

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK HIZ UYGULAMALARI İÇİN YÜKSEK GÜÇ YOĞUNLUKLU YENİ BİR
ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUNUN GELİŞTİRİLMESİ**

YUSUF YAŞA

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK MAKİNALARI VE GÜÇ ELEKTRONİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YARD. DOÇ.DR. MUHAMMET GARİP**

İSTANBUL, 2017

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK HIZ UYGULAMALARI İÇİN YÜKSEK GÜÇ YOĞUNLUKLU YENİ BİR
ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUNUN GELİŞTİRİLMESİ**

Yusuf YAŞA tarafından hazırlanan tez çalışması 5 Ocak 2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yard. Doç. Dr. Muhammet GARİP
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yard. Doç. Dr. Muhammet GARİP
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hacı BODUR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Yaşar BİRBİR
Marmara Üniversitesi

Prof. Dr. Adnan DERDİYOK
Sakarya Üniversitesi

Yard. Doç. Dr. Nihan ALTINTAŞ
Yıldız Teknik Üniversitesi



Bu alışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TUBİTAK) 2214/A numaralı Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı ile desteklenmiştir.

Bu tezde, yüksek hız uygulamalarında kullanılan elektrik motorları incelenmiş, yüksek güç yoğunluğuna sahip yeni teknoloji manyetik laminasyon malzemesi kullanılarak anahtarlamalı relüktans motoru geliştirilmiştir. Elde edilen teorik sonuçlar, benzetim çalışması ve deney sonuçları ile desteklenmiştir.

Tez çalışması Yıldız Teknik Üniversitesi'nde başlamış olup, The University of Akron'da (Ohio,ABD) devam etmiş ve deney çalışması yapılarak sonuçlandırılmıştır. Bu tezin planlanmasında, araştırılmasında ve yürütülmesinde ilgi ve desteğini yanımda hissettiğim kıymetli danışman hocam Yard. Doç. Dr. Muhammet Garip'e (Yıldız Teknik Üniversitesi), çalışmanın gerçekleştirilmesinde bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan ve maddi olanaklarını kullanmaktan çekinmeyen değerli hocam Prof. Dr. Yılmaz Sözer'e (The University of Akron), ve süregelen tez çalışmamın gerek yurt içinde gerekse yurtdışındaki zorlu yollarını birlikte adımladığım, üzüntü ve sevinçlerimi beraber yaşadığım, manevi desteğini biran olsun eksik hissetmediğim pek kıymetli eşime ve bu süreçte bizden dualarını eksik etmeyen aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Aralık, 2017

Yusuf YAŞA

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.1.1 Elektrik Makinalarında Yüksek Hız Kavramı	1
1.1.2 Elektrik Makinalarında Yüksek Hızın Avantajları	3
1.1.3 Elektrik Makinalarında Yüksek Hızın Dezavantajları	3
1.1.4 Yüksek Hızlı Elektrik Makinası Uygulama Alanları	4
1.1.5 Yüksek Hızlı Elektrik Makinaları	5
1.1.6 Literatür Araştırması Sonuçları	23
1.2 Tezin Amacı	25
1.3 Hipotez	25
BÖLÜM 2	
YÜKSEK HIZLI ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MAKİNASININ GELİŞTİRİLMESİ	26
2.1 Anahtarlama Relüktans Makinanın Çalışma Prensibi	26

2.2 Yüksek Hızlı Anahtarlamaalı Relüktans Makinasının Tasarımı.....	29
2.2.1 Elektromanyetik Analiz	38
2.2.2 Mekanik Analiz.....	57
2.2.3 Termal Analiz	71
BÖLÜM 3	
DENEY ÇALIŞMASI	74
3.1 Yüksek hızlı anahtarlamaalı relüktans makinasının üretimi	74
3.2 Anahtarlamaalı relüktans makinası sürücü geliştirilmesi	79
3.3 Deneysel test sonuçları	83
3.3.1 Statik elektriksel testler	84
3.3.2 Dinamik testler.....	87
BÖLÜM 4	
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	96
KAYNAKLAR	97

SİMGE LİSTESİ

$\vec{A}$	Manyetik vektör potansiyeli
B	Akı yoğunluğu
$\vec{B}$	Manyetik akı yoğunluğu vektörü
B_s, B_r	Stator ve rotor kutup yay açısı
$\cos \varphi$	Güç faktörü
D_{ir}	Rotor iç çapı
D_{is}	Stator iç çapı
D_{os}	Stator dış çapı
D, d	Çap
D_r	Rotor çapı
$\vec{f}_{mag}$	Manyetik kuvvet vektörü
F_t, F_r	Teğetsel ve radyel manyetik kuvvet
F_t	Yanal kuvvet
F_r	Radyel kuvvet
f, f_{temel}	Elektriksel uyartım frekansı
$\vec{H}$	Manyetik alan vektörü
I	Faz akımı
$\vec{J}_o$	Akım yoğunluğu vektörü
J	Akım yoğunluğu
K_e	Ters-emk sabiti
k_h, k_e, k_a	Histerezis, eddy ve ekstra (excess) demir kaybı katsayıları
L, l	Eksenel uzunluk
n	Rotasyonel devir sayısı
N_s, N_r	Stator-rotor kutup sayısı
P_c, P_{demir}	Demir güç kaybı
P_h	Histerezis demir güç kaybı
P_e	Eddy akımı demir güç kaybı
P_a, P_{extra}	Ekstra(excess) demir güç kaybı
$P_{mıknatıs}$	Mıknatıs güç kaybı
$P_{hava-sürtünmesi}$	Hava sürtünmesi güç kaybı
P_{rulman}	Rulman güç kaybı
$P_{kılıf}$	Kılıf güç kaybı
P_{mek}	Mekanik çıkış gücü
P_{alan}	Hava aralığı manyetik gücü
p	Kutup sayısı

r	Yarıçap
R	Sargı direnci
q	Faz sayısı
S_1-S_6	İnverter anahtarlama sinyalleri
T_e	Moment
V	Gerilim
v	Çizgisel hız
$V_{\text{bakır}}$	Sargı alanı
Y_s, Y_r	Stator-rotor boyunduruk kalınlığı
ω	Açısal hız
W	Enerji
Δm	Kütle
$\Delta\phi$	Halka açısı
Δr	Kütle genişliği
ρ	Kütle yoğunluğu
σ	Mekanik yük stresi
σ_t	Elektriksel iletkenlik
μ_r	Bağıl manyetik geçirgenlik
μ_0	Hava manyetik geçirgenliği
$\emptyset$	Toplam halkalanan akı
θ	Rotor pozisyonu
η	Verim

KISALTMA LİSTESİ

AM	Asenkron Makine
ARM	Anahtarlama Relüktans Makine
DA	Doğru Akım
EKOK	En Küçük Ortak Kat
GSMSM	Gömülü Sabit Mıknatıslı Senkron Makine
MTPA	Amper Başına Maksimum Moment
SMC	Yumuşak (Soft) Manyetik Komposit
SRM	Senkron Relüktans Makina
SMSM	Sürekli Mıknatıslı Senkron Makina
YHARM	Yüksek Hızlı Anahtarlama Relüktans Motoru
YHEM	Yüksek Hızlı Elektrik Makinası

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Dönen halka kesiti	1
Şekil 1.2 Rotor çizgisel hızı	2
Şekil 1.3 Endüstride kullanılan yüksek hızlı elektrik makinalarının güç-hız değerlerinin karşılaştırılması [22]	6
Şekil 1.4 Literatürdeki yüksek hızlı elektrik makinalarının nominal güç-hız değerlerinin karşılaştırılması [6]	6
Şekil 1.5 Bazı alternatif çoklu demet iletken yapıları [23]	8
Şekil 1.6 3 fazlı 2-seviyeli SMSM sürücüsü-inverter	9
Şekil 1.7 3 fazlı ARM sürücüsü-asimetrik yarım köprü dönüştürücü	9
Şekil 1.8 500 bin d/d, 100W yüksek hızlı SMSM ve kontrol devresi	10
Şekil 1.9 Pozisyon sensörleri: Resolver (solda), artımlı enkoder (sağda) - LTN Servotechnik GmbH	11
Şekil 1.10 Eddy akımı pozisyon sensörü (SUMIDA Components and Modules GmbH ve EFI Automotive)	11
Şekil 1.11 Kalıcı mıknatıslı senkron motorda rotorun 35 bin d/d'da statora sürtmeden önceki ve sonraki hali [4],[7]	12
Şekil 1.12 Rotor yüzeyine sarılmış karbon-fiber bandaj ve tipik stres-gerilme ilişkisi [37]	14
Şekil 1.13 Farklı rotor koruyucu kılıf materyallerinin kullanılması durumunda, rotor kayıplarının rotor hızına bağlı değişimi [36]	14
Şekil 1.14 Gömülü mıknatıslı senkron makina geometrileri ve rotor üzerindeki mekanik stres dağılımı [38]	15
Şekil 1.15 Rotorda oluşabilecek eğilme mod şekilleri	16
Şekil 1.16. Standart mekanik rulmanlar	16
Şekil 1.17. Mıknatıs türlerinin karşılaştırılması [40]	17
Şekil 1.18 Farklı laminasyon materyalleri için demir kaybı aralığı [43]	19

Şekil 1.19 Çeşitli yumuşak manyetik materyallerin koersivite-manyetik saturasyon değerleri [43]	21
Şekil 1.20 Nikel-demir ve kobalt-demir materyallerinin manyetizasyon eğrileri [43] ...	22
Şekil 1.21 Ergimiş amorf materyalinin üretim metodu (melt spinning method) [47] ...	23
Şekil 2.1 Tipik 6/4 ARM geometrisi ve halkanan akı-akım eğrisi	27
Şekil 2.2 İdealleştirilmiş tipik ARM faz endüktansı profili ve motor çalışma için uygulanan akım dalga şekilleri	28
Şekil 2.3 Bir spindle motoru kesiti.....	30
Şekil 2.4 M270-35A ve HiperCo materyallerinin B-H mıknatıslanma eğrilerinin karşılaştırılması	32
Şekil 2.5 6/4 ARM için muhtemel stator-rotor yay açıları	34
Şekil 2.6 Laminasyon malzemesi olarak HiperCo50 ve M250-35A kullanılması halinde (a) verimin (b) toplam kayıp gücün hava aralığı ve oluk iletken sayısına bağlı değişimi	35
Şekil 2.7 Laminasyon uzunluğunun ve iletken sayısının ARM'in (a) verimine ve (b) akım yoğunluğuna etkisi	36
Şekil 2.8 Tasarımı tamamlanan yüksek hızlı ARM.....	37
Şekil 2.9 Yüksek hızlı ARM'in sonlu parçacıklar modeli	38
Şekil 2.10 ARM'in A-fazının 10A doğru akım (DA) ile uyartılma sonucu oluşan manyetik akı yoğunluğu dağılımı	39
Şekil 2.11 ARM'in A-fazının farkı DA seviyelerinde uyartılması sonucu farklı rotor pozisyonlarında oluşan moment, halkalanan akı ve faz endüktansı değişimi.....	41
Şekil 2.12 Dinamik performans analizi için geliştirilmiş ARM simülasyon modeli.....	42
Şekil 2.13 Asimetrik yarım köprü güç dönüştürücüsü devre şeması	42
Şekil 2.14 Uyartım ve iletim açısı tanımları.....	43
Şekil 2.15. Optimizasyon algoritması akış şeması.....	45
Şekil 2.16 20 bin d/d'da minimum moment dalgalılığı için optimizasyon sonucu; $I_{ref}=12A, \theta_{on} = 30^\circ, \theta_{off} = 35^\circ$	46
Şekil 2.17 50 bin d/d'da maksimum ortalama moment için optimizasyon sonucu; $I_{ref}=20A, \theta_{on} = 70^\circ, \theta_{off} = -10^\circ$	47
Şekil 2.18 50 bin d/d'da akım başına maksimum ortalama moment için optimizasyon sonucu; $I_{ref}=20A, \theta_{on} = 70^\circ, \theta_{off} = -10^\circ$	48
Şekil 2.19 Moment-hız algoritması akış şeması	50
Şekil 2.20 Geliştirilen ARM'in 20A ve 12A referans faz akımları ile uyartılması durumunda oluşturulan moment-hız ve Güç-Hız eğrileri.....	51
Şekil 2.21 1000 d/d çalışma hızındaki moment (a) ve faz akımı (b) dalga şekilleri.....	52
Şekil 2.22 3000 d/d çalışma hızındaki moment (a) ve faz akımı (b) dalga şekilleri.....	52

Şekil 2.23 7000 d/d çalışma hızındaki moment (a) ve faz akımı (b) dalga şekilleri.....	52
Şekil 2.24 9000 d/d çalışma hızındaki moment (a) ve faz akımı (b) dalga şekilleri.....	53
Şekil 2.25 15 bin d/d çalışma hızındaki moment (a) ve faz akımı (b) dalga şekilleri.....	53
Şekil 2.26 21 bin d/d çalışma hızındaki moment (a) ve faz akımı (b) dalga şekilleri.....	53
Şekil 2.27 29 bin d/d çalışma hızındaki moment (a) ve faz akımı (b) dalga şekilleri.....	54
Şekil 2.28 37 bin d/d çalışma hızındaki moment (a) ve faz akımı (b) dalga şekilleri.....	54
Şekil 2.29 45 bin d/d çalışma hızındaki moment (a) ve faz akımı (b) dalga şekilleri.....	54
Şekil 2.30 50 bin d/d çalışma hızındaki moment (a) ve faz akımı (b) dalga şekilleri.....	55
Şekil 2.31 Yüksek hızlı ARM içim entegre simulasyon modeli şematik diyagramı.....	56
Şekil 2.32 Geliştirilen yüksek hızlı ARM'in verim haritası	56
Şekil 2.33 Geliştirilen yüksek hızlı ARM'in farklı uyarma akımlarındaki moment eğrileri	57
Şekil 2.34 Geliştirilen yüksek hızlı ARM'in farklı uyarma akımlarındaki çıkış gücü eğrileri	57
Şekil 2.35 Stator, rotor ve faz sargılarının 3 boyutlu kesitleri.....	58
Şekil 2.36 Gövdenin 3 boyutlu kesitleri	59
Şekil 2.37 Elektrik makinalarında oluşabilecek tipik çevresel titreşim modları.....	60
Şekil 2.38 Geliştirilen YH-ARM'in mod şekilleri	61
Şekil 2.39 Tipik 6/4 ARM geometrisi ve stator kutup yüzeyi üzerinde oluşan radyel ve teğetsel kuvvetler	64
Şekil 2.40 Geliştirilen ARM'in nominal çalışma şartlarında (50 bin d/d ve 1.8kW) uyarılması (a) sonucu hesaplanan stator kutuplarındaki radyel kuvvetler(b).....	65
Şekil 2.41 Geliştirilen ARM'in nominal çalışma şartlarında (50 bin d/d ve 1.8kW) uyarılması sonucu oluşan manyetik akı yoğunluğu ve halkalanan akı çizgileri	65
Şekil 2.42 Geliştirilen ARM'in nominal çalışma şartlarında (50 bin d/d ve 1.8kW) uyarılması sonucu hesaplanan stator kutuplarındaki radyel kuvvetlerin FFT harmonik açılımı	66
Şekil 2.43 Geliştirilen ARM'in nominal çalışma şartlarında (50 bin d/d ve 1.8kW) harmonik frekans analiz sonuçları, stator ve gövde üzerinde (a) sonlu parçacık haritası, (b-c) maksimum deformasyon ve (d) maksimum eşdeğer stres.	67
Şekil 2.44 Akustik gürültü analizi akış şeması	68
Şekil 2.45 ARM Gövdesindeki deformasyon hızı	68
Şekil 2.46 Akustik gürültü ölçüm ortamı.....	68
Şekil 2.47 ISO-3744 standardına göre akustik gürültü ölçümü.....	69
Şekil 2.48 ISO-3744 standardına uygun olarak ARM'in 1 m uzaklıktaki akustik gürültüsü	71

Şekil 2.49 (a) doğal soğutma (b) sıvı soğutma sistemine sahip ARM'in kararlı çalışma şartlarındaki sıcaklık dağılımı	73
Şekil 2.50 (a) doğal soğutma (b) sıvı soğutma sistemine sahip ARM'in geçici durum sıcaklık değişimi	73
Şekil 3.1 Tel erozyon yöntemi çalışma prensibi	75
Şekil 3.2 tel erozyon yöntemi ile kesilmiş stator ve rotor laminasyonu	76
Şekil 3.3 Stator rotor laminasyonları ve laminasyonların kurutulması.....	76
Şekil 3.4 Fikstür yardımıyla laminasyonların üst üste dizilmesi.....	76
Şekil 3.5 Fikstür yardımıyla dizilen laminasyonların sıkıştırılması ve fırınlama işlemi	77
Şekil 3.6 Fırınlama işlemi sonrası yapışmış stator laminsyon yığını.....	77
Şekil 3.7 Litz iletken ve bobinaj işlemi	77
Şekil 3.8 Oluk içerisindeki litz iletken kesitleri	78
Şekil 3.9Yüksek hızlı ARM bileşenleri (stator, sargılar, gövde, rotor, şaft ve rulmanlar)	78
Şekil 3.10 Pozisyon ölçümü için şaft üzerine yerleştirilmiş kalıcı mıknatıs	78
Şekil 3.11 ARM gövdesi	79
Şekil 3.12 Montajı tamamlanmış ARM	79
Şekil 3.13 Asimetrik yarım köprü ARM sürücü devre şeması	79
Şekil 3.14 Elektronik kartların tasarımı (a) güç devresi (b) kontrol devresi.....	81
Şekil 3.15 Geliştirilen ARM sürücüsünün 3 boyutlu modeli.	81
Şekil 3.16 Geliştirilen ARM sürücüsü ptototipi	82
Şekil 3.17 Test düzeneği.....	83
Şekil 3.18 (a) Dinamometre düzeneği ve (b) histerezis fren kontrolcüsü	84
Şekil 3.19 Farklı rotor pozisyonlarındaki A-fazının hesaplanan ve ölçülen endüktansları	85
Şekil 3.20 Stator oluk kesit alanı görünümü	86
Şekil 3.21 Geliştirilen ARM ile geleneksel endüstriyel spindle elektrik motorlarının boyutlarının karşılaştırılması.....	87

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1.1 Farklı bandaj materyallerinin bazı teknik özellikleri [7],[31]	13
Çizelge 1.2 Yüksek hız uygulaması için potansiyel elektrik makinalarının karşılaştırılması	24
Çizelge 2.1 Referans alınan spindle motoru teknik özellikleri	30
Çizelge 2.2 ARM tasarımında belirlenen parametreler	31
Çizelge 2.3 Nihai tasarım ARM parametreleri.....	37
Çizelge 2.4 ARM bileşenlerindeki sonlu parçacık sayıları ve istatistik sonuçları	39
Çizelge 2.5 Moment-hız algoritması çıktıları	51
Çizelge 2.6 Geliştirilen YH-ARM'in mod frekans değerleri	60
Çizelge 2.7 Günlük hayatta karşılaştığımız bazı akustik gürültü seviyeleri [62].	70
Çizelge 2.8 YH-ARM termal analizi çalışma şartları	72
Çizelge 3.1 Hesaplanan ve ölçülen faz direnç değerleri.....	84
Çizelge 3.2 Fazlardaki minimum ve maximum endüktans değerleri	85
Çizelge 3.3 ARM'in farklı çalışma hızlarındaki performans sonuçları	88
Çizelge 3.4 ARM'in Tablo 3. 1. ARM'in ve sürücünün farklı çalışma hızlarındaki performans sonuçları	89
Çizelge 3.5 ARM'in. Farklı çalışma şartlarında ölçülen akım dalga şekilleri ve diğer performans sonuçları (Element1: A-fazı, Element2: B-fazı, Element3: C-fazı, Element4:DC bara)	91

YÜKSEK HIZ UYGULAMALARI İÇİN YÜKSEK GÜÇ YOĞUNLUKLU YENİ BİR ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUNUN GELİŞTİRİLMESİ

Yusuf YAŞA

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Yard. Doç. Dr. Muhammet GARİP

Yüksek hız kavramı, son yıllarda üretim teknolojisindeki gelişmelerin elektrik makinalarına bir yansıması olarak değerlendirilebilir. Akıllı telefonlardan internete, iletişimden ulaşım, üretimden tüketime, kısacası hayatımızın en ücra köşesine dahi nüfuz eden yüksek hız gereksinimi çağımızın vazgeçilmezi hükmündedir. Bu tez çalışması, yüksek hız uygulamasına özgü, teknolojinin gelişimine uyum sağlamış yeni bir yüksek güç yoğunluklu anahtarlama relüktans makinasının (ARM) ve sürücüsünün geliştirilmesini kapsamaktadır.

Elektrik makinalarının tasarımı, başta elektriksel-elektromanyetik olmak üzere, mekanik, termal ve akustik problemleri de bünyesinde barındırmaktadır. Ancak geleneksel elektrik makinası tasarımlarında çoğunlukla elektriksel ve elektromanyetik olarak inceleme yapılmaktadır. Tasarımı yapılan elektrik makinasının mekanik, termal ve akustik bilim dallarındaki limitlere yaklaşmadığı varsayımı yapılmaktadır. Bu yaklaşım konvansiyonel elektrik makinaları için kısmen doğru karşılanabilir. Ancak yüksek hızlı elektrik makinalarının geliştirilmesi esnasında tasarımcı bahsedilen beş bilim dalını beraber irdelemek durumunda kalmaktadır. Bu durum, elektrik makinası tasarımını oldukça zorlaştırmaktadır. Bu tezde tasarımı yapılan yüksek hızlı elektrik makinası beş bilim dalı gözönüne alınarak incelenmiş/analiz edilmiş ve yorumlanmıştır.

Yüksek hızın doğal bir sonucu olarak ortaya çıkan yüksek uyartım frekansı, elektrik makinasındaki demir kayıplarını arttırmaktadır. Gerek bu sorunu çözebilmek gerekse yüksek güç yoğunluğu elde edebilmek amacıyla endüstriye yeni kazandırılmış malzeme

kaliteleri araştırılmış, yüksek güç yoğunluğu ve minimum demir kaybı sağlayan kobalt-demir alaşımlı laminasyon malzemesi ilk kez bir yüksek hızlı elektrik makinasında bu tez çalışmasında kullanılmış, test edilmiştir.

Tez akışı şu şekilde sıralanabilir: Elektrik makinalarında yüksek hız kavramının tanımı; elektrik makinalarında yüksek hızın sağladığı avantaj ve dezavantajlar ve yüksek hız endüstriyel uygulama alanları, bu konuda yapılmış çalışmalar ve bu çalışmaların sınıflandırılması birinci bölümde verilmektedir. İkinci bölümde, yüksek hız uygulama alanlarından biri olan CNC tezgahları için yüksek hızlı anahtarlama relüktans motoru geliştirilmiştir. Anahtarlama relüktans motorunun uygulama gereksinimleri gözönüne alınarak yapılan tasarım, optimizasyon ve analizler sonuçları yine bu bölümde sunulmaktadır. Üçüncü bölümde, anahtarlama relüktans motorunun ve sürücüsünün üretim aşamaları anlatılmıştır. Son olarak, kurulan test düzeneği ve test sonuçları sunulmuş ve tez çalışması süresince elde edilen çıktıların yorumları sonuç bölümünde özetlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek hızlı elektrik makinası, anahtarlama relüktans motoru, elektrik makinalarının tasarımı ve kontrolü, CNC tezgahları, spindle motoru.

**DEVELOPMENT OF A NEW SWITCHED RELUCTANCE MOTOR WITH HIGH
POWER DENSITY FOR HIGH SPEED APPLICATIONS**

Yusuf YAŞA

Department of Electrical Engineering

PhD Thesis

Adviser: Assist. Prof. Dr. Muhammet GARİP

High speed concept can be seen in recent years as a reflection of the developments in production technology on electric machines. From smart phone to the internet, from communication to the transportation, from production to the consumption, in short, high speed which penetrates our whole life is the indispensable part of our time. This thesis study includes the development of a new high-power density electric machine and its driver, which is suitable for high speed applications, adapting to the technology development.

The design of electric machines includes electrical, electromagnetics, mechanical, thermal and acoustical problems. However in traditional electric machine designs, mostly electrical and electromagnetics point of views are the only considerations. This approach may be partially reasonably acceptable for conventional electric machines. However for the high speed electric machine development, the designer has to deal with these five sciences together. This makes electric machine design very difficult. In this thesis, the high speed electric machine design is investigated, analyzed and interpreted considering multidisciplinary approach.

The high-frequency electrical supply, which emerges as a natural result of high speed, increases the iron losses in the electric machine. To minimize core losses and to reach high power density, new high-quality lamination materials are investigated. In this

thesis, the cobalt-iron composite lamination material, which provides high power density and minimum iron loss, is firstly used and tested in a high speed electric machine.

The flow of the thesis can be summarized as follows: Definition of high speed concept in electric machines; the advantages and disadvantages of high speeds in electric machines and high speed industrial application areas, the literature summary and classification of high-speed electric machines are given in the first part. In the second chapter, switched reluctance motor is developed for CNC machine applications which is one the application areas of high speed electric machines. The design, optimization and analysis results of the switched reluctance motor are presented in this section. In the third chapter, switched reluctance motor and its driver prototyping stages are given. Finally, the test setup and test results are presented in the same section, and the interpretations of the outputs obtained during the thesis work are summarized in the conclusion.

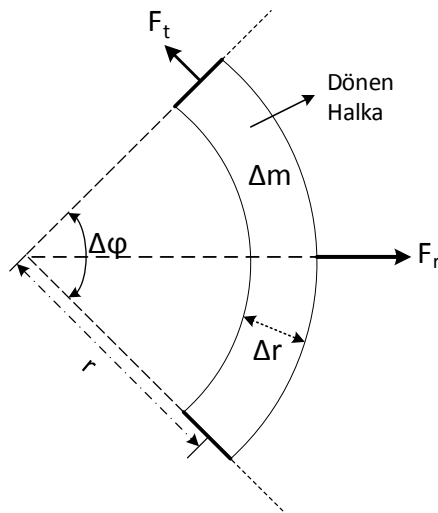
Keywords: High speed electric machine, switched reluctance motor, design and control of electric machines, CNC machines, spindle motor.

1.1 Literatür Özeti

Bu bölümde elektrik makinalarında yüksek hız kavramı irdelenecek, ardından yüksek hızlı elektrik makinalarının (YHEM) literatür özeti kapsamlı olarak ele alınacaktır.

1.1.1 Elektrik Makinalarında Yüksek Hız Kavramı

Elektrik makinaları hız açısından literatürde çeşitli makalelerde sınıflandırılmıştır. Dönen kütle üzerindeki mekanik stres çizgisel hız ile ilişkili olduğundan, literatürde elektrik makinalarındaki yüksek hız sınıflandırması genellikle çizgisel hız terimiyle yapılmaktadır [1]. Şekil 1.1’de verilen, dönen bir halka kesitindeki merkezkaç kuvveti,



Şekil 1.1 Dönen halka kesiti

$$\Delta m = \rho L r \Delta \varphi \Delta r \quad (1.1)$$

$$F_r = \Delta m r (2\pi n)^2 \quad (1.2)$$

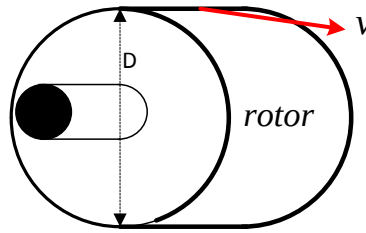
$$F_r = 2F_t \sin(\Delta \varphi / 2) \approx F_t \Delta \varphi \quad (1.3)$$

$$\sigma_t = \frac{F_t}{L \Delta r} \approx \frac{F_r / \Delta \varphi}{L \Delta r} = \frac{(\rho \cdot L \cdot r \cdot \Delta \varphi \cdot \Delta r \cdot r \cdot (2\pi n)^2)}{L \Delta r \Delta \varphi} = \rho r^2 (2\pi n)^2 = \rho v^2 \quad (1.4)$$

$$v = \frac{2\pi n}{60} r \quad (1.5)$$

olarak hesaplanır. Burada, Δm kütle, $\Delta \varphi$ halka açısı, F_t yanal kuvvet, r yarıçap, F_r radyel kuvvet, L eksenel uzunluk, Δr kütle genişliği, n rotasyonel devir sayısı, v çizgisel hız, ρ kütle yoğunluğu, σ mekanik stres olarak tanımlanmıştır.

Eşitlik (1.4)'den de anlaşılacağı üzere dönen kütle üzerinde oluşan mekanik stres, çizgisel hızın karesi (v) ve kütle yoğunluğu (ρ) ile ilişkilidir. Çizgisel hız ise rotasyonel devir sayısı (n) ve dönen halkanın yarıçapı (r) ile orantılıdır (Şekil 1.2). Buradan hareketle, düşük devirde dönen ancak büyük yarıçapa sahip elektrik makinalarının da (MW güç seviyesinde senkron generatörler), yüksek devirde dönen ancak küçük yarıçaplı rotora sahip elektrik makinalarının da (mikrotürbin turbo generatörler) yüksek santrifüj ve mekanik strese maruz kaldığını söyleyebilir.



Şekil 1.2 Rotor çizgisel hızı

Yapılan literatür araştırmasında yüksek hız için kabul gören eşik değerin 100 m/s'den başlatıldığı anlaşılmaktadır [2]. Bugünün teknolojisi ile yüksek hızlı elektrik makinaları 100 ila 250 m/s arasında rotor çizgisel hız değerine sahiptir.

1.1.2 Elektrik Makinalarında Yüksek Hızın Avantajları

Yüksek hızlı elektrik makina uygulamalarının avantajları aşağıda sıralanmıştır. Düşük hızlı elektrik makinasına dişli entegre edilerek hızın yükseltildiği sistemler ile karşılaştırıldığında; dişli kullanmaksızın direkt yüke aküple edilmiş yüksek hızlı elektrik makinası kullanılması durumunda sistemde,

- yüksek verim [3].
- kompakt tasarım,
- mekanik olarak rijit (sağlam) [2].
- aşınma problemlerinde ve toplam sistem kaybında azalma,
- geniş çalışma hız aralığı,
- uzun bakım periyotları
- aynı güçte daha küçük ve hafif sistem mümkün olmaktadır.

Bu maddelere ek olarak torna, freze, taşlama gibi talaş kaldırma uygulamalarındaki operasyon sürelerinde kısalma sağlanmaktadır. Ayrıca volanlı (Flywheel) enerji depolama sistemlerinde hızın artırılması ile depolanan enerji miktarı artmaktadır.

1.1.3 Elektrik Makinalarında Yüksek Hızın Dezavantajları

Yüksek hızın bahsedilen avantajları beraberinde aşağıdaki dezavantajları getirmektedir.

- Sürtünme ve vantilasyon kayıpları artmaktadır. Sürtünme kayıplarının minimize edilebilmesi doğru rulman seçimiyle mümkündür. Vantilasyon kayıpları ise dönen aksâmin hava sürtünmesinin minimize edilmesi ile sınırlandırılabilir. Bu nedenle elektrik makinasındaki hava aralığı yüzeyinin çıkıntılı olmaması tavsiye edilmektedir.
- Nüve kayıpları, yüksek frekanslı elektriksel uyartımdan dolayı makinadaki toplam kayıplar içerisinde baskın hale gelmektedir. Rotorda oluşan nüve kayıplarının neden olduğu ısı artışı, rotorun soğutulması statora göre daha zor olduğundan, tehlikeli seviyelere ulaşabilmektedir. Bu nedenle soğutma mekanizması dikkatlice tasarlanmalıdır.

- Yüksek frekanslı alternatif akım, bobinlerde deri etkisi (skin effect) ve proximity etkisini arttırmakta, bobinlerde direnç artışına neden olmaktadır. Bu etki çok demetli iletken (Litz iletken) kullanımıyla minimize edilebilir. Ancak Litz iletken kullanımı oluk doluluk oranında azalmaya neden olmaktadır.
- Merkezkaç kuvvetinin yükselmesi, rotor üzerinde mekanik stres oluşturmaktadır. Bazı özel önlemler mekanik stresin neden olabileceği yıkıcı etkileri azaltmak amacıyla (rotor yüzeyinin karbon-fiber bandaj, çelik, bakır veya titanyum gibi yüksek mukavemete sahip halka ile sarılması) kullanılmaktadır. Ancak bu özel tedbirler, ekstra kayıplara (halka üzerinde eddy akımı kaybı) neden olabilmektedir. Buna ek olarak, eklenen halka hava aralığının artmasına sebep olmakta ve elektrik makinasının verimini düşürebilmektedir.
- Geleneksel elektrik makinalarıyla karşılaştırıldığında, üretim aşamasında gerekli olan üretim toleransı değerleri çok daha düşük seviyelerde garanti altına alınmalıdır. Bu durum, üretimi zorlaştırmakta ve ek maliyete sebep olmaktadır.

1.1.4 Yüksek Hızlı Elektrik Makinası Uygulama Alanları

Son yıllarda yüksek hızlı elektrik makinaları, teknolojinin gelişimine paralel olarak endüstride geniş yer bulmaya başlamıştır. Bazı uygulama alanları;

- Turbo-kompresörler,
- Turbo-moleküler vakum pompaları,
- Yüksek hızda kesme, delme ve taşmala (spindle) uygulamaları,
- Yüksek hızda enerji depolama (volan-flywheel) uygulamaları,
- Mikro gaz türbini uygulamaları,
- Otomotivde turbo-şarj üniteleri,
- Balans makinaları [4], [5],
- Medikal ekipmanlar,
- Sürtünme yoluyla kaynaklama işlemleridir.

1.1.5 Yüksek Hızlı Elektrik Makinaları

Literatür incelendiğinde yüksek hızlı elektrik makinaları konusunda son yıllarda birçok çalışma veya araştırma yapıldığı anlaşılmaktadır. Bu çalışmaların sınıflandırılması çeşitli bakış açılarıyla yapılabilmektedir.

Yüksek hızlı elektrik makinaları,

- Elektrik-elektromanyetik,
- Elektronik,
- Mekanik,
- Termodinamik,
- Malzeme mühendisliği bilim dalları ile ilişkilendirilmektedir [6].

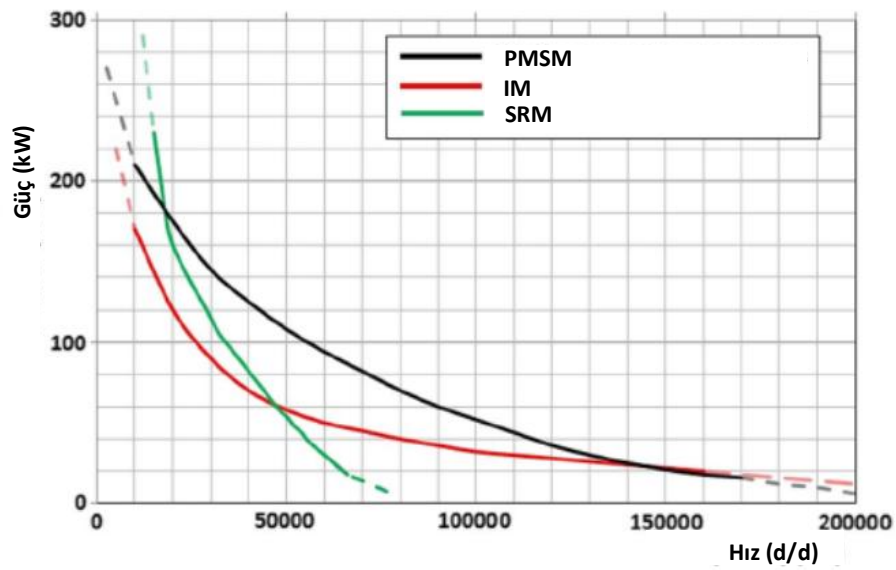
Kullanılan elektrik makine tipleri göz önüne alındığında,

- Sürekli mıknatıslı senkron makina (SMSM) [4], [7],
 - Yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron makina,
 - Fırçasız DC makina [8],
 - Gömülü mıknatıslı senkron makina [9],
 - Lundell (Claw pole) elektrik makinası [10][11],
 - Eksenel Akılı kalıcı mıknatıslı senkron makina,
 - Oluksuz kalıcı mıknatıslı senkron makina [12], [13],
- Asenkron makina (AM),
 - Sincap kafesli asenkron makina [14],[15],
 - Masif rotorlu asenkron makina [16]–[18],
- Anahtarlama relüktans makina (ARM) [19][20],
- Senkron relüktans Makina (SRM) [21],
- Homopolar elektrik makina [11],
- Senkron makina

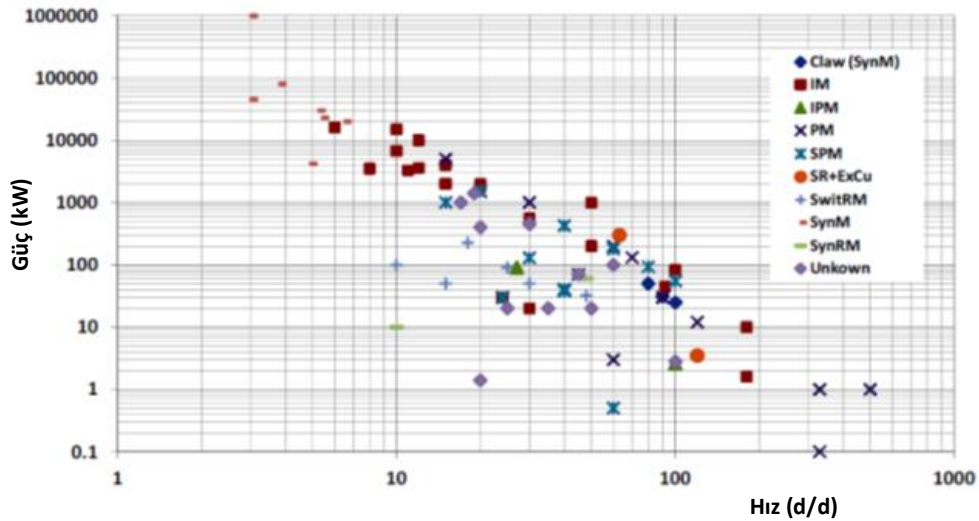
Yukarıdaki elektrik makina tiplerinin yüksek hız uygulamalarında tercih edilebildikleri yapılan literatür araştırmasında görülmektedir.

Günümüze kadar geliştirilen yüksek hızlı SMSM, AM ve ARM elektrik makinaları Şekil 1.3’de güç-hız eğrisi üzerinde karşılaştırılmıştır. Şekil 1.4’de ise literatürde kullanılan

endüstriyel yüksek hızlı elektrik makinalarının nominal güç-hız değerleri gösterilmiştir. Şekilden anlaşıldığı üzere, 10 bin d/d'nın altında olan yüksek hızlı elektrik makinası uygulamalarında yüksek güçlü senkron makinalar ağırlıklı olarak kullanılmıştır. Öte yandan, asenkron makinaların geniş güç-hız aralıklarında tercih edilebildiği görülmektedir. Ancak yüksek güç-orta hız değerlerinde asenkron makinanın oldukça fazla kullanıldığı söylenebilir. Kalıcı mıknatıslı senkron makinalar ise genellikle düşük-orta güç ve orta-yüksek hız uygulamalarında tercih edilmiştir. Diğer yandan, anahtarlamalı relüktans makinalar ise düşük-orta güç ve orta hız uygulamalarında kullanılmıştır.



Şekil 1.3 Endüstride kullanılan yüksek hızlı elektrik makinalarının güç-hız değerlerinin karşılaştırılması [22]



Şekil 1.4 Literatürdeki yüksek hızlı elektrik makinalarının nominal güç-hız değerlerinin karşılaştırılması [6]

1.1.5.1 Elektriksel-Elektromanyetik olarak YHEM'nin incelenmesi

Yüksek hızlı elektrik makinaları elektriksel ve elektromanyetik bilim dalları açısından farklı çalışmalar ile irdelenmiştir. Özetle,

- Geleneksel-düşük hızlar için geliştirilen elektrik makinalarında bakır kaybı (I^2R) toplam kayıpların çoğunluğunu oluşturmaktadır [2]. Ancak yüksek hızlı elektrik makinalarında stator ve rotor laminasyonları üzerinde oluşan demir kayıpları toplam kayıplar içerisinde ekseriyeti oluşturmaktadır. Ayrıca, geleneksel elektrik makinalarında ihmal edilen deri (skin) ve proximity etkileri yüksek hızlarda artmaktadır. Demir kaybı, deri ve proximity etkilerinin artmasındaki temel neden şüphesiz hızla orantılı artan elektriksel uyartım frekansıdır.

Demir kayıpları histerezis, eddy ve ekstra (excess) kayıpları olmak üzere üç kısma ayrılmaktadır. Eşitlik (1.6) ve (1.7)'den anlaşıldığı üzere demir kayıplarının artmasında uyartım frekansı, laminasyonlar üzerindeki manyetik akı yoğunluğu ve laminasyon malzeme kalitesi (k_h, k_e, k_a) rol oynamaktadır.

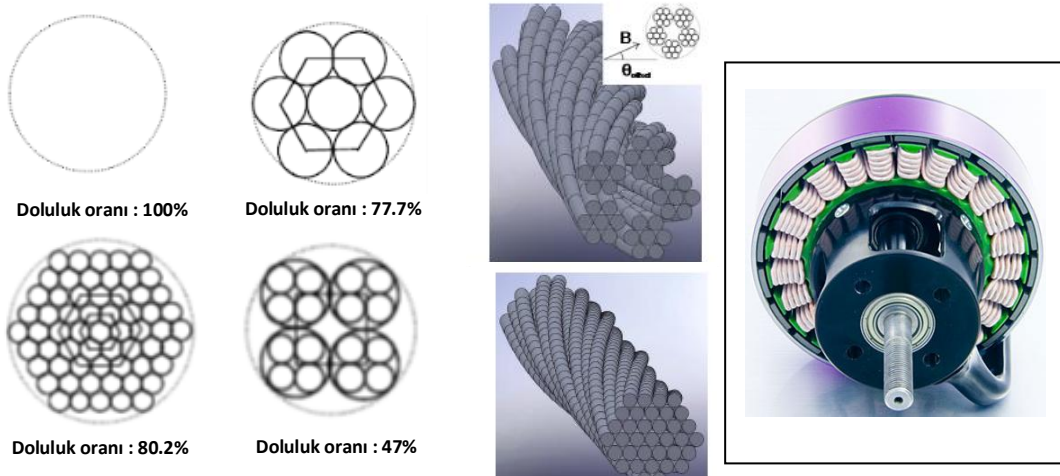
$$P_c = P_h + P_e + P_a \quad (1.6)$$

$$P_c = k_h f B^n + k_e f^2 B^2 + k_a f^{1.5} B^{1.5} \quad (1.7)$$

Elektrik makinasındaki demir kayıplarını azaltmanın birkaç yolu bulunmaktadır. Tasarım sırasında laminasyon malzeme kalınlığının ince seçilmesi (0.2- 0.35mm gibi) ve/veya malzeme kalitesinin artırılması, k_h, k_e, k_a sabitlerinin azalmasını sağlamaktadır. Alternatif olarak, laminasyon malzemesi üzerinde oluşabilecek akı yoğunluğunun düşürülmesi veya rotor kutup sayısının minimize edilerek uyartım frekansının azaltılması da diğer efektif yollardır. Yeni teknoloji çelik alaşım türlerinin laminasyon malzemesi olarak kullanılması da demir kayıplarının azalmasında etkilidir.

- Yüksek hızlı elektrik makinasının sargılarında oluşan bakır kayıpları, artan uyartım frekansının etkisiyle, iletken üzerinde oluşan eddy akımlarından dolayı artmaktadır [6]. Dolayısıyla, uyartım frekansının artması makinadaki bakır kayıplarının artmasına sebep olmaktadır. Genellikle, bu durumu kompanze

edebilmek için, çoklu demet tellere sahip Litz iletkenleri faz bobinlerinde kullanılmaktadır [23]. Çoklu iletken kullanmanın diğer bir avantajı da sarılan bobinin mekanik sağlamlığının artmasıdır. Çeşitli demet iletken yapıları Şekil 1.5’de örnek olarak verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, iletken yapılarındaki doluluk oranı (efektif kullanım oranı) her geometride farklılık arz etmektedir. Litz iletkenler yüksek frekans uygulamalarının olduğu transformatör ya da endüktans sargısı olarak güç elektroniği devrelerinde kullanılmaktadır [24]. Bir Litz kablo içerisinde yüzlerce iletken tel bulunabilmektedir. İletken teller sarım boyunca bükülerek ve çaprazlanarak sürekli yer değiştirirler. Bu teknik özellikle Litz iletkeninde oluşabilecek demet düzeyindeki proximity etkisini (bundle-level proximity effect) minimize etmekte oldukça etkilidir. Ancak Litz iletkenler konvansiyonel iletkenlere göre pahalıdır. Bakır kayıplarını minimize edebilmenin diğer bir yolu ise iletkenindeki akım yoğunluğunun düşürülmesi ya da iletken hacminin artırılmasıdır. Ancak, bu durum elektrik makinasının boyutunun artmasına neden olacağından çoğunlukla tercih edilmez. İletken içerisinde oluşan bu ekstra kayıplar $P_{ekstra} \sim V_{bakır} J^2 f^2$ ile ifade edilmektedir [25].

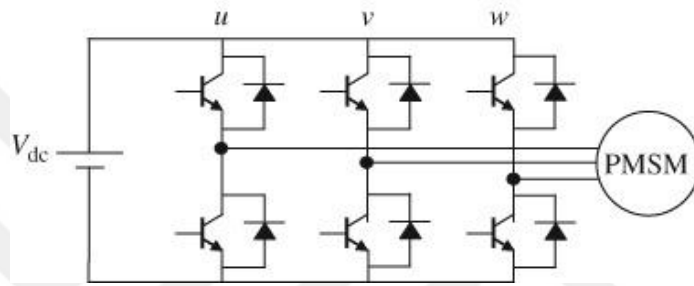


Şekil 1.5 Bazı alternatif çoklu demet iletken yapıları [23]

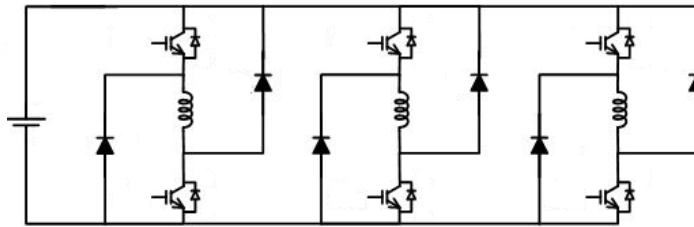
1.1.5.2 Elektronik olarak YHEM’nin incelenmesi

Yüksek hız uygulamaları değişken hıza ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle sistemde kullanılan yüksek hızlı elektrik makinası bir elektronik makina sürücüsü üzerinden

kontrol edilmektedir. Elektrik makina sürücü devre topolojileri elektrik makine tipine göre farklılık göstermektedir. Sürekli mıknatıslı senkron makina (SMSM) ve asenkron makina (AM) gerilim kaynaklı inverter ile kontrol edilirken, anahtarlama relüktans makina ise asimetrik yarım köprü dönüştürücü ile kontrol edilmektedir [26]. Yüksek hızlı SMSM ve IM'lerde demir kayıplarını minimize ederek sistem verimini arttırabilmenin bir yolu hava aralığı manyetik akı yoğunluğunu ve manyeto motor kuvvetini olabildiğince sinüs formuna yakın hale getirmektir. İki, üç veya daha çok seviyeli inverter ile elektrik makinası kontrol edilerek istenilen sinüs formu yakalanabilmektedir [2].



Şekil 1.6 3 fazlı 2-seviyeli SMSM sürücüsü-inverter



Şekil 1.7 3 fazlı ARM sürücüsü-asimetrik yarım köprü dönüştürücü

Yüksek hızda elektrik makinasını kontrol edebilmenin zorluklarından biri, gerekli olan yüksek işlem yapabilme hızı ve yüksek anahtarlama frekansıdır. Vasat şekilde kontrol edilen bir elektrik makinası için gerekli olan minimum anahtarlama frekansı, oluşturulmak istenen temel akım frekansının en az 10 katı ($10F_{temel}$) olmalıdır [2]. Bu durumda, yüksek hızlı elektrik makinalarında zaten konvansiyonel elektrik makinalarına göre akımın temel frekansı yüksek olduğundan, düzgün akım regülasyonu için gerekli olan anahtarlama frekansı artabilmektedir. Ayrıca hedeflenen makine performansının yakalanabilmesi için, kontrolör (mikrodenetleyici) kapasitesinin ve geliştirilen kontrol algoritmasının da oldukça gelişmiş olması istenmektedir. Şekil 1.8'de geliştirilen motor

ve sürücü devresi örnek olarak gösterilmektedir. 500 bin d/d için geliştirilmiş bu üründe akımın temel frekansı 8.3 kHz'dir. Bu motor kontrolünde, temel akım dalga formunu yakalayabilmek için gerekli olan minimum anahtarlama frekansı 83 kHz'tir [27].



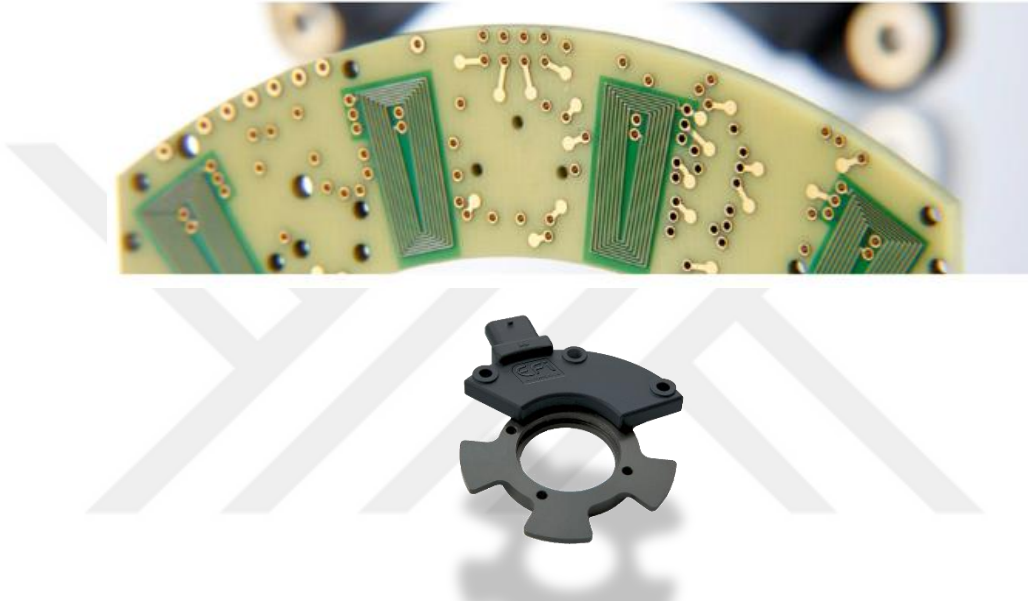
Şekil 1.8 500 bin d/d, 100W yüksek hızlı SSM ve kontrol devresi

Yüksek hızlarda açığa çıkan diğer bir zorluk ise rotor pozisyonunun ölçülmesidir. Konvansiyonel elektrik makinalarında sıklıkla tercih edilen artımlı enkoder pozisyon ölçüm cihazları 10 bin d/d hız değerine kadar çalışmaya uygun olarak üretilmektedirler. Diğer alternatif pozisyon ölçüm sensörleri Hall etkili (effect) sensör ve resolver sensörüdür. Resolver bir mekanik turda yüksek çözünürlükte mutlak pozisyon bilgisi verebilmektedir. Ancak fiyatları diğer sensörlere göre yüksektir. Hall etkili sensör ise fiyatı makul seviyedeysen bir mekanik turda ancak birkaç pozisyon bilgisi üretebilmektedir. Bu sensörlere ek olarak, yeni teknoloji eddy akımı pozisyon sensörleri yüksek hızlarda ve otomotivde kullanılabilmektedir [28].

Yüksek hız uygulamalarındaki diğer bir problem ise gerilim ve akım ölçüm zorluğudur. Elektrik makinasının yüksek performansta ve efektif çalışabilmesi için işlemcinin minimum bir anahtarlama frekansı içerisinde güncel akım bilgisini edinebilmesi gerekmektedir. Bu ancak seçilen akım sensörünün ve sonrasında kullanılan sinyal koşullandırma devrelerinde kullanılan opamp gibi analog devre elemanlarının yüksek köşe frekansına sahip olmasıyla mümkündür.



Şekil 1.9 Pozisyon sensörleri: Resolver (solda), artımlı enkoder (sağda) - LTN Servotechnik GmbH



Şekil 1.10 Eddy akımı pozisyon sensörü (SUMIDA Components and Modules GmbH ve EFI Automotive)

1.1.5.3 Mekanik olarak YHEM'nin incelenmesi

Yüksek hız uygulamalarında elektrik makinasının hızını sınırlandıran başlıca nedenler rotordaki mekanik stres ve elektrik makinesinde oluşan ısıdır [29]. Rotorun yüksek çizgisel hız değeri, rotor üzerinde aşırı oranda merkez kaç kuvveti oluşturmaktadır. Mekanik olarak problem kaynakları,

- Dönen ekipman (rotor) üzerindeki yüksek santrifüj (merkezkaç) etkisi,
- Mekanik tolerans limitlerinin üretim esnasında yakalanamamış olmasından dolayı oluşan titreşim,
- Makinanın doğal titreşim-modal frekansları ile uyartım frekanslarının örtüşmesi sonucu oluşan rezonans-titreşim olarak sıralanabilir.

Yüksek santrifüj etkisinden dolayı dönen ekipmanda kırılmalar hatta yangınlar oluşabilmektedir (Şekil 1.11).



Şekil 1.11 Kalıcı mıknatıslı senkron motorda rotorun 35 bin d/d'da statora sürtmeden önceki ve sonraki hali [4],[7]

Yüksek hız uygulamalarında kullanılan kalıcı mıknatıs içeren elektrik makinalarında mıknatıslar genellikle rotor yüzeyine yerleştirilmektedir. Mıknatıslar mekanik olarak kırılğan alaşımdan oluşmaktadır. Bu nedenle kalıcı mıknatıslı senkron makinalarda santrifüj (merkez kaç) kuvveti oldukça etkilidir. Yüzey montajlı mıknatıs tercih edilen uygulamalarda, mıknatısların çevresi ayrıca bandaj veya destekleyici bir kılıf ile korunmaktadır. Burada amaç, mıknatısların santrifüj etkisiyle merkezden dışa doğru hareket etmesini engellemektir. Bandaj malzemesi olarak karbon elyaf (karbon fiber) veya cam-elyaf (glass fiber) kullanılabilir. Farklı bandaj materyallerinin dayanabilecekleri maksimum mekanik stres değerleri Çizelge 1.1'de verilmektedir. Tablodan görüldüğü üzere, karbon elyaf, cam-elyaf materyale göre 2 kat daha fazla santrifüj kuvvetine dayanabilmektedir. Yani teğetsel gerilmelerde karbon fiber oldukça dayanıklı bir komposit türüdür. Ancak oldukça da kırılğan bir özelliğe sahiptir. Ayrıca, karbon-fiber komposit elektriksel olarak iletken olup termal olarak da geçirgendir. Materyalin termal olarak geçirgen olması özellikle rotorda oluşan ısı kaybının hava yoluyla dış ortama kolayca aktarılmasını sağlamaktadır ve bu nedenle avantaj sunmaktadır. Bandaj rotoru çevrelediğinden, stator ile rotor arasındaki manyetik alan bandajı etkilemektedir. Karbon fiber elektriksel olarak iletken olduğundan, karbon-fiber bandajın maruz kaldığı değişken manyetik alan materyal üzerinde gerilim indüklemektedir. İndüklenen gerilim, bandaj üzerinde ekstra eddy akımı kayıplarına neden olmakta ve ısı oluşturmaktadır. Soğutulması zor olan rotorun ısısına ek olarak bir

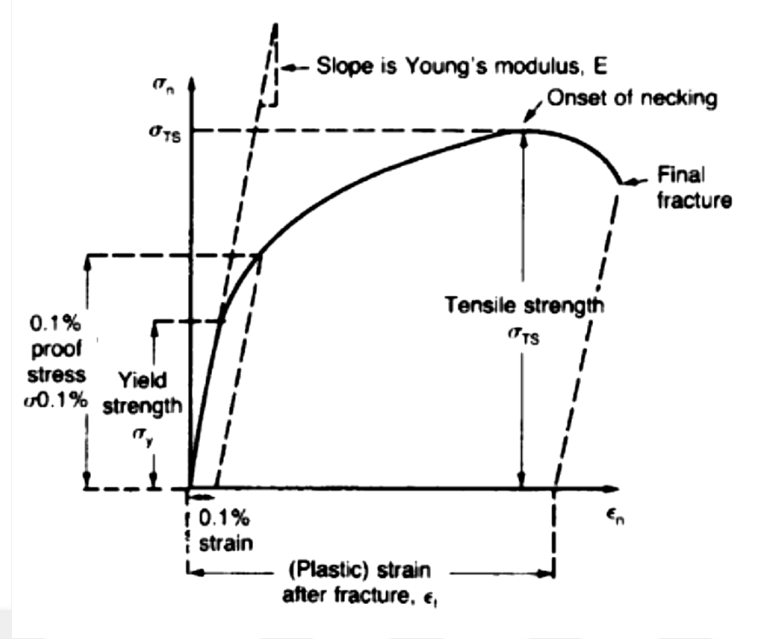
de karbon fiber üzerinde oluşan ısı eklenince, performansı sıcaklıktan oldukça etkilenen mıknatısların soğutulması daha da zorlaşmaktadır. Diğer yandan, cam-elyaf komposit karbon-elyaf'a göre kırılmaya karşı daha dirençli olmasına rağmen, çizgisel hızın 150 m/s'nin üzerine çıktığı uygulamalarda kullanılması tavsiye edilmemektedir [4]. Kevlar polimer rotor sargısı olarak öne çıkan diğer aday materyallerden biridir. Kevlar malzemesinin gerilme mukavemeti oldukça iyidir ve ek olara elektriksel iletkenliği de ihmal edilebilecek seviyededir [30].

Çizelge 1.1 Farklı bandaj materyallerinin bazı teknik özellikleri [7]

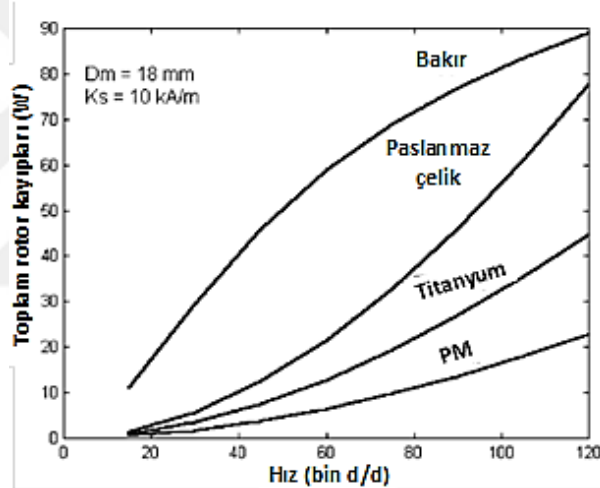
Materyal		σ_{bmax} (N/mm ²)	Elektriksel direnç (ohm.m)	Termal iletkenlik (W/mK)
Cam-Elyaf (Glass Fiber)		2400 (@20°C)	10^{15}	1.25
Kevlar		3757 (@N/A)	10^{14}	0.3
Karbon Elyaf (Karbon Fiber)		4800 (@20°C)	494	7
	Yüksek sıcaklıkta	1650 (@150°C)		
	Üretim toleransı ile birlikte	1100 (@150°C)		

Endüstride tercih edilen diğer rotor koruyucu kılıf materyalleri paslanmaz çelik, titanyum alaşım, bakır, alüminyum ve inkonel (krom-demir) alaşımı olarak sıralanabilir [32]-[33]. Referans [34]'da bu materyaller bir SMSM uygulaması için kayıplar açısından karşılaştırılmıştır. Farklı kılıf materyallerinin kullanılması durumunda, rotor hızı ve rotor kayıpları arasındaki ilişki Şekil 1.13'de verilmektedir. Görüldüğü üzere, mıknatıs üzerine eklenen her bir koruyucu kılıf rotorda ekstra kayıplara neden olmaktadır. Materyaller üzerindeki elektriksel kayıplar materyalin elektriksel iletkenlikleriyle ilişkilendirilmektedir.





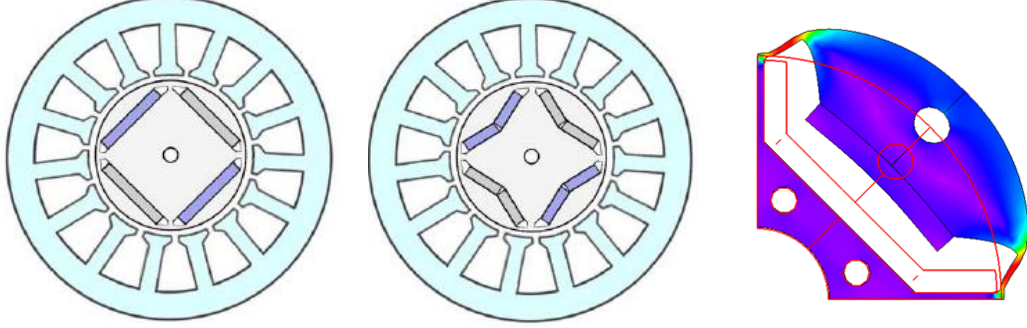
Şekil 1.12 Rotor yüzeyine sarılmış karbon-fiber bandaj ve tipik stres-gerilme ilişkisi [35]



Şekil 1.13 Farklı rotor koruyucu kılıf materyallerinin kullanılması durumunda, rotor kayıplarının rotor hızına bağlı değişimi [34]

Özetle, mıknatısların yüzeye yapıştırılması sonrasında ihtiyaç duyulan rotor kılıfının maliyetli ve makinanın toplam verimini düşüren bir etmen olduğu söylenebilmektedir. Bu duruma alternatif olarak gömülü sabit mıknatıslı senkron makina (GSMSM) sunulabilmektedir. Şekil 1.14'de görüldüğü gibi, bu tip elektrik makinalarında mıknatıslar rotor laminasyonları içerisine gömülmektedir. Bu makinalarda kaçak akıları minimize edebilmek için akı bariyerleri oluşturulmaktadır. Diğer yandan içi boş olarak tasarlanan bu bariyerler rotorun mekanik zorlanmalara karşı oluşturduğu direnci zayıflatmaktadır. Şekil 1.14'de görüldüğü gibi, bu tip makinalarda mekanik stresin yoğunlaştığı kısım genellikle rotor bariyerlerinin birleşim yeridir. Dolayısıyla tasarımcı

rotor akı bariyerlerinin birleşim yerlerini, mekanik zorlanmalarını karşılayabilecek kadar kalınlıkta ve aynı zamanda da minimum kaçak akıyı sağlayabilecek incelikte seçmek zorundadır.

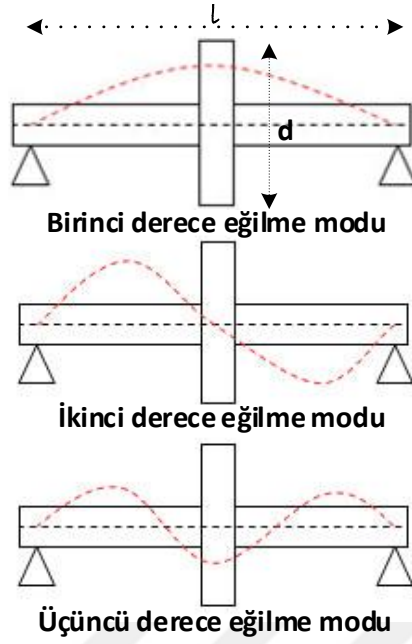


Şekil 1.14 Gömülü mıknatıslı senkron makina geometrileri ve rotor üzerindeki mekanik stres dağılımı [36]

Yüksek hızlı elektrik makinası uygulamalarında özel ilgi bekleyen diğer bir konu rulmanlardır. Makinada oluşabilecek aşırı kuvvetler, titreşim ve rulman kayıpları, ancak doğru rulman seçimi/tasarımı ile minimize edilebilir. Rulmanlar,

- Standart mekanik rulman,
- Aktif manyetik rulman (active magnetic bearing),
- Havalı rulman (air bearing),
- Yağlı yataklı rulman (oil sleeve bearing) olarak sınıflandırılmaktadır [2].

Rulmanlar üzerinde oluşan kuvvetler özellikle eğilme frekanslarında (bending frequency) maksimum seviyeye erişmektedir. Yüksek hızlı elektrik makinaları çalışmaya başladığı andan itibaren yolalma sırasında birçok eğilme mod frekanslarından geçmektedir ve bu geçiş sırasında rulmanlar üzerindeki mekanik stres artmaktadır. Ön ve arkada olmak üzere iki adet rulmana sahip bir sistem için tipik eğilme mod şekilleri Şekil 1.15’de gösterilmektedir. Rotor çapı/uzunluğu ile mod frekansları arasındaki ilişki $f_e \sim d/l^2 \sim 1/d$ ile verilmektedir [2]. Burada d rotor çapı, l ise rulmanlar arasındaki uzaklıktır. Rotor çapının büyümesi mod frekanslarının aynı oranda düşmesine neden olmaktadır. Rulmanlar arasındaki mesafenin büyümesi (rotor uzunluğunun artması) ise mod frekanslarının $1/l^2$ ile düşmesine neden olmaktadır.



Şekil 1.15 Rotorda oluşabilecek eğilme mod şekilleri

Standart mekanik rulmanlar küçük güçlü YHEM'lerde kullanılmaktadır. Standart mekanik rulmanlar çelik veya seramik bilyalı olabilmektedir. Seramik rulmanlar konvansiyonel çelik bilyalı rulmanlara göre, düşük ısı genleşme katsayısına sahiptir ve sıcaklığa daha fazla dayanabilmektedir. Ayrıca seramik rulmanlar daha hafif ve sürtünme katsayısı daha düşüktür. Bu nedenle daha uzun bakım periyotları sunmaktadır. Bu özellikleriyle seramik rulmanlar yüksek hız uygulamalarında güçlü adaylardır. Seramik bilyalar ile çelik halkalar birleştirilerek geliştirilen hibrit rulmanlar da endüstride mevcuttur. Nadir olarak, aktif manyetik ve havalı rulmanlar da küçük güçlü YHEM'lerde kullanılabilir.



Şekil 1.16. Standart mekanik rulmanlar

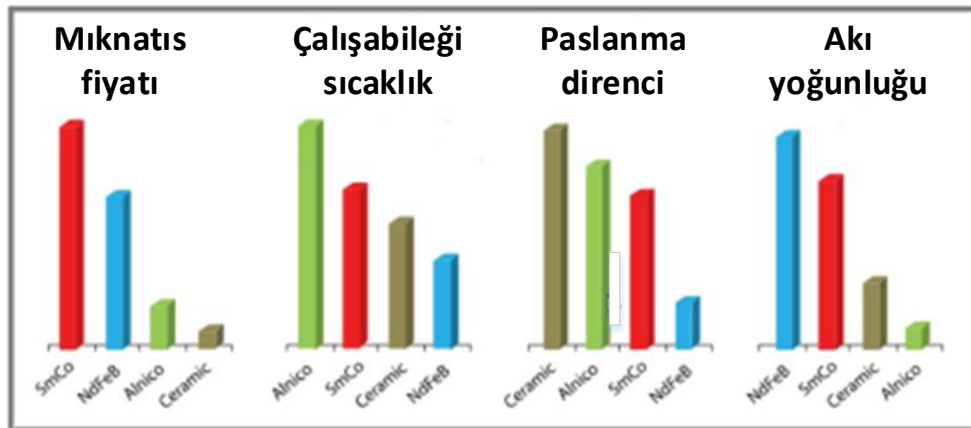
1.1.5.4 Termodinamik olarak YHEM'nin incelenmesi

Aynı güçte, yüksek hızlı elektrik makinası konvansiyonel elektrik makinalarına göre daha küçük hacimdedirler. Bu durum aynı zamanda yüksek hızlı elektrik makinalarında güç kaybı yoğunluğunun konvansiyonel elektrik makinalarına göre çok daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca, demir kayıplarının artması sonucu özellikle rotorda oluşan ısının dış ortama aktarılması, rotor ile dış ortam arasında direkt etkileşim olmadığından, oldukça zordur. Sonuç olarak, YHEM'lerde termal düzen tasarımı önem gerektirmektedir [29].

Elektrik makinası olarak SMSM seçilmesi durumunda, makinanın termal açıdan en zayıf ve hassas olduğu bileşen kalıcı mıknatıslar olarak düşünülebilir. Rotor kayıpları ise,

$$P_{\text{rotor kayıpları}} = P_{\text{demir}} + P_{\text{mıknatıs}} + P_{\text{hava sürtünmesi}} + P_{\text{rulman}} + P_{\text{kılıf}} \quad (1.8)$$

Mıknatısları koruma amaçlı kılıf materyali olarak karbon fiber kullanılması durumunda, karbon fiber kompositin thermal iletkenliği düşük olduğundan, karbon fiber termal anlamda rotor çevresinde termal izolasyona yani rotor ısısının hapsolmasına neden olabilmektedir [37],[38]. Hapsolunan ısı mıknatıslar üzerindeki sıcaklığın artmasına neden olmaktadır. Mıknatıs sıcaklığının kritik seviyelere ulaşması halinde mıknatıslar demanyetizasyon olma tehlikesiyle karşı karşıya kalmaktadır. Bu nedenle, neodinyum-demir-bor (NdFeB)'a alternatif olarak ısı artışına daha dirençli olan alnico ya da samaryum-kobalt (SmCo) mıknatıslar tercih edilebilmektedir. Kalıcı mıknatıs türlerinin bazı özelliklerinin karşılaştırılması Şekil 1.17'de verilmektedir.



Şekil 1.17. Mıknatıs türlerinin karşılaştırılması [39]

Karbon fiber komposite alternatif olarak sunulan titanyum, paslanmaz çelik veya bakır materyalleri hem elektriksel hem de termal olarak iyi iletkenlerdir. Ancak, elektriksel iletkenlik kılıflar üzerinde ekstra eddy akımı kayıpları oluşturmaktadır [40]. Koruyucu bandaj için ideal olan özellik materyalin yüksek termal iletkenliğe ve düşük elektriksel iletkenliğe sahip olmasıdır.

Asenkron makina herhangi bir koruyucu bandaja ihtiyaç duymamaktadır. Ancak rotorunda sargı ya da kafes bulunduğundan, SMSM’de belirtilen rotor kayıplarına ek olarak bu iletkenler üzerinde bakır kaybı oluşmaktadır.

Diğer alternatif olan anahtarlamalı relüktans makinada (ARM) ise rotor da mıknatıs ya da iletken bulunmamakta, rotor yalnızca laminasyondan oluşmaktadır. Ancak akının zamanla değişimi ($d\phi/dt$) çok yüksek olduğundan, eddy akımı ve histerezis kayıpları bu değişimden etkilenmektedir/artmaktadır [41]. Ek olarak rotor geometrisi asenkron ve SMSM’e nazaran çok daha çıkık yapıda olduğundan, ARM’de hava aralığındaki hava sürtünme kayıpları daha yüksek olabilmektedir. Ancak yapılan bazı çalışmalarda, hava aralığı sürtünmesini azaltmak için rotor geometrisi üzerinde bazı değişiklikler önerilmektedir. Referans [43] ve [44]’de rotor kutupları arasına ince bir kırı eklenmek suretiyle hava sürtünmesinin azaltıldığı ve verimin yükseldiği raporlanmıştır.

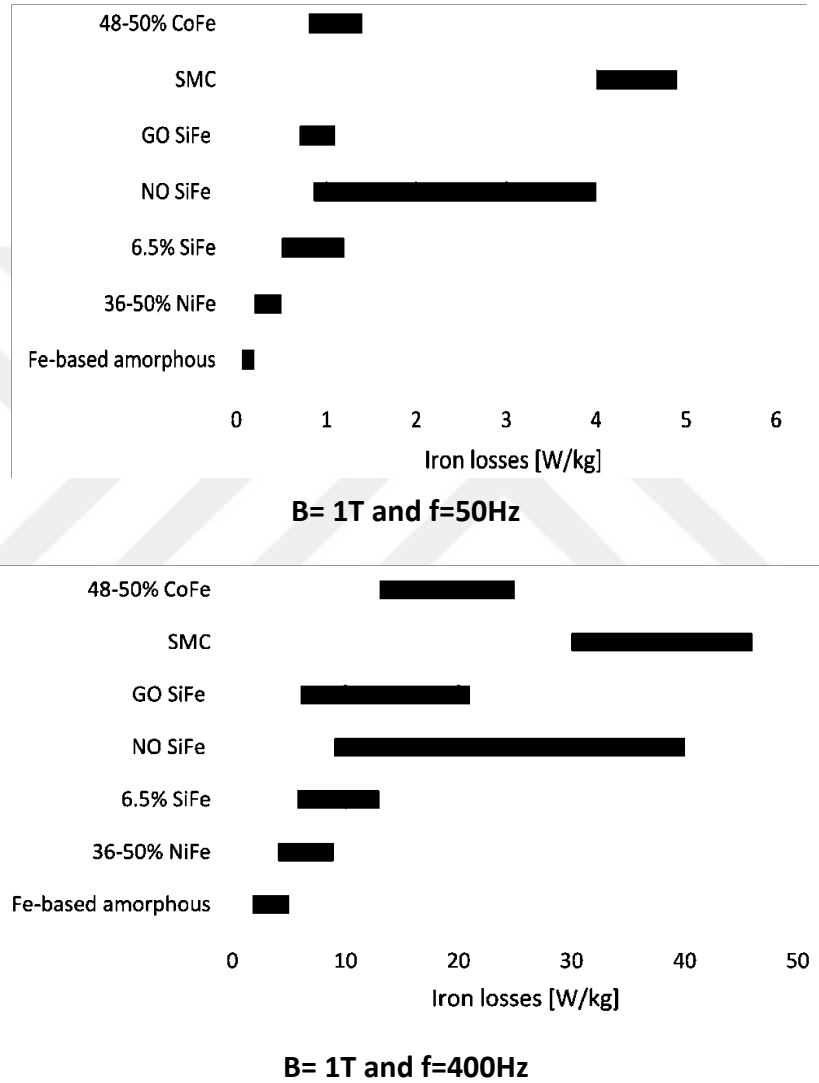
1.1.5.5 Malzeme mühendisliği gözüyle YHEM’nin incelenmesi

Yüksek hızlı elektrik makinası uygulamalarında öne çıkan iki önemli problem; elektriksel/mechanik güç kayıpları ve mekanik stres limitidir.

Toplam güç kaybı içerisinde demir kayıpları YHEM’lerde kaybın çoğunluğunu oluşturmaktadır. Bu kısımda farklı laminasyon malzemeleri demir kayıpları açısından irdelenecektir.

Silikon-demir (SiFe) ve nikel-demir (NiFe) alaşımları uzun zamandan beri araştırılmış ve kullanılagelmiş alaşım türleridir. Ancak günümüzde elektrik makina üretiminde çoğunlukla (marketin %80’i) yönlendirilmemiş tanecikli (non-oriented) silikon-demir kullanılmaktadır. Son yıllarda, nanokristal, amorfus ve soft manyetik kompozit (SMC) laminasyon malzeme türleri de elektrik makinalarında kullanılmaya başlanmıştır.

Günümüzde YHEM'lerde kullanılabilecek çeşitli materyaller bulunmaktadır. Ancak bu çalışmada tasarlanacak olan elektrik makinasında malzeme açısından birincil ve ikincil öneme sahip özellikler güç yoğunluğu ve demir kayıpları olduğundan, materyallerin karşılaştırılması manyetik saturasyon değeri ve birim ağırlıkta oluşan demir kayıplarına göre yapılacaktır. Şekil 1.18'de çeşitli materyallerin 50Hz ve 400Hz frekanslarında 1 Tesla manyetik akı yoğunluğunda oluşabilecek demir kayıpları gösterilmektedir.



Şekil 1.18 Farklı laminasyon materyalleri için demir kaybı aralığı [42]

Tasarımcı, laminasyon materyalini belirlerken aşağıdaki parametrelere dikkat etmelidir,

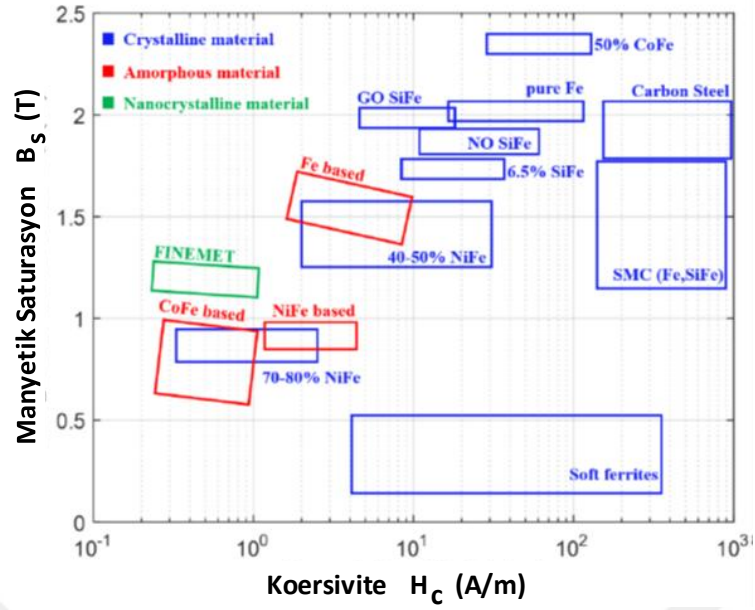
- Manyetik doyum seviyesi,
- Manyetik geçirgenlik (μ_r),
- Manyetik koersivite,
- Demir kaybı katsayıları (k_e, k_h, k_a),

- Materyal formu (tam ya da yarım işlenmiş (fully processed, semi processed)),
- Ulaşılabilirlik,
- Fiyat

Aşağıda yaygın olarak kullanılan laminasyon sac malzemeleri sırasıyla incelenmiştir.

Silikon-Demir (SiFe) Alaşımı

Silikon-demir alaşımlı laminasyon malzemesi elektrik makinaları ve transformatörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Transformatörlerde akının değişimi genellikle tek yönlü gerçekleştiğinden, yönlendirilmiş tanecikli (grain-oriented) silikon-demir alaşımı tercih edilmektedir. Ancak elektrik makinalarında akı çift yönlü değiştiğinden, tanecikleri yönlendirilmemiş (non-grain oriented) malzeme kullanılmaktadır. Tanecikleri yönlendirilmemiş silikon-demir laminasyon %1-3 arasında silikon içeren soğuk çekilmiş karbonlu çelikten üretilmektedir. Ayrıca %0,5 manganez ve %1 alüminyum, alaşımın içeriğinde bulunan diğer bileşenlerdir. Silikon, alaşımın mekanik dayanımını ve elektriksel direncini arttırmaktadır. Ancak diğer yandan alaşımın manyetik geçirgenliğinin azalmasına ve manyetik doyum değerinin düşmesine neden olmaktadır. Laminasyon malzemesindeki eddy akımı kayıplarının minimize edilebilmesi için silikon içeriği fazla olan alaşım tercih edilebilir. Ancak bu durumda alaşımdaki manyetik geçirgenlik azalmakta, eşdeğer manyetik alan yoğunluğunu yakalayabilmek için akım seviyesinin arttırılması gerekmektedir. Bu durum bakır kayıplarının artmasına neden olmaktadır. Şekil 1.18’de verildiği üzere, tanecikleri yönlendirilmemiş çelikte silikon içeriği %6,5 değerine kadar arttırılarak eddy akımı kayıplarında anlamlı bir düşme yakalanabilir. Bu durumda düşen manyetik doyum seviyesi ve manyetik geçirgenlik Şekil 1.19’da görülebilmektedir. Ayrıca, %6,5 değerinde silikon içeriği bulunan laminasyon materyali çok sert ve oldukça da kırılgan olmaktadır. Tanecikleri yönlendirilmemiş %2-3 silikon içeriğine sahip laminasyon malzemeleri endüstride 0,1 ila 0,3 mm gibi çok ince laminasyon kalınlığında bulunabilmektedir.



Şekil 1.19 Çeşitli yumuşak manyetik materyallerin koersivite-manyetik saturasyon değerleri [42]

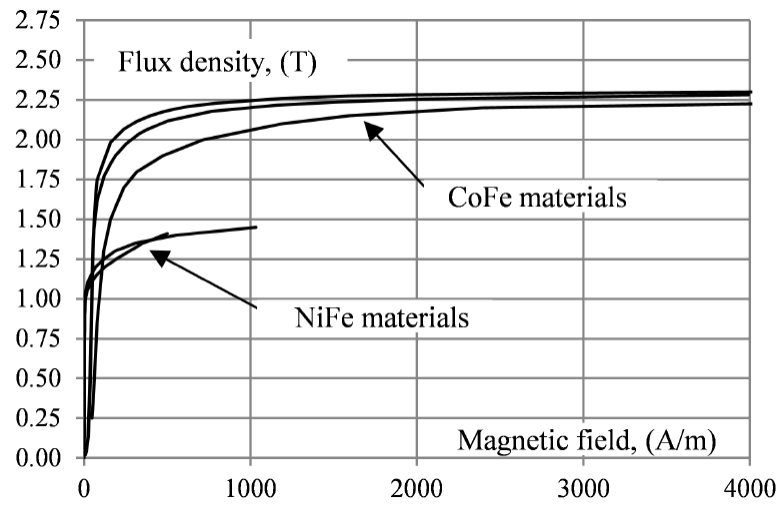
Kobalt-Demir (Co-Fe) Alaşımı

Kobalt-demir alaşımlı laminasyon materyalleri yüksek manyetik doyum seviyesi (2.43 Tesla) ile tanınmaktadır. Dolayısıyla kobalt-demir alaşımlı laminasyon materyali ile yüksek güç yoğunluğuna sahip elektrik makinasının geliştirilmesi mümkündür. Ancak diğer materyallere göre bu alaşım pahalıdır [43]. Alaşım içerisinde %15-49 kobalt, %2 vanadyum ve %49-83 demir bulunmaktadır. Fiyatı pahalı olduğundan, bu alaşım henüz hacim ve ağırlık konularının kritik öneme sahip olduğu alanlarda tercih edilmektedir. İçeriğindeki kobalt elementi sayesinde laminasyon materyalinin mekanik dayanımı çok yüksektir [44]. Bu özelliği ile alaşım manyetik rulman, volan ile enerji depolama sistemleri gibi yüksek hız uygulamalarında kullanıma uygundur [42].

Nikel-Demir (Ni-Fe) Alaşımı

Nikel-demir alaşımı yüksek manyetik geçirgenlik ve manyetik koersivite ile tanınmaktadır. Ancak Şekil 1.20'den de görüldüğü üzere kobalt-demir alaşımının aksine manyetik saturasyon seviyesi düşüktür. İçeriğinde %40-50 oranında nikel, bulunmaktadır. Nikel elementi materyaldeki manyetik geçirgenliğin artmasına yardımcı olmaktadır. Ancak elementin elektriksel iletkenliği yüksek olduğundan, eddy akımı kayıplarının artmasına neden olmaktadır. Diş hekimliğinde, ameliyat ekipmanlarında ve

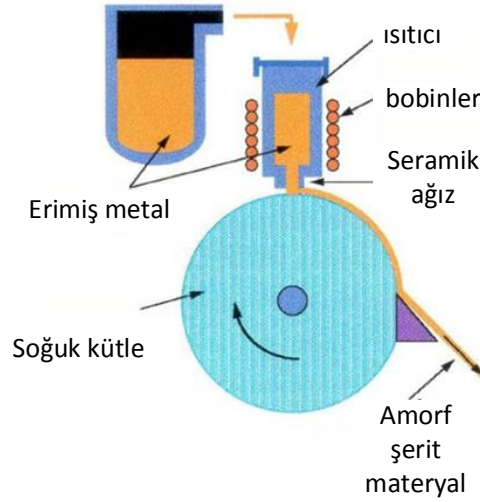
resolver gibi bazı küçük güçlü elektrik makinaları uygulamalarında nikel-demir alaşımlı laminasyon materyalleri tercih edilebilmektedir.



Şekil 1.20 Nikel-demir ve kobalt-demir materyallerinin manyetizasyon eğrileri [42]

Diğer Materyaller

Teknolojik olarak geliştirilme sürecinde olan amorf, nanoyapılı ve soft manyetik kompozitler (SMC) gibi laminasyon materyalleri de mevcuttur [44]. Amorf materyali 0.025mm gibi oldukça ince laminasyon kalınlığında üretilmektedir. Ergimiş amorf materyalinin çok hızlı dönen soğuk bir kütle üzerine akıtılması yöntemiyle üretilen bu laminasyonlar azaltılmış üretim maliyetiyle düşük demir kaybı avantajını sunmaktadır [45]. Silikon-demir alaşımlı laminasyon materyaline göre, amorf materyal eddy akımı kayıpları açısından yaklaşık olarak 3 kat daha az güç kaybı sağlamaktadır. Ancak kullanım alanı kısıtlıdır. Bazı özel dağıtım transformatörlerinde ve düşük güçlü yüksek hızlı elektrik motorlarında kullanılmıştır. Soft manyetik kompozitler birbirinden izoleli toz formundaki kompozit taneciklerinden üretilmektedir [42]. Bu üretim metodu sayesinde kompleks geometriye sahip özel elektrik makinalarının üretilmesi SMC materyali ile mümkün olmaktadır.



Şekil 1.21 Ergimiş amorf materyalinin üretim metodu (melt spinning method) [46]

1.1.6 Literatür Araştırması Sonuçları

Yüksek hızlı elektrik makinaları hakkında yapılan disiplinler arası literatür araştırması aşağıda özetlenmiştir.

- Araştırmacılar genellikle yüksek hızlı elektrik makinalarının uygulamalarından ve elektrik makinası tasarımında ihtiyaç duyulan kritik tasarım gereksinimlerinden bahsetmişlerdir.
- Yüksek hızlı elektrik makinalarında karşılaşılan en büyük problemlerin başında elektrik makinasında dönen kısmın (rotor) maruz kaldığı merkezkaç kuvveti ve yüksek hızdan kaynaklı yüksek elektriksel uyartım frekansının neden olduğu demir kayıpları gelmektedir.
- Bilimler arasındaki 5 temel disiplin elektrik makinalarında çalışılması gereken alanlardır. Bunlar; makine, elektrik-elektromanyetik, elektronik, termodinamik ve malzeme mühendisliği.
- Bilimsel çalışmalarda genellikle 2 tip elektrik makinası tartışılmıştır. Bunlar; sürekli mıknatıslı senkron makine (SMSM) ve asenkron makine (AM)'dir. Ancak bu tez çalışmasında anahtarlamalı relüktans makine (ARM) tercih edildiğinden aşağıda bu üç tip elektrik makinası karşılaştırılmıştır.

Çizelge 1.2 Yüksek hız uygulaması için potansiyel elektrik makinalarının karşılaştırılması

	SMSM	AM	ARM
Güç yoğunluğu	1	3	2
Titreşim Gürültü	1	2	3
Verim	1	3	2
Rotor sıcaklığı	1	3	2
Fiyat	3	1	2
$\cos \varphi$	1	-	-
Güvenilirlik	3	2	1
Ulaşılabilirlik	2	1	3
Komplekslik	3	2	1
Maksimum yük taşıma kapasitesi	1	3	2
Dayanıklılık	3	2	1

1: Çok iyi 2: Orta 3: Kötü

Karşılaştırma tablosundan anlaşılacağı üzere, SMSM avantajların birçoğunu içermektedir. Ancak mıknatıs varlığından kaynaklanan, fiyat, güvenilirlik, komplekslik ve dayanıklılık argümanlarında bu makine tipi doğal olarak dezavantajlı olmaktadır. Ek olarak, mıknatıs fiyatlarındaki belirsizlik ve stratejik nedenler, makine kullanıcılarını ve üreticilerini PMSM'e alternatif çözüm arayışına itmektedir.

Asenkron makine ulaşılabilirliği en kolay ve en ucuz makine olarak bilinmektedir. Ancak asenkron makinenin güç yoğunluğunda, verimde ve maksimum yüklenebilirliğinde doğal sınırlar bulunmaktadır. Ek olarak, rotorda bulunan sargı/kafes ekstra bakır kayıpları oluşturmakta ve rotorda ısı artışına neden olmaktadır. Bu durum, IM'nin sürekli çıkış gücü değerini düşürmektedir.

- Anahtarlama relüktans makine (ARM) diğer iki makine tipine göre en basit yapıya sahiptir. Bu nedenle üretimi kolay, ucuz ve üstelik verimi de SMSM ile yarışabilir seviyededir. Bu makinenin en büyük problemi titreşim ve akustik gürültü seviyesinin yüksek olmasıdır.
- Sonuç olarak SMSM ve Asenkron makine, bünyesinde birçok avantajları barındırmasına karşın yapılarından kaynaklanan dezavantajlar içermektedirler. Ayrıca bu iki makine tipi tez çalışmasına konu olan yüksek hızlı kesme (spindle)

uygulamalarında tercih edilmiş ve endüstriyel olarak pazara ürün olarak sunulmuşlardır.

- Bu çalışmada yüksek hızlı kesme (spindle) uygulamasına özgü anahtarlamalı relüktans makinası geliştirilecektir. Spindle uygulamalarında yüksek güç yoğunluğu istenildiğinden, laminasyon materyalleri arasında yeni teknoloji olan ve güç yoğunluğu konusunda büyük avantajlar sunan kobalt-demir alaşımı tercih edilerek ARM tasarlanacaktır.

1.2 Tezin Amacı

Yüksek hızlı elektrik makinaları beraberinde sunduğu yüksek verim, sağlam ve kompakt sistemler, aşınma ve kayıp güçte azalma, geniş hız aralığında çalışma, uzun bakım periyotları gibi avantajlar sayesinde uygulama alanları günümüzde hızla artmaktadır. Yapılan literatür araştırması sonucu, yüksek hızlı elektrik makinası uygulamalarında genellikle kalıcı mıknatıslı senkron makinalar ve asenkron makinaların tercih edildiği anlaşılmaktadır. Kalıcı mıknatıslı senkron makinalar yüksek güç yoğunlukları ile bilinmektedir. Asenkron makinalar ise düşük maliyetleri ile tanınmaktadır. Bu çalışmada kobalt-demir bileşenli yeni teknoloji laminasyon malzemesi kullanılarak kalıcı mıknatıslı senkron makinanın güç yoğunluğunu, makina tipi olarak ise anahtarlamalı relüktans makinasını seçerek asenkron makinadaki gibi düşük maliyet avantajlarını yeni bir motorda bir araya getirmektir.

1.3 Hipotez

Yüksek hızlı elektrik makinalarında güç kaybının çoğu demir kayıpları olarak açığa çıkmaktadır. Bu nedenle demir kayıplarının olduğu manyetik geçirgen laminasyon malzemesinin kayıp karakteristiği önem arz etmektedir. Bu çalışmada ilk olarak kobalt-demir alaşımlı laminasyon malzemesi (HiperCo50) yüksek hızlı anahtarlamalı relüktans motorunda kullanılmıştır. Bunun neticesinde, halihazırda endüstride kullanılan asenkron motor ve kalıcı mıknatıslı senkron motora alternatif olarak içinde birçok avantaj barındıran anahtarlamalı relüktans motoru bu çalışmayla sunulmaktadır.

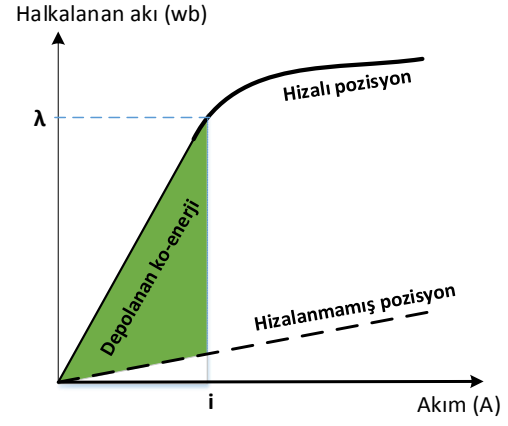
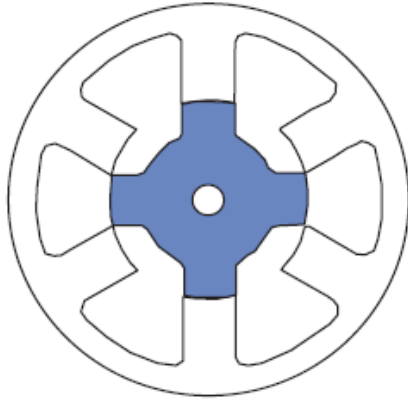
YÜKSEK HIZLI ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MAKİNASININ GELİŞTİRİLMESİ

Bu çalışma, yüksek hızda kesme (spindle) uygulamalarında kullanılmak üzere yüksek güç yoğunluğuna sahip yeni bir anahtarlama relüktans makinasının geliştirilmesini içermektedir. Bölüm 2’de yüksek güçlü anahtarlama relüktans makinanın genel makina denklemleri sunulacak ve ardından tasarım detayları anlatılacaktır. Ardından elektrik-elektromanyetik, mekanik, termal ve akustik analizleri gerçekleştirilecektir. Son olarak üretim aşamaları detaylı olarak anlatılacaktır.

2.1 Anahtarlama relüktans makinanın çalışma prensibi

Anahtarlama relüktans makinaları güvenilir, hata tolare edebilen, düşük maliyetli ve basit elektrik makinası olarak bilinmektedir. Bu özelliklerin kritik gereksinim olduğu havacılık, otomotiv, beyaz eşya ve savunma sanayii gibi uygulamalarda ARM aday elektrik makine tiplerinden biri olarak düşünülmektedir [26].

Anahtarlama relüktans makinasının çalışma prensibi, rotor pozisyonuna göre fazların sırayla uyarımı esasına dayanmaktadır. Uyarım akımı genellikle düşük çalışma hızlarında akımı kontrol eden yarı iletken anahtarlar vasıtası ile kare dalga formunda regüle edilmektedir. Ancak yüksek hızlarda akım dalga şekli regüle edilememekte ve makine tek anahtarlama modda çalışmaktadır [47]. ARM’de her bir faz birbirinden bağımsız olarak kontrol edilir ve tork rotor kutbuna en yakın stator kutbunun uyarımı yoluyla oluşturulmaktadır.



Şekil 2.1 Tipik 6/4 ARM geometrisi ve halkanan akı-akım eğrisi

Matematiksel formda,

$$V = iR + \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

$$V = iR + \frac{\partial \phi}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \phi}{\partial \theta_e} \frac{d\theta_e}{dt} \quad (2.2)$$

$$V = iR + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + K_e(\theta, i) \omega_e \quad (2.3)$$

Burada, $L(\theta, i)$ faz endüktansını ve $K_e(\theta, i) \omega_e$ ise ters-EMK'yı simgelemektedir. Güç eşitliği,

$$vi = i^2 R + i \frac{d\phi}{dt} \quad (2.4)$$

$$i \frac{d\phi}{dt} = P_{mek} + P_{alan} \quad (2.5)$$

$$i \frac{d\phi}{dt} = \frac{dW_{mek}}{dt} + \frac{dW_{alan}}{dt} \quad (2.6)$$

$$P_{mek} = \frac{dW_{mek}}{dt} = T_e \omega_m = T_e \frac{d\theta_m}{dt} = T_e \frac{1}{p} \frac{d\theta_e}{dt} \quad (2.7)$$

$$i \frac{d\phi}{dt} = T_e \frac{d\theta_m}{dt} + \frac{dW_{alan}}{dt} \quad (2.8)$$

$$T_e = i \frac{d\phi}{d\theta} - \frac{dW_{alan}}{d\theta} \quad (2.9)$$

$$W_{alan} = \int_0^{\phi} i(\theta, \phi) d\phi \quad (2.10)$$

Burada W_{alan} hava aralığında depolanan enerjiyi simgelemektedir. Hava aralığında depolanan enerjinin alternatifi olarak ko-enerji ise,

$$W_{ko-alan} = \int_0^i \phi(\theta, i) di \quad (2.11)$$

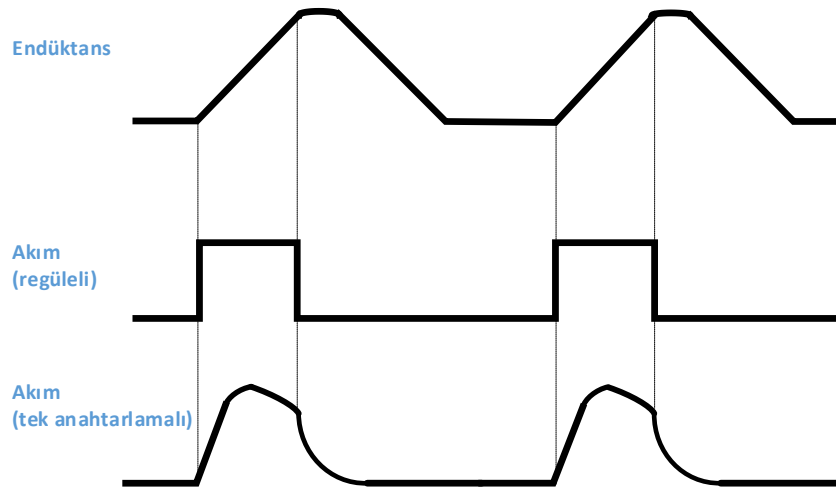
$$\phi = L(\theta, i).i \quad (2.12)$$

Basitleştirilmiş moment ifadesini elde edebilmek amacıyla, anahtarlama relüktans makinanın Şekil 2.1 Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.'deki gibi lineer bölgede çalıştığı kabul edilirse, akım ve rotor pozisyonunun bir fonksiyonu olan faz endüktansı $L(\theta, i)$, $L(\theta)$ şeklinde yazılabilmektedir. Bu durumda eşitlik (2.11)'de verilen ko-enerji formülü,

$$W_{ko-alan} = \int_0^i L(\theta) i di = \frac{i^2}{2} L(\theta) \quad (2.13)$$

olarak bulunur. Moment ise,

$$T = \frac{\partial W_{ko-alan}}{\partial \theta} = \frac{i^2}{2} \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (2.14)$$



Şekil 2.2 İdealleştirilmiş tipik ARM faz endüktansı profili ve motor çalışma için uygulanan akım dalga şekilleri

Eşitlik (2.14)'den anlaşılacağı üzere, ARM'de moment üretilebilmesi için faz akımının olması ve faz endüktansının rotor pozisyonu ile değişmesi gerekmektedir. Tipik idealleştirilmiş ARM faz endüktansının rotor pozisyonuna göre değişimi Şekil 2.2'de verilmiştir. Eşitlik (2.3)'de verildiği üzere ARM'de ters-EMK $K_e(\theta, i)\omega_e$ ile ifade edilmektedir. Dolayısıyla düşük çalışma hızlarında ARM'de oluşan ters-EMK, ARM sürücüsünün DC besleme gerilimini geçmediğinden faz akımı regüle edilebilmektedir. Ancak yüksek hızlarda ters-EMK değeri artmakta ve DC besleme gerilim seviyesini de geçebilmekte, faz akımı kontrol edilememektedir. Bu durumda ARM faz sargılarından geçen akımı kontrol eden yarı iletken anahtarlar tek darbeli (ya da tek anahtarlama) çalışmaktadır. İki durumda da oluşabilecek akım dalga şekilleri Şekil 2.2'de verilmiştir.

2.2 Yüksek hızlı anahtarlama relüktans makinasının tasarımı

Elektrik makinası tasarımına başlanmadan önce, elektrik makinasının kullanılacağı uygulama, makinadan istenen mekanik çıkış gücü, çalışma hızı ve geometrik kısıtlar belirlenmektedir. Yüksek hızda kesme (spindle) uygulamaları günümüzde yüksek hızlı elektrik motorlarının kullanıldığı en yaygın alanlardan biridir. Yüksek hızda kesme sayesinde sağlanacak temel yararlar şunlardır:

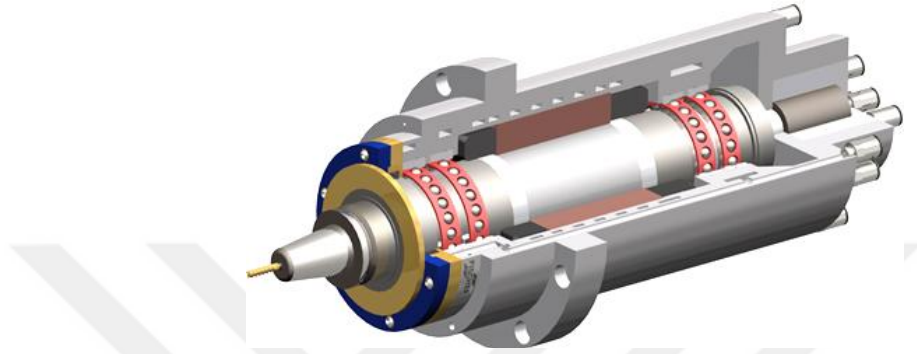
- entegre sistem ile güç yoğunluğunda yükselme,
- operasyon işlem sürelerinde kısalma,
- yüzey pürüzlülüğünde azalma,
- gerekli olan kesme kuvvetinde azalma ve beraberinde işlem hassasiyetinde artma,
- çapaklanma miktarında azalma sağlanmaktadır.

Spindle uygulamalarında,

- yüksek anlık moment (özellikle çalışmaya başladığı anda nominal momentin 1,5 katı kadar),
- düşük atalet (çalışmaya başladığı anda yüksek ivme sağlamaktadır),
- kompakt tasarım,
- geniş hız aralığında çalışma ihtiyacı bulunmaktadır.

Anahtarlama relüktans motorları rotorunda sadece laminasyon bulundurduğundan, rotorunda sargı/kafes bulunduran asenkron motora ve mıknatıs bulunduran sabit

mıknatıslı senkron motora göre en düşük ataleti ve geniş hız aralığında çalışma imkanı sunmaktadır. Ayrıca, SMSM ve asenkron motora göre maksimum yüklenilebilirliği çok yüksek ve tehlikesizdir. Bu özellikler, ARM’i spindle motoru uygulamaları için en cazip adaylardan biri konumuna getirmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada anahtarlamalı relüktans motoru, spindle uygulamasına özgü geliştirilmek amacıyla seçilmiştir. Şekil 2.3’de örnek spindle motor kesiti gösterilmektedir.

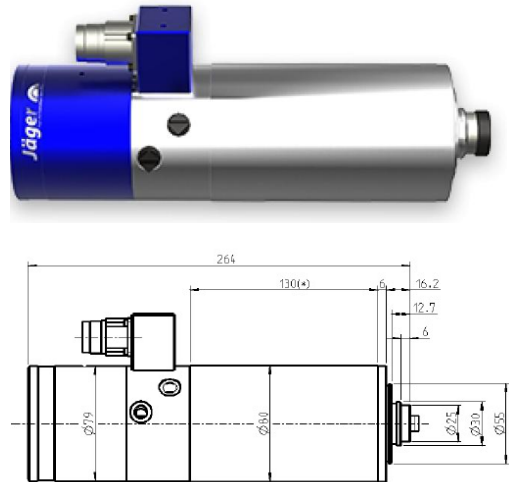


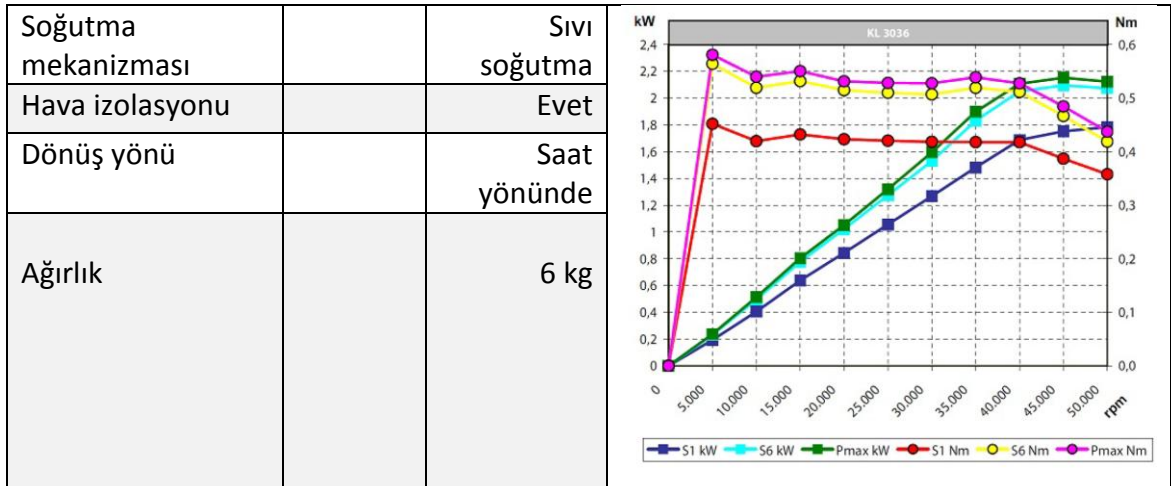
Şekil 2.3 Bir spindle motoru kesiti

Uygulama alanının belirlenmesinin ardından, gerekli olan nominal güç ve hız değerleri endüstride yaygın olarak kullanılan bir spindle motoru referans alınarak belirlenmiştir. Referans olarak alınan spindle motorunun teknik özellikleri Çizelge 2.1’de verilmektedir.

Çizelge 2.1 Referans alınan spindle motoru teknik özellikleri

Nominal çıkış gücü	S1-100% S6-60% Pmax/5s	1.8kW 2.1kW 2.1kW
Gerilim		211V
Faz Akımı (rms)	S1-100% S6-60% Pmax/5s	7.5A 8.7A 8.9A
Elektriksel frekans		1667Hz
Çift kutup sayısı (2p)		2
Nominal rotor hızı		50000 d/d
Hız ölçer		Transmitter
Motor koruması		PTC sensörü
Motor		Asenkron motor
Gövde çapı		80mm





Çizelge 2.2’de ARM tasarımıdaki referans parametreler verilmektedir. ARM’de yüksek kutup sayısı, moment dalgalılığının azalmasında etkili bir yöntemdir. Ancak bu durumda elektriksel frekans yükselmekte, motor üzerinde aşırı demir kayıpları, motor sürücüsü üzerinde ise ekstra anahtarlama kayıpları ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle 6/4 stator/rotor kutup kombinasyonu ARM’de tercih edilmiştir. 6/4 tasarım ile 50 bin d/d rotor hızında elektriksel uyartım frekansı 3.3kHz seviyesindedir. Bu değer, konvansiyonel elektrik motorlarında 50Hz seviyesinde olan elektriksel frekansa göre 66 kat daha yüksektir.

Çizelge 2.2 ARM tasarımı belirlenen parametreler

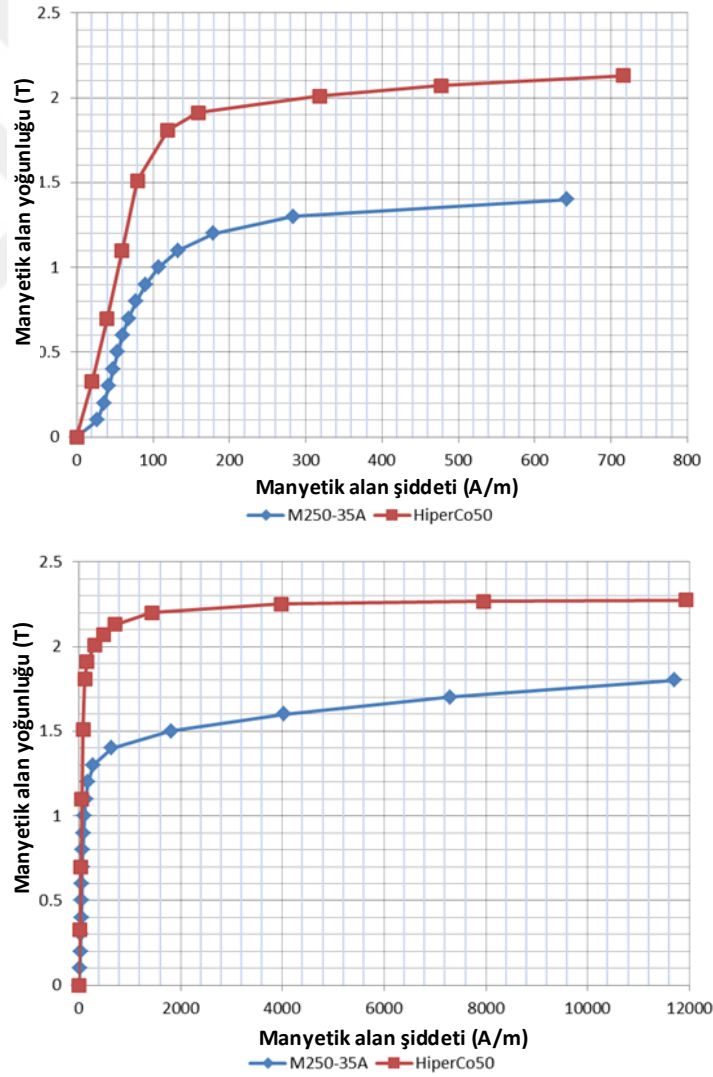
Nominal güç (sürekli çalışma)	1.8kW	Laminasyon uzunluğu	130 mm
DC bara gerilimi	300V	Stator çapı	80 mm
Faz sayısı	3		
Maksimum akım	25A		
Frekans	3.33kHz		
Rotor kutup sayısı	4		
Stator kutup sayısı	6		
Nominal hız	50000 d/d		
Motor tipi	ARM		
Soğutma sistemi	Doğal soğutma		

Stator dış çapı ve laminasyon uzunluğu Çizelge 2.1 baz alınarak belirlenmiştir. Tasarımı yapılan ARM’in yüksek hızlı elektrik motoru sınıfına girebilmesi için rotor yüzeyindeki çizgisel hız değerinin minimum 100 m/s değerinde olabilmesi gerektiğinden, rotor çapı

$$D_r = 2 \frac{v}{\omega} = 2 \frac{100}{2\pi \frac{50000}{60}} = 38.2 \text{ mm} \quad (2.15)$$

olarak hesaplanmıştır.

ARM tasarımında laminasyon materyali olarak kobalt-demir alaşımlı çelik tercih edilmiştir. Bu çelik laminasyon türü, Carpenter Teknoloji firması tarafından HiperCo50 adıyla üretilmektedir. Endüstride yaygın olarak kullanılan silikon-demir içerikli M270-35A laminasyon malzemesi ve HiperCo50 materyalinin B-H manyetizasyon eğrileri Şekil 2.4'te karşılaştırılmaktadır. Silikon-demir içerikli M270-35A'ya göre kobalt-demir içerikli HiperCo50 materyali çok yüksek akı yoğunluğu avantajı sunmaktadır.



Şekil 2.4 M270-35A ve HiperCo materallerinin B-H mıknatıslanma eğrilerinin karşılaştırılması

Stator ve rotor kutuplarının yay açısı (B_s, B_r), araştırmacı Lawrenson'un çalışmasıyla belirlenebilir [48]. Bu çalışmaya göre, ilk olarak stator-rotor kutup sayılarının en küçük ortak katı (EKOK) bulunmalıdır.

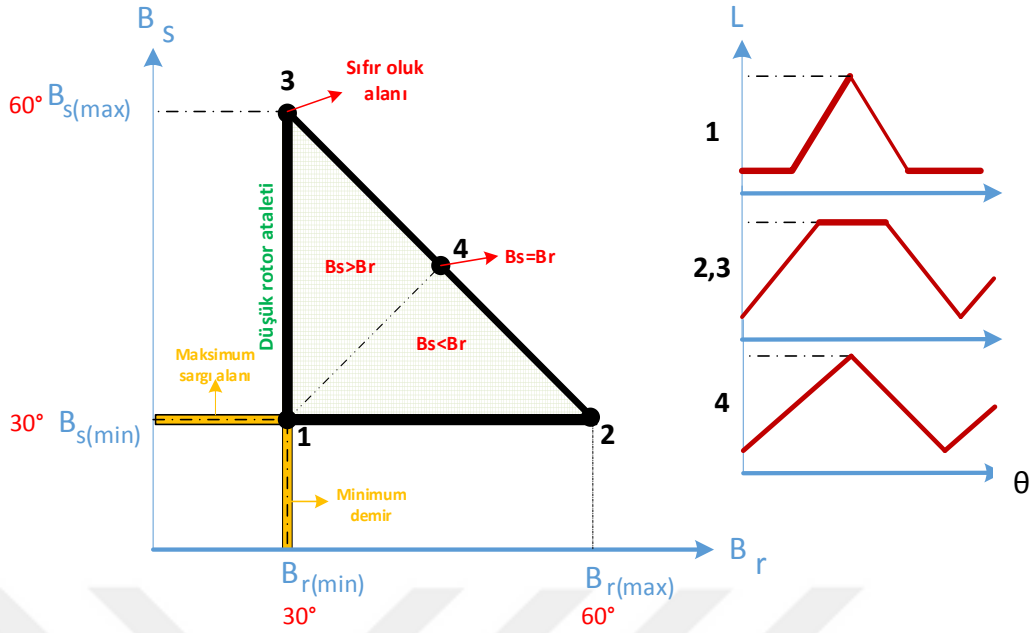
$$EKOK(N_s, N_r) = EKOK(6, 4) = 12 \quad (2.16)$$

$$\min(B_s, B_r) > \frac{360}{qN_r} \quad (2.17)$$

$$\min(B_s, B_r) > 30^\circ \quad (2.18)$$

$$B_s + B_r \leq \frac{360}{N_r} \quad (2.19)$$

Burada N_s, N_r, q sırasıyla stator-rotor kutup sayısı ve faz sayısını simgelemektedir. Eşitlik (2.18)'den görüleceği üzere, stator ve rotor kutup yay açıları 6/4 ARM için minimum 30° olabilmektedir. Diğer sınır şartı ise (2.19)'dan anlaşılmaktadır: stator ve rotor kutup yay açılarının toplamı 90 dereceyi geçmemelidir. Bu iki şart baz alınarak, stator-rotor kutup yay açılarının (B_s, B_r) 6/4 ARM için muhtemel alabileceği değerler Şekil 2.5'de gösterilmektedir. Stator kutup yay açısının artması stator kutuplarındaki manyetik alan yoğunluğunu azaltmaktadır ancak bu durumda faz bobinleri için ayrılan stator oluklarının efektif kullanım alanı azalmaktadır. Rotor kutup yay açısının artması yine kutuplardaki manyetik alan yoğunluğunu azaltmaktadır ancak diğer yandan elektrik makinasının ataleti artmaktadır. Diyagram üzerinde belirlenen 4 özel noktadaki endüktans değişimleri aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Genellikle ARM tasarımlarında $B_r \geq B_s$ olduğu (142) üçgeni içerisinde bulunan alan daha pratik olarak kabul edilmekte, çoğunlukla tercih edilmektedir.



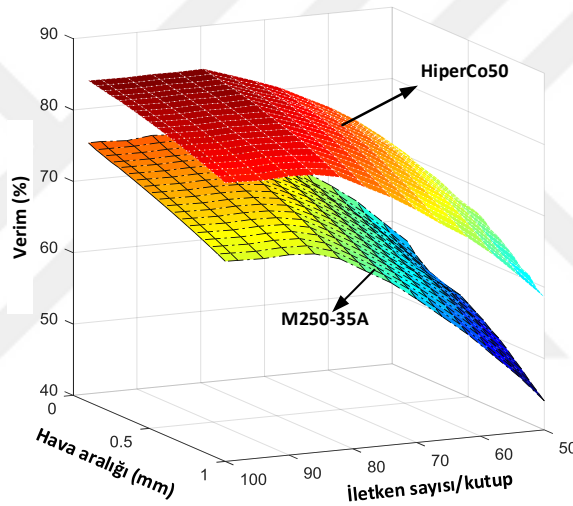
Şekil 2.5 6/4 ARM için muhtemel stator-rotor yay açıları

Şimdiye kadar, kutup sayısı, ARM'nin stator ve rotor çapları ve laminasyon malzemesi türü belirlenmiştir. Hava aralığı, stator-rotor kutup yay açıları, laminasyon uzunluğu ve kutup başına düşen iletken-sipir sayısı sonlu elemanlar yöntemi kullanarak nümerik hesaplama yapan bilgisayar programı ile parametrik optimizasyon aracı kullanılarak bulunabilir. Düşük hızlı geleneksel elektrik makinalarında hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu stator kutbundaki dış akı yoğunluğunun yaklaşık yarısı olacak şekilde hedef belirlenerek hava aralığı uzunluğu belirlenmektedir. Geleneksel laminasyon malzemelerinin tercih edildiği elektrik makinalarında, stator dişlerindeki manyetik akı yoğunluğu 1.5-1.6 Tesla aralığındadır. Laminasyonda oluşan demir kayıpları,

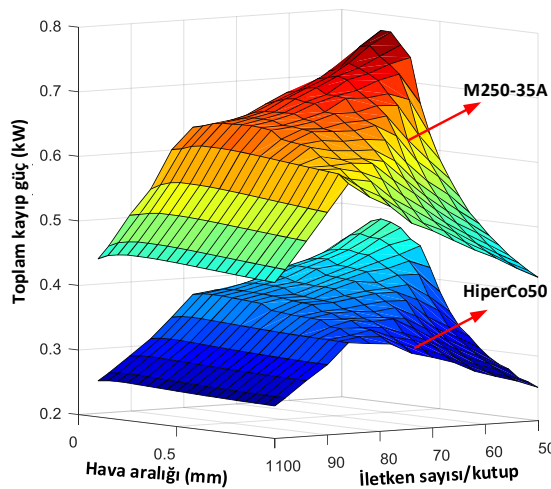
$$P_c = k_h * B^2.f + k_e(B.f)^2 + k_a(B.f)^{1.5} \quad (2.20)$$

ile ifade edilmektedir. Yüksek hızlı elektrik makinalarında frekans geleneksel elektrik makinalarına göre oldukça yüksektir. Dolayısıyla, yüksek hızlı elektrik makinalarında demir kayıplarını minimize edebilmek için laminasyondaki akı yoğunluğu değeri daha düşük tasarlanmalıdır. Bu durumda hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu da düşük olmaktadır. Hava aralığı uzunluğunu belirlerken diğer kısıtlayıcı faktör üretim toleransından gelmektedir. Üretim sırasında oluşabilecek eksenel kaçıklık, üretim toleransları, rotor ve şaft üzerinde oluşan mekanik ve elektromanyetik kuvvetlerin

neden olduğu ovulasyon, yüksek hızlarda etkisini göstermektedir. Bu nedenle hava aralığı uzunluğunu aşırı azaltmak, rotorun yüksek hızlarda statora sürtmesine neden olabilmekte, motorun sağlıklı çalışmasını tehlike altına alabilmektedir. Tasarım parametrelerinin belirlenmesi sonlu elemanlar metodu ile çalışan Ansys-Mawell'in optimizasyon algoritması kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 2.6'da ARM'de farklı laminasyon mazemeleri kullanılması durumunda verim ve toplam kayıp gücün hava aralığı ve statör kutup başına iletken sayısına bağılı değişimi verilmektedir. Hava aralığının artması durumunda verimde düşme söz konusudur. Diğer yandan, iletken sayısının motor veriminde ve dolayısıyla toplam güç kaybı üzerindeki etkisi Şekil 2.6'dan anlaşılmaktadır.



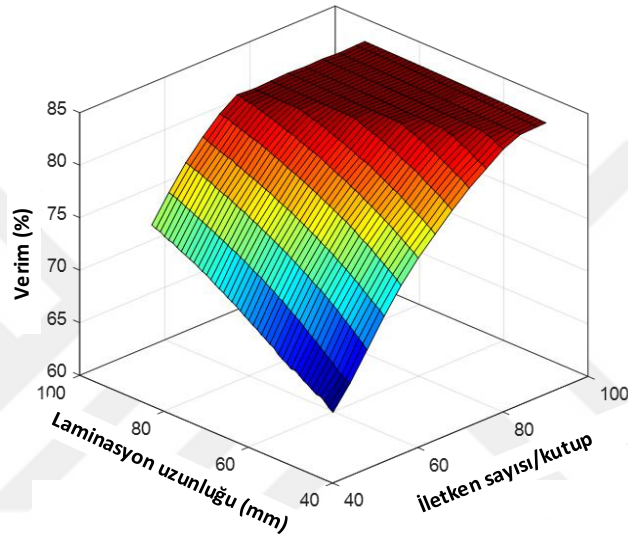
(a)



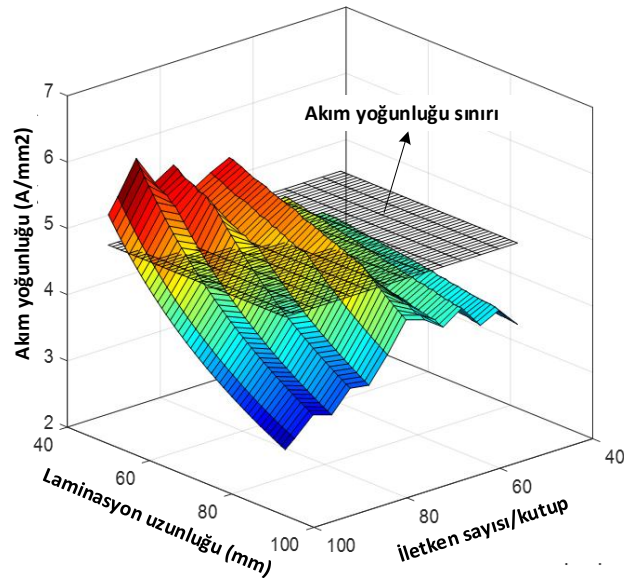
(b)

Şekil 2.6 Laminasyon malzemesi olarak HiperCo50 ve M250-35A kullanılması halinde (a) verimin (b) toplam kayıp gücün hava aralığı ve oluk iletken sayısına bağılı değişimi

Şekil 2.7 laminasyon uzunluğunun ve stator kutup başına iletken sayısının ARM'nin verimi ve akım yoğunluğuna etkisini göstermektedir. Grafiklerden görüldüğü üzere, verimi arttırmanın farklı yolları vardır. Laminasyon uzunluğunu azaltmak üretim maliyetlerini düşürmekte ARM'in toplam ağırlığını ve hacmini düşürmektedir ancak akım yoğunluğunun artmasına neden olmaktadır. Doğal soğutma mekanizması düşünülerek akım yoğunluğunun 5 A/mm^2 değerinin üzerine çıkmasına izin verilmemelidir. Neticede iletken sayısı 84, laminasyon uzunluğu ise 65 mm olarak belirlenmiştir.



(a)



(b)

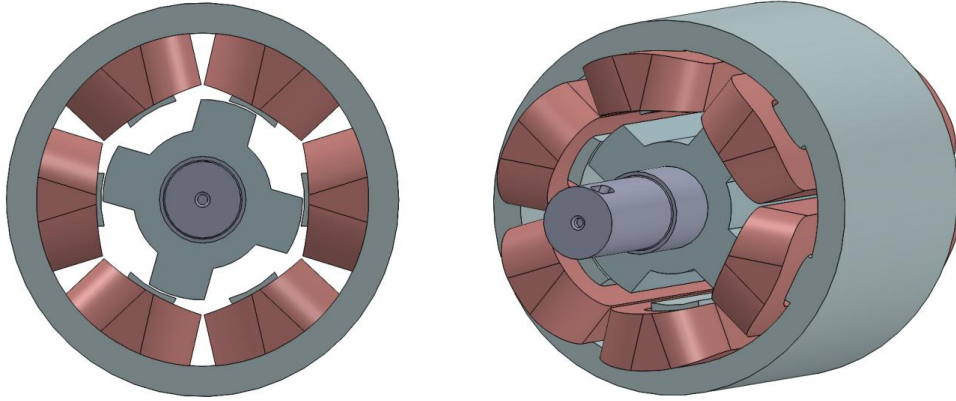
Şekil 2.7 Laminasyon uzunluğunun ve iletken sayısının ARM'in (a) verimine ve (b) akım yoğunluğuna etkisi

Stator ve rotor kutup yay açıları, uyartım açısı (turn-on), iletim açısı (conduction angle) ve kutup başına iletken sayısı dikkate alınarak parametrik optimizasyon metodu ile belirlenmiştir. Ayrıca statordaki 6 kutupta herbir faz için bulunan 2’şer bobin birbirine paralel bağlanarak, yüksek hızlardaki eksantrisite etkisi azaltılmaya çalışılmıştır [49].

Çizelge 2.3 Nihai tasarım ARM parametreleri

Stator kutup yay açısı	β_s	30°
Rotor kutup yay açısı	β_r	33.3°
Stator boyunduruk kalınlığı	Y_s	5.9mm
Rotor boyunduruk kalınlığı	Y_r	6.1mm
Şaft çapı	D_{ir}	15 mm
Rotor dış çapı	D_{or}	39.2 mm
Stator iç çapı	D_{is}	40 mm
Stator dış çapı	D_{os}	77 mm
Laminasyon uzunluğu	L_{stack}	65 mm
İletken sayısı/kutup	N_s	84
Paralel kol sayısı	p_s	2
Laminasyon materyali		HiperCo50

Ön tasarımı yapılan yüksek hızlı anahtarlamalı relüktans motorunun üç boyutlu hali Şekil 2.8’de gösterilmektedir. Sonraki adım detaylı elektromanyetik analiz olacaktır.



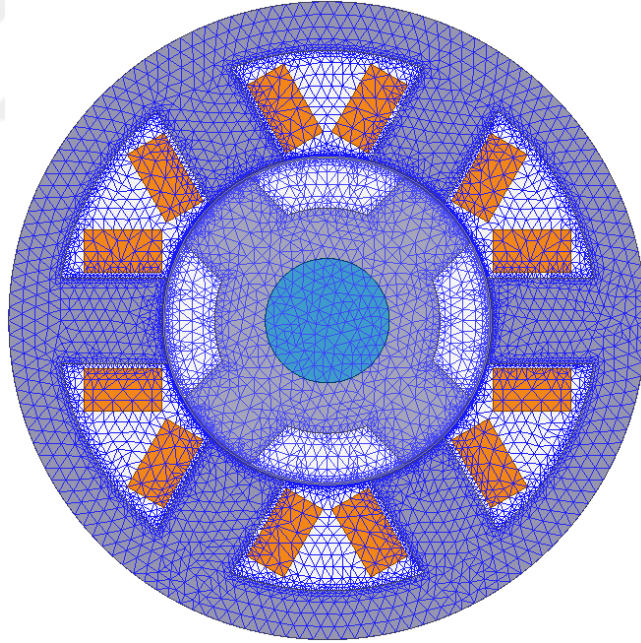
Şekil 2.8 Tasarımı tamamlanan yüksek hızlı ARM

2.2.1 Elektromanyetik analiz

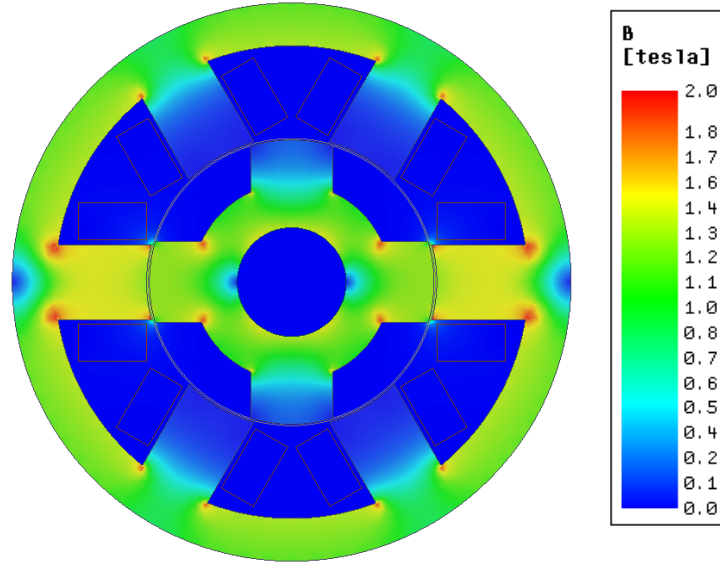
2.2.1.1 Anahtarlamalı relüktans makinası sonlu elemanlar modelinin oluşturulması

Bu kısımda 2 ve 3 boyutlu elektromanyetik analizler için anahtarlamalı relüktans makinasının sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Bu kapsamda, ilk olarak sonlu parçacıkların (mesh) boyutları ve sınır şartlar belirlenmelidir.

Sonlu elemanlar metodunda sonucu etkileyen en önemli parametrelerin başında sonlu parçacıkların boyutlandırılması gelmektedir. Bu nedenle analiz çalıştırılmadan önce kullanıcının sonlu parçacıkları doğru uyarlaması gerekmektedir. Özellikle elektrik makinalarının sonlu elemanlar yöntemi ile analizinde, enerji dönüşümünün sık olduğu kısımlarda yani stator ile rotor arasında bulunan hava aralığında bu sonlu parçacıkların sayısının artırılması elzemdir. Ek olarak, akı çizgilerinin yönünde ani değişikliklerin olduğu kısımlarda kaçak akı miktarında artış gözlemlenebileceğinden, bu kısımlarda da sonlu parçacık sıklığının artırılması, analizin doğruluk payını yükseltecektir.



Şekil 2.9 Yüksek hızlı ARM'in sonlu parçacıklar modeli



Şekil 2.10 ARM'in A-fazının 10A doğru akım (DA) ile uyarılma sonucu oluşan manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Şekil 2.9'da tasarımı yapılan ARM'nin sonlu parçacıklar modeli görünmektedir. Şekilde görüldüğü üzere, hava aralığında ve laminasyonun kenar kısımlarında sonlu parçacık sayısı analizin doğruluğunu yükseltebilmek amacıyla arttırılmıştır. Şekil 2.10'da ise ARM'nin A-fazı 10A doğru akım (DA) ile uyarılmış ve manyetik akı yoğunluğu dağılımı rotorun A fazına hizalandığı an için gösterilmiştir. Şekilden anlaşıldığı üzere özellikle akı çizgilerinin yön değiştirdiği köşelerde manyetik akı yoğunluğu artmaktadır. Çizelge 2.4'de modeldeki parçacık boyları ve istatistik sonuçları verilmektedir.

Çizelge 2.4 ARM bileşenlerindeki sonlu parçacık sayıları ve istatistik sonuçları

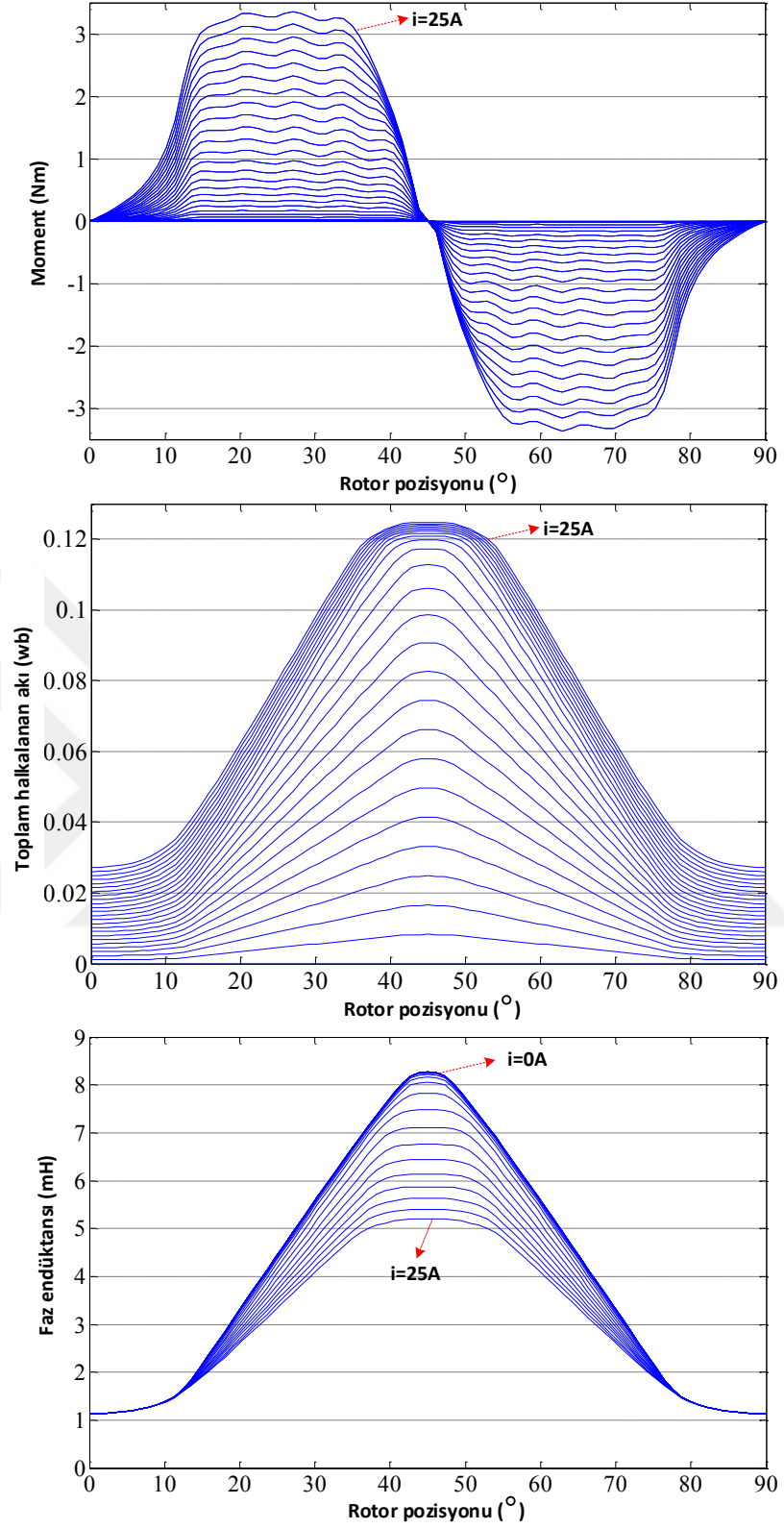
Stator yüzeyi maksimum sonlu parçacık boyu	2 mm
Stator yüzeyi maksimum sonlu parçacık boyu	2 mm
Sargı yüzeyi maksimum sonlu parçacık boyu	3.7 mm
Hava aralığı maksimum sonlu parçacık boyu	0.1 mm
Stator-rotor kenarlarındaki maksimum sonlu parçacık boyu	0.5 mm
Rotor dış çapı	39.2 mm
Modeldeki toplam sonlu parçacık sayısı	22870

2.2.1.2 Geliştirilen ARM'in statik elektromanyetik performans analizi

Sonlu elemanlar yöntemi ile ARM analizi için gerekli olan sonlu parçacıkların belirlenmesinin ardından elektromanyetik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde fazlardan herhangi biri doğru akım (DA) ile uyarılarak farklı rotor pozisyonlarında rotorda oluşan moment, ilgili fazda halkalanan toplam akı miktarı ve endüktans

değişimi gözlemlenmiştir (Şekil 2.11). Sonuçlardan görüldüğü üzere, akım değeri 17A değerine ulaştığında, ARM manyetik açıdan doyuma ulaşmıştır. Bu durum özellikle rotor ve statorun hizalandığı 45° pozisyonunda faz endüktansının düşük akımda uyarımlara nazaran oldukça fazla azalmasından anlaşılmaktadır. Aynı etki bir faz tarafından üretilen momentten de anlaşılmaktadır.





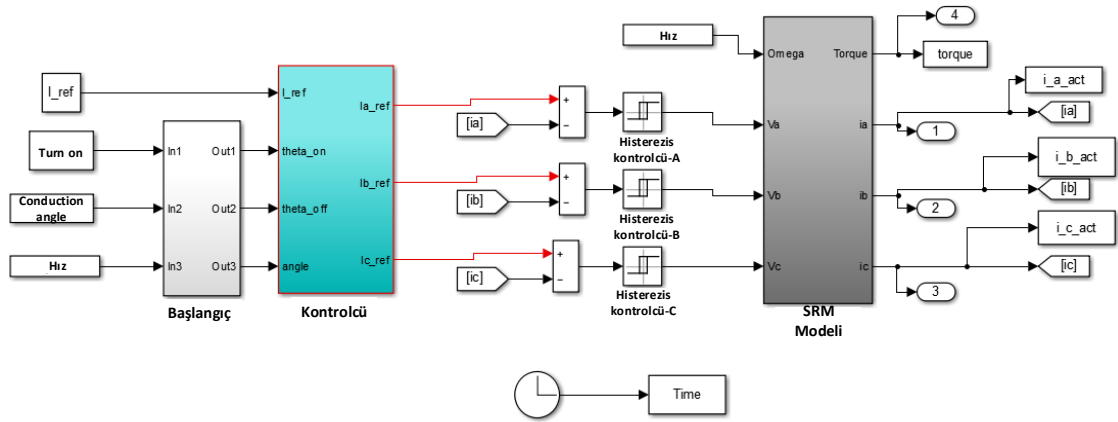
Şekil 2.11 ARM'in A-fazının farkı DA seviyelerinde uyarılması sonucu farklı rotor pozisyonlarında oluşan moment, halkalanan akı ve faz endüktansı değişimi

2.2.1.3 Geliştirilen ARM'in dinamik elektromanyetik performans analizi

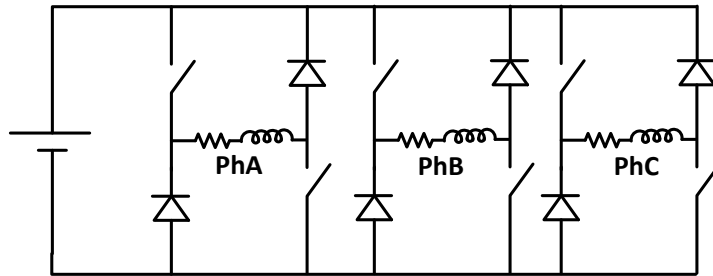
Statik analiz sonucu farklı rotor pozisyonları ve akım seviyeleri için ARM'nin statik performans eğrileri elde edilmişti. Bu kısımda elde edilen bu bilgiler kullanılarak ARM'nin dinamik davranışı incelenecektir. Bu amaç için gerekli olan adımlar,

- Uyarım açısı (turn-on) ve iletim açısı (conduction angle) optimizasyonu,
- Tork-hız eğrilerinin oluşturulması,
- Verim haritasının oluşturulmasıdır.

İlk olarak, ARM makine modeli Matlab-Simulink ortamında geliştirilmiştir (Şekil 2.12). Burada, kontrolcü altsistemi giriş bilgisi olarak gelen uyarım açısı, iletim açısı, hız bilgisi ve akım referansı bilgilerini kullanarak ideal (referans) akım dalga şeklini zaman ekseninde üretmektedir. Ardından histerezis kontrolcü yardımıyla akım regülasyonu sağlanmaktadır. ARM sürücüsü olarak oldukça yaygın olarak kullanılan Şekil 2.13'de verilen asimetrik yarım köprü güç dönüştürücü devre topolojisi tercih edilmiştir.



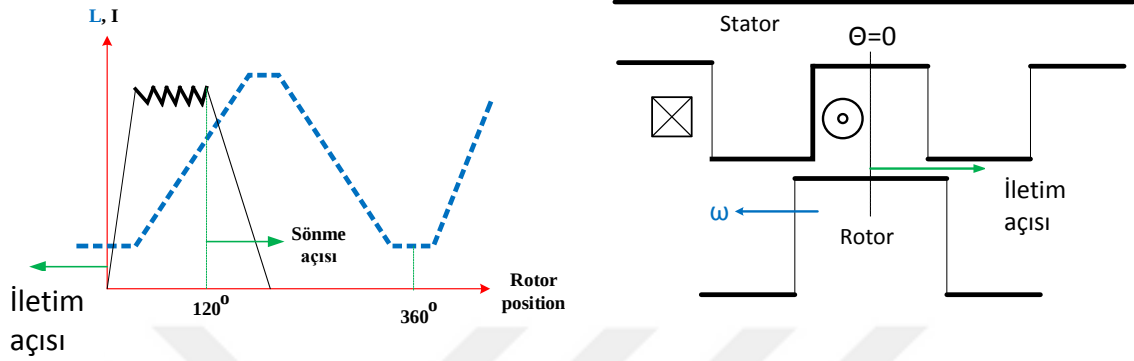
Şekil 2.12 Dinamik performans analizi için geliştirilmiş ARM simülasyon modeli



Şekil 2.13 Asimetrik yarım köprü güç dönüştürücüsü devre şeması

Uyartım açısı (turn-on) ve iletim açısı (conduction angle) optimizasyonu

Uyartım açısı ve iletim açısı Şekil 2.14'te gösterilmektedir. Şekilden anlaşıldığı üzere, stator ve rotor kutuplarının hizalanmamış pozisyonu rotorun başlangıç pozisyonu olarak kabul edilmiştir. Bu durumda faz endüktansı minimum değerdedir.



Şekil 2.14 Uyartım ve iletim açısı tanımları

Uyartım ve iletim açılarının optimizasyonunda üç farklı hedef belirlenebilir;

- Minimum moment dalgalılığı,
- Maksimum ortalama moment,
- Akım başına maksimum ortalama moment (MTPA)

Oluşturulan optimizasyon algoritmasının genel akış şeması Şekil 2.15'de verilmektedir. Burada iç içe akım, uyartım açısı ve iletim açısı çevrimleri bulunmaktadır. İlk olarak bölüm 2.2.1.2 'de verilen farklı rotor pozisyonlarındaki statik performans parametreleri (moment, akı, akım) matlab ortamına aktarılmaktadır. İkincil olarak, çalışma şartları (hız, yük moment) belirlenmektedir. Ardından algoritma içerisinde bulunan referans akım, uyartım ve iletim açıları döngüleri çalıştırılmaktadır. Her bir döngü çalıştırılırken yukarıda bahsedilen Matlab-Simulink dinamik ARM modeli çalıştırılmakta ve her simülasyonun sonucunda ortalama akım, ortalama moment, moment dalgalılığı değerleri hesaplanmaktadır. Hesaplama kısmında ARM'in kararlı rejim değerleri hesaba katılmalıdır. Aksi takdirde sonuçlar yanıltıcı olacaktır. Her hesaplamanın ardından, ARM tarafından üretilen ortalama momentin istenen yük momentini sağlayıp sağlayamadığı kontrol edilmelidir. Eğer sağlamadığı tespit edilir ise bu değerler kaydedilmeden algoritmanın çalıştırılmasına devam edilmektedir. Algoritmanın çalıştırılması esnasında dikkat edilmesi gereken diğer bir konu faz akımlarının bir elektriksel periyot süresince

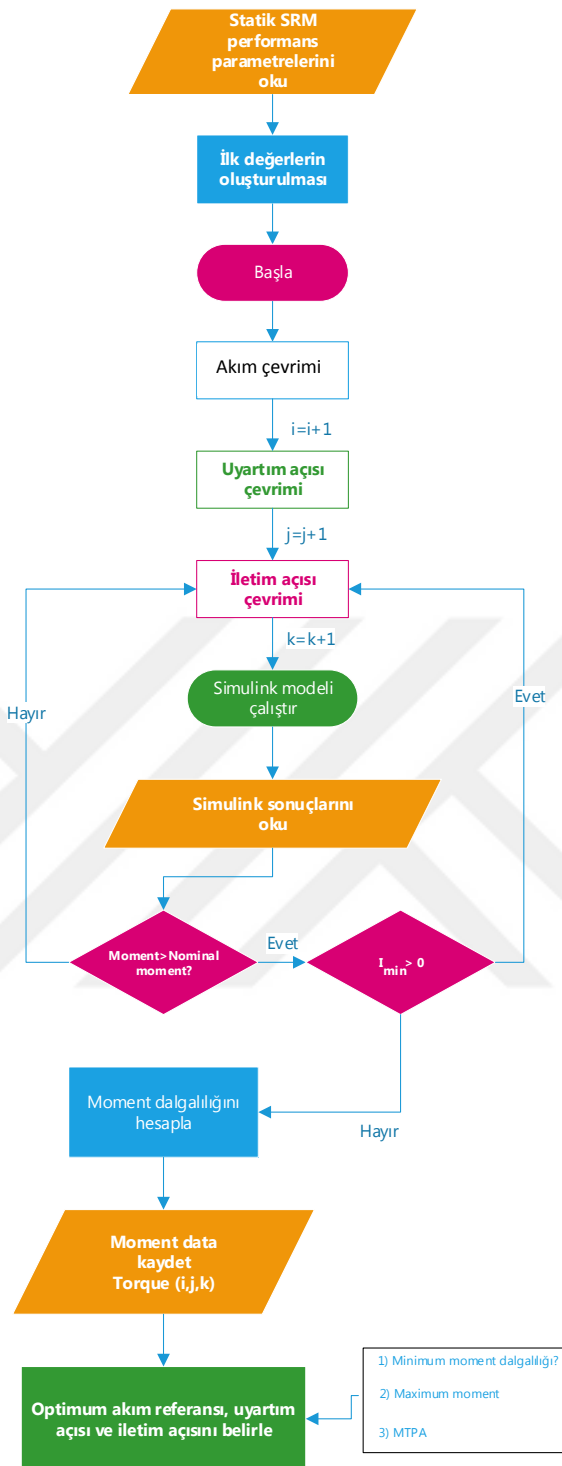
sönmesini sağlamaktır. Diğer bir ifadeyle ARM'in kesintili iletim modunda çalıştırılması garanti altına alınmalıdır. Aksi takdirde ARM manyetik olarak doyum bölgesine girmektedir. ARM'in sürekli iletim modunda çalıştırılması durumundaki ARM'in çalışma davranışı tamamen farklı incelenmelidir. Ancak bu tez çalışması kapsamında sürekli iletim modu konu kapsamı dışındadır. Son adımda, kaydedilen her bir adımdaki moment, akım bilgileri bir matriste birleştirilir. Üç hedeften biri (minimum moment dalgalılığı, maksimum ortalama moment veya MTPA) kullanıcı tarafından seçilir ve optimum akım referansı, uyarım ve iletim açıları belirlenir.

Şekil 2.16'da minimum moment dalgalılığı için örnek algoritma çıktıları görülmektedir. Analiz ARM'nin 20 bin d/d'daki çalışma şartında yapılmış, 12A referans akım, $\theta_{on} = 30^\circ$ ve $\theta_{off} = 35^\circ$ uyarım ve sönüm açıları optimizasyon algoritması sonucunda üretilmiştir. İletim açısı eşitlik (2.21)'den hesaplandığında 155° olarak bulunmaktadır.

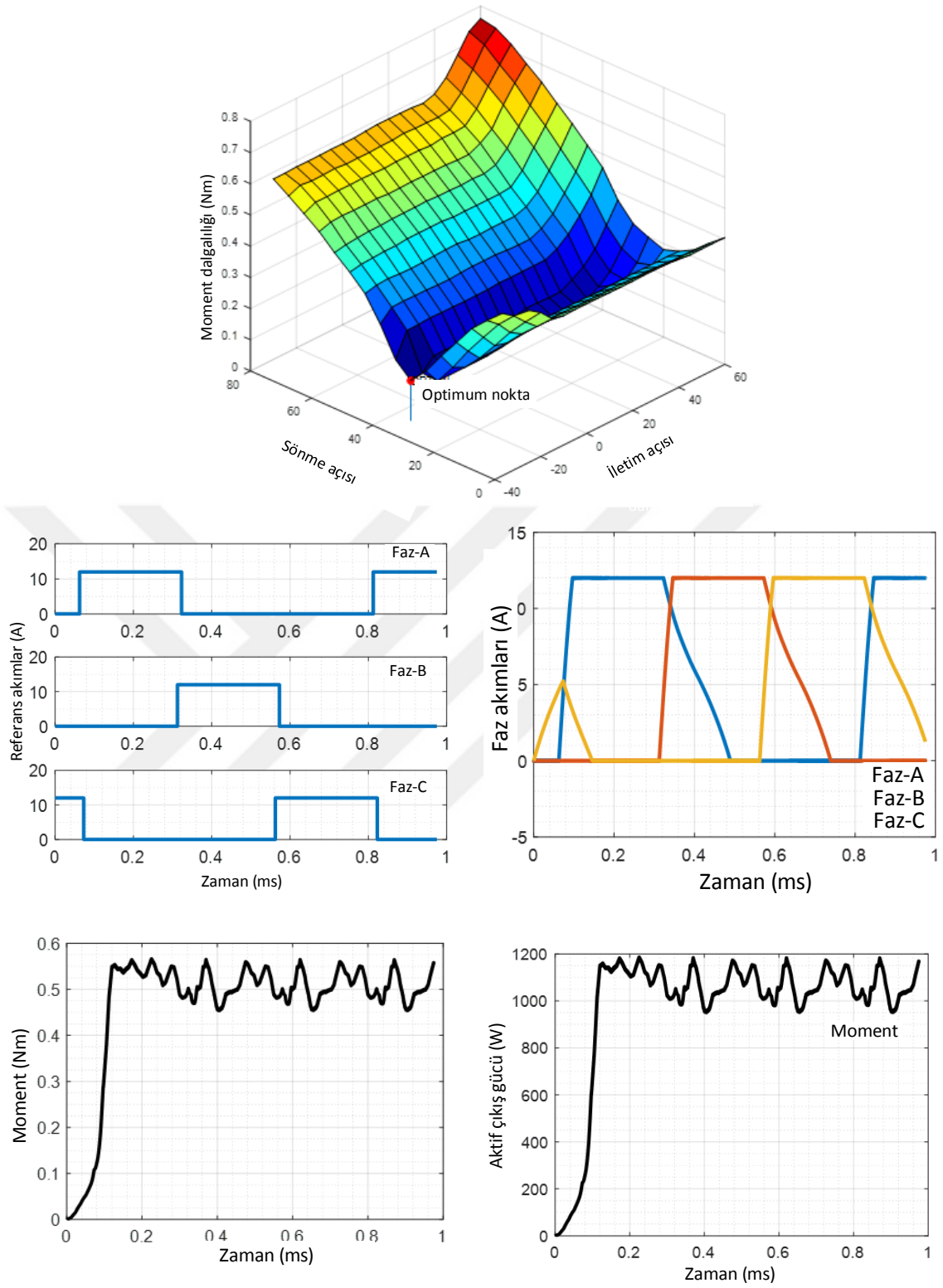
$$\theta_{con} = \theta_{on} + 120 + \theta_{off} \quad (2.21)$$

50 bin d/d rotor hızı için, maksimum ortalama tork ve akım başına maksimum moment hedeflenerek gerçekleştirilen algoritma sonuçları ise Şekil 2.17 ve Şekil 2.18'de sırasıyla verilmiştir. Sonuçlardan anlaşıldığı üzere, akım regülasyonu için histerezis kontrol metodu uygulanmasına rağmen, 50 bin d/d hız değerinde endüklenen ters elektromotif kuvvet(EMK)'ten dolayı akım 12A değerine erişememektedir. Bu durum, tek darbeli mod (single pulse mode) olarak adlandırılmaktadır.

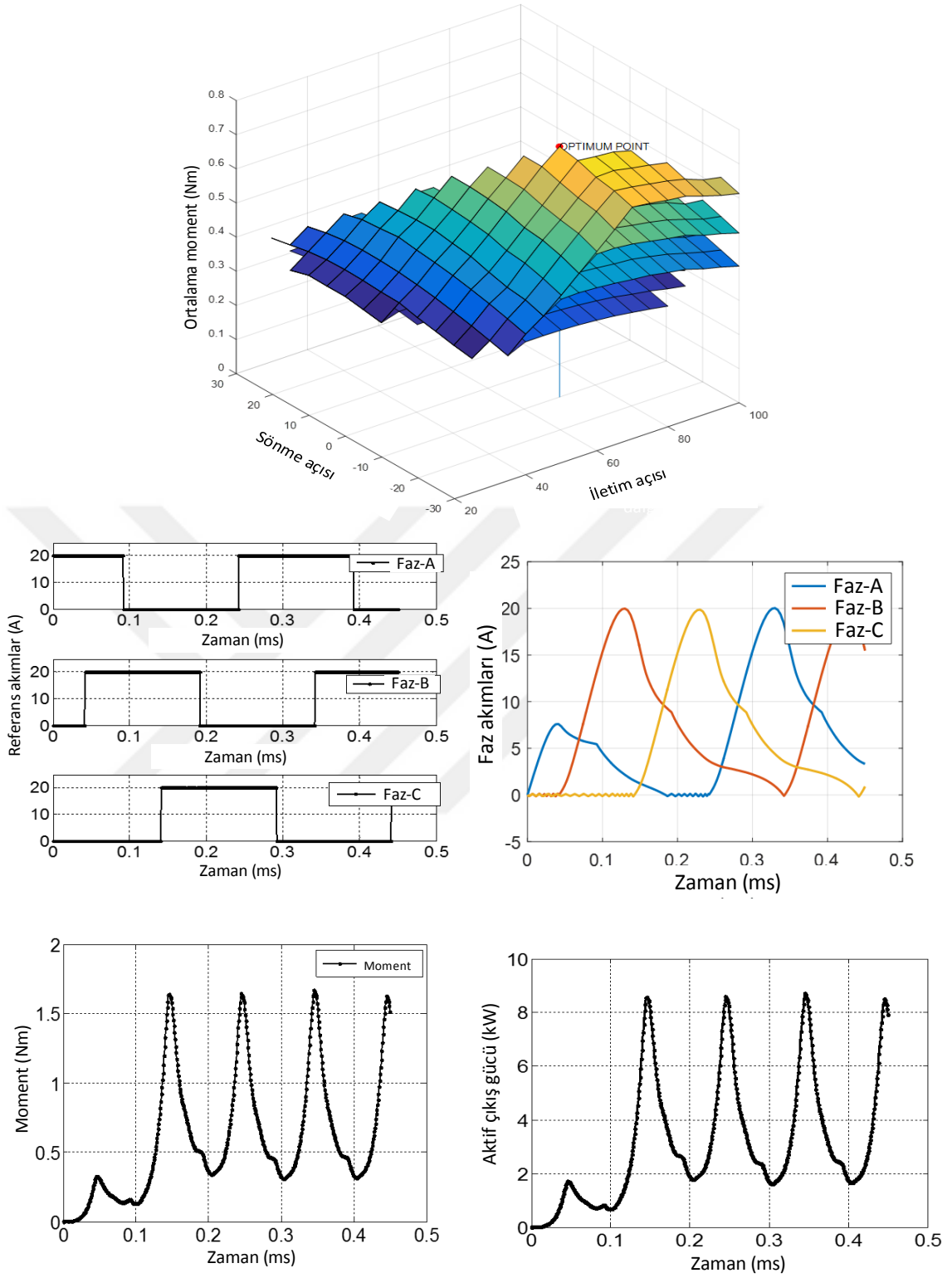
Sonuçları ayrı ayrı verilen bu üç metot uygulama türüne göre tercih edilebilmektedir. Ancak günümüzde bu üç metot içerisinde en çok tercih edilen "akım başına maksimum ortalama moment (MTPA)" metodudur. Bu yöntem ile, ARM sürekli olarak en verimli çalışma şartlarında kullanılmakta, muhtemel gereksiz sıcaklık yükselmelerinin önüne geçilmektedir.



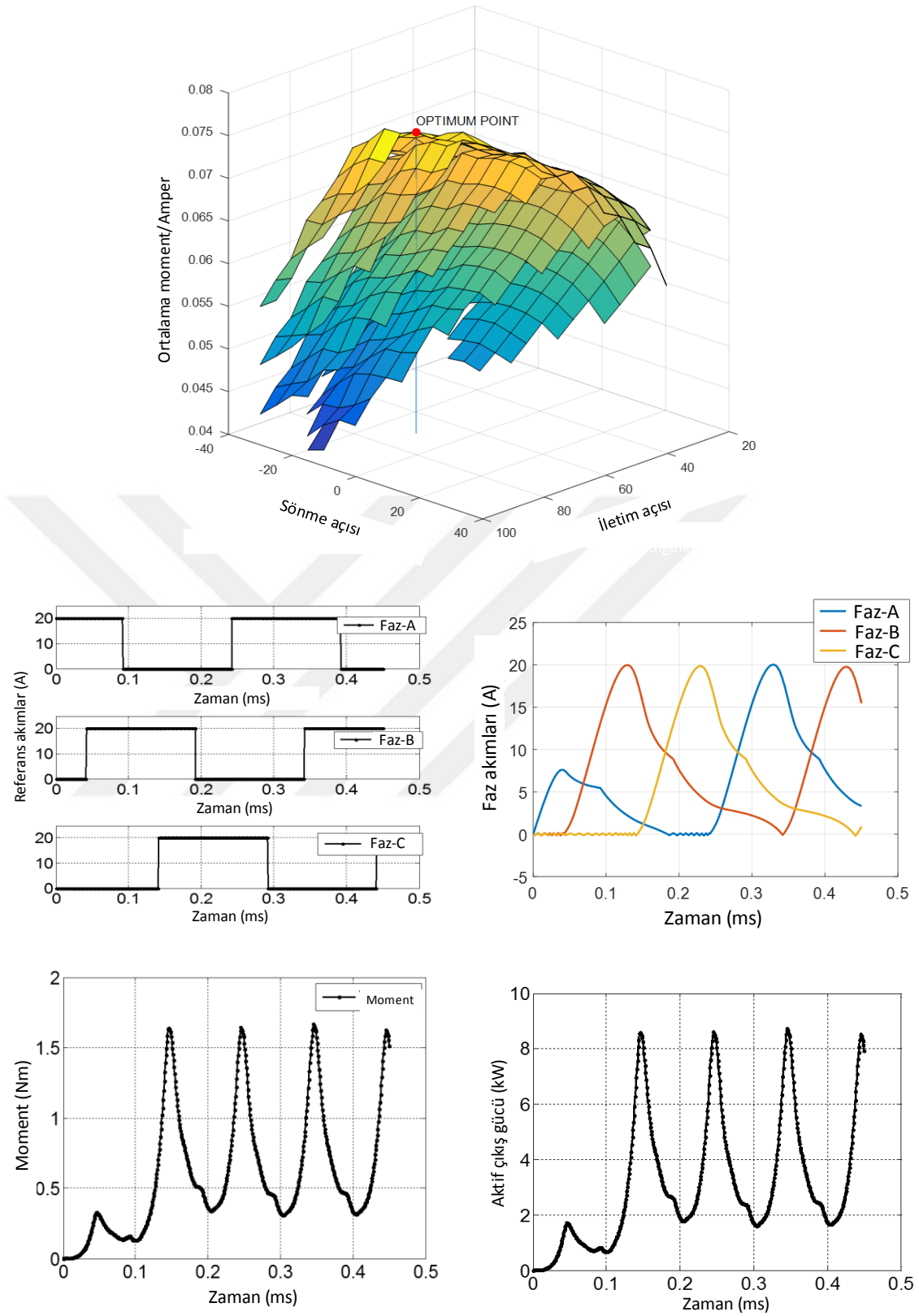
Şekil 2.15. Optimizasyon algoritması akış şeması



Şekil 2.16 20 bin d/d'da minimum moment dalgalılığı için optimizasyon sonucu;
 $I_{ref}=12A$, $\theta_{on} = 30^\circ$, $\theta_{off} = 35^\circ$



Şekil 2.17 50 bin d/d'da maksimum ortalama moment için optimizasyon sonucu;
 $I_{ref}=20A$, $\theta_{on} = 70^\circ$, $\theta_{off} = -10^\circ$



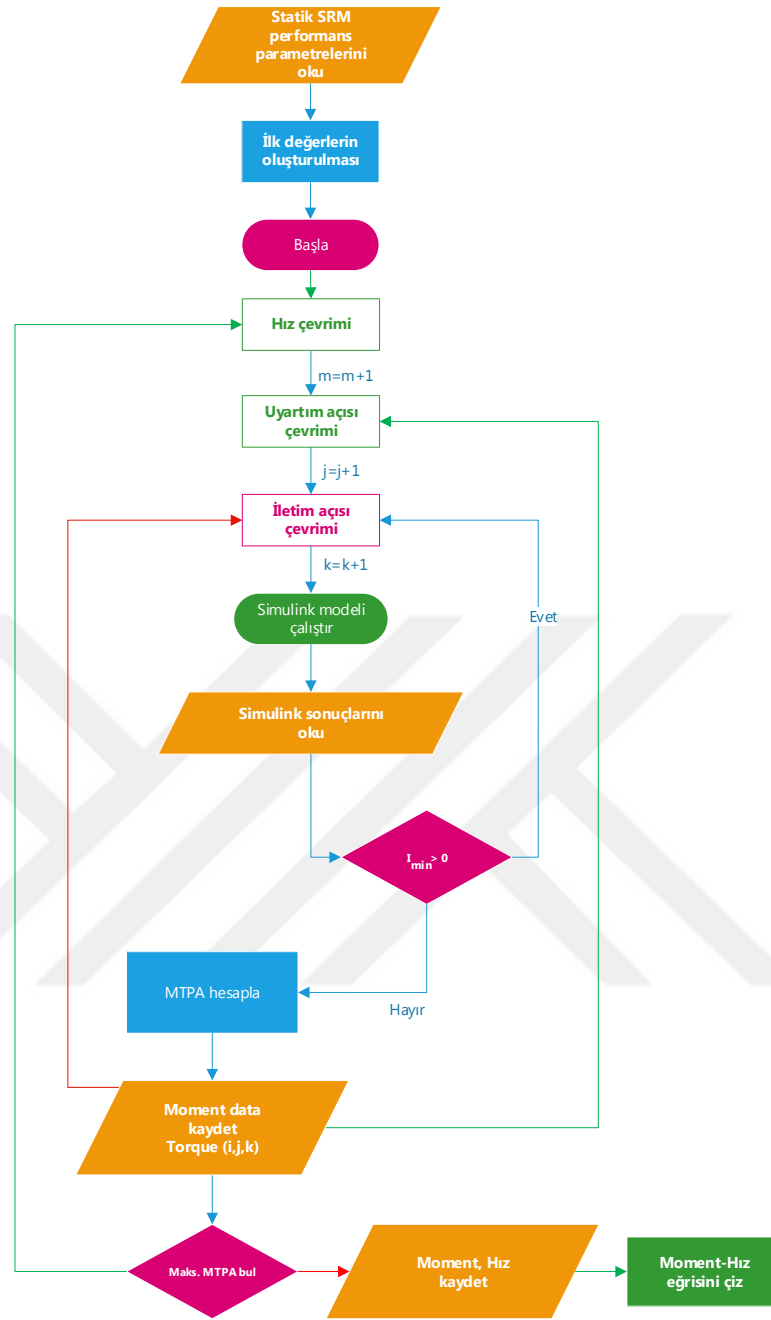
Şekil 2.18 50 bin d/d'da akım başına maksimum ortalama moment için optimizasyon sonucu; $I_{ref}=20A$, $\theta_{on} = 70^\circ$, $\theta_{off} = -10^\circ$

Anahtarlama relüktans motorun moment-hız eğrilerinin elde edilmesi

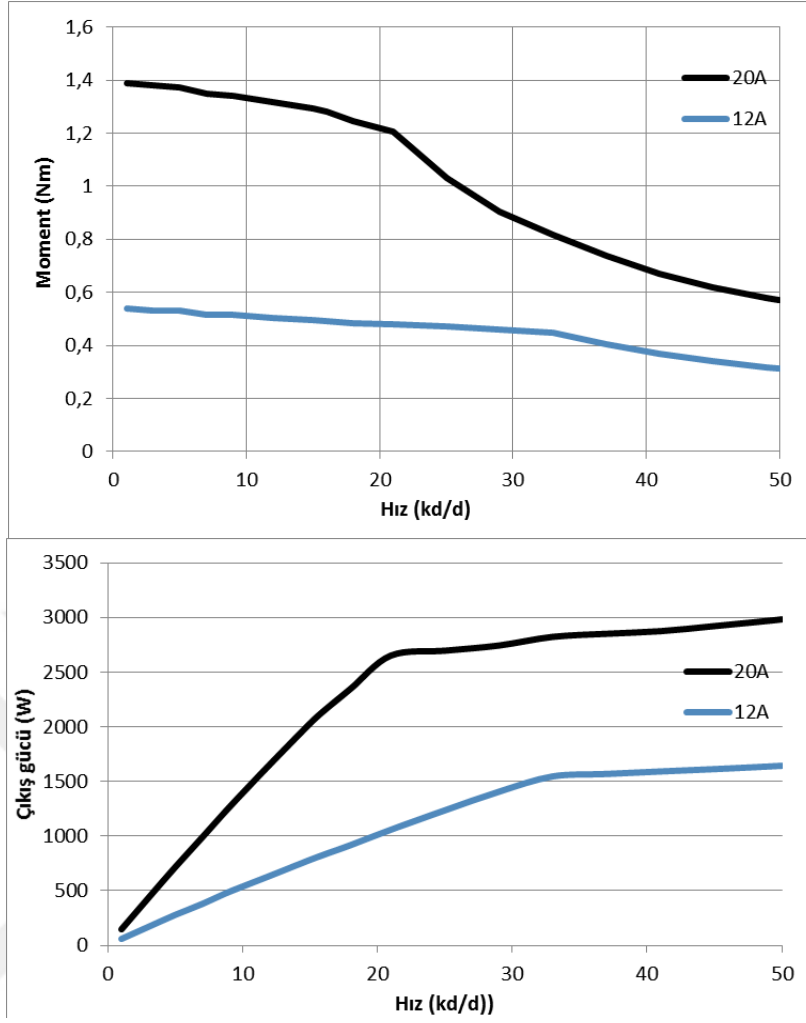
Elektrik motorlarının tasarımı sonrasında elde edilen en önemli performans eğrilerinden biri, makinanın farklı çalışma hızlarında üretebildiği momenti gösteren moment-hız grafiğidir. Bu bölümde, Şekil 2.19’da verilen algoritma şeması oluşturulmuş ve tasarlanan yüksek hızlı anahtarlama relüktans motorunun (YHARM) moment-hız eğrisi elde edilmiştir. Şekil 2.19’dan anlaşıldığı üzere, sabit referans akımda, her çalışma noktası için iletim ve uyarım açıları faz başına maksimum moment hedeflenerek optimize edilmektedir. Moment-hız eğrisi oluşturulurken referans faz akımı değeri, ARM’i sürececek olan inverterin maksimum akım taşıma kapasitesi değerine sabitlendiğinden algoritmanın akış şemasında akım çevrimi bulunmamaktadır.

Algoritmanın akış şeması, uyarım ve iletim açılarının belirlendiği yukarıda bahsedilen algoritmanın akış şemasına oldukça benzemektedir. İlk olarak ARM’in statik sonlu elemanlar analizi yapılmakta ve farklı faz akımı ve rotor pozisyonlarında ARM’in üretebildiği moment ve halkalanan akı değerleri bulunmaktadır. Referans faz akımı değeri inverterin maksimum akım taşıma kapasitesi dikkate alınarak 20A’e sabitlenmiştir. Ardından “hız çevrimi” çalıştırılmaktadır. Her hız değeri için iletim (Toff) ve uyarım (Ton) açıları bir önceki bölümde bahsedildiği gibi optimize edilmektedir. Bu algoritma koşturulurken “sürekli iletim modu” ndan kaçınılmış, ARM’in kesintili iletim modunda çalışması garanti altına alınmıştır. Algoritma sonunda kaydedilen moment ve hız değerleri çizdirilmektedir.

Şekil 2.20’de ARM’in sürekli çalışma akımı olan 12A ve inverterin maksimum taşıma kapasitesine olan 20A akım değerleri için moment-hız ve güç-hız eğrileri 50 bin d/d hız değerine kadar gösterilmiştir. Algoritma çıktıları olan optimum iletim ve uyarım açıları, efektif faz akımı, ortalama moment ve moment dalgalılığı değerleri Çizelge 2.5’de verilmektedir. Farklı hızlardaki faz akımı ve moment dalga şekilleri Şekil 2.21 ila Şekil 2.30 arasında verilmektedir. Akım dalga şekillerinden anlaşılabileceği üzere, rotor hızı arttıkça faz akımlarının histerezis bant içerisindeki regülasyonu bozulmaktadır.



Şekil 2.19 Moment-hız algoritması akış şeması

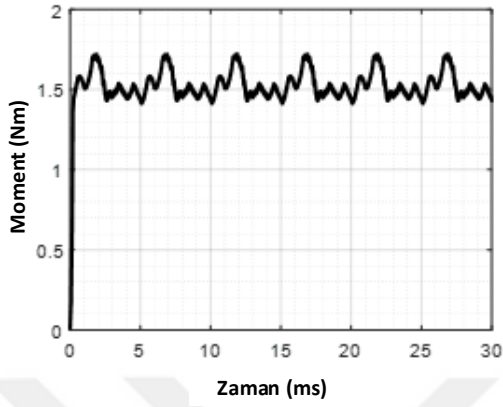


Şekil 2.20 Geliştirilen ARM'in 20A ve 12A referans faz akımları ile uyarılması durumunda oluşturulan moment-hız ve Güç-Hız eğrileri

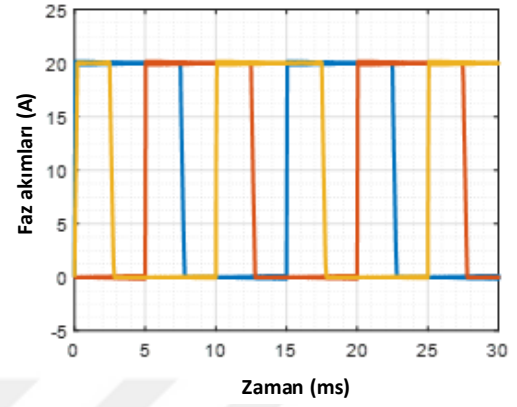
Çizelge 2.5 Moment-hız algoritması çıktıları

Hız (kd/d)	Ort. moment (Nm)	Ref. Akım (A)	İletim açısı (°)	Sönme açısı (°)	Efektif Akım (A _{rms})	Moment dalgalılığı (Nm)
1	1,390	20	0	60	14,19	0,309
3	1,380	20	0	60	14,30	0,42
5	1,371	20	5	50	14,20	0,364
7	1,350	20	5	50	14,31	0,491
9	1,341	20	5	40	13,97	0,403
12	1,317	20	10	35	14,07	0,350
15	1,294	20	10	35	13,94	0,330
16	1,281	20	10	30	13,99	0,357
21	1,207	20	15	20	13,53	0,437
25	1,031	20	15	20	12,68	0,561
29	0,904	20	20	20	12,22	0,631
33	0,818	20	25	15	11,72	0,723
37	0,737	20	25	15	11,27	0,732

41	0,670	20	25	15	10,88	0,759
45	0,621	20	30	15	10,80	0,782
49	0,579	20	35	10	10,60	0,766
50	0,570	20	35	10	10,53	0,771

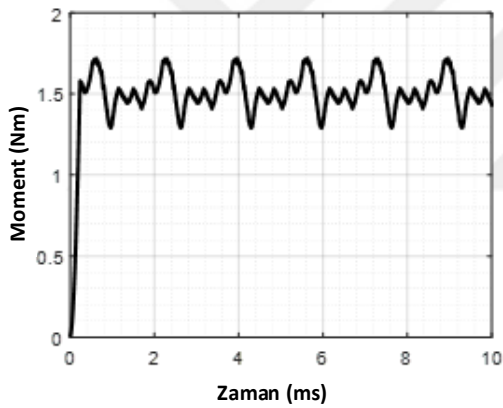


(a)

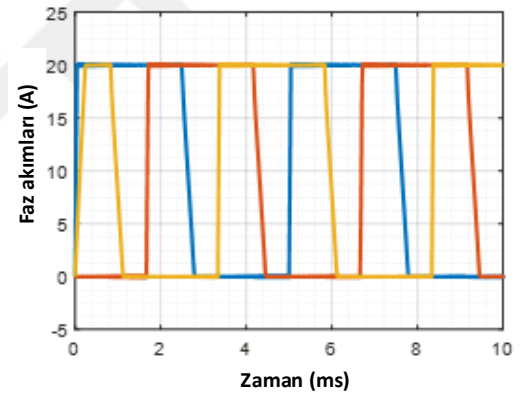


(b)

Şekil 2.21 1000 d/d çalışma hızındaki moment (a) ve faz akımı (b) dalga şekilleri

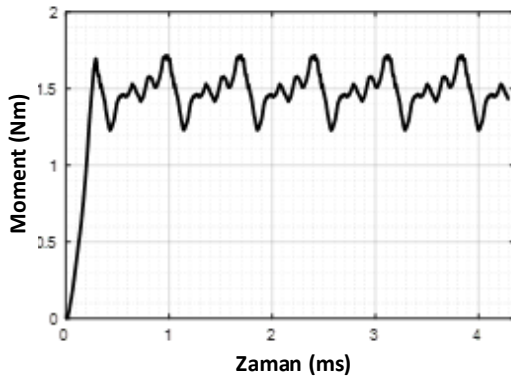


(a)

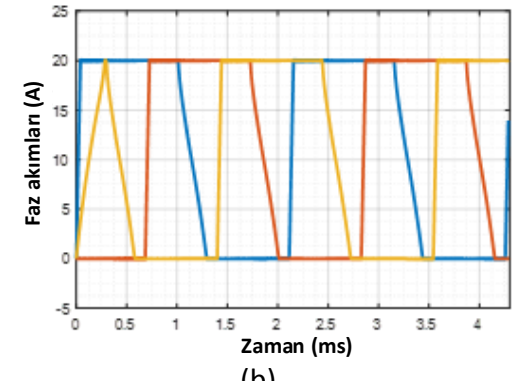


(b)

Şekil 2.22 3000 d/d çalışma hızındaki moment (a) ve faz akımı (b) dalga şekilleri

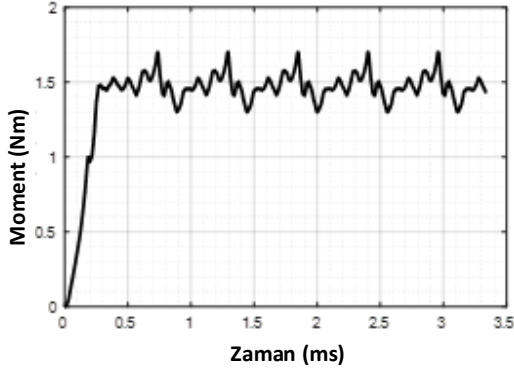


(a)

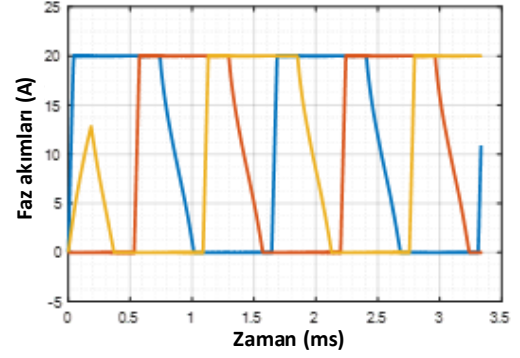


(b)

Şekil 2.23 7000 d/d çalışma hızındaki moment (a) ve faz akımı (b) dalga şekilleri

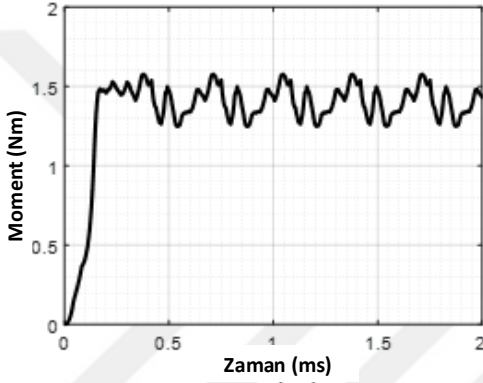


(a)

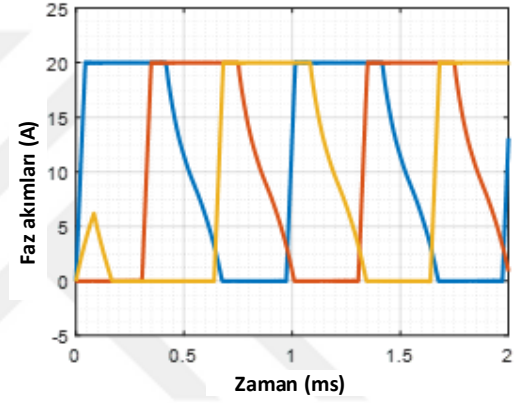


(b)

Şekil 2.24 9000 d/d çalışma hızındaki moment (a) ve faz akımı (b) dalga şekilleri

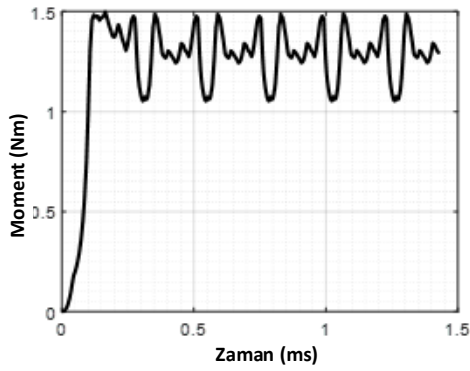


(a)

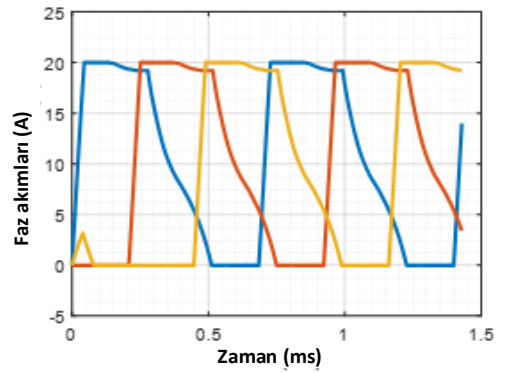


(b)

Şekil 2.25 15 bin d/d çalışma hızındaki moment (a) ve faz akımı (b) dalga şekilleri

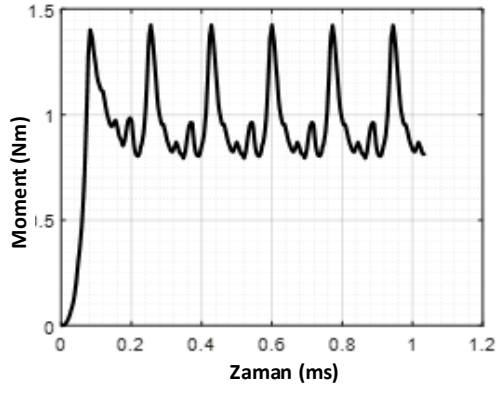


(a)

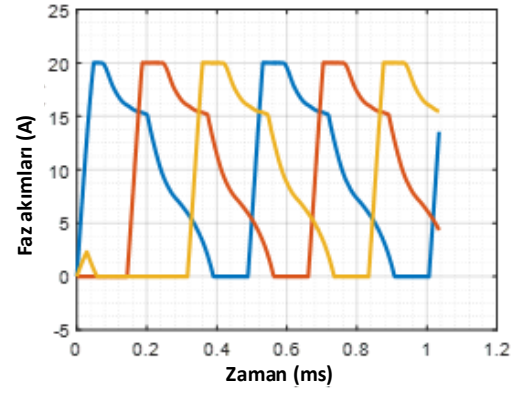


(b)

Şekil 2.26 21 bin d/d çalışma hızındaki moment (a) ve faz akımı (b) dalga şekilleri

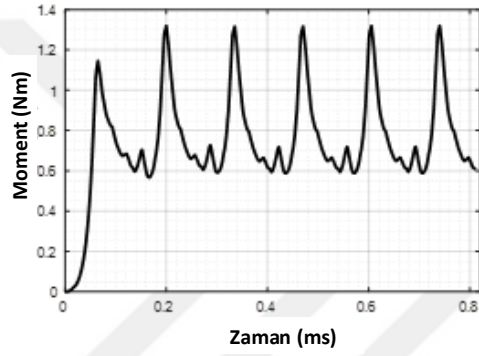


(a)

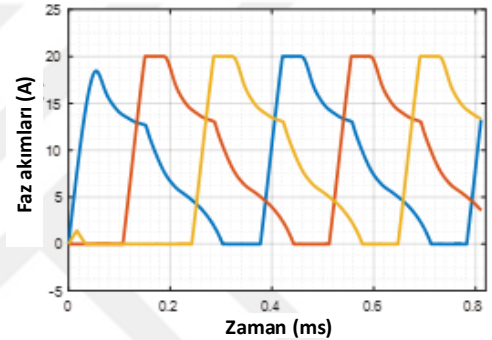


(b)

Şekil 2.27 29 bin d/d çalışma hızındaki moment (a) ve faz akımı (b) dalga şekilleri

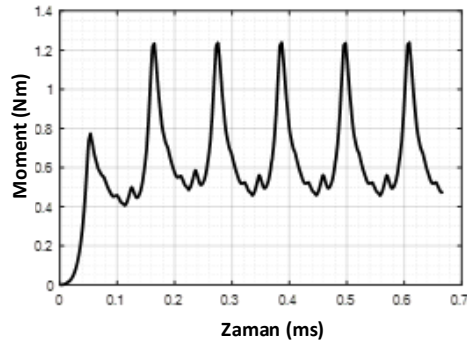


(a)

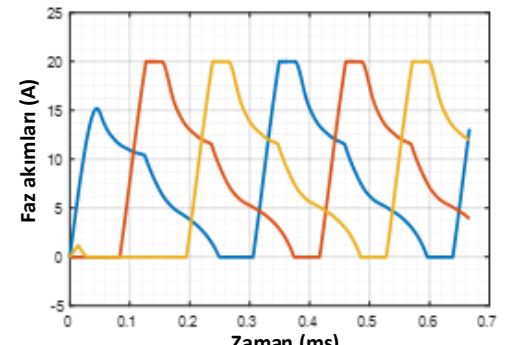


(b)

Şekil 2.28 37 bin d/d çalışma hızındaki moment (a) ve faz akımı (b) dalga şekilleri

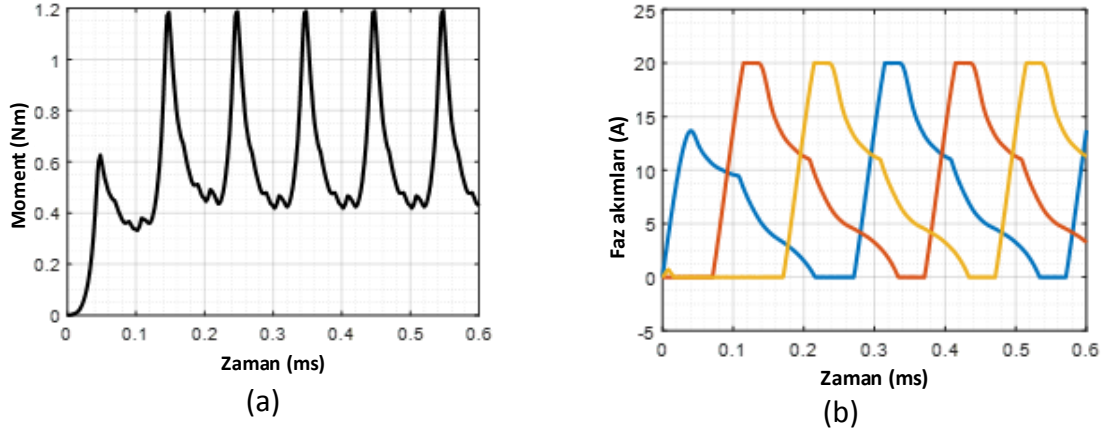


(a)



(b)

Şekil 2.29 45 bin d/d çalışma hızındaki moment (a) ve faz akımı (b) dalga şekilleri



Şekil 2.30 50 bin d/d çalışma hızındaki moment (a) ve faz akımı (b) dalga şekilleri

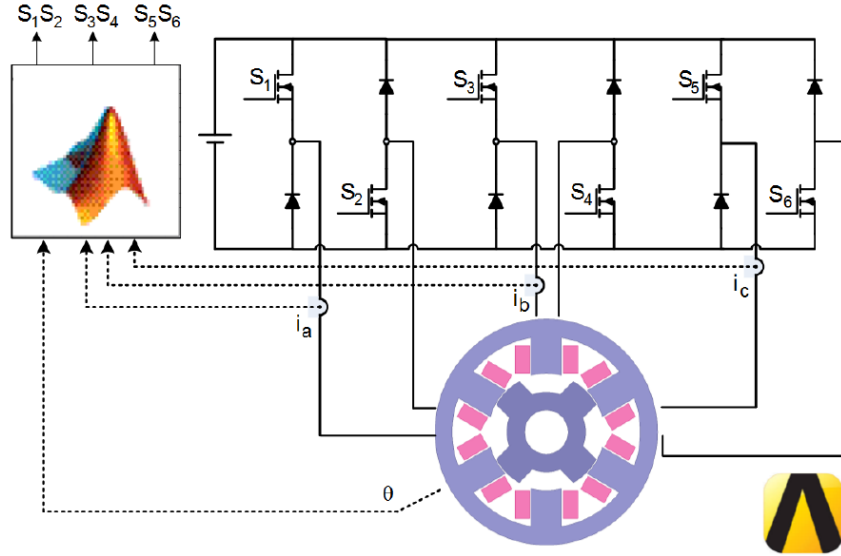
Verim eğrilerinin elde edilmesi

Verim analizi, elektrik makinasının farklı çalışma koşullarındaki (farklı akım ve hız değerlerindeki) elektriksel kayıp değerlerinin çıkarılması ve çıkış gücü ile toplanarak yine çıkış gücüne oranlanması ile bulunmaktadır. Yani,

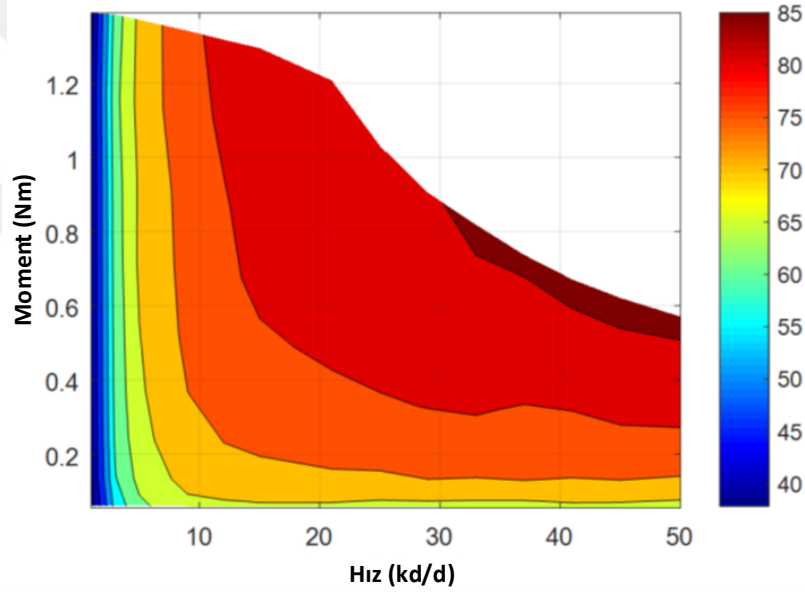
$$\eta_{ARM} = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{giriş}}} = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{çıkış}} + P_{\text{toplam kayıp}}} \quad (2.22)$$

olarak hesaplanmaktadır. Elektrik motorundaki kayıplar “Giriş” bölümünde incelendiği gibi elektriksel ve mekanik kayıplar olarak ayrılmaktadır. Yüksek hızlarda rulman kayıpları ve hava sürtünme kayıpları baskın mekanik kayıplar olarak bilinmektedir. Ancak bu iki kayıp türü tasarımda minimize edilebilmektedir (ARM’in rotor yüzeyinin silindirik tasarlanması [50], [51] ile hava sürtünme kayıplarının, manyetik yataklı rulman kullanılması ile rulman sürtünme kayıplarının minimize edilmesi gibi). Ancak bu çalışma, mekanik kayıpların minimize edilmesine odaklanmadığından, ARM verimi hesaplanırken sadece elektriksel kayıplar dikkate alınmıştır. Elektriksel kayıplar; demir ve bakır kayıpları olarak bilinmektedir. Demir kaybı analizini gerçekleştirebilmek için entegre simulasyon (Coupled simulation) metodu tercih edilmiştir. Bu yöntemde, kontrol algoritması Matlab-Simulink’te, ARM sürücü devresi Ansys-Simplorer’da ve ARM sonlu elemanlar modeli Ansys-Maxwell’de oluşturulmuş ve sonlu elemanlar yöntemi ile demir kayıpları elde edilmiştir (Şekil 2.31). Şekil 2.32’de farklı çalışma koşullarındaki ARM verim değerleri harita üzerinde gösterilmektedir. Şekil 2.33’de verim haritası oluşturulurken kullanılan farklı uyarma akım değerlerindeki moment

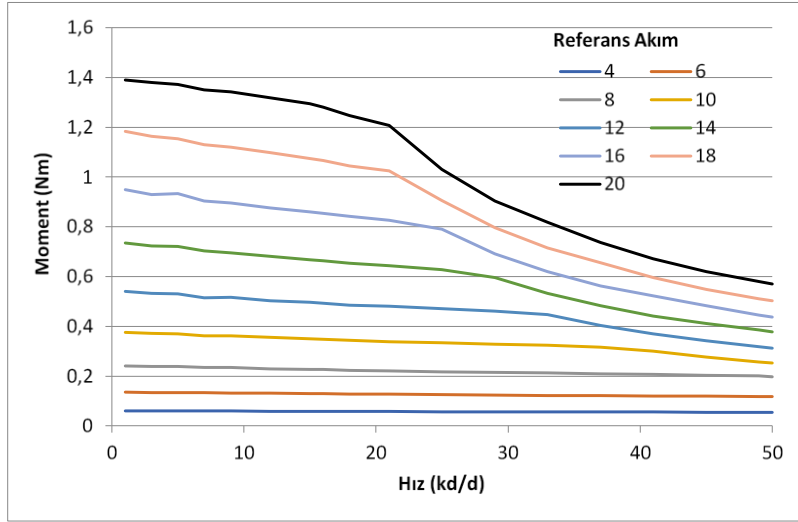
eğrileri hıza bağlı olarak gösterilmektedir. Şekil 2.34’de ise çıkış mekanik gücünün farklı rotor hızı ve uyarma faz akımı değerlerindeki değişimleri gösterilmektedir.



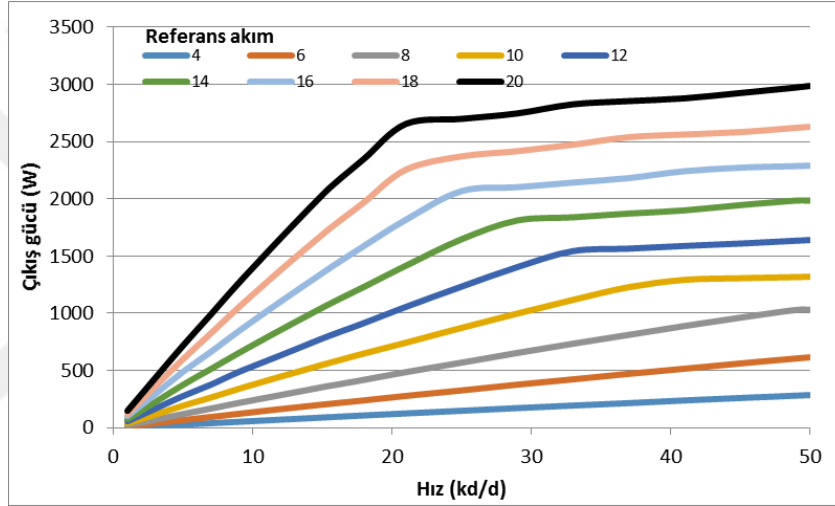
Şekil 2.31 Yüksek hızlı ARM içim entegre simülasyon modeli şematik diyagramı



Şekil 2.32 Geliştirilen yüksek hızlı ARM’in verim haritası



Şekil 2.33 Geliştirilen yüksek hızlı ARM'in farklı uyarma akımlarındaki moment eğrileri



Şekil 2.34 Geliştirilen yüksek hızlı ARM'in farklı uyarma akımlarındaki çıkış gücü eğrileri

Geliştirilen yüksek hızlı ARM için yapılan statik ve dinamik performans analiz sonuçları tasarımda hedeflenen 1.8kW çıkış gücünü, ARM'nin 50 bin d/d rotor hızında üretebildiğini göstermektedir. Ayrıca oluşturulan verim haritasında, tasarlanan ARM'nin nominal çalışma şartlarında (1.8 kW ve 50 bin d/d) veriminin maksimum değere çıktığı anlaşılmaktadır. Sonuç olarak, tasarımda elektriksel ya da elektromanyetik olarak tasarımı, analizi farklı benzetim araçları kullanılarak detaylıca incelenmiştir.

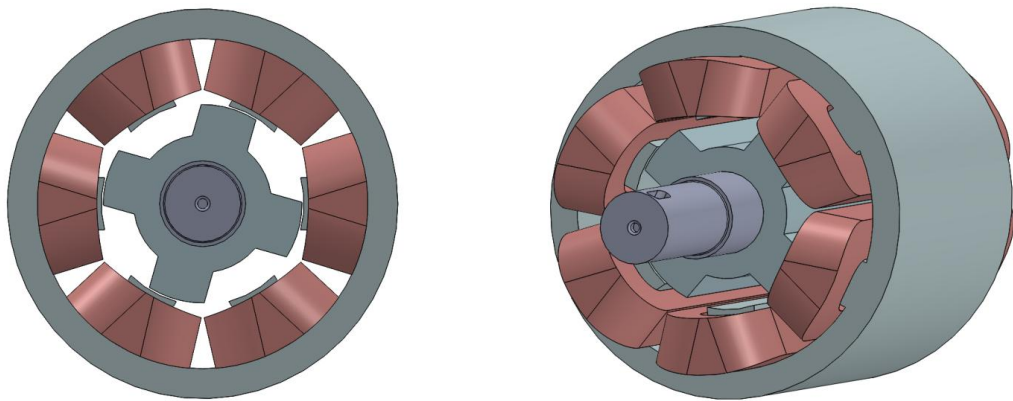
2.2.2 Mekanik analiz

Yüksek hızlı elektrik makinaları, yüksek açısal hızın beraberinde getirdiği potansiyel sorunlar nedeniyle mekanik-yapısal açıdan irdelenmelidir. Rotor hızının aşırı değerlere

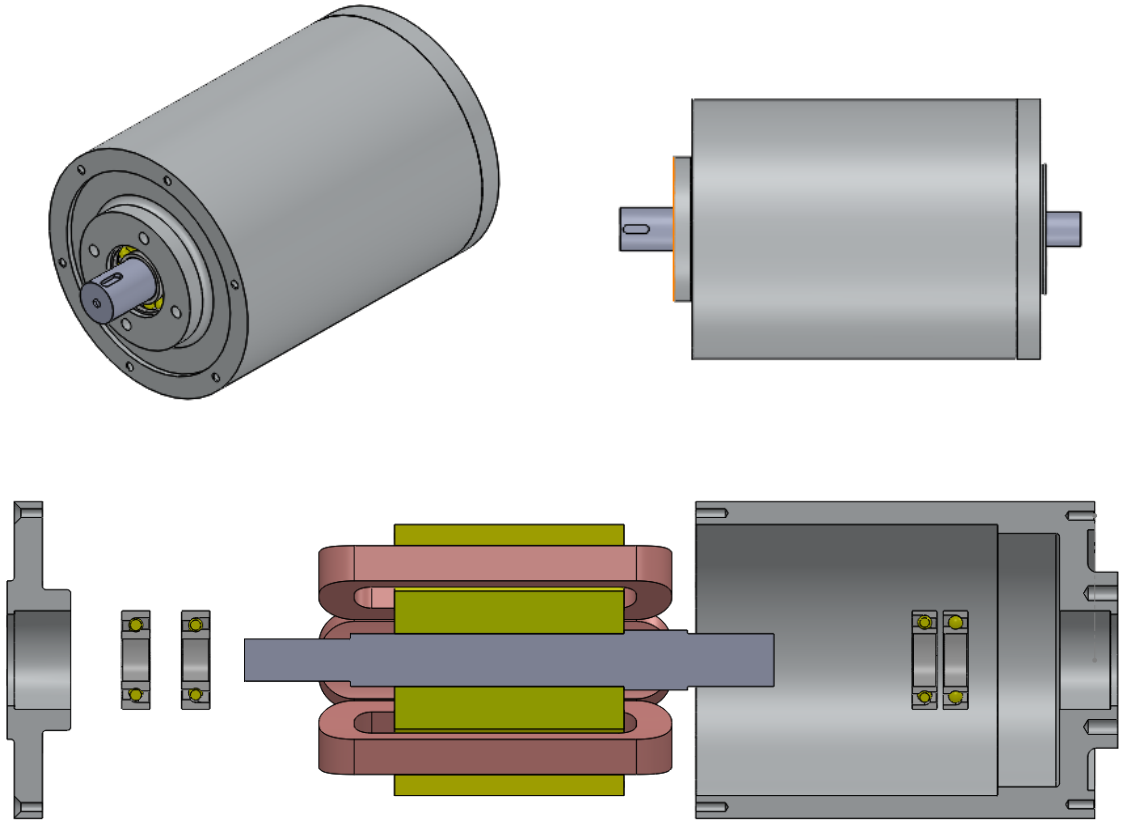
ulaşması nedeniyle hareketli parçalar, eşitlik (1.4)'den anlaşıldığı üzere rotor çizgisel hızının karesiyle artan merkezkaç (santrifüj) kuvvetine maruz kalmaktadır. Buna ek olarak, YHEM'lerde elektriksel temel uyartım frekansları geleneksel elektrik makinalarına göre yüksektir. Temel uyartım frekansları ve katları şeklinde oluşan harmonik bileşenleri elektrik motorunun doğal titreşim frekansları ile örtüşebilmektedir. Bu durumda, elektrik makinası üzerinde mekanik rezonans oluşmakta ve yüksek titreşimler açığa çıkabilmektedir. Ayrıca elektrik makinasının çalışma hız aralığı geniş olduğundan, motorun elektriksel uyartımı sonucu oluşan kuvvetlerin makinanın doğal titreşim frekansları ile örtüşme ihtimali de YHEM'lerde artmaktadır. Titreşimlerin oluştuğu hız değerleri literatürde "kritik hızlar" olarak adlandırılmaktadır. Araştırmacı Castano ve Pillay tarafından yapılan çalışmalarda [52], [53] gövdenin elektrik makinası üzerindeki titreşim etkileri incelenmiş ve gövde yapısının makinanın titreşim davranışı üzerinde etkili olduğu anlaşılmıştır. Dolayısıyla ilk yapılması gereken adım, ARM'in gövdesinin tasarımı olmalıdır.

2.2.2.1 Gövde tasarımı

Elektromanyetik tasarım sonucu oluşan stator, rotor ve sargıların 3 boyutlu şekilleri Şekil 2.35'de gösterilmektedir. Geometrik ön tasarımı yapılan gövde ise Şekil 2.36'da verilmiştir. Soğutma tekniği olarak doğal soğutma tercih edilmiştir. Elektrik motorunun termal analiz sonuçları ilerleyen bölümlerde detaylı olarak anlatılacaktır. Yüksek hızlarda oluşabilecek radyal ve eksenel kuvvetlerin etkisini azaltabilmek amacıyla 2 önde ve 2 arkada olmak üzere toplam 4 adet rulman tercih edilmiştir.



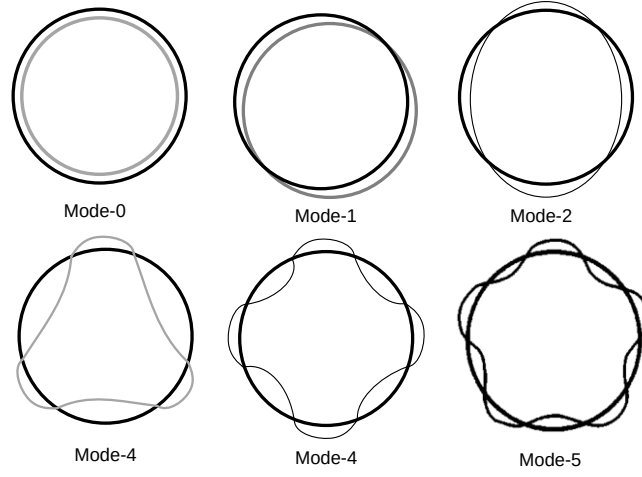
Şekil 2.35 Stator, rotor ve faz sargılarının 3 boyutlu kesitleri



Şekil 2.36 Gövdenin 3 boyutlu kesitleri

2.2.2.2 Modal analiz

Modal analiz, geliştirilen yüksek hızlı ARM'in doğal titreşim frekanslarını belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Her cisim, kendine özgü doğal titreşim frekanslarına sahiptir. Silindirik yapıdaki bir elektrik motorunda oluşabilecek tipik çevresel titreşim mod şekilleri Şekil 2.37'de verilmiştir. Bu titreşim modlarının haricinde boylamsal titreşim modları da mevcuttur ancak boylamsal titreşim modları yüksek güçlü ve eksenel uzunluğu fazla elektrik makinalarında (Hidroelektrik santrallerde kullanılan senkron generatör, turbogeneratörler gibi) etkisini göstermekte, düşük güçlü elektrik makinalarında genellikle ihmal edilmektedir. Bu tez çalışmasında da yalnızca çevresel titreşim modları incelenmiştir. Titreşim ve akustik gürültü açısından Şekil 2.37'de verilen mod şekillerinden, Mod-1, Mod-2 ve Mod-4 genellikle küçük güçlü elektrik makinalarında en önemli ve baskın titreşim formlarıdır.

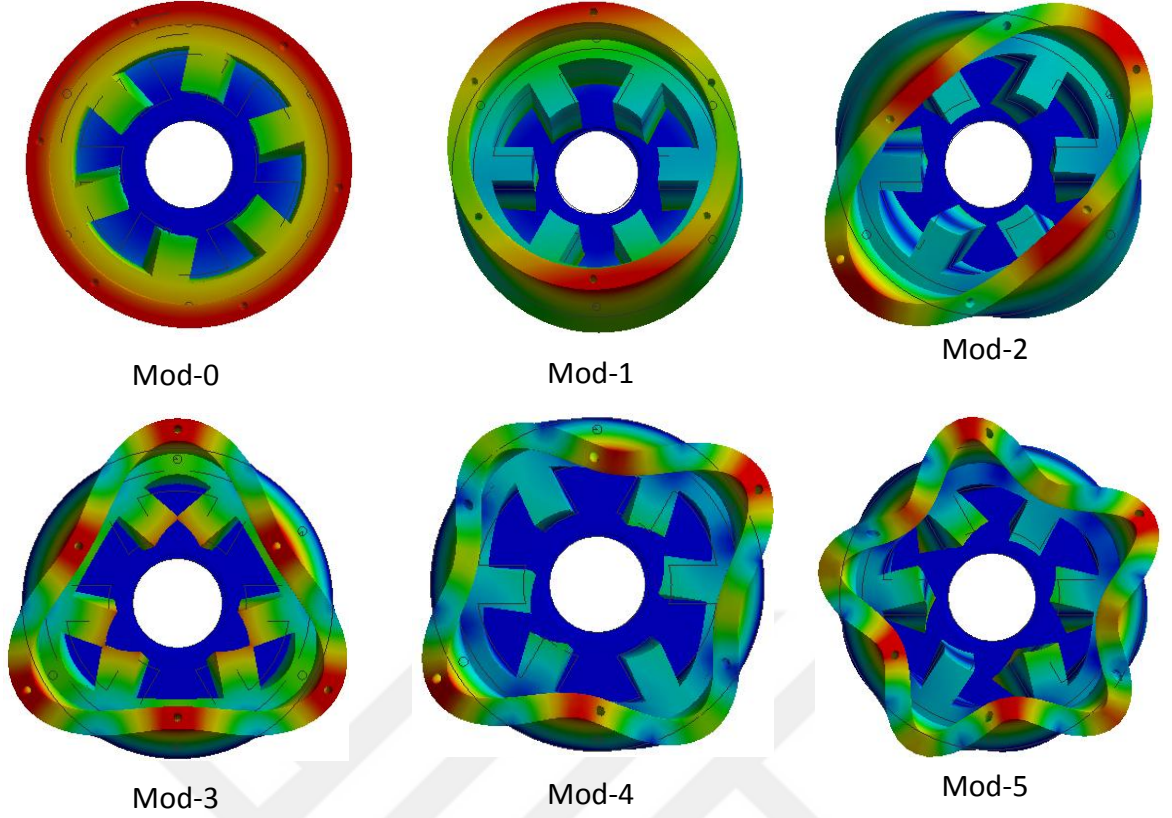


Şekil 2.37 Elektrik makinalarında oluşabilecek tipik çevresel titreşim modları

Mod analizi Ansys-Workbench sonlu elemanlar paket yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uygulamada, stator genellikle gövde içerisine sıkıgeçme (pressfit) olarak yerleştirildiğinden, modal analizde stator ve gövde beraberce analiz edilmelidir. Aksi takdirde çıkan sonuçlar yanıltıcı olacaktır. Çizelge 2.6’da mod frekans analizi sonuçları görülmektedir. Şekil 2.38’de ise Çizelge 2.6’da verilen ilgili mod frekanslarında stator ve gövdenin geometrik değişimi görülmektedir. Çizelge 2.6’dan görüldüğü üzere, en düşük mod frekansı 5.678 kHz’de Mod-0 formuyla oluşmaktadır. Ancak, nominal hız değeri olan 50 bin d/d’da elektriksel frekans 3.3 kHz’dir. Yani, elektriksel temel frekans herhangi bir mod frekansı ile kesişmemektedir. Sonuç olarak, elektriksel temel frekans doğal titreşim frekanslarını tetiklemeyecek ve elektrik makinasında rezonans oluşturmayacaktır. Ancak ARM’in faz sargılarına uygulanan akım dalga şekli içerisinde birçok harmonik bileşen içermektedir. Bu durumda, harmonik bileşenlerin elektrik makinasında kısmi rezonans ve dolayısıyla titreşim-akustik gürültü oluşturabilme ihtimali vardır.

Çizelge 2.6 Geliştirilen YH-ARM’in mod frekans değerleri

Mod	Frekans (kHz)
Mod-0	5.678
Mod-1	8.350
Mod-2	8.524
Mod-3	9.507
Mod-4	16.306
Mod-5	23.485



Şekil 2.38 Geliştirilen YH-ARM'in mod şekilleri

2.2.2.3 Harmonik frekans analizi

Harmonik frekans analizi, farklı titreşim kaynaklarının birlikte analiz edilerek, yapı üzerindeki etkisini incelemektir. Dolayısıyla, bu metod ile çeşitli harmonikler içeren ARM faz akımlarının neden olduğu titreşimler beraberce analiz edilebilmektedir. Çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar [54]–[56] incelendiğinde, elektrik makinalarındaki potansiyel gürültü kaynakları elektriksel-manyetik, mekanik ve/veya aerodinamik (vantilasyon) kaynaklı olabilmektedir. Mekanik gürültüye dişli kutusu, rulman ya da millerin yanlış merkezlenmesi-eksantriklik neden olabilmektedir. Aerodinamik gürültü ise yüksek hızlarda hava sürtünmesinden kaynaklanmaktadır. Diğer yandan, elektriksel-manyetik kaynaklı gürültü ise elektrik makinasının elektriksel uyarıtımı sonrasında oluşan radyal kuvvetlerden oluşmaktadır [57]–[59].

Manyetik vektör potansiyeli ile manyetik alan yoğunluğu vektörleri,

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (2.23)$$

ile ilişkilendirilmektedir. Manyetik alan yoğunluğu vektörü aynı zamanda

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (2.24)$$

Akım yoğunluğu ile manyetik alan şiddeti arasındaki ilişki ise,

$$\vec{J}_o = \nabla \times \vec{H} = \nabla \times \left[\frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \vec{A}) \right] \quad (2.25)$$

Buradan manyetik kuvvet vektörü,

$$\vec{f}_{mag} = \vec{J}_o \times \vec{B} \quad (2.26)$$

Eşitlik (2.23), (2.25) ve (2.26) kullanılarak,

$$\begin{aligned} \vec{f}_{mag} &= \vec{J}_o \times \vec{B} = \nabla \times \left[\frac{1}{\mu_0} \vec{B} \right] \times \vec{B} \\ &= \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B} \\ &= \frac{1}{\mu_0} \left[(\nabla \cdot \vec{B}) \vec{B} - \frac{1}{2} \nabla B^2 \right] \end{aligned} \quad (2.27)$$

manyetik kuvvet vektörü bulunmaktadır. Eşitlik (2.27)'de bulunan manyetik kuvvet bir hacim üzerine uygulandığında,

$$\begin{aligned} F_{mag} &= \frac{1}{\mu_0} \iiint \left[(\nabla \cdot \vec{B}) \vec{B} - \frac{1}{2} \nabla B^2 \right] dV \\ &= \iint \frac{1}{\mu_0} \left[(\vec{B} \cdot \vec{n}) \vec{B} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} \nabla B^2 \cdot \vec{n} \right] dS \end{aligned} \quad (2.28)$$

bulunmaktadır. Maxwell stres tensörü ise,

$$T = \frac{1}{\mu_0} \left[(\vec{B} \cdot \vec{n}) \vec{B} - \frac{1}{2} \nabla B^2 \cdot \vec{n} \right] \quad (2.29)$$

ile verilmektedir. Manyetik kuvvet maxwell stres tensörünün yüzeysel integraline eşit olduğuna göre,

$$F_{mag} = \iint T dS \quad (2.30)$$

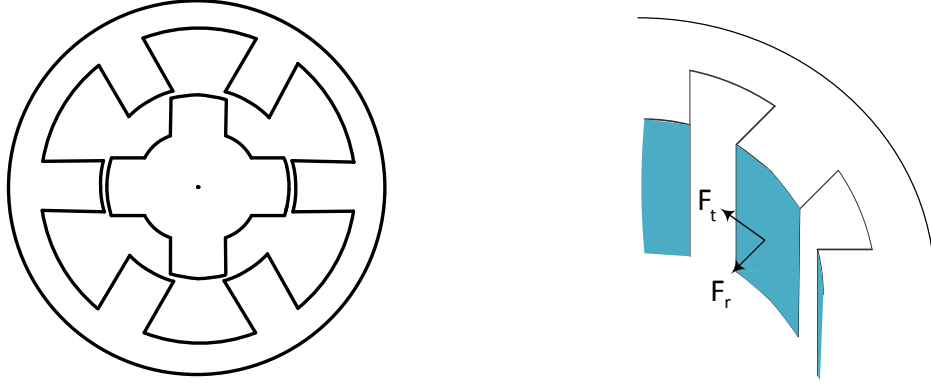
Eşitlik (2.29) ve (2.30)'dan anlaşıldığı üzere maxwell stres tensörü ve manyetik kuvvet aslında teğetsel ve normal olmak üzere iki bileşene sahiptir,

$$\begin{aligned} F_t &= \iint \frac{1}{\mu_0} (\vec{B} \cdot \hat{n}) \vec{B} dS \\ &= \frac{1}{\mu_0} \iint \vec{B}_r \vec{B}_t dS \end{aligned} \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned} F_r &= \iint \frac{1}{2\mu_0} \nabla B^2 \hat{n} \\ &= \frac{1}{2\mu_0} \iint (B_r^2 - B_t^2) dS \end{aligned} \quad (2.32)$$

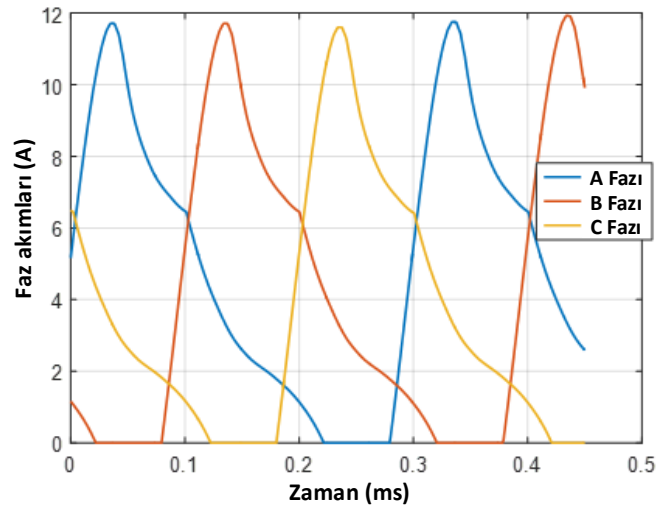
Eşitlik (2.31) ve (2.32), ortamdaki elektromanyetik alandan dolayı varolan ve bir cisim üzerinde endüklenen iki kuvvetin matematiksel ifadeleridir. Eşitlik (2.31) teğetsel kuvveti temsil etmekte olup elektrik motorundaki momentin oluşmasını sağlayan kuvvettir. Diğer yandan eşitlik (2.32)'de verilen radyel kuvvet ise stator yüzeyinde oluşan yüzeye dik kuvveti temsil etmektedir. Bu kuvvet ise elektrik makinasındaki radyel yönde geometrik şekil değişikliklerine (Şekil 2.37'de verilen temel çevresel mod şekilleri) neden olmaktadır. Dolayısıyla radyel kuvvet bileşeni elektrik makinalarında elektromanyetik kaynaklı titreşime ve akustik gürültüye neden olmaktadır.

Burada B_r ve B_t hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun sırasıyla radyel ve teğetsel bileşenleridir. Yukarıda formülize edilen radyel ve teğetsel kuvvet bileşenleri Şekil 2.39'da görüldüğü gibi her bir stator kutup yüzeyi üzerinde noktasal olarak hesaplanır ve ardından yüzey integrali alınarak bir stator kutbu üzerindeki toplam kuvvet bulunur.

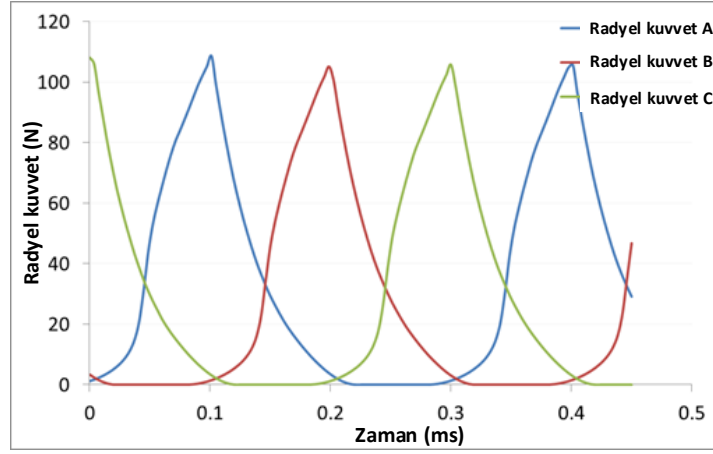


Şekil 2.39 Tipik 6/4 ARM geometrisi ve stator kutup yüzeyi üzerinde oluşan radyel ve teğetsel kuvvetler

Şimdiye kadar stator kutup yüzeyleri üzerinde endüklenen manyetik kuvvetler teorik olarak elde edilmiş oldu. Şimdi ise, yukarıda elde edilen formüller kullanılarak, geliştirilen ARM'in stator kutupları üzerinde oluşan kuvvetler hesaplanacaktır. Şekil 2.40'da nominal çalışma şartlarında uyarılan ARM'in stator kutup yüzeyleri üzerinde oluşan radyel kuvvetler gösterilmektedir. Stator kutup yüzeyleri üzerinde oluşan bu radyel manyetik kuvvetin kaynağı aslında fiziksel olarak Şekil 2.41'de gösterilen stator ve rotor yüzeylerine dik konumda geçen akı çizgileridir. Bu nedenle stator ve rotor kutuplarının tam olarak örtüştüğü rotor pozisyonunda stator kutbu üzerinde endüklenen radyel kuvvet maksimum değerine ulaşmaktadır.

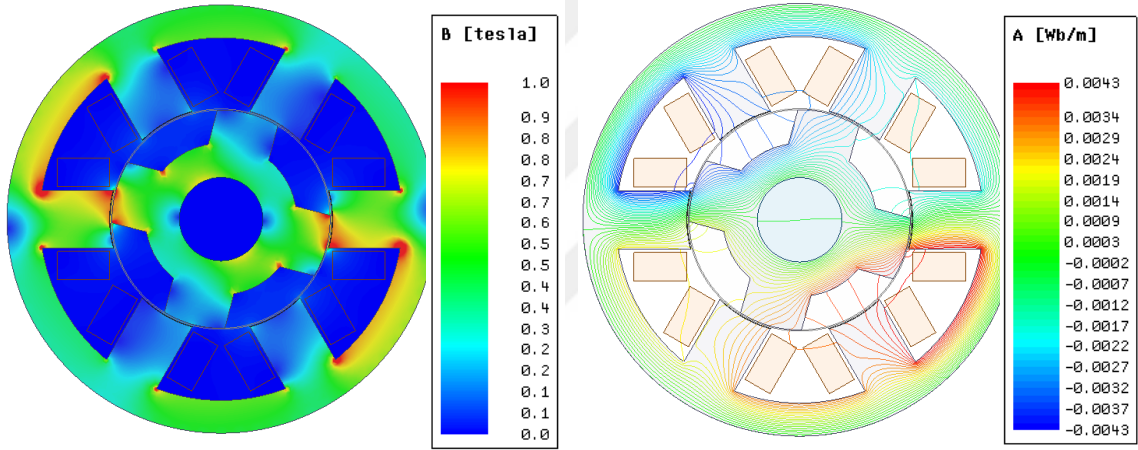


(a)



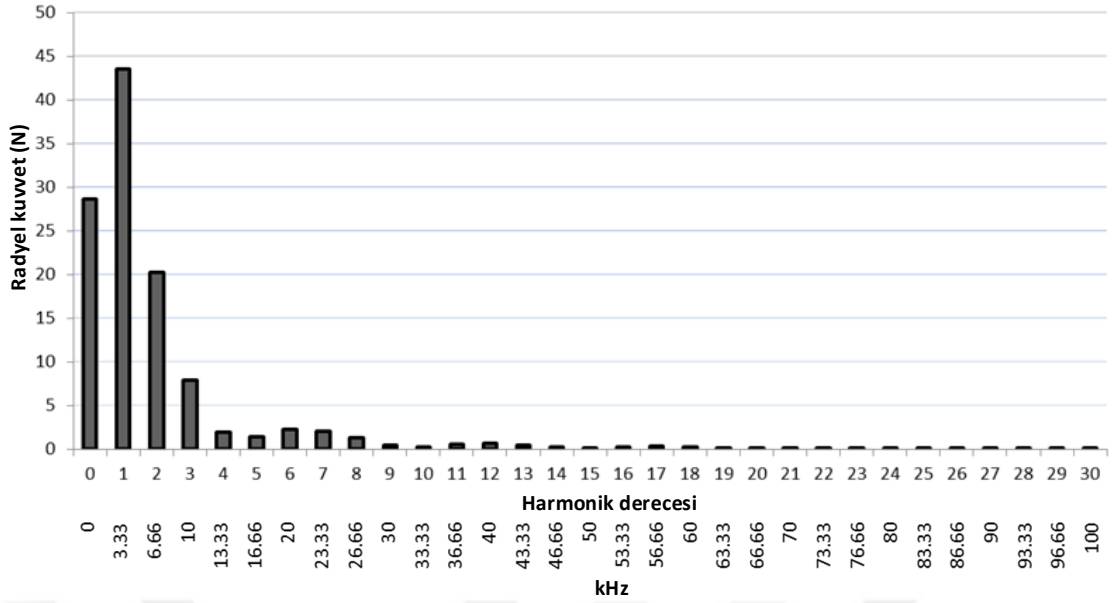
(b)

Şekil 2.40 Geliştirilen ARM'in nominal çalışma şartlarında (50 bin d/d ve 1.8kW) uyarılması (a) sonucu hesaplanan stator kutuplarındaki radyel kuvvetler(b)



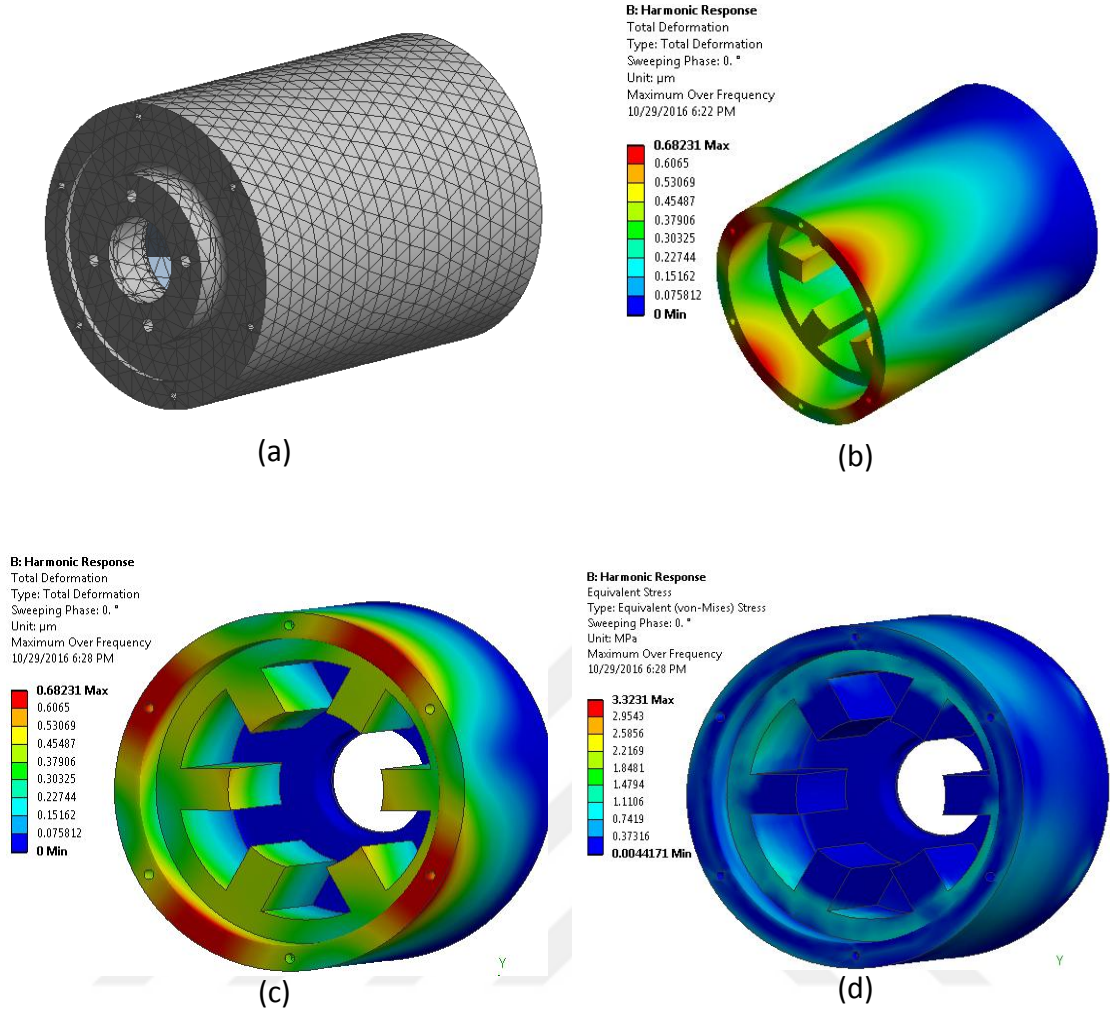
Şekil 2.41 Geliştirilen ARM'in nominal çalışma şartlarında (50 bin d/d ve 1.8kW) uyarılması sonucu oluşan manyetik akı yoğunluğu ve halkalanan akı çizgileri

Şekil 2.40'da verilen radyel kuvvetlerin harmonik bileşenlerini incelemek amacıyla kuvvet dalga şekli fast fourier transform (FFT) ile bileşenlerine ayrılmış ve sonuçları Şekil 2.42'de verilmiştir. Beklendiği üzere en yüksek genliğe sahip radyel kuvvet bileşeni temel elektriksel uyarım frekansı olan 3.33 kHz 'de oluşmaktadır. Frekansa sahip olmayan DC bileşen temel titreşim modlarından mod-0'ı uyarmaktadır. Diğer harmonik bileşenler ise bir veya birden çok sayıda doğal titreşim modlarını uyarmaktadır. Bu uyarılmanın neticesinde kısmi rezonanslar stator ve gövde yapısı üzerinde oluşmakta ve neticede titreşim ve akustik gürültü oluşmaktadır.



Şekil 2.42 Geliştirilen ARM'in nominal çalışma şartlarında (50 bin d/d ve 1.8kW) uyartılması sonucu hesaplanan stator kutuplarındaki radyel kuvvetlerin FFT harmonik açılımı

Yukarıda hesaplanan ve sonuçları verilen radyel kuvvet harmonik bileşenlerinin stator ve gövde üzerine olan etkisini analitik olarak incelemek, üç faz tarafından farklı zamanlarda oluşturulan kuvvetlerin toplamı dikkate alınması gerekmekte ve ayrıca stator ve gövde geometrisi de analitik denklemlerde hesaba katılmalıdır. Bu işlem birçok nonlinearite içermekte ve oldukça zorlu denklemlerin çözümünü gerektirmektedir. Dolayısıyla bu aşamada Ansys-Mechanics sonlu elemanlar paket programından faydalanılmıştır. Sator ve gövde üzerinde oluşabilecek maksimum deformasyon değeri $0.68 \mu\text{m}$ ve maksimum eşdeğer stres ise 3.3 Mpa olarak Şekil 2.43'de görülmektedir. Statorda kullanılan laminasyon malzemesinin (HiperCo50) akma dayanım (yield strength) değerinin 365 Mpa , gövde malzemesi olarak kullanılan Alüminyum 6061'in akma dayanımı değerinin ise 276 MPa olduğu değerlendirilirse, stator ve gövde yapısının mekanik olarak güvenli bölgede kaldığı rahatlıkla söylenebilir.

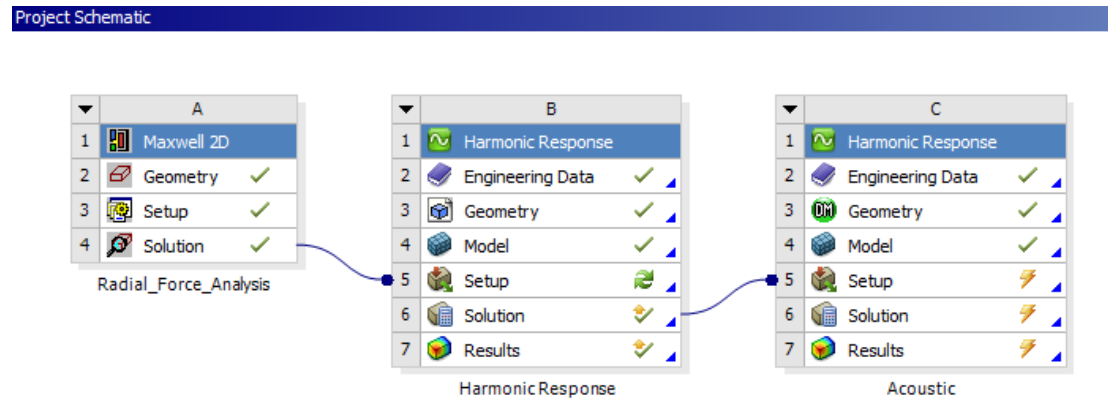


Şekil 2.43 Geliştirilen ARM'in nominal çalışma şartlarında (50 bin d/d ve 1.8kW) harmonik frekans analiz sonuçları, stator ve gövde üzerinde (a) sonlu parçacık haritası, (b-c) maksimum deformasyon ve (d) maksimum eşdeğer stres.

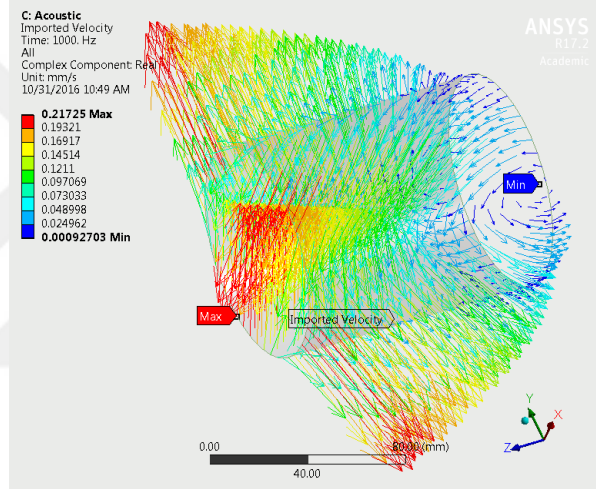
2.2.2.4 Akustik gürültü analizi

Anahtarlamalı relüktans makinalarının diğer elektrik makinalarına göre barındırdığı en büyük dezavantaj ARM'in yüksek titreşim ve akustik gürültü seviyesidir. Bu nedenle, tasarımı doğrulamanın diğer gereksinimlerinden biri makinanın gürültü seviyesinin belirlenmesidir. Bu hedef doğrultusunda, Ansys-Acoustics eklentisi harmonik frekans analizi benzetim çalışmasına entegre edilerek tasarlanan ARM'in gürültü seviyesi tahmin edilmiştir. Şekil 2.44'de akustik gürültü analizine ait benzetim akış şeması görülmektedir. 2 boyutlu elektromanyetik analizi gerçekleştirilen ARM'in radyel kuvvet değerleri harmonik frekans analizine giriş olarak tanımlanmaktadır. Radyel kuvvetler

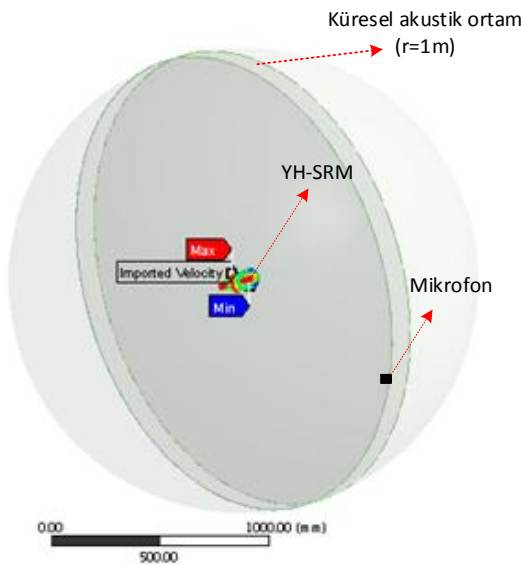
neticesinde oluşan deformasyonun hızı (Şekil 2.45) ise akustik gürültü analizine girmekte ve deformasyon neticesinde akustik gürültü oluşmaktadır.



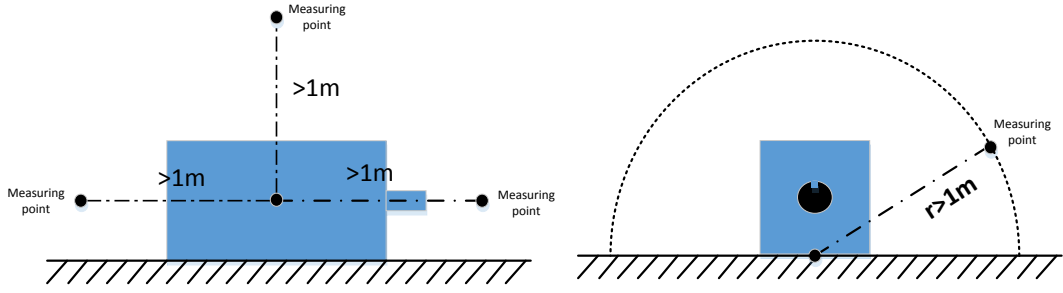
Şekil 2.44 Akustik gürültü analizi akış şeması



Şekil 2.45 ARM Gövdesindeki deformasyon hızı



Şekil 2.46 Akustik gürültü ölçüm ortamı



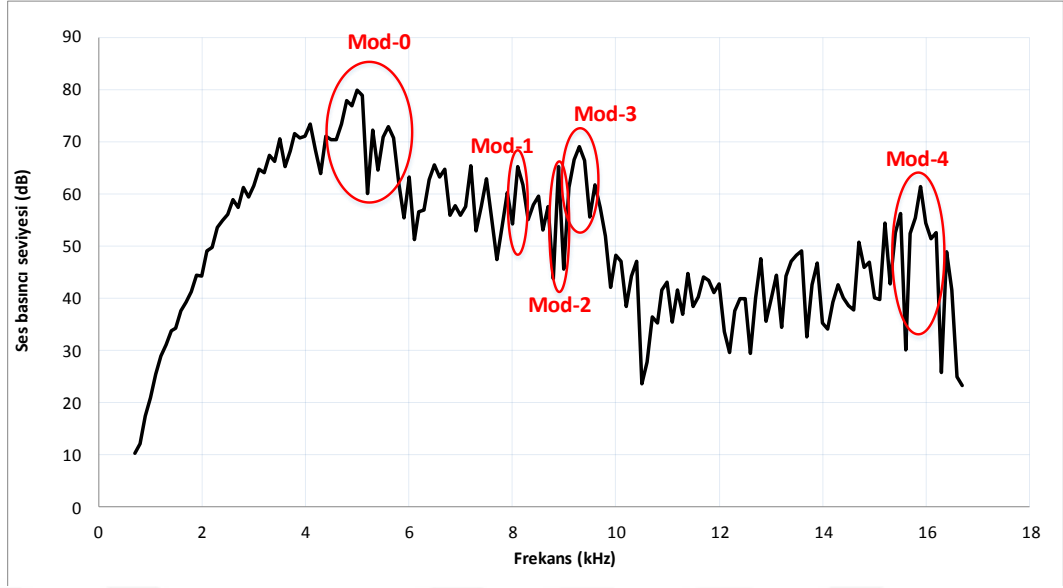
Şekil 2.47 ISO-3744 standardına göre akustik gürültü ölçümü

ISO-3744 standardında, elektrik makinasının gürültüsü ölçülürken 3 ayrı ölçüm yüzeyi tavsiye edilmektedir; Dikdörtgen paralelyüzlü yüzey, konformal yüzey ve en çok tercih edilen yarımküre yüzey[60]. Yarımküre yüzeyi kullanılarak yapılan ölçüm metodunun detayları “IEEE Test Procedure for Airborne Sound Measurements on Rotating Electric Machinery” dokümanında paylaşılmıştır. Bu dokümana göre, elektrik makinası üzerinde yarıçapı 1 metre olan daire üzerinde Şekil 2.47’de gösterildiği gibi üç ayrı noktadan ölçüm yapılmaktadır.

Akustik gürültü seviyelerinin daha kolay anlaşılabilmesi amacıyla, günlük hayatta sıkça karşılaşılan gürültü seviyeleri örnekler ile Çizelge 2.7’de verilmektedir. Geliştirilen ARM’in frekans domeninde akustik gürültü seviyesi Şekil 2.48’de verilmektedir. Grafik üzerinde aynı zamanda mod frekansları ve bu mod frekanslarına karşılık gelen gürültü seviyeleri işaretlenmiştir. Sonuç olarak akustik gürültünün özellikle ARM’in doğal titreşim frekanslarında arttığı gözlemlenmiştir. Ortalama bir insan kulağının duyabileceği ses frekans aralığı 20 Hz ila 20 kHz arasındadır. Dolayısıyla mod-5’in neden olduğu 23.48 kHz’lik gürültü seviyesinin akustik gürültüye etkisi olmayacaktır. Sonuçlardan anlaşılacağı üzere, mod-0 ARM’in elektriksel uyarımı esnasında en fazla akustik gürültüye sebep olan titreşim modudur. Bunun nedeni şüphesiz, Şekil 2.42’de verilen düşük frekanslardaki harmonik radyel kuvvet bileşenlerinin genlik değerlerinin büyük olmasıdır.

Çizelge 2.7 Günlük hayatta karşılaştığımız bazı akustik gürültü seviyeleri.

Gürültü Kaynağı	Desibel seviyesi	Desibel etkisi
Nefes almak	10	Zorla duyulan
Fısıltı, hışırdayan yapraklar	20	
Sessiz kırsal alanlar	30	70 dB'in 16'da 1'i . çok sessiz.
Kütüphane, kuş sesleri (44 dB), kent ortamı sesinin en düşük limiti	40	70 dB'in 8'de 1'i.
Sessiz mahalle, evde sohbet, 100 feet uzaklıktaki trafo sesi	50	70 dB'in 4'te 1'i.
Ofiste veya restorantta sohbet, 100 feet uzaklıktaki havalandırma ünitesi sesi	60	70 dB'in yarısı. Orta sessizlikte.
100 km/sa hızla giden araç (77 dB), oturma odasında muzik (76 dB), radyo veya TV, elektrikli süpürge (70 dB)	70	
Çöp öğütücü (80 dB), bulaşık makinası, ortalama fabrika sesi, 15 metre uzaklıktan yük treni sesi, 20 feet uzaklıktan araç yıkama sesi (89 dB), 1000 feet yükseklikteki pervaneli uçak (88 dB), 50 feet uzaklıktan geçen ve hızı 65 km/sa olan dizel kamyon (83 dB), Blender (88 dB), Freze makinası (85 dB)	80	70 dB'den iki kat daha gürültülü. 8 saat maruz kalınması durumunda kulağa kalıcı hasar verebilir.
6080 feet uzaklıktaki Boeing 737 veya DC-9 uçağın havalanırken yaydığı gürültü (97 dB), çim biçme makinası (96 dB), 25 feet uzaklıktaki motorsiklet (90 dB)	90	70 dB'den 4 kat daha gürültülü
305 metre uzaklıktaki jet havalanırken yaydığı gürültü, Pancar motoru, motorlu çim biçme makinası, ziraat traktörü, kaya matkabı, motorsiklet, çöp kamyonu, 1000 feet uzaklıktan geçen jet(103 dB), 100 feet uzaklıktaki helikopter (100 dB)	100	80 dB'den 4 kat daha gürültülü. 8 saat maruz kalınması durumunda ciddi olarak hasar verir.
Demir-çelik fabrikası, 1 metre uzaklıktaki korna sesi, kalkış uzaklığı 200 feet olan turbofanlı uçak (118 dB), Perçinleme makinası (110 dB), canlı rock müziği (108-114 dB)	110	Ortalama insanın duyabileceği sınır deper, 70 dB'den 16 kat daha gürültülü
Gök gürültüsü, elektrikli testere, Oksijen torç makinası (121 dB)	120	Acı verici, 70 dB'den 32 kat daha gürültülü
50 feet uzaklıktaki askeri jet uçağının havalanırken çıkardığı gürültü (130 dB)	130	
25 feet uzaklıktaki askeri jet uçağının havalanırken çıkardığı gürültü	150	Kulak zarı yırtılması ile neticelenir.



Şekil 2.48 ISO-3744 standardına uygun olarak ARM'in 1 m uzaklıktaki akustik gürültüsü

Frekans domeninde elde edilen farklı frekanslardaki akustik gürültü seviyesinden toplam eşdeğer akustik gürültü seviyesini hesaplayabilmek için,

$$L_{eş} = 10 \log_{10} \sum_{1}^n 10^{L_n/10} \quad (2.33)$$

eşitliği kullanılmalıdır. Eşitlik (2.33) frekans domenindeki akustik gürültü değerlerine uygulandığında geliştirilen ARM'in toplam eşdeğer akustik gürültü seviyesi 50 bin d/d ve nominal güç olan 1.8 kW'ta **87.62 dBA** olarak bulunmuştur. Geliştirilen YH-ARM'in CNC makinası (CNC-Freze yada CNC-Torna) için geliştirildiği hatırlanırsa (Çizelge 2.7'de freze için 85dB), ARM'in ortalama bir freze makinasından 2.62 dB daha gürültü çalışacağı anlaşılmaktadır.

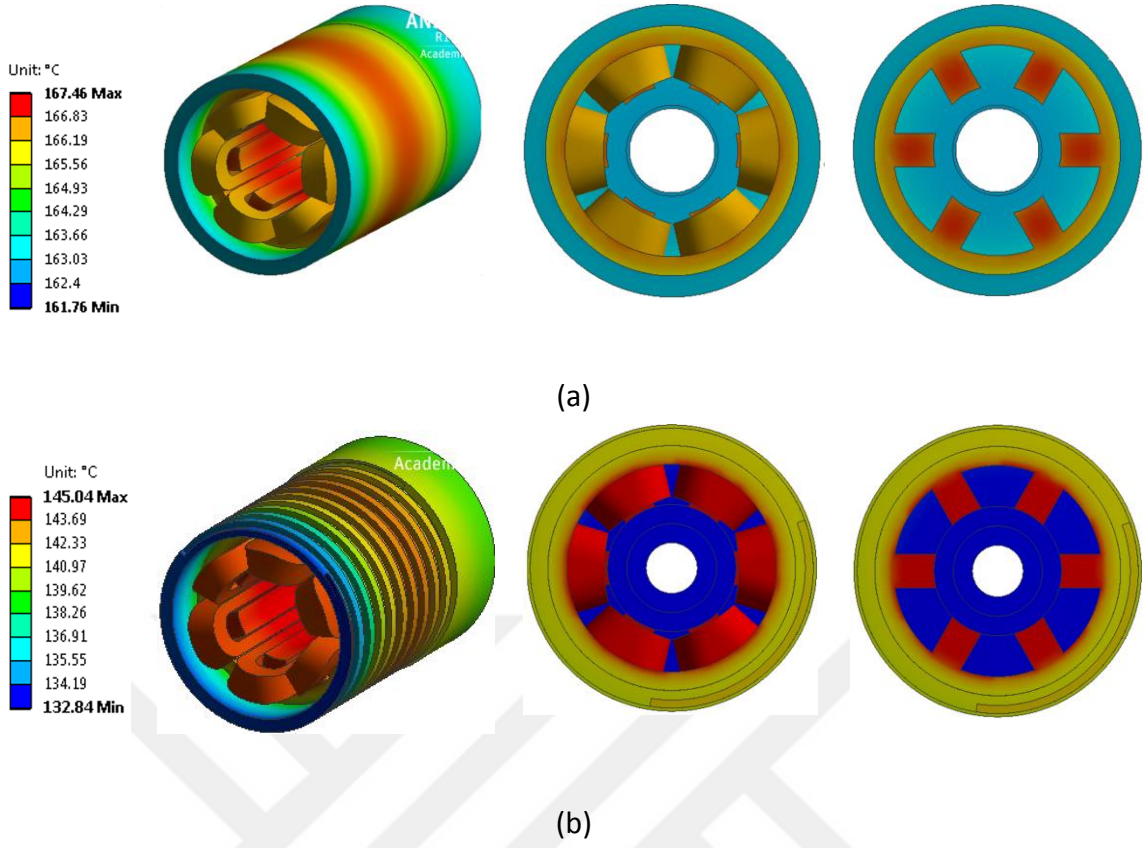
2.2.3 Termal analiz

Elektrik-Elektromanyetik ve mekanik analizleri gerçekleştirilen YH-ARM'in termal davranışı bu bölümde irdelenecektir. Termal analiz için sonlu elemanlar yönteminden faydalanarak gerekli modelleme Ansys-Workbench'de oluşturulmuştur. CNC makinalarında kullanılan elektrik motorlarının birçoğu sıvı soğutma tekniği ile soğutulmaktadır. Ancak bu çalışmada geliştirilen ARM'de ise doğal soğutma hedeflenmektedir. Tezde sunulan ve endüstriyel olarak satılan elektrik motorlarının

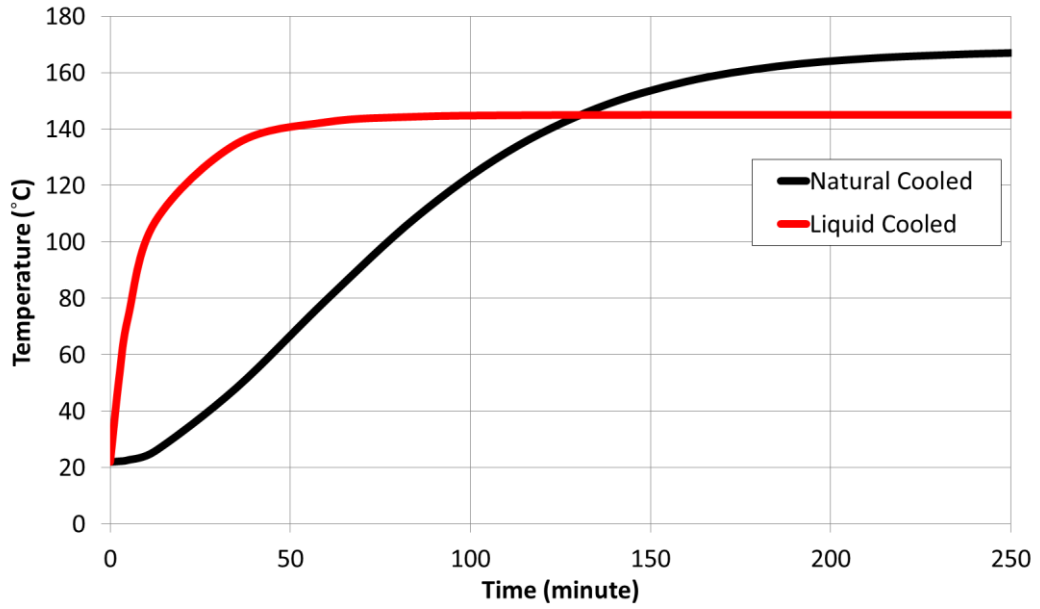
performanslarının karşılaştırılması amacıyla bu bölümde doğal ve sıvı soğutma opsiyonlarının her ikisi için de analizler gerçekleştirilmiş ve her bir soğutma tekniğinde ARM'in ulaşabileceği sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Çizelge 2.8'de termal analizde kullanılan girdiler bulunmaktadır. Analizlerde bakır kayıpları ve demir kayıpları ısı kaynağı olarak modellenmiştir. Şekil 2.49'da doğal ve sıvı soğutma opsiyonları gözönüne alınarak kararlı ARM'in haldeki sıcaklık dağılımı görülmektedir. Sonuçlardan anlaşıldığı üzere, doğal soğutma şartlarında ARM 1.8 kW çıkış gücünü sürekli olarak sağladığında maksimum sıcaklık 167°C'ye ulaşırken, sıvı soğutma ile 3.5 kW çıkış gücünü sürekli olarak sağladığında maksimum sıcaklık 145°C'ye ulaşmaktadır. Şekil 2.50'de ise bu iki soğutma sistemi opsiyonlarının ARM'e uygulanması halinde geçici (transient) sıcaklık değişimi görülmektedir. Sıvı soğutmalı 3.5 kW güç sağlayan ARM yaklaşık 50 dk içerisinde kararlı rejimdeki sıcaklığına erişirken, 1.8 kW güç sağlayan doğal soğutma sistemine sahip ARM ise yaklaşık olarak 200 dk içerisinde kararlı rejim sıcaklığına erişmektedir.

Çizelge 2.8 YH-ARM termal analizi çalışma şartları

Soğutma sistemi	Doğal soğutma	Sıvı soğutma
Anma gücü (S1- %100)	1.8 kW	3.5 kW
Anma rotor hızı	50000 d/d	50000 d/d
Faz direnci (@75°C)	0.315	0.315
Efektif faz akımı (A_{rms})	5.65	9.05
Elektriksel frekans	3.3 kHz	3.3 kHz
Bakır kaybı	28.3	76
Toplam demir kaybı	205.3	294.7
Gövde yüzeyi üzerindeki ısı transfer katsayısı [62], [63]	15	54
Gövde materyali	Al	Al
Ortam sıcaklığı	22 °C	22 °C



Şekil 2.49 (a) doğal soğutma (b) sıvı soğutma sistemine sahip ARM'in kararlı çalışma şartlarındaki sıcaklık dağılımı



Şekil 2.50 (a) doğal soğutma (b) sıvı soğutma sistemine sahip ARM'in geçici durum sıcaklık değişimi

DENEY ÇALIŞMASI

Bölüm 2’de yüksek hızlı anahtarlama relüktans makinası elektromanyetik olarak tasarlanmış ve ardından mekanik, akustik ve termal analizleri gerçekleştirilmişti. Bu bölümde ise geliştirilen ARM’in prototibinin üretilmesi, güç dönüştürücüsünün tasarımı-üretimi ve deney test düzeneğinin kurulumu yapılmış, ardından benzetim sonuçlarını doğrulamak amacı ile testler gerçekleştirilmiştir.

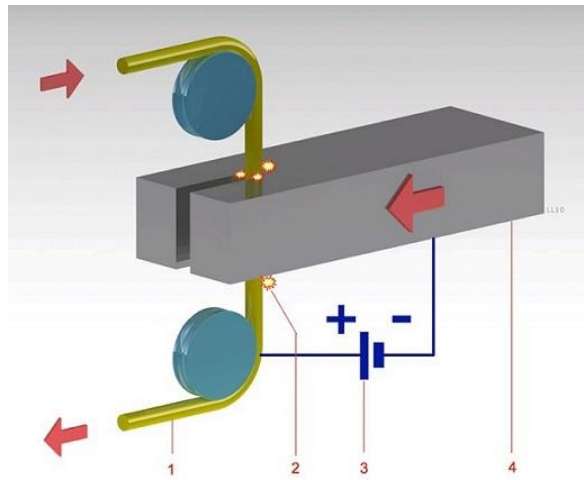
3.1 Yüksek hızlı anahtarlama relüktans makinasının üretimi

Bu kısımda, yüksek hızlı deneysel doğrulama amacıyla geliştirilen ARM’in üretimi gerçekleştirilmiştir.

Prototip üretiminde ilk olarak rulmanlar belirlenmiştir. “Literatür özeti” bölümünde de bahsedildiği üzere, yüksek hızlı elektrik makinası uygulamalarında sürtünme etkisiyle oluşan yüksek ısıdan dolayı genellikle seramik ya da hibrit bilyalı rulmanlar tercih edilmektedir. Ancak bu rulmanların fiyatı geleneksel çelik bilyalı rulmanlara göre çok yüksektir. Testler kısa süreli olarak planlandığından çelik bilyalı rulmanlar prototip üretiminde tercih edilmiştir.

ARM üretimine laminasyonların kesimi ile başlanmıştır. Bu çalışmada sunulan yeni teknoloji HiperCo50 (ya da Permendur) laminasyon malzemesi yarı işlenmiş mamul olarak satılmaktadır. Dolayısıyla, laminasyon malzemesi ilk olarak tel erozyon yöntemi (wire-EDM) ile kesilmiş ve ardından ısıtma işlemi uygulanarak (annealing) laminasyon malzemesinin manyetik özelliği aktif hale getirilmiştir. Kesilen ve ısıtma işlemi uygulanan laminasyonların yüzeyine sıvı yapıştırıcı sürülmüş ve kurutulmuştur (Şekil 3.3). Kurutulan laminasyonlar daha önceden hazırlanan fikstürler yardımıyla üst üste

dizilmiştir (Şekil 3.4). Dizilme işleminin ardından fikstür kapakları yardımıyla laminasyon sıkıştırılmış, laminasyon yığın faktörü (stacking factor) arttırılmaya çalışılmıştır. Stator ve rotor için ayrı ayrı yapılan bu işlemin ardından yapıştırıcının aktifleşebilmesi için fırınlama işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.5 ve Şekil 3.6). Fırınlama işleminin ardından yüzeyler yapıştırıcıdan “kumlama” metodu ile uzaklaştırılmış ve Litz bobinler statora yerleştirilmiştir (Şekil 3.7). Litz kablo içerisinde birçok iletken barındıran iletken demetlerinden meydana gelmektedir. Bu çalışmada içerisinde 37 iletken bulunan litz kablo kullanılmıştır. Litz kablo yüksek elektriksel frekanslardaki deri (skin) ve proximity etkisini azaltmada oldukça etkilidir. Ancak diğer yandan her bir iletkenin izole edilmesi için emaye kullanılması beraberinde oluk doluluk oranını da oldukça düşürmektedir. Diğer bir dezavantajı ise Litz iletkenlerin dayanabileceği maksimum sıcaklık değerinin geleneksel kablolarla göre daha düşük seviyede olmasıdır (Şekil 3.8). Bobinlerin mukavemetinin ve elektriksel izolasyonunun arttırılması amacıyla vernikleme işlemi uygulanmıştır. ARM montajından önce çekilmiş fotoğraf Şekil 3.9’da görülmektedir. Şekil 3.10’da ise rotor pozisyonunun ölçümü için kullanılmış kalıcı mıknatıs görülmektedir. Şekil 3.11’de CNC makinası ile üretilen ARM gövdesi ve Şekil 3.12’de ise montajı tamamlanmış ARM gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Tel erozyon yöntemi çalışma prensibi



Şekil 3.2 tel erozyon yöntemi ile kesilmiş stator ve rotor laminasyonu



Şekil 3.3 Stator rotor laminasyonları ve laminasyonların kurutulması



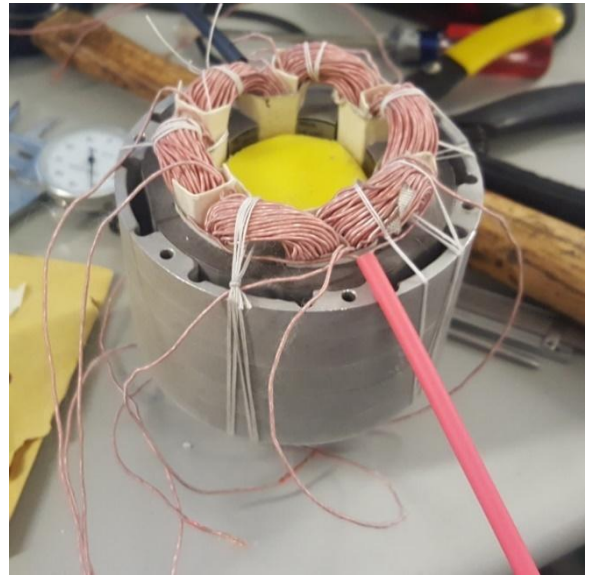
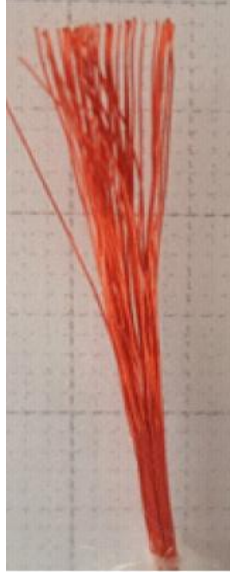
Şekil 3.4 Fikstür yardımıyla laminasyonların üst üste dizilmesi



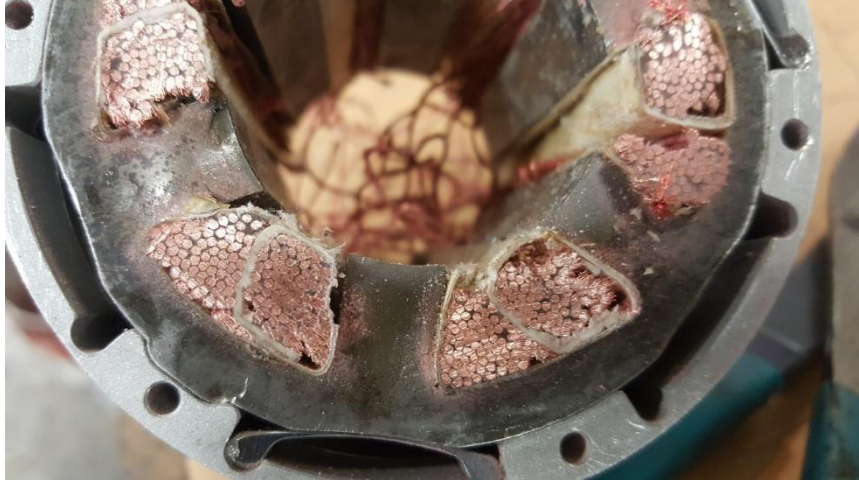
Şekil 3.5 Fikstür yardımıyla dizilen laminasyonların sıkıştırılması ve fırınlama işlemi



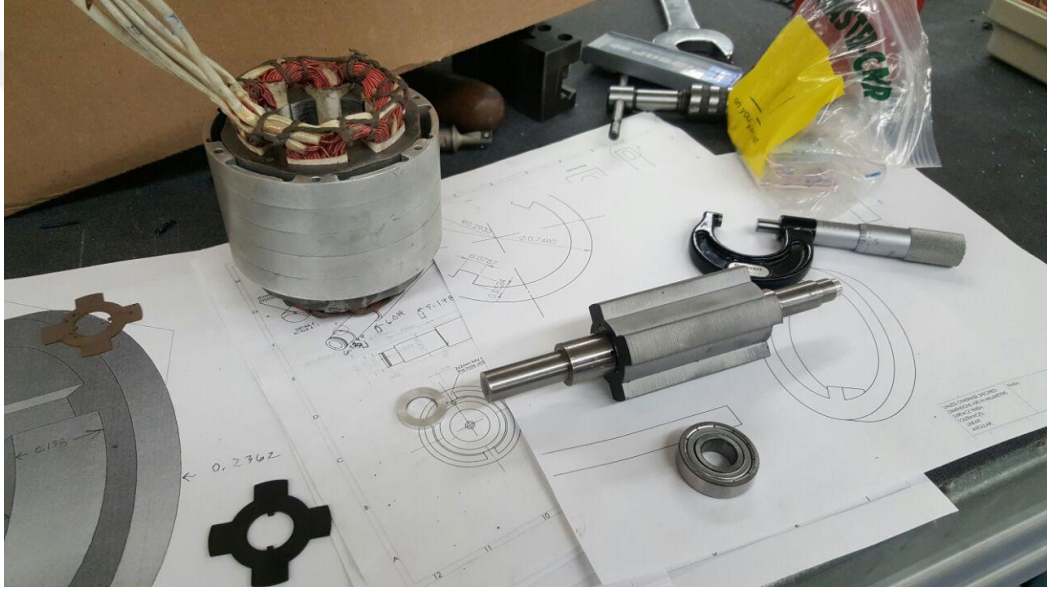
Şekil 3.6 Fırınlama işlemi sonrası yapışmış stator laminsyon yığını



Şekil 3.7 Litz iletken ve bobinaj işlemi



Şekil 3.8 Oluk içerisindeki litz iletken kesitleri



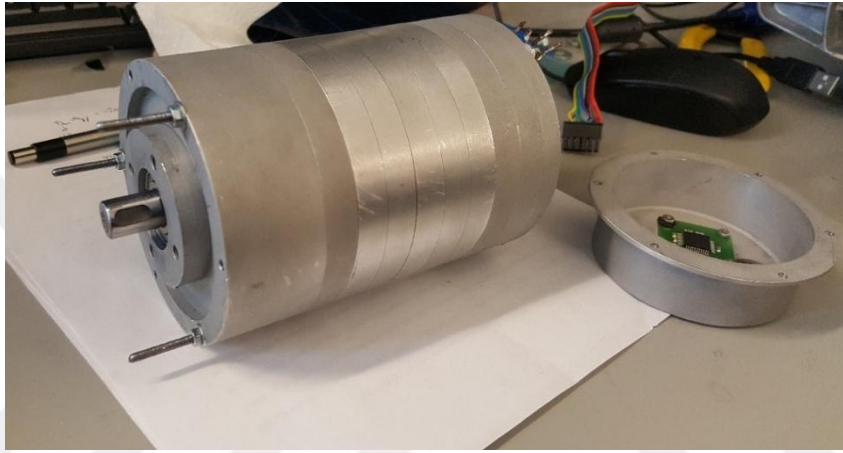
Şekil 3.9Yüksek hızlı ARM bileşenleri (stator, sargılar, gövde, rotor, şaft ve rulmanlar)



Şekil 3.10 Pozisyon ölçümü için şaft üzerine yerleştirilmiş kalıcı mıknatıs



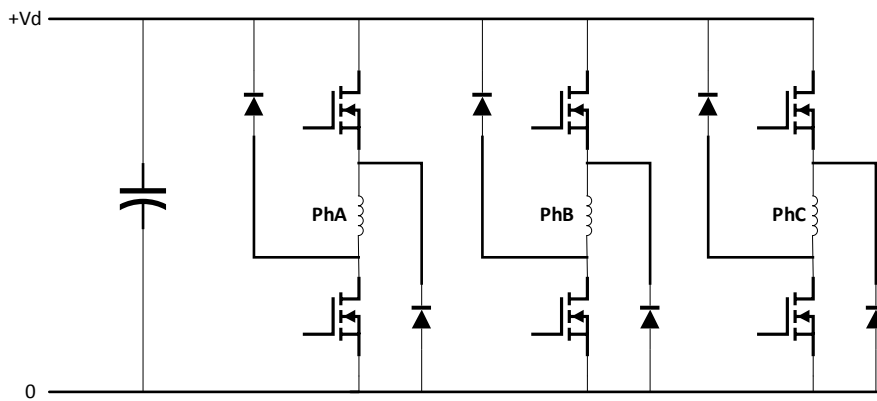
Şekil 3.11 ARM gövdesi



Şekil 3.12 Montajı tamamlanmış ARM

3.2 Anahtarlama relüktans makinası sürücü geliştirilmesi

Anahtarlama relüktans makinasını kontrol edebilmek ve gerek duyulan uyarım dalga şekillerini oluşturabilmek amacıyla bu çalışmada ARM için sürücü geliştirilmiştir. Sürücü topolojisi olarak Şekil 3.13’de gösterilen geleneksel ARM sürücü topolojisi olan “Asimetrik yarım köprü ARM sürücüsü” topolojisi tercih edilmiştir.



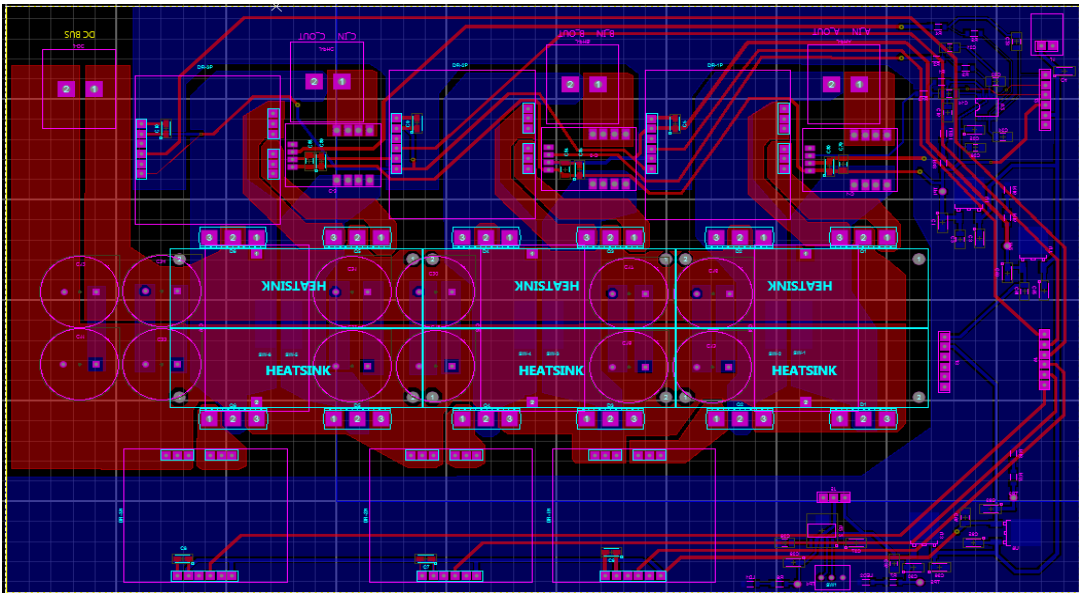
Şekil 3.13 Asimetrik yarım köprü ARM sürücü devre şeması

Her bir faz akımının temel uyartım frekansı,

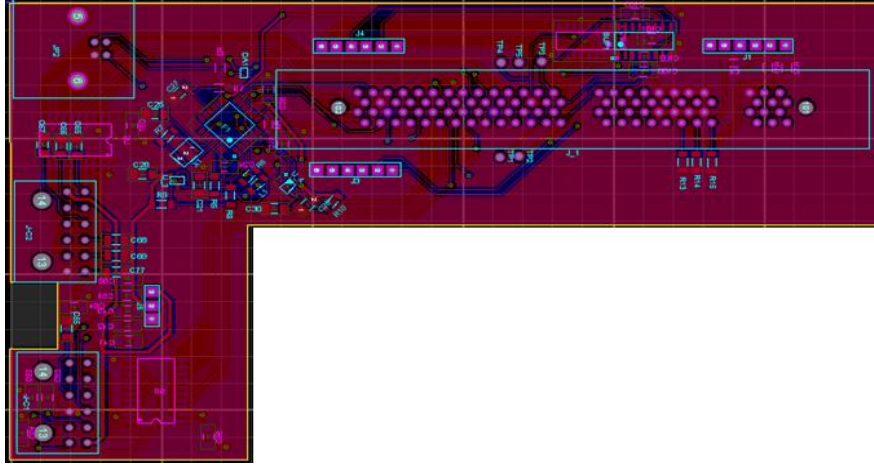
$$f_{main} = p \frac{n}{60} \quad (3.1)$$

ile hesaplanır. Burada, p rotor kutup sayısı ve n ise rotor hızı (d/d)'dır. Eşitlik (3.1)'e göre anma hızında (50 bin d/d) elektriksel uyartım frekansı 3.33 kHz olarak hesaplanır. Bu değer geleneksel elektrik makinalarının temel uyartım frekansına (~50 Hz) göre oldukça yüksektir. ARM'in düşük hızlarda çalışma durumunda ise endüklenen ters EMK besleme gerilimi olan 300 VDC baraya göre çok düşük kaldığından akım dalga şeklini belirlenen histerezis bant içerisinde regüle etmek için oldukça yüksek anahtarlama frekansı gerekecektir. Bu nedenle, anahtarlama güç elemanlarının seçimi iletim ve anahtarlama kayıpları açısından oldukça önemlidir.

Akım regülasyonunu yüksek hassasiyet ile sağlamak için hall etkili yüksek bant genişliğine sahip akım sensörleri kullanılmıştır. Ayrıca, hesaplama ve karar verme işlemlerinin de olabildiğince hızlı olabilmesi için işlemci olarak DSP (digital signal processor) tercih edilmiştir. Ayrıca, akım ve gerilim dalgalanmalarının minimize edilmesi için DC bara elektrolitik ve film kondansatörler ile desteklenmiştir. Elektronik kartların baskı devre (PCB) tasarımı Şekil 3.14'de görülmektedir. Şekil 3.15'de ise ARM sürücüsünün 3 boyutlu modeli, Şekil 3.16'da ise üretilmiş hali görülmektedir. Son olarak sürücü devresi güç giriş-çıkışları ve sensör bağlantıları ARM'e bağlanmıştır (Şekil 3.17).

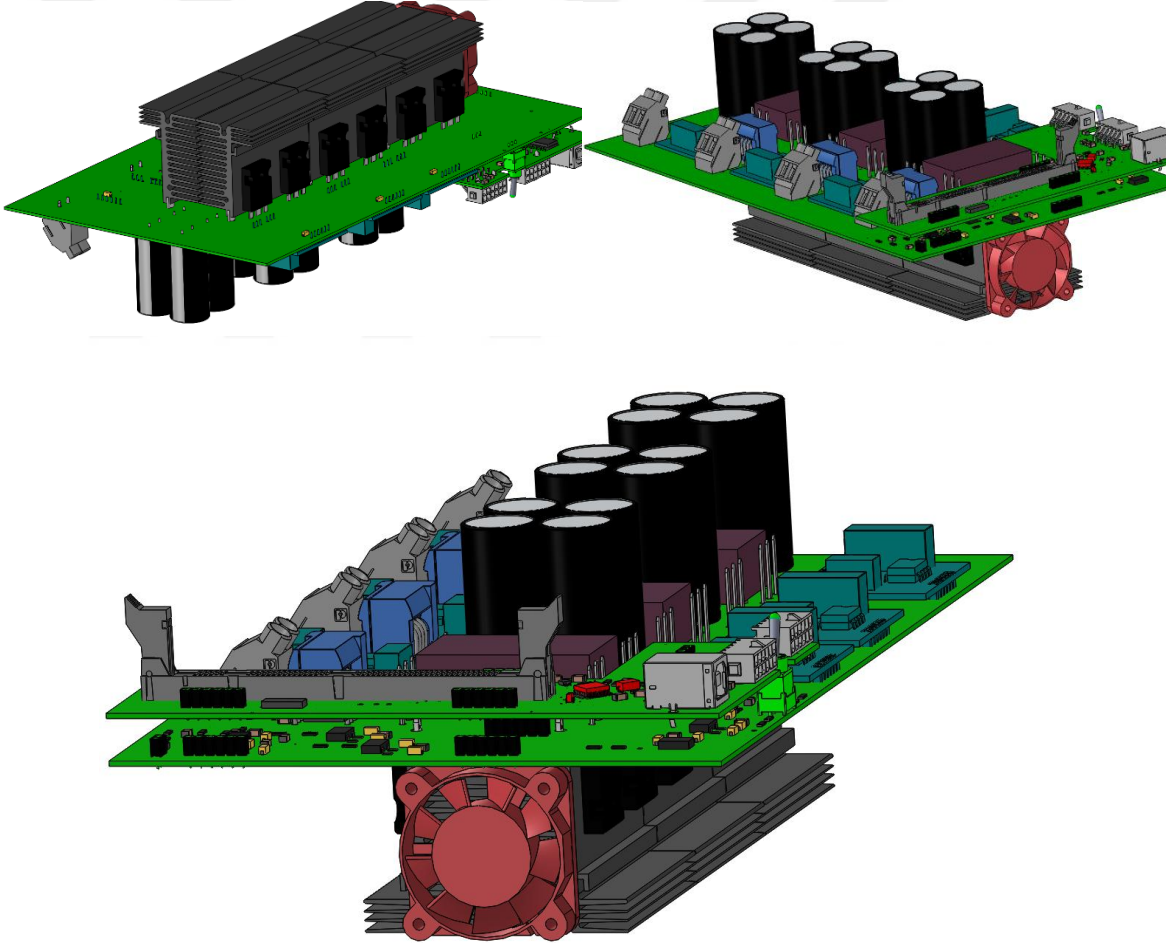


(a)

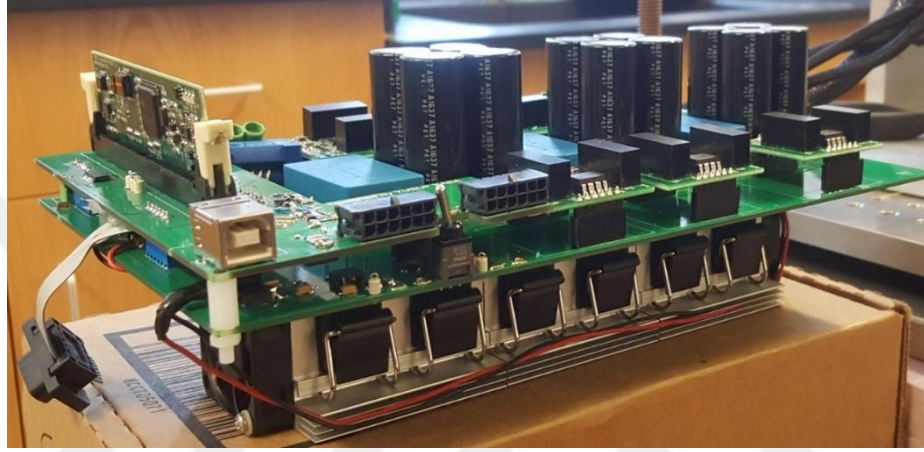
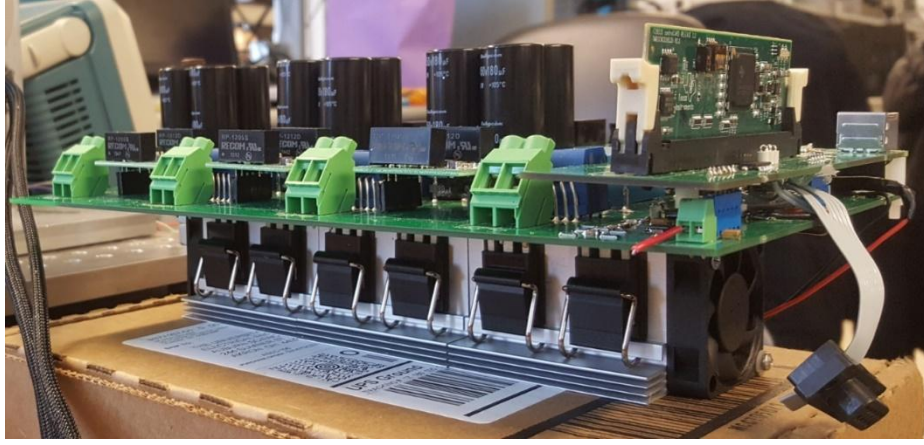


(b)

Şekil 3.14 Elektronik kartların tasarımı (a) güç devresi (b) kontrol devresi

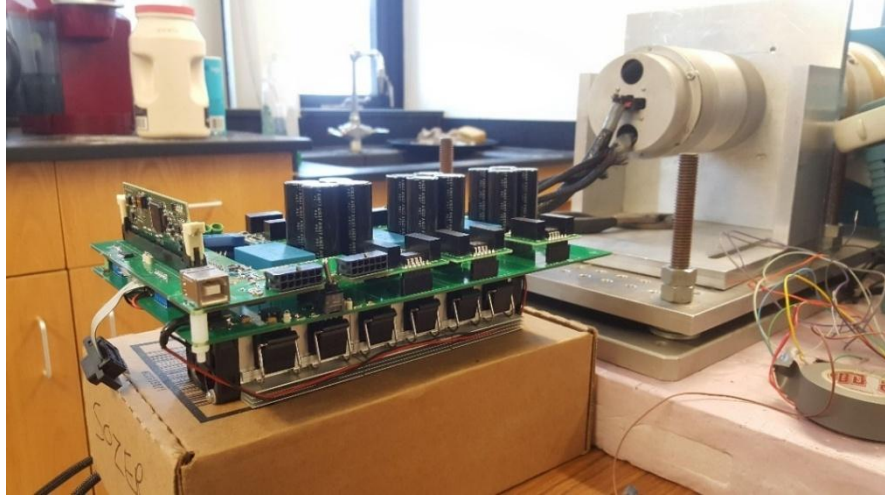


Şekil 3.15 Geliştirilen ARM sürücüsünün 3 boyutlu modeli.



Şekil 3.16 Geliştirilen ARM sürücüsü ptototipi



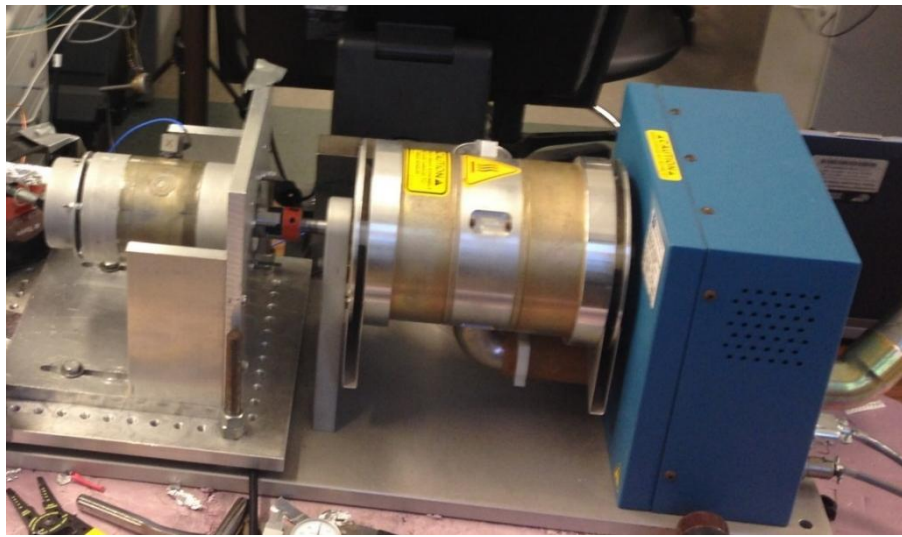


Şekil 3.17 Test düzeneği

3.3 Deneysel test sonuçları

Yüksek hızlı ARM'in ve sürücüsünün tasarımı-geliştirilmesi ve üretimi sonrasında, bu bölümde test sonuçları paylaşılmaktadır. ARM'i dinamik olarak yüklemek ve test edebilmek için Şekil 3.18'deki gibi histerezis fren ARM'e akuple edilmiştir. Histerezis fren kontrolcüsü hız sabitleme algoritması ile test edilecek ARM'i yüklemektedir. Yani, ARM kontrolcüsüne girilen referans hız değerine ulaştığında, dinamometrenin fren momentini artırılarak sabit hızda ARM testi sağlanmış olacaktır.

Deneyler statik ve dinamik testler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 3.18 (a) Dinamometre düzeneği ve (b) histerezis fren kontrolcüsü

3.3.1 Statik elektriksel testler

3.3.1.1 Faz dirençlerinin ölçümü

ARM'in faz dirençleri LCR metre vasıtasıyla ölçülmüştür. Hesaplanan ve ölçülen faz direnç değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Faz dirençlerindeki en fazla sapma C fazında %8.2 dir.

Çizelge 3.1 Hesaplanan ve ölçülen faz direnç değerleri

Direnç (mΩ)	R _a	R _b	R _c
Hesaplanan	363 mΩ		
Deney sonucu	374 mΩ	366 mΩ	393 mΩ
Sapma(%)	%3.03	%0.8	%8.2

3.3.1.2 Faz endüktanslarının ölçümü

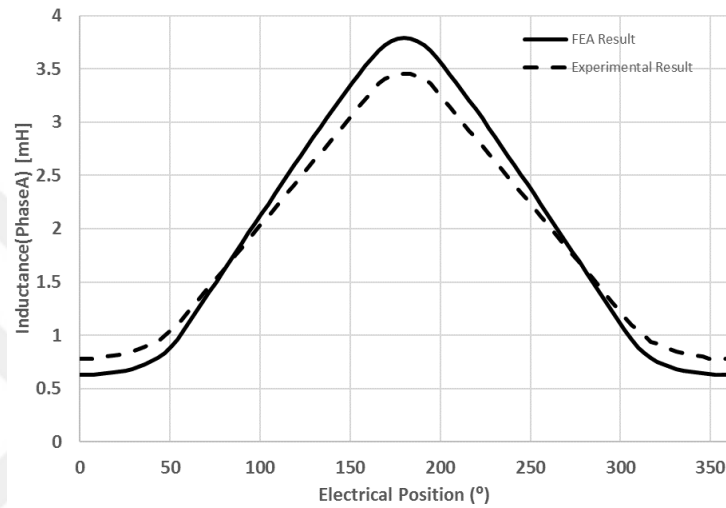
Anahtarlamalı relüktans motoru relüktans etkisiyle moment üretebildiğinden, faz endüktanslarının profili motor performansını etkileyen en önemli parametrelerin başında gelmektedir. Sonlu elemanlar yönteminde A-fazı 1A DC ile uyarılmış ve farklı rotor pozisyonlarında $L(\theta) = \Psi(\theta)/I$ eşitliği kullanılarak faz endüktansı hesaplanmıştır. Ancak not edilmelidir ki: Hesaplanan bu faz endüktansı profili, ARM'in sadece manyetik lineer bölgesindeki (manyetik doyum olmaksızın) faz endüktans profilini sunmaktadır.

Ölçümde ise LCR metre kullanılmış ve rotorun farklı pozisyonlarında ölçülen endüktans değerleri kaydedilmiştir. A-fazına ait hesaplanan ve ölçülen faz endüktans profilleri Şekil 3.19'da karşılaştırılmıştır. Endüktans ile moment arasındaki ilişki eşitlik (3.3) ile

verilmektedir. Dolayısıyla endüktans profilindeki eğim açısındaki sapma oranı direkt olarak çıkış momentinde de sapmaya neden olacaktır.

$$W_{co-field} = \int_0^i L(\theta) i di = \frac{i^2}{2} L(\theta) \quad (3.2)$$

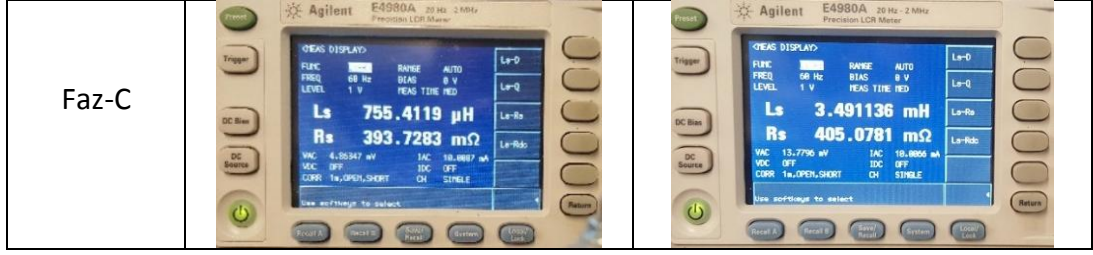
$$T = \frac{\partial W_{co-field}}{\partial \theta} = \frac{i^2}{2} \frac{L(\theta)}{d\theta} \quad (3.3)$$



Şekil 3.19 Farklı rotor pozisyonlarındaki A-fazının hesaplanan ve ölçülen endüktansları

Çizelge 3.2 Fazlardaki minimum ve maximum endüktans değerleri

	Minimum endüktans pozisyonu	Maksimum endüktans pozisyonu
Faz-A		
Faz-B		

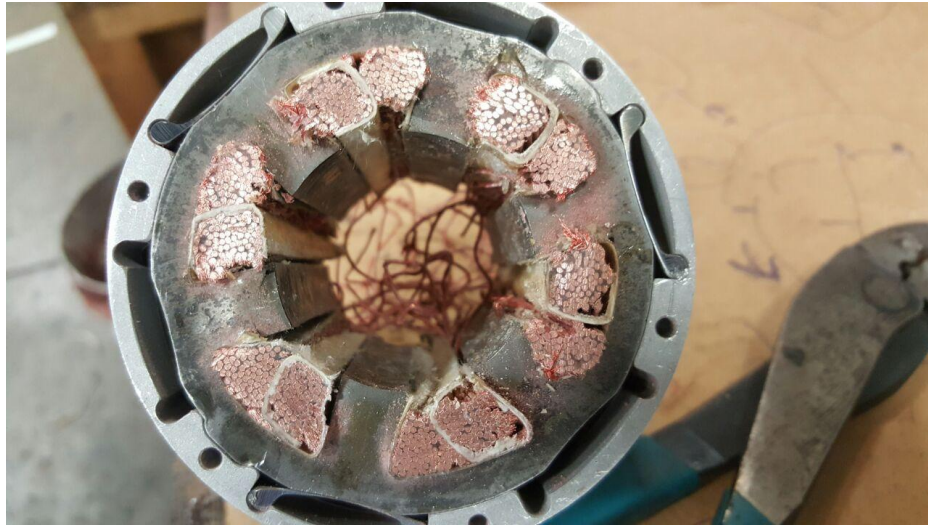


3.3.1.3 Oluk doluluk oranı

Oluk doluluk oranı, stator oluklarının bobinler tarafından efektif kullanım alanını ölçen bir parametredir. Bu değer, geleneksel elektrik makinalarında %40-50 ve bazı özel uygulamalarda ise %65 değerine kadar çıkarılabilmektedir. Ancak bu çalışmada sargılar Litz kablolar ile oluşturulduğundan ulaşılan en yüksek net oluk doluluk oranı %40 olarak ölçülmüştür(Şekil 3.20). Net doluluk oranı,

$$n_{oluk} = \frac{A_{bakır}}{A_{oluk}} \times 100 \quad (3.4)$$

ile bulunmaktadır. Burada $A_{bakır}$, oluk içerisindeki toplam net bakır alanını (mm^2), A_{oluk} ise toplam oluk alanını belirtmektedir.

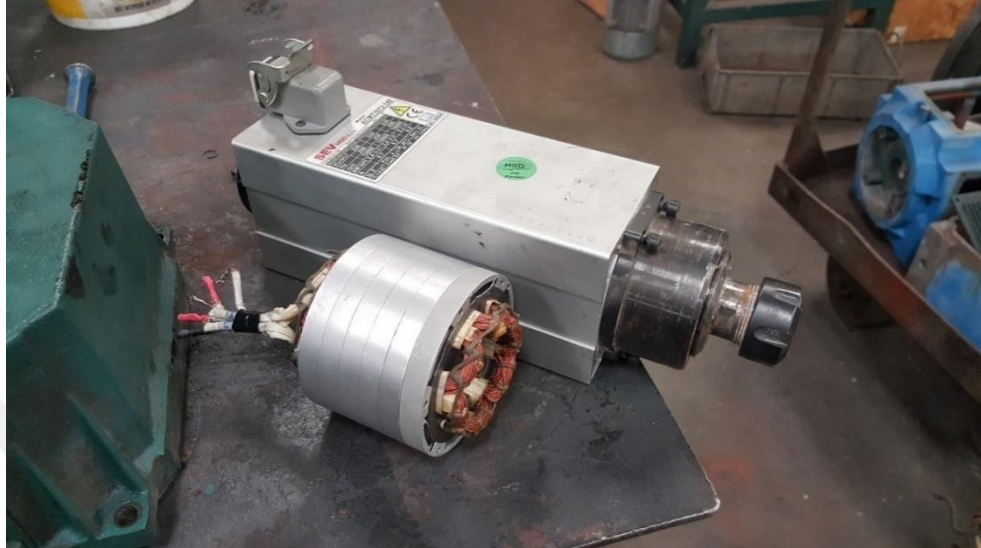


Şekil 3.20 Stator oluk kesit alanı görünümü

3.3.1.4 Boyut karşılaştırılması

Bu çalışmanın ana motivasyon kaynaklarından biri yüksek manyetik geçirgenlik (μ_r) ve yüksek manyetik doyum seviyesine sahip yeni teknoloji kobalt-demir alaşım

HiperCo50 laminasyon malzemesinin yüksek hızlı ARM uygulamasında kullanılmasıdır. Bu nedenle hacim yönüyle muadil bir kalıcı mıknatıslı spindl elektrik motoru ile boyut karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 3.21’den anlaşıldığı üzere geliştirilen ARM muadil spindl elektrik motoruna göre boyut açısından oldukça avantajlıdır.



Şekil 3.21 Geliştirilen ARM ile geleneksel endüstriyel spindl elektrik motorlarının boyutlarının karşılaştırılması

3.3.2 Dinamik testler

Bu kısımda, geliştirilen ARM farklı çalışma şartlarında dinamik olarak yüklenmiş ve test edilmiştir. Test sırasında ARM’e referans akım bilgisi, iletim ve uyarım açıları girdi olarak tanımlanmıştır. Hız kontrolü ise dinamik yük olarak kullanılan histerezis fren kontrolcüsü ile sağlanmıştır.

Çizelge 3.3’de farklı rotor hızı ve referans akım değerlerinde hesaplanan ve test edilen–ölçülen değerler sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.4’te ARM ve sürücünün farklı çalışma şartlarındaki performans değerleri, Çizelge 3.5’te ise ilgili çalışma anlarında kaydedilmiş dalga şekilleri, inverter giriş, çıkış akım ve gerilim değerleri ve inverter verimi bilgileri bulunmaktadır. Dinamometrenin maksimum çalışabileceği hız değeri 18000 d/d olduğundan, bu değerin üstü test edilmemiştir.

Çizelge 3.3 ARM'in farklı çalışma hızlarındaki performans sonuçları

Referans akım	DC bara gerilimi (V)	Hız (d/d)	Hesaplanan moment (Nm)	Ölçülen moment (Nm)	Sapma (%)
20A	100	3000	1,15	1,094	5,24
	100	5000	1,10	1,045	5,23
	110	8000	0,97	0,902	7,80
	150	9000	1,12	0,993	11,58
	170	10000	1,13	0,96	15,24
	170	12000	1,06	0,787	25,79
	250	15000	1,25	0,934	25,28
18A	100	3000	1,07	0,912	14,76
	100	5000	0,93	0,855	8,59
	100	7000	0,87	0,826	5,75
16A	100	3000	0,8741	0,717	17,97
	100	5000	0,7881	0,688	12,7
	100	7000	0,7248	0,674	7,01
	100	8000	0,6339	0,618	2,51
	150	9000	0,7799	0,672	13,84
	170	15000	0,7037	0,565	19,71
	170	16000	0,6644	0,536	19,33
14A	100	3000	0,6818	0,566	16,98
	100	5000	0,6272	0,528	15,82
	100	7000	0,5914	0,519	12,24
12A	60	3000	0,4599	0,402	12,59
	60	5000	0,3794	0,361	4,85
	70	7000	0,3811	0,34	10,78
	80	8000	0,3865	0,337	12,81
	90	9000	0,3905	0,339	13,19
	100	10000	0,3864	0,341	11,75
	170	11000	0,4665	0,37	20,69

	170	12000	0,4562	0,32	29,86
10A	60	3000	0,3194	0,272	14,84
	170	5000	0,3566	0,292	18,12
	170	8000	0,3443	0,279	18,97
	170	10000	0,339	0,268	20,94
	170	11000	0,3372	0,265	21,41
	170	12000	0,332	0,26	21,69
	170	15000	0,3255	0,265	18,59
	170	16000	0,3204	0,233	27,28
	170	16000	0,3204	0,233	27,28
8A	60	3000	0,2179	0,164	24,74
	60	5000	0,1974	0,145	26,55
	70	7000	0,1961	0,135	31,16
	80	8000	0,1963	0,131	33,27
	90	9000	0,1968	0,131	33,43
	100	10000	0,1965	0,128	34,86
	120	11000	0,2020	0,13	35,64
	170	12000	0,2137	0,136	36,36
	170	12000	0,2137	0,136	36,36

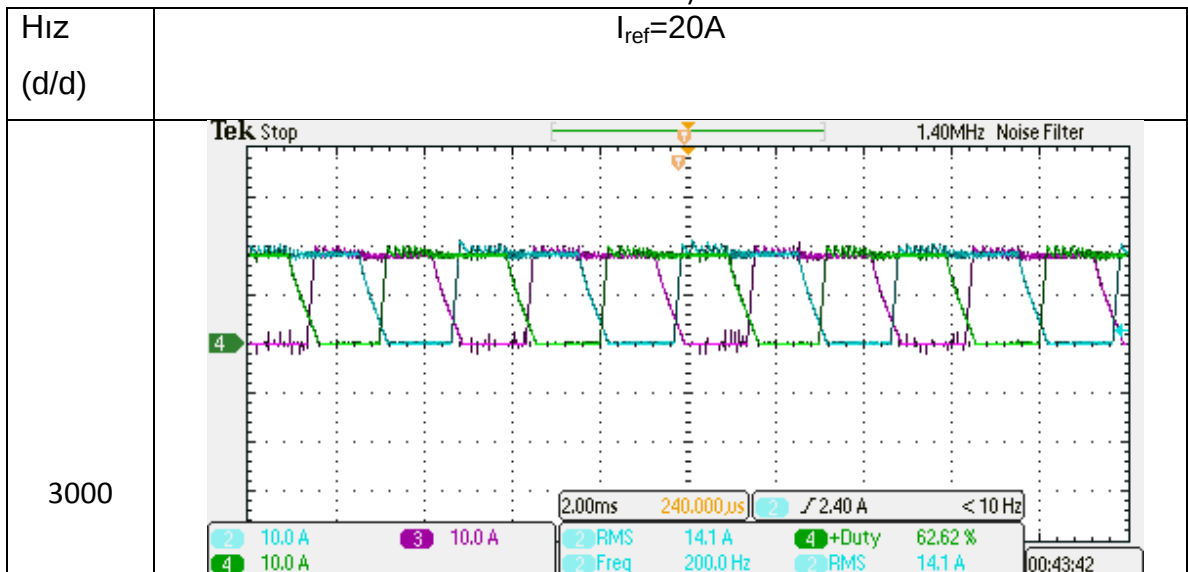
Çizelge 3.4 ARM'in Tablo 3. 1. ARM'in ve sürücünün farklı çalışma hızlarındaki performans sonuçları

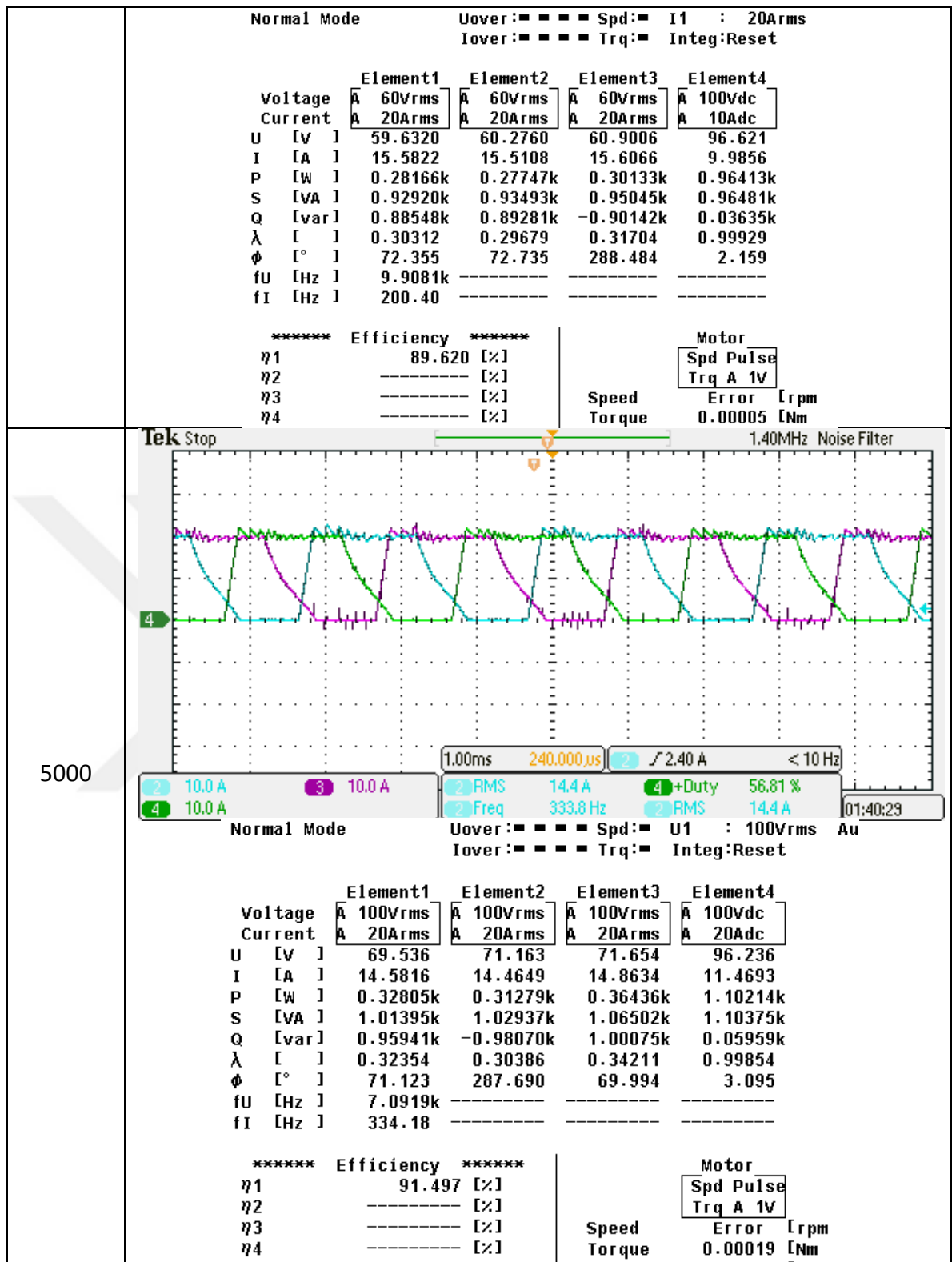
Referans Akım	Hız (d/d)	Motor çıkış gücü (W)	Motor giriş gücü (W)	DC bara gücü (W)	η_{motor} (%)	$\eta_{inverter}$ (%)
20A	3000	343	863	964	39,78	89,62
	5000	547	1008	1102	54,27	91,49
	7000	671	1089	1175	61,65	92,69
	8000	755	1190	1272	63,46	93,6
	9000	935	1493	1581	62,65	94,48
	10000	1005	1615	1700	62,24	95
	12000	988	1631	1718	60,63	94,94
	15000	1467	2202	2286	66,60	96,36

18A	3000	287	699	777	41,00	89,93
	5000	448	820	897	54,58	91,43
	7000	605	976	1041	62,07	93,71
16A	3000	225	563	626	40,00	89,95
	5000	360	692	751	52,09	92,09
	7000	494	799	860	61,85	92,88
	8000	518	836	898	61,90	93,14
	9000	633	1026	1091	61,74	94,03
	11000	657	1157	1227	56,74	94,3
	12000	730	1197	1261	60,97	94,96
	15000	887	1413	1470	62,82	96,1
	16000	898	1400	1459	64,15	95,95
14A	3000	178	416	469	42,71	88,77
	5000	276	527	582	52,48	90,51
	7000	380	621	690	61,22	90,06
12A	3000	126	277	313	45,56	88,56
	5000	189	367	403	51,54	91
	7000	249	446	480	55,93	92,84
	8000	282	490	522	57,58	93,93
	9000	319	543	577	58,79	94,19
	10000	357	594	627	60,11	94,75
	11000	426	706	753	60,34	93,8
	12000	402	722	762	55,73	94,69
10A	3000	85	205	238	41,67	86,15
	5000	153	326	356	46,85	91,66

	7000	166	324	353	51,11	91,82
	8000	234	434	467	53,83	92,97
	10000	281	503	532	55,85	94,46
	11000	305	530	564	57,60	93,97
	12000	327	568	600	57,48	94,74
	15000	416	645	673	64,51	95,87
	16000	390	635	669	61,49	94,9
8A	3000	52	137	159	37,60	86,18
	5000	76	175	197	43,30	89
	7000	99	219	240	45,24	91,14
	8000	110	244	265	45,01	92
	9000	123	270	291	45,72	92,8
	10000	134	289	312	46,31	92,76
	11000	150	312	336	48,02	92,8
	12000	171	367	389	46,54	94,39

Çizelge 3.5 ARM'in. Farklı çalışma şartlarında ölçülen akım dalga şekilleri ve diğer performans sonuçları (Element1: A-fazı, Element2: B-fazı, Element3: C-fazı, Element4:DC bara)





7000



Normal Mode

Uover: ■ ■ ■ ■ Spd: ■ U1 : 100Vrms Au
Iover: ■ ■ ■ ■ Trq: ■ Integ:Reset

	Element1	Element2	Element3	Element4
Voltage	A 100Vrms	A 100Vrms	A 100Vrms	A 100Vdc
Current	A 20Arms	A 20Arms	A 20Arms	A 20Adc
U [V]	80.928	82.355	81.501	96.680
I [A]	13.7178	13.7885	13.7798	12.1611
P [W]	0.35251k	0.34410k	0.38959k	1.17504k
S [VA]	1.11014k	1.13556k	1.12306k	1.17573k
Q [var]	-1.05269k	1.08217k	1.05332k	0.04048k
λ []	0.31754	0.30302	0.34690	0.99941
ϕ [°]	288.514	72.361	69.702	1.973
fU [Hz]	3.7217k	-----	-----	-----
fI [Hz]	467.36	-----	-----	-----

***** Efficiency *****

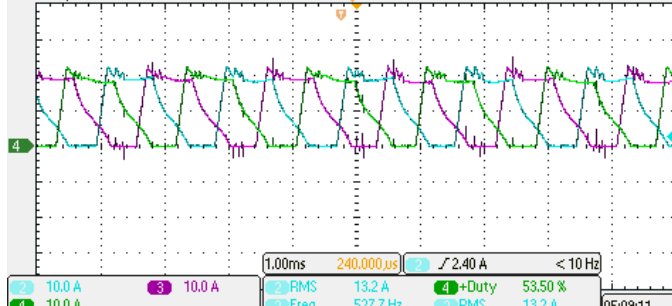
η_1 92.687 [%]
 η_2 ----- [%]
 η_3 ----- [%]
 η_4 ----- [%]

Motor

Spd Pulse
Trq A 1V

Speed Error [rpm]
Torque 0.00005 [Nm]

Tek Stop



Normal Mode

Uover: ■ ■ ■ ■ Spd: ■ I1 : 20Arms
Iover: ■ ■ ■ ■ Trq: ■ Integ:Reset

	Element1	Element2	Element3	Element4
Voltage	A 100Vrms	A 100Vrms	A 100Vrms	A 100Vdc
Current	A 20Arms	A 20Arms	A 20Arms	A 20Adc
U [V]	87.006	88.585	88.303	106.611
I [A]	13.4914	13.4324	13.6467	11.9357
P [W]	0.38715k	0.37341k	0.42730k	1.27201k
S [VA]	1.17383k	1.18992k	1.20505k	1.27248k
Q [var]	1.10815k	-1.12981k	1.12675k	0.03447k
λ []	0.32982	0.31381	0.35459	0.99963
ϕ [°]	70.742	288.289	69.231	1.552
fU [Hz]	3.8200k	-----	-----	-----
fI [Hz]	532.99	-----	-----	-----

***** Efficiency *****

η_1 93.606 [%]
 η_2 ----- [%]
 η_3 ----- [%]
 η_4 ----- [%]

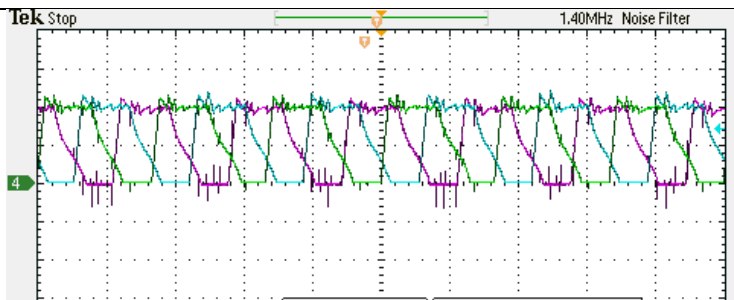
Motor

Spd Pulse
Trq A 1V

Speed Error [rpm]
Torque -0.00000 [Nm]

8000

9000



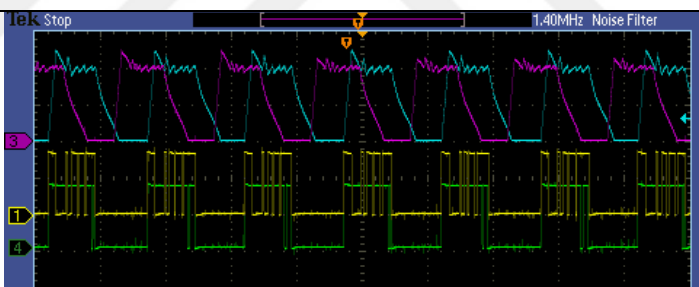
Normal Mode Uover: ■ ■ ■ ■ Spd: ■ U1 : 150Vrms
Iover: ■ ■ ■ ■ Trq: ■ Integ:Reset

	Element1	Element2	Element3	Element4
Voltage	A 150Vrms	A 150Vrms	A 150Vrms	A 150Vdc
Current	A 20Arms	A 20Arms	A 20Arms	A 20Adc
U [V]	113.425	115.056	115.876	146.669
I [A]	14.4470	14.2409	14.5006	10.7830
P [W]	0.50204k	0.46324k	0.52542k	1.58120k
S [VA]	1.63864k	1.63850k	1.68027k	1.58154k
Q [var]	1.55984k	1.57166k	-1.59601k	0.03321k
λ []	0.30637	0.28272	0.31270	0.99978
φ [°]	72.159	73.577	288.222	1.203
fU [Hz]	6.5271k	-----	-----	-----
fI [Hz]	600.48	-----	-----	-----

***** Efficiency *****	
η1	94.481 [%]
η2	----- [%]
η3	----- [%]
η4	----- [%]

Motor	
Spd Pulse	
Trq A 1V	
Speed	Error [rpm]
Torque	0.00003 [Nm]

10000



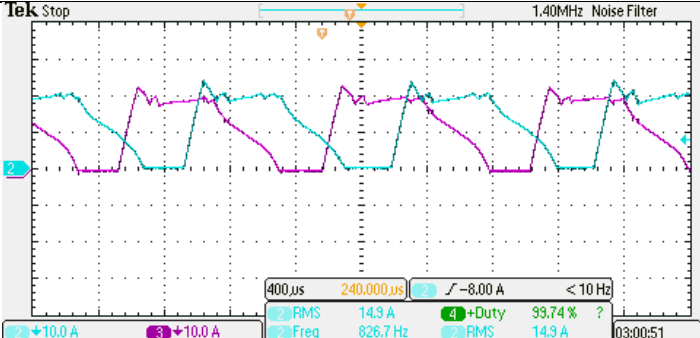
Normal Mode Uover: ■ ■ ■ ■ Spd: ■ U1 : 150Vrms
Iover: ■ ■ ■ ■ Trq: ■ Integ:Reset

	Element1	Element2	Element3	Element4
Voltage	A 150Vrms	A 150Vrms	A 150Vrms	A 300Vdc
Current	A 20Arms	A 20Arms	A 20Arms	A 20Adc
U [V]	122.682	123.727	124.354	166.647
I [A]	14.4040	14.1956	14.3317	10.2054
P [W]	0.51286k	0.53208k	0.56784k	1.70035k
S [VA]	1.76712k	1.75637k	1.78221k	0.00000k
Q [var]	-1.69106k	1.67384k	1.68932k	0.00000k
λ []	0.29022	0.30295	0.31862	Error
φ [°]	286.871	72.365	71.421	Error
fU [Hz]	7.2976k	-----	-----	-----
fI [Hz]	667.98	-----	-----	-----

***** Efficiency *****	
η1	95.039 [%]
η2	----- [%]
η3	----- [%]
η4	----- [%]

Motor	
Spd Pulse	
Trq A 1V	
Speed	Error [rpm]
Torque	0.00002 [Nm]

12000



Tek Stop 1.40MHz Noise Filter

400µs 240,000µs 8.00 A < 10 Hz

RMS 14.9 A 4 Duty 99.74 % ?

Freq 826.7 Hz RMS 14.9 A 03:00:51

Normal Mode Uover: Spd: U1 : 150Vrms

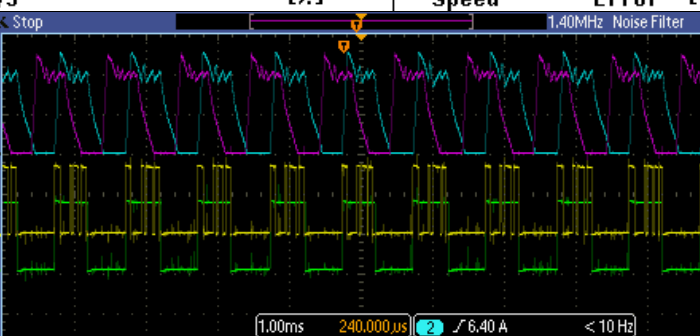
Iover: Trq: Integ:Reset

	Element1	Element2	Element3	Element4
Voltage	A 150Vrms	A 150Vrms	A 150Vrms	A 300Vdc
Current	A 20Arms	A 20Arms	A 20Arms	A 10Adc
U [V]	137.250	139.426	139.516	166.006
I [A]	14.3767	14.4067	14.1882	10.3509
P [W]	0.52591k	0.55280k	0.54936k	1.71816k
S [VA]	1.97321k	2.00867k	1.97948k	0.00000k
Q [var]	1.90183k	-1.93111k	1.90172k	0.00000k
λ []	0.26653	0.27521	0.27753	Error
ϕ [°]	74.542	285.974	73.887	Error
fU [Hz]	5.6017k			
fI [Hz]	801.85			

***** Efficiency *****	
η_1	94.944 [%]
η_2	----- [%]
η_3	----- [%]

Motor	
Spd Pulse	
Trq A 1V	
Speed	Error Trpm

15000



Tek Stop 1.40MHz Noise Filter

1.00ms 240,000µs 6.40 A < 10 Hz

1 2.00 V 2 10.0 A 2 RMS 14.5 A 4 Duty 47.46 %

3 10.0 A 1 2.00 V 2 Freq 1.035kHz 2 RMS 14.5 A 00:17:52

Normal Mode Uover: Spd: U1 : 300Vrms

Iover: Trq: Integ:Reset

	Element1	Element2	Element3	Element4
Voltage	A 300Vrms	A 300Vrms	A 300Vrms	A 300Vdc
Current	A 20Arms	A 20Arms	A 20Arms	A 20Adc
U [V]	178.992	181.311	181.145	250.649
I [A]	14.5032	14.2991	14.2241	9.1247
P [W]	0.72004k	0.74179k	0.73813k	2.28649k
S [VA]	2.59596k	2.59257k	2.57664k	0.00000k
Q [var]	2.49410k	-2.48419k	2.46865k	0.00000k
λ []	0.27737	0.28612	0.28647	Error
ϕ [°]	73.897	286.626	73.353	Error
fU [Hz]	6.3550k			
fI [Hz]	1.0003k			

***** Efficiency *****	
η_1	96.359 [%]
η_2	----- [%]
η_3	----- [%]

Motor	
Spd Pulse	
Trq A 1V	

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada aşağıdaki hedefler gerçekleştirilmiştir:

- Elektrik makinalarında yüksek hız kavramı tanımlanmış ve kriterler belirtilmiştir.
- Yüksek hızın sunduğu avantaj ve dezavantajlar sıralanmıştır.
- Literatürdeki yüksek hızlı elektrik makineleri ile ilgili yapılan çalışmalar detaylı olarak incelenmiş ve çeşitli yönler ile sınıflandırmalar yapılmıştır. Yüksek hızlı elektrik makinaları elektriksel-elektromanyetik, elektronik, mekanik, termodinamik ve malzeme bilimi yönleriyle incelenmiştir.
- Yüksek hızlı anahtarlama relüktans motoru spindl motoru olarak tasarlanmış, sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş, statik ve dinamik elektriksel performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Yüksek hızın gerektirdiği mekanik, akustik ve termal analizler yapılmış ve tasarım nihayetlendirilmiştir.
- Tasarım doğrulaması için anahtarlama relüktans motoru ve motor sürücüsü üretilmiş, test sistemi kurulmuştur. Statik ve dinamik testler gerçekleştirilmiştir.

Yüksek hızlı elektrik makinalarında güç kaybının çoğu demir kayıpları olarak açığa çıkmaktadır. Bu nedenle demir kayıplarının oluştuğu manyetik geçirgen laminasyon malzemesinin kayıp karakteristiği önem arz etmektedir. Bu çalışmada ilk olarak kobalt-demir alaşımlı laminasyon malzemesi (HiperCo50) yüksek hızlı anahtarlama relüktans motorunda kullanılmıştır. Bunun neticesinde, halihazırda endüstride kullanılan asenkron motor ve kalıcı mıknatıslı senkron motora alternatif olarak içinde birçok avantaj barındıran anahtarlama relüktans motoru bu çalışmayla sunulmaktadır.

KAYNAKLAR

-
- [1] Binder, A., "Tutorial " High Speed Drives "", International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2-5 October 2014, Berlin.
 - [2] Binder, A. ve Schneider, T., (2007). "High-speed Inverter-fed AC drives", 2007 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, 10-12 Eylül 2007, Bodrum.
 - [3] Tenconi, A., Vaschetto, S., ve Vigliani, A., (2014). "Electrical Machines for High-Speed Applications: Design Considerations and Tradeoffs", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61(6):3022–3029.
 - [4] Binder, A., Schneider, T., ve Klohr, M., (2005). "Fixation of Buried and Surface Mounted Magnets in High-speed Permanent Magnet Synchronous Motors", Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), 2-6 Eylül 2005, Hong Kong.
 - [5] Munteanu, G., Binder, A., ve Schneider, T., (2011). "Loss measurement of a 40 kW high-speed bearingless PM synchronous motor", IEEE Energy Conversion Congress and Exposition: Energy Conversion Innovation for a Clean Energy Future, ECCE 2011, Proceedings, 17-22 Eylül 2011, Phoenix.
 - [6] Moghaddam, R. R., (2014). "High Speed Operation of Electrical Machines, a Review on Technology, Benefits and Challenges", 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2014, (mm):5539–5546.
 - [7] Binder, A., Schneider, T., ve Klohr, M., (2006). "Fixation of Buried and Surface-Mounted Magnets in High-speed Permanent-magnet Synchronous Machines", IEEE Transactions on Industry Applications, 42(4):1031–1037.
 - [8] Gieras, J. F., (2015). "Design of permanent magnet brushless motors for high speed applications", 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2014, 22-25 Eylül 2014, Hangzhou.
 - [9] Mirzaei, M. ve Binder, A., (2008). "Permanent Magnet Savings in High Speed Electrical Motors", SPEEDAM 2008 - International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 11-13 Haziran 2008, Ischia.
 - [10] Zhu, Z. Q. ve Howe, D., (2007). "Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles", Proceedings of the IEEE, 95(4):746–765.
 - [11] Msekela, J. a. N., Materu, P. N., ve Nzali, a. H., (1996). "Development of a

- Homopolar Electrical Machine for High Power Density High Speed Applications", Proceedings of IEEE. AFRICON '96, 27 Eylül 1996, Stellenbosch.
- [12] Bianchi, N., Bolognani, S., ve Luise, F., (2006). "High Speed Drive Using a Slotless PM Motor", IEEE Transactions on Power Electronics, 21(4):1083–1090.
 - [13] Bianchi, N., Bolognani, S., ve Luise, F., (2004). "Potentials and Limits of High Speed PM Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, 40(6):1570–1578.
 - [14] Caprio, M. T., Lelos, V., Herbst, J. D., ve Upshaw, J., (2005). "Advanced Induction Motor Endring Design Features for High Speed Applications", IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 15 Mayıs 2005, San Antonio.
 - [15] Soong, W. L., Kliman, G. B., Johnson, R. N., White, R., ve Miller, J., (1999). "Novel High Speed Induction Motor for a Commercial Centrifugal Compressor", IEEE Transactions on Industry Applications 36(3):706–713.
 - [16] Zaim, M. E. H., (2009). "High-Speed Solid Rotor Synchronous Reluctance Machine Design and Optimization", IEEE Transactions on Magnetics, 45(3):1796–1799.
 - [17] Gieras, J. F., Saari, J., Sundstrand, H., ve Corporation, S., (2010). "Performance Calculation for a High Speed Solid- Rotor Induction Motor" IEEE Transactions on Industrial Electronics, 59(6):1748–1753.
 - [18] Park, J. Do, Kalev, C., ve Hofmann, H. F., (2008). "Analysis and Reduction of Time Harmonic Rotor Loss in Solid-rotor Synchronous Reluctance Drive", IEEE Transactions on Power Electronics, 23(2):985–992.
 - [19] MacMinn, S. R. ve Jones, W. D., (1989). "A Very High Speed Switched-reluctance Starter-generator for Aircraft Engine Applications", Proceedings of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference, 22-26 Mayıs 1989, Dayton.
 - [20] Rahimi, S. K. ve Sulaiman, E., (2014). "Design Investigation of Hybrid Excitation Flux Switching Machine for High-speed Electric Vehicles", Proceedings of the 2014 IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference, PEOCO 2014, 1 Mart 2014: Langkawi.
 - [21] Hofmann, H. ve Sanders, S. R., (2000). "High-speed Synchronous Reluctance Machine with Minimized Rotor Losses", IEEE Transactions on Industry Applications, 36(2):531–539.
 - [22] Tenconi, A., Vaschetto, S., ve Vigliani, A., (2014). "Electrical Machines for High-Speed Applications: Design Considerations and Tradeoffs", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61(6):3022–3029.
 - [23] Reddy, P. B. ve Jahns, T. M., (2010). "Analysis of Bundle Losses in High Speed Machines", The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA -, 21-24 Haziran 2010, Sapporo.
 - [24] Bartoli, M., Noferi, N., Reatti, A., ve Kazimierczuk, M. K., (1996). "Modeling Litz-wire Winding Losses in High-frequency Power Inductors", PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, 2 Ekim 1996, Baveno.

- [25] Aoulkadi, M., Binder, A., ve Joksimovic, G., (2005). "Additional Losses in High-Speed Induction Machine - removed Rotor Test", 2005 European Conference on Power Electronics and Applications, 11 Eylül 2005, Dresden.
- [26] Radun, A. V., (1995). "Design Considerations for The Switched Reluctance Motor", IEEE Transactions on Industry Applications, 31(5):1079–1087.
- [27] ZWYSSIG, C., ROUND, S., ve KOLAR, J., (2006). "Analytical and Experimental Investigation of a Low Torque, Ultra-high Speed Drive System", Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE, 8-12 Ekim 2006, Tampa.
- [28] Lou, J., Ding, W., ve Liu, L., (2013). "Design and Control of a High-speed Switched Reluctance Machine with Conical Magnetic Bearings for Aircraft Application", IET Electric Power Applications, 7(3):179–190.
- [29] Kolondzovski, Z., Arkkio, A., Larjola, J., ve Sallinen, P., (2011). "Power Limits of High-speed Permanent-magnet Electrical Machines for Compressor Applications", IEEE Transactions on Energy Conversion, 26(1):73–82.
- [30] Funck, R., (2015). "Composite Materials in High Efficient Sleeve Applications of Electric Machines", Analiz Raporu, Kaiserslautern .
- [31] Ultimate tensile strength, <https://www.scienceabc.com/pure-sciences/what-is-ultimate-tensile-strength.html>, 9 Ocak 2018.
- [32] Kolondzovski, Z., Sallinen, P., Belahcen, A., ve Arkkio, A., (2010). "Rotordynamic Analysis of different rotor structures for high-speed permanent-magnet electrical machines", IET Electric Power Applications, 4(7):516–524.
- [33] Boubaker, N., Matt, D., Enrici, P., Martire, T., ve Nierlich, F., "Estimation of Rotor Eddy-current Losses for High Speed SPMSM Keywords Finite-element Model and Results" Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on, 2-6 Eylül 2013, Lille.
- [34] Bianchi, N., Bolognani, S., ve Luise, F., (2004). "High Speed Drive Using a Slotless PM Motor", 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, 20-25 Eylül 2004, Aachen.
- [35] Khlystov, N., Lizardo, D., Matsushita, K., ve Zheng, J., (2013). Uniaxial Tension and Compression Testing of Materials, Lab Report.
- [36] Staunton, R. H. vd., (2004). "PM Motor Parametric Design Analyses for a Hybrid Electric Vehicle Traction Drive Application", Interim Report.
- [37] Kolondzowski, Z., (2010). Thermal and Mechanical Analyses of High-Speed Permanent-Magnet Electrical Machines, Doktora Tezi, Aalto University, Espoo.
- [38] Van Der Geest, M., Wolmarans, J. J., Polinder, H., Ferreira, J. a., ve Zeilstra, D., (2012). "Rotor Losses in Laminated Magnets and an Anisotropic Carbon Fiber Sleeve", 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012), 27-29 Mart 2012, Bristol.

- [39] Alnico Magnets for High Heat Applications, <https://www.duramag.com/techtalk/alnico-magnets/alnico-magnets-for-high-heat-applications/>, 9 Ocak 2018.
- [40] Zhou, F. Z. F., Shen, J. S. J., Fei, W. F. W., ve Lin, R. L. R., (2006). "Study of Retaining Sleeve and Conductive Shield and Their Influence on Rotor Loss in High-Speed PM BLDC Motors", IEEE Transactions on Magnetics, 42(10):3398–3400.
- [41] Hendershot, J. R., (1996). "High Speed Permanent Magnet Brushless Motors For Spindles and Compressors", White paper.
- [42] Krings, A., Boglietti, A., Cavagnino, A., ve Sprague, S., (2016). "Soft Magnetic Material Status and Trends in Electric Machines", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 46(c):1–1.
- [43] Fernando, N., Vakil, G., Arumugam, P., Amankwah, E., Gerada, C., ve Bozhko, S., (2016). "Impact of Soft Magnetic Material on Design of High Speed Permanent Magnet Machines", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 46(c):1–1.
- [44] Major, R. V., (1998). "Development of High Strength Soft Magnetic Alloys for High Speed Electrical Machines", IEE Colloquium on New Magnetic Materials - Bonded Iron, Lamination Steels, Sintered Iron and Permanent Magnets, 28 Mayıs 1998, London.
- [45] Gavrilă, H. ve Ionita, V., (2002). "Crystalline and Amorphous Soft Magnetic Materials and Their Applications - Status of Art and Challenges", Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 4(2):173–192.
- [46] Gusev, A.I. ve Rempel, A. A., (2004). Nanocrystalline Materials, Cambridge International Science Publishing, London.
- [47] Magnussen, F., (2004). On Design and Analysis of Synchronous Permanent Magnet Machines for Field-weakening Operation in Hybrid Electric Vehicles, Doktora Tezi, Stockholm.
- [48] Lawrenson, P. J., Sc, D., Fel, I. E. E. E., Eng, C., ve Stephenson, J. M., (1980). "Variable-speed Switched Reluctance Motors", Electric Power Applications, IEE Proceedings -, 127(4):253–265.
- [49] Krishnan, R., (2001). Switched Reluctance Motor Drives, CRC Press, .
- [50] Kiyota, K., Kakishima, T., ve Chiba, A., (2014). "Cylindrical Rotor Design for Acoustic Noise and Windage Loss Reduction in Switched Reluctance Motor for HEV Applications", 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Eylül 2014, Pittsburgh.
- [51] Kiyota, K., Kakishima, T., Chiba, A., ve Rahman, M. A., (2016). "Cylindrical Rotor Design for Acoustic Noise and Windage Loss Reduction in Switched Reluctance Motor for HEV Applications", IEEE Transactions on Industry Applications, 52(1):154–162.
- [52] Castano, S. M., Bilgin, B., Fairall, E., Member, S., ve Emadi, A., (2015). "Acoustic Noise Analysis of a High-Speed High-Power Switched Reluctance Machine :

- Frame Effects", IEEE Transactions on Energy Conversion, 131(1):69-77.
- [53] Cai, W., Pillay, P., ve Omekanda, A., (2001). "Low Vibration Design of SRMs for Automotive Applications Using Modal Analysis", IEMDC 2001 - IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 17-20 Haziran 2001, Cambridge.
 - [54] Islam, R. ve Husain, I., (2010). "Analytical Model for Predicting Noise and Vibration in Permanent-Magnet Synchronous Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, 46(6):2346–2354.
 - [55] Liang, X., Li, G., Ojeda, J., Gabsi, M., ve Ren, Z., (2014). "Comparative Study of Classical and Mutually Coupled Switched Reluctance Motors Using Multiphysics", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61(9):5066–5074.
 - [56] Besnerais, J. Le, Lanfranchi, V., Hecquet, M., Brochet, P., Friedrich, G., ve Member, S., (2010). "Prediction of Audible Magnetic Noise Radiated by Adjustable-Speed Drive Induction Machines", IEEE Transactions on Industry Applications, 46(4):1367–1373.
 - [57] Zou, Y., Cheng, K. E., Cheung, N. C., ve Pan, J., (2014). "Deformation and Noise Mitigation for the Linear Switched Reluctance Motor With Skewed Teeth Structure", IEEE Transactions on Magnetics, 50(11):2–5.
 - [58] Zhao, G., Hua, W., ve Cheng, M., (2015). "Analysis of a Skewed-rotor DC-excited Flux-switching Machine", 2015 IEEE Magnetics Conference (INTERMAG), 11-15 Mayıs 2015, Beijing.
 - [59] Gan, C., Wu, J., Shen, M., Yang, S., Hu, Y., ve Cao, W., (2015). "Investigation of Skewing Effects on the Vibration Reduction of Three-Phase Switched Reluctance Motors", IEEE Transactions on Magnetics, 51(9):1–9.
 - [60] Verma, S. P. ve Li, W., (2003). "Measurement of Vibrations and Radiated Acoustic Noise of Electrical Machines", Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems, 9-11 Kasım 2003. Beijing.
 - [61] Yasa, Y., Sincar, E., Tugrul, B., ve Mese, E., (2016). "A multidisciplinary design approach for electromagnetic brakes", Electric Power Systems Research, 141:165–178.
 - [62] Staton, D. A., "Improving Motor Efficiency and Motor Miniaturisation The Role of Thermal Simulation", International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2-5 Eylül 2014, Berlin.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Yusuf YAŞA
Doğum Tarihi ve Yeri : 01.08.1989 ÇAT/ERZURUM
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : yasa@yildiz.edu.tr / yasayusuf@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2013
Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2010

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2010-...	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Makaleler

1. Mese E., Yasa Y., Akca H., Aydeniz M.G. and Garip M., "Investigating Operating Modes and Converter Options of Dual Winding Permanent Magnet Synchronous Machines for Hybrid Electric Vehicles", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 30 pp. 285-295, 2014, DOI 10.1109/TEC.2014.2360714.
2. Yasa Y., Sincar E., Ertugrul B.T. Mese E., "A Multidisciplinary Design Approach for Electromagnetic Brakes", ELSEVIER Electric Power Systems Research, Vol. 141 pp. 165-178, Dec. 2016, DOI 10.1016/j.epsr.2016.07.020.
3. Mese E, Yasa Y., Ertugrul B.T., Sincar E., "Unbalanced Distributed and Balanced Concentrated Winding Comparison in Servo Motor Applications ELSEVIER Electric Power Systems Research, DOI 10.1016/j.epsr.2017.11.013.
4. Yasa Y., Mese E., "Thermal Assessment of Outer Rotor Direct Drive Gearless Small-Scale Wind Turbines" World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Environmental and Ecological Engineering, DOI 10.1999/1307-6892/10002406
5. Yasa Y, Sozer Y, Garip M, "Loss Analysis of High Speed Switched Reluctance Machine with Integrated Simulation Methods," IOS Press International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Kabul edildi.

Uluslararası Bildiriler

1. Y. Yasa, M. Elamin, Y. Sozer, J. Kutz, JS. Tylanda, RL. Wright, "Acoustic noise mitigation for high pole count switched reluctance machines through skewing method with multiphysics FEA simulations," Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2017 IEEE, 738-744, Cincinnati, OH, USA.
2. Elamin, Mohammed; Yasa, Yusuf; Elrayyah, Ali; Sozer, Yilmaz, "Performance Improvement of the Delta-connected SRM Driven by a Standard Three Phase Inverter," 2017 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 21-24 May 2017, Miami, FL, USA.
3. Elamin, Mohammed; Yasa, Yusuf; Sozer, Yilmaz; Kutz, John; Tylanda, Joshua; Wright, Ronnie L., "Effects of Windows in Stator and Rotor Poles of Switched Reluctance Motors in Reducing Noise and Vibration," 2017 IEEE International

Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 21-24 May 2017, Miami, FL, USA.

4. Yusuf Yasa; Didem Tekgun; Yilmaz Sozer; John Kutz; Joshua Tylanda, "Effect of distributed airgap in the stator for acoustic noise reduction in switched reluctance motors," 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 26-30 March 2017, Tampa, FL, USA, USA
5. Hashim H. M, Yasa Y., Dogruoz M.B., Arik M., Mese E, "Investigation of Power Distribution on an Axial Fan" IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 2016, Las Vegas, Nevada-USA. 4
6. Ting N. S, Yasa Y., Aksoy İ., Sahin Y., "Comparison of SVPWM, SPWM and HCC Control Techniques in Power Control of PMSG used in Wind Turbine Systems," International symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems, 2015.
7. Yasa Y., Mese E., "Thermal Assessment of Outer Rotor Direct Drive Gearless Small-Scale Wind Turbines" 17th International Conference on Power and Control Engineering, 2015, Paris, France.
8. Ayaz M, Yasa Y, Mese E, Tezcan M. "Thermal Analysis of a Permanent Magnet Alternator with Auxiliary Winding," XVII International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, 2015.
9. Mese E. Yasa Y., Ertugrul B. T., Sincar E., "Design of a high performance servo motor for low speed high torque application," IEEE 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2014.
10. Yasa Y., Mese E., "Design and analysis of generator and converters for outer rotor direct drive gearless small-scale wind turbines," 2014 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), 2014.
11. Yasa Y., Sincar E., Ertugrul B.T. Mese E, "Design Considerations of Electromagnetic Brakes for Servo Applications", IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) 2014.

12. Akca, H.; Yasa, Y.; Ayaz, R.; Durusu, A.; Ajder, A.; Nakir, I.; Tanrioven, M. "Thermal management of power LED system," 2014 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), 2014, Chicago, USA
13. Yasa Y., Yılmaz S. and Mese E., "Unbalanced Fault Analysis of Doubly Fed Induction Generator Drive System for Wind Turbine Applications," IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC), 2013.
14. Yasa Y., ISEN E., Sozer Y. and Mese E., "Analysis of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbine System During One Phase-to-Ground Fault," IEEE European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), 2013.
15. Yasa Y., Sozer Y. and Mese E., "Harmonic Analysis of Doubly Fed Induction Generator Based Utility Interactive Wind Turbine Systems during Fault Conditions," IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013.
16. Gürleyen H., Mese E. and Yasa Y., "Fault Ride Through of DFIG-Based Wind Turbine with Saturable Transformer Model," IEEE European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), 2013.
17. Mese E., Yasa Y. Akca H., M. Aydeniz Mustafa M., Ayaz M., Tezcan M., "Investigating Converter Options for Automotive Grade Permanent Magnet Synchronous Generators", IEEE EPECS 2013.
18. Yasa Y., Sahin E., Acar C., Gozutok R. A., Firat E., "Servo Motor Driver Design for High Performance Applications", IEEE EPECS 2013.
19. Yetis H., Boztepelı H., Yasa Y. Mese E., "Comparative Design of Direct Drive PM Synchronous Motors in Gearless Elevator Systems", IEEE EPECS 2013.
20. Mese E., Yasa Y., Akca H., Aydeniz M.G. and Garip M. "A New Electric Accessory Drive System for Hybrid Electric Vehicles", IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012.
21. Mese E., Tezcan M., Ayaz M., Yasa Y. and Yılmaz K., "Design Considerations for Dual Winding Permanent Magnet Synchronous Machines," IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012.

Ulusal Bildiriler

1. Cebeci E., Yasa Y., “Pratik Tasarım Metodlarıyla Düşürücü Tip DA-DA Dönüştürücünün Geliştirilmesi” ELECO Konferansı, 2016, Bursa, Türkiye.
2. Yasa Y, Sahin E., Acar C, Gozutok R. A, Fırat E., Mese E., “Yüksek Performanslı Servo Uygulamalar için Motor Sürücüsü Tasarımı ve Uygulaması” Enerji Verimliliği Konferansı (EVK), 2013, KartepeKocaeli, Türkiye.
3. Yasa Y., Mese E., “Lityum İyon Batarya Hücreleri için Şarj Dengeleme Sistemleri,” Enerji Verimliliği Konferansı (EVK), 2011, Kartepe-Kocaeli, Türkiye.

AKADEMİK PROJELER

1. Hibrit Araç Uygulaması İçin Kuplajsız Çift Sargılı Elektirik Makinası Tasarımı ve Denetimi. Tubitak 1001 Projesi, Sözleşme numarası: 110E111. 2010-2013.
2. Mikroşebeke Yapısına Uygun Gerilim Beslemeli İnverter Geliştirilmesi, Tubitak 3001 Projesi, 2014- 2016.
3. Investigating battery and capacitor sizing problems with more efficient power flow control techniques for sustainable hybrid electric vehicle development (AB Projesi-European Union (EU)-Marie Curie, Araştırmacı).