KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KATLI SARGI YAPISININ ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUNUN ÇIKIŞ PERFORMANSINA ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Adem ÇALIKER

Ana Bilim Dalı: Elektrik Eğitimi
Danışman: Dr. Kadir YILMAZ

KOCAELİ, 2010

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KATLI SARGI YAPISININ ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUNUN ÇIKIŞ PERFORMANSINA ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Adem ÇALIKER

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 31 Aralık 2009

Tezin Savunulduğu Tarih: 04 Mart 2010

Tez Danışmanı	Üye	Üye
Dr. Kadir YILMAZ	Doç.Dr. Engin ÖZDEMİR	Yrd.Doç.Dr. Erdal BEKİROĞLU
(.....)	(.....)	(.....)

KOCAELİ, 2010

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Yarı iletken teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak kontrol sistemlerinin gelişmesi ile Anahtarlamalı Relüktans Motorlarına olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Anahtarlamalı Relüktans Motorları ile ilgili çalışmalar, temelde kontrol devreleri üzerine yapılan çalışmalar ve manyetik devre üzerine yapılan çalışmalar olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Bu tez çalışmasında, motorun manyetik devresi üzerinde çalışılmış olup anahtarlamalı relüktans motorunun faz sargıları katlı olarak tasarlanmıştır. Sargı katları için farklı modeller oluşturularak anahtarlamalı relüktans motorunun temel çalışma karakteristikleri elde edilmektedir. Aynı geometriye sahip anahtarlamalı relüktans motoru için çalışma karakteristikleri katlı sargı ve klasik sargı için karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen ve bilgisi ile sürekli yönlendiren tez danışmanım Dr. Kadir YILMAZ'a, tecrübelerinden istifade etmeme müsaade eden Arş.Gör. Murat AYAZ'a, tüm çalışma arkadaşlarıma, her zaman manevi desteklerinden güç aldığım aileme, eşim Melahat ÇALIKER'e ve kızım Zeynep ÇALIKER'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ……..i
İÇİNDEKİLER……ii
ŞEKİLLER DİZİNİ…….iii
TABLOLAR DİZİNİ……....v
SEMBOLLER……..……vi
ÖZET……..viii
İNGİLİZCE ÖZET……...……...ix
1. GİRİŞ……...……1
1.2 Literatürde ARM Üzerine Yapılan Çalışmalar……... 3
1.3 Çalışmanın amacı…….....9
1.4 Çalışmanın yapısı…..... 11
2. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLARI…..... 12
2.1. Giriş……..12
2.2 Tanımı ve Yapısı……...12
2.3 Anahtarlamalı Relüktans Motorunun Çalışma Esası…… 14
2.4 Endüktans ve Momentin Rotor Konumu ile İlişkisi…… 22
2.5 Eşdeğer Devre……...24
2.6 ARM için Dönüştürücü Devreleri ve Özellikleri…….…27
2.6.1 Klasik Köprü Tipi Dönüştürücü Devresi……... 28
2.6.2 ARM'lerde Kullanılan Diğer Dönüştürücü Devreleri……... 29
2.7 Dönüştürücü Devrelerin Avantaj ve Dezavantajları……33
3. KLASİK ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUNUN ANALİZİ…..... 34
3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)…….…34
3.2 Klasik ARM'nin Manyetostatik Analizi……..35
3.3 Analizi yapılan ARM'nin yapısal özellikleri…….....36
3.4 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modelin Oluşturulması…….…38
3.4.1 Motora Ait Geometrinin Oluşturulması…….....38
3.4.2 Kullanılan Malzemenin Tanımı…… 39
3.4.3 Modelin Oluşturulması…….. 39
3.4.4 Sonuçların Değerlendirilmesi……... 41
3.4.5 SEY ile ARM'nun Çalışma Karakteristiklerinin Elde Edilmesi……...41
3.4.5.1 Akı Eğrileri…… 42
3.4.5.2 Moment Eğrileri……...…46
4. KATLI SARGI YAPISINA SAHİP ARM ANALİZİ…… 50
4.1 Katlı Sargı Yapısına Sahip ARM'nun Çalışma Karakteristiklerinin Elde Edilmesi……..51
4.2 Katlı Sargı Yapısının ARM'nun Çalışma Karakteristiklerine Etkileri……..52
4.3 Klasik ARM ve Katlı Sargı Yapısına Sahip ARM Çalışma Karakteristiklerinin Karşılaştırılması……..61
5. SONUÇ VE ÖNERİLER……...64
KAYNAKLAR……66
ÖZGEÇMİŞ ……71

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: 6/4 ARM kesiti……... 13
Şekil 2.2: ARM'nin çalışması, a) c fazı örtüşen pozisyonda, b) a fazı örtüşen pozisyonda ……. 15
Şekil 2.3: Selenoid ve karakteristikleri……..16
Şekil 2.4: Mekanik enerji yok iken manyetik alanda depolanan enerji…….17
Şekil 2.5: Artan mekanik enerji…….18
Şekil 2.6: Sargı akımı ve rotor konumlarına göre bir faz endüktansının ve momentin dalga şekilleri (ideal durumda), (a) 2/2 ARM kesit görünüş, (b) Endüktans değişimi, (c) Momentin değişimi……...24
Şekil 2.7: ARM'nin bir faz eşdeğer devresi……....26
Şekil 2.8: ARM'lerde kullanılan dönüştürücülerin anahtar sayısına göre sınıflandırılması……...…28
Şekil 2.9: Üç fazlı bir arm için klasik köprü tipi dönüştürücü devresi……...… 29
Şekil 2.10: Faz sayısı + 1 dönüştürücü devresi……...… 30
Şekil 2.11: Split DA link dönüştürücü devresi……31
Şekil 2.12: Üç fazlı ARM için bifilar sargılı dönüştürücü devresi……. 31
Şekil 2.13: Üç fazlı ARM için C-Dump dönüştürücü devresi…… 32
Şekil 2.14: Üç fazlı ARM için söndürme dirençli dönüştürücü devresi……33
Şekil 3.1: 6/4 kısa kutup adımlı sargı yapısına sahip ARM……35
Şekil 3.2: Üç fazlı 6/4 kısa kutup adımlı ARM kesiti……36
Şekil 3.3: Motorun stator ve rotorun kullanılan malzeme için B-H eğrisi……...…38
Şekil 3.4: Stator, rotor, sargı, hava aralığı ve hava boşluğunda kullanılan elemanlar. ……40
Şekil 3.5: ARM'un sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiş hali……41
Şekil 3.6: ARM'nun halkalanma akısı - akım eğrisi……...…42
Şekil 3.7: $\theta=0^o$ için (a) Akı çizgileri dağılımı (wb/m) (b) Akı yoğunluğu (B[T]) dağılımı…… 43
Şekil 3.8: $\theta=20^o$ için (a) Akı çizgileri dağılımı (wb/m) (b) Akı yoğunluğu (B[T]) dağılımı……...… 44
Şekil 3.9: $\theta=45^o$ için (a) Akı çizgileri dağılımı (wb/m) (b) Akı yoğunluğu (B[T]) dağılımı……...… 45
Şekil 3.10: ARM'nun statik moment eğrileri……..... 46
Şekil 3.11: Klasik ARM'nin statik moment eğrisi (165A)……47
Şekil 3.12: 6/4 klasik ARM için öz endüktans değişimi……48
Şekil 3.13: Klasik ARM üç fazlı öz endüktans değişimi…….... 49
Şekil 4.1: Katlı sargı yapısı……50
Şekil 4.2: Katlı sargı yapısına sahip ARM'larının 1. kat sargısı halkalanma akısı-akım eğrisi (θ=0°)……53
Şekil 4.3: Katlı sargı yapısına sahip ARM'larının 2. kat sargısı halkalanma akısı-akım eğrisi (θ=0°)……53
Şekil 4.4: Katlı sargı yapısına sahip ARM'larının 3. kat sargısı halkalanma akısı-akım eğrisi (θ=0°)……54

Şekil 4.5: Katlı sargı yapısına sahip ARM'larının 1. kat sargısı halkalanma akısı-akım eğrisi (θ=45°) ……54
Şekil 4.6: Katlı sargı yapısına sahip ARM'larının 2. kat sargısı halkalanma akısı-akım eğrisi (θ=45°) ……55
Şekil 4.7: Katlı sargı yapısına sahip ARM'larının 3. kat sargısı halkalanma akısı-akım eğrisi (θ=45°) ……55
Şekil 4.8: θ=0^o için Akı çizgileri dağılımı (wb/m)……56
Şekil 4.9: θ=0^o için Akı yoğunluğu (B[T]) dağılımı……...57
Şekil 4.10: θ=20^o için Akı çizgileri dağılımı (wb/m)……..57
Şekil 4.11: θ=20^o için Akı yoğunluğu (B[T]) dağılımı……...58
Şekil 4.12: θ=45^o için Akı çizgileri dağılımı (wb/m) ……58
Şekil 4.13: θ=45^o için Akı yoğunluğu (B[T]) dağılımı……...59
Şekil 4.14: Katlı sargı yapısına sahip ARM'lerin statik moment eğrileri ……..60
Şekil 4.15: 10-12-10 sargı dağılımı olan model için statik moment eğrisi……60
Şekil 4.16: 165 A için statik moment eğrileri……62

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 3.1: Klasik anahtarlamalı motor boyut değerleri……..37
Tablo 3.2: Klasik anahtarlamalı relüktans motoru plaka değerleri…….....37
Tablo 3.3: 6/4 Klasik ARM moment dalgalılık oranları…….....48
Tablo 4.1: Katlı sargı yapısı dağılımı …….51
Tablo 4.2: Oluşturulan modellerde kat sargılarına uygulanan akım değerleri……52
Tablo 4.3: Katlı sargı yapısına sahip modellerin dalgalılık oranları……...61
Tablo 4.4: 165 A için moment dalgalılığı oranları …….63

SEMBOLLER

θ_0	: Ateşleme açısı
i	: Faz akımı
m	: Faz sayısı
S/P	: Güç oranı
g	: Hava aralığı
A	: Hava aralığı alanı
R_h	: Hava aralığı relüktansı
θ_D	: İletim açısı
L_a	: Karşılıklı konumdaki faz endüktansı
W'_m	: Ko-enerji
θc	: Komutasyon açısı
W_m	: Manyetik devrede depolanan enerji
μ	: Manyetik geçirgenlik
T	: Moment
T_d	: Moment dalgalılığı
T_{max}	: Moment eğrisindeki en büyük değer
T_{min}	: Moment eğrisinin kesişme değeri
λ	: Motor akısı
m_d	: Motor derinliği
P	: Motor gücü
r_{sh}	: Motor mil yarıçapı
μ_0	: Mutlak manyetik geçirgenlik
L_u	: Ortalanmış konumdaki faz endüktansı
ω	: Rotor açısal hızı
y_r	: Rotor boyunduruk kalınlığı
r_0	: Rotor boyunduruk yarıçapı
D_r	: Rotor çapı
θ	: Rotor konumu
β_r	: Rotor kutup açısı
t_r	: Rotor kutup genişliği
N_r	: Rotor kutup sayısı
d_r	: Rotor kutup yüksekliği
r_1	: Rotor yarıçapı
V	: Sargı besleme gerilimi
R	: Sargı direnci
L	: Sargı endüktansı
N	: Sarım sayısı
y_s	: Stator boyunduruk kalınlığı
D_s	: Stator çapı
r_3	: Stator dış boyunduruk yarıçapı
r_2	: Stator iç boyunduruk yarıçapı
β_s	: Stator kutup açısı
t_s	: Stator kutup genişliği

N_s : Stator kutup sayısı
d_s : Stator kutup yüksekliği
ε : Stroke açısı
t : Zaman
n : Devir sayısı

Kısaltmalar

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

KATLI SARGI YAPISININ ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUNUN ÇIKIŞ PERFORMANSINA ETKİSİ

Adem ÇALIKER

Anahtar Kelimeler: Anahtarlamalı Relüktans Motor, Katlı Sargı, Sonlu Elemanlar Analizi

Anahtarlamalı relüktans motorlarının çalışma prensibi, relüktans kuvvetine dayanmakta ve serbest hareketli, çıkık yapılı rotorun, bulunduğu manyetik devre içerisinde akının, en kolay yol bulabileceği en küçük relüktans konumuna kadar kuvvet uygulanarak çekilmesi şeklinde gerçekleşmektedir. Bu motorlara olan ilgi, maliyetlerinin düşük olması, yapılarının basitliği ve kullanım kolaylıkları nedeniyle her geçen gün artmaktadır. Bu duruma paralel olarak anahtarlamalı relüktans motorları üzerine yapılan performans arttırmaya yönelik çalışmalar kontrol devresi üzerine yapılan çalışmalar ve manyetik devresi üzerine yapılan çalışmalar olarak iki alana ayrılmaktadır. Bu çalışmada motorun manyetik devresi üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, öncelikle anahtarlı relüktans motorları ve bu motorların tasarımı hakkında genel bilgiler verildikten sonra klasik anahtarlamalı relüktans motorunun ve katlı sargı yapısına sahip anahtarlamalı relüktans motorunun sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılmıştır. Sargı yapısında yapılan değişiklik sonucunda elde edilen değerler klasik anahtarlamalı relüktans motor analizinden elde edilen değerler ile karşılaştırılmış ve grafiksel olarak gösterilmiştir.

Yapılan statik analizler sonucunda sargı yapısındaki değişiklik motorun moment değeri üzerinde pozitif yönde etkili olduğu görülmektedir. Katlı sargı yapısına sahip ARM için moment dalgalılığı değerinde küçük bir artış gözlemlenmiştir. Analizler sonucunda her iki sargı yapısı için moment dalgalılık oranları tespit edilerek giderilmesine yönelik önerilerde bulunulmaktadır.

THE EFFECT OF MULTIPLE LAYER WINDING STRUCTURE ON OUTPUT PERFORMANCE OF SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

Adem ÇALIKER

Keywords: Switched Reluctance Motor, Multiple Winding, Finite Element Analysis

The principle of working of the motor is based on reluctance force and realizes by pulling the rotor which has doubly-salient structure to the least reluctance position where the easiest is and most suitable way to flow flux-linkages. Switched reluctance motors(SRM) are simple electrical machines which have application areas increasingly growing because of their cheapness and easy usage. In paralel with this situation, Its 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 is about magnetic circuit os switched reluctance motor.

First of all, the general knowledge about Switched Reluctance Motors and its design has been given in this study. Subsequently, magnetic analysis of the classical switched reluctance motor and multiple layer winding structured switched reluctance motor has been achieved by using the finite element method. Finally, the analysis results of these two machines have been compared and showed grafically.

According to the resulting of the static analyses it has been found that output torque of the motor was effected positively. It has been seen that a little torque ripple increment for Multiple windig structured SRM was occured. After the analyses results, the torque ripples ratios for both winding structure have been determined, and suggestions for eliminating them have been presented.

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesi ile insanoğlu için vazgeçilmez makinelerden birisi haline gelen elektrik motorları dönme hareketinin elde edilme şekline göre ikiye ayrılır. Klasik elektrik motorları olarak adlandırılan grupta dönme hareketi stator ve rotorda bulunan manyetik alanların etkileşimi ile oluşurken, anahtarlamalı relüktans motorunun(ARM) da içinde bulunduğu ikinci grupta dönme hareketi, stator sargılarına enerji verildiğinde rotorun minimum relüktansın bulunduğu noktaya hareket etmesi ile oluşmaktadır.

Basit yapıları ile dikkat çeken ARM'ler, çalışma prensibi ilk olarak 1840 yılında Wheatsone ve Davidson tarafından ortaya konmasına rağmen diğer çoğu elektrik motorlarında olduğu gibi direkt DA veya AA kaynaklardan beslenememesi ve doğrusal olmayan bir karakteristik göstermesi nedeniyle 1960'lı yıllara kadar kullanımı pek tercih edilmeyen elektrik motorları olmuştur. Yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler, Leeds Üniversitesinden Lawrenson ve ekibinin, Nottingham Üniversitesinden Ray, Davis ve Blake'in 1980 yılların başında yaptığı çalışmalar ile ARM'lere olan ilgi her geçen gün artmıştır[2-4]. Yapılan ilk çalışmalarda hava aralığındaki relüktans değişimi prensibini temel aldıklarından ve faz endüktanslarının değişken olmasından dolayı değişken relüktanslı motorlar olarak isimlendirilen ARM'ler, daha sonraları faz sargılarının yarı iletken elemanlar tarafından anahtarlanmasından dolayı anahtarlamalı relüktans motorlar olarak isimlendirilmişlerdir.

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

- Rotorda sargı, mıknatıs, kısa devre halkası ve fırça bulunmaması hem rotor kayıplarının olmaması nedeniyle verimin yüksek olmasını hem de yüksek hızlara daha elverişli olmasını sağlamaktadır,

• Basit yapılı olması ile diğer motor çeşitlerine göre maliyetinin düşük olması sonucunu ortaya çıkarmaktadır,

• Hız uygulamalarında kullanılan motorlar için hızlanma ve cevap süreleri önemli kriterlerdir. ARM'lerin sargı bulunmayan rotorunun eylemsizlik momentinin düşük olması nedeniyle cevap süresi küçüktür,

• Motor sargısının yarı iletken anahtarlara seri bağlı olması nedeni ile kısa devre tehlikesi yoktur,

• Stator üzerindeki sargı yapısının basit oluşu ve sargıların aralarında bir elektriksel bağlantının bulunmaması ARM'lerin üretim sürecini kolaylaştırmaktadır.

• Motor fazlarının birbirinden bağımsız çalışabilmesi nedeni ile herhangi bir fazın arızalanması durumunda bile motor dönmeye devam etmektedir.

• ARM'lerin sürücülerinde, diğer sürücü gerektiren motorların sürme devrelerinde kullanılan yarı iletken elemanların sayısının yarısı kadar yarı iletken anahtar kullanılabilmektedir. Bu durum maliyeti etkileyen önemli bir unsurdur.

Yukarıda belirtilen avantajlarına rağmen ARM'lerin kullanımı sınırlayan etkenler de aşağıdaki şekilde sıralanmaktadır:

• Motorun ilk hareketine başlayabilmesi için rotor konumunun bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle rotor konum algılayıcı ya da sensörsüz kontrol için mikrodenetleyici gibi ek donanımlara ihtiyaç vardır. Bu hem maliyetin hem de karmaşıklılığın artmasına neden olur.

• Anahtarlama mantığı ile çalıştığından moment üretimi darbelidir. Bu durum yüksek hızlarda gürültünün yüksek olmasına, düşük hızlarda ise moment dalgalanmasına neden olur.

• Stator sargı endüktansının büyük olması anahtarlama esnasında sargı uçlarında büyük gerilim oluşması neden olmaktadır. Bu nedenle anahtarlama elemanları daha yüksek V_A oranına sahip olanlardan seçilmelidir.

• Çıkıntılı rotora sahip ARM'lerde, yüksek hızlarda rüzgâr kayıpları artmaktadır.

Bir taraftan kontrol tekniklerindeki gelişmeler diğer taraftan yeni algılama yöntemlerinin ortaya çıkması ile ARM'ler dezavantajlarının azaltılması, performanslarının arttırılması ile ilgili çalışmaları destekler niteliktedir[6,7]. Bu

gelişmeler sayesinde ARM'ler birçok uygulama alanında diğer motorlara rakip olabilmektedir. Günümüzde ARM'ler aşağıda belirtilen alanlarda sıkça kullanılmaktadır.

- Elektrikli otomobil ve motosikletlerde
- Uzay ve havacılık endüstrisinde
- Demiryolu ve hafif raylı sistem araçlarında
- Ev aletlerinde (Süpürgeler, beyaz eşyalar vb.)
- Genel amaçlı endüstriyel sürücülerde
- Servo sistemlerde
- Robot uygulamalarında
- Özellikle dış rotorlu yapısı ile kompresörler, fanlar, pompalar, santrifüj tahriği
- Yazıcılarda

1.2. Literatürde ARM Üzerine Yapılan Çalışmalar

ARM'lerin dikkat çekmeye başladığı 1970'lerin sonundan günümüze dek yapılan çalışmalardan bazıları kısaca aşağıda sıralanmıştır.

Stephenson ve diğ. çalışmasında, 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[23].

Lawrenson ve diğ. yaptığı çalışmada, anahtarlamalı relüktans motor üzerine yapılan en kapsamlı çalışmada anahtarlı relüktans motorların yapısı ve çalışması ayrıntılı incelenmiş, aynı güçte ARM ile asenkron motorun verimleri karşılaştırılmıştır[2].

Davis ve Ray, 8/6 iki katlı sargı düzenlemeli ve klasik ARM'ları için, çeşitli çevirici devrelerinin tasarımına ilişkin esaslar inceleyerek, 8/6 ARM'lar için çift katlı sargı yapısının kontrol devresi açısından avantajları ortaya koymuştur[3].

Arumugam ve diğ. çalışma ile Sonlu Elemanlar Metodunu kullanarak değişik uyarma akımları ve farklı rotor konumları için ARM'nin manyetik alan dağılımını sunmuştur[24].

Lindsay ve diğ. yaptığı çalışmada iki boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemini kullanarak bir stator kutbunda iki diş olan bir ARM'nin bir faz endüktansı ve akısı farklı rotor konumları ve uyarma akımları için hesaplanmıştır[25].

Dawson ve diğ. çalışmasında 7.5 KW gücünde bir ARM'nin ürettiği momenti Sonlu Elemanlar Yönteminde hesaplanmış ve elde edilen teorik sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır[26].

Fauchez çalışması ile ARM'nin iki boyutlu manyetik analizi sınır eleman ve sonlu eleman metotlarını birlikte kullanarak yapmıştır. Doymanın etkilerinin meydana geldiği demir bölgesi sonlu eleman; hava aralığı, stator sargıları gibi motorun manyetik olmayan kısımları için sınır eleman metodu kullanarak ARM'nin konuma bağlı endüktans ve momentini hesaplamıştır[28].

Arumugan ve diğ. yaptığı çalışmada, Anahtarlamalı relüktans motorlarında kutup yay genişliğinin kutup basamak değerine oranının değiştirilmesi ile motor çalışma karakteristikleri üzerindeki etkileri ortaya koymuştur[29].

Krishnan ve diğ. çalışmalarında, Anahtarlamalı relüktans motorun tasarımı için Sonlu Elemanlar Yönteminde hazırladıkları bir bilgisayar programı tanıtılmıştır[31].

Stephenson ve El- Khazendar çalışmaları ile hem statorunda, hem de rotorunda çıkık kutuplara sahip olan büyük bir 8/6 ARM'u imal ederek, motorun doyma altındaki karakteristikleri ortaya konulmuş olup, doymanın momente olan etkisi ve enerji akışı incelenmiştir[32].

Corda çalışmasında, ARM'da oluşan moment dalgalılığının hesabına ilişkin yapılan bu çalışmada, doyma altında çalışan motorun dinamik modelleme için hayli karmaşık bir problem oluşturduğu ifade edilmiştir[33].

Xu ve diğ. çalışmasında 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 konulmuştur[34].

Davis ve Al-Bahadly çalışmalarında ARM üzerine yapılan çalışmalarda ortak endüktans etkisi belirlemeye 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 gerektiği belirtilmiştir[35].

Preston ve Lyons, herhangi bir uyarmada aynı anda birden fazla fazı uyarılan ARM'ye ilişkin ortak endüktansın etkilerini içeren manyetik eşdeğer devre modeli tanımlamıştır. ARM'nin manyetik eşdeğer devre modeli sonuçları ile SEY sonuçları karşılaştırılmıştır[36].

Moghbelli ve diğ., Tasc Drive Ltd. şirketi tarafından üretilen 8/6 kutuplu bir ARM'nin Sonlu Elemanlar Yönteminde anlık akım ve moment dalga şekilleri hesaplanarak deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır[37].

Jack ve diğ., ARM'nin tasarımında gerek duyulan uyarma akımı ve konuma bağlı motorun faz akısının hesaplanmasını Sonlu Elemanlar Yönteminde yapan yeni bir metot tanımlamıştır. Bölmeleme, sınır değerleri, malzeme bilgileri, denklem çözümü, çözümden sonra makine bilgilerinin çıkarılması işlemlerini otomatik yapan bir bilgisayar programı tanıtmıştır[38].

Davis, ARM'nun rotor yapılarının moment üzerine etkileri inceleyerek, motorun lineer modeli için stator ve rotor farklı yapılarda tasarlanarak çıkış momenti üzerindeki etkiler ortaya koymuştur[39].

Finch ve diğ., klasik anahtarlamalı relüktans motorlarında kayıplar göz önünde bulundurularak yapılan tasarım çalışmalarının motor performansı üzerindeki etkileri açıklamıştır[40].

Suriano ve Ong çalışmasında, düşük hız çalışma altında klasik ARM, karşıt kuplajlı ARM ve değişik rotor yapısına sahip bir ARM'unun statik moment karakteristikleri karşılaştırılarak en uygun motor yapısı ortaya konulmuştur[41].

Faiz ve Finch yaptığı 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 açıklanmıştır[42].

Chenadec ve diğ. çalışmalarında, 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[43].

Xu ve Ruckstader çalışmasında, 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[44].

Radun çalışmasında, 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[45].

Suriano ve Ong yaptığı çalışmada, 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 karşılaştırılmıştır[46].

Pelikant ve Wiak yaptığı çalışmada, 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 konulmuştur[47].

Ohgachi ve diğ. yapılan çalışmada, ARM'larda momentte oluşan dalgalanmaların azaltılması için optimum tasarım parametrelerinin belirlenmesi ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılmıştır[48].

Li ve Tang çalışmasında "Fractionally-Pitched Winding" ismi ile tam kutup adımlı ve kısa kutup adımlı sargının birlikte kullanıldığı yeni bir sargı yöntemi, Anahtarlamalı Relüktans Motoruna uygulandığı çalışmada pozitif moment, hem öz endüktansların hem de karşıt endüktansların, rotor konumuna göre değişim oranından elde edilmiştir. Klasik Anahtarlamalı Relüktans Motor ile karşılaştırıldığında makine veriminin yükseldiği, manyetik alan analizi ve deneysel çalışmalarla sunulmuştur[49].

Russa ve diğ. yaptığı çalışmada, geniş bir hız aralığında çalışma gerektiren uygulamalar için ARM momentinde dalgalanmayı azaltan bir teknik sunulmuştur[50].

Pillay ve Cai tarafından yapılan çalışmada, ARM'de statorun dışının yuvarlak ve çıkıntılı olması durumu için statorda oluşan titreşim hareketlerini incelenmiş, çıkıntılı statorda titreşimlerin daha fazla olduğu kanıtlanmıştır[51].

Clothier ve Mecrow çalışmasında, 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[52].

Kosaka ve Matsui tarafından yapılan çalışmada, 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 edilmiştir[53].

Mecrow ve diğ. çalışmasında, "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 konularak 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 aşılmıştır[54].

Wichert ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, anahtarlamalı relüktans motorlarda verimi arttırmak ve kayıpları azaltmak için optimum yapısal parametrelerin belirlenmesi incelenmiştir[55].

Hong ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, klasik anahtarlamalı relüktans motorlarda değişik stator kutup şekilleri ve boyunduruk yapıları modellenerek motorda oluşan titreşimlerin düşürülmesi amaçlanmıştır[56].

Xu ve Torrey çalışmasında, klasik anahtarlamalı relüktans motor ile karşıt kuplajlı anahtarlamalı relüktans motor sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri gerçekleştirilerek çalışma karakteristikleri karşılaştırılmıştır[57].

Mao ve Tsai tarafından yapılan çalışmada stator kutuplarının yeni tasarım şekli(C-core) ile klasik anahtarlamalı motorlara göre daha yüksek moment üreten, verimi daha yüksek aynı zamanda esnek sargı yapısına sahip bir anahtarlamalı relüktans motorunun tasarımı yapılmıştır[58].

Perez Cebolla ve diğ. çalışmasında, anahtarlamalı relüktans motorlarında akım yönü ve sargı diziliminin çıkış momentine etkisinin incelenmiş, 24/18 bir anahtarlı motor için faz akımlarının yönüne ve sargıların dizilimine göre çıkış momenti deneysel sonuçları ile ortaya konmuştur[59].

Yong tarafından yapılan çalışmada, kutup şeklinin anahtarlamalı relüktans motorun moment dalgalılığı üzerindeki etkisinin incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda ortalama moment üretimi fazla ve moment dalgalanması daha az olan bir motor tasarımı gerçekleştirilmiştir[60].

Daldaban ve Üstkoyuncu tarafından yapılan çalışmada, disk tipi anahtarlamalı relüktans motorların klasik anahtarlamalı relüktans motorları ile moment üretimi ve gürültü seviyesi noktasında karşılaştırılması yapılmıştır. Temelde doğrusal relüktans motorlara benzeyen disk tipi anahtarlamalı relüktans motorların daha yüksek moment ürettiği ve daha düşük gürültü seviyesine sahip olduğu ortaya konmuştur[61].

Daldaban ve Üstkoyuncu tarafından yapılan çalışmada, çok katmanlı anahtarlamalı relüktans motorlarında moment dalgalılığı durumu incelenmiştir. Çalışmada bu tür motorlarda daha yüksek kalkış momenti ve daha düşük gürültü seviyesi olduğu sonucu elde edilmiştir[62].

Afjei ve diğ. tarafından yapılan çalışmada, iki fazlı yeni bir anahtarlamalı relüktans motoru için yüksek kalkış momenti elde etmek için çapılan çalışmada motorun rotor pozisyonundan bağımsız bir şekilde sorunsuzca kalkış momenti üretebildiği gösterilmiştir[63].

1.3. Çalışmanın Amacı

Son yıllarda teknolojinin gelişmesine paralel olarak artan rekabet, daha az maliyetle daha kaliteli ürünlerin üretilme zorunluluğunu olmazsa olmaz kural haline getirmiştir. Her alanda, bu tür basit ama zor bir kurala ayak uydurabilmek amacıyla mühendisler mevcut makine ve sistemlerin performansını yükseltmek, boyutunu küçültmek, maliyetini insan ve çevre sağlığını dikkate alarak düşürmek amacıyla sürekli araştırmalar yapmaktadırlar.

Günümüzde diğer sistem ve makineler için olduğu gibi elektrik makineleri için de en basitinden en karmaşığına kadar tasarım parametrelerini en uygun şekilde gerçekleştirilmiş olanların doğrudan kullanım alanları artmakta ve günlük hayatta daha fazla tercih edilmektedir.

Hem mekanik yapılarının hem de kullanılan çevirici yapısının basitliği nedeniyle endüstride daha fazla kullanılmaya başlayan ARM'lar hakkında 1970'lerin sonundan günümüze değin birçok çalışma yapılmıştır.

Ancak ARM'lar basit tasarım, düşük atalet, geniş hız aralığı, yüksek verim ve düşük maliyet gibi birçok avantaja sahip olmasına karşın faz geçiş anlarında momentte meydana gelen çökmeler, yüksek akustik gürültü ve konum tespitinin yapılmasının zorunluluğu gibi bir takım sıkıntılara da sahiptirler [5].

ARM'ların birçok üstünlüklerine karşın momentte meydana gelen çökmeler nedeniyle moment dalgalılığı problemi, endüstriyel alanda ön plana çıkmamasının en önemli sebeplerinden birisidir. Bu nedenle momentin iyileştirilebilmesi için gerek manyetik devre gerekse kontrol devresi ve kontrol tekniğinde yapılan değişiklikler ile bu sorunun kabul edilebilir değerler inmesi için birçok çalışma yapılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, klasik anahtarlamalı relüktans motorunun sargı yapısının değiştirilmesi ile oluşturulan modellerin analizlerinin yapılarak sargı yapısındaki değişikliğin anahtarlamalı relüktans motorunun halkalanma akısı-akım, endüktans, moment gibi çalışma karakteristikleri üzerine etkilerini değerlendirmektir. Bu noktadan hareketle, motorun endüktans ve moment profiline göre belirtilen değerlendirmeyi yapabilmek amacıyla katlı sargı yapısına sahip 8 model ve 6/4 klasik anahtarlamalı relüktans motorunun tasarımı yapıldıktan sonra sonlu elemanlar yöntemi kullanan Maxwell 2D programı ile manyetostatik analizi gerçekleştirilmektedir.

1.4. Çalışmanın Yapısı

Çalışmanın amacına uygun olarak oluşturulan diğer tez bölümlerinde aşağıdaki bilgiler yer almaktadır.

2. Bölümde, ARM'nun yapısal özellikleri, tasarım kriterleri, çalışma prensibi ve manyetik karakteristikleri anlatılmaktadır.

3. Bölümde, 6/4 klasik anahtarlamalı relüktans motoru için sonlu elemanlar yöntemini kullanan Maxwell 2D programı ile elde edilen analiz sonuçları verilmektedir.

4. Bölümde katlı sargı yapısına sahip 8 modelin yine Maxwell 2D programı ile elde edilen analiz sonuçları ve bu sonuçların klasik anahtarlamalı relüktans motoru ile karşılaştırılması yer almaktadır.

Son bölüm olan 5. bölümde ise, elde edilen sonuçlar, bu sonuçların karşılaştırılması ile ortaya çıkan durumun değerlendirmesi neticesinde bazı öneri ve yorumlar bulunmaktadır.

2. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLARI

2.1. Giriş

Klasik elektrik motorlarında olduğu gibi ARM'ler de stator ve rotordan oluşmasına rağmen ARM'lerde sadece statorda sargı bulunmaktadır. Aslında bu durum ARM'nin çalışma mantığının temelini oluşturmakta ve diğer motorlardan farklı olarak rotor konumuna göre hava aralığının değişmesi, dolayısıyla relüktansın değişmesi sonucu dönme hareketi oluşmaktadır. Basit yapılı olmasına rağmen doğrudan bir kaynağa bağlanarak çalışamadıkları için bu motorlarda bir sürme(anahtarlama) devresinin kullanılması gerekmektedir. Hem değişken relüktansa bağlı olan çalışma prensiplerini hem de çalışmaları için gerekli olan sürme devrelerini birlikte kullanılması ile anahtarlamalı relüktans motorları (ARM) adı kullanılmaktadır.

İlk olarak 1840'lı yıllarda çalışma prensipleri ortaya konan ARM'ler karmaşık bir sürme devresi gerektirmesi nedeniyle 1970'li yıllara kadar arka planda kalmışlardır. Bu dezavantajları nedeniyle üzerlerinde yapılan çalışmaların kısıtlı kalmasına rağmen özellikle yarıiletken ve güç elektroniği teknolojisinde olan gelişmelere paralel olarak 1980'li yıllardan itibaren değişken veya ayarlı hız uygulamalarında kullanılmaya başlanmışlardır. Basit yapıları nedeniyle son yıllarda mühendislik uygulamalarında birkaç watt değerinden yüzlerce kilowatt'a kadar çeşitli değerlerde kullanım alanı bulmaktadır. Günümüzde güç elektroniği maliyetlerinin düşmesi nedeniyle ARM'ler DA ve AA motorları ile rekabet edebilmektedir.

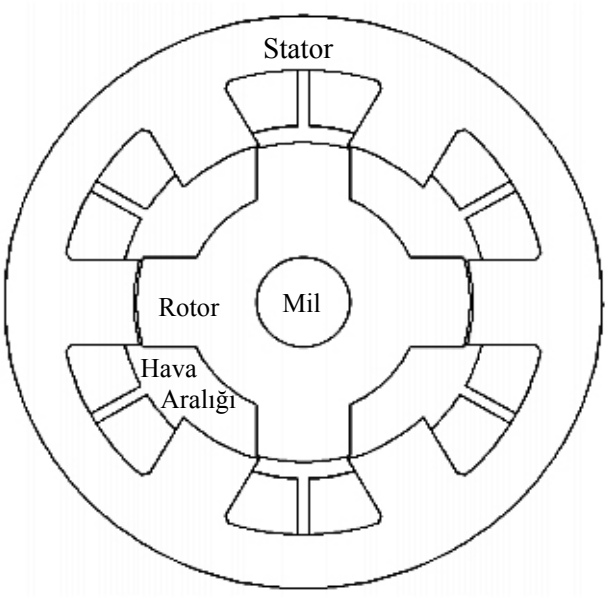
2.2. Tanımı ve Yapısı

Elektrik motorları elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesi amacıyla kullanılır. Dönme hareketi yapan motorlarda bu hareket endüklenen moment ve relüktans moment olmak üzere iki şekilde oluşmaktadır. Bilinen elektrik motorlarının birçoğu endüklenen momenti mekanik enerjiye çevirmektedir. Bu tür makinelerde iki

farklı sargı bulunmaktadır. Bu sargılardan birisi uyarma görevini yaparken diğer sargı endükleme görevini yerine getirerek momentin üretilmesini sağlar.

Anahtarlamalı relüktans motorları ise mekanik enerji relüktans moment üretimiyle oluşumuyla gerçekleşir. Bu tip motorlarda moment, karşılıklı stator kutbu üzerinde bulunan sargı çiftinin uyarılması sonucunda hava aralığında depolanan manyetik enerjinin rotor konumuna göre değişimiyle oluşmaktadır. Yani, stator ve rotor kutuplarının örtüşme oranlarına bağlı olarak relüktans değişimi ile moment üretilmektedir.

Yapı bakımından adım motorları ve çıkık kutuplu senkron motorlara benzeyen ARM'ler sadece stator kısmında sargı olması nedeniyle diğer motorlara göre daha basit yapıya sahiptir. Diğer elektrik motorlarında olduğu gibi demir kaybını azaltmak için stator ve rotor nüveleri ince lamine saçlardan imal edilir. Faz sargıları çıkık kutupların üzerine ince kesitli telden yoğun bir şekilde sarılır. Rotorda ise sargı, kısa devre çubukları ya da mıknatıs bulunmaz.



Şekil 2.1: 6/4 ARM kesiti

Moment dalgalanmasını önlemek, ayrıca ilk kalkınma anında sorun olmaması için ARM'lerde stator ve rotor kutup sayıları birbirine eşit değildir. ARM'nun stator kutup sayısı Ns, rotor kutup sayısı Nr ile gösterilebilir. Kutup sayılarının seçimi uygulamaya göre değişmektedir. Yüksek hız istenen ARM uygulamalarında stator

kutup sayısının (Ns) rotor kutup sayısına (Nr) oranı (Ns/Nr) büyük seçilirken yüksek moment istenen ARM uygulamalarında ise stator kutup sayısının rotor kutup sayısına oranı daha küçük seçilmektedir. Ayrıca bu oranın moment dalgalılığına etkisi de büyük olmaktadır. Genellikle stator kutup sayısı rotor kutup sayısından büyük olmaktadır ve birbirine yakın olmaktadır. Bunun nedeni, herhangi bir faz uyarıldığında oluşan manyetik alandan daha fazla yararlanmak ve sargılara daha geniş yer sağlamaktır. ARM'unda en çok kullanılan stator/rotor kutup sayısı oranları (Ns/Nr) 6/2, 6/4, 8/6 şeklindedir.

Anahtarlı relüktans motorunda stator ve rotor kutup sayısı farklı olduğundan dolayı her zaman hareket verebilecek uygun bir rotor kutbu vardır. Rotorun dönüş yönünün aksine, bir sonraki fazın uyarılması ile bulunduğu konumu değiştirmesi esnasında kat ettiği açısal yer değiştirmesine adım açısı ya da konum açısı adı verilmektedir.

Konum açısı (adım açısı) θ;

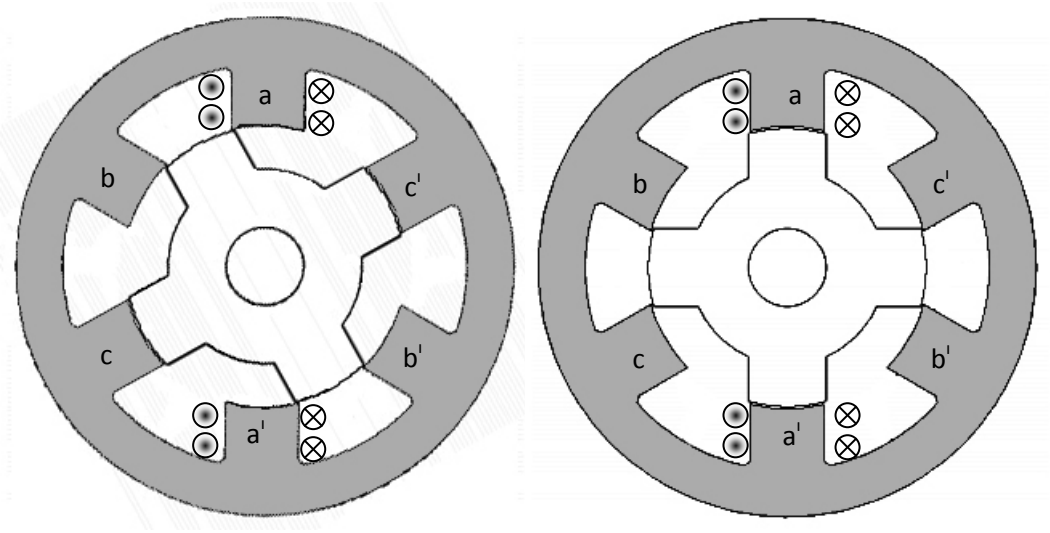
$$\theta = \frac{360}{N_r q} \tag{2.1}$$

Burada; N_r rotor kutup sayısını, q faz sayısını, θ ise adım açısını tanımlamaktadır.

2.3. Anahtarlamalı Relüktans Motorunun Çalışma Esası

Şekil 2.2 (a)'daki motorda r_1 ve r_1' rotor kutupları ile c ve c′ stator kutuplarının aynı eksende olduğunu (örtüşen pozisyonda olduğunu) kabul edelim. Şekil 2.2 (a)'da gösterilen yönde a-fazına bir akım uygulanırsa, a ve a′ stator kutupları ile r_2 ve r_2'rotor kutupları içinde bir akı üretilir. Bu akı, r_2 ve r_2' rotor kutuplarını a ve a′ stator kutuplarına doğru çekmeye çalışır. Kutuplar aynı eksene geldiklerinde, a-fazının akımı kesilir ve bunun sonucunda oluşan durum Şekil 2.2 (b)'de gösterilmiştir. Şimdi statorun b-sargısı uyarılır, r_1 ve r_1' şekilde, c-fazının enerjilenmesi sonucu r_2 ve r_2' kutupları c ve c′ kutupları ile aynı eksene gelir. Bu anahtarlama sırasına göre 90º hareket ettirmek için a, b, c sırasına göre üç fazın enerjilenmesi gerekir. Rotorun bir devirlik hareketi, her fazın akımlarının rotor kutupları sayısı kadar anahtarlanmasıyla üretilir. Akımların a, b, c sırasında

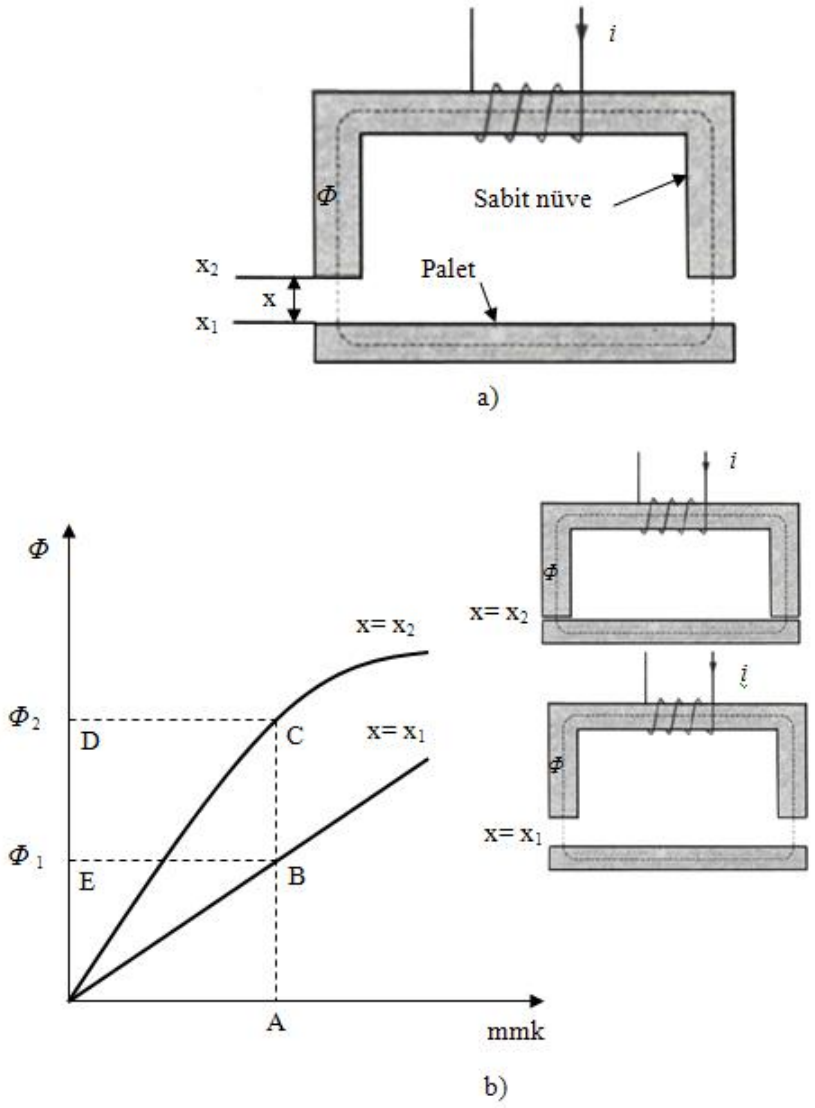
anahtarlanması rotor dönüş yönünün ters çevrilmesini sağlar. Bu durum Şekil 2.2 (a) ve (b) yardımıyla görülebilir[10].



a) b)

Şekil 2.2: ARM'nin çalışması, a) c fazı örtüşen pozisyonda, b) a fazı örtüşen pozisyonda

ARM'nin moment üretimi bir solenoitte elektromekanik enerji çevriminin temel esasları kullanılarak açıklanabilir. Şekil 2.3 (a)'daki solenoid N sarımlıdır ve sargı i akımı ile uyartıldığı zaman bir φ akısı üretir. Uyartım akımının artırılması paleti sabit nüveye doğru hareket ettirecektir. Hava aralığının x_1 ve x_2 ($x_1 > x_2$) değerleri için mmk'e karşı oluşan manyetik akı (φ) Şekil 2.3 (b)'de çizilmiştir. x_1 için çizilen akı doğrusaldır. Çünkü manyetik yolda hava aralığının relüktansı egemen olup manyetik devrede akının daha küçük olmasına neden olur[10].



Şekil 2.3: Selenoid ve karakteristikleri

Elektrik enerjisi girişi Eşitlik 2.2'de

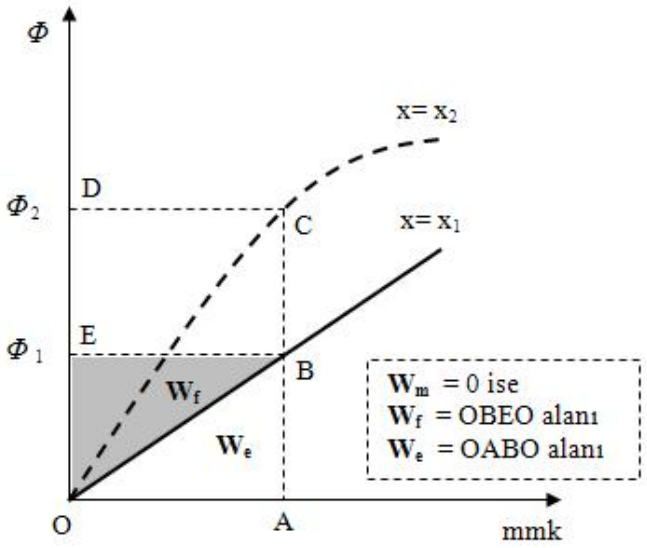
$$W_e = \int eidt = \int idt \frac{Nd\varphi}{dt} = \int Nid\varphi = \int Fd\varphi \qquad (2.2)$$

olarak yazılır. Burada; *e* indüklenen emk ve F mmk'dir. Elektrik enerji girişi (W_{el}), sargıda depolanan enerji (W_f) ve mekanik ise çevrilen enerjinin (W_m) toplamına eşittir ve Eşitlik 2.3'de verilmiştir.

$$W_e = W_f + W_m \tag{2.3}$$

Mekanik iş yapılmadığı zaman (armatürün x_1 den başlaması durumunda olduğu gibi) depolanan alan enerjisi, Eş.2.2 de verilen elektrik girişi enerjisine eşittir. Bu durum Şekil 2.4'de OBEO alanına denk gelir.

Alan enerjisinin tamamlayanı, koenerji (W_c) olarak adlandırılır, Şekil 2.5'de OBAO alanı ile verilir ve matematiksel olarak $\int \varphi dF$ ile ifade edilir. Benzer şekilde, armatürün x_2 konumu için alan enerjisi OCDO alanına denk gelir ve koenerji OCAO alanı ile verilir[10].



Şekil 2.4: Mekanik enerji yok iken manyetik alanda depolanan enerji

Artırmalı değişimler için Eşitlik 2.4

$$\Delta W_e = \Delta W_f + \Delta W_m \tag{2.4}$$

olarak yazılır. Şekil 2.3 (b) ve Şekil 2.5'daki A çalışma noktasınca belirlenen sabit bir F_1 uyartımı için farklı enerjiler elde edilir.

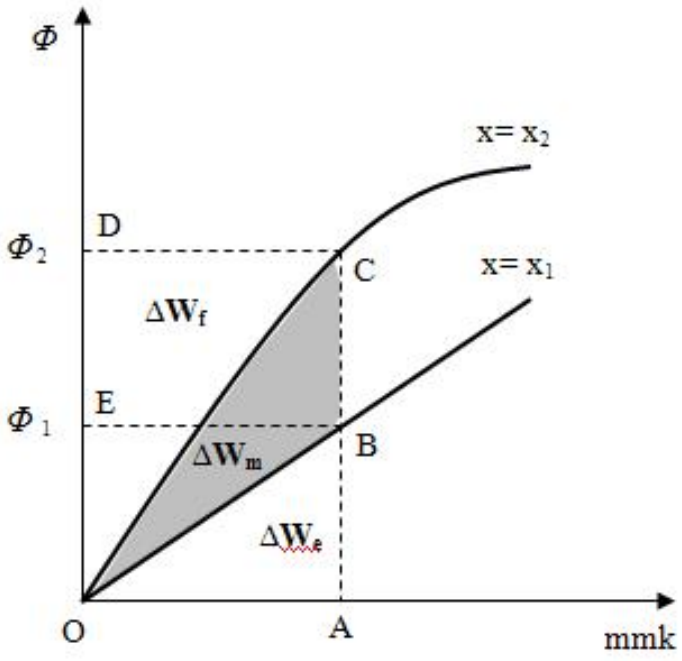
$$\Delta W_e = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} F_1 d\varphi = F_1(\varphi_1 - \varphi_2) = \text{alan(BCDEB)} \tag{2.5}$$

$$\Delta W_f = \Delta W_f\Big|_{x=x_2} - \Delta W_f\Big|_{x=x_1} = \text{alan(OCDO)} - \text{alan(OBEO)} \tag{2.6}$$

Eşitlik 2.4 ve Eşitlik 2.6 kullanılarak artan mekanik enerji Eşitlik 2.7'da

$$\Delta W_m = \Delta W_{el} + \Delta W_f = \text{alan(OBCO)} \tag{2.7}$$

olarak elde edilir ve bu alan belirli bir mmk için çizilen iki eğri arasındadır ve Şekil 2.5'da gösterilmiştir.



Şekil 2.5: Artan mekanik enerji

Döner motorda ise artan mekanik enerji elektromanyetik moment ve rotor konumundaki değişim terimleri Eşitlik 2.8 ile

$$\Delta W_m = T_e \Delta\theta \tag{2.8}$$

olarak yazılır. Burada T_e elektromanyetik moment ve $\Delta\theta$ artan rotor açısıdır. Buna göre, elektromanyetik moment Eşitlik 2.9'de

$$T_e = \frac{\Delta W_m}{\Delta\theta} \tag{2.9}$$

olarak verilir. Sabit uyartım durumunda (mmk sabit iken), yapılan artan mekanik iş koenerjideki (W_c) değişim oranına eşittir. Gerçekte koenerji yoktur, sadece alan enerjisinin tamamlayanıdır. Bundan dolayı yapılan artan iş Eşitlik 2.10 da,

$$\Delta W_m = \Delta W_c \tag{2.10}$$

olarak yazılır. Buradan, Eşitlik 2.11 ile koenerji bulunur[10].

$$\Delta W_c = \int \phi dF = \int \phi d(Ni) = \int (N\phi) di = \int \lambda(\phi, i) = \int L(\phi, i) i.di \tag{2.11}$$

Burada, L endüktansı ile λ sargı halkalanma akısı rotor konumu ve akımın bir fonksiyonu olur. Koenerjideki değişiklik iki konum (θ_2 ve θ_1) arasında meydana gelir. Bu açıklamalara göre, armatür konumu ve akımın bir fonksiyonu olarak temsil edilen koenerji terimi ile tanımlanan hava aralığı momentinin ifadesi Eşitlik 2.12' de verilmiştir[10].

$$T_e = \frac{\Delta W_m}{\Delta \theta} = \frac{\Delta W_c}{\Delta \theta} = \frac{\Delta W_c(i,\theta)}{\Delta \theta}\bigg|_{i=sabit} \tag{2.12}$$

Belirli bir akım için endüktans rotor konumu ile doğrusal olarak değişir ise (bu genellikle gerçeğe uygun bir durum değildir), hava aralığı momenti Eşitlik 2.13 ile

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta,i)}{d\theta} \tag{2.13}$$

olarak elde edilebilir. Bu durum Eşitlik 2.14'den türetilir.

$$\frac{dL(\theta,i)}{d\theta} = \frac{L(\theta_2,i) - L(\theta_1,i)}{\theta_2 - \theta_1} \tag{2.14}$$

Bu diferansiyel endüktans, moment sabiti olarak dikkate alınabilir ve birimi Nm/A² dir. Ancak bu bir sabit değildir, sürekli değişir. Bu terime göre, ARM bir kararlı-durum Eşdeğer devresine (DA ve AA motorlarının sabit olduğu anlamda) sahip olmayacaktır. Moment için Eşitlik 2.13'den su sonuçlar çıkarılabilir.

1. Moment akımın karesi ile değişir. Bundan dolayı tek yönlü (unipolar) moment üretmek için akım da tek yönlü olabilir. Bu AA motorlarına göre ters bir durumdur. Tek yönlü akım gerektirmesi, bir fazlı akımı kontrol etmek için sadece bir güç anahtarı (muhtemelen transistör) kullanılması üstünlüğü sağlar. Bu özellik, motoru sürmek için kullanılan konvertörde en az sayıda güç anahtarları kullanılması imkanı verir ve böylece konvertör (sürücü) daha ekonomik hale gelir.

2. Moment sabiti, endüktansın rotor konumuna karşı eğilimi ile belirlenir. Bir stator sargısının endüktansı hem rotor konumunun hem de sargı akımının bir

fonksiyonudur ve bundan dolayı doğrusal değildir[10]. Doğrusal olmayan yapıdan dolayı ARM için basit eşdeğer devresi geliştirmek mümkün değildir.

3. Moment akımın karesiyle değişmesinden dolayı, bu motor bir DA motoruna benzer karakteristiğe sahiptir ve iyi bir başlangıç momenti üretir.

4. Akım tek yönlü olmasına rağmen generatör özelliğini (endüktans eğrisinin negatif eğiliminde çalıştırarak) yerine getirebilir.

5. Dönüş yönü, stator uyartım sırası değiştirilerek kolayca ters çevrilebilir.

6. 1, 4 ve 5. maddelerdeki özelliklerden dolayı bu motor bir konvertör yardımıyla dört-bölgede çalıştırılmaya uygundur.

7. Bu motor üç-fazlı şebekeden veya kaynaktan doğrudan çalıştırılamaz, kontrol edilebilir bir konvertör gerektirir. Bundan dolayı sabit hız uygulamaları için bu motor asenkron ve senkron motora göre daha pahalıdır[10].

8. Moment ve hız kontrolü konvertörün kontrolü ile gerçekleştirilir.

9. Görevini yerine getirebilmesi için bir güç konvertörü ile beraber bu motor, yapı olarak ayarlı-hızlı bir motor sürme sistemini oluşturmaktadır.

10. ARM'de motor faz sargıları arasında küçük bir ortak endüktans vardır ve genellikle bütün uygulamalarda ihmal edilebilir. Ortak manyetik bağın olmadığı kabul edildiğinden dolayı bütün fazlar birbirinden elektriksel olarak bağımsızdır. Bu emsalsiz özellik sadece ARM'ye özgü olup bir faz sargısındaki kısa devre arızası diğer fazlar üzerinde herhangi bir etkiye sahip değildir. ARM'nin bu özelliği, emniyetli kullanımın önemli olduğu yerlerde tercih sebebi olmaktadır.

11. Dört-bölge çalışma için bir yönlü akımın yeterli olması, her bir sargının seri bağlı bir güç anahtarı ile kontrolünü mümkün kılmaktadır.

Yukarıdaki açıklamalara göre ARM'nin aşağıdaki özellikleri dışında adım motoruna çok benzer olduğu görülür. ARM'nin farklı özellikleri şunlardır [11].

1. Çok az kutup sayısı

2. Daha geniş adımlama açısı

3. Kutup başına genellikle bir diş kullanılması

4. Daha yüksek güç çıkış kapasitesi

2.4. Endüktans ve Momentin Rotor Konumu ile İlişkisi

Moment karakteristikleri, sargı akıları ve motor konumu arasındaki ilişkiye bağlıdır ve akımın bir fonksiyonudur. Şekil 2.6'de sabit bir faz akımına göre faz endüktansının rotor konumu ile değişimi verilmiştir. Endüktans ARM statorundaki bir faz sargısı içindir ve saçaklanma ile doyum etkileri yok sayılmıştır. Endüktans eğrisindeki önemli değişiklikler, stator ve rotor kutup yayları ve rotor kutup sayısı terimleri ile tanımlanır. Rotor kutup yayı, bu gösterim amacıyla, stator kutup yayından daha geniş olarak kabul edilmiştir ve bu genel bir durumdur[10]. Şekil 2.6 (a) ve (b)'de gösterilen değişik açılar aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\theta_1 = \frac{1}{2}\left[\frac{2\pi}{n_r} - (\beta_s + \beta_r)\right]$$

$$\theta_2 = \theta_1 + \beta_r$$

$$\theta_3 = \theta_2 + (\beta_r - \beta_s)$$

$$\theta_4 = \theta_3 + \beta_s$$

$$\theta_5 = \theta_4 + \theta_1 = \frac{2\pi}{n_r} \qquad (2.15)$$

Burada β_s ve β_r sırasıyla stator ve rotor kutup yayları ve n_r rotor kutup sayısıdır. Şekil 2.6 (b)'ye göre endüktans dört bölgede farklı özellik göstermektedir.

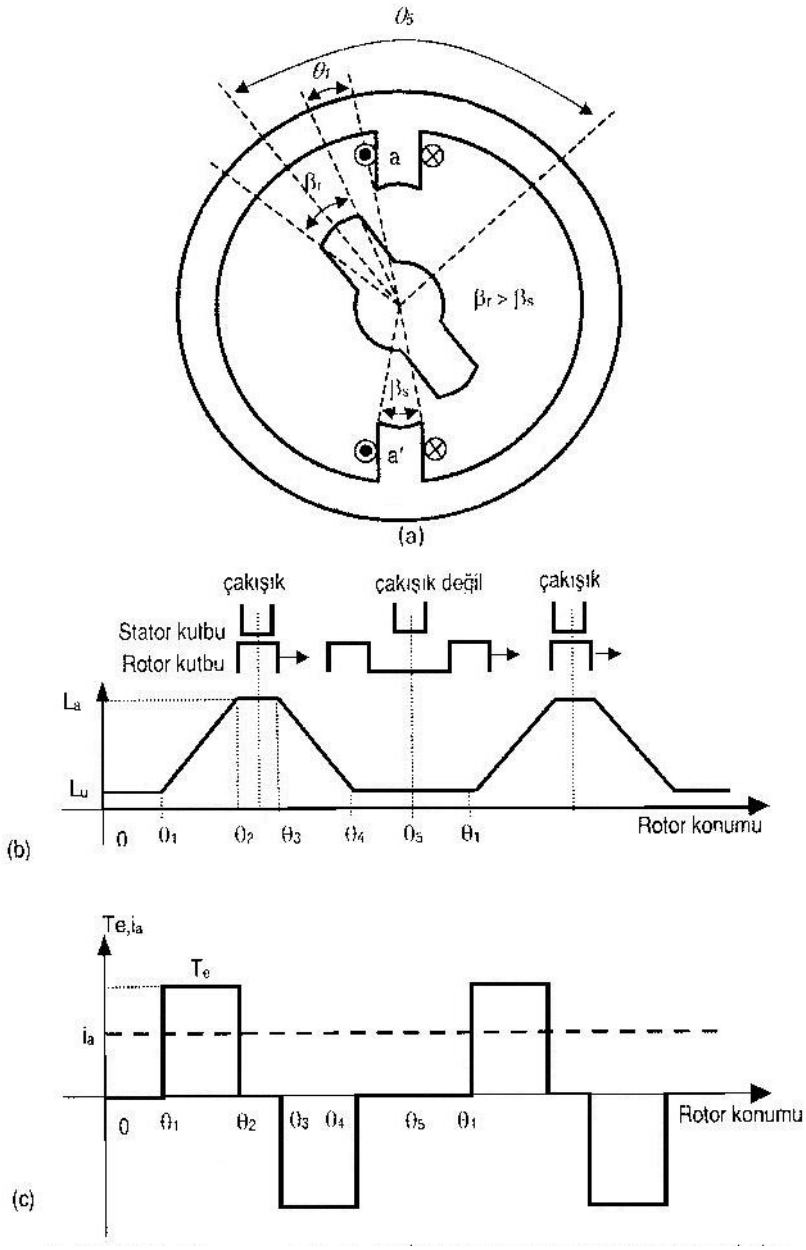
1. θ - θ_1 ve $\theta_4 - \theta_5$: Stator ve rotor kutupları bu bölgede örtüşmez ve akı tamamen hava aralığınca belirlenir. Bu nedenle, bu bölgede endüktans en düşük seviyede olup

yaklaşık sabittir ve örtüşmeyen endüktans (L_u) olarak adlandırılır. Bu özellikten dolayı bu bölgeler moment üretimine katkıda bulunmaz[10].

2. θ_1 - θ_2 : Kutuplar örtüşmeye baslar ve akı yolunun ana kısmını stator ve rotor nüveleri içinden tamamlar. Bu, rotor konumuyla birlikte endüktansı artırır ve endüktansa pozitif bir yükselme eğimi verir. Bu bölgede sargıya bir akım uygulanmasıyla bir pozitif moment (motor olarak çalışma) üretilir. Bu bölgede, kutuplar tamamen örtüştüğü anda son bulur[10].

3. θ_2 - θ_3 : Bu periyot süresince, rotor kutbunun hareketi stator kutbunun tamamen örtüşmesini değiştirmez ve dolayısıyla egemen olan akı yolu değişmez. Diğer bir ifadeyle endüktans en yüksek değerinde sabit tutulur ve örtüşen endüktans (L_a) olarak adlandırılır. Bu bölgede endüktansta değişiklik olmazken moment üretimi (ilgili faz sargısında akım bulunsa bile) sıfırdır. Bu gerçeğe rağmen bu aralık, stator sargı anahtarı açıldığında stator akımının sıfıra azalması için kullanışlı bir süre sağlar ve böylece negatif moment üretimi önlenmiş olur[10].

4. θ_3 – θ_4 : Bu bölgede, rotor kutbu örtüştüğü stator kutbundan uzaklaşır. Bu durum, θ_1– θ_2 bölgesine çok benzerdir, ancak bu bölgede endüktans azalır. Rotor konumunun artması endüktansın negatif moment üretmesiyle (ARM'ye mekanik enerji sağlanırken elektrik enerjisi üretimi ile) sonuçlanır. Şekil 2.6 (b) ve (c)'de gösterilen ideal endüktans ve moment eğrilerinin gerçek bir motorda (doyumdan dolayı) elde edilmesi mümkün değildir. Ayrıca, makine motor olarak çalıştırılacak ise faz endüktansının azalan eğiminde o faza akım uygulanmamalıdır. Aksi halde üretilen momentin ortalama değeri sıfır olacak ve dönemeyecektir[10].



Şekil 2.6: Sargı akımı ve rotor konumlarına göre bir faz endüktansının ve momentin dalga şekilleri (ideal durumda), (a) 2/2 ARM kesit görünüşü, (b) Endüktans değişimi, (c) Momentin değişimi

2.5. Eşdeğer Devre

ARM için bir temel eşdeğer devre, fazlar arasındaki ortak endüktans ihmal edilerek şöyle elde edilebilir. Bir faza uygulanan gerilim; sargı direncinde düşen gerilim ile sargı akısının değişiminin toplamına eşittir ve Eşitlik 2.16 ile

$$\nu = \mathrm{R.i} + \frac{d\lambda(\theta,i)}{dt} \tag{2.16}$$

verilir. Burada *R* bir faz direnci, λ faz başına sargı halkalanma akısıdır ve Eşitlik 2.17 da verilmiştir.

$$\lambda = L(\theta,i)i \tag{2.17}$$

Burada *L* endüktans olup rotor konumuna ve faz akımına bağlıdır. Faz gerilimi denklemi, Eşitlik 2.18'de verilmiştir[10].

$$v = R.i + \frac{d\left[L(\theta,i)i\right]}{dt} = R.i + L(\theta,i)\frac{di}{dt} + i\frac{d\theta}{dt}\frac{dL(\theta,i)}{d\theta}$$

$$v = R.i + L(\theta,i)\frac{di}{dt} + \frac{dL(\theta,i)}{d\theta}\omega_m i \tag{2.18}$$

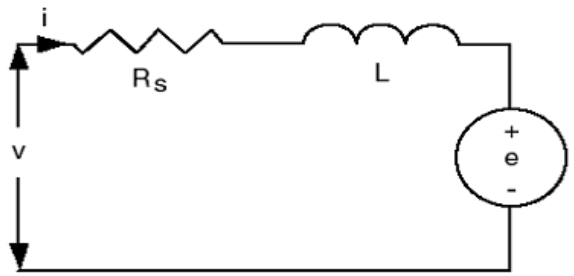
Bu Eşitlik 2.20'deki denklemin sağ tarafındaki üç terim sırayla omik gerilim düşümü, endüktif gerilim düşümü ve endüklenen emk'i temsil etmektedir ayrıca, Eşitlik 2.20 DA seri motor gerilim denklemine çok benzerdir. Endüklenen emk, Eşitlik 2.19'de

$$e = \frac{dL(\theta,i)}{d\theta}\omega_m i = K_b \omega_m i \tag{2.19}$$

olarak tanımlanır. Burada K_b, seri uyartımlı DA makinesinin emk sabitine benzer olarak düşünülebilir ve Eşitlik 2.20'de

$$K_b = \frac{dL(\theta,i)}{d\theta} \tag{2.20}$$

olarak tanımlanır. Emk sabiti çalışma noktasına bağlıdır ve o noktada sabit akımda elde edilir. Gerilim denklemi ve endüklenen emk ifadelerinden elde edilen ARM'nin bir faz eşdeğer devresi Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7: ARM'nin bir faz eşdeğer devresi

Sargı akısı, gerilim denkleminde yerine konulur ve denklem akım ile çarpılırsa ani giriş gücü Eşitlik 2.21'de

$$P_i = v.i = Ri^2 + i^2 \frac{dL(\theta,i)}{dt} + L(\theta,i)i\frac{di}{dt} \tag{2.21}$$

olarak yazılır.

$$\frac{d}{dt}(\frac{1}{2}L(\theta,i)i^2) = L(\theta,i)i\frac{di}{dt} + \frac{1}{2}i^2\frac{dL(\theta,i)}{dt} \tag{2.22}$$

Bu Eşitlik 2.21 , Eşitlik 2.20'de yerine konulursa ani giriş gücü (P_i) Eşitlik 2.23 ile

$$P_i = v.i = Ri^2 + \frac{d}{dt}(\frac{1}{2}L(\theta,i)i^2) + \frac{1}{2}i^2\frac{dL(\theta,i)}{dt} \tag{2.23}$$

verilir. Burada Ri^2 sargı omik kayıpları, $\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}L(\theta,i)i^2\right)$ alan enerjisindeki değişim oranı, $\frac{1}{2}i^2\frac{dL(\theta,i)}{dt}$ ise hava aralığı gücüdür (P_g). Hava aralığı gücünde yer alan rotor konumu ve hız terimlerindeki *t* yerine Eşitlik 2.24, Eşitlik 2.25 de $\frac{\theta}{\omega_m}$ konulur.

$$t = \frac{\theta}{\omega_m} \tag{2.24}$$

$$P_g = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta,i)}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta,i)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta,i)}{d\theta} \omega_m \tag{2.25}$$

Hava aralığı gücü, elektromanyetik moment ile rotor hızının çarpımına eşittir. Bu ifade Eşitlik 2.26'da verilmiştir.

$$P_g = \omega_m T_e \tag{2.26}$$

$$T_e = \frac{P_g}{\omega_m} = \frac{\frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta,i)}{d\theta} \omega_m}{\omega_m} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta,i)}{d\theta} \tag{2.27}$$

Şimdiye kadar elde edilen denklemler eşdeğer devrenin tanımlanmasını sağlarken aynı zamanda elektromanyetik momentin, hava aralığı gücünün ve ARM'ye giriş gücünün hem dinamik hem de kararlı durum çalışmalarında değerlendirilebilmesi için yeterlidir[10].

2.6. ARM için Dönüştürücü Devreleri ve Özellikleri

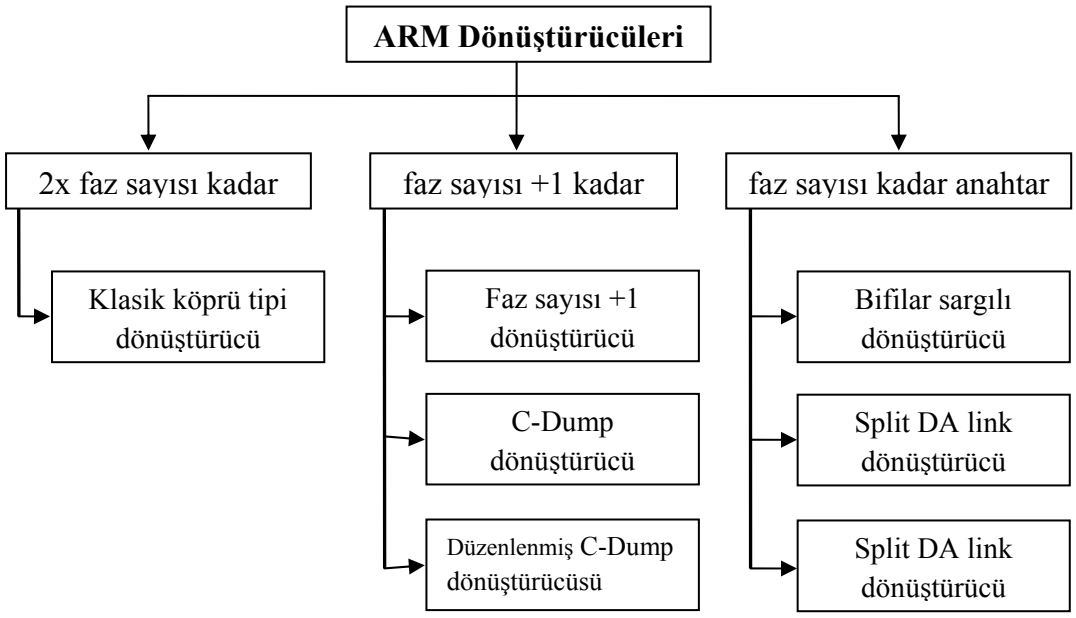
ARM'lerin döndürme momenti akımın yönüne değil genliğine bağlıdır. Dolayısıyla motorun sürücü devresinde kullanılacak yarı iletken sayısı diğer sürücülere nazaran daha azdır. Bunun yanında moment değeri endüktansın değişimine bağlı olduğundan, eğer akım endüktansın artma yönünde uygulanırsa döndürme momenti pozitif olurken, akımın endüktansı azaltma yönünde olması durumunda ise negatif olacaktır. Dolayısıyla akım darbelerinin, endüktans değişiminin hangi bölgelerinde uygulanacağının tespit edilmesi ve bu bölgelere ait rotor konumunun bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle, ARM'lerde kullanılacak dönüştürücüler iki temel özelliği karşılamalıdır.

1. ARM'de her faz diğerinden bağımsız olarak iletime geçmelidir.
2. ARM motor olarak çalışırken, generatör çalışma bölgesine geçmemelidir.

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

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

ARM'lerde kullanılan dönüştürücü devrelerini kullanılan anahtar sayısına göre sınıflandırabiliriz[12]. Şekil 2.8'de bu sınıflandırma gösterilmektedir.

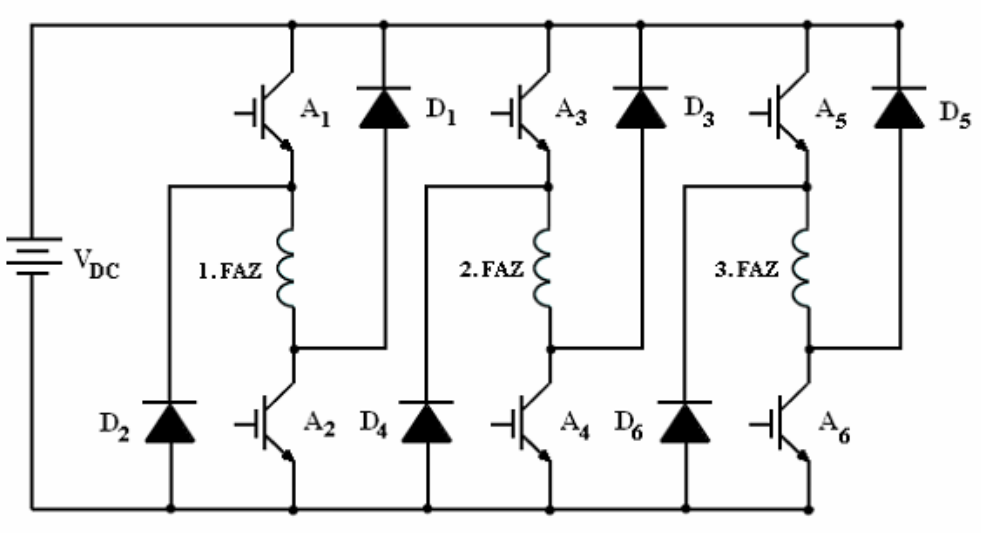


Şekil 2.8: ARM'lerde kullanılan dönüştürücülerin anahtar sayısına göre sınıflandırılması

2.6.1. Klasik Köprü Tipi Dönüştürücü Devresi

Bu dönüştürücüde stator faz sayısının iki katı kadar güç diyotu ve güç anahtarı kullanılmaktadır. Fazlar birbiriyle bağımsız olduğu için her fazın ayrı kontrol edilebilmesi mümkün olmaktadır. Bu özellikleriyle ARM sürücüleri AA eviricilerinden farklıdırlar. Çünkü AA eviricilerinde faz sargıları invertör ayaklarının ortasından beslenmektedir. ARM dönüştürücülerinde ise sargılar güç anahtarları ile seri bağlıdır. AA eviricilerde sargıların alt ve üst uçlarındaki anahtarların aynı anda açılmasından sakınılmalıdır. Aksi takdirde DA kaynak kısa devre olmaktadır. Bu

durumu önlemek için ilave denetim devreleri eklemek gerekmektedir. ARM denetiminde böyle bir duruma gerek yoktur. Şekil 2.9'da klasik köprü tipi dönüştürücü devresi gösterilmiştir.



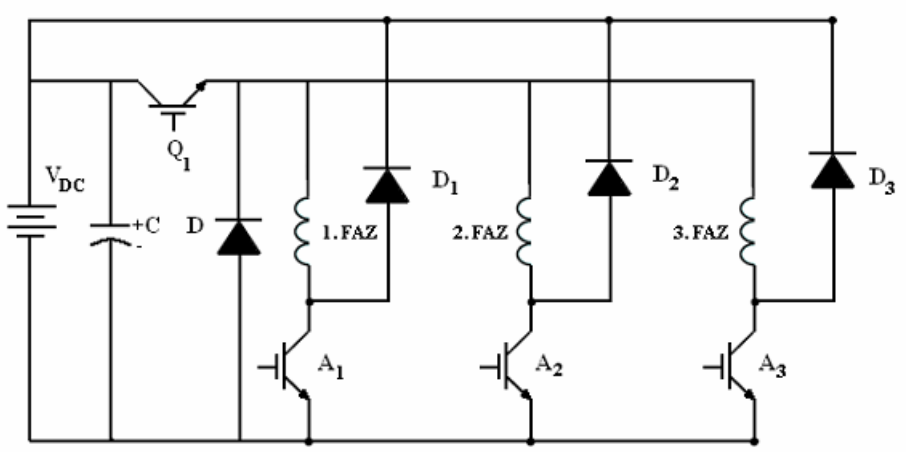
Şekil 2.9: Üç fazlı bir arm için klasik köprü tipi dönüştürücü devresi

Sargıların alt ve üst kısımlarındaki güç anahtarları her iletim periyodu ve moment vuruşu başlangıcında birlikte iletime geçirilmekte ve komütasyon noktası ise birlikte kesime geçirilmektedir. Kontrol stratejisinin tipine göre anahtarlardan biri veya her ikisi birden kıyma işlemi yapabilirler. Kıyma işlemi, akımın belirtilen denetim bandı içerisinde kalması sağlanmaktadır. Bu çalışma modu motorun zıt emk'sının kaynak voltajına göre küçük olduğu düşük hızlarda kullanılmaktadır. Yüksek hızlarda ise her iki anahtar da iletimde olmakta ve böylece akımın dalga şekli hız ve momente bağlı olarak doğal halini almaktadır. Bir iletim periyodu sonunda her iki anahtar da birden kesime geldiğinde, sargıda depo edilen manyetik enerji hızlı diyotlar üzerinden kaynağa döndürülmektedir. Diyotlar ileri yönlü kutuplandırıldığı zaman, sargı uçlarına kaynak voltajı ters uygulanmış olacaktır. Enerji kesildiğinde ise sargıdaki polarite ters yönlü olmaktadır.

2.6.2. ARM'lerde Kullanılan Diğer Dönüştürücü Devreleri

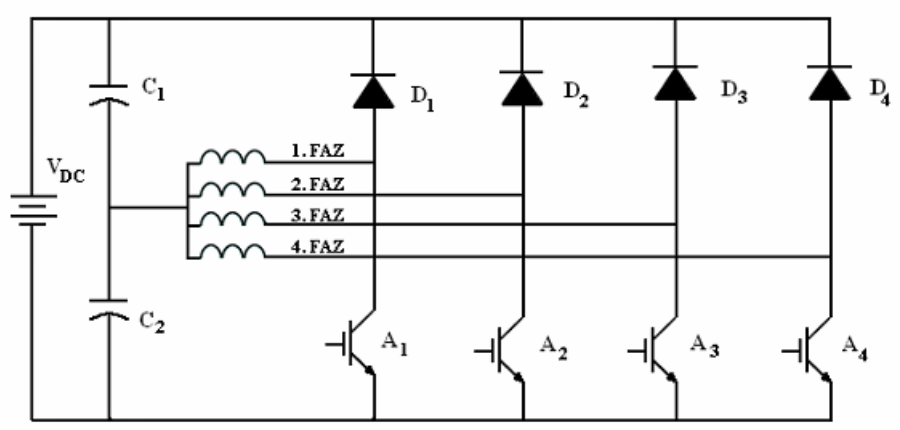
Düşük hızlı sürücülerde bütünün hız aralığı boyunca darbe genişlik modülasyonu denetim kullanılmaktadır. Bu denetim için yapılan araştırmalar sonucu faz sayısının

bir fazlası anahtar kullanılmış ve dönüştürücü devresi Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Dönüştürücü devresinde fazlara bağlı anahtarlar iletim durumunda iken kıyma işlemi Q1 anahtarı tarafından yapılmaktadır. Bu devrenin temel dezavantajı yüksek hızlarda fazlar arasında üst üste binmenin meydana gelmesidir. Yüksek hızlarda sargılar diyotlar üzerinden yeteri kadar hızlı deşarj olamamaktadırlar. Çünkü denetim anahtarı iletim pozisyonunda uzun bir süre kalmaktadır[12]. Faz sayısı + 1 dönüştürücü devresi genellikle momentteki vuruntuların önemli olmadığı durumlarda, yüksek gerilim uygulamalarında ve performansın önemli olmadığı sistemler için uygundur[13].



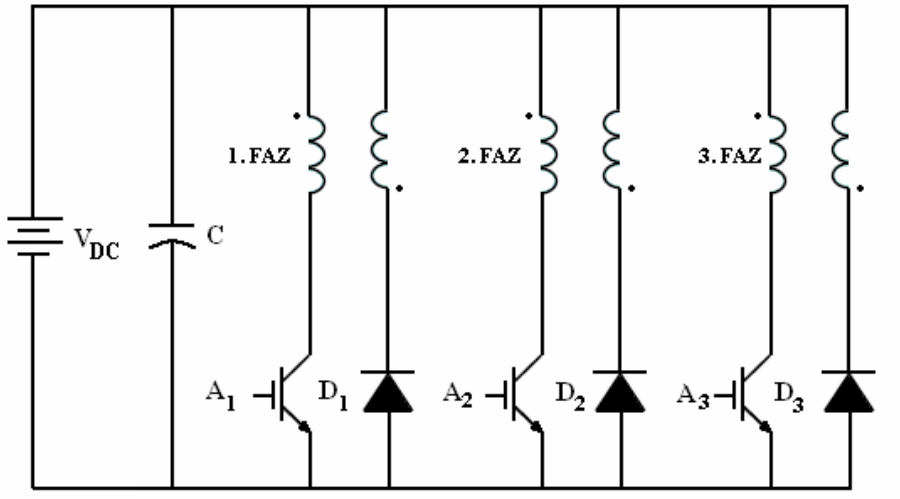
Şekil 2.10: Faz sayısı + 1 dönüştürücü devresi

Tek kutuplu sürme devresi kullanmanın bütün avantajlarından faydalanmak için anahtar sayısını faz sayısına indirmeye yönelik başka devreler de geliştirilmiştir. Ancak eleman sayısı faz başına indirildiğinde fazladan pasif elemanlar gerekmekte yada kontrol sınırlamalarından dolayı bazı problemler ortaya çıkmaktadır[14]. Şekil 2.11' de split DA link devresi gösterilmiştir.



Şekil 2.11: Split DA link dönüştürücü devresi

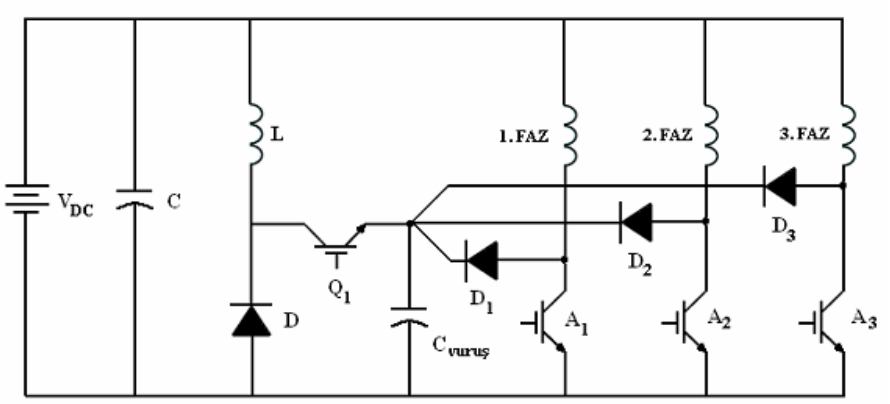
Bunun yanında yine faz başına tek bir anahtarlama elemanının yeterli olduğu bifilar (çift tel) sargılı çevirici devrelerinde, bifilar sargı bağlantı sayısını ikiye katlamakta ve bakırın verimsiz biçimde kullanılmasına neden olmaktadır. Ayrıca, sargılar arasında eşit olmayan etkileşimden doğan gerilim sıçramaları sebebiyle problemler ortaya çıkabilmektedir. Şekil 2.12' de sözü edilen bifilar sargılı çevirici devresi gösterilmiştir.



Şekil 2.12: Üç fazlı ARM için bifilar sargılı dönüştürücü devresi

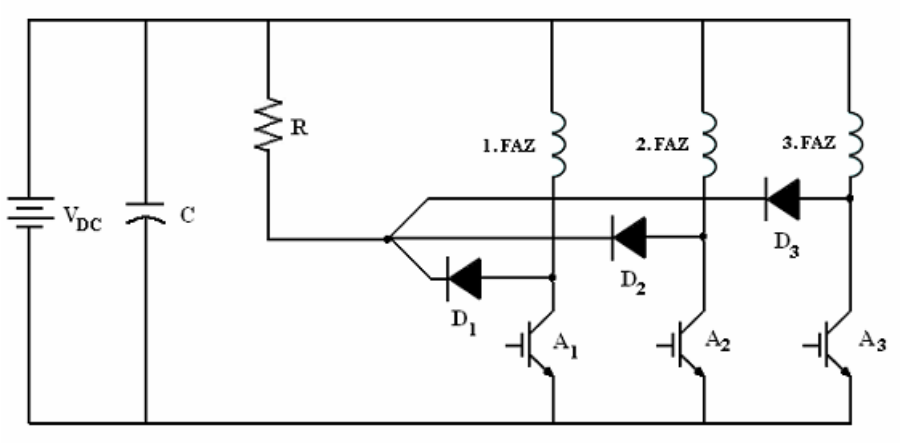
Şekil 2.13' de gösterilen C-Dump çevirici devresinde, depolanmış enerjiyi boşaltma kondansatörü C' den kaynağa step-down (azaltıcı) kıyıcı devresi ile iletecek eleman

dahil eleman sayısı n+1 olmaktadır. Ortalama kondansatör gerilimi, komütasyondan sonra hızlı boşalmaya izin vermek için kaynak geriliminden yüksek tutulmaktadır. Bu devrenin verimi yüksek olmasına karşın, kontrolü karmaşıktır ve ilave elemanlar gerektirir. Enerji deşarj devresindeki bir kontrol hatası boşalma kondansatöründe hızlı bir şarj oluşumuna yol açmakta ve eğer koruyucu tedbirler alınmaz ise bütün çevirici devre elemanları yüksek gerilime maruz kalıp zarar görebilmektedir.



Şekil 2.13: Üç fazlı ARM için C-Dump dönüştürücü devresi

Çevirici düzenekleri içerisinde en ekonomik olan devre söndürme dirençli çevirici devresidir. Bu devre düşük performans ve maliyet istenilen uygulamalar için iyi bir seçenek olup kontrol edilmesi de oldukça basittir. Bu çeviricide her bir faz için bir diyot ve bir anahtar yeterlidir. Depolanan enerji serbest dönüşüm esnasında R direnci üzerinde harcanmaktadır. Şekil 2.14' de üç fazlı bir sistem için söndürme dirençli çevirici devresi gösterilmiştir. Bu şekilde gösterilen söndürme dirençli çevirici devresinde R direncinin değeri büyük önem arz etmektedir. Direncin küçük değerde olması durumunda, hız yüksek iken bozucu moment üretimine sebep olur ve dolayısıyla da verim düşer. Direncin büyük değerli olması durumunda ise komütasyondaki faza bağlı anahtarda yarı iletken elemanlar için tehlikeli olan büyük değerlikli gerilim sıçramaları oluşur.



Şekil 2.14: Üç fazlı ARM için söndürme dirençli dönüştürücü devresi

2.7. Dönüştürücü Devrelerin Avantaj ve Dezavantajları

Anahtarlamalı relüktans motorlar yapıları sebebiyle diğer motorlar ile karşılaştırıldığında kendilerine ait çevirici devrelerine de birtakım avantajlar kazandırmaktadır. Bu avantajlardan bir kısmını şöyle sıralamak mümkündür:

- Dört bölgeli çalışma için ARM'lerde akımın çift yönlü olmasına gerek olmadığından çoğu çevirici topolojisinde ARM'nin uygun olarak çalıştırılabilmesinde her bir faz için ikiden daha az anahtara gereksinim vardır.
- Güç anahtarları faz sargılarına seri bağlı olduklarından ve her biri DC kaynağa paralel olduğundan shoot-through hatası oluşmaz.
- Herhangi bir anahtarın gerektiği gibi çalışmaması durumunda ARM'nin çalışması aksamaz.
- Güç anahtarlarının sayılarının azaltılabilmesi vasıtasıyla ihtiyaç duyulan lojik devre ve bunlara ait güç kaynakları ile kapı sürücülerinin de sayısı azalacak ve dolayısıyla da çevirici hacmi ve maliyeti azalacaktır.

Sayılan bu avantajları yanında, ARM çeviricilerinin sahip olduğu dezavantajların başında her bir anahtar elemanı için ayrı bir serbest geri dönüşüm diyotuna gereksinim duyulması yer almaktadır. Bu durum tüm çevirici topolojileri için geçerlidir ve dolayısıyla da bu durum çeviricilere ait maliyeti artırmaktadır [1].

3. KLASİK ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUNUN ANALİZİ

Bu bölümde ilk olarak elektrik makinelerinde manyetik alan dağılımının ve manyetik alana ilişkin büyüklüklerin belirlenmesinde en fazla tercih edilen sonlu elemanlar yöntemi hakkında bilgi verildikten sonra iki boyutlu analiz yapabilen Maxwell 2D programı ile üç fazlı 6/4 kutuplu bir anahtarlı relüktans motorunun analizi ve elde edilen sonuçlarına yer verilmektedir.

3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)

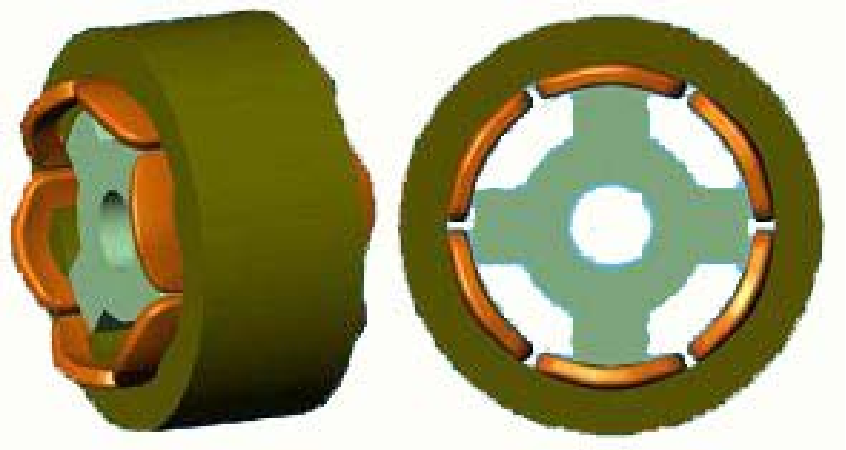
Sanayinin ve günlük hayatımızın vazgeçilmez parçalarından olan transformatör, motor, generatör gibi elektrik makinelerinde manyetik alana ilişkin büyüklüklerin belirlenmesi ve manyetik alan dağılımının için birçok zorluk ve yetersizliği bulunan analog yöntemlerin yerine sayısal yöntemler tercih edilmektedir. Manyetik alan problemlerinin çözümünde farklı sayısal yöntemlerden bahsetmek mümkündür. Sonlu Farklar Yöntemi, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Monte Carlo Yöntemi, Sınır Elemanları Yöntemi ve Yük Benzetim Yöntemi bunlardan bazılarıdır. Bu sayısal yöntemlerin en fazla kullanılanlarından birisi de Sonlu Elemanlar Yöntemidir (SEY). Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak makinenin analizi gerçekleştirilmektedir.

Elektrik makinelerinin tasarım ve üretim aşamasında prototiplerin üretim maliyeti ve prototiplerin hazırlanması için harcanan zaman kaybı teknolojinin gelişimi açısından önemli bir sıkıntı olarak karşımıza çıkmaktadır. SEY ile bir kez oluşturulan model üzeride parametrelerin değiştirilmesi sonucunda farklı durumlar için modelin davranışı ve karakteristikleri kolayca elde edilebilir. Bu şekilde farklı parametreler için ayrı prototiplerin oluşturulması gerekmemektedir. Bu durum tasarım ve geliştirme maliyetlerinin azalmasına büyük ölçüde yardımcı olmaktadır.

Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) gibi sayısal yöntemlerin makineleri analizinde kullanılması sırasında karşılaşılan en önemli dezavantajı yüksek miktarda bilgisayar işlem gücüne ihtiyaç duymasıdır. Son yıllarda bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler ile bu durum dezavantaj olmaktan çıkmış ve SEY daha fazla uygulama sahası bulmuştur.

3.2. Klasik ARM'nin Manyetostatik Analizi

Bu çalışmada 6/4 kısa kutup adımlı sargı yapısına sahip anahtarlamalı relüktans motorunun tüm çalışma karakteristikleri sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile elde edilmektedir. Şekil 3.1'de kısa kutup adımlı sargı yapısına sahip anahtarlamalı relüktans motorun 3 boyutlu görüntüsü bulunmaktadır.



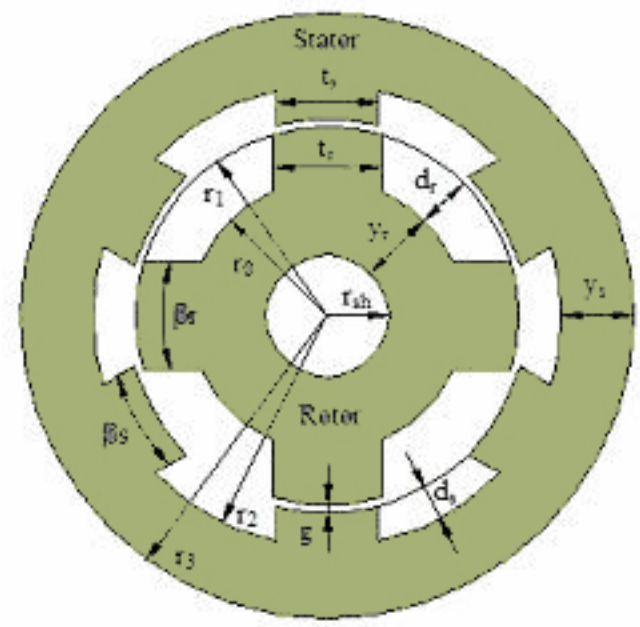
Şekil 3.1: 6/4 kısa kutup adımlı sargı yapısına sahip ARM

Manyetostatik çözüm yapan Maxwell 2D sonlu elemanlar analiz programı ile ARM'nun çalışma karakteristikleri hem doymuş hem de doğrusal bölgeler için tespit edilmektedir. Maxwell 2D programı doğrudan sargının halkaladığı akıyı hesaplayabilmektedir. Çalışmada, 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) kısa kutup adımlı ARM için (0^o…45^o) aralığında 5^o adımlarla 10 adet rotor konumu ve (l5A...255A) aralığında 15A'lik adımlarla 17 adet akım değeri için toplam 170 adet farklı hesaplama ile motora ilişkin $\psi(i,\theta)$ değişimi belirlenmektedir. Maxwell 2D programı ile yapılan analizler adında anlaşılacağı üzere 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[2,15]

3.3. Analizi yapılan ARM'nin yapısal özellikleri

Çalışmada kullanılan üç fazlı 6/4 kısa kutup adımlı sargı yapısına sahip klasik ARM'una ait motorun kesit görünüşü Şekil 3.2'de gösterilmektedir[16].



Şekil 3.2: Üç fazlı 6/4 kısa kutup adımlı ARM kesiti

Çalışmada kullanılan üç fazlı 6/4 kısa kutup adımlı sargı yapısına sahip klasik ARM'una ait boyut değerleri Tablo 3.1' de verilmiştir. SI birim sitemi kullanılmış ve değerler buna göre verilmiştir.

Tablo 3.1: Klasik anahtarlamalı motor boyut değerleri

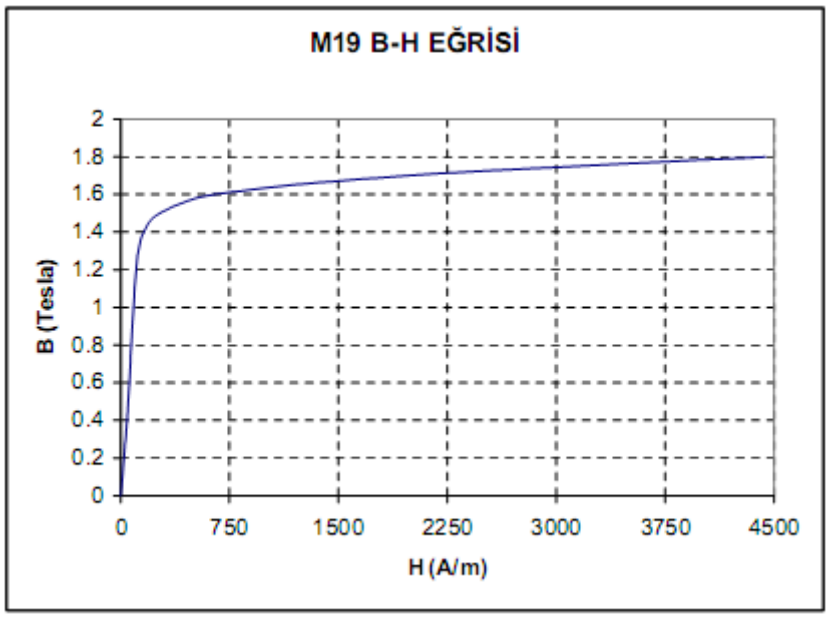
Parametrenin Adı	**Sembolü**	**Değeri**
Stator kutup yüksekliği	d_s	0,0265
Rotor kutup yüksekliği	d_r	0,0447
Motor derinliği	m_d	0,2981
Hava aralığı	g	0,0020
Stator kutup genişliği	t_s	0,07816
Rotor kutup genişliği	t_r	0,08214
Stator kutup sayısı	N_s	6
Rotor kutup sayısı	N_r	4
Stator boyunduruk kalınlığı	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	βs	30
Rotor kutup açısı	βr	32

Üç fazlı 6/4 kısa kutup adımlı ARM'na ait plaka değerleri Tablo 3.2'de verilmektedir.

Tablo 3.2: Klasik anahtarlamalı relüktans motoru 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	n_{nom}	1200 rpm
Maksimum hız	n_{max}	6000 rpm

Üç fazlı 6/4 kısa kutup adımlı ARM'nun modeli oluşturulurken rotor ve stator gövdesi doymuş saç malzemeden (M19) yapılmış olup malzemenin B-H eğrisi Şekil 3.3'de gösterilmektedir. Eğri incelendiğinde malzemenin lineer olmayan karakteristiğe sahip olduğu görülmektedir. Analiz sonuçlarının sağlı bir şekilde elde edilebilmesi için malzeme karakteristiğin modelin oluşturulması aşamasında hatasız olarak tanımlanması önem arz etmektedir.



Şekil 3.3: Motorun stator ve rotorun kullanılan malzeme için B-H eğrisi

3.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modelin Oluşturulması

Bu kısımda, modelin sonlu elemanlar yöntemini kullanan Maxwell 2D programında oluşturulmasına ait aşamalar adım adım incelenmiştir.

3.4.1. Motora Ait Geometrinin Oluşturulması

Bu aşamada, Tablo 2.1'de verilen motorun geometrik verilerine ait iki boyutlu çizim yapılmaktadır. Çizim, analiz için kullanılan Maxwell 2D programında yapılabileceği gibi, herhangi bir CAD programında da çizilerek Maxwell 2D programına transfer edilebilir. Modelin çizim aşamasında, Maxwell 2D programının tam anlamı ile çizim programı olmadığı buna karşın CAD programlarının çizim sırasında kullanıcıya daha fazla özellik sunarak esneklik tanıdığı gerçeğinden hareketle ikinci yöntemi

kullanmanın daha uygun olacağı düşünülmüştür. Ancak bu noktada transfer işlemi sırasındaki toleranslara dikkat edilmesi gerektiği unutulmamalıdır.

3.4.2. Kullanılan Malzemenin Tanımı

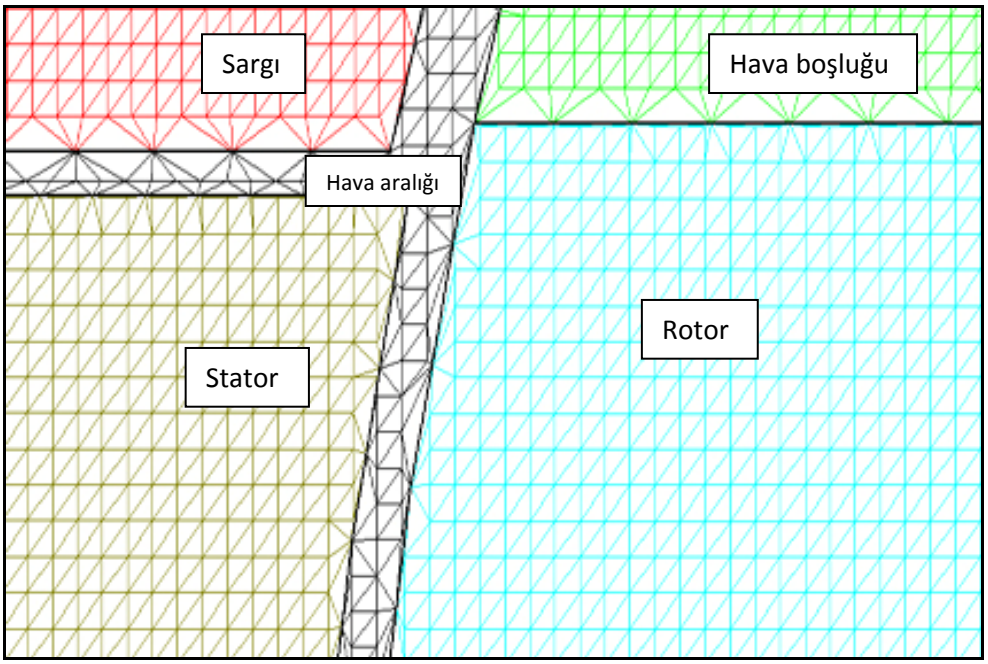
Günümüzde bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile bilgisayar ortamda yapılan deneyler ve analizler üretim maliyetinin azalmasında önemli bir etkendir. Ancak bilgisayar ortamında yapılan deneyler ile analizlerin pratik olarak yapılan deneylerle elde edilen sonuçlarla uyumlu olabilmesi için bilgisayar ortamında modelde kullanılan malzeme özelliklerinin çok iyi bir şekilde tanımlanmasını gerektirmektedir. Motorun modellenmesi sırasında kullanılan, demirin mıknatıslanma eğrisi, bakır ve alüminyumun iletkenliği gibi doğrusal karakteristiğe sahip özellikleri tanımlamak oldukça basittir. Fakat doğrusal olmayan karakteristikteki malzemeyi tanımlamak oldukça güçtür[17].

ARM'nin modellenmesi sırasında rotor ve statorunda kullanılan saç malzemenin mıknatıslanma eğrisi doğrusal değildir. Şekil 3.3'de sunulan manyetik doyma özelliğine sahip olan eğrinin yapısına uygun olarak, yapılan çalışmada hem doğrusal hem de doğrusal olmayan bölgelere ait değerler alınmaktadır.

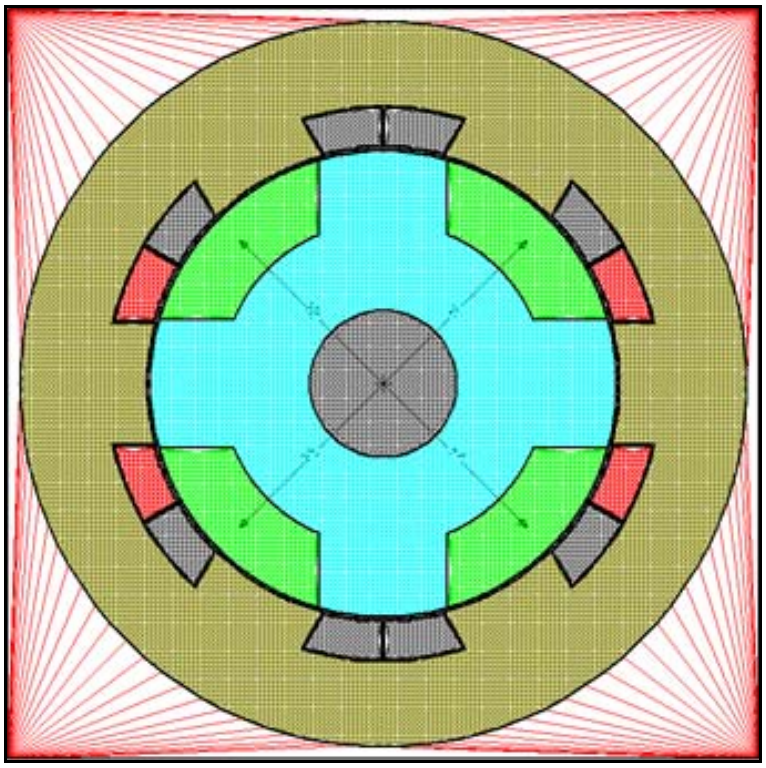
3.4.3. Modelin Oluşturulması

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılacak olan analiz için kullanılan Maxwell 2D programında modelin oluşturulması 6 aşamada gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada motorun geometrisi programa ait 2D çizim modülünde ya da uygun bir CAD programında çizilerek analiz programına aktarılmaktadır. Ayrıca bu safha, modelin analizinde kullanılması istenen değişkenlerin de tanımlandığı aşamadır. İkinci aşamada geometri üzerinde kullanılan malzemelerin tanımlanması gerekmektedir. Daha önce bahsedildiği üzere deneysel verilerle analiz sonuçlarının tutarlı olabilmesi için bu aşmada yapılan malzeme tanımı büyük önem arz etmektedir. Üçüncü aşamada sınır koşulları ve akım kaynakları çizim üzerinde tanımlanmaktadır. Dördüncü aşamada moment akı, endüktans, vb çözümü istenen parametreler belirlenmektedir. Beşinci aşamada, daha önce tanımlanan değişkenlerin alacağı değerler belirlenir. Altıncı ve son aşama ise modelin nominal durum yada

değişkenlere göre çözümünün yapıldığı son safhadır. Ayrıca ARM'un modellenmesi sırasında analizin gerçeğe en yakın sonuçlar üretebilmesi için akı çizgilerinin yoğun olduğu bölgelerin çok iyi modellenmesi gerektiği unutulmamalıdır. Bu nedenle stator ve rotor arasında kalan hava aralığı bölgesi için modelleme elemanların hassasiyeti uygun şekilde arttırılmıştır. Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'de ARM'nun sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiş hali görülmektedir.



Şekil 3.4: Stator, rotor, sargı, hava aralığı ve hava boşluğunda kullanılan elemanlar



Şekil 3.5: ARM'un sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiş hali

3.4.4. Sonuçların Değerlendirilmesi

Sonlu elemanlar yöntemini kullanan manyetik analiz programları, her düğümde manyetik vektör potansiyelini çözümlemektedir. Sonuçlar, elde edilen çözümlerin bir ara birim vasıtası ile değerlendirilmesi sonrasında ortaya çıkar. Manyetik alan çözümlerinden genel olarak, endüktans, direnç, kayıplar, kuvvet, moment, akı vb. büyüklükleri hesaplamak mümkündür. Bunların dışında model üzerinde, akı çizgileri, akı yoğunlukları, manyetik alan şiddeti, vb. gibi dağılımlarda bir ara birim vasıtası ile görülebilmektedir.

3.4.5. SEY ile ARM'nun Çalışma Karakteristiklerinin Elde Edilmesi

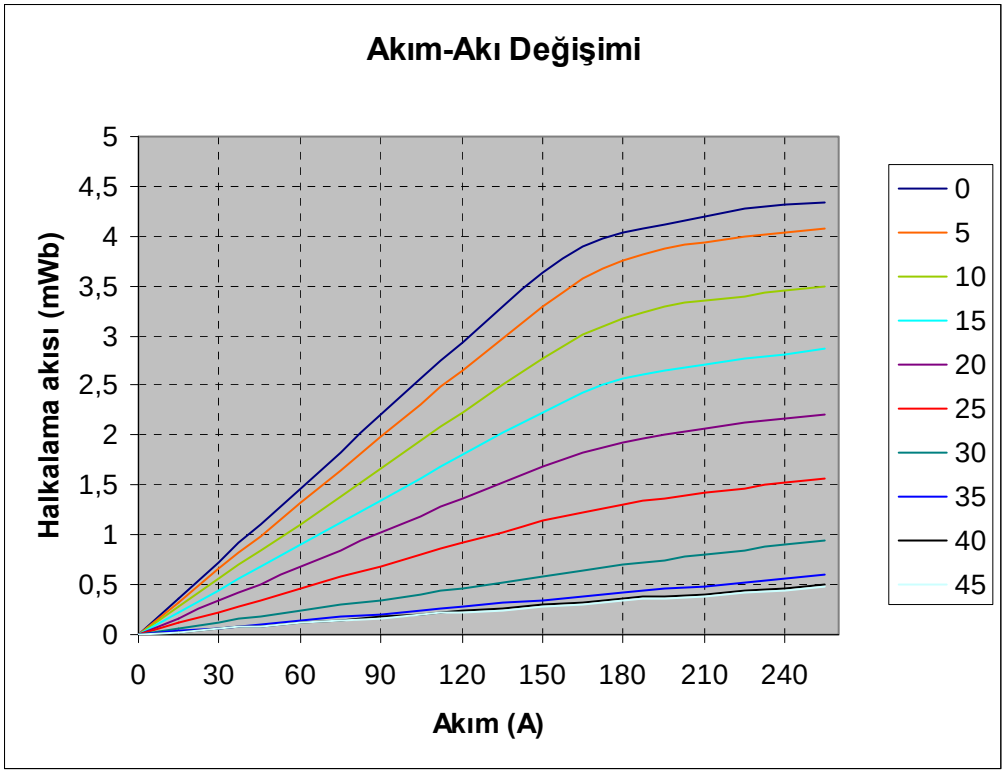
SEY'i kullanan Maxwell 2D programı ile ARM'nun çalışma eğrilerini hem doğrusal olan hem de doğrusal olmayan bölge için çıkartmak amacı ile anma akımının altında ve üstünde olan değerler belirlenmiştir. Bu amaçla, klasik ARM'nin çalışma karakteristiklerinin belirlenmesi için analizde (0^o…45^o) aralığında 5'er derecelik adımlarla 10 adet rotor konumu ve (l5A...255A) aralığında 15 A'lik adımlarla 17

adet akım değeri için toplam 170 adet farklı hesaplama yapılmıştır. Böylece her iki bölgenin de özellikleri ortaya koyulabilecektir. Bu kısımda, çalışma karakteristiklerinden akı, moment ve endüktans eğrileri sırasıyla incelenecektir.

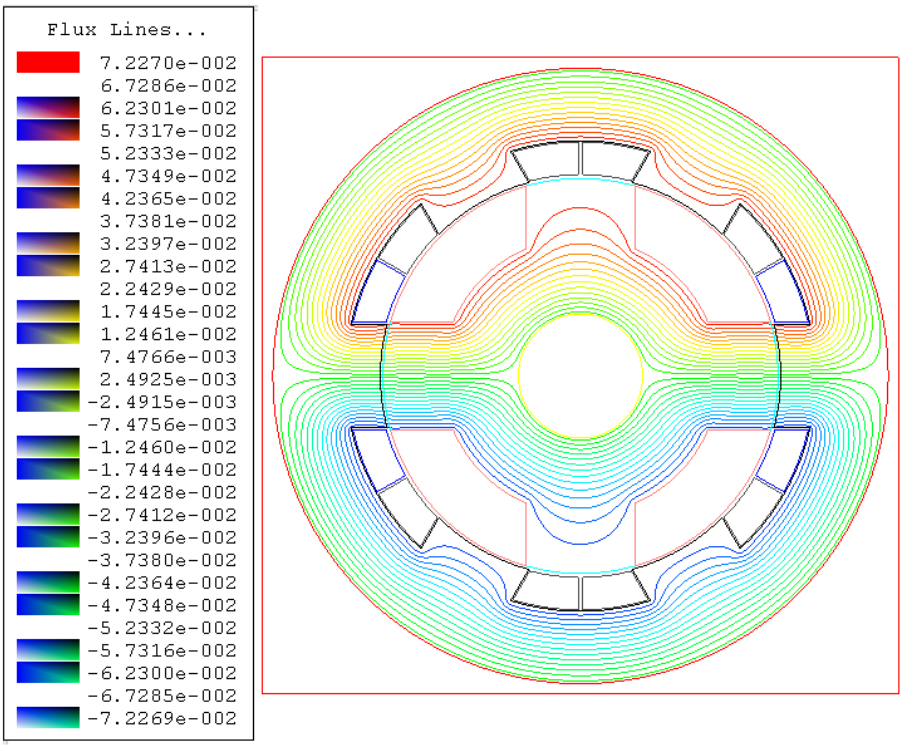
3.4.5.1. Akı Eğrileri

Şekil 3.6'da anahtarlamalı relüktans motoruna ait halkalanma akısı-akım değişimi verilmektedir. Akı eğrileri dikkatle incelendiğinde 165 A civarında doymanın başladığı görülmektedir. Bu değerin altındaki değerler doğrusal bölgeye, üstündeki değerler ise doğrusal olmayan bölgeye aittir. Akı karşılıklı konumda en büyük değerine ulaşmaktadır.

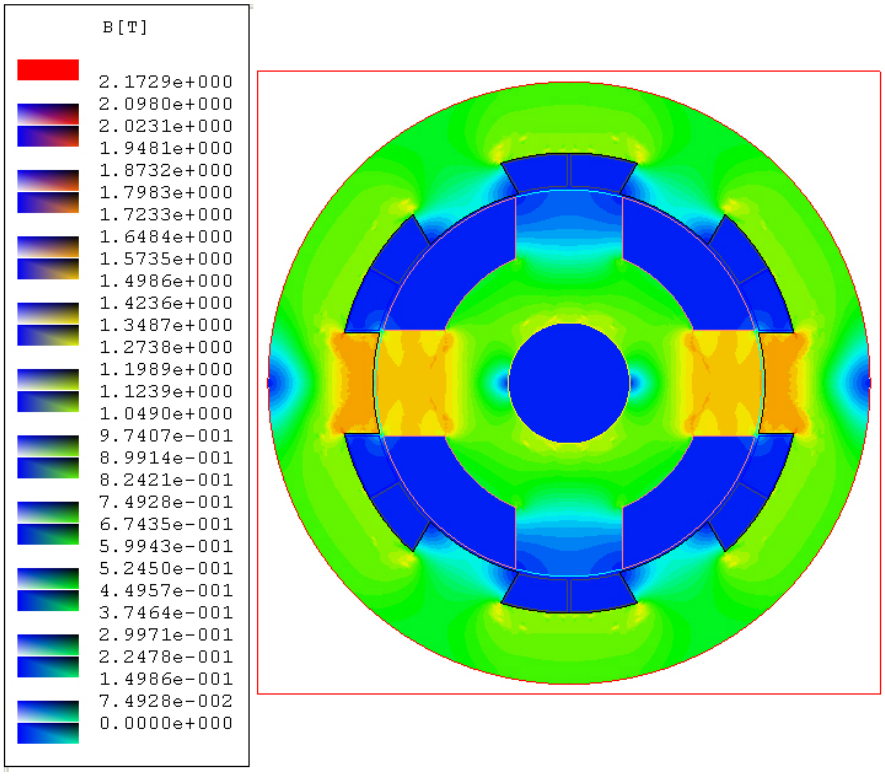
Şekil 3.7...3.9'de üç fazlı klasik ARM'nun manyetik analiz sonuçlarında örnek olarak seçilen, rotorun $\theta=0^o$, $\theta=20^o$ ve $\theta=45^o$ konumlarındaki akı çizgileri dağılımları ve akı yoğunlukları (B[T]) dağılımına yer verilmektedir.



Şekil 3.6: ARM'nun halkalanma akısı - akım eğrisi

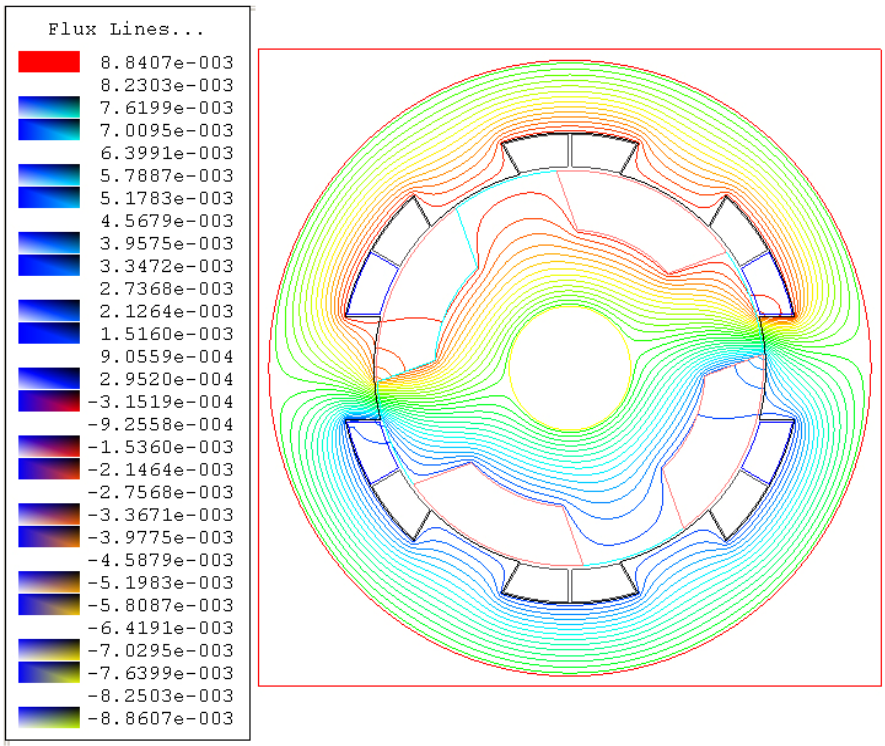


(a)

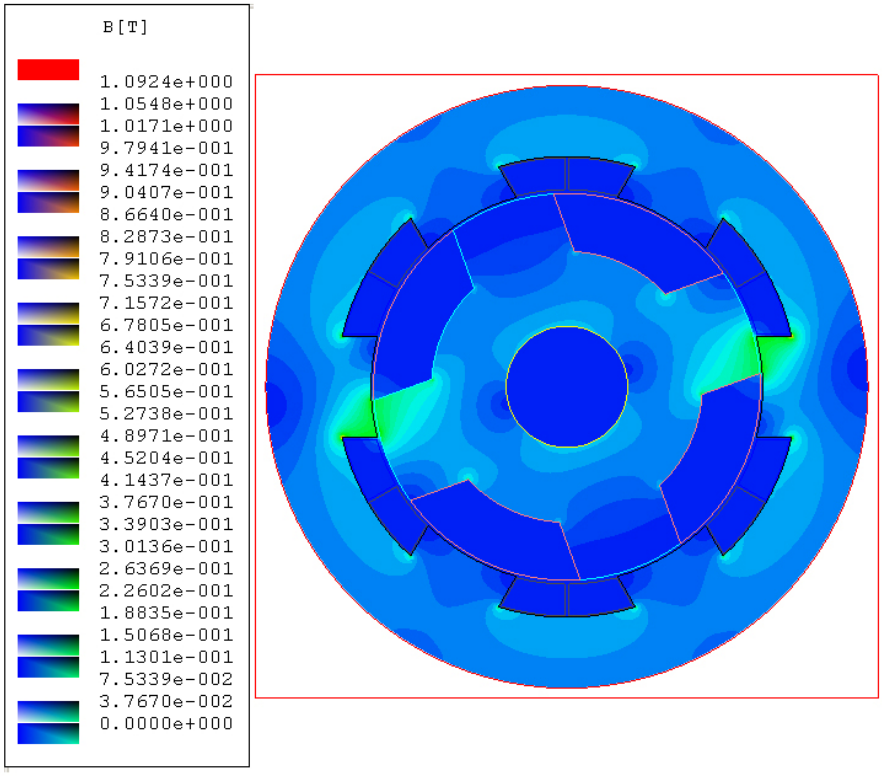


(b)

Şekil 3.7: θ=0^{o} için (a) Akı çizgileri dağılımı (wb/m) (b) Akı yoğunluğu (B[T]) dağılımı.

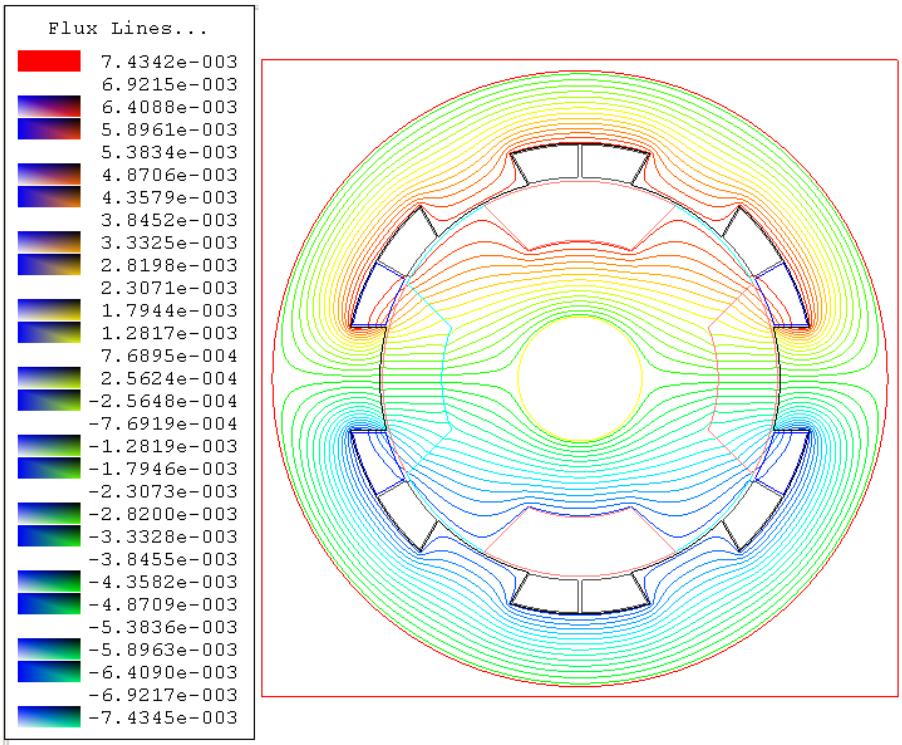


(a)

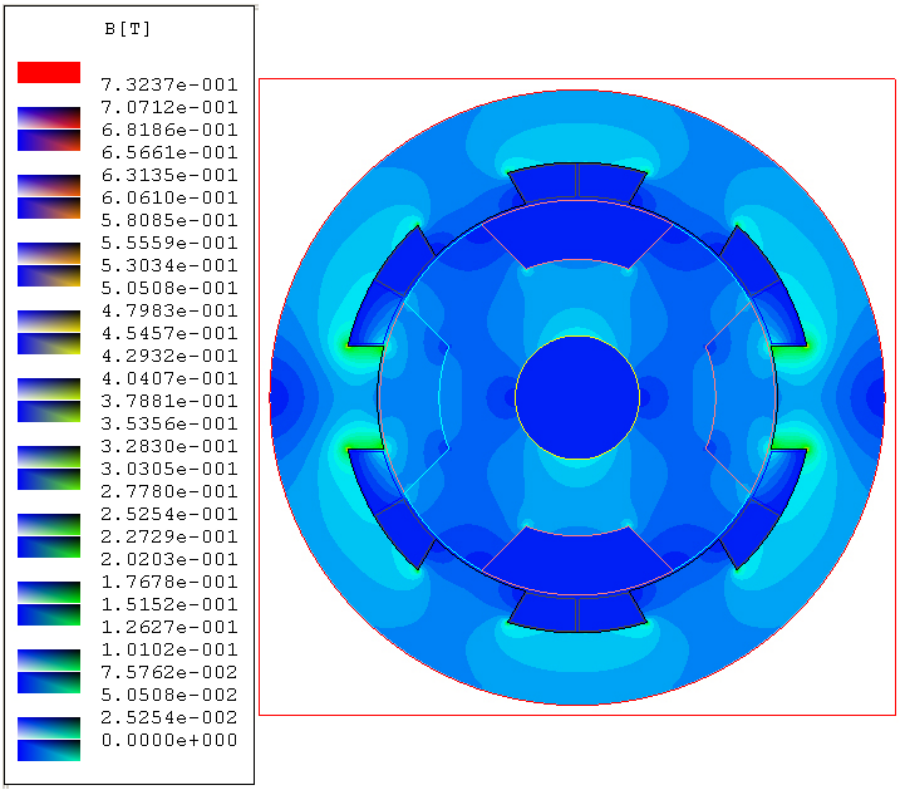


(b)

Şekil 3.8: θ=20^{o} için (a) Akı çizgileri dağılımı (wb/m) (b) Akı yoğunluğu (B[T]) dağılımı.



(a)

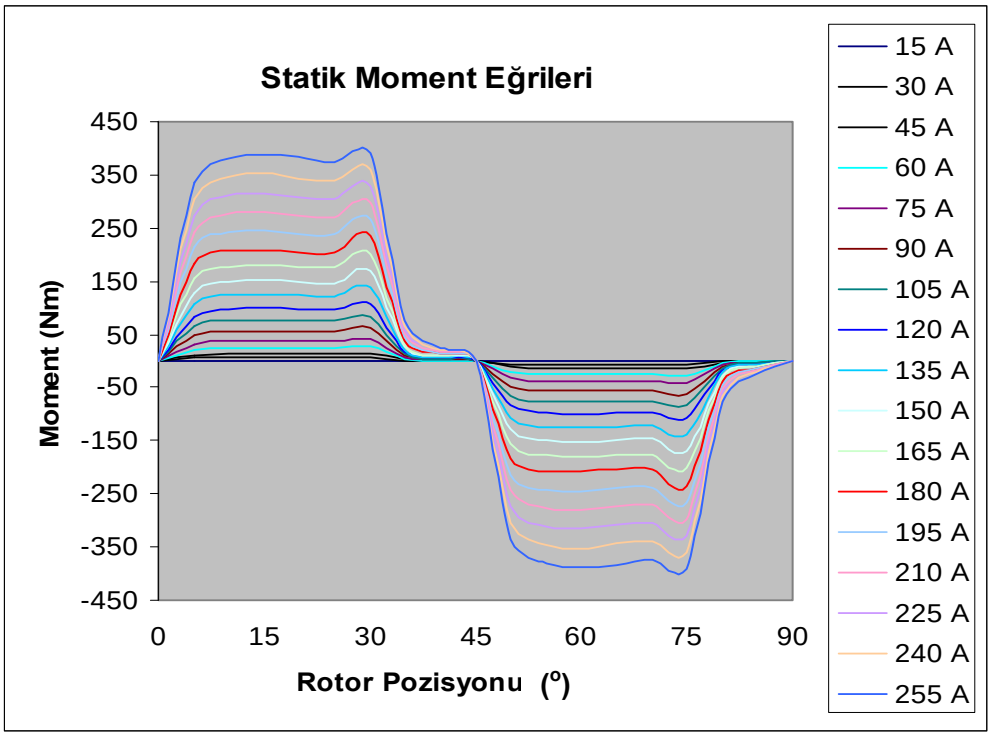


(b)

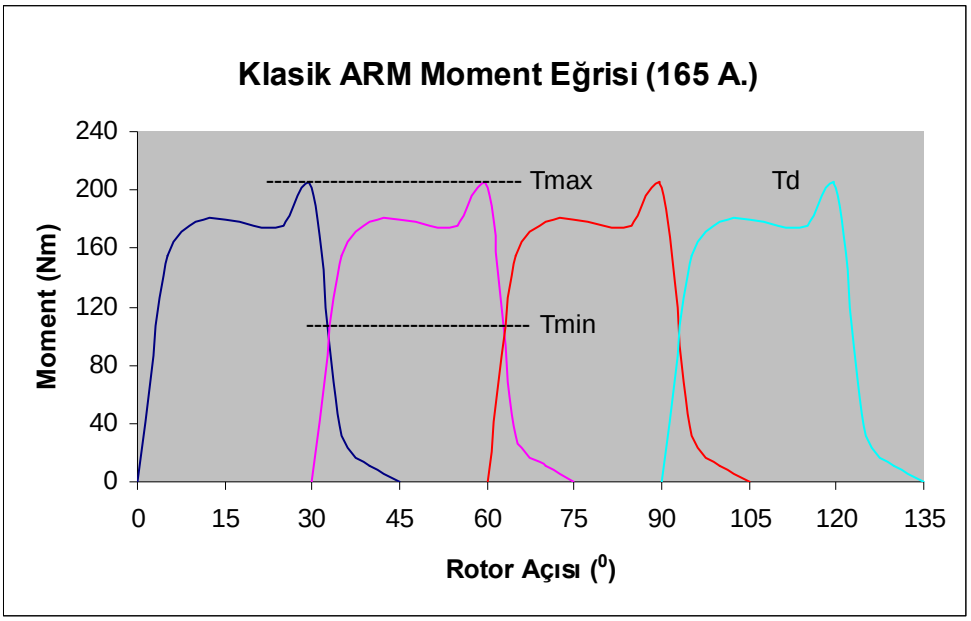
Şekil 3.9: θ=45^{o} için (a) Akı çizgileri dağılımı (wb/m) (b) Akı yoğunluğu (B[T]) dağılımı.

3.4.5.2. Moment Eğrileri

Tüm elektrik motorlarında olduğu gibi ARM'u içinde en önemli çalışma karakteristiklerinden birisi de moment eğrisidir. Doğrusal durum için moment, daha önce de belirtildiği üzere doğrusal durum için öz endüktansın rotor konumuna göre değişim oranı ile akımın karesinin fonksiyonudur. Karşıt endüktansların ihmal edilebilecek seviyede olması nedeniyle moment sadece öz endüktansın rotor konumuna göre değişim oranından elde edilmektedir. Manyetostatik analiz sonuçlarından elde edilen moment eğrileri şekil 3.10.'da verilmektedir. Moment eğrileri, makinenin (l5A...255A) aralığında 15 A'lik adımlarla 17 adet akım değeri için momentin rotor konumuna göre değişimini vermektedir.



Şekil 3.10: ARM'nun statik moment eğrileri



Şekil 3.11: Klasik ARM'nin statik moment eğrisi (165A)

Klasik ARM'un en olumsuz yönlerinden birisi manyetik doyma ve faz komitasyonu nedeniyle moment de meydana gelen çökmelerdir. ARM'ları ile ilgili yapılan gerek tasarım konulu gerekse de kontrol konulu çalışmaların birçoğunda moment eğrisindeki dalgalanmanın önlemesine yönelik fikirler sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Moment dalgalılığını hesaplamak için, eğrilerin en yüksek değeri (T_{max}) ve en küçük değeri (T_{min}) bulunur. Elde edilen bu değerle Eşitlik 3.1'de yerine yazıldığında % olarak moment dalgalılığı hesaplanmaktadır.

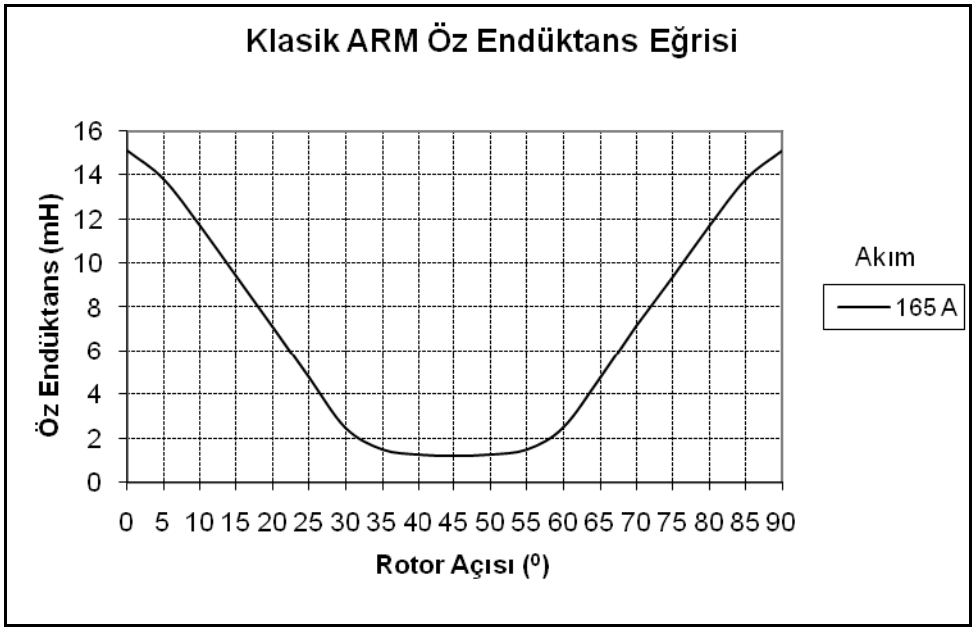
$$\%T_d = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} * 100 \qquad (3.1)$$

Analizi yapılan klasik 6/4 üç fazlı anahtarlamalı relüktans motoru için hem doğrusal hem de manyetik doymuş bölgelere ait moment eğrileri ve bu eğrilerdeki değerlere göre moment dalgalılık hesabı yapılmıştır. ARM'da analiz sonuçları incelendiğinde moment dalgalılığının özellikle doyma bölgesinde yüksek olduğu görülebilmektedir. Bu nedenle, 150A ile 240A arasındaki moment değerleri için dalgalanma oranları Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.3: 6/4 Klasik ARM moment dalgalılık oranları

Klasik ARM	
Akım (A)	$\%T_d$ (Dalgalılık oranı)
150	29,78
165	30,03
210	30,93
225	31,21
240	31,84

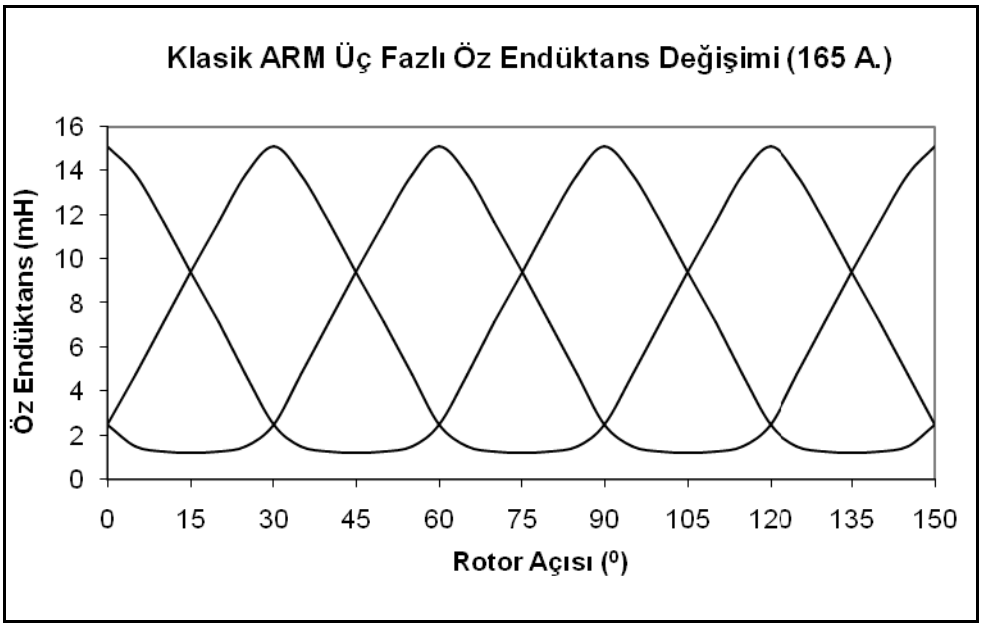
Şekil 3.12'de 6/4 klasik ARM için öz endüktans eğrisi verilmiştir. Klasik ARM'lerde endüktans eğrisinden de anlaşılabileceği gibi, ortalanmış konumda en küçük değeri alırken karşılıklı konumunda en büyük değeri almaktadır.



Şekil 3.12: 6/4 klasik ARM için öz endüktans değişimi

Pozitif moment, öz endüktans eğrisinde endüktansın 55°'den başlayan ve 90°'ye kadar süren artışın olduğu bölgede üretilmektedir. Eğer bu bölgenin bitiminde,

uyarılan fazın enerjisi kesilmez ise motor negatif moment üretir. Fazlar arasındaki 30° açı farkı Şekil 3.13 de üç fazlı öz endüktans değişim eğrisinde de görülebilmektedir. Şekil gösterildiği gibi bir fazın endüktans eğrisi en yüksek seviyede iken diğer ikisi en düşük seviyededir. Doğrusal bölgede endüktans eğrisi sabit bir akı değerine karşılık L(θ) şeklinde sadece rotor konumunun bir fonksiyonudur.



Şekil 3.13: Klasik ARM üç fazlı öz endüktans değişimi

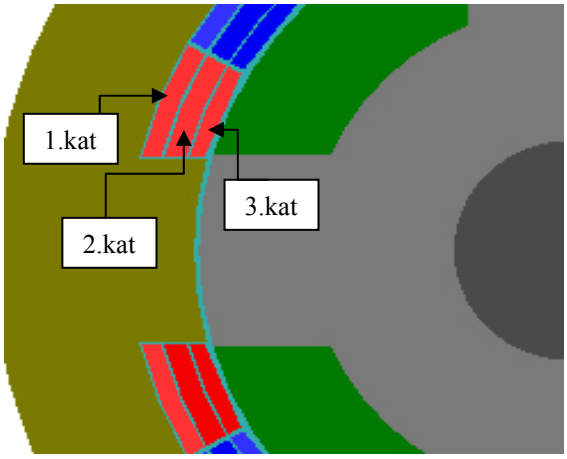
Ancak manyetik doymuş bölgede, karşıt kuplaj değeri klasik ARM'da fazlar arasındaki dekuplajdan dolayı ihmal edilecek seviyededir ve öz endüktans L=f(i,θ) şeklinde hem akımın hem de rotor konumunun fonksiyonudur[48,55].

4. KATLI SARGI YAPISINA SAHİP ARM ANALİZİ

Özellikle 1980'li yılların başından itibaren anahtarlamalı relüktans motorlarına olan ilgi ve bu motorların performansını arttırmaya yönelik çalışmalar artmıştır. Gerek kontrol devreleri üzerine gerekse motorun geometrisi ile ilgili yapılan çalışmalarda, birçok yöntem denenerek anahtarlamalı relüktans motorunun performansı iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalar motorun geometrisi ve sargı yapısı gibi yapısal çalışmalar ve sürücü devre devresi üzerinde yapılan çalışmalar olmak üzere iki grupta toplanabilir. Bu çalışmalardan daha fazla zaman ve maliyet gerektiren yapısal çalışmalar belirtilen nedenler dolayısıyla daha az yapılmaktadır.

Bilindiği üzere, anahtarlamalı relüktans ve adım motorları her faz sargısının tek bir stator kutbu 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 bölümde klasik anahtarlamalı relüktans motorun kutup sargısı aynı sarım sayısı sağlanacak şekilde üç parçaya ayrılmıştır. Sargı yapısı Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Katlı sargı yapısı

Katlı sargı yapısında katların dağılımı yapılırken ARM'nun endüktans profili ve moment profili belirleyici olmaktadır. Optimizasyon işlemi için kat sargı ve akım değerleri belirlenirken sarım sayıları için endüktans profili ve motorun hız aralığı ön plana çıkarken, sargılara uygulanacak akımlar için motorun geometrisini göz önüne alarak ilk sargı az, ikinci sargı daha çok ve üçüncü sargıdan en fazla akımın geçmesi düşünülmüştür. Bu kriterler çerçevesinde belirlenen sargı sarım sayılarının anahtarlamalı relüktans motorunun performansına etkilerini görmek amacıyla Tablo 4.1' de sargının katlara nasıl dağıtıldığı gösterilen 8 model oluşturulmuştur.

Tablo 4.1: Katlı sargı yapısı dağılımı

Model	**Sargı dağılımı**		
	1.Kat(spir)	2.Kat(spir)	3.Kat(spir)
Model 1	2	28	2
Model 2	2	26	4
Model 3	4	24	4
Model 4	12	8	12
Model 5	14	4	14
Model 6	7	4	21
Model 7	21	4	7
Model 8	10	12	10

4.1. Katlı Sargı Yapısına Sahip ARM'nun Çalışma Karakteristiklerinin Elde Edilmesi

SEY'i kullanan Maxwell 2D programı ile ARM'nun çalışma eğrilerini hem doğrusal olan hem de doğrusal olmayan bölge için çıkartmak amacı ile anma akımının altında ve üstünde olan değerler belirlenmiştir. Bu amaçla, belirtilen 7 modelin her biri için çalışma karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla analizde (0^o…45^o) aralığında 5'er derecelik adımlarla 10 adet rotor konumu ve amper sarım değeri klasik anahtarlamalı motorun amper sarım değerine yakın olacak şekilde belirlenmiş 17 adet akım değeri için toplam 170 adet farklı hesaplama yapılmıştır. Böylece her iki bölgenin de özellikleri ortaya koyulabilecektir. Bu kısımda, üç katlı sargı yapısının çalışma karakteristiklerine etkisi incelenecektir.

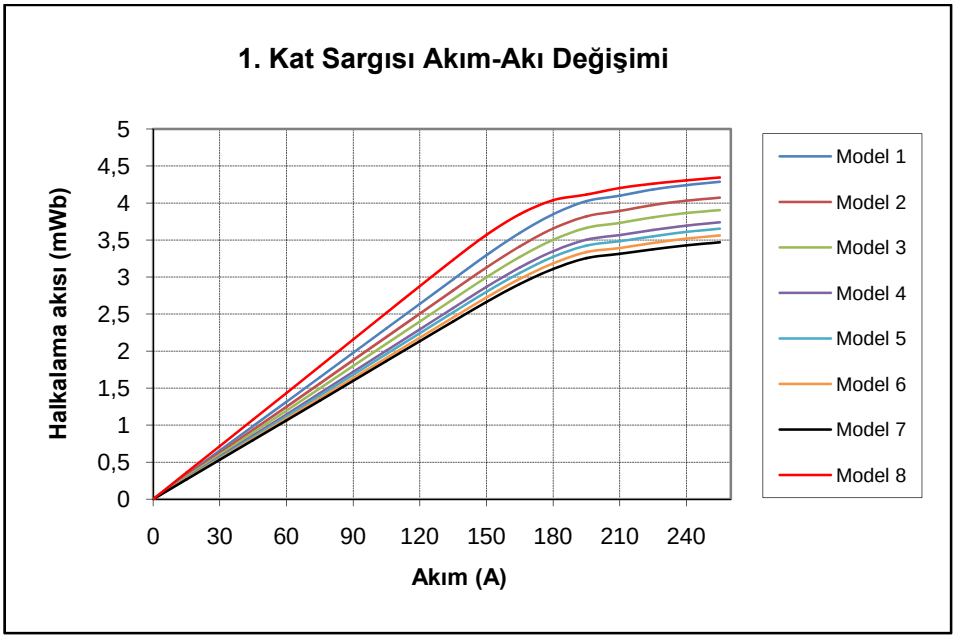
Tablo 4.2: Oluşturulan modellerde kat sargılarına uygulanan akım değerleri

Model	1. Kat		2. Kat		3. Kat		Toplam Amper-Sarım
	Sarım sayısı	Akım (A)	Sarım sayısı	Akım (A)	Sarım sayısı	Akım (A)	
Model 1	2	5	28	15	2	5	440
Model 2	2	5	26	15	4	10	440
Model 3	4	10	24	15	4	10	440
Model 4	12	15	8	10	12	15	440
Model 5	14	15	4	5	14	15	440
Model 6	7	15	4	5	21	15	440
Model 7	21	15	4	5	7	15	440
Model 8	10	15	12	15	10	15	480

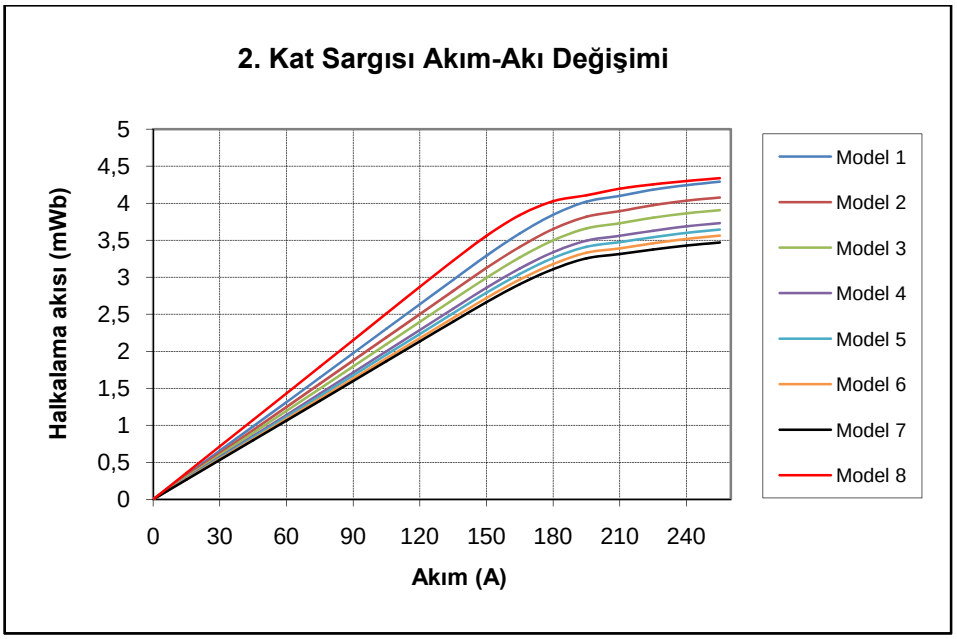
Tablo 4.2'de oluşturulan modellere analizin ilk basamağında uygulanan akım değerleri verilmektedir. Yukarıda belirtildiği gibi rotorun her bir 5 derecelik pozisyonu için sargılara Tablo 4.2'de belirtilen akım değerlerinden başlanarak bu akım değerlerinin 17 katına kadar akım uygulanmış ve analiz işlemi gerçekleştirilmiştir.

4.2. Katlı Sargı Yapısının ARM'nun Çalışma Karakteristiklerine Etkileri

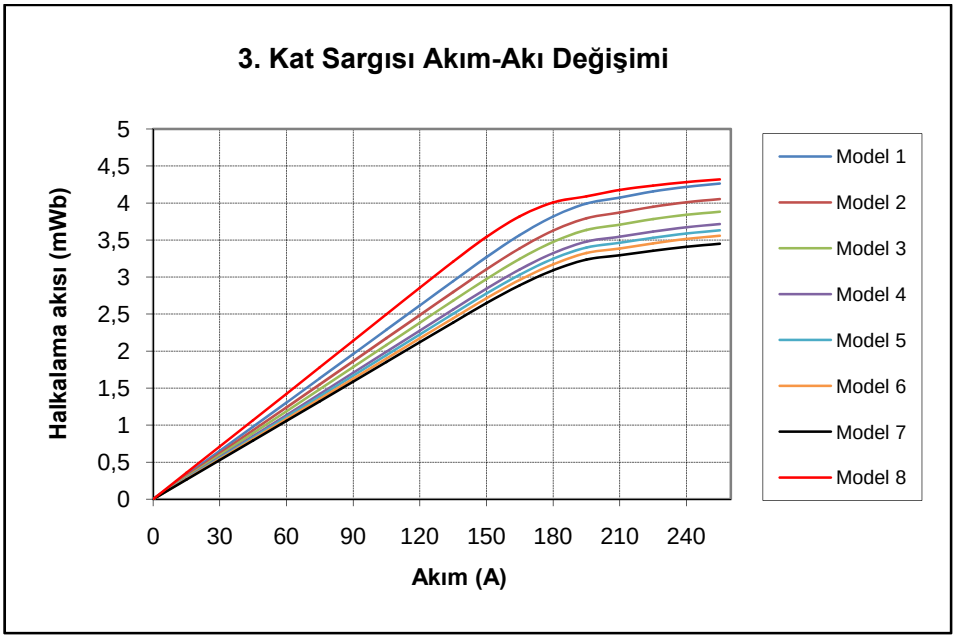
Üç katlı sargı yapısına sahip anahtarlamalı relüktans motorunda manyetik doymadan önce ve doymadan sonraki etkileri belirlemek için anma akım değerinin altında ve üstünde değerlerin alınması gerekmektedir. Bu kısımda çalışma karakteristiklerinden ilk olarak akı eğrisi her model için çizilerek karşılaştırılmaktadır. Daha sonra da üç katlı sargı yapısına sahip ARM'nun moment eğrisi incelenmektedir. Şekil 4.2…4.4'de rotorun karşılıklı (θ=0°) ve Şekil 4.5…4.7'de ortalanmış (θ=45°) konumlarında, her bir model için anahtarlamalı relüktans motoruna ait halkalanma akısı-akım değişimi verilmektedir.



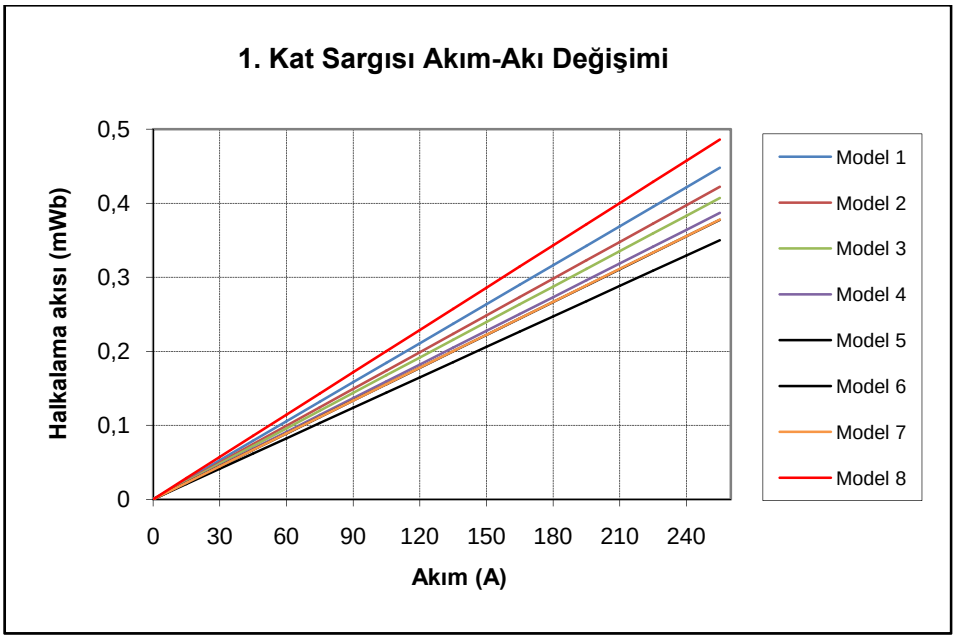
Şekil 4.2: Katlı sargı yapısına sahip ARM'larının 1. kat sargısı halkalanma akısı-akım eğrisi (θ=0°)



Şekil 4.3: Katlı sargı yapısına sahip ARM'larının 2. kat sargısı halkalanma akısı-akım eğrisi (θ=0°)



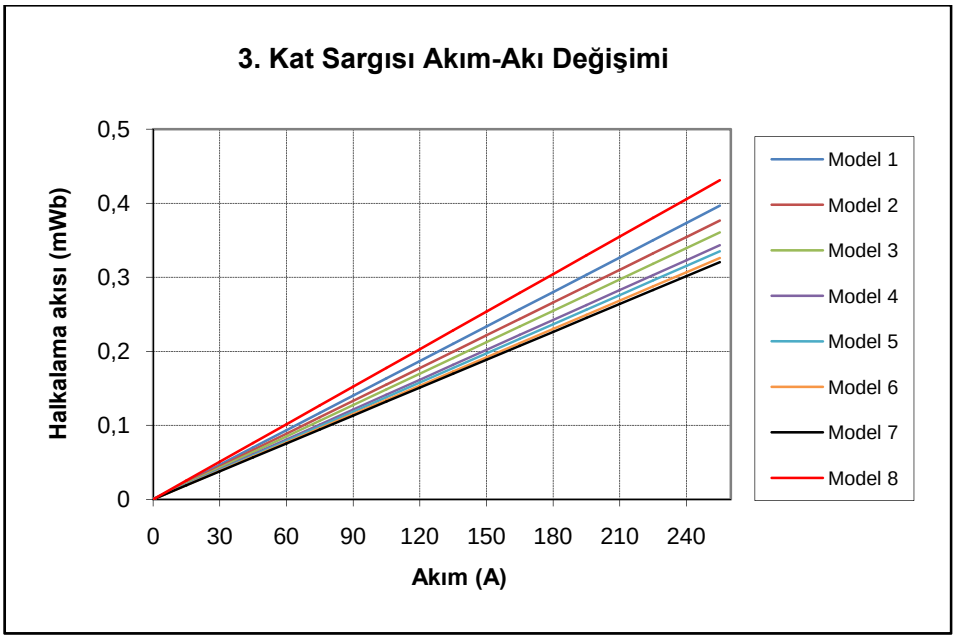
Şekil 4.4: Katlı sargı yapısına sahip ARM'larının 3. kat sargısı halkalanma akısı-akım eğrisi (θ=0°)



Şekil 4.5: Katlı sargı yapısına sahip ARM'larının 1. kat sargısı halkalanma akısı-akım eğrisi (θ=45°)



Şekil 4.6: Katlı sargı yapısına sahip ARM'larının 2. kat sargısı halkalanma akısı-akım eğrisi (θ=45°)

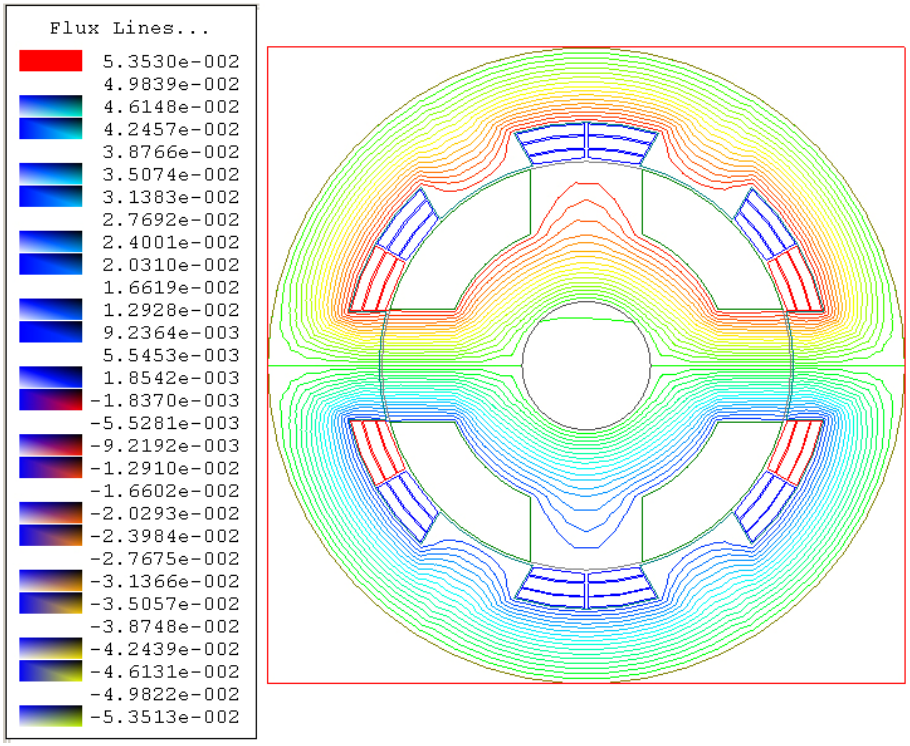


Şekil 4.7: Katlı sargı yapısına sahip ARM'larının 3. kat sargısı halkalanma akısı-akım eğrisi (θ=45°)

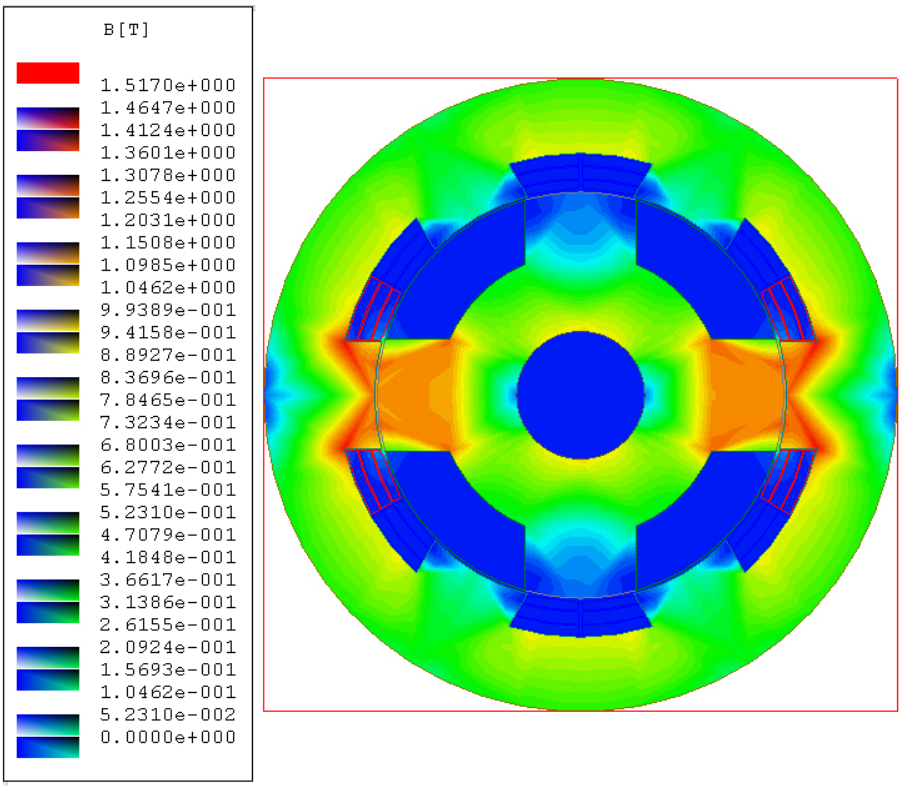
Analiz sonucunda elde edilen eğriler incelendiğinde, manyetik doymanın başladığı akım değerinin altındaki değerler doğrusal bölgeye, üstündeki değerler ise doğrusal olmayan bölgeye aittir. Akı, karşılıklı (θ=0°) konumda en büyük değere sahiptir.

Ayrıca analizi yapılan modeller toplam akım-sarım değerleri açısından dikkate alındığında 2. katta bulunan sargı sayısının fazla olduğu modellerde akının daha fazla olduğu görülmektedir.

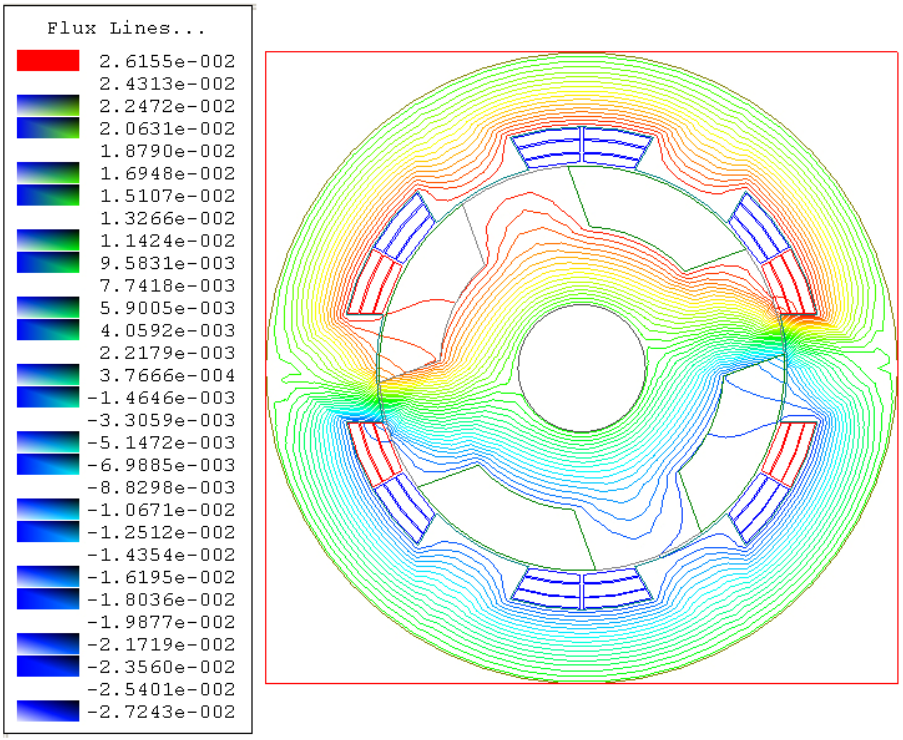
Katlı sargı yapısına ait modellerden örnek olan seçilen, rotorun θ=0°, θ=20° ve θ=45° konumlarına ait akı çizgi dağılımları ve akı yoğunluğu dağılımları Şekil 4.8…4.13'da verilmektedir.



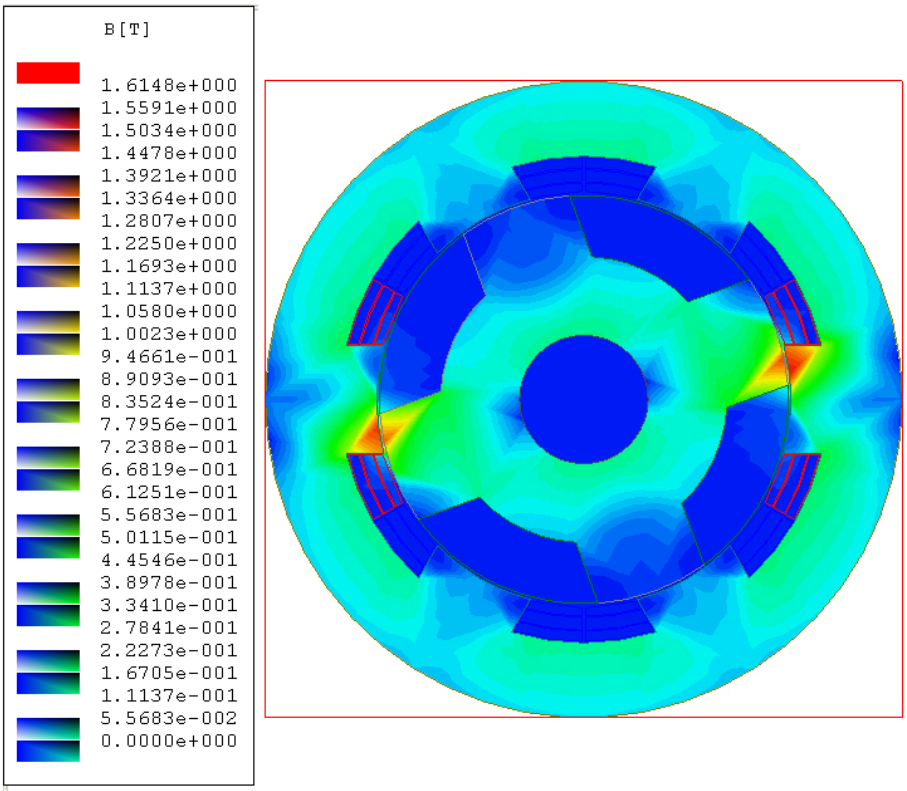
Şekil 4.8: θ=0^{o} için Akı çizgileri dağılımı (wb/m)



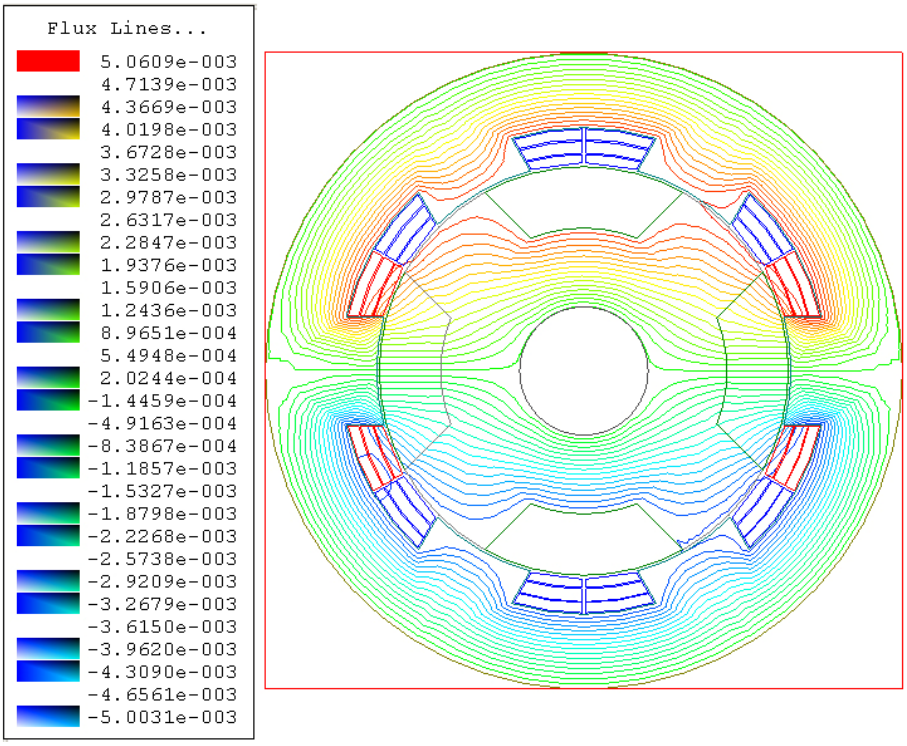
Şekil 4.9: θ=0^{o} için Akı yoğunluğu (B[T]) dağılımı.



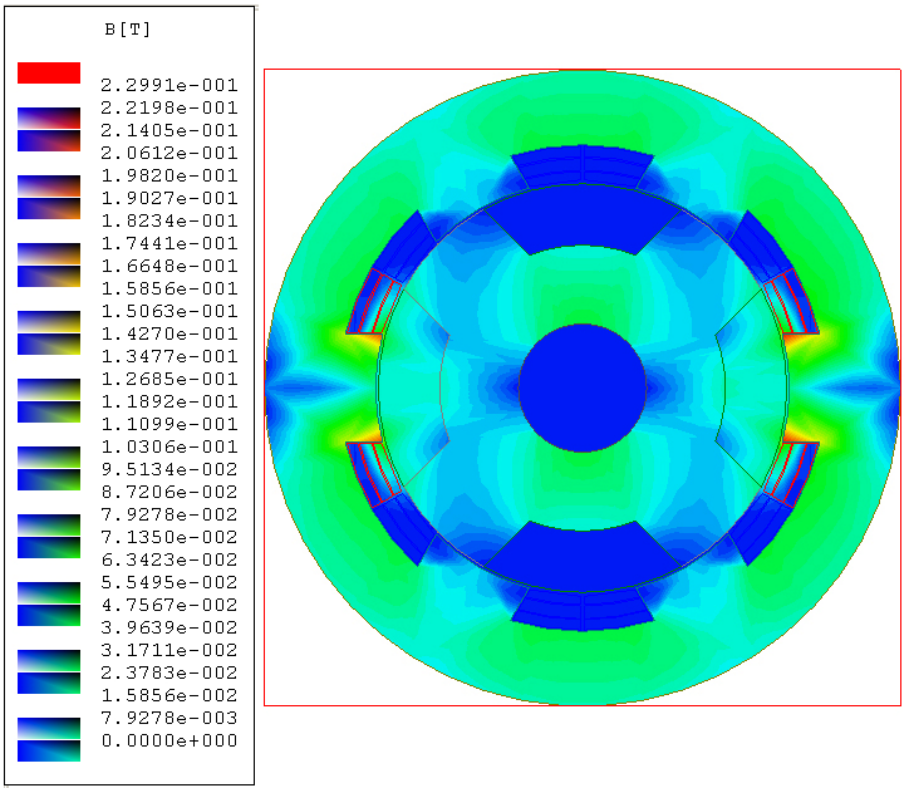
Şekil 4.10: θ=20^{o} için Akı çizgileri dağılımı (wb/m)



Şekil 4.11: θ=20^{o} için Akı yoğunluğu (B[T]) dağılımı.

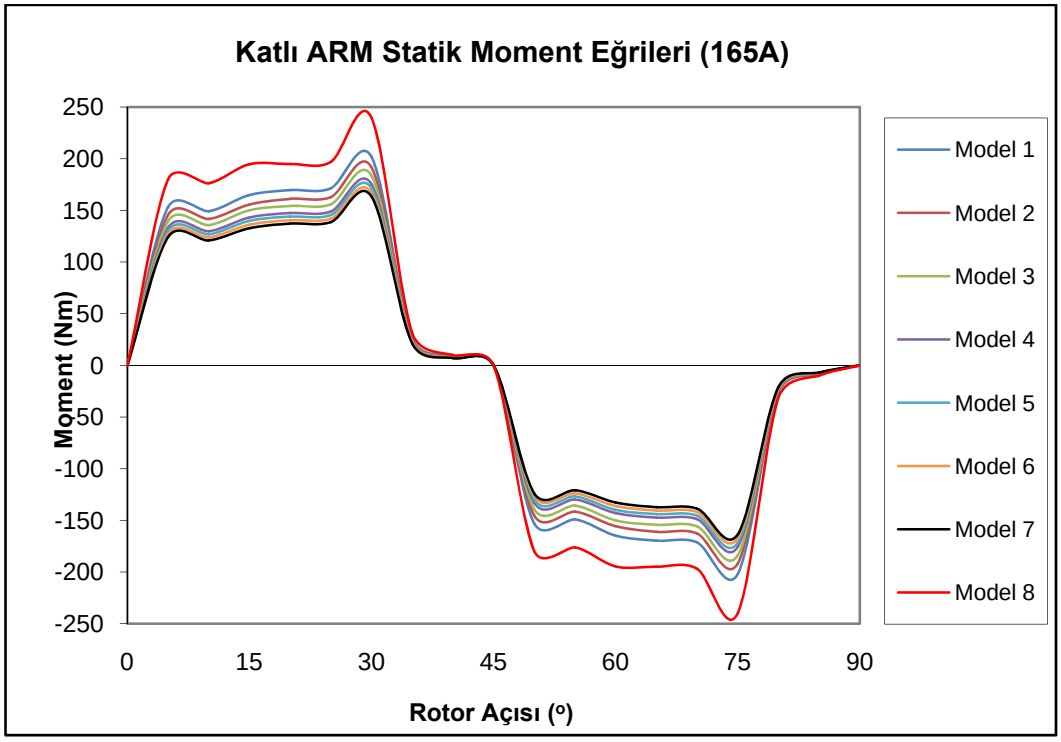


Şekil 4.12: θ=45^{o} için Akı çizgileri dağılımı (wb/m)

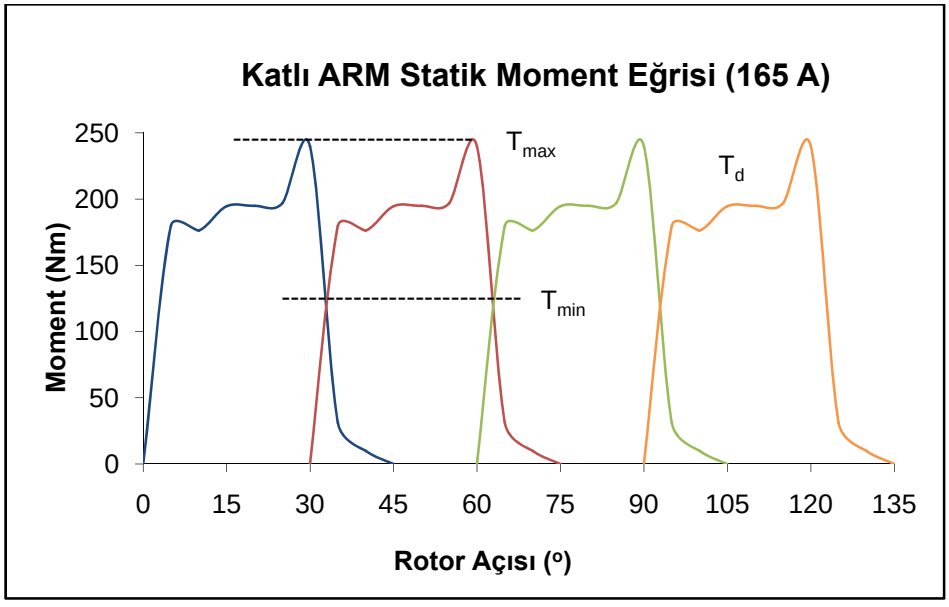


Şekil 4.13: θ=45^{o} için Akı yoğunluğu (B[T]) dağılımı.

Sargı yapısı değiştirilerek oluşturulan 8 modele ait manyetostatik analiz sonuçlarından elde edilen statik moment eğrileri Şekil 4.14'de verilmektedir. Eğrilerin incelenmesinden anlaşılacağı üzere orta kat sargı spir sayısı ile anahtarlamalı relüktans motor moment değeri arasında bir paralellik olduğu yani spir fazla olduğu modellerde moment değerinin daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 4.14: Katlı sargı yapısına sahip ARM'lerin statik moment eğrileri



Şekil 4.15: 10-12-10 sargı dağılımı olan model için statik moment eğrisi

Şekil 4.15'de 10-12-10 sargı dağılıma sahip model için 165A statik moment eğrisi verilmiştir. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi anahtarlamalı relüktans

motorlarının en önemli dezavantajlarından birisi de moment eğrisinden de anlaşılacağı üzere manyetik doymadan ve faz komitasyonundan dolayı meydana gelen moment çökmeleridir. Analiz sonuçlarından elde edilen değerler denklem 4.1'de yerine koyulduğunda % olarak moment dalgalılığı hesaplanmaktadır. Her bir model için hesaplanan moment dalgalılığı değerleri Tablo 4.3'de verilmektedir.

Tablo 4.3: Katlı sargı yapısına sahip modellerin dalgalılık oranları

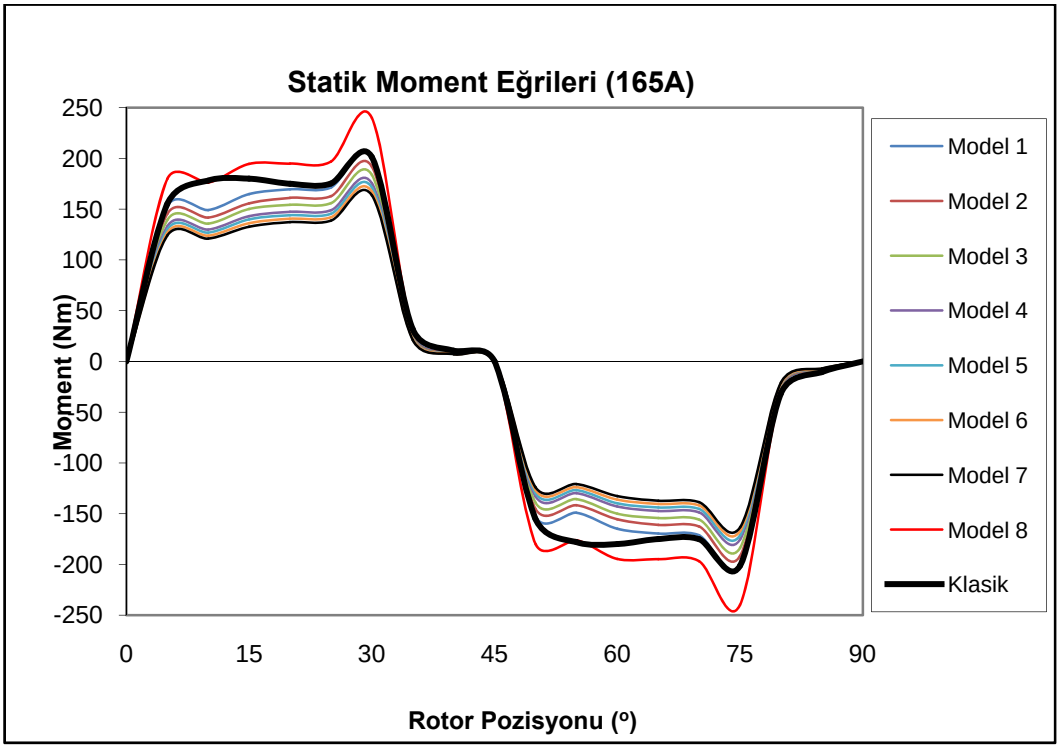
Model	**% T_d (Dalgalılık Oranı) (165A)**
Model 1	30,14
Model 2	30,47
Model 3	30,76
Model 4	31,09
Model 5	31,89
Model 6	32,03
Model 7	32,07
Model 8	31,23

4.3. Klasik ARM ve Katlı Sargı Yapısına Sahip ARM Çalışma Karakteristiklerinin Karşılaştırılması

Tüm elektrik makineleri için moment en önemli performans kriteridir. Momentin olabildiğince yüksek ve dalgalılığının düşük olması hale getirilebilmesi için araştırmacılar sürekli çalışmalar yapmaktadır. Bu çalışma sırasında 3. bölümde klasik anahtarlamalı relüktans motorunun performans analizi, 4. bölümde ise katlı sargı yapısına sahip 8 farklı modelin analizi sonlu elemanlar yöntemi kullanan bir paket program tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu kısımda elde edilen sonuçların karşılaştırması yapılırken yukarıda belirtildiği gibi moment ve moment dalgalılığı değerleri ön plana çıkartılacaktır.

Anahtarlamalı relüktans motorları için moment dalgalılığı önemli dezavantajlardan birisidir ve dalgalılığın faz komitasyonu ve manyetik doyma nedeniyle meydana geldiği bilinen bir gerçektir. Bu nedenle analizi yapılan motorların halkalanma akısı-akım eğrilerinden tespit edilen 165A'lik doyma değerindeki moment eğrileri üzerinde çalışma yapılmasının doğru olacağı mütalaa edilmektedir. Katlı sargı

yapısına sahip modeller ile klasik anahtarlamalı relüktans motorunun 165A için moment eğrileri Şekil 4.16'de verilmiştir.



Şekil 4.16: 165 A için statik moment eğrileri

Sonlu elemanlar yöntemi kullanan paket program vasıtası ile elde edilen veriler sonucunda oluşturulan daha önce verilen modellerle ilgili bilgiler ışığında moment eğrileri incelendiğinde şu sonuçlar çıkartılabilmektedir.

Katlı sargı yapısında orta katta bulunan sarım sayısı miktarı arttıkça motorun moment değeri de artmaktadır. Toplam akım-sarım sayısı klasik anahtarlamalı motor ile aynı olan 10-12-10 sargı dağılımı bulanan model için moment değerinde %10,51'lik bir artış gözlemlenmektedir. Toplam akım-sarım sayısı yaklaşık %11 daha az olan modeller için ise her ne kadar momentin tepe değerleri klasik anahtarlamalı relüktans motorunun moment tepe değerine yakın olduğu görülse de moment dalgalılığı nedeniyle ortalama momentlerinde klasik anahtarlamalı relüktans motorundan daha düşük bir performans sergilediği görülmektedir.

Daha önce de belirtildiği üzere anahtarlamalı relüktans motorları için moment dalgalılığı değerleri ayrı bir önem arz etmektedir. Çalışmalar sonucunda elde edilen hem katlı sargı yapısına hem de klasik anahtarlamalı motora ait moment dalgalılığı değerleri Tablo 4.4 de verilmiştir.

Tablo 4.4: 165 A için moment dalgalılığı oranları

Model	**% Td (Dalgalılık Oranı) (165A)**
Model 1	30,14
Model 2	30,47
Model 3	30,76
Model 4	31,09
Model 5	31,89
Model 6	32,03
Model 7	32,07
Model 8	31,23
Klasik ARM	30,03

Tablo 4.4 deki moment dalgalılığı değerleri incelendiğinde her ne kadar moment değerleri açısından aynı akım-sarım sayısı miktarı için performansın iyi olduğu görülse de moment dalgalılığı açısından klasik anahtarlamalı motorlar için en önemli dezavantajlardan birisi olan yüksek dalgalılık durumunun katlı sargı yapısı için de söz konusu olduğu görülmektedir. Katlı sargı yapısının bu noktada dikkate değer bir iyileştirme yaptığı söylenemez.

Bununla birlikte daha önce de belirtildiği gibi gerek kontrol devreleri üzerine yapılan çalışmalar gerekse manyetik devre üzerine yapılan çalışmalarla moment dalgalılığı konusunda önemli ilerlemeler elde edilmiştir. İleride yapılacak çalışmalarla katlı sargı yapısına ait moment dalgalılığı değerinin istenen değerlere indirilebileceği böylece moment değerindeki artışla anahtarlamalı relüktans motorunun kullanımının yaygınlaştırılması konusunda fayda sağlanacağı düşünülmektedir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Yapılan çalışmada, yarı iletken teknolojisinde meydana gelen gelişime paralel olarak kullanımı giderek yaygınlaşan anahtarlamalı relüktans motorlarının sargı yapısında yapılan değişikliğin motorun karakteristiklerine özellikle de moment ve moment dalgalılığı üzerine etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu etkilerin incelenebilmesi için sonlu elemanlar analizi yöntemini kullanan Maxwell 2D programı kullanılmıştır.

Anahtarlamalı relüktans motorlarının çıkış performansının iyileştirilmesi amacıyla klasik 6/4 anahtarlamalı relüktans motoruna göre sargı yapısı değiştirilmiş sekiz model hazırlanarak analizi yapılmıştır. Modellerin moment ve moment dalgalılığı oranları ile klasik anahtarlamalı relüktans motoru moment ve moment dalgalılığı oranları karşılaştırılmıştır.

Elde edilen veriler incelendiğinde aynı akım-sarım sayısı değerine sahip model için moment değerinde %10,51'lik bir artış gözlemlenmiştir. Toplam akım-sarım sayısı yaklaşık %11 daha az olan modeller için ise her ne kadar momentin tepe değerleri klasik anahtarlamalı relüktans motorunun moment tepe değerine yakın olduğu görülse de moment dalgalılığı nedeniyle ortalama momentlerinde klasik anahtarlamalı relüktans motorundan daha düşük bir performans sergilediği görülmektedir.

Bilindiği üzere, düşük hızlı ARM'lerde zıt emk'nın küçük olması nedeniyle sargılardan istenilen değerde akım geçirilebilmektedir. Bu nedenle katlı sargı yapısının düşük hızlı ARM'ler yerine yüksek hızlı ARM'lere uygulanmasının daha uygun olacağı gerçeğinden hareketle çalışma sırasında yapılan statik analizler sonucunda momentte elde edilen %10,51'lik iyileşmenin dinamik analiz sırasında yüksek hızlı ARM'lerde uygulanması durumunda iyileşmenin daha yüksek değerlerde olacağı düşünülmektedir.

Moment dalgalılığı değerleri incelendiğinde her ne kadar moment değerleri açısından aynı akım-sarım sayısı miktarı için performansın iyi olduğu görülse de moment dalgalılığı açısından klasik anahtarlamalı relüktans motoruna göre %1,04'lük bir artış gözlemlenmiştir. Değerlerden de anlaşılacağı üzere moment dalgalılığı değerleri her iki tip motor için de birbirine çok yakındır.

Bununla birlikte anahtarlamalı relüktans motorların performanslarının iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar kontrol devresi üzerine yapılan çalışmalar ve manyetik devresi üzerine yapılan çalışmalar olmak üzere iki gruba ayrılmakta olup özellikle momentin iyileştirilmesi ve moment dalgalılığının azaltılması üzerine yapılan çalışmalarda önemli gelişmeler yaşanmaktadır. Bu gelişmeler ışında mevcut analiz sonuçlarına tekrar ele alınması yani moment dalgalılığı için uygulanan bir yöntemle modellerin tekrar analizinin yapılmasının uygun olacağı düşünülmektedir.

Ayrıca, manyetik devre üzerine yapılan çalışmaların sınırlı olmasında çalışma maliyetinin yüksek olması ve uzun zaman alması gibi bir takım önemli nedenler mevcut olmasına rağmen analiz çalışması sonucunda elde edilen verilerin deneysel olarak gerçekleştirilmesi anahtarlamalı relüktans motorlarının geliştirilmesi ve endüstride kullanımının arttırılması bakımından büyük önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

1. Krishnan, R., "Switched Reluctance Motor Drives", ***CRC Press***,(2001).

2. 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).

3. Davis, R. M., Ray, W. F., "An Inverter Drive for a Switched Reluctance Motor" ***Proc. ICEM 80 Conference***, pp.1026-1213, (1980).

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

5. Özoğlu, Y., "Anahtarlamalı Relüktans Motorunda Kutup Başlarına Şekil Vererek Moment Dalgalanmasının Azaltılması", Doktora Tezi, ***İTÜ***, (1999).

6. Hsu, J.S., Liou , P.S., Woodson, H.H., "Peaked-MMF Smooth-Torque Reluctance Motors", ***IEEE Transactions on Energy Conversion***, 5(1), 104-109, (1990).

7. Xu, L., Wang, C., "Accurate Rotor Position Detection and Sensorless Control of SRM for Super-High Speed Operation", ***IEEE Transactions on Power Electronics***, 17(5), 757-763, 2002.

8. "Maxwell 2D Getting Started, Magnetostatic Problem", ***Ansoft Corp***., (2002).

9. Garip, M., "Kutup Başları Şekillendirilmiş Anahtarlamalı Relüktans Motorunda Tam Kutup Adımlı Sargının Moment Dalgalılığının İyileştirilmesine Katkısı", Doktora Tezi, ***Yıldız Teknik Üniversitesi***, (2002).

10. Bal, G., "Özel Elektrik Makinaları" , ***Seçkin Yayıncılık***, 155-175 (2004).

11. Elmas, C., Sagiroglu, S., Colak, I., Bal, G. "Modelling of a nonlinear switched reluctance drive based on artificial neural networks", ***Proceedings of PowerElectronics and Variable-Speed Drives***, 7 - 12 (1994).

12. Yiğit, T., "Genetik Uyarlamalı Denetleyici İle Anahtarlamalı Reluktans Motorun Hız Denetiminin Gerçekleştirilmesi", Doktora Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, 1-100 (2005).

13. Elmas, Ç., "Position Sensorless Operation of A Switched Reluctance Motor Drive Based on A Non-Linear Observer", PhD. Thesis, ***School Of Electronic &Electrical Engineering, University of Birmingham***, 1-100, (1993).

14. Sefa, İ., "Sliding Mode Yaklaşımı ile Anahtarlamalı Relüktans Motorun Hız Denetimi", Doktora Tezi, ***Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, 13-14, (1997).

15. 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).

16. Shyam, R., "Aspects of switched Reluctance Motor Drive Application for Electric Vehicle propulsion", PhD Thesis, ***Arkansas University***, (2001).

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

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

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

20. "Maxwell 2D Online Help System", ***Ansoft Corp***., (2004).

21. Gürdal, O., "Elektromanyetik Alan Teorisi", ***Nobel Yayınları***, 385-398, (2000).

22. Gürdal, O., "Elektrik Makinalarının Tasarımı", ***Nobel Yayıları***., (2000).

23. Stephenson, J. M., Corda, J., "Computation of Torque and Current in Doubly Salient Reluctance Motors From Nonlinear Magnetisation Data", IEE Proc., Vol. 126, No. 5, 393-396, (1979).

24. Arumugam, R., Lowther, D. A., Krishnan, R., Lindsay, J. F., "Magnetic Field Analysis of a Switched Reluctance Motor Using a Two Dimensional Finite Element", ***IEEE Transactions On Magnetics, Vol. MAG-21***, No. 5, 1883-1885, (1985).

25. Lindsay, J. F., Arumugam, R., Krishnan, R., "Finite Element Analysis Characterisation of a Switched Reluctance Motor with Multitooth Per Stator Pole", ***IEE Proc.*** , Vol. 133, Pt. B, No.6, 347-353, (1986).

26. Dawson, G. E., Eastham, A. R., Mizia, J., "Switched Reluctance Motor Torque Characteristics: Finite Element Analysis and Test Results", ***IEEE Transaction on Industry Applications***, Vol. IA-23, No. 3, 532–537, (1987).

27. Yılmaz K., "Anahtarlamalı Relüktans Motorunun Sargı Yapısı Değiştirilerek Moment Performansının İyileştirilmesi", Doktora Tezi, ***Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, (2004).

28. Fauchez, M. B., "Magnetic Analysis of a Switched Reluctance Motor Using a Boundary Element-Finite Element Coupling Method", ***IEEE Transactions On Magnetics***, Vol. 24, No. 1, 475-478, (1988).

29. Arumugam, R., Lindsay, J. F., Krishnan, R., "Sensitivity of Pole Arc/Pole Pitch Ratio on Switched Reluctance Motor Performance", ***IEEE Tran. On Magnetics***, (1988).

30. Ayaz, M., "Klasik ve Karşıt Kuplajlı Anahtarlamalı Relüktans Motorlarda Geometrik Parametrelerin Çıkış Performansına Etkileri", Yüksek Lisans Tezi, ***Kocaeli Üniversitesi***, (2008).

31. 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).

32. Stephenson, J. M., El-Khazendar, M. A., "Saturations in Doubly Salient Reluctance Motors", ***Proc. IEE***, Vol. 136, Part B, No. l, pp.50-58, (1989).

33. Corda, J. B., "Computation of Torque Pulsations of Switched Reluctance Drive", ***Proc. Of Conference on Electrical Machines and Drives***, pp. 308-311, (1989).

34. 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).

35. Davis, R. M. and Al-Bahadly, L., "Experimental Evaluation of Mutual Inductances in a Switched Reluctance Motor", ***IEE Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives***, No. 324, pp. 337-347, (1990).

36. 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).

37. Moghbelli, H., Adams, G. E. and Hoft, R. G., "Performance of a 10-Hp Switched Reluctance Motor and Comparision with Induction Motors", ***IEEE Trans. On Industry Applications***, Vol. 27, No. 3, pp. 531-538, (1991).

38. Jack, A. G., Finch, J. W., Wright, J. P., "Adaptive Mesh Generation to Switched Reluctance Motor Design", ***IEEE Transaction on Industry Applications***, Vol. 28, No. 2, 370– 375, (1992).

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

40. Finch, J. W., Faiz, J., Metwally, H. M. B., "Design Study of Switched Reluctance Motor Performance", ***IEEE Trans. on Industry Applications***, (1992).

41. Suriano, J. R., Ong, C. M., "Variable Reluctance Motor Structures for Low Speed Operation", ***IEEE Trans. on Industry Applications***, (1993).

42. Faiz, J., Finch, J. W., "Aspects of Design Optimisation for Switcihed Reluctance Motors", ***IEEE Transactions on Energy Conversion***, Vol. 8, No. 4, (1993).

43. Chenedac L.,Geoffroy J. Y. Multon M., Mouchoux J. C., "Tourque Ripple Minimisation in Switched Reluctance Motors by Optimisation of Current Wave-Forms and of Tooth Shape With Copper Losses and V.A. Silicon Constraints", ***Proc. ICEM'94***, pp.559-564, (1994).

44. 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).

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

46. 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).

47. Pelikant, A., Wiak, S., "Influence of 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).

48. Ohgachi, 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).

49. Li Y., Tang Y., "Switched Reluctance Motor Drives with Fractionally-Pitched Winding Design" ***Emerson Motor Cor., Patent Çalışması*** Vol. 2, pp.875-880,(1997).

50. Russa, K., Iqbal, H., Elbuluk, M. E., "Torque- Ripple Minimization in Switched Reluctance Machines Over a Wide Speed Range", ***IEEE Transaction on Industry Applications***, Vol. 34, No. 5, 1105– 1112, (1998).

51. Pillay, P., Cai, W., "A Investigation into Vibration in Switched Reluctance Motors", ***IEEE Transaction on Industry Applications***, Vol. 35, No. 3, 589–596, (1999).

52. 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. l, pp. 416-423, Dallas, TX, USA, (1999).

53. 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, (2000).

54. 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).

55. Wichert, T., Kub, H., Schuffenhauer, U., "Modern Dimensioning of Switched Reluctance Machines", ***IEEE Trans. on Industry Applications***, (2001).

58. 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).

57. 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).

58. Mao, S., Tsai, M., "A Novel Switched Reluctance Motor with C-core Stators", ***IEEE Transactions on Magnetics***, v 41, n 12 p 4413-4420, (2005).

59. Perez Cebolla, F.J., Martinez, A., Martin, B., Laloya, E., Pollan, T., Vicuna, J.E., Llado, J., Sanchez, B., "Influence of Coil Arrangement and Current Polarity on The Output Torque of a Switched Reluctance Motor" ***IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)***, p 1188-1193, (2006).

60. Yong, K.C., Chang, S.K., "Pole Shape Optimization of Switched Reluctance Motor For Reduction of Torque Ripple" ***12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation***, p1633125, (2006).

61. Daldaban, F., Ustkoyuncu, N., "New Disc Type Switched Reluctance Motor For High Torque Density" ***Energy Conversion and Management***, v 48, n 8, p 2424-2431, (2007).

62. Daldaban, F., Ustkoyuncu, N., "Multi-layer Switched Reluctance Motor to Reduce Torque Ripple" Energy Conversion and Management, v 49, n 5, p 974-979, (2008).

63. Afjei, E., Mazloomnezhad, B., Seyadatan, A., "A Novel Two Phase Configuration For Switched Reluctance Motor with High Starting Torque" ***SPEEDAM 2008 - International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion***, p 1049-1052, (2008).

ÖZGEÇMİŞ

1975 yılında Kocaeli'de doğdu. İlkokulu Kocaeli Piri Reis ilkokulunda, ortaokulu Kocaeli Derince Lisesi orta kısmında okudu. 1989 yılında girdiği Kocaeli Teknik Lise ve Endüstri Meslek Lisesinden 1993 yılında elektrik teknisyeni olarak mezun oldu. Aynı yıl girdiği Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Öğretmenliği Bölümünden 1998 yılında mezun oldu. Askerlik görevinden sonra Milli Eğitim Bakanlığı tarafından yapılan seçme sınavı sonucunda 2000 yılında atandığı elektrik öğretmenliği görevine halen devam etmektedir.