple Minimisation in Switched Reluctance Motors by Optimization of Current Wave-Forms and of Tooth Shape with Copper Losses and V.A. Silicon Constrains", *ICEM-94 Conference*, pp.559-564, (1994).

LI, S. H-Y., LIANG, F., ZHAO, Y., LIPO, T. A., "A Doubly Salient Doubly Excited Variable Reluctance Motor", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 31, No. 1, pp. 99-106, (1995).

LIANG, F., LIAO, Y., LIPO T., "A New Variable Reluctance Motor Utilizing an Auxiliary Commutation Winding", *Proc. IEEE Industry Applications*, Vol. 31, No.1, (1995).

LOW, T. S., LIN, H., CHEN, S. X., "Analysis and Comparison of Switched Reluctance Motors with Different Physical Sizes Using A 2D Finite Element method", *IEEE Tran. on Magnetics*, Vol. 31, No. 6, pp. 3503-3505, (1995).

LOW, T. S., LIN, H., CHEN, S. X., "Analysis and Comparison of Switched Reluctance Motors With Different Physical Sizes A 2D Finite Element Method", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 31, No. 6, (1995).

MAO, S. H., TSAI, M. C., "A Novel Switched Reluctance Motor With C-Core Stators", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 41, No. 12, (2005)

MECROW, B. C., "Fully-Pitched Winding Switched Reluctance and Stepping Motor Arrangements", *IEE Part B*, Vol.140, No.1, pp. 61-70, (1993).

MECROW, B. C., "New Winding Configuration For Doubly Salient Reluctance Machines", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol32, No.6, pp.1348-1356, (1996).

MECROW, B. C., BARRASS, P. G., CLOTHIER, A.C., WEINER, C., "Drive Configurations for Fully-Pitched Winding Switched Reluctance Machines", *IAS Annual Meeting*, Vol. 1, pp. 563-570, St. Louis, MO, USA, (1988).

MECROW, B. C., WEINER, C., CLOTHIER, A. C., "The Modelling of Switched Reluctance Machines With Magnetically Coupled Windings", *IEEE Tran. on Industry Applications*, Vol. 37, No 6, pp. 1675-1683, (2001).

MICHAELIDAS, A. M., POLLOCK, C., “Modelling and Design of Switched Reluctance Motors with Two Phases Simultaneously Excited”, *IEE Proc. Electric Power Applications*, Vol. 143, No. 5, pp. 361-370, (1996).

MILES, A. R., “Design of a 5 MW, 9000V Switched Reluctance Motor”, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 6, No. 3, pp. 484-491, (1991).

MILLER, T. J. E., “Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives”, *Oxford University Press*, Oxford, (1993).

MILLER, T. J. E., “Converter Volt-Ampere Requirements of the Switched Reluctance Motor Drive”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 21, No. 5, pp. 1136-1144, (1985).

MILLER, T. J. E., “Switched Reluctance Motors and Their Control”, Oxford *University Press*, Oxford, (1993).

MILLER, T. J. E., “Fault and Unbalance Forces in the Switched Reluctance Machine”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 31, No. 2, pp. 319-325, (1995).

MIZIA, J., ADAMIAK, K., EASTHAM, A. R., DAWSON, G. E., “Finite Element Force Calculation Comparison Of Methods For Electric Machines”, *IEEE Tran. On Magnetism*, Vol. 24, No. 1, pp. 447-450, (1988).

MOALLEM, M., ONG, C. M., “Predicting the Torque of Switched Reluctance Machine From Its Finite Element Field Solution”, *IEEE Tran. on Energy Conversion*, Vol. 5, No. 4, pp. 733-739, (1990).

MOALLEM, M., ONG, C. M. and UNNEWEHR, L. E., “Effect of Rotor Profiles on the Torque of a Switched Reluctance Motor”, *IEEE Trans. on Industry. Applications.*, Vol.28, No.2, pp.364-369, (1992).

MOGHBELLI, H., ADAMS, G. E. and HOFT, R. G., “Performance of a 10-Hp Switched Reluctance Motor and Comparison with Induction Motors”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 27, No. 3, pp. 531-538, (1991).

MOREIRA, J.C., “Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motors” *Via Bi-Cubic Spline Interpolation, PES-92 Conference*, pp.851-856, (1992).

OHDACHI, Y., KAWASE, Y., MIURA, Y., HAYASHI, Y., “Optimum Design of Reluctance Motors using Dynamic Finite Element Analysis”, *IEEE Transactions on Magnetism*, Vol. 33, No. 2, (1997).

OHDACHI, Y., KAWASE, Y., MIURA, Y., HAYASHI, Y., “Optimum Design of Reluctance Motors using Dynamic Finite Element Analysis”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 33, No. 2, (1997).

OHDACHI, Y., KAWASE, Y., MIURA, Y., HAYASHI, Y., “Optimum Design of Switched Reluctance Motors Using Dynamic Finite Element Analysis”, *IEEE Tran. on Magnetics*, Vol. 33, No. 2, pp. 2033-2036, (1997).

ORTHMANN, R., SCHONER, H. P., “Turn-off Angle Control of Switched Reluctance Motors for Optimum Torque Output”, *EPE-93 Conference*, pp.20-25, (1993).

OSHEBA, S. M. and AABDEL-KADER, F. M., “Dynamic Performance Analysis of Reluctance Motors Using Damping and Synchronising Torques”, *IEE Proc.* Vol. 137, Part B, No. 4, pp. 231-238, (1990).

ÖZBULUR, V., BİLGİÇ, M. O., SABANOVIC, A., “Torque Ripple Reduction of a Switched Reluctance Motor”, *IEEE-IPEC Conference*, pp. 550-567, (1995).

ÖZOĞLU, Y., “Anahtarlamalı Relüktans Motorunda Kutup Başlarına Şekil Vererek Moment Dalgalanmasının Azaltılması“, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi*, İstanbul, Türkiye (1999).

PELIKANT, A., WIAK, S., “Influende od the Rotor Pole Shape on the Static and Dynamics Characteristics of Switched Reluctance Motor”, *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 32, No. 3, pp. 1529-1532, (1996).

PRESTON, M. A., LYONS, J. A., “Switched Reluctance Motor Model with Mutual Coupling and Multi Phase Excitation”, *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 27, No. 6, pp. 5423-5425, (1991).

RADUN, A. V., “Design Considerations for the Switched Reluctance Motor”, *IEEE Trans. on Industry Applications*. Vol. 51, No. 5, pp. 1079-1087, (1995).

RAY, W. F., DAVIS, R. M., “Inverter Drive for Doubly Salient Reluctance Motor, its fundamental behaviour, lineer analysis and cost implications”, *Electric Power Applications*, Vol. 2, pp.185-193, (1979).

RAY, W. F., DAVIS, R. M. and BLAKE, R. J., “The Control of SR Motors”, *CAMC-Conference*, pp. 51-59, (1986).

REEVE, J. M., POLLOCK, C., “Dynamic Simulation Model for Two-Phase Mutually Coupled Reluctance Machines”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, (2001).

ROCHFORD, C., KAVANAGH, R. C., EGAN, M. G. and MURPHY, J. M. D., “Development of Smooth Torque in Switched Reluctance Motors Using Oz-Learning Techniques”, *Proc. EPE'93*, pp.14-19, (1993).

- SADOWSKI, N., LEFEVRE, Y., NEVES, C. G. C., CARLSON, R., “Finite Element Coupled Electrical Circuit Equationc in the Simulation of Switched Reluctance Drive: Attention to Mechanical Behaviour”, *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 32, No. 3, pp. 1086-1089, (1996).
- SCHRAMM, D. S., WILLIAMS, B. W., GREEN, T. C., “Torque Ripple Reduction of Switched Reluctance Motors by Phase Current Optimal Profiling”, *Proc. PESC'92*, pp.857-860, (1992).
- SHYAM, R., “Aspects of switched Reluctance Motor Drive Application for Electric Vehicle propulsion”, PhD Thesis, *Arkansas University*, (2001).
- SRINIVAS, K. N., ARUMUGAM, R., “Analysis and Improvement of Torque Profile in the Switched Reluctance Drivers”, *IEEE Trans. on Magnetics*, (2000).
- STEPHENSON, J. M., EL-KHAZENDAR, M. A., “Saturations in Doubly Salient Reluctance Motors”, *Proc. IEE*, Vol. 136, Part B, No. 1, pp.50-58, (1989).
- SURIANO, J. R. and ONG, C.M., “Variable Reluctance Motor Structures for Low-Speed Operation”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 32, No. 2, pp. 345-353, (1996).
- SURIANO, J. R., ONG, C. M., “Variable Reluctance Motor Structures for Low Speed Operation”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, (1993).
- TANG, Y. T., KLINEONG, J. A., “Modelling and Optimization Switched Reluctance Machine by Boundry Element Analysis and Simulation”, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 11, No. 4, pp. 673-680, (1996).
- TANG, Y., “Switched Reluctance Motor with Fractionally Pitched Windings and Bipolar Currents”, *Proc. 33th IAS Annual Meeting*, Vol. 1, pp. 351-358, St. Louis, MO, USA, (1998).
- TORREY, D. A., NIU, X. M., UNKAUF, E. J., “Analytical Modelling of Variable Reluctance Machine Magnetization Characteristics”, *IEEE, Proc. Part B.*, Vol. 142, No. 1, (1995).
- TORREY, D. A. and LANG, J. H., “Modelling a Nonlinear Variable Reluctance Drive”, *IEE Proc. Inst. Elect. Eng.*, Part. B. pp. 314-326, (1990).
- WICHERT, T., KUB, H., SCHUFFENHAUER, U., “Modern Dimensioning of Switched Reluctance Machines“, *IEEE Trans. on Industry Applications*, (2001).
- XU, L., LIPO, T. A. and RAO, S. C., “Analysis of a New Variable-Speed Singly Salient Reluctance Motor Utilizing Only Two Transistor Switches”, *IEEE Tans. On Industry Applications*, Vol. 26, No. 2, pp. 229-236, (1990).

XU, L., RUCKSTADER, E., “Direct Modelling of Switched Reluctance Machine by Coupled Field-Circuit Method”, *IEEE Trans, on Energy Conversion*, Vol. 10, No. 3, pp. 446-454, (1995).

XU, Y., TORREY, D. A., “Study of the mutually coupled switched reluctance machine using the finite element-circuit coupled method”, *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 149, No. 2, (2002).

YUNTAO, X., “Utility Interface Design and Mutually Coupled Switched Reluctance Machine Study for a Wind Generation System”, Phd Thesis, *RPI*, (2001).

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

1. AYAZ, M., YILDIZ, A. B., “An Equivalent Circuit Model for Switched Reluctance Motor”, *IEEE Conf. Proc., 13th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conf. (MELECON 2006)*, Spain, (2006a).
2. AYAZ, M., YILDIZ, A. B., “Control of Switched Reluctance Motor Containing a Linear Model”, *IEEE Conf. Proc., 14th IEEE Mediterranean Conf. on Control and Automation. (MED 2006)*, Italy, (2006b).
3. YILMAZ, K., CENGİZ, A., AYAZ, M., MEŞE, E., “Performance Improvement in Finite Element Analysis by Modifying Mesh Structure”, *ELMA*, (2005)

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Ardahan'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Bursa'da tamamladı. 2000 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Öğretmenliği Bölümü'nden 2005 yılında mezun oldu. 2005 yılından itibaren özel bir şirkette proje yöneticisi olarak görev yapmaktadır.