



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



**SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE 6/4
ANAHTARLAMALI
RELÜKTANS MAKİNE TASARIMI VE ANALİZİ**

Yüksek Lisans Tezi

Ümit CANDAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir
2024

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE 6/4
ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MAKİNE
TASARIMI VE ANALİZİ**

Ümit CANDAN

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Özkan AKIN

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

İzmir
2024

Ümit CANDAN tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan “Sonlu Elemanlar Yöntemi ile 6/4 Anahtarlama Relüktans Makine Tasarımı ve Analizi” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesinin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı :

Raportör Üye :

Üye :



EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum **“SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE 6/4 ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MAKİNE TASARIMI VE ANALİZİ”** başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğumu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

11 / 12 / 2024

Ümit CANDAN



ÖZET**SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE 6/4 ANAHTARLAMALI
RELÜKTANS MAKİNE TASARIMI VE ANALİZİ**

Ümit CANDAN

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Elektronik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Özkan AKIN

Aralık 2024, 74 sayfa

Bu çalışma Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanarak 6/4 anahtarlama relüktans makinesinin (ARM) tasarım ve analizine odaklanmaktadır. Amaç manyetik devre tasarımı, tork üretimi ve motor verimliliği gibi kritik performans parametrelerini optimize etmektir. Temel motor parametrelerini belirlemek için ANSYS RMXprt kullanılmış manyetik alan dağılımı, tork üretimi ve genel performans özelliklerini analiz etmek için ise ANSYS Maxwell 2D kullanılmıştır.

Motorun manyetik özellikleri kapsamlı olarak incelenmiş özellikle tork dalgalanmalarını minimize etme ve tork üretimini optimize etme üzerine yoğunlaşmıştır. ANSYS yazılımı ile yapılan simülasyonlar geometrik değişikliklerin motor performansı üzerindeki etkilerine dair bilgiler sunmuştur. Bu simülasyonlar en yüksek tork ve verimliliği elde etmek için gerekli tasarım ayarlarının belirlenmesinde önemli bir rol oynamıştır.

ARM modeli daha sonra Matlab Simulink'e aktarılmış ve doğrulama amacıyla dinamik davranışların simülasyonu yapılmıştır. Simulink'te motorun matematiksel modeli oluşturularak tork üretimi dinamik davranışlar simüle edilmiştir. Simulink ile elde edilen sonuçlar ANSYS simülasyonları ile karşılaştırılmış ve modelin doğruluğu onaylanmıştır. Sonuçların uyumu tasarım ve analiz sürecinin güvenilirliğini artırmıştır.

Sonuç olarak bu alışma 6/4 ARM'nin tasarım ve optimizasyonunu başarılı olarak sergilemekte, ayrıntılı simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve bulgular Matlab Simulink simülasyonları ile doğrulanmıştır. Anahtarlama açıları Simulink ile analiz edilerek tork dalgalanmasının etkileri daha verimli bir biçimde incelenmiş ve motor performansını iyileştirmek için tasarım geliştirmeleri konusunda net öneriler sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: 6/4 Anahtarlamaalı Relüktans Motoru, Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), Tork Dalgalanması, ANSYS RMxpert, ANSYS Maxwell 2B, Matlab Simulink.





ABSTRACT**DESIGN AND ANALYSIS OF A 6/4 SWITCHED RELUCTANCE
MACHINE USING FINITE ELEMENT METHOD****Umit CANDAN**

Master Thesis, Electrical Electronic Department

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Özkan AKIN

June 2024, 74 pages

This study focuses on the design and analysis of a 6/4 switched reluctance machine (SRM) using the Finite Element Method (FEM). The goal is to optimize critical performance parameters such as magnetic circuit design, torque production, and efficiency of the motor. ANSYS RMxprt was employed for determining fundamental motor parameters, while ANSYS Maxwell 2D was used for analyzing the magnetic field distribution, torque production and overall performance characteristics.

Motor magnetic properties were examined comprehensively with particular emphasis on minimizing torque ripple and optimizing torque production. Simulations performed with ANSYS software provided insights into the impact of geometric modifications on motor performance. These simulations played a crucial role in identifying necessary design adjustments for achieving the highest levels of torque and efficiency.

The SRM model was also transferred to Matlab Simulink for further validation. A mathematical model of the motor was created in Simulink, enabling the simulation of dynamic behaviors such as torque generation and speed response. The results obtained through Simulink were compared with those from ANSYS simulations, confirming model accuracy. This alignment between results enhanced the reliability of the design and analytical process.

In summary, this study successfully demonstrates the design and optimization of a 6/4 SRM using finite element analysis. Detailed simulations were conducted, and the findings were validated through Matlab Simulink simulations. By analyzing switching angles with Simulink, it was possible to investigate the impact on torque ripple more efficiently, offering clear recommendations for improving motor performance through design enhancements.

Keywords: 6/4 Switched Reluctance Motor (SRM), Finite Element Method (FEM), Torque Ripple, ANSYS RMxpert, ANSYS Maxwell 2D, MATLAB Simulink



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında bana rehberlik eden ve değerli katkıları sunan başta Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Özkan Akın'a, desteğini ve yardımını esirgemeyen Dr. Kadir Doğan'a ve Araştırma Görevlisi Mert Altıntaş'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Başta ailem olmak üzere, tüm sevdiklerime destekleri ve anlayışları için teşekkür eder ve minnettarım.

Sonsuz teşekkürlerimle.

İZMİR

11.12.2024

Ümit CANDAN



İÇİNDEKİLERSayfa

İÇ KAPAK	ii
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	x
ÖNSÖZ.....	xii
İÇİNDEKİLER.....	xiv
ŞEKİLLER DİZİNİ	xix
ŞEKİLLER DİZİNİ (devam).....	xx
ŞEKİLLER DİZİNİ (devam).....	xxi
ŞEKİLLER DİZİNİ (devam).....	xxii
TABLolar DİZİNİ	xxiv
TABLolar DİZİNİ (devam)	xxv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)	xxix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)	xxx
1. GİRİŞ.....	1

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
1.1. Çalışmanın Amacı.....	8
1.2. Anahtarlama Relüktans Motorlar İçin Sürücü Devreleri.....	9
1.2.1. Asimetrik Yarım Köprü Dönüştürücüsü.....	10
1.2.2. Ortak Anahtarlı Dönüştürücü (Miller Devresi).....	11
1.2.3. C-dump Dönüştürücü.....	13
1.2.4. Split DA Link Dönüştürücü.....	14
1.2.5. Bifilar Sargılı Dönüştürücü.....	14
1.3. Anahtarlama Relüktans Motorlar.....	15
1.3.1. Anahtarlama Relüktans Motorun Çalışma Prensipleri.....	19
1.3.2. ARM Eş Değer Devre ve Matematiksel Denklemler.....	19
1.3.3. Hava Aralığı (g).....	21
1.3.4. Kutup Yayları (β_s, β_r) Açısı.....	21
1.3.5. Rotor Oyuk Derinliği (d_r).....	22
1.3.6. Rotorun Boyunduruk Kalınlığı (y_r), Stator Boyunduruk Kalınlığı (y_s).....	22
1.3.7. Stator Bobinin Yüksekliği (d_s).....	22
1.3.8. Stator Kutup Yüksekliği (h_s).....	22

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
1.3.9. Adım Açısı (ϵ).....	22
2. 6/4 ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTOR RMXPRT TASARIMI.....	24
2.1. Stator Dış Çapının Belirlenmesi.....	24
2.2. Hava Aralığının Belirlenmesi.....	25
2.3. Faz Akımının ARM'ye Etkisi	29
2.4. Rotor Kutup Yayı Açısı, Stator İç Çapı ve Sarım Sayısının ARM'ye Etkisi.....	35
2.5. Hızın ve Rotor Kutup Yay Açısının İlişkisi Ve ARM'ye Etkisi.....	42
2.6. 8/6 ARM'nin RMXPRT Analizi	43
3. MAXWELL 2B ANALİZLERİ	46
3.1. 6/4 ARM Parametrelerine Göre Tork Dalgalanması.....	46
3.2. Rotoru Modifiye Edilmiş ARM'lerin Analizleri.....	47
3.2.1. Birinci Tip Rotoru Değiştirilmiş 6/4 ARM	48
3.2.2. İkinci Tip Rotoru Değiştirilmiş 6/4 ARM.....	54
3.2.3. Üçüncü Tip Rotoru Değiştirilmiş 6/4 ARM.....	56
3.2.4. Rotoru Değiştirilmiş ARM'lerin Karşılaştırılması.....	57
3.3. Verim ve EN 60034 Standardı	59

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4. MATLAB SIMULINK ANALİZİ	60
5. SONUÇLAR	65
KAYNAKLAR DİZİNİ	66
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)	67
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)	68
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)	69
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)	70
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)	71
KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)	72
TEŞEKKÜR	73
ÖZGEÇMİŞ	74



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. (a) 4 Fazlı ARM İçin Asimetrik Yarım Köprü Dönüştürücü, (b) Magnetization Modu, (c) Freewheeling Modu, (d) Demagnetization Modu.....	11
1.2. (a) 4 Fazlı ARM İçin Miller Dönüştürücü, (b) Magnetization Modu, (c) Ve (d) Freewheeling Modu, (e) Demagnetization Modu	12
1.3. (a) 4 Fazlı ARM İçin C-Dump Dönüştürücü, (b, c) 4 Fazlı ARM İçin Tam Köprü Dönüştürücü	13
1.4. (a) 4 Fazlı Bir ARM İçin Split Dönüştürücü, (b) Magnetization Modu, (c) Demagnetization Modu.....	14
1.5. Farklı Rotor Ve Stator Konfigürasyonlarına Sahip ARM'ler (Krishnan, 2001) .	17
1.6. En Yaygın Ve Sık Kullanılan Dizilimler (Krishnan, 2001).....	18
1.7. Rotorun Statora Göre Konumuna Bağlı Olarak İndüktans Değişimi.....	19
1.8. Anahtarlama Relüktans Motorunun (ARM) Tek Fazına Ait Eşdeğer Devre Şeması.....	20
2.1. Stator Dış Çapının Kumpas ile Ölçümü.....	25
2.2. KÖM Makinası.....	25
2.3. Hava Aralığının Ortalama Torka Etkisi (Kocan et al., 2020)	26
2.4. Hava Aralığının Tork Dalgalanmasına Olan Etkisi (Kocan et al., 2020)	27
2.5. Dört Farklı Hava Aralığına Ait Verim Grafikleri	28

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.6. Dört Farklı Hava Aralığına Ait Tork ve Güç Grafiği.....	29
2.7. Faz Akımı ve Stator İç Çapı-Tork Grafiği	31
2. 8. Sadeleştirilmiş Faz Akımı ve Stator İç Çapı-Tork Grafiği.....	31
2. 9. Faz akımı, Stator İç Çapı Verim Grafiği	32
2.10. Sadeleştirilmiş Faz Akımı ve Stator İç Çapı-Verim Grafiği	32
2.11. Faz akımı, Stator İç Çapı Güç Grafiği.....	34
2.12. Sadeleştirilmiş Faz Akımı ve Stator İç Çapı-Güç Grafiği.....	34
2.13. Rotor Kutup Yayı açısı, Stator İç Çapı ve Sarım Sayısına Göre Tork Grafiği .	36
2.14. Sadeleştirilmiş Rotor Kutup Yayı Açısı, Stator İç Çapı-Tork Grafiği.....	37
2.15. Rotor Kutup Yayı açısı, Stator İç Çapı ve Sarım Sayısına Göre Güç	37
2.16. Sadeleştirilmiş Rotor Kutup Yayı Açısı, Stator İç Çapı-Güç Grafiği	37
2.17. Rotor Kutup Yayı, Stator İç Çapı ve Sarım Sayısına Göre Verim Grafiği	38
2.18. Sadeleştirilmiş Rotor Kutup Yayı Açısı, Stator İç Çapı-Verim Grafiği.....	38
2.19. 1000 rpm'e Göre Tork ve Güç Grafiği.....	43
2.20. 8/6 ARM Rotor Kutup Yayının Tork ve Güç Eğrisine Etkisi.....	44
2.21. 8/6 ARM Rotor Kutup Yayının Verim Eğrisine Etkisi.....	45

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Parametreye Ait Tork Grafiği.....	46
3.2. Değiştirilmiş Versiyonun Sonuçları.....	47
3.3. Birinci Tip Rotoru Değiştirilmiş 6/4 ARM.....	48
3.4. Birinci Tip Rotoru Değiştirilmiş 6/4 ARM'nin “Wsp”, “Wrp” ve “thetax” Parametrelerine Göre Ortalama Tork ve Tork Dalgalanmaları.....	49
3.5. Birinci Tip Rotoru Değiştirilmiş 6/4 ARM İçin 18 Farklı Parametreye Ait Tork Grafikleri.....	49
3.6. Birinci Tip Rotoru Değiştirilmiş ARM'nin Faz Akımlarının Anahtarlama ..	52
3.7. 18 Farklı Parametreye Ait Faz A Akımlarının Anahtarlama Geçişleri.....	52
3.8. Üç farklı Rotoru Değiştirilmiş ARM'lerin Devresi	53
3.9. Birinci Tip Rotoru Değiştirilmiş ARM'nin 96V Versiyonu Akım Anahtarlama Geçişleri	53
3.10. Birinci Tip Rotoru Değiştirilmiş ARM'nin Seçilen Parametrelerle Tork Grafiği	54
3.11. Seçilen Parametreler İçin Faz Akımlarının Anahtarlama Davranışı.....	54
3.12. İkinci Tip Rotoru Değiştirilmiş 6/4 ARM, L1=15.3mm.....	55
3.13. İkinci Tip Rotoru Değiştirilmiş 6/4 ARM Tork Grafiği	56

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.14. İkinci Tip Rotoru Değiştirilmiş ARM'nin Faz Akımlarına Ait Anahtarlama Grafiği	56
3.15. Üçüncü Tip Rotoru Değiştirilmiş 6/4 ARM.....	57
3.16. Üçüncü Tip Rotoru Değiştirilmiş ARM'nin Tork Grafiği	57
3.17. 3 Farklı Rotoru Değiştirilmiş 6/4 ARM'ye Ait Tork Grafiklerinin Karşılaştırılması.....	58
3.18. 3 Farklı Rotoru Değiştirilmiş 6/4 ARM'nin A Fazı Akım Grafikleri.....	59
4.1. Flux Linkage Analizi.....	60
4.2. Flux Linkage" Grafiğinin MATLAB'a Aktarımı	61
4.3. ANSYS Statik Tork Analizi.....	62
4.4. ANSYS Verisiyle MATLAB'da Statik Tork Eğrisi	62
4.5. (a) Endüktans Eğrisi, (b) Motora Ait Geri Elektromotor Kuvveti	63
4.6. Matlab Simulink Modeli	64
4.7. (a) $\theta_{on}=3$ $\theta_{off}=40$, (b) $\theta_{on}=6$ $\theta_{off}=36$ Tork grafiği	64



TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Elektrikli Araç Uygulamalarında Kullanılacak Dört Farklı Elektrik Motoru Tahrikinin Karşılaştırılması (Xue et al., 2008).....	3
1.2. Anahtarlı Relüktans Motorlarının En Yaygın Kutup Kombinasyonları ve Bunlara Karşılık Gelen Faz Sayıları	3
1.3. ARM Sürücü Topolojilerinin Karşılaştırılması (Deepak et al., 2022)	15
1.4. Elektrikli Araç Uygulamaları İçin Farklı Elektrik Motorlarının Özelliklerinin Karşılaştırılması (Jape et al., 2017).....	18
2.1. Dört Farklı Hava Aralığına Ait Verim Grafiklerinin Değerleri	27
2.2. Dört Farklı Hava Aralığına Ait Çıkış gücü-Çıkış Torku Grafiklerinin Numaraları	29
2.3. Faz Akımının ve Stator İç Çapının Torka Olan Etkisi	32
2.4. Stator İç Çapı ve Faz Akımı Değerlerine Göre d , J , B	34
2.5. Rotor Kutup Yay Açısı, Sarım Sayısı ve Stator İç Çapı Parametrelerine Göre Tork, Güç ve Verim Değerleri	38
2.6. Rotor Kutup Yay Açısı, Sarım Sayısı ve Stator İç Çapının Yuva Doluluk Faktörü, Faz Akım Yoğunluğu ve Stator-Kutup Akı Yoğunluğu Üzerindeki Etkileri.....	40
2.7. Simülasyona Ait Motor Parametreleri.....	42
2.8. Tablo 2.7’de Belirtilen Motor Parametrelerine Göre Nominal Tork, Güç, Verim, Yuva Doluluk Faktörü, Faz Akım Yoğunluğu ve Stator-Kutup Akı Yoğunluğunun Değerleri.....	43

TABLolar DİZİNİ (devam)

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.9. 8/6 ARM'nin parametreleri.....	43
2.10. 8/6 ARM'de Rotor Kutup Yayı Açısının Etkisi.....	44
3.1. ARM Parametreleri.....	46
3.2. Değiştirilmiş Parametreler	47
3.3. Bölüm 2'den Elde Edilen ve Bu Bölümde Kullanılan Parametreler	47
3.4. Birinci Tip Rotoru Değiştirilmiş 6/4 ARM nin “Wsp”, ”Wrp” ve “thetax” Parametrelerine Göre Ortalama Tork, Tork Dalgalanması, Maksimum Tork ve Minimum Tork Değerler.....	49
3.5. İkinci Tip Rotoru Değiştirilmiş 6/4 ARM'nin L1'e Göre Sonuçları	55
3.6. Üç Farklı Rotoru Değiştirilmiş ARM'nin Performans Karşılaştırması	58



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
ARM	Anahtarlama Relüktans Makinesi
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
DC	Direct Current (Doğru akım)
SEA	Sonlu Elemanlar Analizi
BJT	Bipolar Eklem Transistör
GTO	Kapıdan Kapatılabilen Tristör
MOSFET	Metal Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör
V	Gerilim
\mathfrak{R}	Relüktans
F	Manyeto Motor Kuvveti
\emptyset	Akı
H	Hava boşluğundaki manyetik alan şiddeti
l	Manyetik yolun uzunluğu
B_b	Akı yoğunluğu
S	Manyetik yolun kesit alanı
μ	Manyetik malzemenin manyetik geçirgenliği
R_s	Her faz için stator sargılarının direnci
λ	Halkalanma akısı
N	Faza ait sarım sayısı
i	Faz akımı
p_{ag}	Hava aralığı gücü



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
T	Çıkış Torku
w_m	Açısal Hız
g	Hava aralığı
Nm	Newton-metre
rpm	Revolution per minute (Dakikadaki devir sayısı)
KÖM	Koordinat ölçüm makinesi
d	Yuva doluluk faktörü
J	Faz akım yoğunluğu
B	Stator kutup akı yoğunluğu
P	Çıkış Gücü
rot	Rotor konumunun açısı
β_s	Stator kutup yay açısı
β_r	Rotor kutup yay açısı
d_r	Rotor oyuk derinliği
y_s	Rotorun boyunduruk kalınlığı
d_s	Statorun bobin yüksekliği
h_s	Stator kutup yüksekliği
ε	Adım açısı
t_s	Stator yayı uzunluğu
t_r	Rotor yayı uzunluğu
D	Stator iç çapı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
r_3	Stator dış yarıçapı
d_d	Stator iç çapı
S_a	Anahtarlama relüktans motorun anahtarlama sayısı
m	Faz sayısı
N_r	Rotor kutup sayısı
DA	Doğru akım
Back-EMF	Geri elektromotor kuvveti
θ	Rotor konumu açısı
p	Türev operatörü
L	İndüktans
y_r	Rotor boyunduruk kalınlığı
Tmax	Maksimum tork
deg	Derece



1. GİRİŞ

Anahtarlamalı Relüktans Motorlar (ARM) rotorun yapısına bağlı olarak çeşitli rotor-stator kombinasyonları için tasarlanabilen ve değişen relüktans ve endüktans etkisiyle elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren bir motor türüdür. Bu makine basit yapısının yanı sıra rotor konum bilgisi ve sürücü devresinin kullanılmasını gerektiren üstün özelliklere sahip özel bir elektrikli makinedir (Gürdal, 2001). Anahtarlamalı Relüktans Motorlar (ARM'ler) relüktans ve endüktansın manipülasyonu yoluyla elektrik enerjisini mekanik güce dönüştürme yetenekleriyle tanınan benzersiz bir elektrik makineleri sınıfını temsil eder. Bu motorlar çeşitli rotor-stator konfigürasyonlarına göre uyarlanabilir ve tasarımda çok yönlülük sunar. İlk kez 1838'de İskoçya'da Davidson, bir elektrikli tren lokomotifini hareket ettirmek için ARM'yi kullanmıştır (Miller, 2001; Miller, 1993). 1970'lerde uygun maliyetli ve hızlı elektronik güç anahtarlama elemanlarının yanı sıra yüksek güçlü değişken relüktanslı motorların geliştirilmesiyle birlikte relüktans motorlara yönelik araştırmalar ivme kazanmıştır. Bu kapsamda Nasar ve Ofsenani 1969 yılında bu alandaki ilk önemli adımlardan birini atmıştır (Nasar, 1969). Khor ve Sotudeh, yüksek tork uygulamaları için iki fazlı enerjilendirme yöntemi, asimetrik yapı ve 12/10 kutup yapısına sahip bir anahtarlamalı relüktans motoru tanıttı (Khor et al., 2005). Pandey ve Rajagopal, 2005 yılında rotor ve statorun kutup geometrilerinde yapılan değişikliklerin motor performansı üzerindeki etkilerini inceledi (Ashok et al., 2006). ARM'le doğrudan tahrikli harici rotor ve tekerlek jantının içine yerleştirilmek üzere radyal akı yoluyla geliştirilen sistemlerde otomotiv endüstrisinde kullanılmaya başlandı (Miller, 2004). Stator yapısında yapılan değişikliklerle E tipi ve helisel yapıdaki iki fazlı ARM tasarımları geliştirilmiş ve elde edilen deneysel sonuçlar literatürde sunulmuştur (Lee et al., 2009). 2009 yılında Daldaban ve Ustkoyuncu, MagLev trenler ve asansör sistemlerinde kullanılmak üzere yenilikçi bir doğrusal ARM tasarımı ve sürücü uygulaması geliştirmiştir (Daldaban ve Ustkoyuncu, 2009). Brauer ve arkadaşları, 2009 yılında kritik güvenlik katsayısı gerektiren uygulamalarda çok yüksek sürüş hassasiyetine sahip beş farklı sargıda hatalar oluşturarak ARM'lerin farklı sargılarda meydana gelen arızalara rağmen çalışmaya devam edeceğini gösterdi (Brauer et al., 2009). ARM'ler rotorunda herhangi bir malzemenin enerjilendirilmesini gerektirmez, DC ve sargılı endüksiyon makinelerinde olduğu gibi bir fırça toplayıcı yapısı gerektirmez (Önder ve

Doğan, 2019). Bu nedenle daha uzun süre kullanılabilirler. Aynı zamanda DC makinelerindeki kolektör mekanizmasında karşılaşılan kıvılcım etkisi olmadığı için yangın riski olan yerlerde kolaylıkla kullanılabilirler (Yang et al., 2023). Ayrıca rotorun çıkıntılı yapısı nedeniyle fan etkisi yarattığından endüksiyon makinelerinde olduğu gibi motoru soğutmak için herhangi bir ek ekipman gerektirmez (Alipour-Sarabi et al., 2019). Anahtarlama relüktans motorun rotoru kalıcı mıknatıs içermez bu da basit ve güvenilir bir yapı ile yüksek arıza toleransı sağlar. Bu onu çok elektrikli uçaklarda bir marş, generatör ve Pan-Tilt uygulamalarında kullanıma son derece uygun hale getirir (Yang et al., 2023) Mühendislik analizlerinde sıklıkla kullanılan ileri düzey bir bilgisayarlı simülasyon yöntemi olan Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) simülasyonlarını gerçekleştirmek için sayısal bir teknik olan Sonlu Elemanlar Yöntemi'ni (SEY) kullanır (Maurya et al., 2024). SEY çeşitli koşullar altında ve rotor pozisyonlarında tork üretimini analiz ederken ve bunların karşılık gelen faz endüktanslarını hesaplarken çok yararlıdır (Maurya et al., 2024). ARM'lerin karmaşık ve spesifik yapısal özellikleri ve stator-rotor kutuplarının mükemmel hizalanmamış durumlarındaki şiddetli doygunluk etkileri göz önüne alındığında SEY analizi çok önemlidir (Maurya et al., 2024). Güç elektroniğinde yarı iletken teknolojilerinin ilerlemesi, mikrodenetleyici yapılarının gelişmesi ve kontrol tekniklerindeki yeniliklerle birlikte ARM'ler literatürde daha fazla yer almaya başlamıştır. Ancak ARM'lerin ticari uygulamalarda geniş çapta kullanılmamasının temel nedenlerinden biri karşılıklı stator kutuplarında oluşan titreşimler ve rotor konumunu algılayan sürücü devresinin kullanım zorunluluğudur (Miller, 1993). ARM'lerin kontrol sistemleriyle ilgili literatür incelendiğinde birçok farklı çalışmanın yapıldığı görülmektedir. Lawrenson, 1989'daki çalışmasında, yüksek hız ve tork çalışma aralığı için daha az anahtarlama devresine sahip yüksek performanslı bir sürücü devresi tanıttı (Lawrenson, 1989). Düşük maliyet, yüksek sıcaklıklı ortamlarda çalışma kabiliyeti ve sağlam rotor yapısı, anahtarlı relüktans motorlarının bazı avantajlarıdır (Kiyota et al., 2014). Öte yandan daha düşük güç yoğunluğu, daha yüksek akustik gürültü ve titreşim, daha düşük verimlilik ve benzersiz bir invertör devresi ARM'nin kalıcı mıknatıslı makinelerle karşılaştırıldığında bazı dezavantajlarıdır (Chiba et al., 2014). Günümüzde anahtarlama relüktans motorlarının tork yoğunluğunun artırılması, tork dalgalanmasının azaltılması ve tasarım optimizasyonlarının kalıcı mıknatıslı makineler için güçlü bir alternatif haline getirilmesi üzerine çok sayıda araştırma yürütülmektedir (Rahman et al., 2002; Sahin vd., 2000; Gao et al., 2011). Elektrikli araç uygulamaları için en uygun elektrik motorunu belirlemek amacıyla dört farklı tipte elektrik motor

sürücüsünün verimliliği, ağırlığı ve maliyetini karşılaştırarak kapsamlı bir araştırma yürütmüştür. Araştırmada her bir motor sürücüsünün performansını ve özelliklerini ölçmek için belirli bir puanlama sistemi kullanılmıştır. Verim, ağırlık ve maliyet gibi kriterler Tablo 1.1'de yer alan verilerle değerlendirilmiş ve her sütunda belirtilen kriterler üzerinden puanlar verilmiştir. Toplam puanlar her bir sürücünün genel performansını kapsamlı biçimde yansıtmaktadır. Tablodaki tüm değerler 1 ile 5 arasında bir puanlama sistemine göre belirlenmiş olup 1 en düşük, 5 ise en yüksek puanı temsil eder. Örneğin ağırlık parametresi yüksek bir puan aldığı anda sürücü ağırlık açısından avantajlı olarak değerlendirilmiştir. Düşük puan ise ağırlık bakımından dezavantajlı bir durumu ifade etmektedir. Bu puanlama sistemi her bir sürücünün performansını objektif ve karşılaştırılabilir bir biçimde ortaya koymaktadır. ARM sürücüler diğer üç sürücü türüyle karşılaştırıldığında bu özel uygulama için en uygun olandır.

Tablo 1. 1. Elektrikli Araç Uygulamalarında Kullanılacak Dört Farklı Elektrik Motoru Tahrikinin Karşılaştırılması (Xue et al., 2008)

İndeks	Doğru Akım Motor Sürücü	İndüksiyon Motor Sürücü	Fırçasız Doğru Akım Motor Sürücü	Anahtarlama Relüktans Motor Sürücü
Verim	2 Puan	4 Puan	5 Puan	4,5 Puan
Ağırlık	2 Puan	4 Puan	4,5 Puan	5 Puan
Maliyet	5 Puan	4 Puan	3 Puan	4 Puan
Toplam	9 Puan	12 Puan	12,5 Puan	13,5 Puan

Anahtarlama relüktans motor yapılarında kullanılan en yaygın kutup kombinasyonları Tablo 1.2'de özetlenmiştir. Ayrıca her kutup kombinasyonundaki faz sayısı da belirlenmiştir.

Tablo 1. 2. Anahtarlı Relüktans Motorlarının En Yaygın Kutup Kombinasyonları ve Bunlara Karşılık Gelen Faz Sayıları

N_s/N_r	6/4	8/6	12/8	18/12	24/12
Faz Sayısı	3	4	3	3	4

Belirli bir N_s/N_r değerine sahip anahtarlanmış bir relüktans motorundaki faz sayısının benzersiz olduğunu ve aşağıdaki biçimde kolayca Denklem 1'deki gibi

hesaplanmaktadır. Burada N_s ve N_r sırasıyla stator ve rotor kutup sayılarını ifade eder. EBOB (N_s, N_r) stator ve rotor kutup sayılarının En Büyük Ortak Bölücüsünü ifade eder.

$$q = \frac{N_s}{EBOB(N_s, N_r)} \quad (1)$$

Bir ARM'nin statik özelliklerini hesaplamak için Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) uygulanmaktadır (Moallem et al., 1991). ARM'lerin elektromanyetik özelliklerini hesaplamak için bilgisayar tabanlı yöntemleri tartıştılar (Gobbi et al., 2008). Miller ve McGilp, analitik ve hızlı bir yöntem sunar. Bu yöntem hızlı bilgisayar destekli tasarım ve hesaplama amaçları için kullanılabilen anahtarlama relüktans motorlarının statik özelliklerini hesaplamak için uygulanır (Miller et al., 1990). Yapılan çalışmada deneysel çalışmalar kullanılarak 4 fazlı anahtarlama relüktans motorunun statik özellikleri belirlenmiştir (Chancharoensook et al., 2001). Necip Besenek dış aralığının hava boşluğu uzunluğu oranına göre daha yüksek değerlere sahip yapılar için kullanılmak üzere sonlu elemanlar yöntemini kullanarak verileri genişletti (Besenek, 1988). İbrâhim bu verilerin doğruluğunu Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanarak araştırdı (Mahariq, 2009). Önceki çalışmalarda veri sayısı sınırlıydı ve verileri tahmin etmek için enterpolasyon kullanıldı. Üretim prosedürü yazılımın içine yerleştirilmiş Maxwell 2B parametrik çözüm seçeneği kullanılarak gerçekleştirilir. ARM'ler (Anahtarlama Relüktans Motorlar) yapısal olarak senkron makinelerle benzerlik gösterse de stator ve rotorlarındaki çıkıntılı yapı ile rotorlarında mıknatıs veya sargı bulunmaması nedeniyle diğer elektrik makinelerinden ayrılır ve çalışma prensipleri bu nedenle farklılık gösterir. ARM'lerin (Anahtarlama Relüktans Motorlar) çalışma prensibi relüktans kuvvetine dayanır. ARM'ler çıkıntılı rotorun, manyetik akının en kısa yoldan geçebilmesi için en düşük relüktansa sahip konuma çekilmesi prensibiyle çalışır. Bu nedenle ARM'lerde elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesi relüktans kuvveti ile sağlanır. Relüktans kuvveti rotor kutbunun statora göre konumunu belirleyerek uygun faz sargılarının uyarılmasıyla sürekli bir döndürme momenti oluşturur (Diril, 1999). Literatürde "More electric aircraft" olarak adlandırılan yeni nesil hava araçlarında artık pnömatik, hidrolik güçle çalışan çok hantal, yavaş sistemler yerine elektrik makineleriyle çalışan sistemler tercih edilmektedir. Zorlu şartlarda nadir toprak elementinin kullanıldığı mıknatısların sıcaklık sebebiyle performanslarının düşmesiyle birlikte demagnetizasyon olma olasılıkları vardır. Bu sebeple mıknatıslı senkron makinelerin yerine Anahtarlama Relüktans Makine kullanılmaktadır (Radun et al., 1995; Wang et al., 2022; Skvarenina et al., 1996). ARM'lerin kullanıldığı

alanlar şöyle verilebilir; Elektrikli ev aletleri, demiryolu ve hafif raylı sistemler, otomotiv sektörü, iş makineleri, tekstil sektörü, havacılık, madencilik, enerji üretimi gibi birçok alanda elektrikle çalışan motorların kullanımına yönelik gelişmeler artmaktadır (Özoğlu, 1999; Elhomdy et al., 2018; Krishnan, 2001). Ayrıca yazıcılar, tarayıcılar, çizim cihazları, el tipi matkaplar, forkliftler, bulaşık ve çamaşır makineleri, tren klimaları ve uzay sanayi gibi çeşitli alanlarda da elektrikli motor uygulamaları hız kazanmıştır. Canterbury Üniversitesi'nin elektrik-elektronik mühendisliği bölümü 1974'te yaşanan petrol krizinden bu yana elektrikli taşıtlar için araştırmalar yapmaktadır. Bu kapsamda öncelikle kara taşıtlarında kullanılacak indüksiyon motorları geliştirilmiş; daha sonra Toyota'nın EV3 adlı spor aracı için özel bir motor tasarlanarak bu alandaki çalışmalara katkı sağlanmıştır (Takau, 2003). Anahtarlamalı relüktans motorunun ismi Rotorun konumuna bağlı olarak stator ve rotor kutupları arasındaki hava boşluğunun relüktansı değişiklik göstermektedir. Bu durum rotor konumuna göre faz sargılarının sırasıyla anahtarlanarak enerjilendirilmesi ile oluşmaktadır (Bal, 2004). Fırçasız DC motorun verimi biraz daha yüksek görünse bile kullanılan faz akım değeri anahtarlamalı relüktans motora (ARM) göre daha yüksektir (Kokernak et al., 2002). Tork-hız karakteristiği incelendiğinde ARM'nin fırçasız DC motora göre üstün olduğu ancak ARM'lerdeki tork dalgalanmasının etkisinin göz önünde bulundurulması gerektiği belirtilmiştir (Kokernak et al., 2002). Toplam maliyet incelendiğinde ise ARM'lerin avantajlı olduğu anlaşılmıştır (Kokernak et al., 2002). Davis, çıkık kutuplu geleneksel rotor tasarımını; silindirik, manyetik olmayan veya eksenel laminasyonlu manyetik malzemelerle üretilmiş rotor tasarımları ile kıyaslamıştır. Yapılan analiz sonucunda, maksimum eşdeğer akı yoğunluğu ve bakır kayıpları açısından değerlendirildiğinde geleneksel rotor tasarımının rotor hacmi açısından %20; stator uç sargı hacmi açısından ise %100 oranında daha avantajlı olduğunu vurgulamıştır (Davis, 1988). Vladan ve Slobadan, geniş güç aralığına hitap eden üç fazlı asimetrik bir ARM tasarımı için sistematik bir yöntem geliştirmişlerdir. Çalışmalarında fazlardaki sarım sayılarının farklı olması durumunda daha geniş güç aralıklarını kapsayan ARM yapılarının elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Karşılaştırma için kullanılan konvertör yapıları aynı biçimde seçilmiş ve analizler deneysel olarak doğrulanmış bir ARM modeli üzerinde gerçekleştirilmiştir. Simetrik ARM yapısının asimetrik yapıdan daha iyi dinamik performans sağladığı ifade edilmiş ayrıca asimetrik yapının beklenenden düşük sonuçlar verdiği görülmüştür (Vujicic et al., 2006). Stator ve rotor kutup sayısının artırılması durumunda aynı maksimum moment değeri için rotor kutuplarına etki eden radyal kuvvet azaldığından anahtarlamalı relüktans

motorlarında (ARM) titreşime bağlı gürültü seviyesinde azalma meydana gelir. Ancak stator ve rotor kutup sayısının artması fazların anahtarlama frekansını artırdığı için demir kayıplarında belirli bir artış yaşanabilir. Öte yandan stator ve rotor kutup sayısının artışı ile fazların akı yolları kısalır ve bu durum manyetik devrede akının izlediği yoldaki demir kayıplarında bir miktar azalma sağlar (Omaç, Kürüm ve Selçuk, 2007). Anahtarlama relüktans motorlarında (ARM) üretilen moment akımın karesi ve endüktans değerlerine bağlı olarak değişiklik gösterir. Stator ve rotor kutup sayıları düşük olduğunda endüktansta daha büyük dalgalanmalar oluşur ve bu durum daha yüksek moment üretimine imkân sağlar. Ancak stator ve rotor kutup sayıları arttıkça, faz endüktansları arasındaki minimum ve maksimum değerler arasındaki fark azalır ve bu da aynı faz akımında üretilen moment miktarının düşmesine yol açar.

Anahtarlama Relüktans Motorları (ARM'ler) aşağıda sıralanan birçok avantaja sahiptir:

1. Basit ve Sağlam Yapı: ARM'lerin rotorunda sargı veya mıknatıs bulunmaz bu da motorun yapısını basitleştirir ve sağlamlığını artırır. Bu özellik motorun güvenilirliğini artırır ve uzun ömürlü olmasını sağlar.
2. Düşük Maliyet: Rotor ve statorun basit yapısı nedeniyle üretim maliyetleri düşüktür. Ayrıca nadir toprak mıknatıslarına ihtiyaç duyulmaması maliyetleri daha da düşürür.
3. Yüksek Başlangıç Torku: ARM'ler düşük hızlarda yüksek tork üretebilme yeteneğine sahiptir bu da özellikle yüksek başlangıç torku gerektiren uygulamalarda avantaj sağlar.
4. Yüksek Verimlilik: ARM'ler yüksek verimlilikte çalışabilirler, çünkü rotor kayıpları yoktur ve enerji dönüşümü esnasında daha az ısı üretirler.
5. Düşük Bakım Gereksinimi: Fırça veya kollektör gibi aşınan parçalar olmadığı için bakım gereksinimi düşüktür. Bu da operasyonel maliyetleri azaltır.
6. Yüksek Güvenilirlik: Basit ve dayanıklı yapısı sayesinde ARM'ler zorlu çalışma koşullarında bile yüksek güvenilirlik sunar.
7. Geniş Hız Aralığı: ARM'ler geniş bir hız aralığında verimli çalışabilirler. Bu özellik, farklı uygulamalarda esneklik sağlar.
8. Yüksek Tork Yoğunluğu: ARM'ler boyutlarına göre yüksek tork üretebilirler. Bu da daha kompakt tasarımlar yapmayı mümkün kılar.

9. Isıl Dayanıklılık: Rotor yapısında sargı veya mıknatıs bulunmaması ARM'lerin yüksek sıcaklıklarda çalışabilmesini sağlar.
10. Manyetik Alan Kontrolü: Rotor ve stator arasındaki manyetik alan kontrol edilebilir bu da ARM'lerin dinamik performansını artırır.
11. Senkronizasyon ve Kontrol Kolaylığı: Elektronik kontrol sistemleri sayesinde ARM'lerin senkronizasyonu ve kontrolü kolaydır.

Anahtarlama Relüktans Motorları (ARM'ler), birçok avantaja sahip olmakla birlikte, bazı dezavantajları da vardır. Bu dezavantajlar aşağıda sıralanmıştır:

1. Yüksek Gürültü ve Titreşim: ARM'ler çalışırken yüksek seviyede akustik gürültü ve titreşim üretebilir. Bu, manyetik kuvvetlerin stator ve rotor arasında ani değişimlerinden kaynaklanır.
2. Kontrol Zorluğu: ARM'lerin doğru çalışması için hassas bir kontrol sistemi gereklidir. Bu motorların kontrol algoritmaları ve sürücü devreleri karmaşıktır ve özel tasarım gerektirir.
3. Rotor Konum Algılayıcı Gereksinimi: ARM'lerin verimli çalışabilmesi için rotor pozisyonunun hassas bir biçimde belirlenmesi gerekir. Bu da ek sensörler ve algılayıcılar kullanmayı gerektirir.
4. Tork Dalgalanmaları: ARM'ler belirli çalışma koşullarında tork dalgalanmaları (ripple) yaşayabilir. Bu dalgalanmalar, motorun performansını ve hassas kontrolünü olumsuz etkileyebilir.
5. Düşük Güç Faktörü: ARM'ler genellikle düşük bir güç faktörüne sahiptir, bu da enerji verimliliğini düşürür ve güç elektroniği devrelerinin tasarımını zorlaştırabilir.
6. Karmaşık Tasarım ve Üretim: ARM'lerin stator ve rotor tasarımı ve üretimi, hassas ölçümler ve yüksek toleranslar gerektirir. Bu da üretim sürecini zorlaştırabilir ve maliyetleri artırabilir.
7. Düşük Moment Hassasiyeti: ARM'lerin moment (tork) kontrolü, bazı uygulamalarda istenilen hassasiyeti sağlamayabilir. Bu, özellikle hassas pozisyonlama gerektiren uygulamalarda bir dezavantaj olabilir.
8. Elektromanyetik Parazit (EMI): ARM'ler yüksek anahtarlama frekansları nedeniyle elektromanyetik parazit (EMI) oluşturabilirler. Bu parazitler, diğer elektronik cihazların çalışmasını olumsuz etkileyebilir.

9. Genişleyememe: ARM'lerin genişletilmesi ve farklı uygulamalara adapte edilmesi zor olabilir. Her uygulama için özel tasarım ve optimizasyon gerektirebilirler.
10. Sıcaklık Kontrolü Zorlukları: ARM'lerin çalışması sırasında üretilen ısının yönetimi ve dağıtılması zordur. Yüksek sıcaklıklarda çalışıklarında verimlilik düşebilir ve bileşenlerin ömrü kısalsabilir.

Bu dezavantajlar ARM'lerin belirli uygulamalarda kullanımını sınırlandırabilir ve tasarım sürecinde dikkate alınması gereken önemli faktörlerdir.

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak 6/4 anahtarlamalı relüktans motorunun (ARM) tasarım süreçlerini geliştirmek ve performans parametrelerini optimize etmektir. ARM'lerin yüksek verimlilik ve tork üretimi gibi avantajlarından faydalanarak elektrikli sürüş sistemlerinde daha etkin bir düzeyde kullanılabilmeleri hedeflenmektedir. Bu bağlamda özellikle tork dalgalanmalarının azaltılması, moment üretiminin iyileştirilmesi ve ARM'lerin çeşitli uygulama alanlarındaki kullanım potansiyelinin artırılması amaçlanmıştır.

Çalışma kapsamında motorun manyetik devre tasarımı, moment üretimi, verimlilik ve tork dalgalanmaları gibi kritik performans parametrelerinin analiz edilmesi ve optimize edilmesi hedeflenmiştir. ANSYS RMXprt ve ANSYS Maxwell 2D yazılımları kullanılarak motorun temel tasarım parametrelerinin belirlenmesi ve manyetik alan simülasyonlarının gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Bu simülasyonlar sayesinde motorun geometrik yapısındaki değişimlerin performansa etkilerinin detaylı olarak incelenmesi amaçlanmaktadır.

Motorun anahtarlama açıları gibi önemli tasarım parametrelerinin MATLAB Simulink ortamında analiz edilmesi ve tork dalgalanmalarının etkilerinin kontrol altına alınması hedeflenmiştir. Böylelikle motorun dinamik davranışlarının simüle edilmesi ve performansının artırılması amaçlanmaktadır. Bu süreçte motorun verimlilik, moment üretimi ve genel performansını etkileyen parametrelerin en iyi şekilde optimize edilmesi planlanmıştır.

Sonuç olarak ARM tasarımına yönelik bu çalışmada SEY'nin sağladığı detaylı analiz imkanları kullanılarak yenilikçi tasarım yaklaşımları geliştirilmesi ve ARM'lerin daha geniş bir uygulama alanında kullanılabilirliğinin artırılması hedeflenmektedir. Bu doğrultuda motor performansını etkileyen kritik faktörlerin detaylı olarak ele alınması ve iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

1.2. Anahtarlamalı Relüktans Motorlar İçin Sürücü Devreleri

Anahtarlamalı relüktans motorlarda (ARM) tork dalgalanmaları, titreşim ve akustik gürültü gibi dezavantajlar bulunmaktadır (Rodrigues et al., 2001). Güç elektroniği ve bilgisayar teknolojisindeki ilerlemeler anahtarlamalı relüktans motorların (ARM) kontrolünde başarılı uygulamalara olanak tanımıştır. Güç elektroniği devreleri ile kontrol edilen elektrik motorlarında hız ve tork optimize edilerek verimlilik artırılabilir. Ancak bu kontrol devrelerinin maliyeti, boyutu ve karmaşıklığı sağladıkları avantajları sınırlayabilir. Bu nedenle elektronik kontrollü elektrik motorlarının kullanım alanları genellikle sınırlı kalmaktadır. Bu motorların daha geniş bir kullanım alanı bulabilmesi için basit, maliyet etkin ve kararlı kontrol devrelerinin tasarlanması gerekmektedir. Ray ve ekibi, GTO ve BJT kullanılan iki farklı ARM konverter devresini kıyaslamışlardır. Konum ve akım sensörleri olmadan gerçekleştirilen bu çalışmada Mac Minn ve ekibi, 6/4 kutuplu, 5.5 A akım ve 450 W gücünde bir ARM'yi mikroişlemci tabanlı bir sistem ile kontrol etmiştir. Bu süreçte rotorun konumu faz endüktansı ölçümleri kullanılarak belirlenmiş ve faz akımı güç MOSFET'leri üzerinden algılanarak kontrol sağlanmıştır (Omaç, 2006). Krishnan ve ekibi, Siemens SAB 80535 mikroişlemcisini kullanarak 6/4 kutuplu bir ARM'nin kapalı çevrim akım ve hız kontrolünü etkin bir biçimde uygulamışlardır (Krishnan et al., 1990). Kjaer ve ekibi, 6/4 ARM ve 8 bitlik 80C517A mikroişlemcisini kullanarak yapılan bir çalışmada, gerilim kontrollü ARM'de enerji tüketimini düşürüp verimliliği artırmayı amaçlayan bir iletim açısı kontrol algoritması geliştirmişlerdir (Kjaer et al., 1995). Duran, TMS320F2812 dijital sinyal işlemci ile akım ve gerilim sensörlerini kullanarak, endüstriyel çamaşır makinelerinde kullanılan ARM'nin akıllı kontrolünü gerçekleştirmiştir (Duran, 2008). Omaç ve ekibi, 18/12 kutuplu bir ARM'nin tasarımını, analizi ve kontrolünü ele aldıkları çalışmalarında kapalı çevrim hız kontrolünü

TMS320LF2407A sayısal sinyal işlemcisi ile başarıyla uygulamışlardır (Omaç, Kürüm ve Selçuk, 2007). Kjaer ve ekibi, 32 bitlik Motorola MC68332 mikroişlemci kullanarak 3 Hp gücünde ve 8/6 kutuplu bir ARM'nin dört çalışma bölgesinde kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada geniş bir hız aralığında moment dalgalanmalarını minimize ederek ve yüksek verim sağlayarak ARM moment kontrolünü başarıyla gerçekleştirmişlerdir (Kjaer et al., 1996). DC hattındaki dalgalanmalar hem yumuşak hem de sert anahtarlama modlarında sonlu eleman analizi ile incelenmiştir. İki mod arasında yapılan karşılaştırmada sert anahtarlama durumunda DC hat kapasitörü üzerinde daha fazla dalgalanma gözlemlenmiştir; bu durumun akım değişim oranının yüksek olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir (Choi et al., 2005). Ayrıca DC hattı ve serbest dolaşım diyotu üzerindeki dalgalanmaların etkileri göz önüne alındığında tork dalgalanmalarının azaltılabileceği sonucuna varılmıştır. ARM'nin kontrolünde kullanılan konvertör yapısının sistemin genel performansını etkilediği vurgulanmıştır (Liptak, 2004). Motor değerlendirilirken motor kayıpları ve tork dalgalanmalarının da dikkate alınması gereken önemli unsurlar olduğu ifade edilmiştir (Liptak, 2004).

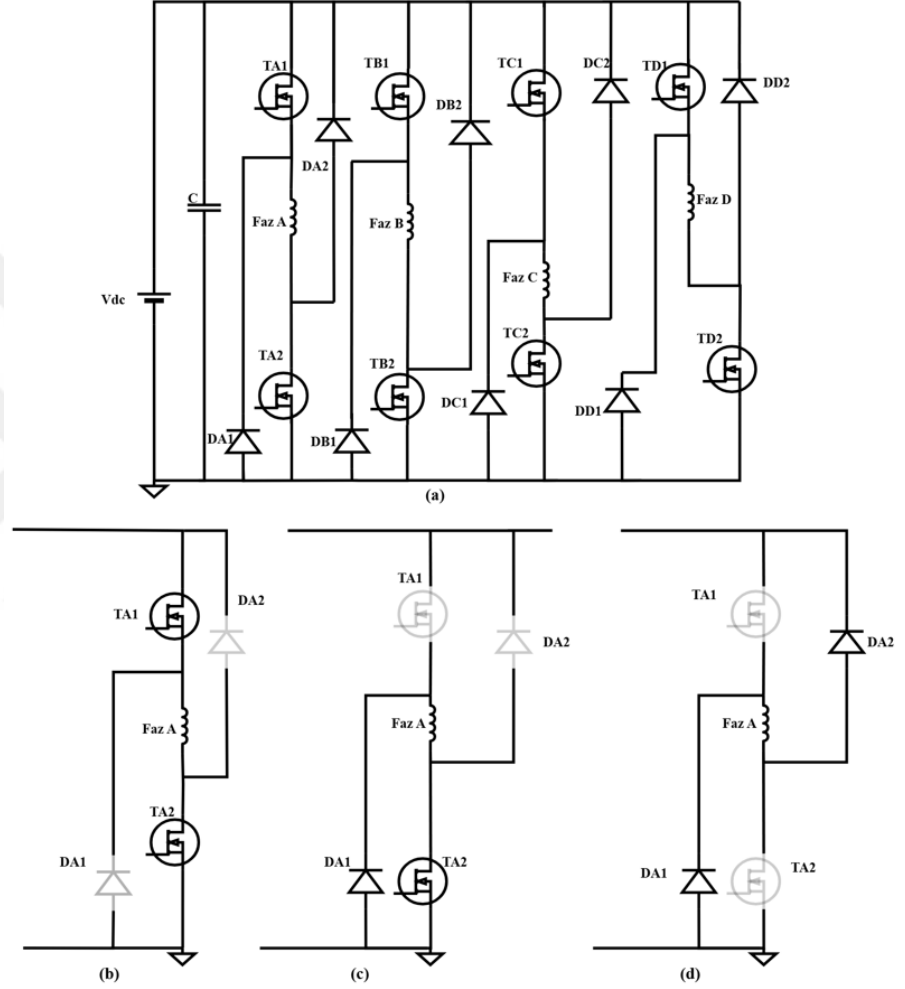
1.2.1. Asimetrik Yarım Köprü Dönüştürücüsü

Klasik köprü tipi dönüştürücü devrelerinde anahtarlama relüktans motorunun (ARM) faz sayısının iki katı kadar güç anahtarı elemanı bulunmaktadır. Bu devre yapılarında fazlar bağımsız olarak çalıştığından her bir fazın ayrı bir biçimde kontrol edilmesi mümkündür. Ayrıca bu sistemlerde kullanılan anahtarlar düşük gerilim seviyelerinde işlev göstermektedir. Şekil 1.1'de asimetrik yarım köprü dönüştürücü devresi gösterilmiştir.

Bu klasik dönüştürücü topolojisinin avantajları şunlardır (Deepak et al., 2022):

- Her faz diğer fazlardan tamamen bağımsız olarak kontrol edilebilir.
- Tüm anahtarlama cihazları ve diyotlar düşük bir voltaj olan V_{dc} voltaj seviyesinde çalışır.

- Kesme süresi boyunca dönüştürücü düşük hızlarda serbest çalışabilir bu da anahtarlama frekansını ve dolayısıyla dönüştürücünün anahtarlama kayıplarını en aza indirir.
- Önceki fazdan gelen enerji geri beslenerek etkin bir biçimde kullanılabilir.



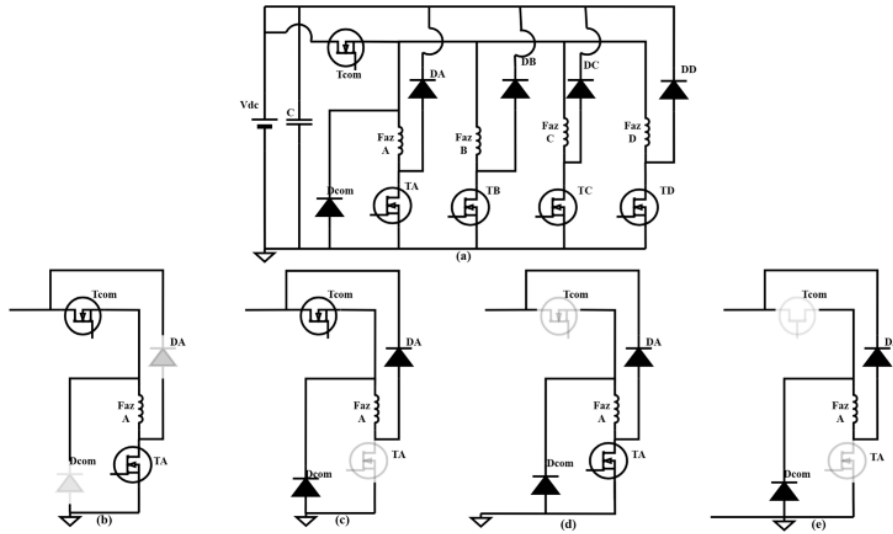
Şekil 1.1. (a) 4 Fazlı ARM İçin Asimetrik Yarım Köprü Dönüştürücü, (b) Magnetization Modu, (c) Freewheeling Modu, (d) Demagnetization Modu.

1.2.2. Ortak Anahtarlı Dönüştürücü (Miller Devresi)

Miller tarafından geliştirilen ve Miller dönüştürücü olarak da bilinen paylaşımlı anahtarlı asimetrik yarı köprü dönüştürücüler tanıtılmıştır (Miller, 1993). Dört fazlı ARM'ler için tasarlanan $(n+1)$ anahtar dönüştürücüsü Şekil 1.2(a)'da gösterilmiştir. Asimetrik yarı

köprü dönüştürücü ile karşılaştırıldığında, $(n+1)$ anahtar dönüştürücüsünde asimetrik yarım köprü dönüştürücüsündeki köprülerin yarısı ortak anahtar ve diyottan oluşan bir köprü ile değiştirilmiştir. Şekil 1.2(b) ile (e)'de üç çalışma modu gösterilmiştir. Düşük hızlı uygulamalarda, $(n+1)$ dönüştürücüsünün performansı asimetrik yarım köprü dönüştürücüsü ile aynıdır. Ancak motor yüksek hızda çalıştığında, bir sonraki fazın mıknatıslanma periyodu sırasında ortak anahtarın açılması, önceki fazın manyetikliğini giderir bu da faz akımının serbest tekerlekle sıfıra inmesini engeller ve hata toleransını azaltır. Ayrıca ortak anahtar ve diyottan geçen akım tüm fazların akımlarının toplamına eşittir bu da ortak anahtar ve diyottaki akım stresinin diğer cihazlardan daha yüksek olduğu anlamına gelir. Bu ortak anahtarlı topolojisinin avantajları şunlardır (Deepak et al., 2022):

- Dönüştürücü kesme sırasında anahtarlama frekansını ve serbest tekerleği azaltarak kayıpları azaltabilir.
- Dönüştürücü daha az anahtarlama bileşeni kullandığı için daha az maliyetlidir.
- Tüm anahtarlama cihazları ve diyotların düşük bir voltaj olan V_{dc} voltaj derecesi vardır.
- Devre dışı fazda kullanılan enerji kaynağa geri döndürülür bu da daha etkili enerji kullanımı ve daha yüksek verimlilikle sonuçlanır.



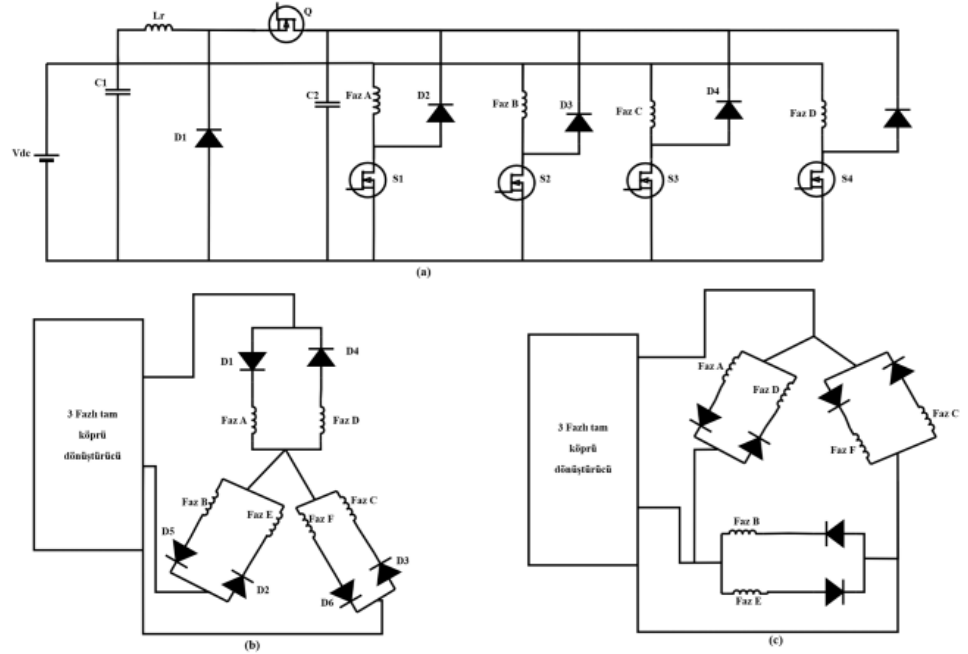
Şekil 1.2. (a) 4 Fazlı ARM İçin Miller Dönüştürücü, (b) Magnetization Modu, (c) ve (d) Freewheeling Modu, (e) Demagnetization Modu.

1.2.3. C-dump Dönüştürücü

C-dump dönüştürücü, relüktans motorundaki faz değiştirme işlemi sırasında daha hızlı manyetikliğini kaybederek enerji verimliliği sağlar. Kapasitöre boşaltılan enerji doğrudan bir sonraki fazda kullanılır ve DC kaynağına geri döndürülmez. Bir indüktör ve kapasitörden oluşan filtre devresi dönüştürücüye eklenerek güç kaynağına geri beslenen enerji azaltılır. Dört fazlı bir ARM'de kullanılan standart bir C-dump dönüştürücüsü Şekil 1.3(a)'da gösterilmiştir. Bu devrede kapasitör voltajı kısıyıcının giriş voltajı olarak işlev görür ve bu nedenle bir indüktör gereklidir. Standart C-dump dönüştürücüsünde kullanılan indüktör ek kayıplara neden olabilir. Altı fazlı ARM için tam köprü dönüştürücüsünün iki topolojisi Şekil 1.3(b) ve (c)'de sunulmuştur.

C-dump dönüştürücünün başlıca avantajları şunlardır (Deepak et al., 2022):

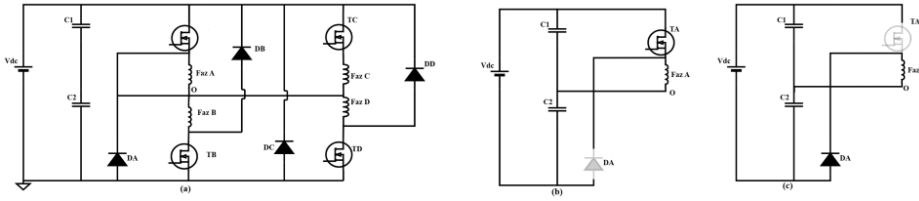
- Bu tasarımda daha az sayıda güç yarı iletken anahtarlama cihazı bulunur ve sadece bir anahtar ileri voltaj kaybına sahiptir.
- Güç yarı iletken dönüştürücü maksimum rejeneratif modda çalışabilir.
- Komütasyon sırasında fazlar daha hızlı manyetikliğini kaybeder.
- Fazlar arasında geçiş yapmak mümkündür.



Şekil 1.3. (a) 4 Fazlı ARM İçin C-Dump Dönüştürücü, (b, c) 4 Fazlı ARM İçin Tam Köprü Dönüştürücü.

1.2.4. Split DA Link Dönüştürücü

Şekil 1.4(a)'da dört fazlı bir ARM'de kullanılan bir split dönüştürücü gösterilmiştir ve Şekil 1.4(b) ile (c)'de iki çalışma modu sunulmuştur. Bu dönüştürücüde yalnızca DC voltajın yarısı kullanılır ve orta noktadaki voltajı dengelemek için iki kapasitöre ihtiyaç duyulur. Split dönüştürücüde her zaman iki fazın aynı anda iletilmesi gerekir; bu nedenle bu dönüştürücüyü kullanabilmek için birden fazla faza sahip bir ARM gereklidir. Bu dönüştürücünün başlıca dezavantajları orta nokta voltajındaki dalgalanmalar ve düşük hata toleransıdır.



Şekil 1.4. (a) 4 Fazlı Bir ARM İçin Split Dönüştürücü, (b) Magnetization Modu, (c) Demagnetization Modu.

1.2.5. Bifilar Sargılı Dönüştürücü

Bu topolojide faz sarımı manyetik olarak bağlanmış olup rotor pozisyonuna ve faz akımı geri beslemesine göre denetleyiciye bağlıdır. Histerezis kontrol döngüsüne dayanan referans akım kullanılarak Anahtar açıldığında fazlar (manyetik olarak bağlanmış) enerjilenir ve güç faz sargısına akar. Manyetizmayı gidermek için Anahtar kapatılır ve diyot açılır, bu durumda faz sargısındaki güç kullanılmaz (Touati et al., 2021). Bifilar sarımlı dönüştürücü güç yoğunluğunu azaltırken anahtarlama elemanları üzerindeki stresi artırır. Bifilar dönüştürücünün avantajları şunlardır:

- Dönüştürücü daha az sayıda anahtarlama bileşeni kullanır bu da maliyeti düşürür.
- Komütasyon sırasında güç yarı iletken dönüştürücü hızlı faz manyetizmasını sağlar.

Ancak bu dönüştürücünün dezavantajları avantajlarından fazladır. Fazlar V_{dc} 'yi gözlemlediğinden kıyma sırasında serbest tekerlekleme mümkün değildir bu da daha yüksek dalgalanma akımı ve tork

yaratır. Bu dönüştürücü her fazda iki manyetik bağlı sargıya sahip özel bir makine tasarımı gerektirir bu da makinenin maliyetini artırır ve dönüştürücü tasarruflarını azaltır. Faz komütasyonu sırasında faz anahtarı $2 \times V_{dc}$ gerilimi görür bu nedenle dönüştürücü cihazları iki kat DC gerilim seviyesinde derecelendirilmelidir. Kapatma sırasında iki sargı arasındaki bağlantı hatası nedeniyle voltaj zirveleri oluşur. Birçok uygulamada yardımcı sargının neden olduğu bakır kayıpları çok yüksektir.

Tablo 1. 3. ARM Sürücü Topolojilerinin Karşılaştırılması (Deepak et al., 2022)

Topoloji	Avantaj	Dezavantaj	Faz Başına Anahtar Sayısı	Hata Toleransı	Kontrol Zorluğu	Uygulama Alanları
Asimetrik Yarım Köprü Konvertörü	Rejeneratif frenleme yeteneği, hızlı demanyetizasyon Az tork dalgalanması	Yüksek anahtarlama cihazları	İki anahtar/faz	Minimum	Kolay	Otomobil, havacılık ve yenilenebilir enerji kaynakları
(n+1) Anahtarlama Konvertör	Güç cihazlarının sayısını azaltma, yüksek verimlilik	Aşırı EMF, daha fazla dolaşım akımı, yüksek demanyetizasyon	Bir anahtar/faz + bir ek anahtar	Minimum	Kolay	Yenilenebilir enerji kaynakları
Bifilar Sarım Konvertörü	Düşük anahtar sayısı, hızlı demanyetizasyon	Düşük verimlilik, karmaşık susturucu devresi, yüksek tork dalgalanması	Bir anahtar/faz	Maksimum	Zor	Düşük güçlü uygulamalar
Ayrık Bağlantı Konvertörü	Ekstra pasif bileşenler gerektirmez, hızlı demanyetizasyon	Yüksek anahtarlama frekansı kayıpları, düşük dinamik yanıt, hız azaltma	Bir anahtar/faz	Minimum	Orta	Enerji depolama
C-Dump Konvertörü	Düşük anahtar sayısı ile bağımsız faz kontrolü	Enerji geri kazanım devresinde kayıplar	Bir anahtar/faz	Minimum	Orta	Elektrik çekiş, yenilenebilir enerji kaynakları
Sood Konvertörü	Düşük anahtar sayısı, arıza toleransı azaltma	Karmaşık kontrol, enerji geri kazanım devresinde kayıplar	Bir anahtar/faz + bir ek anahtar	Minimum	Zor	Pompa sistemine PV kaynaklı enerji tedariki
R-Dump Konvertörü	Basit yapı, düşük anahtar sayısı, düşük maliyet	Düşük verimlilik	Bir anahtar/faz	Maksimum	Kolay	Düşük güçlü uygulamalar

1.3. Anahtarlama Relüktans Motorlar

Elektrik makineleri elektrik enerjisini mekanik enerjiye veya mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır. Temel olarak jeneratörler ve motorlar olarak iki ana kategoriye ayrılırlar. Jeneratörler mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürken motorlar elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürür. Elektrik makineleri endüstriyel

uygulamalardan ev aletlerine kadar geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir. Elektrik makineleri modern teknolojinin temel taşlarından biridir ve endüstriyel üretimden günlük yaşama kadar geniş bir yelpazede önemli bir rol oynar. Gelişen teknoloji ile birlikte bu makinelerin verimliliği ve performansı sürekli olarak artmakta ve yeni uygulama alanları ortaya çıkmaktadır.

Elektrik makinelerinin yapısı enerji dönüşümünün verimli bir biçimde gerçekleştirilmesi için dikkatlice tasarlanmış bileşenlerden oluşur. Temel olarak elektrik makineleri stator (duran kısım) ve rotor (dönen kısım) olmak üzere iki ana bölümden oluşur. Bu iki bölüm arasındaki manyetik alan etkileşimi sayesinde enerji dönüşümü sağlanır. Elektrik makinelerinin yapısı türüne ve uygulama alanına göre değişiklik gösterebilir. Ancak temel prensipler ve bileşenler genellikle benzerlik gösterir. Bu bileşenlerin her biri makinenin verimli ve güvenilir bir biçimde çalışmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir.

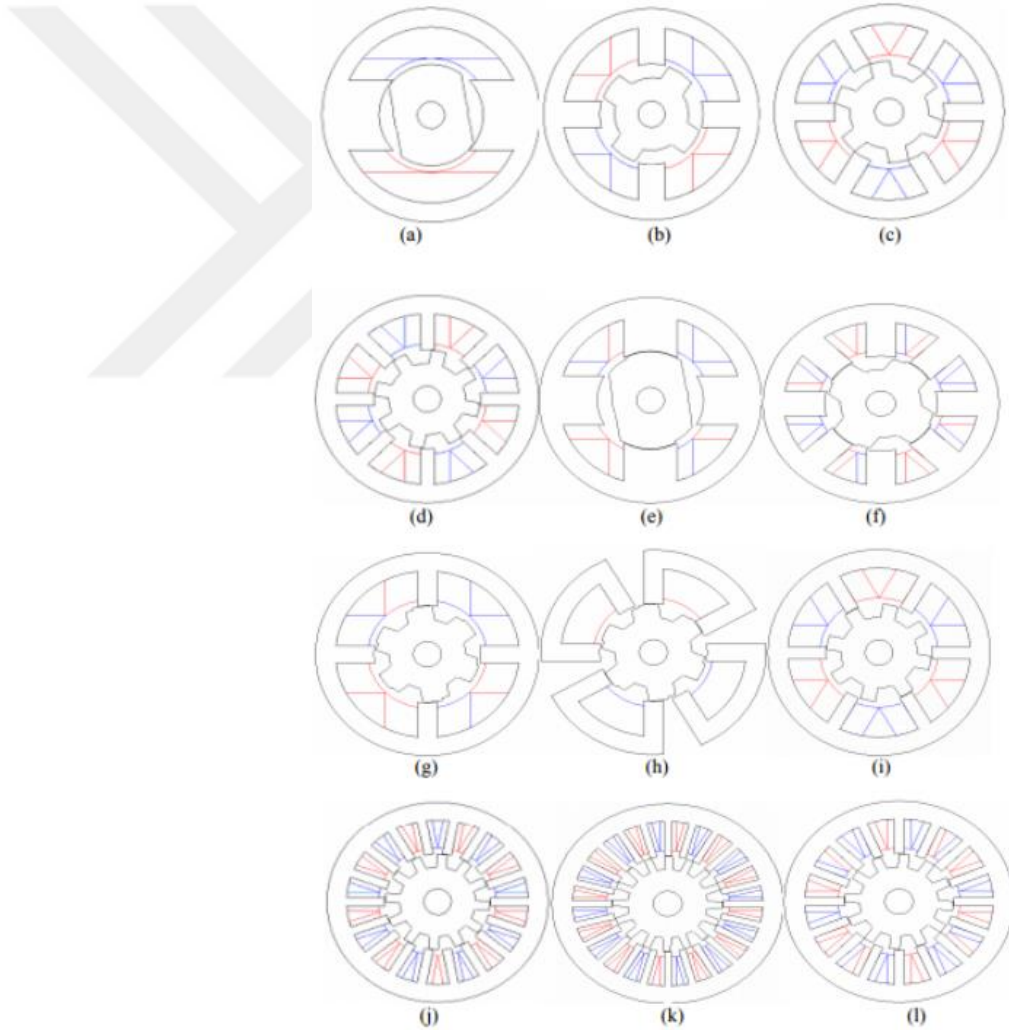
Anahtarlama relüktans motorlar (ARM) özellikleri ve yapıları itibarıyla senkron ve asenkron makinalardan belirgin şekilde farklıdır; ancak her iki türün yapısal avantajlarından yararlanılarak geliştirilmişlerdir. İlk anahtarlama relüktans motorları (ARM) senkron motorların tasarımında bazı modifikasyonlar yapılarak geliştirilmiştir. Stator ve rotorun geometrik yapılarını optimize ederek yeni tasarımlar oluşturulmuş ve bu sayede daha yüksek verimli motorlar elde edilmiştir. Bu çalışmaların ana hedefi stator ile rotor arasında bulunan hava boşluğunda depolanan enerjinin daha etkili bir biçimde kullanılmasını sağlamaktır.

Anahtarlama relüktans motorlar (ARM) yapı olarak adım motorlara benzerlik gösterir. Senkron motorların kalkış problemi bulunurken ARM'lerde rotor ve stator çıkıntılardan oluşur ve bu çıkıntı sayıları farklıdır. Bu farklılık sayesinde senkron motorlarda görülen kalkış problemi ARM'lerde yaşanmaz. Kalkış probleminin olmaması bakımından ARM'ler asenkron motorlara benzerlik gösterir. Ancak ARM'lerin en önemli farkı uygulanan gerilim yapısında yatmaktadır. Asenkron motorlarda hem rotor hem de stator alternatif gerilimle çalışırken, anahtarlama relüktans motorları (ARM) yalnızca stator sargılarına darbe akımı vererek çalışmaktadır. ARM'lerin çalışma prensibi stator sargılarına akım uygulanarak hava aralığındaki relüktansın değiştirilmesiyle rotorun hareketinin sağlanması ve böylece

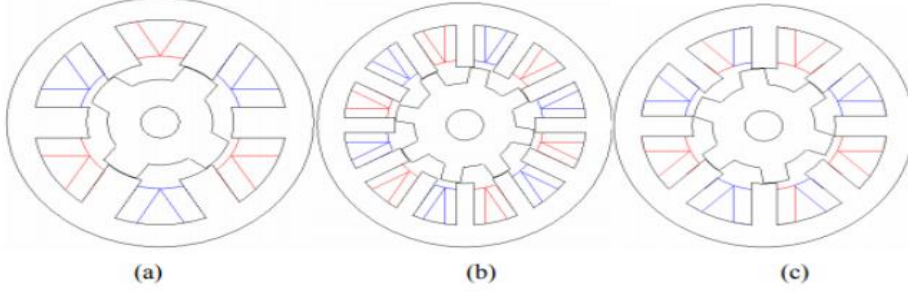
tork elde edilmesidir. Bu motorlarda rotor herhangi bir iletken veya sargı içermeyen oldukça basit bir yapıdadır.

Anahtarlama Relüktans Motor (ARM) basit ve sağlam yapısıyla dikkat çeker. ARM'nin temel bileşenleri stator ve rotordan oluşur. Bu bileşenler motorun verimli ve güvenilir çalışmasını sağlar.

Stator ve rotor kutuplarının sayısı her zaman çift sayı olmalıdır ve bu sayılar birbirine eşit olabilir veya farklılık gösterebilir. Genellikle stator kutup sayısı rotor kutup sayısından daha fazladır. ARM'nin türü stator ve rotor kutup sayıları ile belirtilir. Örneğin 12/8 konfigürasyonuna sahip bir ARM 12 stator kutbu ve 8 rotor kutbuna sahip olduğunu gösterir. Şekil 1.5'te farklı rotor ve stator konfigürasyonlarına sahip ARM'ler Şekil 1.6'da ise en yaygın ve sık kullanılan dizilimler gösterilmektedir.



Şekil 1.5. Farklı Rotor Ve Stator Konfigürasyonlarına Sahip ARM'ler (Krishnan, 2001).



Şekil 1.6. En Yaygın Ve Sık Kullanılan Dizilimler (Krishnan, 2001).

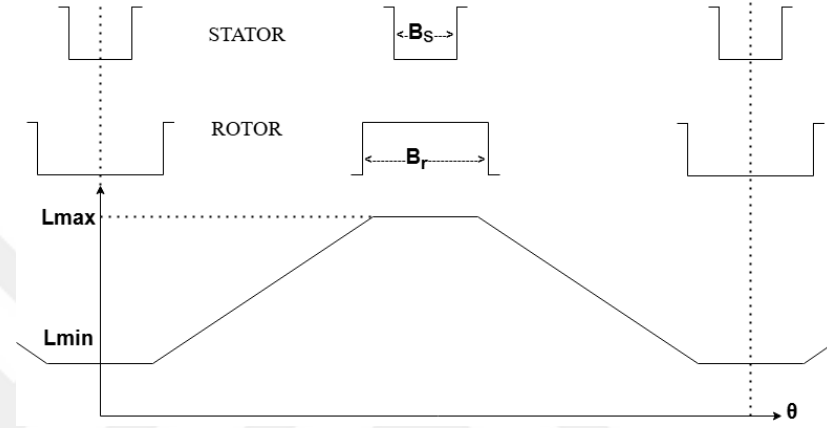
Elektrikli araç uygulamaları için kullanılacak farklı elektrik motoru sınıflarını karşılaştırdı. Karşılaştırılan motorlar Doğru Akım motoru, Fırçasız DC motoru, asenkron motor, senkron motor ve anahtarlamalı relüktans motorudur. Karşılaştırma, güç-ağırlık oranı, tork hız özellikleri, verimlilik, kontrolör maliyeti ve motor temelinde Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 1. 4. Elektrikli Araç Uygulamaları İçin Farklı Elektrik Motorlarının Özelliklerinin Karşılaştırılması (Jape et al., 2017).

Motor Tipi	Özellikler
DC Fırçalı Motor	Kontrolü kolaydır
	Düşük hızda artan tork
	Bakım maliyeti yüksektir
	Azaltılmış verimlilik
	Yüksek güç/ağırlık oranı
Fırçasız DC Motor (BLDC)	Yüksek bakım ve denetleyici maliyeti
	Yüksek verim
	Elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılır
	Daha düşük maliyetle yüksek verimlilik sağlar
Senkron Motor	Yüksek hızlarda verimli çalışır
	Sabit tork gerektiren uygulamalarda etkilidir
Anahtarlamalı Relüktans Motor	Daha düşük motor ve kontrolör maliyeti
	Yüksek verim
	Güvenilirlik
	Hata tolerans yeteneği yüksek

1.3.1. Anahtarlamalı Relüktans Motorun Çalışma Prensibi

Şekil 1.7'de rotorun statora göre konumuna bağlı olarak indüktans değişimi gösterilmiştir. Tork değerinin indüktans değişimine bağlı olması nedeniyle eğer akım indüktansı artırıcı yönde uygulanırsa döndürme momenti pozitif olur. Buna karşılık akım indüktansı azaltıcı yönde uygulanırsa negatif bir döndürme momenti oluşur.



Şekil 1.7. Rotorun Statora Göre Konumuna Bağlı Olarak İndüktans Değişimi.

1.3.2. ARM Eş Değer Devre ve Matematiksel Denklemler

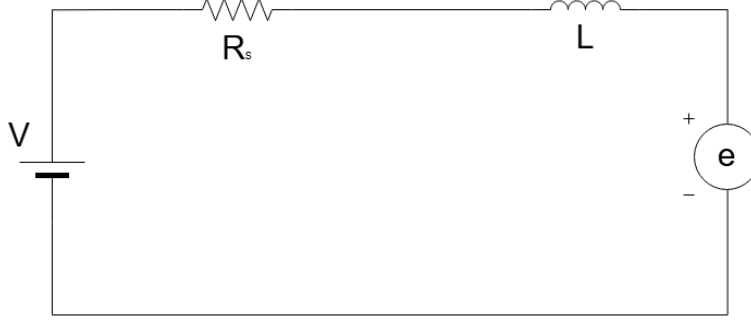
Manyetik bir devrenin relüktans denklemi Eşitlik 2'de verilmiştir.

$$\mathfrak{R} = \frac{F}{\phi} = \frac{(HI)}{(B_b S)} = \frac{1}{\mu S} \quad (2)$$

Eşitlik 1'de kullanılan terimler şu biçimde açıklanabilir: F manyeto motor kuvveti (mmk), \mathfrak{R} relüktans, ϕ akı, l manyetik yolun uzunluğu, H hava boşluğundaki manyetik alan şiddeti, B_b akı yoğunluğu, μ manyetik malzemenin manyetik geçirgenliği ve S manyetik yolun kesit alanıdır. Rotor ve stator kutupları hizalanmış pozisyonda olduğunda, relüktans en yüksek seviyeye ulaşır. Ancak stator ve rotor hizalanmış pozisyondan ayrılıp karşılıklı pozisyona doğru hareket ettikçe relüktans azalır. Stator ve rotor kutupları tam karşı karşıya geldiğinde manyetik geçirgenlik maksimuma ulaşır ve relüktans en düşük seviyeye iner. ARM'lerde indüktans ve relüktans arasındaki ilişki Eşitlik 3'te belirtilen biçimde ifade edilebilir.

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{(N\phi)}{i} = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} \quad (3)$$

Eşitlik 3'te i ifadesi faz akımını, λ ifadesi halkalanma akısı değerini ve N ifadesi ise faza ait sarım sayısını temsil etmektedir. Şekil 1.8'de anahtarlama relüktans motorunun (ARM) bir tek fazına ait eşdeğer devre şeması sunulmuştur.



Şekil 1. 8. Anahtarlama Relüktans Motorunun (ARM)

Tek Fazına Ait Eşdeğer Devre Şeması.

Şekil 1.8'deki devrede R_s terimi her faz için stator sargılarının direncini, L terimi ise indüktansı temsil etmektedir. Bu devrede her bir faza uygulanan gerilim miktarı, Eşitlik 4'teki formülle hesaplanabilir. Giriş gücü ise Eşitlik 5 ve Eşitlik 6'da verilmiştir.

$$V = R_s \times i + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (4)$$

$$p_i = V \times i = R_s \times i^2 + i^2 \times \frac{dL(\theta, i)}{dt} + L(\theta, i) i \frac{di}{dt} \quad (5)$$

$$p_i = R_s \times i^2 + \frac{di}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (6)$$

Eşitlik 5'te giriş gücü çeşitli bileşenlere ayrılmıştır. $R_s \times i^2$ ifadesi sargı kayıp gücünü, $p[L(\theta, i) i^2 / 2]$ ifadesi alan enerjisinin değişim oranını, $[i^2 pL(\theta, i)] / 2$ ifadesi ise hava aralığı gücünü temsil eder. Bu bileşenlerin toplamı giriş gücünü verir.

Hava aralığı gücü rotorun belirli bir pozisyon ve hızda etkilerini göz önünde bulunduracak biçimde zaman ifadesine rotor pozisyonu ve hız terimleri yerleştirilerek hesaplanabilir. Bu rotorun hareketi ve konumu doğrultusunda hava aralığındaki güç dağılımını ifade eder.

$$p_{ag} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \frac{d\theta}{dt} \quad (7)$$

$$p_{ag} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (8)$$

Eşitlik 7 ve 8 elde edilir.

Hava aralığı gücü ile elektromanyetik tork ve hız arasındaki ilişki Eşitlik 9'da verilmiştir:

$$p_{ag} = T \times \omega_m \quad (9)$$

Motora ait tork Eşitlik 10'da gösterilmiştir.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (10)$$

1.3.3. Hava Aralığı (g)

Anahtarlamalı relüktans motorlarının performansını optimize etmek için dengeli faz akımlarının sağlanması ve akustik gürültünün minimize edilmesi önemlidir. Bunun için düzgün bir hava aralığı ve etkili bir yataklama sistemi gereklidir. Yüksek tork değerlerinin elde edilmesi amacıyla hava aralığının mümkün olduğunca küçültülmesi sağlanmalıdır. İmalat koşulları ve yataklama kolaylığı göz önünde bulundurularak hava aralığı değeri 0,3 mm olarak belirlenmiştir.

1.3.4. Kutup Yayları (β_s , β_r) Açısı

Motorun kutup yayları tasarlanırken iki temel faktöre dikkat edilmelidir. İlk olarak hizalanmış konumda indüktansın maksimuma çıkarılması için kutup yaylarının mümkün olduğunca geniş seçilmesi gerekmektedir. Bu çevre akılarının en üst düzeye çıkmasını sağlar. İkinci olarak kutup yaylarının fazla geniş olması stator sargılarının uygun biçimde yerleştirilebilmesi için yeterli açıklık sağlanmasını zorunlu kılar. Kutup genişlikleri β_s ve β_r , Lawrenson'un 1980 yılında tanımladığı "optimum üçgen" alanı içinde belirlenmelidir. Bu belirleme işlemi, motorun performansını maksimize etmek için kritik bir öneme sahiptir (Liptak, 2004). Bu üçgen anahtarlamalı relüktans motorunda en yüksek torkun sağlanması için gerekli olan β_s ve β_r değerlerini tanımlar. β_s ve β_r değerlerine göre stator ve rotor yayının uzunlukları olan t_s ve t_r Eşitlik 11 ve Eşitlik 12'deki gibi bulunabilir. Bu çalışmada parametreler parametrik yöntem kullanılarak elde edilmiştir. D stator iç çapıdır.

$$t_s = 2 \times \frac{D}{2} \times \sin\left(\frac{\beta_s}{2}\right) \quad (11)$$

$$t_r = 2 \times \frac{D-2g}{2} \times \sin\left(\frac{\beta_r}{2}\right) \quad (12)$$

1.3.5. Rotor Oyuk Derinliği (d_r)

Rotorun oyuk derinliği hizalanmamış indüktansı elde etmek amacıyla hava aralığının en az 20-30 katı kadar olmalıdır. Eşitlik 13'te t_s Stator yuvası genişliğini ifade eder.

$$d_r = \frac{t_s}{2} \quad (13)$$

1.3.6. Rotorun Boyunduruk Kalınlığı (y_r), Stator Boyunduruk Kalınlığı (y_s)

Rotorun boyunduruk kalınlığı doygunluk olmaksızın tepe rotor akımını taşıyabilecek yeterlilikte olmalıdır. Eşitlik 14 ve 15'te t_r ve t_s sırasıyla stator yuva genişliği ve rotor yuva genişliği olarak ifade edilebilir.

$$0.5t_r < y_r < 0.9t_r \quad (14)$$

$$0.5t_s < y_s < 0.7t_s \quad (15)$$

1.3.7. Stator Bobinin Yüksekliği (d_s)

Stator bobini oyuk yüksekliği sargı alanını maksimize etmek ve bakır kayıplarını en aza indirmek amacıyla yeterli bakırın rahatça yerleştirilebilmesi için mümkün olduğunca büyük seçilmelidir (Gürdal, 2001). Denklem 16'da Stator Bobininin Yüksekliği gösterilmektedir. Eşitlik 16'da r_3 statorun dış yarıçapını, d_d statorun iç çapını, g rotor ve stator arasındaki hava aralığını temsil etmektedir.

$$d_s = \frac{1}{2} \times [2 \times r_3 - (d_d - 2 \times g) - 2 \times (g + y_s)] \quad (16)$$

1.3.8. Stator Kutup Yüksekliği (h_s)

Stator bobinin yüksekliği belirlendikten sonra, bu değer rotorun hareketini kısıtlamayacak bir ölçüt çerçevesinde sınırlandırılması gerekmektedir. Stator kutup yüksekliği ise belirlenen stator bobin yüksekliğinden daha fazla olmalıdır (Gürdal, 2001). Eşitlik 17'de h_s ifade edilmektedir.

$$d_s < h_s < 1.4d_s \quad (17)$$

1.3.9. Adım Açısı (ϵ)

Tasarlanan motorun her bir anahtarlama sonrası rotorun döndüğü açı denklem 18 ile ifade edilmektedir. Denklem 19'da S_a anahtarlama

relüktans motorun bir tam tur dönmesi için gerekli olan anahtarlama sayısını ifade eder. Denklem 19'da m faz sayısını N_r ise rotor kutup sayısını temsil etmektedir.

$$\varepsilon = 360^\circ / S_a \quad (18)$$

$$S_a = m \times N_r \quad (19)$$

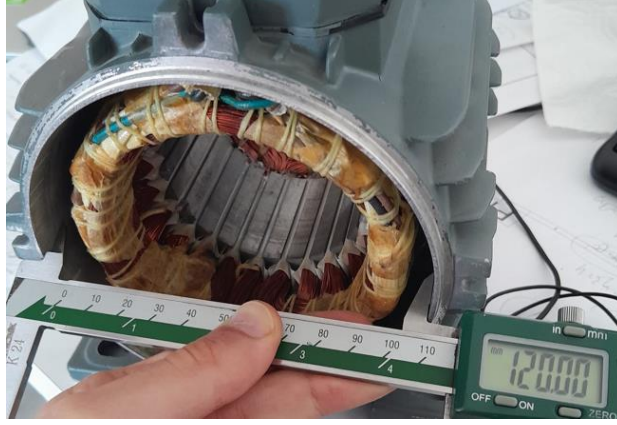


2. 6/4 ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTOR RMXprt TASARIMI

Bu bölümde 6/4 Switched Reluctance Motor (ARM) tasarımı için başlangıç noktasından itibaren parametrik yöntemlerle elde edilen RMXprt sonuçları incelenmiştir. RMXprt elektrik motorlarının tasarım ve analizi için kullanılan gelişmiş bir yazılımdır. Bu yazılım mühendislerin hızlı ve güvenilir bir biçimde motor performansını simüle etmelerine ve optimize etmelerine olanak tanır. Parametrik analiz yöntemi motor tasarımında farklı parametrelerin etkilerini değerlendirerek en uygun tasarımı belirlemek için kritik öneme sahiptir. RMXprt özellikle motorun manyetik devresini, akı yoğunluğunu ve moment üretim kapasitesini detaylı bir biçimde analiz ederek tasarım sürecini hızlandırır ve optimize eder. Bu çalışma kapsamında RMXprt'nin sağladığı verilerle motorun performans kriterleri detaylı olarak incelenmiş ve en verimli tasarım parametreleri belirlenmiştir. RMXprt'nin kullanımı motor tasarımında zamandan tasarruf sağlarken aynı zamanda yüksek performanslı ve güvenilir motorların geliştirilmesine katkıda bulunur. Bu çalışmada, askeri Pan-Tilt cihazları için 1400 rpm hızında en az 2 Nm çıkış torku elde etmek hedeflenmiştir. Elde edilen motor hızı dişli mekanizması kullanılarak 14 rpm'e düşürülerek uygulama gereksinimlerine uygun hale getirilmiştir. Bu bölümde seçilen parametreler Bölüm 3'te üç farklı rotoru değiştirilmiş ARM'ye referans oluşturmaktadır.

2.1. Stator Dış Çapının Belirlenmesi

Stator dış çapının belirlenmesi tasarımı yapılan motorun üretimi ve montajı için kritik bir parametredir. Elimizde bulunan motor gövdesinin dış çapı önce bir kumpas ile ölçülmüş ardından bu ölçüm KÖM (Koordinat Ölçüm Makinesi) cihazı ile yüksek hassasiyetle doğrulanmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda statorun dış çapı 120,5 mm olarak belirlenmiştir. Bu hassas ölçüm ve doğrulama motorun performansını ve montaj uyumluluğunu sağlamak açısından büyük önem taşımaktadır. Şekil 2.1'de motor gövdesinin kumpas ile ölçülmesi gösterilmektedir. Stator dış çapı parametresi tasarım sürecinde sabit tutulmuştur. Motor çerçevesinin içindeki sargılar ısıtma yöntemiyle çıkarılmıştır. Şekil 2.2'de KÖM makinası gösterilmiştir. Motor çerçevesi oluşunda ısıtma etkisinden dolayı genleşme ve daralma durumları gözlenmiştir.



Şekil 2. 1. Stator Dış Çapının Kumpas ile Ölçümü.

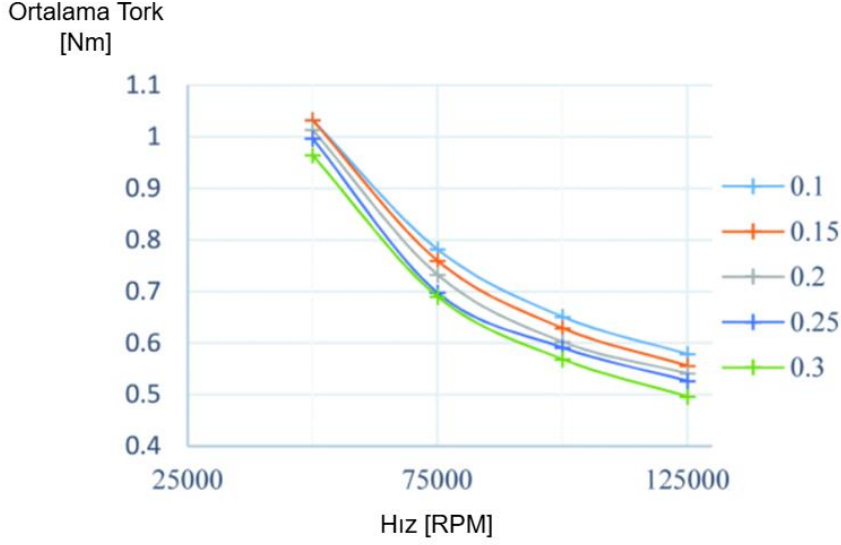


Şekil 2. 2. KÖM Makinası.

2.2. Hava Aralığının Belirlenmesi

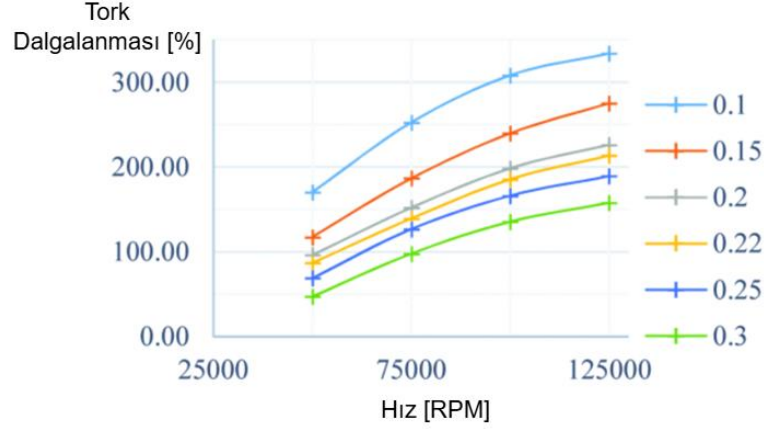
Literatürde yapılan çalışmalarda yüksek hızlı uygulamalarda hava aralığının artmasıyla birlikte ortalama torkun düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum motor tasarımında kritik bir parametre olan hava aralığının, performansı doğrudan etkilediğini göstermektedir. Hava aralığının artması manyetik devrenin etkinliğini azaltarak tork üretiminde verim kaybına yol açar. Şekil 2.3'te hava aralığının artmasıyla ortalama torkun nasıl azaldığını gösteren sonuçlar detaylı bir biçimde sunulmuştur. Bu grafik yüksek hızlı

motor uygulamalarında hava aralığının optimize edilmesinin, performans kayıplarını minimize etmek için ne kadar önemli olduğunu vurgulamaktadır.



Şekil 2. 3. Hava aralığının ortalama torka etkisi (Kocan et al., 2020).

Literatürde yapılan aynı çalışmada yüksek hızlı uygulamalarda hava aralığının artmasıyla birlikte ortalama torkun düşmesine karşın tork dalgalanmasının azaldığı da gösterilmiştir. Hava aralığının artması manyetik devre üzerindeki etkileşimleri yumuşatarak tork dalgalanmalarını azaltır. Bu durum motorun daha düzgün ve kararlı bir tork üretmesini sağlar, özellikle hassas kontrol gerektiren yüksek hızlı uygulamalarda önemli bir avantaj sunar. Şekil 2.4'te hava aralığının artmasıyla tork dalgalanmalarının nasıl azaldığını gösteren sonuçlar detaylı olarak sunulmuştur. Bu grafik yüksek hızlı motor uygulamalarında hava aralığının optimize edilmesinin hem ortalama tork performansını hem de tork dalgalanmalarını dengelemede ne kadar kritik olduğunu vurgulamaktadır.

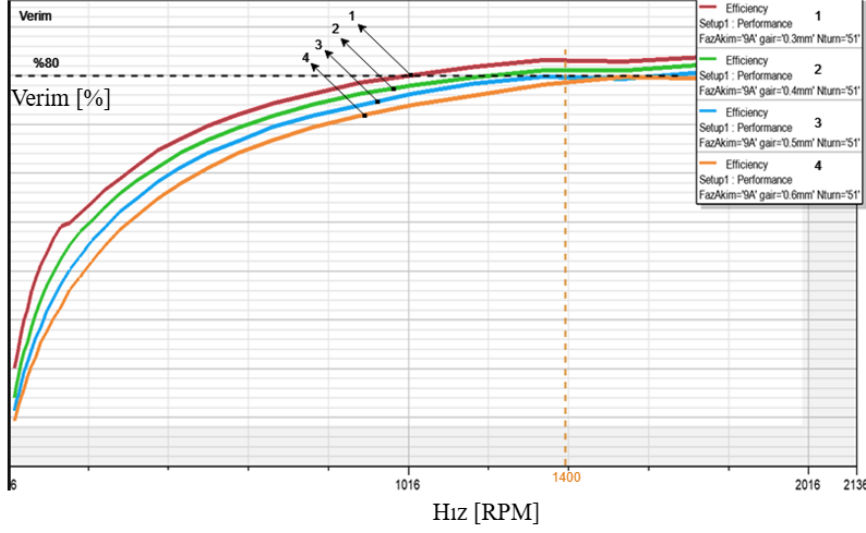


Şekil 2. 4. Hava aralığının tork dalgalanmasına olan etkisi (Kocan et al., 2020).

Bu çalışmada dört farklı hava aralığı incelenerek diğer tüm parametreler sabit tutularak verim grafikleri RMXprt yazılımında analiz edilmiştir. Bölüm 1.3.3'te üretim açısından değerlendirildiğinde optimal hava aralığı 0,3 mm olarak seçilmiştir. Bu seçim hem üretim kolaylığı hem de performans dengesi açısından en uygun seçenek olarak belirlenmiştir. Şekil 2.5'te dört farklı hava aralığına ait verim grafikleri detaylı bir biçimde sunulmuştur. Bu grafikler, hava aralığının motor verimi üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak göstermekte ve optimal hava aralığının belirlenmesinde önemli bir referans noktası sağlamaktadır. Şekil 2.5'te yer alan grafikler numaralandırılmış ve Tablo 2.1'de parametreler ile birlikte gösterilmiştir. Seçilen hava aralığı grafik numarası Tablo 2.1'de işaretlenmiştir.

Tablo 2. 1. Dört Farklı Hava Aralığına Ait Verim Grafiklerinin Değerleri

Grafik Numarası	Faz Akımı [A]	Hava Aralığı [mm]	Sarım Sayısı	Çıkış Parametresi
1	9	0,3	52	Verim
2	9	0,4	52	Verim
3	9	0,5	52	Verim
4	9	0,6	52	Verim

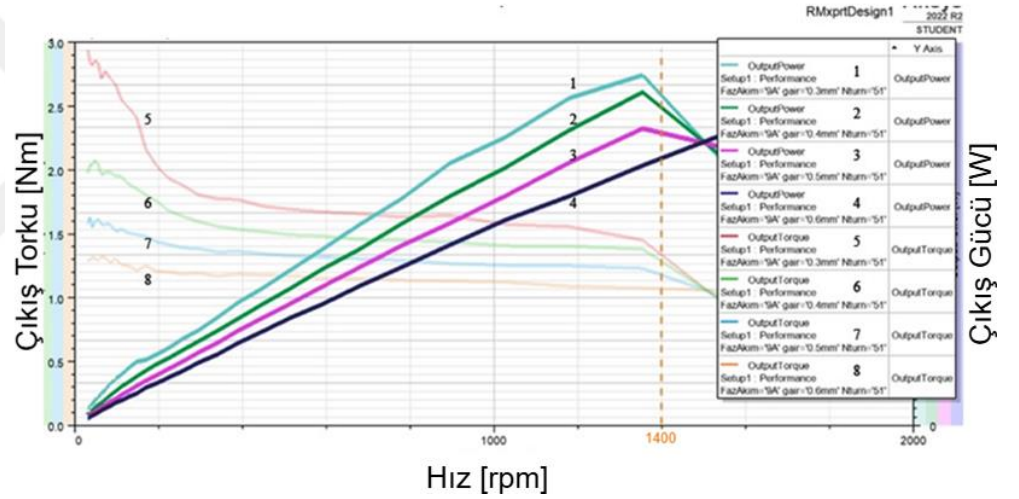


Şekil 2. 5. Dört Farklı Hava Aralığına Ait Verim Grafikleri.

Bu çalışmada dört farklı hava aralığının sabit tork bölgesindeki tork seviyesi ve sabit tork bölgesindeki maksimum güç noktası detaylı bir biçimde incelenmiştir. Şekil 2.6'da dört farklı hava aralığına ait tork ve güç eğrileri sunulmuştur. Bu analizde özellikle sabit tork bölgesindeki maksimum güç noktası göz önünde bulundurulmuştur. Önceki grafikte verim grafiklerine değinilmiş olup bu simülasyon sonuçları verimin yüksek olacağını göstermektedir. Grafikte 0,3 mm hava aralığına sahip eğrinin sabit tork bölgesinde maksimum güç noktasının en yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum 0,3 mm hava aralığının motorun performansı açısından en uygun değer olduğunu göstermektedir. Maksimum güç noktasının yüksek olması motorun sabit tork bölgesinde daha fazla güç üretebileceği anlamına gelir bu da motorun verimliliğini ve genel performansını artırır. Bu sonuç üretim açısından da dikkate alınarak hava aralığının 0,3 mm olarak seçilmesinin ne kadar doğru bir tercih olduğunu ortaya koymaktadır. İndisler renk olarak gösterilmiştir. Şekil 2.6'da yer alan grafikler numaralandırılmış ve Tablo 2.2'de parametreler ile birlikte belirtilmiştir. Seçilen hava aralığı grafik numarası Tablo 2.2'de işaretlenmiştir.

Tablo 2. 2. Dört Farklı Hava Aralığına Ait Çıkış gücü-Çıkış Torku Grafiklerinin Numaraları

Grafik Numarası	Faz Akımı [A]	Hava Aralığı [mm]	Sarım Sayısı	Çıkış Parametresi
1	9	0,3	51	Çıkış Gücü
2	9	0,4	51	Çıkış Gücü
3	9	0,5	51	Çıkış Gücü
4	9	0,6	51	Çıkış Gücü
5	9	0,3	51	Çıkış Torku
6	9	0,4	51	Çıkış Torku
7	9	0,5	51	Çıkış Torku
8	9	0,6	51	Çıkış Torku



Şekil 2. 6. Dört Farklı Hava Aralığına Ait Tork ve Güç Grafiği.

2.3. Faz Akımının ARM'ye Etkisi

Bu çalışmada faz akımının motor gücüne, torka ve verime etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Faz akımı arttıkça torkun arttığı gözlemlenmiş ancak bununla birlikte bakır kayıplarının da artması nedeniyle verimin olumsuz etkilendiği belirlenmiştir. Ayrıca motorun Yuva Doluluk Faktörü, Faz Akım Yoğunluğu ve Stator-Kutup Akı Yoğunluğu gibi önemli parametreler de değerlendirilmiştir.

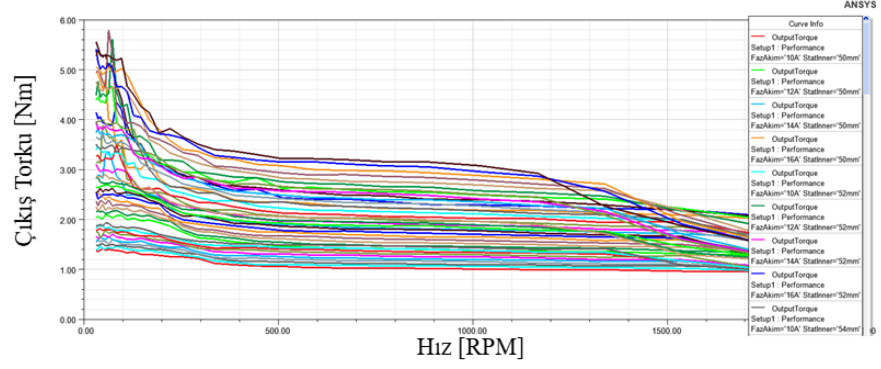
Yuva doluluk faktörü motorun sargılarının yuva içindeki alanın ne kadarını kapladığını belirler. Yüksek doluluk faktörü daha fazla bakır telin yuvalara sığmasını ve dolayısıyla daha yüksek akım taşıma kapasitesini sağlar. Bu motorun tork ve güç üretimini artırır. Ancak yuva

doluluk faktörünün yüksek olması ısı dağılımını zorlaştırabilir ve sargıların soğutulmasını karmaşık hale getirebilir.

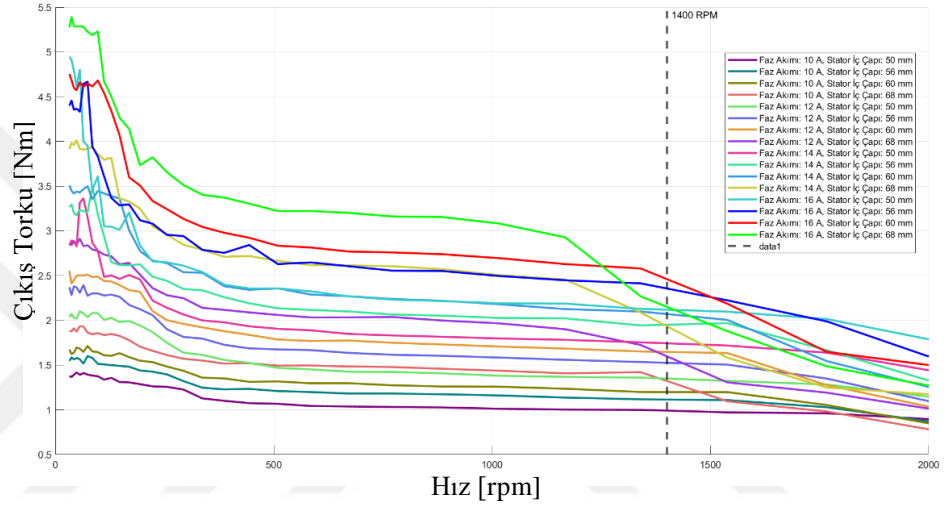
Faz akım yoğunluğu faz başına düşen akımın, fazın kesit alanına oranıdır. Yüksek faz akım yoğunluğu motorun daha fazla tork üretmesini sağlar ancak aynı zamanda daha fazla ısınma ve dolayısıyla daha etkili bir soğutma ihtiyacı doğurur. Faz akım yoğunluğu yüksek olan motorlar için etkin soğutma sistemleri kullanılması gereklidir. Etkin soğutma motorun performansını artırırken aşırı ısınma nedeniyle oluşabilecek zararları önler.

Stator-kutup akı yoğunluğu stator dişleri ve kutuplar arasındaki manyetik akının yoğunluğudur. Yüksek akı yoğunluğu motorun manyetik devresinin etkinliğini artırarak daha yüksek güç ve tork üretimine katkıda bulunur. Ancak akı yoğunluğunun çok yüksek olması manyetik malzemelerin doyuma ulaşmasına ve bu nedenle verimin düşmesine neden olabilir. Bu yüzden stator-kutup akı yoğunluğunun optimum seviyede tutulması önemlidir.

Bu çalışma faz akımının ve diğer önemli parametrelerin motor performansı üzerindeki etkilerini ortaya koyarak motor tasarımında dikkate alınması gereken kritik noktaları vurgulamaktadır. Faz akımının güce ve torka olan olumlu etkilerinin yanı sıra, verim üzerindeki olumsuz etkilerini dengelemek için uygun tasarım geliştirilmiştir. Bu sayede yüksek performanslı ve verimli bir motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Test simülasyonu, belirli nominal çalışma koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Simülasyon motor DC bara gerimi 48V'ta, 300W nominal güçte ve 1400 rpm nominal hızda yapılmıştır. Çalışma sıcaklığı ise 75 derece olarak ayarlanmıştır. Sarım sayısı 52 sarımdır ve sabit tutulmuştur. Bu koşullar motorun performansını ve verimliliğini değerlendirmek için uygun bir test ortamı sağlamıştır. Nominal değerlerde yapılan testler motorun gerçek çalışma koşullarında nasıl bir performans sergileyeceğini ve verimliliğini öngörmek açısından önemlidir. Ayrıca 75 derece çalışma sıcaklığı motorun yüksek sıcaklıklarda dayanıklılığını ve performansını da değerlendirme fırsatı sunmuştur. Şekil 2.7'de faz akımı ve stator parametrelerinin tork üzerindeki etkisini detaylandıran grafik yer almakta olup 40 farklı parametre değeri için tork eğrileri ayrıntılı bir biçimde sunulmuştur. Buna karşılık Şekil 2.8'de grafikler sadeleştirilmiş ve 16 farklı parametre değeri üzerinden incelenmiştir böylece analizler daha yalın bir biçimde gerçekleştirilebilmiştir.

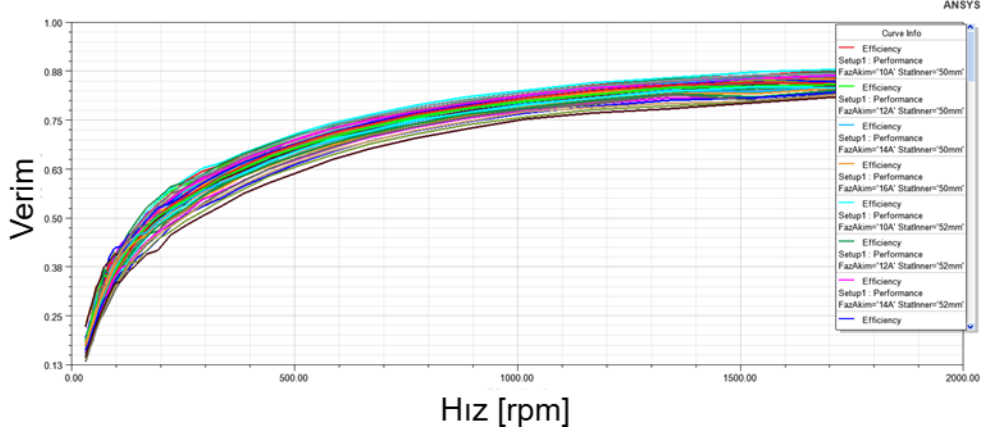


Şekil 2. 7. Faz Akımı ve Stator İç Çapı-Tork Grafiği.

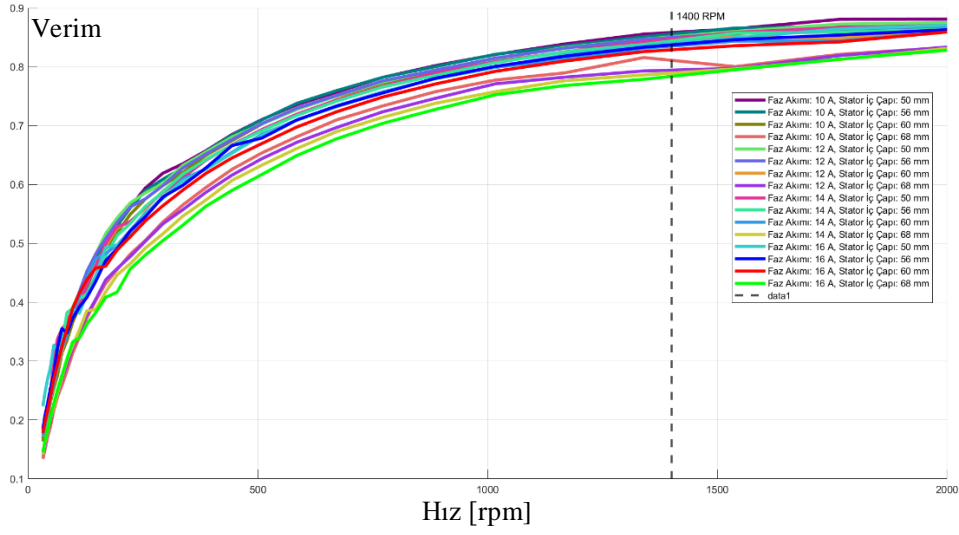


Şekil 2. 8. Sadeleştirilmiş Faz Akımı ve Stator İç Çapı-Tork Grafiği.

Faz akımının ve stator iç çapının torka olan etkisi Tablo 2.3'te detaylı olarak görülmektedir. Tabloya göre faz akımı arttıkça tork değeri de artmaktadır. Aynı zamanda stator iç çapının artmasıyla tork değerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Tablo 2.3'te aynı faz akımlarında stator iç çapının torka olan etkisini net olarak göstermektedir. Ayrıca aynı stator iç çapında farklı faz akımlarının torka olan etkisi de yine Tablo 2.3'te açıkça belirtilmiştir. Bu veriler motor performansını optimize etmek için hem faz akımı hem de stator iç çapının dikkatle ayarlanması gerektiğini göstermektedir. Şekil 2.9'da faz akımı ve stator iç çapı parametrelerinin verim üzerindeki etkisini detaylandıran grafik yer almakta olup 40 farklı parametre değeri için verim eğrileri ayrıntılı bir biçimde sunulmuştur. Buna karşılık Şekil 2.10'da grafikler sadeleştirilmiş ve 16 farklı parametre değeri üzerinden incelenmiştir böylece analizler daha yalın bir biçimde gerçekleştirilebilmiştir.



Şekil 2. 9. Faz akımı, Stator İç Çapı Verim Grafiği.



Şekil 2. 10. Sadeleştirilmiş Faz Akımı ve Stator İç Çapı-Verim Grafiği.

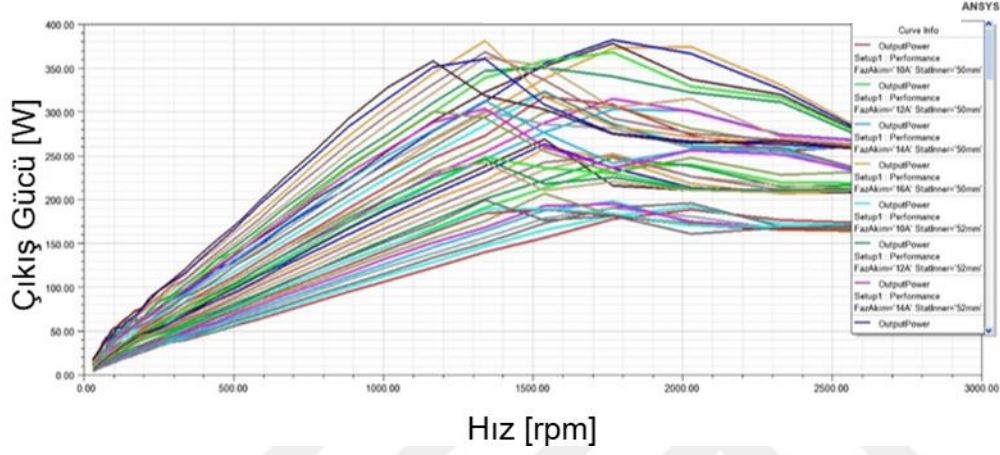
Tablo 2. 3: Faz Akımının ve Stator İç Çapının Torka Olan Etkisi

İndeks	Faz Akımı [A]	Stator İç çapı [mm]	Hız [rpm]	Çıkış Torku [Nm]	Çıkış Gücü [W]	Verim
1	10	50	1400	0,999	140,254	0,855
2	10	52	1400	1,047	146,953	0,857
3	10	54	1400	1,073	150,653	0,844
4	10	56	1400	1,117	156,822	0,851
5	10	58	1400	1,169	164,176	0,843
6	10	60	1400	1,199	168,311	0,840
7	10	62	1400	1,251	175,587	0,833
8	10	64	1400	1,314	184,469	0,839
9	10	66	1400	1,346	188,969	0,823
10	10	68	1400	1,421	199,444	0,815
11	12	50	1400	1,360	190,922	0,847
12	12	52	1400	1,431	200,840	0,854
13	12	54	1400	1,465	205,668	0,839

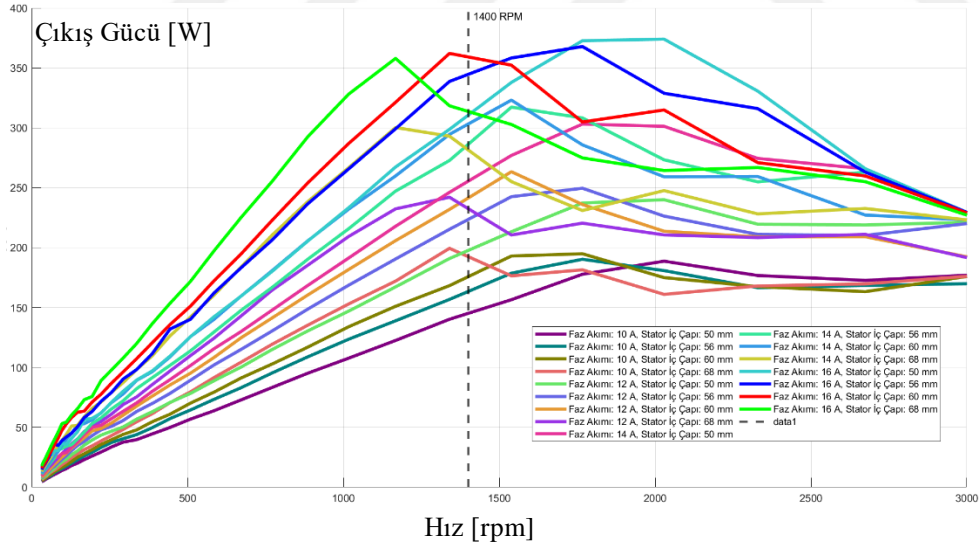
14	12	56	1400	1,534	215,330	0,846
15	12	58	1400	1,580	221,833	0,831
16	12	60	1400	1,652	231,917	0,839
17	12	62	1400	1,696	238,097	0,824
18	12	64	1400	1,769	248,364	0,831
19	12	66	1400	1,751	245,839	0,816
20	12	68	1400	1,724	242,083	0,792
21	14	50	1400	1,754	246,179	0,842
22	14	52	1400	1,809	253,901	0,847
23	14	54	1400	1,876	263,364	0,835
24	14	56	1400	1,943	272,753	0,838
25	14	58	1400	2,029	284,787	0,828
26	14	60	1400	2,098	294,556	0,831
27	14	62	1400	2,147	301,424	0,816
28	14	64	1400	2,229	312,835	0,825
29	14	66	1400	2,164	303,828	0,806
30	14	68	1400	2,088	293,038	0,786
31	16	50	1400	2,128	298,741	0,836
32	16	52	1400	2,221	311,748	0,841
33	16	54	1400	2,297	322,458	0,828
34	16	56	1400	2,413	338,731	0,833
35	16	58	1400	2,470	346,747	0,819
36	16	60	1400	2,580	362,125	0,825
37	16	62	1400	2,623	368,163	0,812
38	16	64	1400	2,715	381,049	0,818
39	16	66	1400	2,566	360,230	0,800
40	16	68	1400	2,268	318,397	0,778

Tablo 2.4'te, stator iç çapı sabitken faz akımı farklı olan değerler için Yuva Doluluk Faktörü, Faz Akım Yoğunluğu ve Stator-Kutup Akı Yoğunluğu değerleri verilmiştir. Aynı tabloda, stator iç çapı farklı olup faz akımı aynı olan değerler için de Yuva Doluluk Faktörü, Faz Akım Yoğunluğu ve Stator-Kutup Akı Yoğunluğu değerleri gösterilmiştir. Tablo 2.4'te "d" Yuva Doluluk Faktörünü, "J" Faz Akım Yoğunluğunu, "B" ise Stator-Kutup Akı Yoğunluğunu temsil etmektedir. Şekil 2.11'de faz akımı ve stator iç çapı parametrelerinin güç üzerindeki etkisini detaylandıran grafik yer almakta olup 40 farklı parametre değeri için güç eğrileri ayrıntılı bir biçimde sunulmuştur. Buna karşılık Şekil 2.12'de grafikler sadeleştirilmiş ve 16 farklı parametre değeri üzerinden incelenmiştir, böylece analizler daha yalın bir biçimde gerçekleştirilebilmiştir. Tablo 2.3 ve Tablo 2.4 incelendiğinde İndeks 2'deki faz akım yoğunluğunun oldukça düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ancak bu düşük faz akım yoğunluğuna rağmen Stator-Kutup Akı

Yoğunluğu da düşüktür. Bu durum motorun potansiyel gücü ve tork kapasitesine tam olarak ulaşamadığını açıkça ortaya koymaktadır. Bu nedenle motorun performansının optimize edilebilmesi için faz akım yoğunluğunun artırılması gerektiği sonucuna varılmaktadır. Tablo 2.3 ve Tablo 2.4 incelendiğinde indeks 26 dikkate alındığında üretilen tork, güç, verim, Yuva Doluluk Faktörü, Faz Akım Yoğunluğu ve Stator-Kutup Akı Yoğunluğu birlikte ele alındığında kabul edilebilir parametreler olduğu görülmektedir.



Şekil 2. 11. Faz akımı, Stator İç Çapı Güç Grafiği.



Şekil 2. 12. Sadeleştirilmiş Faz Akımı ve Stator İç Çapı-Güç Grafiği.

Tablo 2. 4. Stator İç Çapı ve Faz Akımı Değerlerine Göre d, J, B

İndeks	Faz akımı [A]	Stator iç çap [mm]	d[%]	J[A/mm ²]	B[T]
1	10	50	45,722	2,609	1,353
2	10	52	48,217	2,624	1,364
3	10	54	45,340	2,972	1,415
4	10	56	48,058	2,962	1,388
5	10	58	45,506	3,338	1,351

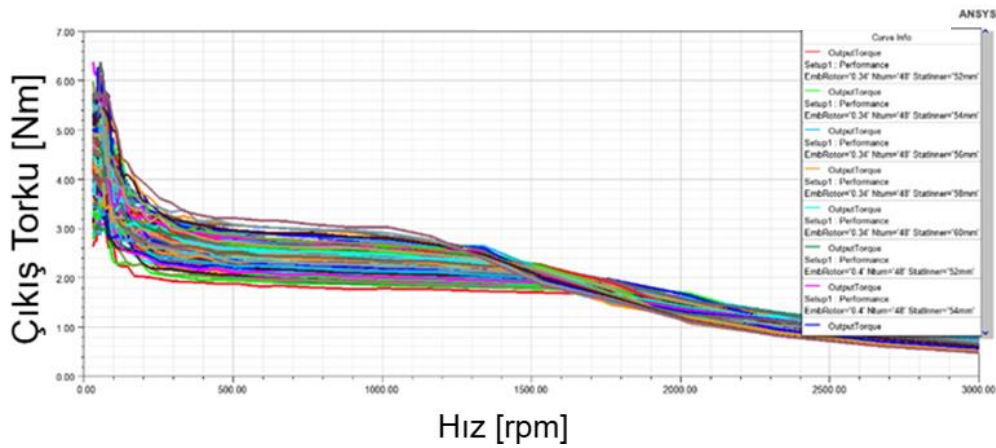
6	10	60	48,539	3,395	1,450
7	10	62	46,319	3,781	1,386
8	10	64	49,799	3,756	1,373
9	10	66	47,880	4,265	1,452
10	10	68	46,365	4,701	1,404
11	12	50	45,722	3,157	1,564
12	12	52	48,217	3,126	1,493
13	12	54	45,340	3,546	1,540
14	12	56	48,058	3,546	1,507
15	12	58	45,506	4,008	1,546
16	12	60	48,539	3,993	1,476
17	12	62	46,319	4,508	1,498
18	12	64	49,799	4,427	1,504
19	12	66	47,880	4,957	1,555
20	12	68	46,365	5,379	1,500
21	14	50	45,722	3,637	1,645
22	14	52	48,217	3,651	1,641
23	14	54	45,340	4,094	1,610
24	14	56	48,058	4,143	1,645
25	14	58	45,506	4,662	1,640
26	14	60	46,539	4,168	1,602
27	14	62	46,319	5,141	1,658
28	14	64	49,799	4,996	1,587
29	14	66	47,880	5,584	1,641
30	14	68	46,365	6,127	1,643
31	16	50	45,722	4,133	1,723
32	16	52	48,217	4,132	1,706
33	16	54	45,340	4,601	1,685
34	16	56	48,058	4,624	1,714
35	16	58	45,506	5,156	1,691
36	16	60	48,539	5,192	1,727
37	16	62	46,319	5,709	1,716
38	16	64	49,799	5,591	1,687
39	16	66	47,880	6,072	1,674
40	16	68	46,365	6,725	1,705

2.4. Rotor Kutup Yayı Açısı, Stator İç Çapı ve Sarım Sayısının

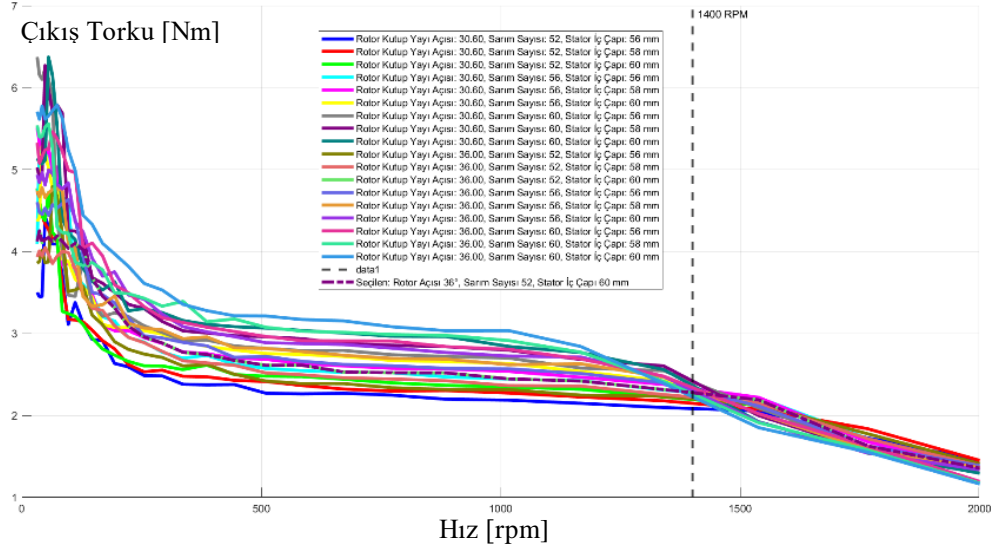
ARM'ye Etkisi

Bu çalışmada rotor kutup yayı açısı, stator iç çapı ve sarım sayısı gibi kritik parametreler bir arada ele alınarak tork, verim ve güç grafikleri detaylı olarak incelenmiştir. Bu parametrelerin optimize edilmesi sayesinde tork, verim ve güç arasındaki ilişkiler dikkatlice analiz edilmiştir. Ayrıca bu analiz kapsamında yuva doluluk oranı, faz akım yoğunluğu ve stator-kutup akı yoğunlukları da

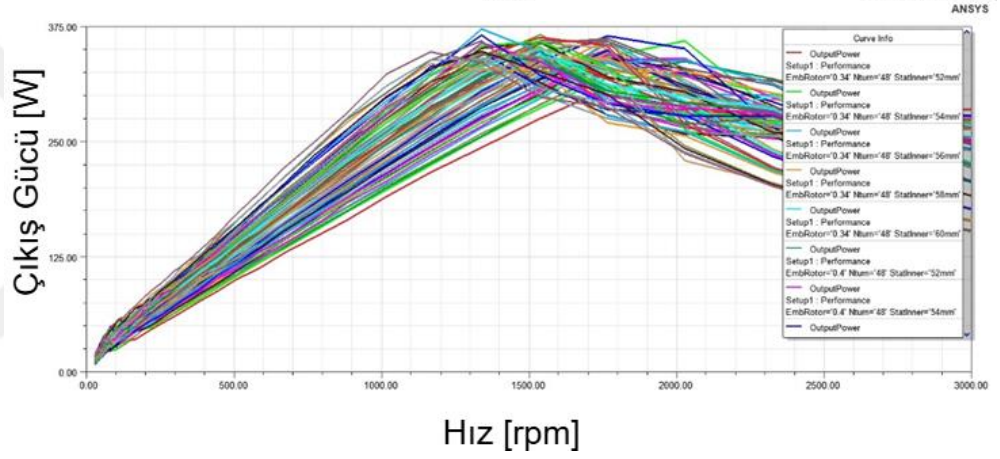
değerlendirilmiştir. Bu sayede ilgili parametrelerin birbiriyle olan etkileşimi incelenmiş ve performans üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Analizlerde stator kutup yayı açısı 30 derece, nominal hız 1400 rpm, güç 300 W, faz akımı 15 A ve hava aralığı 0,3 mm olarak belirlenmiş ve bu parametreler sabit tutularak incelemeler gerçekleştirilmiştir. Bu sayede motorun performans karakteristikleri sabit parametreler altında optimize edilerek analiz edilmiştir. Şekil 2.13’de rotor kutup yayı açısı, stator iç çapı ve sarım sayısının tork üzerindeki etkisini detaylandıran grafik yer almakta olup 70 farklı parametre değeri için tork eğrileri ayrıntılı bir biçimde sunulmuştur. Buna karşılık Şekil 2.14’de grafikler sadeleştirilmiş ve 18 farklı parametre değeri üzerinden incelenmiştir böylece analizler daha yalın bir biçimde gerçekleştirilebilmiştir. Şekil 2.15’te rotor kutup yayı açısı, stator iç çapı ve sarım sayısının güç üzerindeki etkisini detaylandıran grafik yer almakta olup 70 farklı parametre değeri için güç eğrileri ayrıntılı bir biçimde sunulmuştur. Buna karşılık Şekil 2.16’da grafikler sadeleştirilmiş ve 18 farklı parametre değeri üzerinden incelenmiştir böylece analizler daha yalın bir biçimde gerçekleştirilebilmiştir. Şekil 2.17’te rotor kutup yayı açısı, stator iç çapı ve sarım sayısının verim üzerindeki etkisini detaylandıran grafik yer almakta olup 70 farklı parametre değeri için verim eğrileri ayrıntılı bir biçimde sunulmuştur. Buna karşılık Şekil 2.18’de grafikler sadeleştirilmiş ve 18 farklı parametre değeri üzerinden incelenmiştir böylece analizler daha yalın bir biçimde gerçekleştirilebilmiştir. Şekil 2.14’te seçilen parametrenin tork eğrisi “seçilen” olarak adlandırılmıştır. Şekil 2.16’da seçilen parametrenin güç eğrisi “vurgulanan” olarak adlandırılmıştır. Şekil 2.18’de seçilen parametrenin verim eğrisi “vurgulanan” olarak adlandırılmıştır.



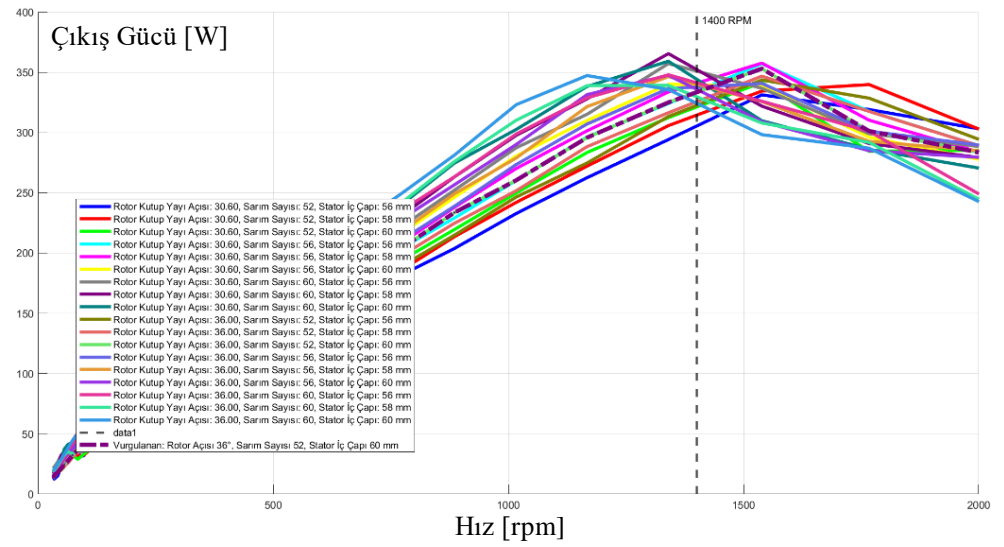
Şekil 2. 13. Rotor Kutup Yayı açısı, Stator İç Çapı ve Sarım Sayısına Göre Tork Grafiği.



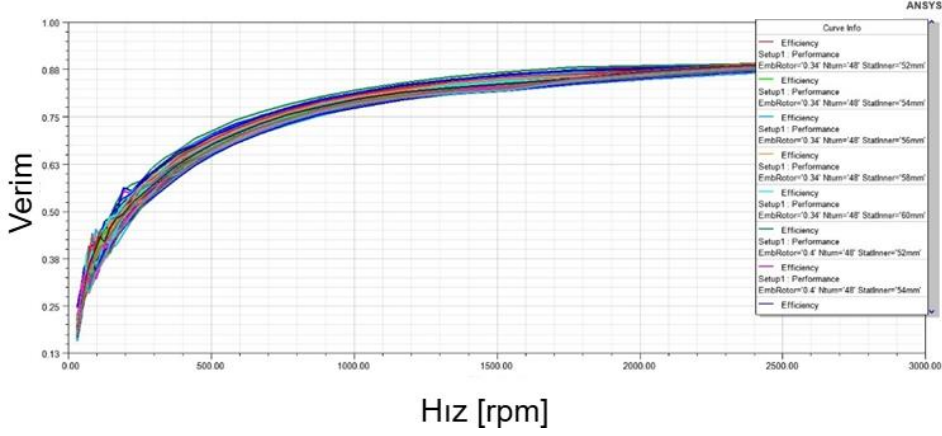
Şekil 2. 14. Sadeleştirilmiş Rotor Kutup Yayı Açısı, Stator İç Çapı-Tork Grafiği.



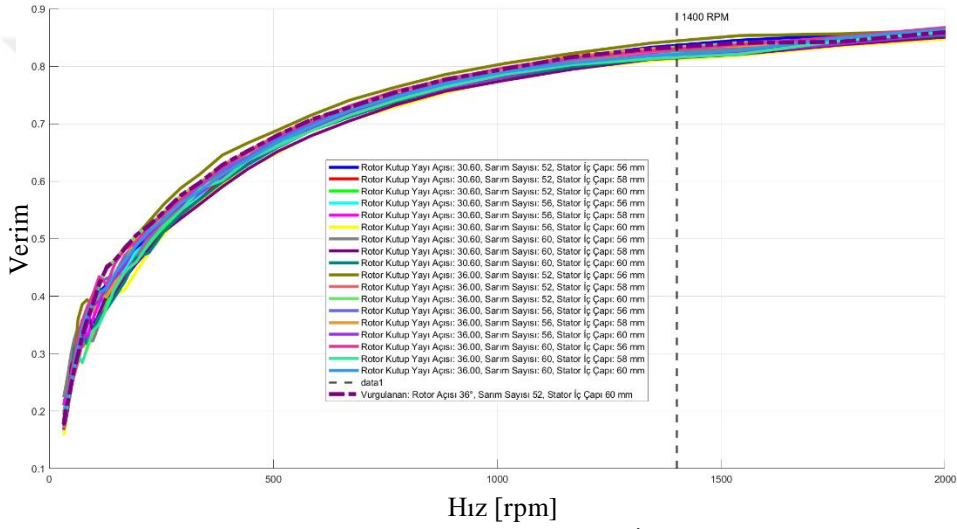
Şekil 2. 15. Rotor Kutup Yayı açısı, Stator İç Çapı ve Sarım Sayısına Göre Güç.



Şekil 2. 16. Sadeleştirilmiş Rotor Kutup Yayı Açısı, Stator İç Çapı-Güç Grafiği.



Şekil 2. 17. Rotor Kutup Yayı, Stator İç Çapı ve Sarım Sayısına Göre Verim Grafiği.



Şekil 2. 18. Sadeleştirilmiş Rotor Kutup Yayı Açısı, Stator İç Çapı-Verim Grafiği.

Tablo 2.5'te rotor kutup yay açısı, sarım sayısı ve stator iç çapı parametrelerine göre tork, güç ve verim değerleri sunulmuştur. Her bir parametre sabit tutularak diğer parametrelerin tork, güç ve verim üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Tablo 2.5'te β_r rotor kutup yay açısını, T çıkış torkunu ve P çıkış gücünü temsil etmektedir. Tablo 2.5 ve Tablo 2.6'da seçilen parametreler işaretli olarak gösterilmektedir.

Tablo 2. 5. Rotor Kutup Yay Açısı, Sarım Sayısı ve Stator İç Çapı Parametrelerine Göre Tork, Güç ve Verim Değerleri

İndeks	β_r [°]	Sarım Sayısı	Stator İç Çapı [mm]	T [Nm]	P[W]	Verim [%]
1	30,6	48	52	1,736	243,664	0,848
2	30,6	50	52	1,844	258,881	0,836
3	30,6	52	52	1,958	274,802	0,839
4	30,6	54	52	2,057	288,773	0,841
5	30,6	56	52	2,153	302,200	0,829

6	30,6	58	52	2,246	315,228	0,829
7	30,6	60	52	2,357	330,892	0,831
8	36	48	52	1,823	255,914	0,855
9	36	50	52	1,930	270,889	0,842
10	36	52	52	2,048	287,429	0,844
11	36	54	52	2,171	304,793	0,848
12	36	56	52	2,214	310,780	0,832
13	36	58	52	2,361	331,464	0,837
14	36	60	52	2,381	334,223	0,837
15	30,6	48	54	1,818	255,222	0,838
16	30,6	50	54	1,928	270,672	0,840
17	30,6	52	54	2,061	289,338	0,829
18	30,6	54	54	2,177	305,556	0,831
19	30,6	56	54	2,218	311,376	0,832
20	30,6	58	54	2,332	327,326	0,833
21	30,6	60	54	2,462	345,571	0,822
22	36	48	54	1,901	266,870	0,843
23	36	50	54	2,017	283,171	0,845
24	36	52	54	2,147	301,370	0,834
25	36	54	54	2,252	316,076	0,836
26	36	56	54	2,304	323,422	0,838
27	36	58	54	2,448	343,654	0,840
28	36	60	54	2,467	346,227	0,826
29	30,6	48	56	1,887	264,911	0,843
30	30,6	50	56	1,990	279,352	0,830
31	30,6	52	56	2,096	294,211	0,832
32	30,6	54	56	2,206	309,716	0,835
33	30,6	56	56	2,309	324,078	0,821
34	30,6	58	56	2,408	337,995	0,820
35	30,6	60	56	2,545	357,227	0,825
36	36	48	56	1,972	276,851	0,847
37	36	50	56	2,105	295,483	0,835
38	36	52	56	2,232	313,332	0,840
39	36	54	56	2,351	330,060	0,841
40	36	56	56	2,397	336,503	0,827
41	36	58	56	2,523	354,168	0,827
42	36	60	56	2,479	347,968	0,826
43	30,6	48	58	1,950	273,803	0,831
44	30,6	50	58	2,070	290,532	0,834
45	30,6	52	58	2,178	305,787	0,820
46	30,6	54	58	2,282	320,268	0,822
47	30,6	56	58	2,377	333,728	0,823
48	30,6	58	58	2,503	351,396	0,828
49	30,6	60	58	2,604	365,487	0,812
50	36	48	58	2,062	289,438	0,837
51	36	50	58	2,185	306,743	0,842

52	36	52	58	2,255	316,471	0,825
53	36	54	58	2,343	328,960	0,827
54	36	56	58	2,468	346,423	0,830
55	36	58	58	2,651	372,098	0,834
56	36	60	58	2,416	339,125	0,813
57	30,6	48	60	2,038	286,086	0,835
58	30,6	50	60	2,137	299,984	0,820
59	30,6	52	60	2,226	312,406	0,823
60	30,6	54	60	2,324	326,232	0,824
61	30,6	56	60	2,422	340,004	0,809
62	30,6	58	60	2,469077	346,51442	0,814
63	30,6	60	60	2,559326	359,18013	0,812
64	36	48	60	2,14186	300,59226	0,843
65	36	50	60	2,273548	319,07359	0,829
66	36	52	60	2,315923	325,02049	0,830
67	36	54	60	2,408307	337,98579	0,833
68	36	56	60	2,476395	347,54149	0,817
69	36	58	60	2,33637	327,89009	0,815
70	36	60	60	2,391665	335,65022	0,818

Tablo 2.6'da rotor kutup yay açısı, sarım sayısı ve stator iç çapı parametrelerine göre Yuva Doluluk Faktörü, Faz Akım Yoğunluğu ve Stator-Kutup Akı Yoğunluğu değerleri gösterilmektedir. Bu tablo parametrelerin birlikte ve bağımsız olarak Yuva Doluluk Faktörü, Faz Akım Yoğunluğu ve Stator-Kutup Akı Yoğunluğu üzerindeki etkilerini açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca Tablo 2.5'teki veriler Tablo 2.6'da yer alan tork, güç ve verim parametreleri ile karşılaştırılarak bu parametrelerin motor performansı üzerindeki etkileri kapsamlı bir biçimde değerlendirilebilir. Tablo 2.6'da "d" Yuva Doluluk Faktörünü, "J" Faz Akım Yoğunluğunu, "B" ise Stator-Kutup Akı Yoğunluğunu temsil etmektedir. Seçilen parametreler Tablo 2.6'da işaretlenmiştir.

Tablo 2. 6. Rotor Kutup Yay Açısı, Sarım Sayısı ve Stator İç Çapının Yuva Doluluk Faktörü, Faz Akım Yoğunluğu ve Stator-Kutup Akı Yoğunluğu Üzerindeki Etkileri

İndeks	β_r [°]	Sarım sayısı	Stator İç Çapı [mm]	d[%]	J[A/mm ²]	B[T]
1	30,6	48	52	49,971	3,459	1,526
2	30,6	50	52	46,362	3,894	1,574
3	30,6	52	52	48,217	3,853	1,555
4	30,6	54	52	50,071	3,856	1,589
5	30,6	56	52	46,189	4,332	1,614
6	30,6	58	52	47,838	4,325	1,601
7	30,6	60	52	49,488	4,338	1,645
8	36	48	52	49,971	3,482	1,650

9	36	50	52	46,362	3,906	1,686
10	36	52	52	48,217	3,880	1,696
11	36	54	52	50,071	3,842	1,670
12	36	56	52	46,189	4,341	1,714
13	36	58	52	47,838	4,305	1,741
14	36	60	52	49,488	4,416	1,727
15	30,6	48	54	47,050	3,898	1,536
16	30,6	50	54	49,011	3,874	1,530
17	30,6	52	54	45,340	4,343	1,565
18	30,6	54	54	47,083	4,351	1,602
19	30,6	56	54	48,827	4,368	1,639
20	30,6	58	54	50,571	4,337	1,621
21	30,6	60	54	46,597	4,794	1,674
22	36	48	54	47,050	3,894	1,630
23	36	50	54	49,011	3,906	1,692
24	36	52	54	45,340	4,374	1,710
25	36	54	54	47,083	4,331	1,670
26	36	56	54	48,827	4,391	1,746
27	36	58	54	50,571	4,310	1,750
28	36	60	54	46,597	4,806	1,730
29	30,6	48	56	49,871	3,924	1,558
30	30,6	50	56	46,210	4,390	1,568
31	30,6	52	56	48,058	4,387	1,590
32	30,6	54	56	49,906	4,382	1,616
33	30,6	56	56	46,098	4,934	1,647
34	30,6	58	56	47,744	4,887	1,630
35	30,6	60	56	49,391	4,701	1,625
36	36	48	56	49,871	3,924	1,670
37	36	50	56	46,210	4,374	1,671
38	36	52	56	47,098	4,362	1,675
39	36	54	56	49,906	4,355	1,697
40	36	56	56	48,058	4,772	1,681
41	36	58	56	47,744	4,802	1,751
42	36	60	56	49,391	4,802	1,739
43	30,6	48	58	47,161	4,379	1,526
44	30,6	50	58	49,126	4,437	1,593
45	30,6	52	58	45,506	4,962	1,610
46	30,6	54	58	47,257	4,937	1,614
47	30,6	56	58	49,007	4,909	1,603
48	30,6	58	58	50,757	4,721	1,619
49	30,6	60	58	46,801	5,203	1,633
50	36	48	58	47,161	4,412	1,667
51	36	50	58	49,126	4,390	1,661
52	36	52	58	45,506	4,904	1,682
53	36	54	58	47,257	4,932	1,713
54	36	56	58	49,007	4,748	1,712

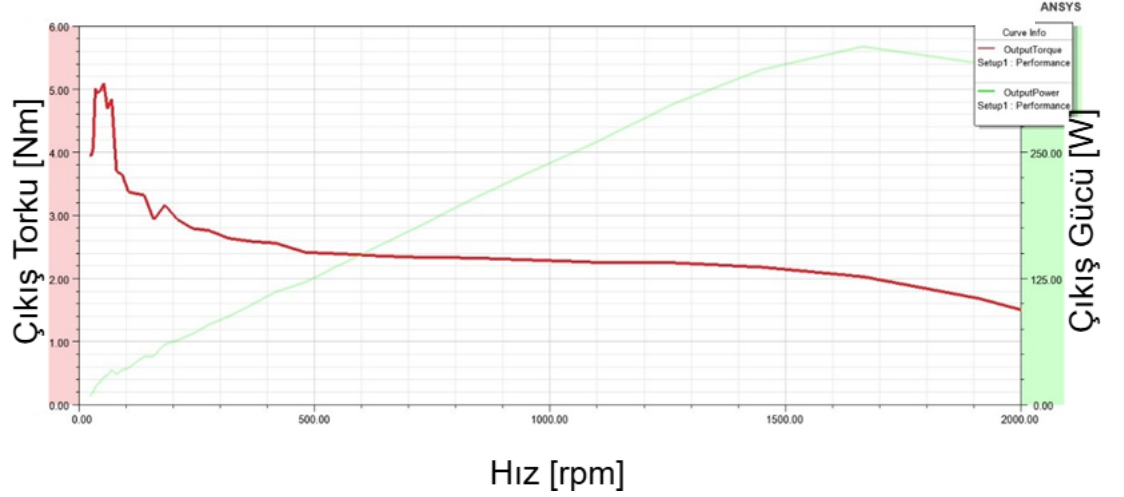
55	36	58	58	50,757	4,721	1,619
56	36	60	58	46,801	5,203	1,633
57	30,6	48	60	50,303	4,418	1,558
58	30,6	50	60	46,672	4,952	1,550
59	30,6	52	60	48,539	4,935	1,566
60	30,6	54	60	50,405	4,927	1,587
61	30,6	56	60	46,592	5,479	1,606
62	30,6	58	60	48,256	5,129	1,600
63	30,6	60	60	49,920	5,179	1,666
64	36	48	60	50,303	4,392	1,620
65	36	50	60	46,672	4,931	1,676
66	36	52	60	48,539	4,929	1,685
67	36	54	60	50,405	4,764	1,689
68	36	56	60	46,592	5,224	1,714
69	36	58	60	48,256	5,164	1,727
70	36	60	60	49,920	4,892	1,730

2.5. Hızın ve Rotor Kutup Yay Açısının İlişkisi Ve ARM'ye Etkisi

Bu bölümde simülasyon parametreleri güç için 300W, nominal hız için 1000 rpm ve çalışma sıcaklığı için 75 derece olarak ayarlanmıştır. Tablo 2.7'de motor parametreleri gösterilmektedir. Tork ve güç grafiği Şekil 2.19'da sunulmuştur. Tablo 2.7'de, Tablo 2.8'de verilen motor parametrelerine ait nominal tork, güç, verim, yuva doluluk faktörü, faz akım yoğunluğu ve stator-kutup akı yoğunluğu verilmiştir.

Tablo 2. 7. Simülasyona Ait Motor Parametreleri

Faz akımı[A]	β_s [°]	Stator İç çapı[mm]	β_r [°]	Sarım Sayısı
15	30	56	37,8	52



Şekil 2. 19. 1000 rpm'e Göre Tork ve Güç Grafiği.

Tablo 2. 8. Tablo 2.7'de Belirtilen Motor Parametrelerine Göre Nominal Tork, Güç, Verim, Yuva Doluluk Faktörü, Faz Akım Yoğunluğu ve Stator-Kutup Akı Yoğunluğunun Değerleri

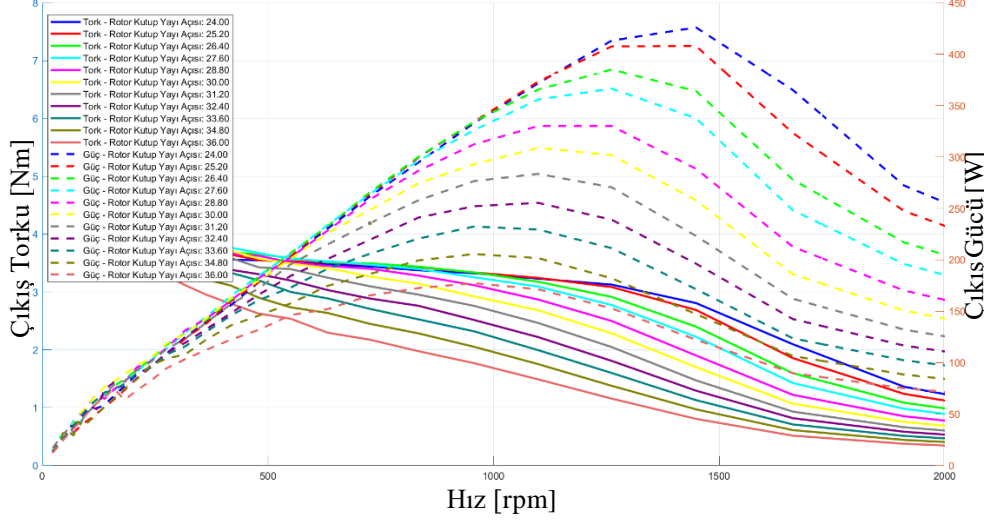
T[Nm]	P[W]	Verim[%]	d[%]	J[A/mm ²]	B[T]
2,2747	238,206	80,3359	48,0584	4,32164	1,7041

2.6. 8/6 ARM'nin RMXprt Analizi

Bu çalışmada aynı ölçülerde 8/6 ARM'nin sonuçları da incelenmek istenmiştir. 8/6 ARM'nin performansı ve etkileri bu doğrultuda değerlendirilmiştir. Tablo 2.9'da analizi yapılan 8/6 ARM'nin motor parametreleri verilmiştir. Stator kutup yayı açısı değiştirilerek bu analiz yapılmıştır. Şekil 2.20'de rotor kutup yayının tork-güç eğrisine olan etkisi gösterilmiştir. Analiz 1000 rpm'e göre yapılmıştır. Tablo 2.10'da rotor kutup yayı açısının tork, güç ve verim üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu tablo farklı rotor kutup yay açılarının motor performans parametreleri üzerindeki değişimlerini net olarak göstermektedir. Tablo 2.10'da "d" Yuva Doluluk Faktörünü, "J" Faz Akım Yoğunluğunu, "B" ise Stator-Kutup Akı Yoğunluğunu temsil etmektedir. Şekil 2.21'de rotor kutup yayının verim eğrisine etkisi gösterilmiştir.

Tablo 2. 9. 8/6 ARM'nin Parametreleri

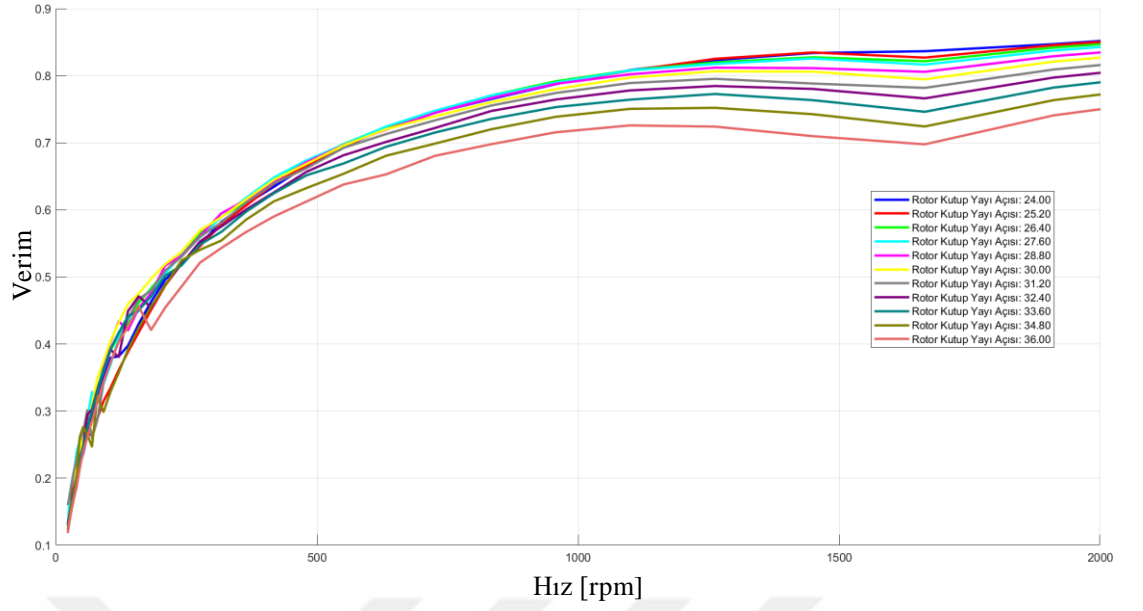
Faz akımı[A]	β_s [°]	Stator İç çapı[mm]	Sarım Sayısı
15	22,5	56	52



Şekil 2. 20. 8/6 ARM Rotor Kutup Yayınnın Tork ve Güç Eğrisine Etkisi.

Tablo 2. 10. 8/6 ARM'de Rotor Kutup Yayı Açısının Etkisi

$\beta_r [^\circ]$	T[Nm]	P[W]	Verim [%]	d [%]	J[A/mm ²]	B[T]
24	3,230	371,788	79,321	50,286	5,416	5,41
25,2	3,243	373,361	79,538	50,286	5,384	1,790
26,4	3,176	365,642	79,463	50,286	5,389	1,868
27,6	3,093	356,024	79,620	50,286	5,301	1,854
28,8	2,869	330,223	79,174	50,286	5,218	1,846
30	2,684	308,994	78,422	50,286	5,186	1,901
31,2	2,464	283,654	78,002	50,286	5,066	1,873
32,4	2,219	255,446	76,833	50,286	5,022	1,928
33,6	1,994	229,512	75,545	50,286	4,929	1,917
34,8	1,752	201,750	74,143	50,286	4,822	1,889
36	1,489	171,388	71,855	50,286	4,752	1,958



Şekil 2. 21. 8/6 ARM Rotor Kutup Yayı Açısının Verim Eğrisine Etkisi.

3. MAXWELL 2B ANALİZLERİ

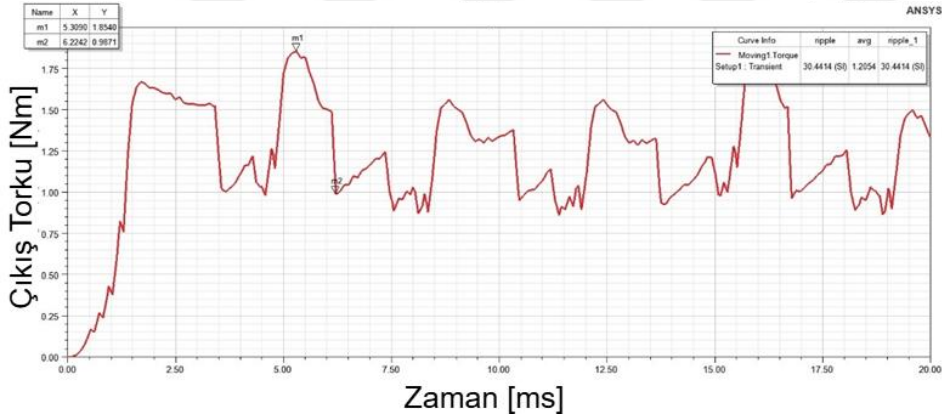
Bu bölümde motor parametrelerinin tork dalgalanmasına olan etkisi MAXWELL 2B kullanılarak analiz edilmiştir. Analizler motor DC bara gerilimi olarak 48V'ta yapılmıştır.

3.1. 6/4 ARM Parametrelerine Göre Tork Dalgalanması

Tablo 3.1'de ARM parametreleri verilmiştir. Şekil 3.1'de parametreleri verilen ARM'nin tork dalgalanma grafiği verilmiştir. Ortalama torku 1,2054Nm'dir. Tork grafiği %71,91 tork dalgalanmasına sahiptir.

Tablo 3. 1. ARM Parametreleri

Faz akımı[A]	β_s [°]	Stator İç Çapı [mm]	β_r [°]	Sarım Sayısı
10	30	56	36	58

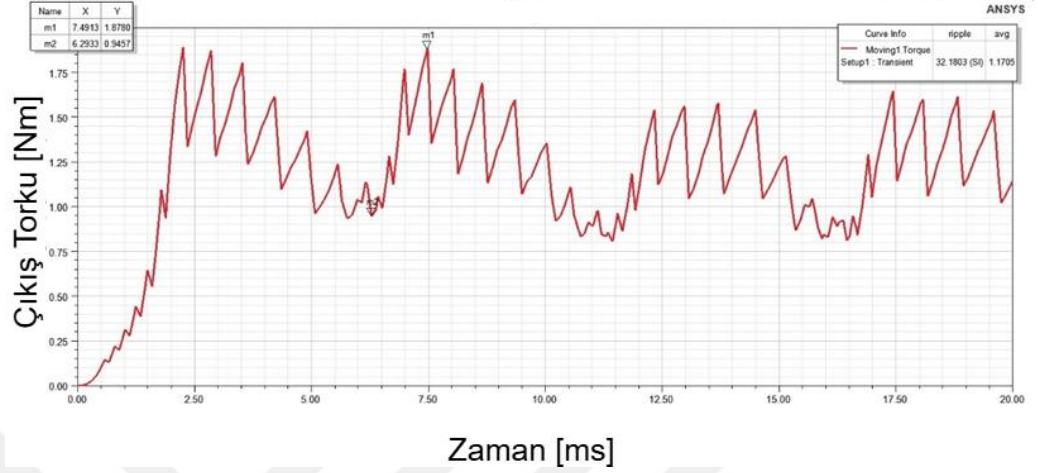


Şekil 3. 1. Parametreye Ait Tork Grafiği.

Tablo 3.1'de verilen parametrelerin değiştirilmiş versiyonu Tablo 3.2'de verilmiştir. Şekil 3.2'de sonuçlar gösterilmiştir. Tork dalgalanması %78 olarak ortaya çıkmaktadır. Bu analizde anahtarlamadan gelen dalgalanma da gözlemlenmiştir.

Tablo 3. 2. Değiştirilmiş Parametreler

Faz akımı[A]	β_s [°]	Stator İç Çapı [mm]	β_r [°]	Sarım Sayısı
10	30	52	36	60



Şekil 3. 2. Değiştirilmiş Versiyonun Sonuçları.

3.2. Rotoru Modifiye Edilmiş ARM'lerin Analizleri

Bu çalışmada 3 farklı modifiye edilmiş rotora sahip ARM'nin ortalama torkları ve tork dalgalanmaları Maxwell 2D kullanılarak incelenmiş ve sonuçları paylaşılmıştır. Tablo 3.3'te Bölüm 2'den elde edilen ve seçilen parametrelerin yer aldığı tablo sunulmuştur.

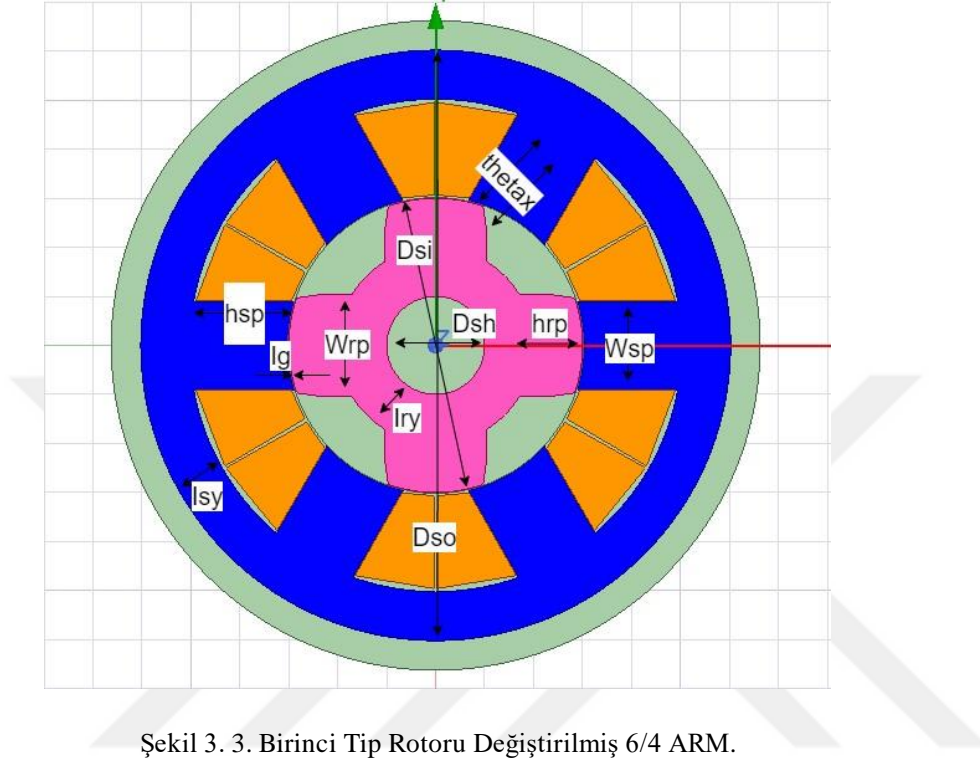
Tabloda yer alan parametreler bu bölümde yapılan analiz ve tasarımlarda kullanılmıştır.

Tablo 3. 3. Bölüm 2'den Elde Edilen ve Bu Bölümde Kullanılan Parametreler

Parametre Adı	Değeri
Stator Dış Çapı	120,5 mm
Hava Aralığı	0,3 mm
Faz Akımı	14,5 A
Rotor Kutup Yayısı Açısı	36 Derece
Stator İç Çapı	60 mm
Sarım Sayısı	52 Sarım
Hız	1400 rpm

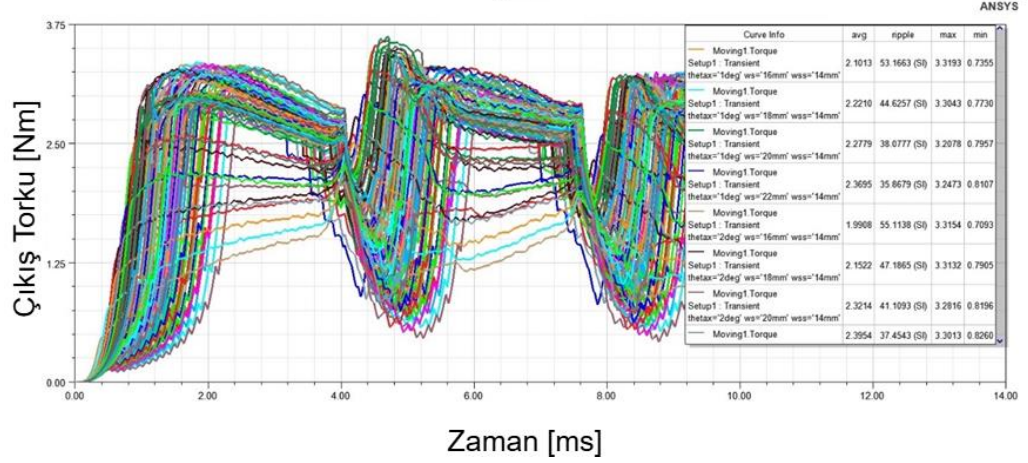
3.2.1. Birinci Tip Rotoru Değiştirilmiş 6/4 ARM

Şekil 3.3'te birinci tip rotoru değiştirilmiş 6/4 ARM verilmiştir.

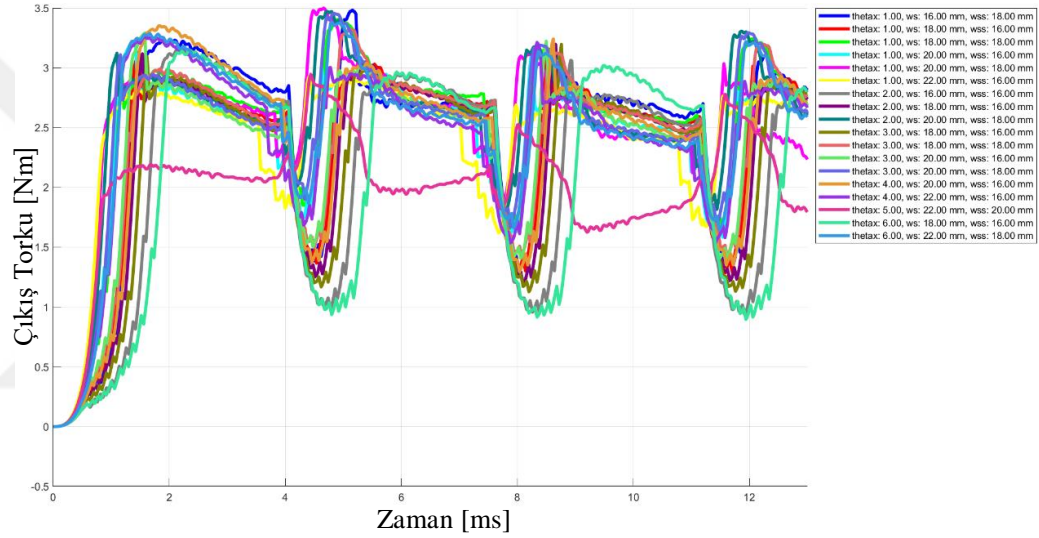


Şekil 3. 3. Birinci Tip Rotoru Değiştirilmiş 6/4 ARM.

Şekil 3.4'te birinci tip rotoru değiştirilmiş 6/4 ARM'nin "Wsp", "Wrp" ve "thetax" parametrelerine göre ortalama tork ve tork dalgalanmaları verilmiş ve sonuçlar detaylı olarak incelenmiştir. Bu kapsamda 97 farklı parametrenin yer aldığı tork grafiği gösterilerek elde edilen bulgular değerlendirilmiştir. Şekil 3.5'te 18 farklı parametreye ait tork grafikleri sunulmuş ve bu parametrelerin motor performansı üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir.



Şekil 3. 4. Birinci Tip Rotoru Değiştirilmiş 6/4 ARM'nin "Wsp", "Wrp" ve "thetax" Parametrelerine Göre Ortalama Tork ve Tork Dalgalanmaları.



Şekil 3. 5. Birinci Tip Rotoru Değiştirilmiş 6/4 ARM İçin 18 Farklı Parametreye Ait Tork Grafikleri.

Tablo 3.4'te birinci tip rotoru değiştirilmiş 6/4 ARM nin "wsp", "wrp" ve "thetax" parametrelerine göre ortalama tork, tork dalgalanması, maksimum tork ve minimum tork değerleri verilmiştir. Tablo 3.4'de "wrp" parametresi "ws" olarak, "wsp" parametresi "wss" olarak verilmiştir.

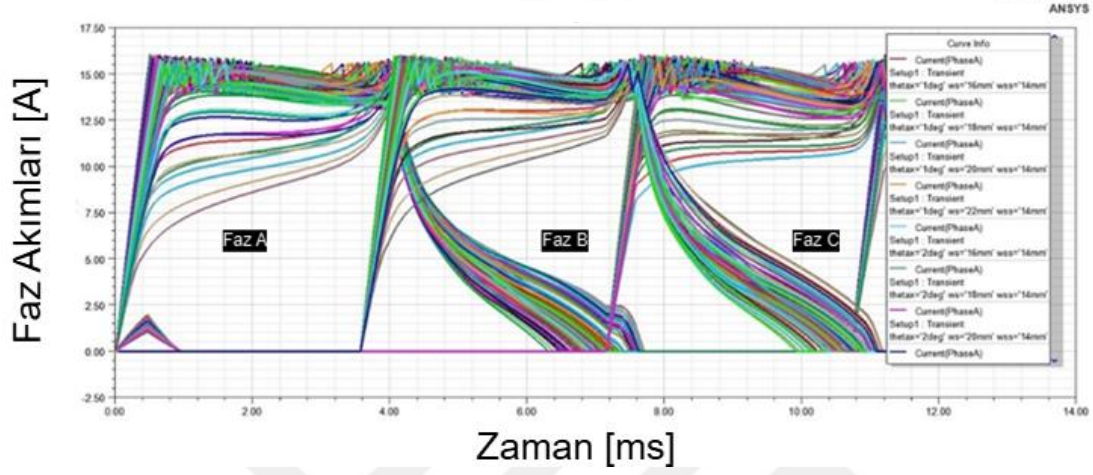
Tablo 3. 4. Birinci Tip Rotoru Değiştirilmiş 6/4 ARM nin "Wsp", "Wrp" ve "thetax" Parametrelerine Göre Ortalama Tork, Tork Dalgalanması, Maksimum Tork ve Minimum Tork Değerleri.

Parametreler [°, mm,mm]	Ortalama tork [Nm]	Dalgalanma [SI]	Tmax
thetax='1deg' ws='16mm' wss='14mm'	2,1013	53,1663 (SI)	3,3193
thetax='1deg' ws='18mm' wss='14mm'	2,2210	44,6257 (SI)	3,3043
thetax='1deg' ws='20mm' wss='14mm'	2,2779	38,0777 (SI)	3,2078
thetax='1deg' ws='22mm' wss='14mm'	2,3695	35,8679 (SI)	3,2473
thetax='2deg' ws='16mm' wss='14mm'	1,9908	55,1138 (SI)	3,3154

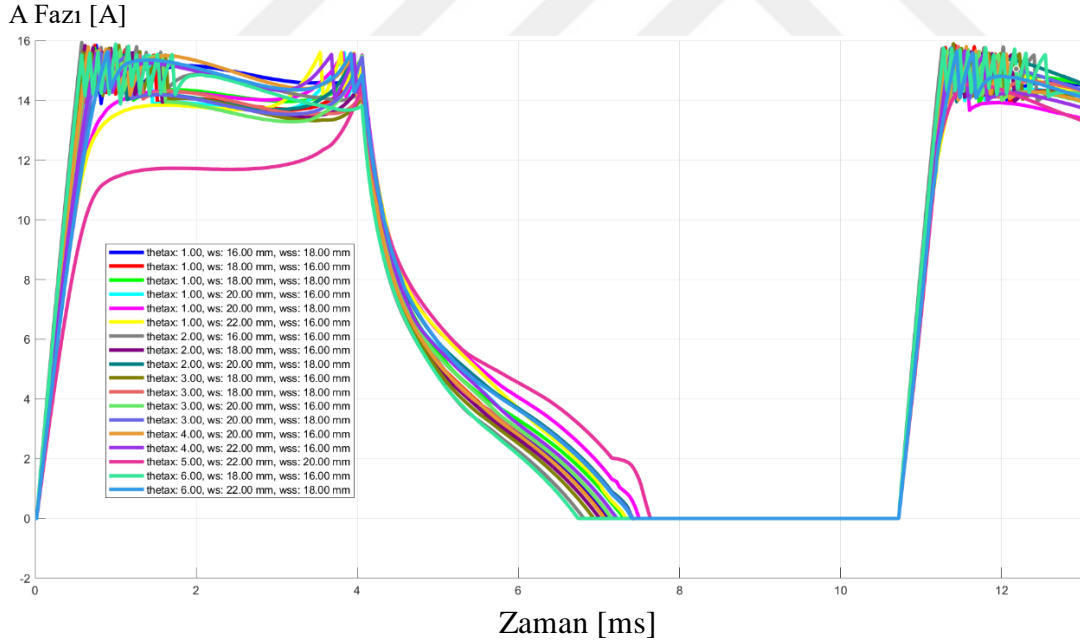
thetax='2deg' ws='18mm' wss='14mm'	2,1522	47,1865 (SI)	3,3132
thetax='2deg' ws='20mm' wss='14mm'	2,3214	41,1093 (SI)	3,2816
thetax='2deg' ws='22mm' wss='14mm'	2,3954	37,4543 (SI)	3,3013
thetax='3deg' ws='16mm' wss='14mm'	1,9469	58,7840 (SI)	3,3240
thetax='3deg' ws='18mm' wss='14mm'	2,0851	49,6140 (SI)	3,3076
thetax='3deg' ws='20mm' wss='14mm'	2,2356	42,8390 (SI)	3,2911
thetax='3deg' ws='22mm' wss='14mm'	2,3607	38,5253 (SI)	3,3001
thetax='4deg' ws='16mm' wss='14mm'	1,8202	62,1009 (SI)	3,2985
thetax='4deg' ws='18mm' wss='14mm'	2,0633	52,0664 (SI)	3,3075
thetax='4deg' ws='20mm' wss='14mm'	2,1963	44,6492 (SI)	3,3017
thetax='4deg' ws='22mm' wss='14mm'	2,2945	39,4321 (SI)	3,3119
thetax='5deg' ws='16mm' wss='14mm'	1,7404	65,8526 (SI)	3,3062
thetax='5deg' ws='18mm' wss='14mm'	1,9475	54,7021 (SI)	3,2118
thetax='5deg' ws='20mm' wss='14mm'	2,1491	47,3066 (SI)	3,2735
thetax='5deg' ws='22mm' wss='14mm'	2,2838	41,2745 (SI)	3,3057
thetax='6deg' ws='16mm' wss='14mm'	1,6862	70,1871 (SI)	3,2946
thetax='6deg' ws='18mm' wss='14mm'	1,8362	57,6251 (SI)	3,2274
thetax='6deg' ws='20mm' wss='14mm'	2,0323	48,5312 (SI)	3,2363
thetax='6deg' ws='22mm' wss='14mm'	2,1486	41,5357 (SI)	3,2207
thetax='1deg' ws='16mm' wss='16mm'	2,2044	41,9798 (SI)	3,1746
thetax='1deg' ws='18mm' wss='16mm'	2,3289	33,999 (SI)	3,1577
thetax='1deg' ws='20mm' wss='16mm'	2,4212	27,8867 (SI)	3,2215
thetax='1deg' ws='22mm' wss='16mm'	2,3952	24,9533 (SI)	2,9198
thetax='2deg' ws='16mm' wss='16mm'	2,1091	44,5224 (SI)	3,1620
thetax='2deg' ws='18mm' wss='16mm'	2,2528	35,9231 (SI)	3,1970
thetax='2deg' ws='20mm' wss='16mm'	2,4413	31,0820 (SI)	3,3324
thetax='2deg' ws='22mm' wss='16mm'	2,4546	27,0504 (SI)	3,2531
thetax='3deg' ws='16mm' wss='16mm'	1,9976	47,3171 (SI)	3,0577
thetax='3deg' ws='18mm' wss='16mm'	2,1787	38,4620 (SI)	3,1962
thetax='3deg' ws='20mm' wss='16mm'	2,3204	31,8220 (SI)	3,2909
thetax='3deg' ws='22mm' wss='16mm'	2,4286	28,2404 (SI)	3,2467
thetax='4deg' ws='16mm' wss='16mm'	1,9409	51,8250 (SI)	3,2080
thetax='4deg' ws='18mm' wss='16mm'	2,1468	41,9090 (SI)	3,1529
thetax='4deg' ws='20mm' wss='16mm'	2,3451	35,1812 (SI)	3,3536
thetax='4deg' ws='22mm' wss='16mm'	2,4044	29,7982 (SI)	3,2600
thetax='5deg' ws='16mm' wss='16mm'	1,9280	56,8164 (SI)	3,2385
thetax='5deg' ws='18mm' wss='16mm'	2,1017	45,3534 (SI)	3,1585
thetax='5deg' ws='20mm' wss='16mm'	2,2739	37,2892 (SI)	3,3360
thetax='5deg' ws='22mm' wss='16mm'	2,3963	31,1833 (SI)	3,2366
thetax='6deg' ws='16mm' wss='16mm'	1,8036	60,2198 (SI)	3,1483
thetax='6deg' ws='18mm' wss='16mm'	2,0151	48,5947 (SI)	3,1527
thetax='6deg' ws='20mm' wss='16mm'	2,3140	40,3756 (SI)	3,3331
thetax='6deg' ws='22mm' wss='16mm'	2,3552	33,0876 (SI)	3,2369
thetax='1deg' ws='16mm' wss='18mm'	2,3960	34,7721 (SI)	3,4831
thetax='1deg' ws='18mm' wss='18mm'	2,5280	28,5406 (SI)	3,4093
thetax='1deg' ws='20mm' wss='18mm'	2,5172	25,3778 (SI)	3,4995

thetax='1deg' ws='22mm' wss='18mm'	1,7083	23,1554 (SI)	2,6040
thetax='2deg' ws='16mm' wss='18mm'	2,3239	37,4337 (SI)	3,2264
thetax='2deg' ws='18mm' wss='18mm'	2,4518	30,6334 (SI)	3,3790
thetax='2deg' ws='20mm' wss='18mm'	2,5345	26,5768 (SI)	3,4714
thetax='2deg' ws='22mm' wss='18mm'	1,9500	23,2575 (SI)	2,8328
thetax='3deg' ws='16mm' wss='18mm'	2,2169	40,4204 (SI)	3,1969
thetax='3deg' ws='18mm' wss='18mm'	2,3801	32,6368 (SI)	3,3224
thetax='3deg' ws='20mm' wss='18mm'	2,4895	27,8912 (SI)	3,4564
thetax='3deg' ws='22mm' wss='18mm'	2,2012	24,6894 (SI)	3,1537
thetax='4deg' ws='16mm' wss='18mm'	2,1802	45,0525 (SI)	3,2879
thetax='4deg' ws='18mm' wss='18mm'	2,3117	34,7715 (SI)	3,2004
thetax='4deg' ws='20mm' wss='18mm'	2,4907	29,8704 (SI)	3,4471
thetax='4deg' ws='22mm' wss='18mm'	2,4184	26,4364 (SI)	3,4818
thetax='5deg' ws='16mm' wss='18mm'	2,1047	49,6466 (SI)	3,2990
thetax='5deg' ws='18mm' wss='18mm'	2,3064	38,4782 (SI)	3,2806
thetax='5deg' ws='20mm' wss='18mm'	2,3839	31,0882 (SI)	3,3474
thetax='5deg' ws='22mm' wss='18mm'	2,5112	28,4119 (SI)	3,4426
thetax='6deg' ws='16mm' wss='18mm'	1,9743	53,5958 (SI)	3,2923
thetax='6deg' ws='18mm' wss='18mm'	2,1832	41,6598 (SI)	3,2624
thetax='6deg' ws='21mm' wss='18mm'	2,6958	20,1756 (SI)	3,4622
thetax='6deg' ws='22mm' wss='18mm'	2,4826	29,4856 (SI)	3,3835
thetax='1deg' ws='16mm' wss='20mm'	2,5485	29,1588 (SI)	3,4143
thetax='1deg' ws='18mm' wss='20mm'	2,4517	26,4827 (SI)	3,5803
thetax='1deg' ws='20mm' wss='20mm'	1,8120	24,8035 (SI)	2,7860
thetax='1deg' ws='22mm' wss='20mm'	1,2427	27,4597 (SI)	2,0985
thetax='2deg' ws='16mm' wss='20mm'	2,4545	31,1687 (SI)	3,1575
thetax='2deg' ws='18mm' wss='20mm'	2,5476	27,0925 (SI)	3,5618
thetax='2deg' ws='20mm' wss='20mm'	2,0503	25,0624 (SI)	3,0215
thetax='2deg' ws='22mm' wss='20mm'	1,3999	26,3099 (SI)	2,4254
thetax='3deg' ws='16mm' wss='20mm'	2,3803	34,1311 (SI)	3,1601
thetax='3deg' ws='18mm' wss='20mm'	2,5274	28,3352 (SI)	3,4940
thetax='3deg' ws='20mm' wss='20mm'	2,2931	26,0083 (SI)	3,2748
thetax='3deg' ws='22mm' wss='20mm'	1,5779	25,4271 (SI)	2,5167
thetax='4deg' ws='16mm' wss='20mm'	2,3221	38,3532 (SI)	3,2294
thetax='4deg' ws='18mm' wss='20mm'	2,4710	29,7642 (SI)	3,3586
thetax='4deg' ws='20mm' wss='20mm'	2,4458	26,8884 (SI)	3,6227
thetax='4deg' ws='22mm' wss='20mm'	1,7858	25,3047 (SI)	2,7040
thetax='5deg' ws='16mm' wss='20mm'	2,2824	43,3109 (SI)	3,2384
thetax='5deg' ws='18mm' wss='20mm'	2,3663	31,5036 (SI)	3,2565
thetax='5deg' ws='20mm' wss='20mm'	2,5011	27,9549 (SI)	3,5161
thetax='5deg' ws='22mm' wss='20mm'	2,0038	25,7479 (SI)	2,9461
thetax='6deg' ws='16mm' wss='20mm'	2,1112	47,3963 (SI)	3,2051
thetax='6deg' ws='18mm' wss='20mm'	2,3159	35,1895 (SI)	3,1210
thetax='6deg' ws='20mm' wss='20mm'	2,4617	28,7885 (SI)	3,4168
thetax='6deg' ws='22mm' wss='20mm'	2,2317	26,5875 (SI)	3,2209

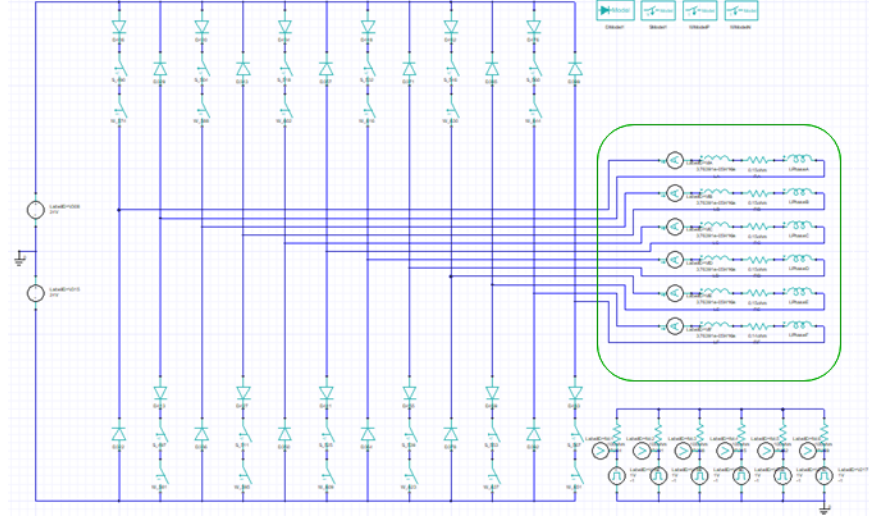
Şekil 3.6'te faz akımlarının anahtarlama geçişleri verilmiştir. Şekil 3.7'de 18 farklı parametreye ait A fazlarının akım grafiği sunulmuş ve bu parametrelerin motor performansı üzerindeki etkileri detaylı bir biçimde incelenmiştir. Faz akımlarının maksimum noktaları ve kapanma zamanları olarak incelenmiştir. Şekil 3.8'de analizde kullanılan devre gösterilmiştir.



Şekil 3. 6. Birinci Tip Rotoru Değiştirilmiş ARM'nin Faz Akımlarının Anahtarlama Geçişleri.



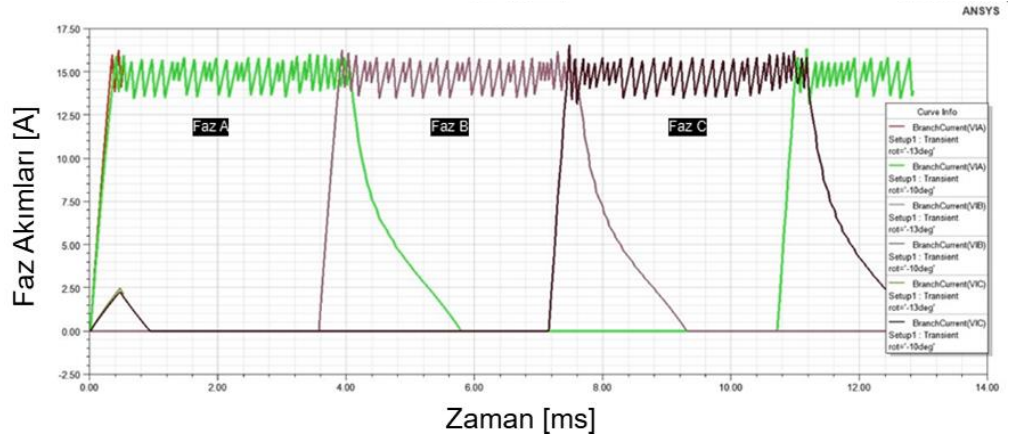
Şekil 3. 7. 18 Farklı Parametreye Ait Faz A Akımlarının Anahtarlama Geçişleri.



Şekil 3. 8. Üç farklı Rotoru Değiştirilmiş ARM'lerin Devresi.

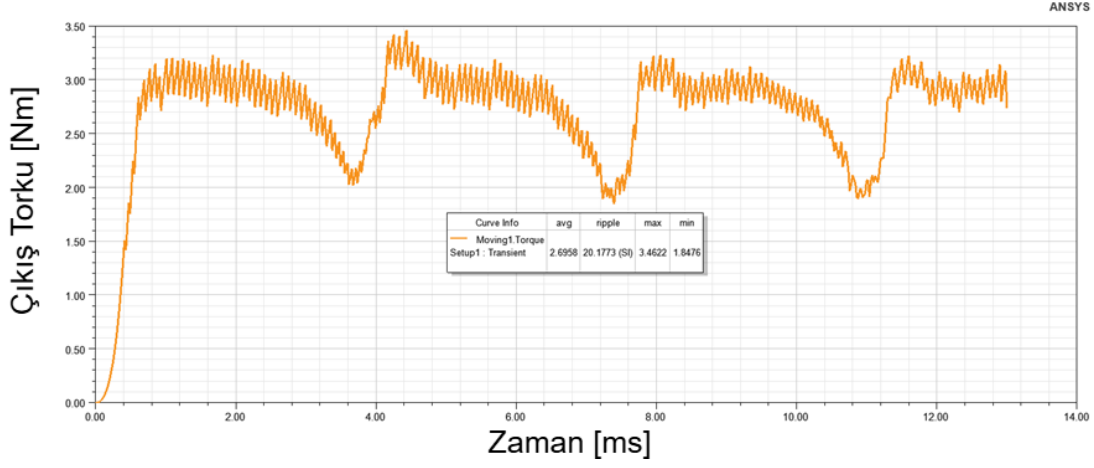
Şekil 3.8'de işaretli alan faz sargılarının eş değer modelini temsil etmektedir. Şekil 3.8'de görüldüğü gibi faz sargıları paralel olarak bağlanmıştır. Üç farklı rotoru değiştirilmiş 6/4 ARM tasarımlarında Şekil 3.8'de görülen devre kullanılmıştır.

Motor DC bara gerilimi 48V'tan 96V'a yükseltilmiş ve Şekil 3.9'da fazların anahtarlama durumları gösterilmiştir. Yapılan analizlerde akımın daha erken kesildiği gözlemlenmiş olup bu durum yalnızca etkisini değerlendirmek amacıyla bu çalışmada incelenmiştir.



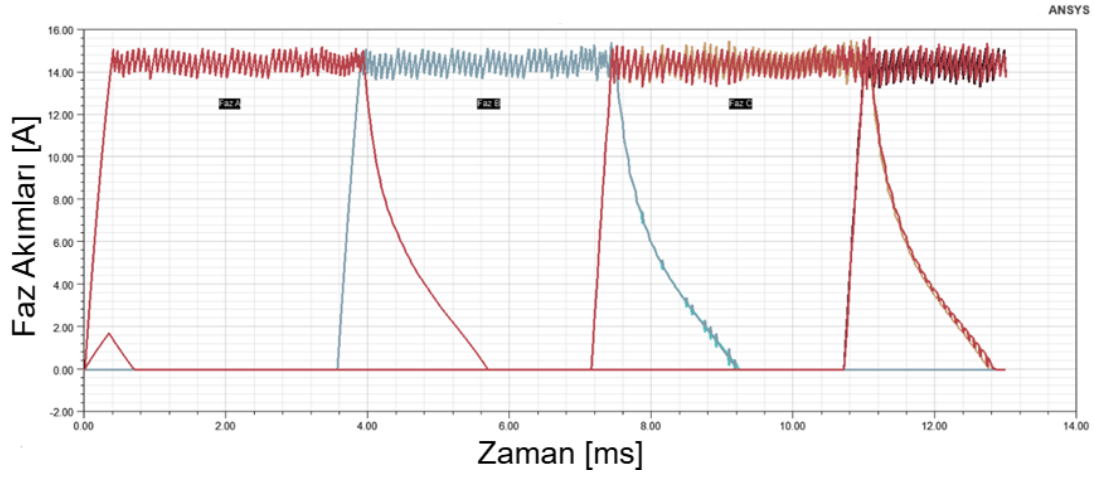
Şekil 3. 9. Birinci Tip Rotoru Değiştirilmiş ARM'nin 96V Versiyonu Akım Anahtarlama Geçişleri.

Tablo 3.4'teki seçilen parametrelere uygun olarak birinci tip rotoru değiştirilmiş ARM'nin tork grafiği Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Bu parametreler ve verileri Tablo 3.4'te özel olarak işaretlenmiştir.



Şekil 3. 10. Birinci Tip Rotoru Değiştirilmiş ARM'nin Seçilen Parametrelerle Tork Grafiği.

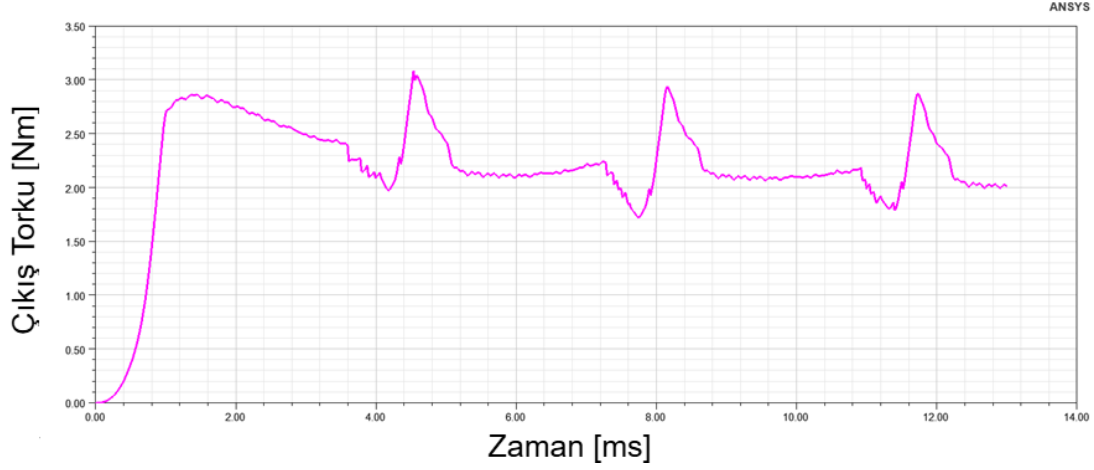
Şekil 3.11'de seçilen parametrelere ait faz akımlarının anahtarlama grafiği gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde faz akımlarının daha erken kapanma eğiliminde olduğu görülmektedir.



Şekil 3. 11. Seçilen Parametreler İçin Faz Akımlarının Anahtarlama Davranışı.

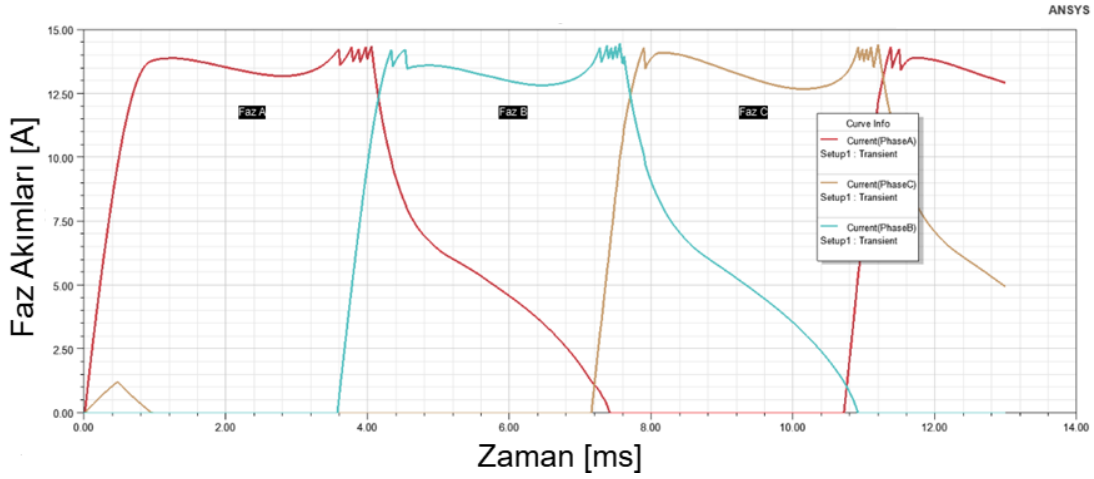
3.2.2. İkinci Tip Rotoru Değiştirilmiş 6/4 ARM

Şekil 3.12'de ikinci tip rotoru değiştirilmiş 6/4 ARM verilmiştir.



Şekil 3. 13. İkinci Tip Rotoru Değiştirilmiş 6/4 ARM Tork Grafiği.

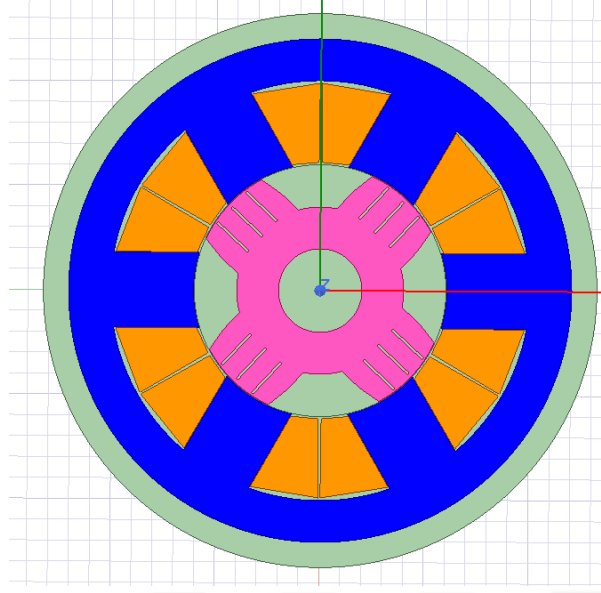
Şekil 3.14'de ikinci tip rotoru değiştirilmiş ARM'nin faz akımlarına ait anahtarlama grafiği sunulmuştur. Seçilen parametreye uygun olarak fazların daha geç kapandığı gözlemlenmektedir bu durum motorun performansına yönelik detaylı analizler yapılmasına olanak tanımaktadır.



Şekil 3. 14. İkinci Tip Rotoru Değiştirilmiş ARM'nin Faz Akımlarına Ait Anahtarlama Grafiği.

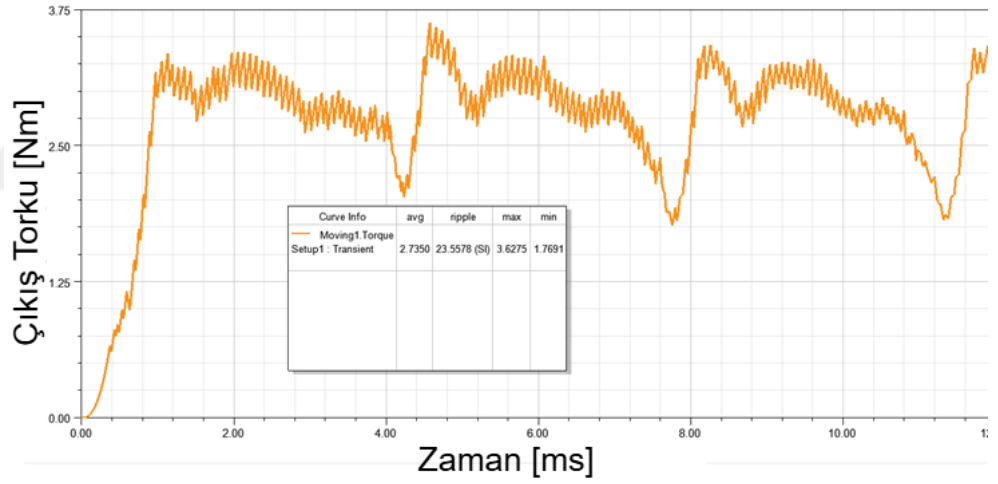
3.2.3. Üçüncü Tip Rotoru Değiştirilmiş 6/4 ARM

Şekil 3.15'te üçüncü tip rotoru değiştirilmiş 6/4 ARM verilmiştir.



Şekil 3. 15. Üçüncü Tip Rotoru Değiştirilmiş 6/4 ARM.

Şekil 3.16'da üçüncü tip rotoru değiştirilmiş ARM'nin tork grafiği verilmiştir.



Şekil 3. 16. Üçüncü Tip Rotoru Değiştirilmiş ARM'nin Tork Grafiği.

3.2.4. Rotoru Değiştirilmiş ARM'lerin Karşılaştırılması

Bu bölümde rotoru değiştirilmiş ARM'lerin ortalama tork ve tork dalgalanmaları performans açısından karşılaştırılmıştır. Tablo 3.6'da üç farklı rotoru değiştirilmiş ARM'nin performans karşılaştırılması verilmiştir.

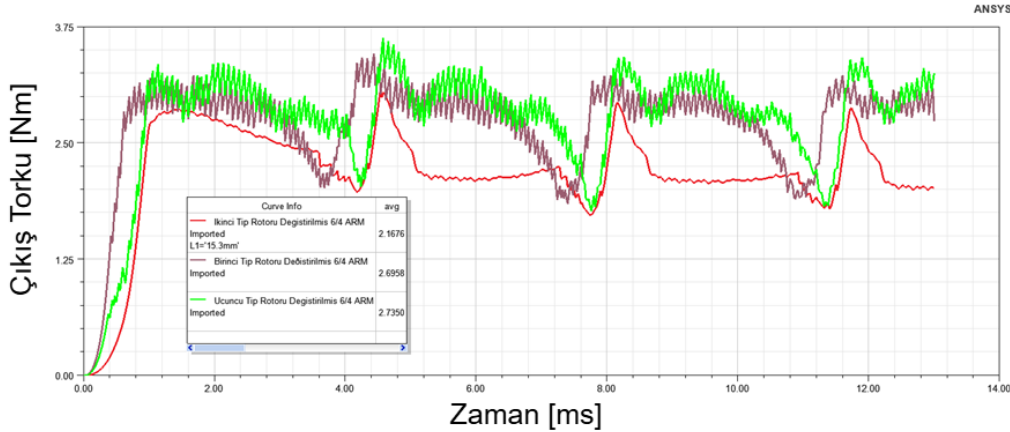
Tablo 3. 6. Üç Farklı Rotoru Değiştirilmiş ARM'nin Performans Karşılaştırması

	Ortalama Tork	Tork Dalgalanması	Minimum Tork[Nm]	Maksimum Tork[Nm]	Tork Dalgalanması
		(SI)			(%)
Birinci tip	2,6958Nm	20,1756(SI)	1,84Nm	3,4622m	59
İkinci tip	2,1676Nm	24,77(SI)	1,72Nm	3,0865m	62
Üçüncü Tip	2,7350Nm	23,55(SI)	1,76Nm	3,627Nm	67

Tablo 3.6'ya göre ortalama tork ve tork dalgalanması birlikte değerlendirildiğinde birinci tipin daha iyi performans sergilediği sonucuna varılmıştır. Tork dalgalanması yüzdesel olarak Denklem 20'deki gibi bulunur.

$$\%Tork\ dalgallığı = \frac{Maksimum\ Tork - Minimum\ Tork}{Ortalama\ Tork} \times 100 \quad (20)$$

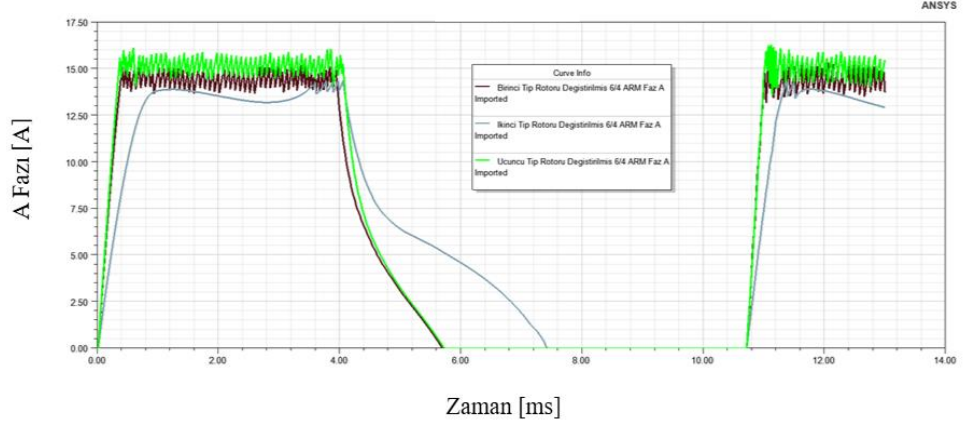
Şekil 3.17'de 3 farklı rotoru değiştirilmiş 6/4 ARM'ye ait tork grafikleri karşılaştırılmış ve sonuçlar özetlenmiştir. Bu karşılaştırma farklı rotor yapılarına göre elde edilen tork performanslarının detaylı bir analizini sunarak tasarım değişikliklerinin etkilerini ortaya koymaktadır.



Şekil 3. 17. 3 Farklı Rotoru Değiştirilmiş 6/4 ARM'ye Ait Tork Grafiklerinin Karşılaştırılması.

Şekil 3.18'de 3 farklı rotoru değiştirilmiş 6/4 ARM'lerin A fazı akımlarına ait grafikler sunulmuştur. Bu grafikler farklı rotor yapılarına göre faz akımlarının kapanma zamanlarını detaylı olarak incelemektedir. Analizler rotor değişikliklerinin faz kapanma süreçlerine etkisini göstererek motor performansı

üzerinde önemli sonuçlar ortaya koymaktadır. Bu sayede tasarım değişikliklerinin akım geçişlerine ve anahtarlama davranışına etkileri daha net olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3. 18. 3 Farklı Rotoru Değiştirilmiş 6/4 ARM'nin A Fazı Akım Grafikleri.

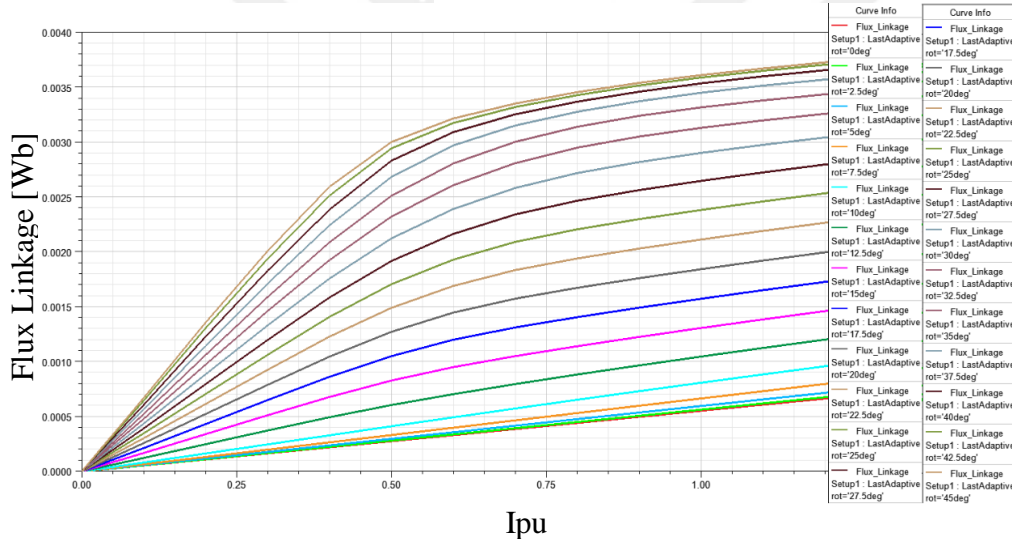
3.3. Verim ve EN 60034 Standardı

EN 60034 standardı elektrik motorlarının verimliliğini ölçme yöntemlerini ve hesaplama prosedürlerini belirlerken ARM gibi özel motor türlerinin de verimliliğinin doğru olarak değerlendirilmesine olanak tanır. ARM'lerin verimliliği bu standart çerçevesinde tork üretimi, kayıplar ve enerji dönüşüm süreçleri dikkate alınarak ölçülür. Standart ARM motorlarının enerji performansını optimize etmek için güvenilir bir referans sağlar ve motorların enerji tüketiminde daha verimli çalışmasını hedefler. Bu sayede ARM'ler yüksek verimlilik sınıflarında yer alabilir ve enerji tasarruflu uygulamalarda kullanılabilir.

Bu çalışmada EN 60034-2-1 standardına uygun verimlilik kriterleri göz önünde bulundurularak motor parametreleri seçilmiştir. %83 verimlilik oranına sahip birinci tip rotoru değiştirilmiş ARM IE3 (Premium Verimlilik) sınıfına girmektedir.

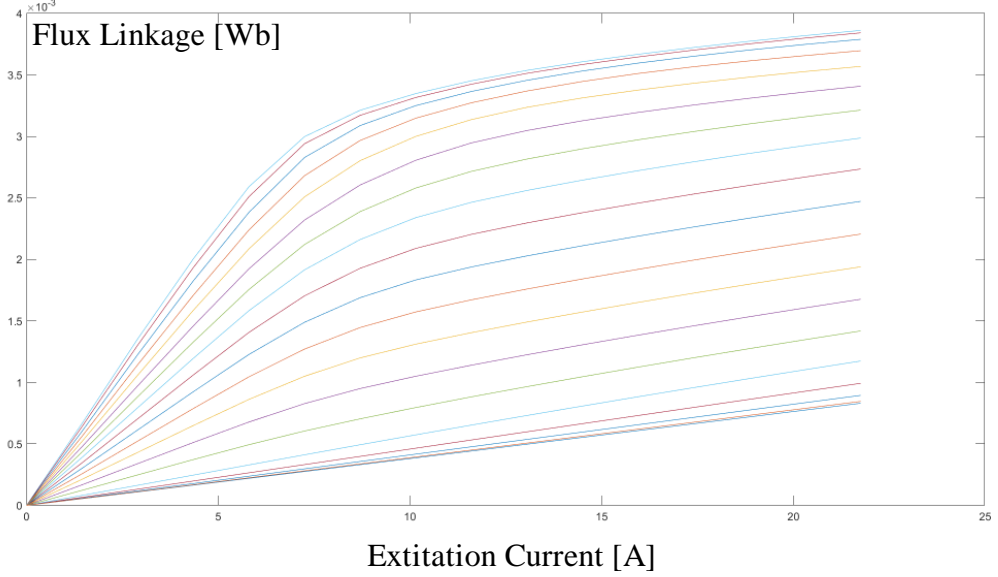
4. MATLAB SIMULINK ANALİZİ

Bu bölümde ANSYS'ten elde edilen sonuçlar MATLAB Simulink ortamında doğrulanmıştır. Simulink modeli ile motorun dinamik davranışları analiz edilmiştir ve tork üretimi değerlendirilmiştir. Ayrıca anahtarlama açılımları üzerinde yapılan değişiklikler kullanılarak motorun performansına olan etkiler MATLAB ortamında incelenmiş ve analiz sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmalar motor tasarımının optimizasyonu ve performans iyileştirmeleri için önemli veriler sunmaktadır. Şekil 4.1'de "Flux Linkage" değeri rotor pozisyonu parametresi kullanılarak analiz edilmiş ve grafik üzerinde gösterilmiştir. Bu analiz ilgili verilerin "CSV" dosyası formatında MATLAB ortamına tanıtılması ve okunması ile gerçekleştirilmiştir. Bu sayede elde edilen veriler MATLAB kullanılarak işlenmiş ve analiz edilmiştir. Bu bölümde Birinci Tip Rotoru Değiştirilmiş ARM ele alınmıştır.



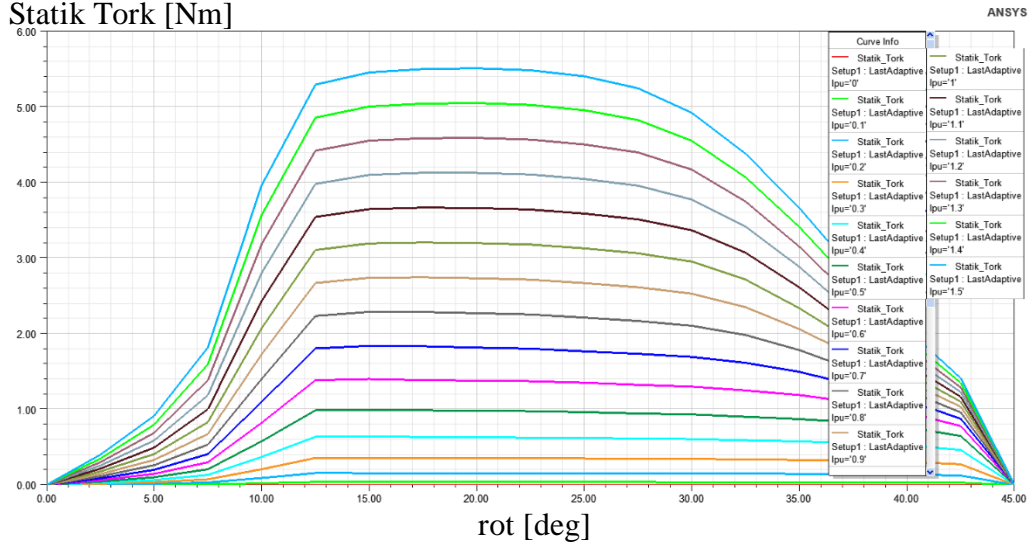
Şekil 4. 1. Flux Linkage Analizi.

Şekil 4.2’de ANSYS’ten elde edilen “Flux Linkage” grafiğinin MATLAB’a aktarılması ve doğrulama işlemi gösterilmektedir. Bu süreçte grafiğin MATLAB ortamında doğru olarak analiz edilmesi sağlanmıştır. Şekil 4.2’de “excitation current” elektrik makinesinin manyetik devresinde manyetik alan oluşturmak için gereken akımı temsil etmektedir.

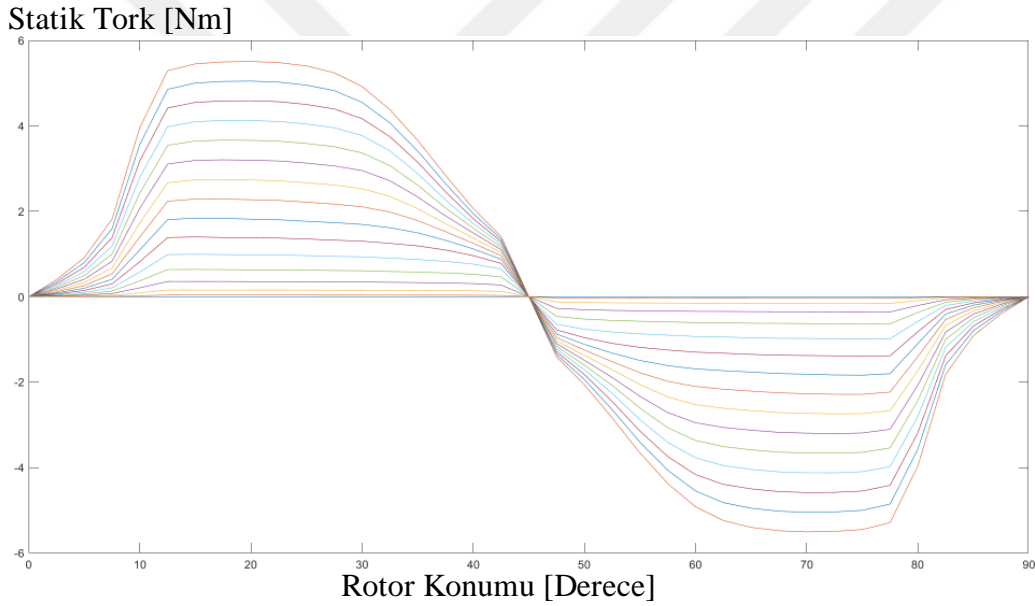


Şekil 4. 2. Flux Linkage Grafiğinin MATLAB'a Aktarımı.

Statik tork analizleri elektrik motorları ve özellikle Anahtarlama Relüktans Motor gibi makinelerin performans değerlendirmesinde önemli bir rol oynar. Statik tork motor rotorunun belirli bir açısız pozisyonda hareket etmeden ürettiği tork miktarını ifade eder ve motor tasarımının performansını anlamak ve optimize etmek için kritik öneme sahiptir. Statik tork analizleri motor tasarımındaki tork dalgalanmalarını belirlemek ve minimize etmek için kullanılır; özellikle ARM'lerde tork dalgalanmalarını azaltmak daha pürüzsüz bir çalışma sağlamak açısından önemlidir. Rotorun farklı pozisyonlarında üretilen torku incelemek rotor geometrisinin motor performansı üzerindeki etkisini değerlendirmeye olanak tanır. Ayrıca statik tork eğrileri anahtarlama açıları gibi kontrol parametrelerinin optimizasyonunda rehberlik ederek motor performansını artırmak için kullanılır. Şekil 4.3'te statik tork analizleri ANSYS kullanılarak elde edilmiştir. ANSYS motorun farklı rotor pozisyonlarındaki tork dağılımını simüle ederek rotor geometrisinin ve manyetik alanın etkisini detaylı bir biçimde inceler. Şekil 4.3'teki grafikteki "rot" olarak tanımlanan parametre rotor konumunun açısını temsil etmektedir. Şekil 4.4'te ANSYS'ten elde edilen CSV dosyası MATLAB ortamında analiz edilmiş ve burada statik tork eğrisi oluşturulmuştur.



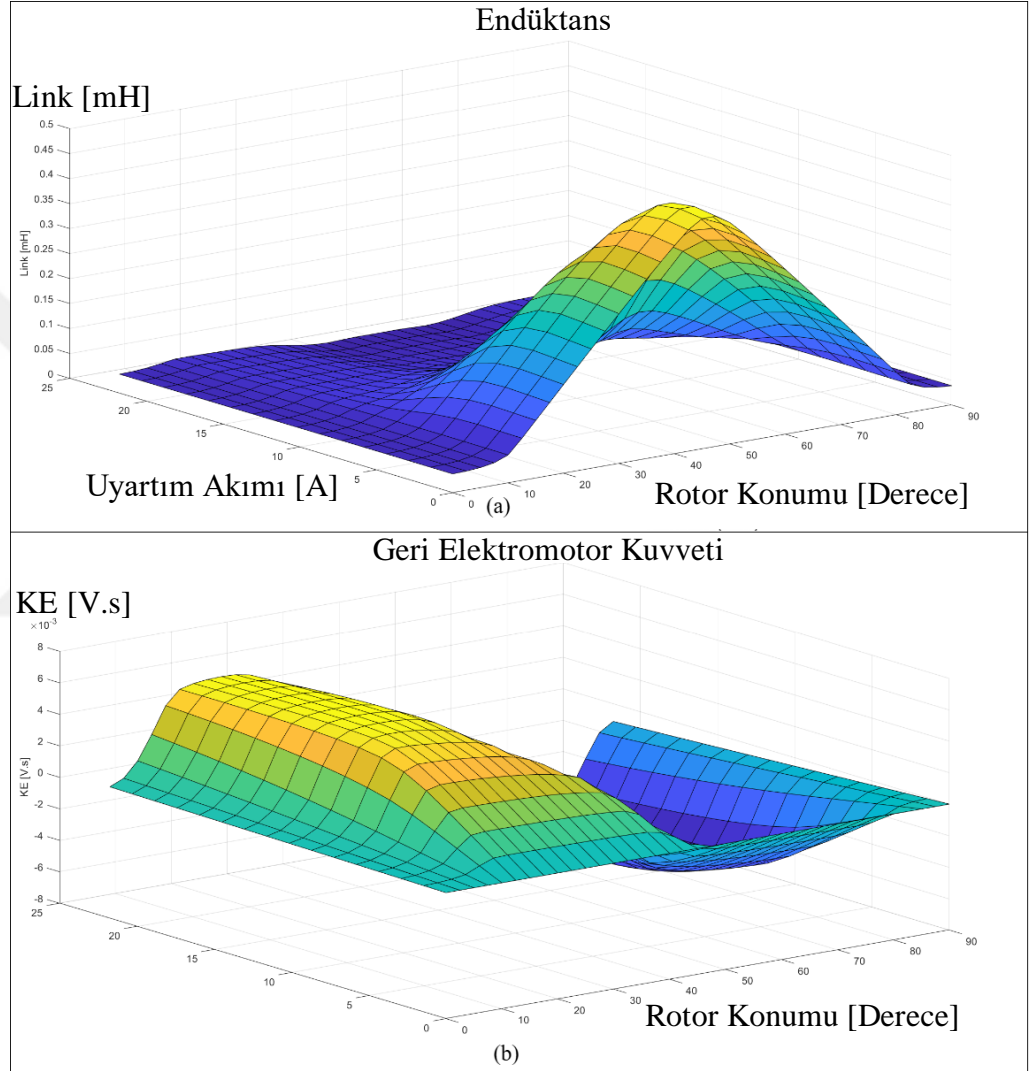
Şekil 4. 3. ANSYS Statik Tork Analizi.



Şekil 4. 4. ANSYS Verisiyle MATLAB'da Statik Tork Eğrisi.

Şekil 4.5(a)'da motorun matematiksel modeli aktarılmış ve elektrik ile mekanik parametrelere göre endüktans eğrisi verilmiştir. Şekil 4.5(b)'de ise motora ait geri elektromotor kuvveti (Back-EMF) verilmiştir. ARM'deki geri elektromotor kuvveti (Back-EMF) motorun performansını etkileyen kritik bir parametredir. Bu kuvvet rotor hareketi sırasında motor sargılarında indüklenen ters yönlü bir gerilimdir ve motorun hızına, manyetik akı yoğunluğuna ve yapısal tasarımına bağlıdır. Geri elektromotor kuvveti analizi motorun verimliliği, hız kontrolü ve enerji dönüşümü üzerindeki etkilerini anlamak için gereklidir.

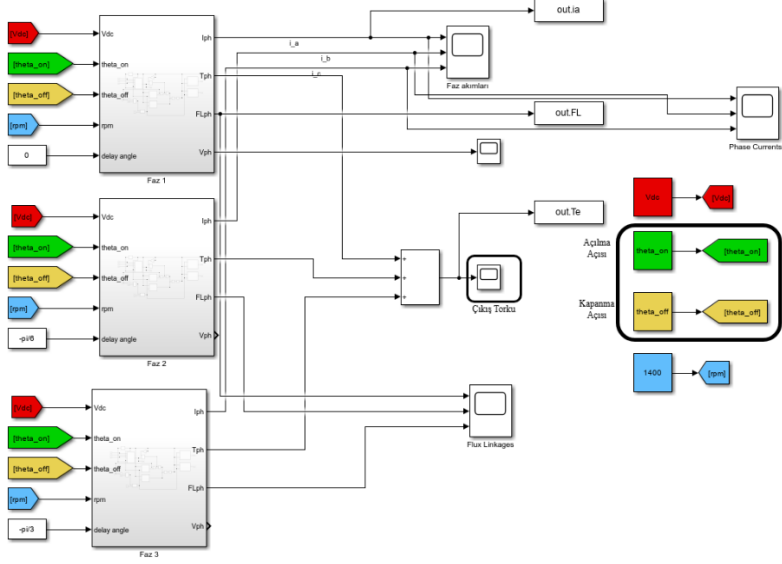
Özellikle ARM gibi yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda geri elektromotor kuvveti motorun çıkış torkunu, akım dalgalanmalarını ve enerji kayıplarını etkileyebilir. Ayrıca bu kuvvetin frekans ve genlik özellikleri motorun anahtarlama açılarının ve kontrol algoritmalarının optimize edilmesi açısından önemlidir. Bu nedenle ARM'deki Back-EMF analizi hem tasarım hem de kontrol aşamalarında motor performansını iyileştirmek için kritik bir rol oynar.



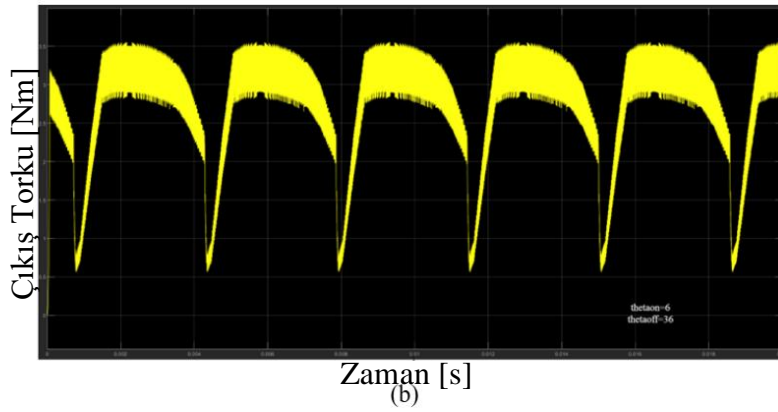
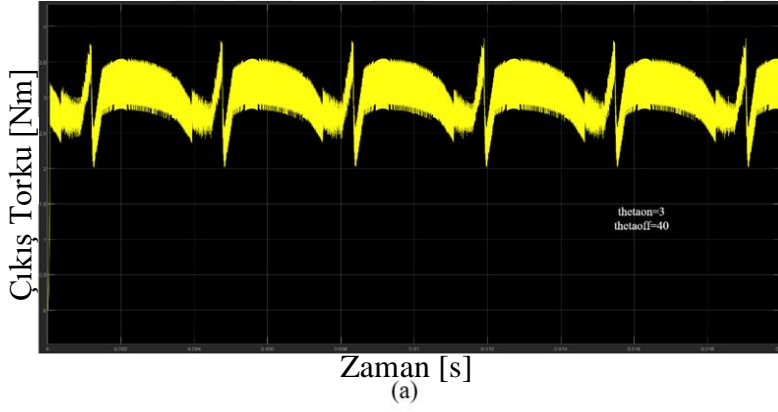
Şekil 4. 5. (a) Endüktans Eğrisi, (b) Motora Ait Geri Elektromotor Kuvveti.

Şekil 4.6'da ARM'nin MATLAB Simulink ortamındaki simülasyonu gösterilmiştir; çıkış torku bloğu ve açılma-kapanma açıları işaretlenmiştir. Bu çalışmada açılma ve kapanma açıları MATLAB Simulink aracılığıyla gözlemlenmiş ve etkileri incelenmiştir. Şekil 4.7(a)'da "thetaon" değeri 3 derece ve "thetaoff" değeri 40 derece olarak ayarlanarak elde edilen çıkış torku grafiği, Şekil 4.7(b)'de ise "thetaon" değeri 6 derece ve "thetaoff" değeri 36 derece olarak

ayarlanarak elde edilen grafiği göstermektedir. "thetaon" değeri açılma açısını, "thetaoff" değeri kapanma açısını temsil etmektedir.



Şekil 4. 6. Matlab Simulink Modeli.



Şekil 4. 7. (a) thetaon=3 thetaoff=40, (b) thetaon=6 thetaoff=36 Tork grafiği.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada ANSYS RMxprt ve ANSYS Maxwell 2D yazılımları kullanılarak anahtarlama relüktans motorun (ARM) manyetik ve elektriksel performansı optimize edilmiş farklı rotor yapısına sahip üç ARM tasarımı analiz edilmiştir. Faz akımı, stator iç çapı, sarım sayısı, hava aralığı ve rotor kutup yay açısı gibi parametrelerin etkisi ve birbirleriyle olan etkileşimleri detaylı bir biçimde incelenmiş bu parametreler üç farklı rotoru değiştirilmiş ARM tasarımına referans oluşturmuştur. Simulink ortamında oluşturulan MATLAB modeli anahtarlama açılarını daha rahat incelemeye olanak tanıyarak tasarım sürecini desteklemiştir. Yapılan analizler sonucunda "thetaon" değeri 3 derece ve "thetaoff" değeri 40 derece olarak en optimal değerler bulunmuştur. Performans karşılaştırmaları sonucunda 6/4 ARM tasarım parametreleri incelenerek farklı rotor yapısı ile tork dalgalanmasının %59'a kadar azaltıldığı, hedeflenen 2Nm çıkış torkunun elde edildiği ve %83 verime sahip birinci tip rotoru değiştirilmiş 6/4 ARM tasarımının optimal tasarım olarak öne çıktığı tespit edilmiştir. Çalışma, faz akımı, stator iç çapı, sarım sayısı, hava aralığı ve rotor kutup yay açısı gibi parametrelerin ARM performansına etkilerini inceleyerek ARM tasarımı ve optimizasyonu konusunda literatüre değerli bir kaynak sunmaktadır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Alipour-Sarabi, R., Nasiri-Gheidari, Z., & Oraee, H.,** (2019). Development of a three-dimensional magnetic equivalent circuit model for axial flux machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(7), 5758-5767.
- Ashok, P., & Tesar, D.,** (2006, July). Computer aided design of switched reluctance motors for use in robotic actuators. In *2006 World Automation Congress* (pp. 1-7). IEEE.
- Bal, G.,** Özel Elektrik Makineleri, Seçkin Yayınları, Ankara 2004.
- Beşenek, N.,** (1988). Numerically calculated force and permeance data for doubly salient geometries (Master's thesis, Middle East Technical University).
- Brauer, H. J., Kasper, K. A., & De Doncker, R. W.,** (2009, November). Design and analysis of a pancake switched reluctance machine for use in household applications. In *2009 International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)* (pp. 1050-1055). IEEE.
- Chancharoensook, P., & Rahman, M. F.,** (2001, October). Magnetization and static torque characterization of a four-phase switched reluctance motor: experimental investigations. In *4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems. IEEE PEDS 2001-Indonesia. Proceedings* (Cat. No. 01TH8594) (Vol. 2, pp. 456-460). IEEE.
- Chiba, A., Kiyota, K., Hoshi, N., Takemoto, M., & Ogasawara, S.,** (2014). Development of a rare-earth-free SR motor with high torque density for hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30(1), 175-182.
- Choi, J. H., Ahn, J. S., & Lee, J.,** (2005). The characteristic analysis of switched reluctance motor considering DC-link voltage ripple on hard and soft chopping modes. *IEEE transactions on magnetics*, 41(10), 4096-4098.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Daldaban, F., & Ustkoyuncu, N.,** (2009, November). A new linear switched reluctance motor with MagLev effect. In 2009 International Conference on Electrical and Electronics Engineering-ELECO 2009 (pp. I-420). IEEE.
- Davis, R. M.,** (1988). A comparison of switched reluctance rotor structures. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 35(4), 524-529.
- Deepak, M., Janaki, G., & Bharatiraja, C.,** (2022). Power electronic converter topologies for switched reluctance motor towards torque ripple analysis. Materials Today: Proceedings, 52, 1657-1665.
- Diril, O.,** Anahtarlamalı Relüktans Motorda Moment Dalgalılığını Enazlama Üzerine Bir Çalışma, Doktora Tezi, İTÜ, İstanbul, 1999.
- Duran, F.,** (2008). Endüstriyel çamaşır makinelerinde anahtarlamalı relüktans motoru kullanımı ve sistemin zeki denetimi.
- Elhomdy, E., Li, G., Liu, J., Bukhari, S. A., & Cao, W. P.,** (2018). Design and experimental verification of a 72/48 switched reluctance motor for low-speed direct-drive mining applications. Energies, 11(1), 192.
- Gao, J., Sun, H., He, L., Dong, Y. & Zheng, Y.,** (2011, August). Optimization design of switched reluctance motor based on particle swarm optimization. In 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems (pp. 1-5). IEEE.
- Gobbi, R., Sahoo, N. C. & Vejian, R.,** (2008). Experimental investigations on computer-based methods for determination of static electromagnetic characteristics of switched reluctance motors. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 57(10), 2196-2211.
- Gürdal, O.,** (2001). Elektrik makinalarının tasarımı. Atlas Yayın Dağıtım.
- Han, S., Diao, K., & Sun, X.,** (2021). Overview of multi-phase switched reluctance motor drives for electric vehicles. Advances in Mechanical Engineering, 13(9), 16878140211045195

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Jape, S. R., & Thosar, A.,** (2017). Comparison of electric motors for electric vehicle application. *international Journal of Research in Engineering and Technology*, 6(09), 12-17.
- Khor, M. T., & Sotudeh, R.,** (2005, September). A 3-phase 12/10 asymmetrical switched reluctance motor. In *2005 European Conference on Power Electronics and Applications* (pp. 9-pp). IEEE.
- Kiyota, K., Kakishima, T., & Chiba, A.,** (2014, September). Cylindrical rotor design for acoustic noise and windage loss reduction in switched reluctance motor for HEV applications. In *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (pp. 1814-1821). IEEE.
- Kjaer, P. C., Nielsen, P., Andersen, L., & Blaabjerg, F.,** (1995). A new energy optimizing control strategy for switched reluctance motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31(5), 1088-1095.
- Kjaer, P. C., Gribble, J. J., Miller, T. J. E.,** “High- Grade Control of Switched Reluctance Machines”, *IEEE Transaction on Industry Applications*, (6), 1585–1593, (November/December, 1996).
- Kocan, S., Rafajdus, P., & Sumega, M.,** (2020, May). Effect of air gap size on parameters of high speed switched reluctance motor. In *2020 ELEKTRO* (pp. 1-5). IEEE
- Kokernak, J. M., & Torrey, D. A.,** (2002). Motor drive selection for automotive applications. *ICEM2002*.
- Krishnan, R.,** *Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications*, London, CRC Press, 2001
- Krishnan, R., Mang, X., & Bharadwaj, A. S.,** (1990). Design and performance of a microcontroller-based switched reluctance motor drive system. *Electric machines and power systems*, 18(4-5), 359-373.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lawrenson, P.J.**, Design And Performance of Switched Reluctance Drives With High Performance Of Drive Characteristics, in Proc. Int. Conf. Power Conversion and Intel. Motion, pp. 1-11, 1989
- Lee, C., Krishnan, R., & Lobo, N. S.**, (2009). Novel two-phase switched reluctance machine using common-pole E-core structure: concept, analysis, and experimental verification. IEEE transactions on industry applications, 45(2), 703-711.
- Liptak, M.**, Principle of Design of Four Phase Low Power Switched Reluctance Machine Aimed to Maximum Torque Production, Journal of Electrical Engineering, 5: 138-143, 2004.
- Lu, Y.**, Instantaneous Torque Control of Switched Reluctance Motors, Master of Science Thesis, The University of Tennessee, 2002
- Moallem, M. & Ong, C. M.**, (1991). Predicting the steady-state performance of a switched reluctance machine. IEEE Transactions on Industry Applications, 27(6), 1087-1097
- Mahariq, I.**, (2009). A normalized set of force and permeance data for doubly-salient magnetic geometries (Master's thesis, Middle East Technical University).
- Maurya, A. K., Maheshwari, M. K., & Gupta, A. K.**, (2024, January). Designing and Modelling of Switched Reluctance Motor with its Characteristics Analysis. In 2024 Fourth International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (ICAECT) (pp. 1-6). IEEE.
- Miller, T. J. E., & McGilp, M.**, (1990, November). Nonlinear theory of the switched reluctance motor for rapid computer-aided design. In IEE Proceedings B (Electric Power Applications) (Vol. 137, No. 6, pp. 337-347). IET Digital Library.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Miller, T.J.E.**, Switched Reluctance Motors and Their Control, Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford, 1-199, 1993.
- Miller, T. J. E.**, (Ed.). (2001). Electronic control of switched reluctance machines. Elsevier.
- Miller, J. M.**, (2004). Propulsion systems for hybrid vehicles (Vol. 45). Iet.
- Nasar, S. A.**, (1969, June). DC-switched reluctance motor. In Proceedings of the institution of electrical engineers (Vol. 116, No. 6, pp. 1048-1049). IET.
- Omaç, Z., Kürüm, H., & Selçuk, A. H.**, (2007). 18/12 kutuplu bir anahtarlı relüktans motorun tasarımı, incelenmesi ve kontrolü” Fırat. University Journal of Engineering Science, 19(3), 339-346.
- Omaç, Z.**, (2006). Yeni bir anahtarlı relüktans motorun tasarımı ve akım kontrolü. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elâzığ.
- Önder, M., Doğan, M. U., & Arslan, M.**, (2019). Anahtarlama frekansının anahtarlama relüktans motorda tork dalgalanmasına etkisinin incelenmesi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 11(1), 13-23.
- ÖZOĞLU, Y.**, Anahtarlama Relüktans Motorunda Kutup Başlarına şekil Vererek Moment Dalgalanmasının Azaltılması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1999.
- Radun, A., Cathey, J., Pais, M. R., Durkin, E., & Weimer, J.**, (1995). Four-Phase Switch Reluctance Machines for More Electric Aircraft Power Generation. SAE transactions, 396-404.
- Rahman, K. M. & Schulz, S. E.**, (2002). Design of high-efficiency and high-torque-density switched reluctance motor for vehicle propulsion. IEEE Transactions on Industry Applications, 38(6), 1500-1507.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Rodrigues, M., Branco, P.J.C., Suemitsu, W.,** “Fuzzy Logic Torque Ripple Reduction by Turn-Off Angle Compensation for Switched Reluctance Motors”, IEEE Transactions of Industrial Electronics, USA, 711-714, (2001)
- Sahin, F., Ertan, H. B. & Leblebicioglu, K.,** (2000). Optimum geometry for torque ripple minimization of switched reluctance motors. IEEE Transactions on Energy Conversion, 15(1), 30-39.
- SEFA, İ., ELMAS, Ç., & ÖZER, Ş.** Sliding Mode Kontrol Yaklaşımı ile Anahtarlama Relüktans Motorun Hız Kontrolü.
- Skvarenina, T. L., Wasynczuk, O., Krause, P. C., Chen, W. Z., Thibodeaux, R. J., & Weimer, J.,** (1996, August). Simulation and analysis of a switched reluctance generator/more electric aircraft power system. In IECEC 96. Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (Vol. 1, pp. 143-147). IEEE.
- Takau, L.,** (2003). Design of a Switched Reluctance Motor for an Electric Vehicle: A Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Electrical and Electronic Engineering in the University of Canterbury (Doctoral dissertation, University of Canterbury).
- Touati, Z., Mahmoud, I., & Khedher, A.,** (2021, March). Torque Ripple Minimization Approach of a 3-phase Switched Reluctance Motor. In 2021 18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD) (pp. 533-538). IEEE.
- Vujicic, V. P., Vukosavic, S. N., & Jovanovic, M. B.,** (2006). Asymmetrical switched reluctance motor for a wide constant power range. IEEE Transactions on Energy Conversion, 21(1), 44-51.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Yang, C., Song, S., Liu, C., Zhong, J., & Sun, G.,** (2023, June). Development of High Voltage Switched Reluctance Starter/Generator System for More Electric Aircraft. In 2023 IEEE 32nd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) (pp. 1-6). IEEE.
- Xue, X. D., Cheng, K. W. E. & Cheung, N. C.,** (2008, December). Selection of electric motor drives for electric vehicles. In 2008 Australasian Universities power engineering conference (pp. 1-6). IEEE.
- Wang, L., Zhang, D., Duan, J., & Gu, R.,** (2022). Research on High Performance Multi-phase DC-DC Converter Applied to Distributed Electric Propulsion Aircraft. IEEE Transactions on Transportation Electrification.

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının her aşamasında bana rehberlik eden ve değerli katkılarını sunan başta Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Özkan Akın'a, desteğini ve yardımını esirgemeyen Dr. Kadir Doğan'a ve Araştırma Görevlisi Mert Altıntaş'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Başta ailem olmak üzere, tüm sevdiklerime destekleri ve anlayışları için teşekkür eder ve minnettarım.

Sonsuz teşekkürlerimle.

11.12.2024

Ümit Candan

ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Ankara'da tamamlamıştır. 2021 yılında Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden mezun olmuştur. 2021 yılında Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır. 2023 yılından itibaren Donanım Tasarım Mühendisi olarak çalışmaktadır.

