

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SERVO MOTORLARDA FARKLI MİKNATIS
GEOMETRİLERİ İLE MOMENT DALGALANMASININ
İNCELENMESİ

Hacı DEDECAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Makinaları ve Güç Elektronik Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK

Eş Danışman

Öğr. Gör. Dr. Mustafa Gürkan AYDENİZ

Temmuz, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SERVO MOTORLARDA FARKLI MİKNATIS
GEOMETRİLERİ İLE MOMENT DALGALANMASININ
İNCELENMESİ**

Hacı DEDECAN tarafından hazırlanan tez çalışması 23.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Öğr. Gör. Dr. Mustafa Gürkan AYDENİZ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Kamuran Nur BEKİROĞLU, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Murat TEZCAN, Üye
Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

Danışmanlarım Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK ve Öğr. Gör. Dr. Mustafa Gürkan AYDENİZ sorumluluğunda tarafımda hazırlanan “Servo Motorlarda Farklı Mıknatıs Geometrileri İle Moment Dalgalanmasının İncelenmesi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Hacı DEDECAN

İmza



Canım Aileme...

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamı tamamlamamda bana destek olan birçok değerli kişiye teşekkür etmek istiyorum.

İlk olarak, tez danışmanlarım Sn. Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK ve Sn. Öğr. Gör. Dr. Mustafa Gürkan AYDENİZ'e en içten duygularıyla teşekkür ederim. Değerli rehberlikleri, bilgileri ve cesaretlendirmeleri ile bu çalışmayı başarıyla tamamlamamı sağladılar.

Bu süreçte birlikte adımlar attığımız tez yoldaşım ve beraber çalıştığım ekip arkadaşım, ortağım, Sn. Bektaş Aybars BALTA'ya da teşekkür ederim. Ekip içindeki önemli katkıları için kıymetli ekip arkadaşım Sn. Ömer DENEK'e de ayrıca teşekkürlerimi sunarım. Birlikte geçirdiğimiz her an, birlikte aştığımız her zorluk benim için unutulmazdı; iş birliğimiz ve dayanışmamız ise çok değerliydi. Her birinizin çalışmalarımızdaki emeği, bu tezin zenginleşmesine ve olgunlaşmasına fazlasıyla katkı sağladı, çok teşekkürler...

Güzel bir çalışma ve araştırma ortamı sağladığı, tez çalışmamı desteklediği ve kaynak oluşturduğu için ASELSAN A.Ş.'ye minnettarım. Özellikle yöneticim Sn. Mustafa Burak GÜRCAN'a ve ekip liderim Sn. Hayrettin Ulaş AKOVA'ya da teşekkürlerimi iletmek istiyorum. Her zaman yanımda oldular, beni motive ettiler ve hedefimin gerçekleşmesine yardımcı oldular.

Bu süreçte bana akademik ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili arkadaşlarıma minnettarım. Sizlerin teşvikleri ve yardımları olmasaydı yolculuğumda bu kadar ilerleyemezdim.

Son olarak ama en önemlisi, hayatımın her anında hep yanımda olan Canım Aileme en samimi duygularıyla sonsuz şükranlarımı sunarım. Beni her zaman destekleyip cesaretlendirdiler ve bu süreçte de yanımda oldular. Onların maddi ve manevi desteği sayesinde bu tez çalışmasını başarıyla tamamlıyorum.

Her birinize olan minnettarlığımı ifade etmek için kelimeler yetersiz kalabilir. Ancak hepinizin katkıları ve desteği benim için çok kıymetlidir, iyi ki varsınız...

Hacı DEDECAN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xv
ÖZET	xvi
ABSTRACT	xviii
1 GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	3
1.2 Literatür Özeti	6
2 SÜREKLİ MİKNATISLI SENKRON MOTORLAR	22
2.1 Genel Özellikler	22
2.2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Çeşitleri.....	26
2.2.1 Akı Yönüne Göre Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar	26
2.2.2 Rotor Konumuna Göre Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar	28
2.2.3 Mıknatısın Rotordaki Konumuna Göre Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar	29
2.2.4 Sarım Şekline Göre Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar	32
2.2.5 Stator Yapısına Göre Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar	33
2.2.6 Gövde Yapısına Göre Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar	36
2.3 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Matematiksel Modeli	39
2.4 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Moment Dalgallılığı ve Bileşenleri..	44
3 SERVO MOTORUN NÜMERİK MODELLEMESİ	46
3.1 Manyetik Modelleme	47
3.1.1 Malzeme Bilgileri	53
3.2 Analiz Sonuçları.....	56
4 ALTERNATİF SERVO MOTOR TASARIMLARI	72
4.1 Mıknatıs Yüzey Öteleme Değişikliği ile Elde Edilen Alternatif Servo Motorlar	73
4.2 Mıknatıs Genişliği Değişikliği ile Elde Edilen Alternatif Servo Motorlar	80
5 SERVO MOTORLARIN ANALİZ SONUÇLARI VE KARŞILAŞTIRILMASI	87
5.1 Moment Dalgallılığı Açısından Karşılaştırma	87
5.1.1 Mıknatıs Yüzey Öteleme Değişimi Açısından Karşılaştırma.....	87

5.1.2	Mıknatıs Genişliği Değişimi Açısından Karşılaştırma	94
5.2	Vuruntu Momenti Açısından Karşılaştırma	101
5.2.1	Mıknatıs Yüzey Öteleme Değişimi Açısından Karşılaştırma	101
5.2.2	Mıknatıs Genişliği Değişimi Açısından Karşılaştırma	103
5.3	Genel Performans Açısından Karşılaştırma	106
5.4	Maliyet Açısından Karşılaştırma	110
6	SONUÇ	112
	KAYNAKÇA	116
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	120



SİMGE LİSTESİ

B_r	Artık mıknatısiyet
e	Endüklenen gerilim
H_c	Manyetik gidergenlik
i	Stator akımı
i_a	a fazı akımı
i_b	b fazı akımı
i_c	c fazı akımı
i_d	d eksenı akımı
i_q	q eksenı akımı
L	Stator endüktansı
L_{aa}	a fazı öz endüktansı
L_{ab}	a ve b fazları arası karşıt endüktans
L_{ac}	a ve c fazları arası karşıt endüktans
L_{ba}	b ve a fazları arası karşıt endüktans
L_{bb}	b fazı öz endüktansı
L_{bc}	b ve c fazları arası karşıt endüktans
L_{ca}	c ve a fazları arası karşıt endüktans
L_{cb}	c ve b fazları arası karşıt endüktans
L_{cc}	c fazı öz endüktansı
L_d	d eksenı endüktansı
L_q	q eksenı endüktansı
p	Çift kutup sayısı
P_e	Elektriksel güç
P_m	Mekanik güç
R	Stator direnci
R_a	a fazı direnci
R_b	b fazı direnci
R_c	c fazı direnci
t	Zaman
T	Moment
$T_{dalgalanma}$	Moment dalgalanması
$T_{maksimum}$	Maksimum moment

T_{minimum}	Minimum moment
T_{ortalama}	Ortalama moment
u	Stator fazlar arası gerilimi
u_a	a fazı gerilimi
u_b	b fazı gerilimi
u_c	c fazı gerilimi
v_d	d eksenı gerilimi
v_q	q eksenı gerilimi
V_s	Stator gerilimi
ψ_m	Sürekli mıknatıs akısı
ψ_{Ma}	Sürekli mıknatısın a fazında oluşturduğu akı
ψ_{Mb}	Sürekli mıknatısın b fazında oluşturduğu akı
ψ_{Mc}	Sürekli mıknatısın c fazında oluşturduğu akı
λ_a	a fazı halkanan akısı
λ_b	b fazı halkanan akısı
λ_c	c fazı halkanan akısı
λ_d	d eksenı halkalanan akısı
λ_q	q eksenı halkalanan akısı
ω_e	Elektriksel açısal hız
ω_m	Rotorun mekanik açısal hızı
θ_e	Elektriksel rotor açısı

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif Akım
AlNiCo	Alüminyum Nikel Kobalt
BLAC	Fırçasız Alternatif Akım
BLDC	Fırçasız Doğru Akım
CP	Consequent Pole
DC	Doğru Akım
EMK	Elektro-Motor Kuvveti
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi
IPM	Gömülü Sürekli Mıknatıs
I-PMSM	Gömülü Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
MMK	Manyeto-Motor Kuvveti
NdFeB	Neodmiyum Demir Bor
PM	Sürekli Mıknatıs
PMAC	Sürekli Mıknatıslı Alternatif Akım
SMSM	Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
RI-PMSM	Radyal Gömülü (Spoke Tip) Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
SI-PMSM	Yüzeye Gömülü Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
SM	Yüzey Montajlı
SmCo	Samaryum Kobalt
SM-PMSM	Yüzey Montajlı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
SPM	Yüzey Montajlı Mıknatıs
THD	Toplam Harmonik Distorsiyon
VI-PMSM	V Şekilli Gömülü Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Elektrik makinelerinin sınıflandırılması.....	2
Şekil 1.2	Sürekli mıknatıslı senkron motor örneği [3]	3
Şekil 1.3	Farklı mıknatıs şekilleri a) çubuk, b) somun ve c) taç yaprağı şekillerinde [5]	7
Şekil 1.4	Sürekli mıknatıslı senkron motor (SMSM) rotor topolojileri a) yüzey montajlı, b) iç yüzey montajlı, c) gömülü, d) v-şekilli gömülü ve e) radyal gömülü (spoke tip) mıknatısa sahip [7]	9
Şekil 1.5	SMSM rotor topolojileri a) radyal polarize yüzey montajlı, b) paralel polarize yüzey montajlı, c) paralel polarize gömülü, d) dairesel (spoke tip) ve e) somun tip mıknatısa sahip [8].....	10
Şekil 1.6	Dikdörtgen ve sinüzoidal mıknatıs şekli [11].....	12
Şekil 1.7	Kesit görünümleri a) orijinal rotor ve b) önerilen rotor [14].....	14
Şekil 1.8	SPM ve CP tip rotor topolojileri [15].....	15
Şekil 1.9	Moment dalgalanması azaltma yöntemleri [16].....	18
Şekil 1.10	Rotor görseli a) mıknatısa ve b) rotora kaykısı verme [17]	19
Şekil 1.11	Yönlendirilmiş mıknatıslar ve ters EMK dalga biçimleri a) radyal mıknatıslama (trapezoidal EMK) ve b) paralel mıknatıslama (sinüzoidal EMK) [18].....	19
Şekil 1.12	Mıknatıs şekilleri a) dikdörtgen, b) kelebek, c) yumurta ve d) somun şeklinde [19].....	20
Şekil 2.1	Paralel ve seri bağlı fırçalı ve kollektörlü DC motorlar [23]	23
Şekil 2.2	Fırçasız motor [24]	23
Şekil 2.3	BLDC ve SMSM için EMK dalga formu [25]	24
Şekil 2.4	SMSM bileşenleri [26]	25
Şekil 2.5	Radyal akıllı SMSM [20]	27
Şekil 2.6	Eksenel akıllı SMSM [20]	28
Şekil 2.7	SMSM gösterimi a) iç rotorlu ve b) dış rotorlu [20]	29
Şekil 2.8	Yüzey montajlı mıknatıs [20].....	29
Şekil 2.9	SPM motorun d-q eksenli endüktansları [27].....	30
Şekil 2.10	Gömülü mıknatıslı konfigürasyonlar [20].....	31
Şekil 2.11	IPM motorun d-q eksenli endüktansları [27].....	32
Şekil 2.12	Sargı yapıları a) tek katmanlı ve dağıtılmış üst üste gelen, b) tek katmanlı ve konsantre üst üste gelen, c) çift katmanlı ve konsantre üst üste gelmeyen ve d) tek katmanlı ve konsantre üst üste gelmeyen sargılar [20].....	33
Şekil 2.13	Nüvesiz statora sahip mini BLDC motor [28].....	34

Şekil 2.14 Oluklu stator yapısı [29].....	35
Şekil 2.15 Oluklu ve oluksuz motorlar [30]	35
Şekil 2.16 Çerçevesiz senkron motorlar [31].....	36
Şekil 2.17 Çerçevesiz senkron motor [32].....	37
Şekil 2.18 Servo sistem blok şeması [33].....	38
Şekil 2.19 Servo motor örneği [34]	39
Şekil 2.20 Senkron motorun 1 faz eş değer devresi [35].....	39
Şekil 2.21 Senkron motorun 3 faz eş değer devresi [27].....	40
Şekil 2.22 a-b-c fazları ve d-q eksenlerinin SMSM modelinde gösterimi [36].....	42
Şekil 2.23 d-q eksenleri için SMSM eş değer devre yapıları [37].....	42
Şekil 3.1 Elektrik motoru tasarım süreci [4].....	46
Şekil 3.2 RMXprt modülü	47
Şekil 3.3 Servo motor modeli	49
Şekil 3.4 Servo motor stator oluk yapısı.....	50
Şekil 3.5 Servo motor stator sargı yapısı.....	50
Şekil 3.6 Servo motor rotor kutup yapısı.....	50
Şekil 3.7 Nominal yükteki faz akımlarının grafikleri.....	51
Şekil 3.8 Vuruntu momenti dalga şekli	51
Şekil 3.9 Hava aralığı akı yoğunluğu	52
Şekil 3.10 Nominal hızdaki endüklenen gerilim grafikleri	52
Şekil 3.11 Nominal yükteki terminal gerilimi grafikleri	52
Şekil 3.12 Örnek bir sac için B-H karakteristiği [38].....	54
Şekil 3.13 Mıknatısların enerji yoğunlukları [20]	54
Şekil 3.14 Mıknatısın histeresiz çevrimi [20].....	55
Şekil 3.15 Maxwell 2D modül bilgileri.....	56
Şekil 3.16 Maxwell 2D servo motor kesiti	57
Şekil 3.17 Nominal besleme gerilimi – zaman grafiği	58
Şekil 3.18 Moment – zaman grafiği	58
Şekil 3.19 Akım – zaman grafiği.....	59
Şekil 3.20 Endüklenen gerilim – zaman grafiği	59
Şekil 3.21 Fazlar arası endüklenen gerilim – zaman grafiği	60
Şekil 3.22 Nominal gerilim beslemesi için manyetik akı yoğunluğu dağılımı	60
Şekil 3.23 Nominal gerilim beslemesi için manyetik akı çizgileri.....	61
Şekil 3.24 Nominal besleme akımı – zaman grafiği.....	62
Şekil 3.25 Nominal moment – zaman grafiği.....	62

Şekil 3.26 Nominal akım beslemesi için endüklenen gerilim – zaman grafiği	62
Şekil 3.27 Nominal akım beslemesi için fazlar arası endüklenen gerilim – zaman grafiği	63
Şekil 3.28 Nominal akım beslemesi için manyetik akı yoğunluğu dağılımı	64
Şekil 3.29 Nominal akım beslemesi için manyetik akı çizgileri	64
Şekil 3.30 Maksimum besleme akımı – zaman grafiği	65
Şekil 3.31 Maksimum moment – zaman grafiği	65
Şekil 3.32 Endüklenen gerilim – zaman grafiği	66
Şekil 3.33 Fazlar arası endüklenen gerilim – zaman grafiği	66
Şekil 3.34 Maksimum akım için manyetik akı yoğunluğu dağılımı	67
Şekil 3.35 Maksimum akım için manyetik akı çizgileri	68
Şekil 3.36 Maksimum akım için servo motorun tüm manyetik akı çizgileri	68
Şekil 3.37 Servo motorun ağ (mesh) yapısı	69
Şekil 3.38 Servo motor kesitinin ağ (mesh) yapısı	70
Şekil 3.39 Vuruntu momenti için ağ yapısı	70
Şekil 3.40 Beslemesi olmayan servo motor kesiti	71
Şekil 3.41 Vuruntu momenti – pozisyon grafiği	71
Şekil 4.1 Mıknatıs öteleme gösterimi [39]	72
Şekil 4.2 Mıknatıs genişliği gösterimi [40]	73
Şekil 4.3 41 mm mıknatıs öteleme için rotor kesiti	73
Şekil 4.4 Endüklenen gerilimin mıknatıs yüzey ötelenmesine göre değişimi	74
Şekil 4.5 Faz akımının mıknatıs yüzey ötelenmesine göre değişimi	74
Şekil 4.6 Akım yoğunluğunun mıknatıs yüzey ötelenmesine göre değişimi	75
Şekil 4.7 Momentin mıknatıs yüzey ötelenmesine göre değişimi	75
Şekil 4.8 Vuruntu momentinin mıknatıs yüzey ötelenmesine göre değişimi	75
Şekil 4.9 Verimin mıknatıs yüzey ötelenmesine göre değişimi	76
Şekil 4.10 Mıknatıs kütlelerinin mıknatıs yüzey ötelenmesine göre değişimi	77
Şekil 4.11 0 mm mıknatıs yüzey öteleme için rotor görseli	78
Şekil 4.12 10 mm mıknatıs yüzey öteleme için rotor görseli	78
Şekil 4.13 31 mm mıknatıs yüzey öteleme için rotor görseli	79
Şekil 4.14 36 mm mıknatıs yüzey öteleme için rotor görseli	79
Şekil 4.15 0,4 mıknatıs genişliği oranı için rotor görseli	81
Şekil 4.16 0,94 mıknatıs genişliği oranı için rotor kesiti	81
Şekil 4.17 Endüklenen gerilimin mıknatıs genişliğine göre değişimi	82
Şekil 4.18 Faz akımının mıknatıs genişliğine göre değişimi	82

Şekil 4.19 Akım yoğunluğunun mıknatıs genişliğine göre değişimi.....	82
Şekil 4.20 Momentin mıknatıs genişliğine göre değişimi	83
Şekil 4.21 Vuruntu momentinin mıknatıs genişliğine göre değişimi	84
Şekil 4.22 Verimin mıknatıs genişliğine göre değişimi	84
Şekil 4.23 Mıknatıs kütlelerinin mıknatıs genişliğine göre değişimi.....	84
Şekil 4.24 0,56 mıknatıs genişliği oranı için rotor görseli.....	85
Şekil 4.25 0,61 mıknatıs genişliği oranı için rotor görseli.....	86
Şekil 4.26 0,9 mıknatıs genişliği oranı için rotor görseli.....	86
Şekil 5.1 0 mm için gerilim analizi moment – zaman grafiği	87
Şekil 5.2 0 mm için 175 Arms nominal akım analizi moment – zaman grafiği	88
Şekil 5.3 0 mm için 565 Arms maksimum akım analizi moment – zaman grafiği	88
Şekil 5.4 10 mm için gerilim analizi moment – zaman grafiği	89
Şekil 5.5 10 mm için 175 Arms nominal akım analizi moment – zaman grafiği ..	89
Şekil 5.6 10 mm için 565 Arms maksimum akım analizi moment – zaman grafiği	89
Şekil 5.7 31 mm için gerilim analizi moment – zaman grafiği	90
Şekil 5.8 31 mm için 210 Arms nominal akım analizi moment – zaman grafiği ..	90
Şekil 5.9 31 mm için 565 Arms maksimum akım analizi moment – zaman grafiği	91
Şekil 5.10 36 mm için gerilim analizi moment – zaman grafiği	91
Şekil 5.11 36 mm için 225 Arms nominal akım analizi moment – zaman grafiği	92
Şekil 5.12 36 mm için 565 Arms maksimum akım analizi moment – zaman grafiği	92
Şekil 5.13 Gerilim beslemeli analiz için moment dalgalanmaları.....	93
Şekil 5.14 Nominal akım beslemeli analiz için moment dalgalanmaları	93
Şekil 5.15 Maksimum akım beslemeli analiz için moment dalgalanmaları	94
Şekil 5.16 0,56 için gerilim analizi moment – zaman grafiği.....	95
Şekil 5.17 0,56 için 225 Arms nominal akım analizi moment – zaman grafiği	95
Şekil 5.18 0,56 için 565 Arms maksimum akım analizi moment – zaman grafiği	95
Şekil 5.19 0,61 için gerilim analizi moment – zaman grafiği.....	96
Şekil 5.20 0,61 için 220 Arms nominal akım analizi moment – zaman grafiği	96
Şekil 5.21 0,61 için 565 Arms maksimum akım analizi moment – zaman grafiği	97
Şekil 5.22 0,9 için gerilim analizi moment – zaman grafiği.....	97
Şekil 5.23 0,9 için 185 Arms nominal akım analizi moment – zaman grafiği	98
Şekil 5.24 0,9 için 565 Arms maksimum akım analizi moment – zaman grafiği ..	98
Şekil 5.25 Gerilim beslemeli analiz için moment dalgalanmaları.....	99

Şekil 5.26 Nominal akım beslemeli analiz için moment dalgalanmaları	99
Şekil 5.27 Maksimum akım beslemeli analiz için moment dalgalanmaları	100
Şekil 5.28 0 mm için vuruuntu momenti – pozisyon grafiği	101
Şekil 5.29 10 mm için vuruuntu momenti – pozisyon grafiği	101
Şekil 5.30 31 mm için vuruuntu momenti – pozisyon grafiği	102
Şekil 5.31 36 mm için vuruuntu momenti – pozisyon grafiği	102
Şekil 5.32 Vuruuntu momenti genlikleri	103
Şekil 5.33 Vuruuntu momenti ortalama değerleri	103
Şekil 5.34 0,56 için vuruuntu momenti – pozisyon grafiği	104
Şekil 5.35 0,61 için vuruuntu momenti – pozisyon grafiği	104
Şekil 5.36 0,9 için vuruuntu momenti – pozisyon grafiği	104
Şekil 5.37 Vuruuntu momenti genlikleri	105
Şekil 5.38 Vuruuntu momenti ortalama değerleri	106
Şekil 5.39 Mıknatıs yüzey öteleme değişikliği için performans değerleri	107
Şekil 5.40 Mıknatıs yüzey öteleme değişikliği için moment değerleri	107
Şekil 5.41 Mıknatıs genişliği değişikliği için performans değerleri.....	108
Şekil 5.42 Mıknatıs genişliği değişikliği için moment değerleri.....	109
Şekil 5.43 Mıknatıs yüzey öteleme değişikliği için mıknatıs ağırlıkları	110
Şekil 5.44 Mıknatıs genişliği değişikliği için mıknatıs ağırlıkları.....	111

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Servo motor özellikleri	48
Tablo 3.2 Servo motorda kullanılan malzemeler	48
Tablo 3.3 “RMxprt”teki elektriksel ve manyetik hesap sonuçları	48
Tablo 3.4 Soğutma durumu için akım yoğunlukları [20].....	49
Tablo 6.1 Mıknatıs yüzey öteleme değişikliği için nominal moment, moment dalgalanması ve vuruğu momenti değişimleri	113
Tablo 6.2 Mıknatıs genişliği değişikliği için nominal moment, moment dalgalanması ve vuruğu momenti değişimleri	113
Tablo 6.3 Mıknatıs yüzey öteleme değişikliği için performans özelliklerinin değişimi.....	114
Tablo 6.4 Mıknatıs genişliği değişikliği için performans özelliklerinin değişimi	114

Servo Motorlarda Farklı Mıknatıs Geometrileri ile Moment Dalgalanmasının İncelenmesi

Hacı DEDECAN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK

Eş-Danışman: Öğr. Gör. Dr. Mustafa Gürkan AYDENİZ

Servo motorlar, sürekli mıknatıslı senkron motorların (SMSM) verimli ve hassas performans sağlayan ürünlerinden birisidir. Sürekli mıknatıslı senkron motorlar; yüksek güç yoğunluğu, sessiz çalışma, bakım gerektirmeme ve geniş çalışma hızı aralığı avantajları ile AC motorlar arasında öne çıkmaktadır. Bu sebeple ulaşım, sağlık, robotik, üretim ve savunma sektörlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

SMSM kullanımının dezavantajları da vardır. Bunların başında, SMSM'nin veya servo motorların güç elektroniği ve kontrol teknolojilerine (motor sürücüsüne) ihtiyaç duyması gelmektedir. Ancak bu alanda dünyadaki gelişmeler, SMSM'lerin standart motor olarak kabul edilmesine katkı sağlamaktadır. Bu çalışmanın da konusu olan diğer bir dezavantaj ise, moment dalgalanmasının SMSM'lerde veya servo motorlarda yüksek olmasıdır.

Servo motorların tasarımı uygulamanın beklentisine göre gerçekleştirilmelidir. Hassasiyet isteyen uygulamalarda moment dalgalanması kritik öneme sahiptir.

Çünkü momentin dalgalanması, çalışma performansını etkilemekle birlikte titreşim ve gürültü problemlerine de sebep olabilmektedir.

Bu çalışmada, servo motorların moment dalgalanması, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile farklı tasarım ve analizler gerçekleştirilerek incelenmiştir. Servo motorların moment dalgalanması, nominal ve maksimum yükleme durumları için incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Ayrıca moment dalgalanması ile birlikte maliyet, vuruğu momenti, verim ve diğer performans kriterleri de incelenerek değerlendirilmiştir.

Çalışma kapsamında, ANSYS yazılımı kullanılarak referans bir servo motor için modelleme ve analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Referans motorun stator yapısı tamamen aynı kalacak şekilde sadece rotor yapısında değişiklikler yapılmıştır. Yüzey montajlı mıknatısa (SPM) sahip olan referans servo motorun, mıknatıs genişliği (magnet embrace) ve mıknatıs yüzey öteleme (magnet offset) parametreleri değiştirilerek alternatif tasarımlar elde edilmiştir. Bu tasarımların, referans motorla benzer şekilde FEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Böylece referans servo motorla karşılaştırılacak performans sonuçları elde edilmiştir.

Yapılan çalışmalarda, moment dalgalanmasının iyileştirilebildiği gözlenmiştir. Ancak iyileşme miktarına bağlı olarak performans kayıpları oluşabilmektedir. Dolayısıyla servo motorun kullanılacağı uygulamaya göre ilgili tasarım seçilmelidir. Moment dalgalanmasının çok düşük olması istenen uygulamalarda verim, moment, akım ve ısınma gibi temel performans kriterlerinden taviz verilmesi gerekebilir.

Anahtar Kelimeler: Servo motor, moment dalgalanması, mıknatıs geometrisi, sürekli mıknatıslı senkron motor, vuruğu momenti.

Investigation of Torque Ripple in Servo Motors with Different Magnet Geometries

Hacı DEDECAN

Department of Electrical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Engin AYÇİÇEK

Co-supervisor: Lect. PhD Mustafa Gürkan AYDENİZ

Servo motors are among the products that provide efficient and precise performance in the category of Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSMs). PMSMs stand out among AC motors due to their high power density, quiet operation, no-maintenance, and wide operating speed range. Consequently, they find extensive use in transportation, healthcare, robotics, manufacturing, and defense sectors.

However, the use of PMSMs has its disadvantages. Foremost among these is their reliance on power electronics and control technologies (motor drives). Despite this requirement, advancements in the field contribute to the widespread acceptance of PMSMs as standard motors. Another significant disadvantage, explored in this study, is the high torque ripple present in PMSMs or servo motors.

The design of servo motors must align with the expectations of the application. In applications requiring precision, torque ripple becomes critically important as it not only affects operational performance but can also lead to vibration and noise issues.

This study focuses on investigating torque ripple in servo motors through various designs and analyses using the Finite Element Method (FEM). Torque ripple is examined and evaluated under nominal and maximum load conditions.

Additionally, alongside torque ripple, factors such as cost, cogging torque, efficiency, and other performance criteria are studied and evaluated.

Within the scope of this research, modeling and analysis were conducted using ANSYS software for a reference servo motor. Changes were made to the rotor structure while keeping the stator structure identical. Alternative designs were obtained by modifying parameters such as magnet embrace and magnet offset for a surface-mounted permanent magnet (SPM) reference servo motor. These designs performed FEM analyses similar to those conducted on the reference motor, allowing for performance comparisons.

The findings indicate that torque ripple can be mitigated through specific modifications. However, the extent of improvement may lead to trade-offs in performance metrics. Therefore, the selection of the appropriate design should be tailored to the specific application where the servo motor will be used. In applications demanding very low torque ripple, compromises may need to be made in fundamental performance criteria such as efficiency, torque, current, and heating.

Keywords: Servo motor, torque ripple, magnet geometry, permanent magnet synchronous motor, cogging torque.

1 GİRİŞ

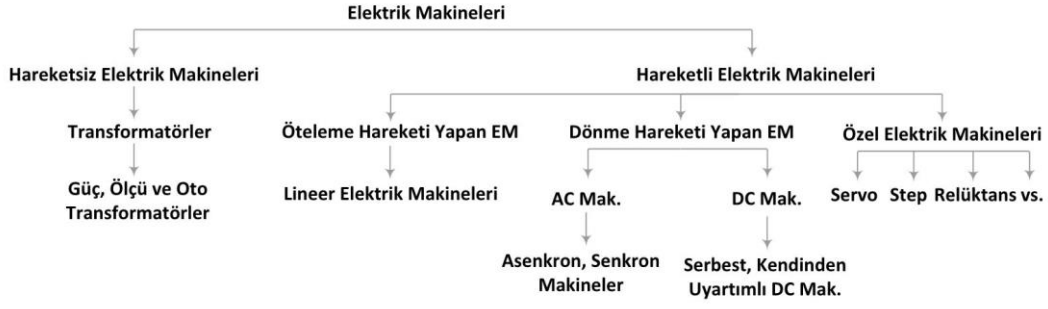
İnsan, yaşamının devamı için enerjiye sürekli olarak ihtiyaç duyar. Gerek beslenme açısından gerekse yapacağı işlerin kolaylığı açısından enerji vazgeçilmez bir yapı halini almıştır. Dünyada insan nüfusunun artması da enerji ihtiyacını sürekli olarak arttırmaktadır. Enerji kaynaklarının sınırlı olması da insanların bu kaynakları verimli kullanabilmelerini gerektirmektedir.

Elektrik makineleri, insanların günlük hayatta belli faaliyetleri yapmalarını sağlayan ve/veya bu faaliyetleri yapmalarını kolaylaştıran araçlardır. Elektrik makineleri; elektrikli ev aletlerinden gıda sektörüne, tarım ve hayvancılık uygulamalarından sağlık sektörüne, enerji üretim tesislerinden iklimlendirme sistemlerine, gemi ve denizcilik sistemlerinden sanayi uygulamalarına, otomotiv sektöründen robotik sistemlere kadar hareket gereken her alanda çok yaygın ve geniş bir kullanımı vardır. Dolayısıyla elektrik makinelerinin enerji tüketimi, günümüzde göz ardı edilemeyecek kadar yüksektir.

Elektrik makinelerinin enerji tüketim miktarı, verimliliklerinin yüksek olması ile doğrudan ilişkilidir. Elektrik makinelerinin verimlerinin artırılması için de dünyada yoğun olarak çalışmalar yürütülmektedir.

Elektrik makineleri, hareket enerjisi ile elektrik enerjisi arasında geçişi sağlayan ve elektrik enerjisinin seviyesini ihtiyaca göre değiştiren bir araçtır. Elektrik enerjisinin seviyesinin ihtiyaca göre ayarlanmasını transformatör (kısaca trafo) olarak isimlendirilen elektrik makinesi gerçekleştirir. Hareket enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesini gerçekleştirilen elektrik makinesi, generatördür. Generatör, alternatör olarak da isimlendirilebilmektedir. Elektrik enerjisinin hareket enerjisine çevrilmesini sağlayan ise, elektrik motorudur.

Elektrik makineleri; transformatörler, generatörler ve motorlar olarak 3 temel gruba ayrılmaktadır. Elektrik makineleri, sınıflandırılmasına göre birbirinden farklılaşabilmektedir. Şekil 1.1’de belirtilen hareketli elektrik makineleri generatör/alternatör ve motor olarak kullanılabilir.



Şekil 1.1 Elektrik makinelerinin sınıflandırılması

Literatürde, hareketli elektrik makinelerinin sınıflandırılması için farklı yöntemler bulunmaktadır. Örnek olarak besleme şekline, rotor yapısına veya stator yapısına göre çeşitli sınıflandırmalar yapılabilmektedir. Elektrik makineleri uyartım/besleme şekline göre doğru akım (DC) ve alternatif akım (AC) makineleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Doğru akım makineleri farklı alanlarda uzun yıllardır kullanılmaktadır.

Daha yaygın olarak kullanılması ve bu tez çalışmasına konu olması sebebiyle elektrik makinelerinin alternatif akım (AC) motor çeşidi ön planda tutularak bundan sonraki anlatımlar gerçekleştirilecektir. Dolayısıyla doğru akım (DC) makineleri/motorları bu çalışmada detaylı olarak ele alınmamıştır.

Asenkron motorlar, alternatif akım (AC) motorları ailesine bağlıdır ve endüstriyel uygulamalarda çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu durum ve enerjinin verimli kullanılması dikkate alındığında; asenkron motorların verim sınıflarını arttırmak kadar, asenkron motorlara alternatif olarak kullanılabilecek daha verimli motor tiplerine olan ihtiyaç da artmaktadır. Bu noktada senkron motorlar, asenkron motorlardan daha verimli olarak ortaya çıkmaktadır.

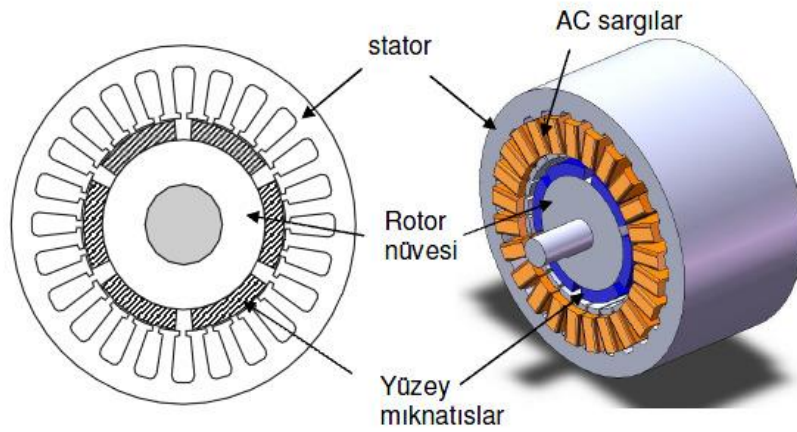
Asenkron motorlar, güvenilir olmaları ve doğru akım (DC) motorlarında bulunan fırça ile kolektör bakım maliyetlerini içermemeleri en belirgin avantajlarındandır. Diğer taraftan rotorlarında sargıların bulunması verimlerinin düşük olmasına neden olduğu gibi termal olarak da problemlere neden olur. Rotor sargılarından kaynaklanan sıcaklık nedeniyle motor parametrelerinin değişmesi de ilave bir geri bildirim olarak ele alınabilir.

Rotorunda sargı yerine mıknatıs bulunan ve bu sayede yukarıda belirtilen asenkron motorun dezavantajlı özelliklerini elimine eden elektrik makinesi olan senkron motorlar, asenkron motorlara güçlü bir alternatif olmaktadır.

Bu tez kapsamında, senkron motorun detay özellikleri üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Muhakkak ki senkron motorların da avantajlı ve dezavantajlı özellikleri vardır. Tezin ilerleyen kısımlarında bunlar detaylıca ele alınacaktır.

1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada, sağladığı avantajlar sebebiyle son yıllarda hızla popülerleşen senkron motor tiplerinden biri olan sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM) incelenmiştir (bkz. Şekil 1.2).



Şekil 1.2 Sürekli mıknatıslı senkron motor örneği [3]

Teknolojinin hızlı gelişimi ile her uygulamada olduğu gibi elektrik motoru kullanan uygulamalarda da daha yüksek kalite ve hassasiyet istenmektedir. Elektrik motorlarından beklenti, moment kalitesinin ve güç yoğunluğunun daha yüksek olması şeklindedir. Bu durum sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM) için de geçerlidir. Dolayısıyla SMSM'lerin bu isteği karşılayabilmesi için tasarım süreçleri daha da zor olmakta ve diğer motor çeşitlerine göre mıknatıs bulundurma sebebiyle yüksek moment kalitesi için tasarımda daha fazla dikkat edilmesi gerekmektedir.

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM), mıknatıs kullanımının artmasıyla birlikte kullanımı yaygınlaşan bir motor tipidir ve senkron motorlar ailesinin farklı

sektörlerde/uygulamalarda en çok kullanılan çeşididir. Sınıfında yer alan diğer motor tiplerine göre;

- yüksek güç yoğunluğu,
- yüksek verimlilik,
- hızlı ve dinamik cevap,
- sessiz çalışma,
- geniş çalışma hızı aralığı,
- bakım gerektirmeme ve dolayısıyla uzun ömürlü olma

gibi birçok avantaja sahiptir. Ancak bu avantajlarının yanında birtakım dezavantajlar da bulundurmaktadır. Özellikle yüksek moment dalgalanması SMSM'lerde öne çıkan bir dezavantajdır ve üzerinde yoğun olarak çalışılmaktadır. SMSM'lerde, tıpkı senkron motorlarda olduğu gibi, rotorda sargı yerine mıknatıs kullanılması sebebiyle moment dalgalılığı yüksek olabilmektedir. Birçok çalışmada, moment dalgalanmalarına sebep olan nedenler ortaya konularak, bu etmenlerin minimize edilmesi ile moment dalgalanmasının azaltılması hedeflenmektedir.

Güç elektroniği (yarı iletken malzeme teknolojisi ve elektronik devreler) ve kontrol teknolojileri alanlarında, dünyadaki gelişmeler sürekli mıknatıslı senkron motorların standart motor olarak kabul edilmesine katkı sağlamaktadır. İlaveten SMSM'lerin maliyeti düşmeye devam ettikçe kullanıldığı çeşitli uygulamalarda baskın güç olma fırsatına sahip olmaktadır.

SMSM'lerin tasarımı uygulamanın beklentisine göre gerçekleştirilmelidir. Hassasiyet isteyen uygulamalarda moment dalgalılığı kritik öneme sahiptir. Çünkü moment dalgalılığı, çalışma performansını etkilemekle birlikte titreşim ve gürültü problemine de sebep olabilmektedir. Bu sorunlar da yataklama elemanlarının deformasyonuna ve motorun kullanıldığı sistemdeki mekanik bileşenlere zarar vermesine kadar varabilmektedir.

Bu tez çalışmasında, SMSM'lerin moment dalgalılığına sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile farklı tasarım ve analizler gerçekleştirilerek çözüm aranmıştır. Moment dalgalılığının nominal ve maksimum moment durumlarındaki değişimi incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Literatürde moment dalgalanmasının azaltılması için farklı

metotlar uygulanmıştır. Yapılan bu çalışmada analitik çözümler ile literatürdeki bilgilerin uyumlu olduğu görülmüştür.

SMSM'lerin yukarıda belirtilen avantajlarından dolayı hemen hemen her sektörde yaygınlaşması, motor tipinin ve topolojisinin gelişime açık yönlerinin bulunması, özellikle hassasiyet istenen uygulamalarda tercih edilmesi bu konuda çalışma yapmaya yöneltmiştir. İlaveten elde edilen bilgi birikiminin ileride yapılacak çalışmalara da ışık tutması amaçlanmıştır.

Bu çalışmanın kapsamı;

- ✓ üç fazlı yüzey mıknatıslı bir SMSM'nin referans alınarak modellenmesinin ve analizlerinin yapılması,
- ✓ referans motorun statoru sabit tutularak farklı mıknatıs geometrileri ile çeşitli rotorların -ve dolayısıyla motorların- tasarlanması ve analizlerinin yapılması
- ✓ temelde moment dalgalılığı ve motor performansını gösteren bazı çıktıların dikkate alınarak tasarlanan ve analizi yapılan motorların karşılaştırılması

şeklinde. Burada amaç ve hedef, moment dalgalılığı ve önemli motor performans metriklerinin optimum olduğu tasarımı bulmaktır. Bu doğrultuda, tezin esas amacı ve kapsamı olan, belli boyut ve özelliklerdeki SMSM'ler için tasarım alternatifleri incelenerek ve değerlendirilerek çalışma yapılmıştır.

Bu tez çalışmasının bölümleri aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Bölüm 1'de elektrik makinelerinin sınıflandırılması, belirlenen elektrik motorunun genel özellikleri, çalışmanın amacı ve daha önceden yapılmış olan literatür çalışmalarından bahsedilmiştir.

Bölüm 2'de sürekli mıknatıslı senkron motorun çalışma prensibi, genel özellikleri, çeşitleri ve matematiksel modellemesi detaylıca açıklanmıştır.

Bölüm 3'te sürekli mıknatıslı senkron motor (veya servo motor) için tasarım süreci anlatılmıştır. Referans bir servo motor için modelleme ve analiz çalışmaları gerçekleştirilerek analiz sonuçları paylaşılmıştır.

Bölüm 4'te referans servo motor için belli değişkenler belirlenerek alternatif tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Bu alternatifler içerisinde belli parametreler için seçimler yapılmıştır.

Bölüm 5’te seçilen alternatif tasarımlar için analiz sonuçları paylaşılmıştır. Tez çalışması kapsamındaki tüm servo motorlar için analiz sonuçları detaylıca karşılaştırılmıştır.

Bölüm 6’da tez çalışması kapsamında yapılan faaliyetler özetlenmiş, değerlendirilmiş ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar belirtilmiştir.

1.2 Literatür Özeti

SMSM’ler uygulama alanlarına göre çeşitli özelliklere ve avantajlara sahip olmasına rağmen moment kalitesi ve performans arttırılması amacıyla literatürde üzerine pek çok çalışma gerçekleştirilmektedir.

Moment dalgalılığını azaltmak için de literatürde pek çok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bunları genel olarak iki temel başlık altında; motor tasarımıyla moment dalgalılığının azaltılması ve kontrol teknikleriyle moment dalgalılığının azaltılması şeklinde ele alabiliriz. Bu tez çalışmasına da konu olan motor tasarımı ile moment dalgalılığını azaltma yöntemleri literatürde akademik anlamda incelenmiştir.

Yapılan literatür araştırmalarında, moment dalgalanmasına etki eden parametreler genel olarak aşağıdaki şekilde listelenebilir.

1. Motor mekaniği ve üretimi kaynaklı
2. Vuruntu (cogging) momenti kaynaklı
3. Kontrolcü/elektronik kaynaklı

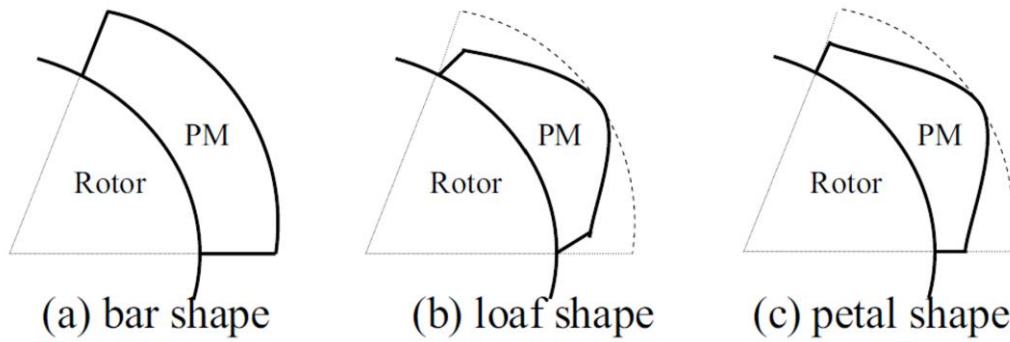
Sırasıyla bu maddelerin detayları ve nedenleri de aşağıdaki gibidir.

1. Stator-rotor geometrik tasarımları, üretimleri ve tüm bileşenlerin (sarım ve mıknatıslar dahil) montajlama adımlarını kapsayan bir durumdan ortaya çıkmaktadır. Seri üretim de dahi ilk ürün ve son ürün arasında performans ve moment dalgalılığı açısından farklılıklar olabilmektedir.
2. İlk maddenin detaylarından ve en önemli performans metriklerinden birisi olduğu için ayrıca belirtilmiştir. Vuruntu momenti, rotorda bulunan mıknatısların stator ile olan etkileşiminden ortaya çıkmakta ve moment dalgalılığına doğrudan etki etmektedir.
3. Elektrik motoru sürücüsü, kontrol yöntemi ve elektronik bileşenleri içermektedir. Hem kontrol yöntemi ve algoritmalarından hem de elektronik

bileşenlerin üretimi, montajı gibi detaylarından dolayı; anahtarlanan gerilim ve motora aktarılan akımda oluşan harmonikler (veya titreşimli dalga formları), akım ölçümündeki hatalar ve faz dengesizlikleri moment dalgalılığına sebep olmaktadır. İlaveten anahtarlama sırasındaki faz geçişleri esnasında hala devrede kalan fazlar sebebiyle akımda ve dolaylı olarak moment dalgalanmasında titreşimler oluşabilmektedir.

1980’li yıllar itibari ile mıknatıs ve güç elektroniği teknolojilerinde kaydedilen önemli gelişmeler sayesinde sürekli mıknatıslı senkron motorların kullanım oranları hızlı bir şekilde artmıştır. Tercih edilme sebebi olan avantajları nedeniyle sürekli mıknatıslı motorlar fırçalı doğru akım, asenkron ve relüktans motor türlerine göre daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır.

Islam ve arkadaşları tarafından 2007 yılında yapılan çalışmada [5], rotoruna kayk (skew) verilen sürekli mıknatıslı bir motorun moment dalgalanması ve vuru momentindeki değişimi, FEM ve deneysel sonuçlar ile incelenmiştir. Çalışmada mıknatıs şeklinin de önemi vurgulanmış ve farklı mıknatıs şekilleri dikkate alınmıştır (bkz. Şekil 1.3). Moment kalitesini arttırmak için yapılan mıknatıs şekil değişikliklerinde tasarım seçimi dikkatli yapılmalıdır. Bazı motorlarda, mıknatıs şekli dikkatli bir şekilde tasarlanmamışsa, mıknatısa/rotora kayk verilmesinden sonra bile moment dalgalanmasında artış olabilmektedir.



Şekil 1.3 Farklı mıknatıs şekilleri a) çubuk, b) somun ve c) taç yaprağı şekillerinde [5]

Yapılan çalışmalar rotora kayk vermenin moment dalgalanmasını mutlaka azaltmadığını ve artmasına neden olabileceğini de göstermektedir. Bu durum, literatürde genel olarak bilinen rotora/statora kayk vermenin vuru momenti ve

moment dalgalanmasını azaltacağı varsayımının da tam olarak doğru olmadığını göstermektedir. Moment dalgalanmasını en aza indirmek için tasarım aşamasında mutlaka sonlu elemanlar analizinin (FEM) kullanılması gerekir. [5, 45]

Chaieb ve arkadaşları tarafından 2008 yılında yapılan çalışmada [6], moment dalga şeklini etkileyen çeşitli faktörler ele alınmıştır. Manyetik akının, temel endüklenen EMK dalga şeklinin ve motor geometrisinin; moment dalga şeklinin belirlenmesinde önemli faktörler olduğu gösterilmiştir. Çalışmada, EMK dalga biçimlerini iyileştirmek ve moment dalgalanmasını en aza indirmek amacıyla içten rotorlu bir motor için optimum manyetik ve geometrik parametreleri belirlemeye yönelik bir yaklaşım açıklanmıştır. Sonuçlar, uyarılma seviyesinden bağımsız olarak moment dalgalanmasının, aşağıdaki parametreler için belli oranlar seçilmesiyle en aza indirilebileceğini göstermektedir.

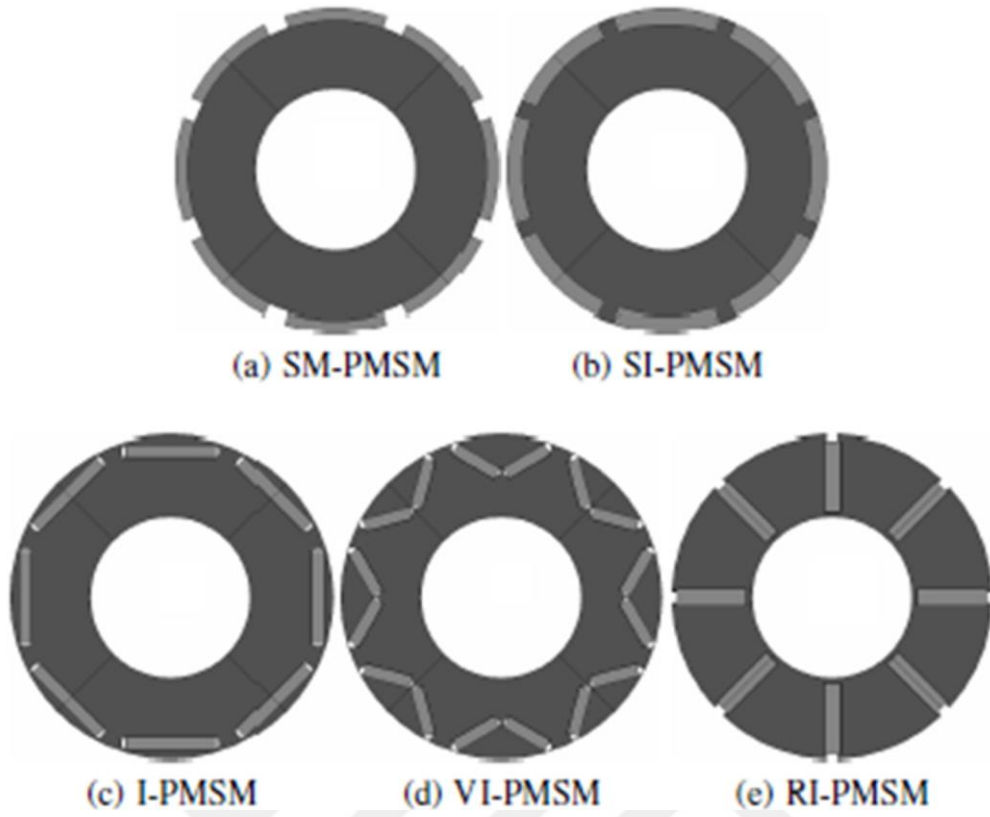
- Diş sayısı / kutup çifti sayısı
- Oluk alanı / diş alanı
- Diş genişliği açısı / mıknatıs genişliği açısı
- Mıknatıs genişliği açısı / kutup adımı

Bu parametreler için belirlenen oranlar seçilince moment dalgalılığı %17 seviyelerinden %7 seviyelerine kadar düşmektedir. Ancak bu durum elde edilen ortalama moment değerinin de düşmesine neden olmaktadır. [6]

Finken ve arkadaşları tarafından 2010 yılında yapılan çalışmada [7], sürekli mıknatıslı çeşitli rotor tipleri elektrikli araçlara ve hibrit elektrikli araçlara uygulanabilirlikleri açısından incelenmiş ve; maksimum moment ve güçleri, güç yoğunlukları, verimlilik haritaları, alan zayıflatma yetenekleri, aşırı yük kapasiteleri ve moment dalgalanmaları açılarından karşılaştırılmıştır.

Yapılan çalışmanın moment dalgalılığı kısmı, bu tez çalışmasıyla ilgili olduğu için sadece bu konudan bahsedilmiştir.

Çalışmalar 5 farklı rotor topolojisi (bkz. Şekil 1.4) için hem iki farklı kutup sayısı (4 ve 8 kutup çifti) hem de iki farklı sargı yöntemi (dağıtılmış ve konsantre sargı) açısından yapılmıştır. [7]

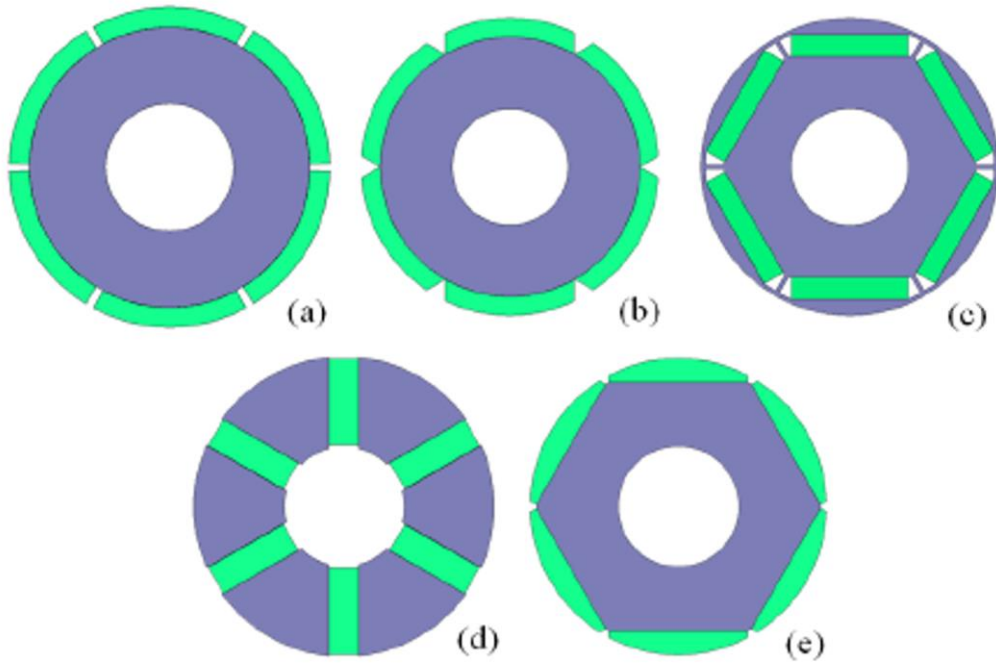


Şekil 1.4 Sürekli mıknatıslı senkron motor (SMSG) rotor topolojileri a) yüzey montajlı, b) iç yüzey montajlı, c) gömülü, d) v-şekilli gömülü ve e) radyal gömülü (spoke tip) mıknatısa sahip [7]

Mıknatıslara göre en iyi mıknatıs yoğunluğu ve dolayısıyla en iyi maliyet/fayda oranı, SM-PMSM ve SI-PMSM veya VI-PMSM'li geometriler tarafından sağlanır. Moment dalgalanması açısından motor çeşitleri ve topolojileri karşılaştırıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. [7]

- Düşük kutup sayısı ($p=4$) için; VI-PMSM dağıtılmış sargılı topoloji en iyi performansı sunmaktadır. Sargı şeklinden bağımsız olarak SM-PMSM ve I-PMSM topolojiler, benzer performansı sağlamakta ve 2. sırada yer almaktadır. SI-PMSM ve RI-PMSM topolojiler en kötü performansa sahip olmaktadır.
- Yüksek kutup sayısı ($p=8$) için; SM-PMSM dağıtılmış sargılı topoloji en iyi performansı sunmaktadır. 2. sırada SM-PMSM konsantre sargılı topoloji ve sargı şeklinden bağımsız olarak VI-PMSM topoloji yer almakta ve benzer performansı sergilemektedir. Diğer topolojilerin moment dalgalılığı açısından performansı kötüdür.

Vakil ve arkadaşları tarafından 2010 yılında yapılan çalışmada [8], aynı hacimdeki sürekli mıknatıs malzemeleri ve rotor nüveleri (çekirdekleri) dikkate alınarak genel olarak kullanılan beş tip rotor topolojisi (bkz. Şekil 1.5) değerlendirilmiş, aynı stator geometrisi ve sargı uyartımları için motorların performansı karşılaştırılmıştır. Belirli mıknatıs ve rotor hacimleri olan bir SMSM için bread-loaf rotor topolojisi; en yüksek moment, en az vuruş momenti ve en az moment dalgalanması sergileyerek diğer topolojilere göre daha iyi performans sağlamaktadır. Yüzey montajlı (SM) paralel polarize rotor topolojisi ise, daha yüksek bir maliyetle bread-loaf topolojisine neredeyse eşdeğer performans sergilemektedir.



Şekil 1.5 SMSM rotor topolojileri a) radyal polarize yüzey montajlı, b) paralel polarize yüzey montajlı, c) paralel polarize gömülü, d) dairesel (spoke tip) ve e) somun tip mıknatısa sahip [8]

Paralel polarize gömülü (IPM) rotor topolojisi, geniş hızlı bir uygulama için yüksek verimlilik ve daha düşük moment dalgalanması sağlar. Ancak mıknatıs ve çekirdek malzeme yoğunluğu, diğer topolojilerle karşılaştırıldığında daha düşüktür (Aynı mıknatıs ve çekirdek malzemesi diğer rotor topolojileri için daha yüksek moment ve daha yüksek güç üretmektedir.). En yüksek moment dalgalanmasına sahip ve bu sebeple en kötü performans spoke tip topolojide gözlenmiştir. [8]

Islam ve arkadaşları tarafından 2011 yılında yapılan çalışmada [9], sinüzoidal olarak uyarılan sürekli mıknatıslı senkron motorların moment dalgalanmasını azaltmak için tasarım parametrelerinin belirlenmesine odaklanılmıştır. Böylece bu parametrelerin, moment dalgalanması ve moment doğrusallığı (torque linearity) üzerindeki hassasiyeti araştırılmıştır.

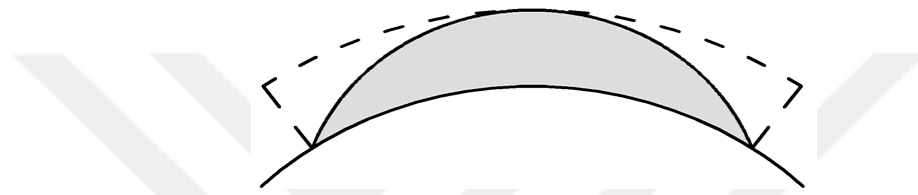
Düşük moment dalgalanması için motor tasarlarken kutup başına manyetik akı, elektriksel yük ve maliyet arasında bir tasarım dengesi gereklidir. Sürücü elektroniği ve kontrolcü ile de ilişkili olan moment dalgalanması literatürde ayrıca ele alınmaktadır. Çoğu durumda da, dalgalanma minimizasyon tekniklerinin sürücü tarafında ele alındığı görülmüştür. Kontrolcü ve sürücü elektroniğinin yanı sıra, makinenin kendisi de (örneğin oluk-kutup kombinasyonu) hem moment dalgalanmasına hem de momentin doğrusal olmamasına katkıda bulunur. Çoğu zaman, moment dalgalanmasını azaltmak için vuruğu momenti ve ters EMK'daki (elektromotor kuvveti) harmonik içerikler en aza indirilir. [9, 46]

Yapılan çalışmalar ve deneysel faaliyetler sonucunda, kutup başına artan manyetik akı ve azaltılmış elektrik yüküne sahip tasarımın daha iyi moment dalgalanma performansı sergilediğini doğrulamaktadır. İlâveten yapılan analizlerde, mıknatıs malzemesinin dalgalanma farklılıklarına büyük katkı sağlamadığını göstermektedir. Bu durum elektrik yükünün azaltılmasının moment dalgalanmasını ve moment doğrusallığını iyileştirebileceğini göstermektedir. Sonlu elemanlar analizi ve deneysel sonuçlar da bu bulguları doğrulamaktadır. [9]

Kim ve arkadaşları tarafından 2012 yılında yapılan çalışmada [10], ters EMK ve vuruğu momentinin, moment dalgalanması üzerindeki etkileri sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Sürekli mıknatıslı (PM) motorların tasarımlarında, moment dalgalanması daha iyi kontrol performansı elde etmenin önünde büyük bir engeldir ve mümkün olduğu kadar en aza indirilmelidir. Vuruğu momenti, PM motorların moment dalgalanmasını ve hassasiyetini etkileyen bir faktördür. Genel olarak, vuruğu momentinin azalmasıyla moment dalgalanması azalır. Ancak vuruğu momenti ile moment dalgalanması arasındaki ilişki her zaman bu eğilimi takip etmeyebilir. Çünkü vuruğu momentini azaltmak için uygulanan yöntemler, vuruğu momentinin yanı sıra ters EMK'nın şeklini de değiştirir ve moment dalgalanmasında bir azalmayı garanti etmez. Analiz sonuçları; üretilen momentin

dalgalanmasının, vuruuntu momenti ve ters EMK için sadece genlikler tarafından değil aynı zamanda harmoniklerin fazları tarafından da belirlendiğini göstermektedir. İlaveten ters EMK'nın toplam harmonik distorsiyon (THD) değeri, moment dalgalanmasının miktarını göstermemektedir.

Chikouche ve arkadaşları tarafından 2015 yılında yapılan çalışmada [11], hibrit bir mıknatıs şekli (bkz. Şekil 1.6) kullanılarak vuruuntu momentinin azaltılması amaçlanmıştır. Bu yapının kullanılmasıyla moment dalgalanmasının da azaldığı gözlenmiştir. Ancak önerilen yöntemdeki mıknatısın üretilmesi ve kullanımı çok yüksek maliyet gerektirmektedir.



Şekil 1.6 Dikdörtgen ve sinüzoidal mıknatıs şekli [11]

Athanasopoulos ve arkadaşları tarafından 2016 yılında yapılan çalışmada [12], SMSM bir makinenin stator yapısı aynı tutularak 4 farklı rotor topolojisi (surface PM, inset PM, interior PM, spoke type) elektromanyetik performans açısından karşılaştırılmıştır. Çalışmanın amacı; tüm modellerde mıknatısların toplam hacmi ve kalitesi, hava boşluğunun uzunluğu ve stator konfigürasyonu gibi tüm makine tasarım parametrelerinin sabit tutulmasıdır. Böylece mıknatısların rotor üzerindeki farklı konumları tek değişken olarak ele alınmıştır. Sonuçlar, yüzeye gömülü mıknatıslara (surface PM) sahip rotor topolojisinin -tüm modeller için aynı mıknatıs miktarı ve kalitesi dikkate alındığında- en yüksek elektromanyetik momenti ürettiğini ortaya koymaktadır. Ancak, bu model en olumsuz vuruuntu momentini oluşturmaktadır. Diğer motor modelleri de benzer vuruuntu momenti davranışı sergiler, ancak senkron çalışma sırasında bunlara karşılık gelen moment dalgalanması yüksektir. Moment dalgalanması açısından en iyi davranışı yüzey montajlı mıknatısa sahip rotor topolojisi sağlamaktadır.

Zeng ve arkadaşları tarafından 2020 yılında yapılan çalışmada [13], bir servo sistemdeki yüzey montajlı sürekli mıknatıslı makinenin (SM-PMSM) moment kalitesini geliştirmek için yeni yöntemler önerilmektedir. Önerilen yöntemler çeşitli harmonik kombinasyonlarını ve farklı mıknatıs tasarımlarını içermektedir. Bu

teknikler, moment dalgalanmasını azaltırken ortalama momentte önemli bir düşüşün önlenmesini sağlar. Moment dalgalanması sorununu çözmek için vuru momentinin minimizasyonu veya ters elektromotor kuvveti (EMK) optimizasyonu iyi birer adaydır.

Çok sayıda çalışmada ve literatürde, moment dalgalanmasının azaltılmasına odaklanıldığında, PM makinelerin genellikle karşılaştığı sorun ortalama momentin azalmasıdır. Momentte bir düşüş olmadan moment dalgalanmasının azaltılmasına yönelik bir yöntem bulmak, dikkat çekici ve zorlu bir görev olarak ortaya çıkmaktadır. [13]

Literatürde, PM makinenin stator geometrisini istenen vuru momentine göre şekillendirmeye yönelik yaklaşımlar rapor edilmektedir. Ayrıca mıknatıs kaydırma yoluyla toplam moment dalgalanmasının azaltılmasına yönelik geleneksel yöntemler de önerilmektedir. Sonuçlar, moment dalgalanmasının %5-20 oranında azaldığını ve toplam moment kaybının %5-7 olduğunu göstermektedir. Ek olarak, IPM ve SPM makinelerindeki moment dalgalanmasını azaltmak için mıknatıs/rotor şekli üzerine araştırmalar yoğun bir şekilde yürütülmektedir. Bu nedenle, moment dalgalanmasını azaltabilen ancak ortalama momentte önemli bir düşüşü önleyebilen bir teknik, araştırmalara ve çalışmalara oldukça konu olmaktadır. [13]

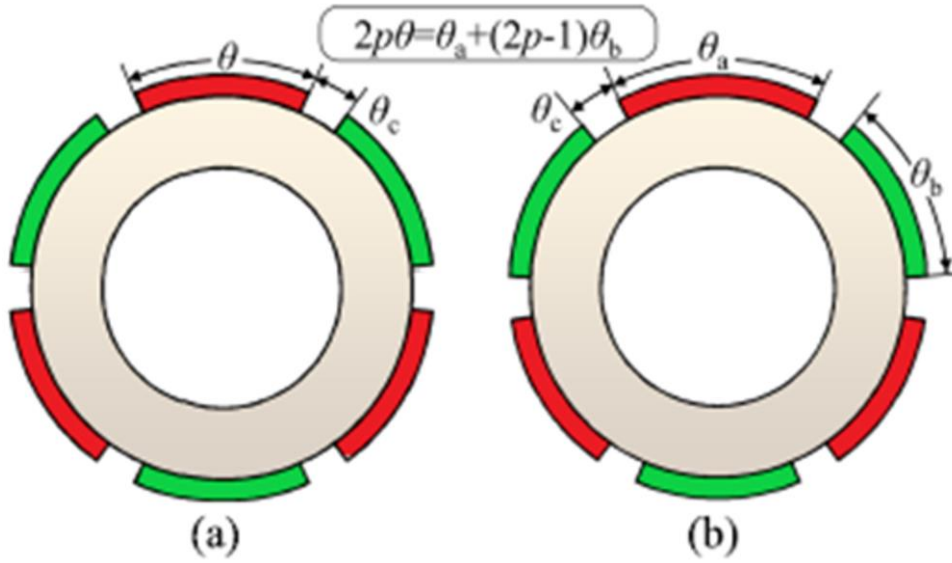
Çalışmadaki sonuçları özetlersek, orijinal ve önerilen makinelerin elektromanyetik performansı karşılaştırıldığında; önerilen makinelerin moment dalgalanmalarının orijinal makinelere göre %15 oranında azaldığı, ortalama momentlerin de ise %4 oranında bir kayıp olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmalar deneysel faaliyetler ile doğrulanmıştır. Bu çalışma, literatürdeki diğer yöntemlere göre daha efektif bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. [13]

Peng ve arkadaşları tarafından 2022 yılında yapılan çalışmada [14], SMSM için moment dalgalanmasını ve elektromanyetik titreşimi azaltmak amacıyla farklı kutup genişlikleri yaklaşımına sahip segmente rotorlu bir motor incelenmiştir.

Sürekli mıknatısların kullanılması SMSM için iki sorunu beraberinde getirir. Bunlardan biri, vuru momentinin neden olduğu moment dalgalanmasının yüksek değeridir, diğeri ise kompleks hava boşluğu manyetik alanının neden olduğu elektromanyetik titreşimdir. Bu sorunları azaltmak için literatürde çeşitli yaklaşımlar kullanılmaktadır. Günümüzde, oluklara kayk verme yaklaşımı hala

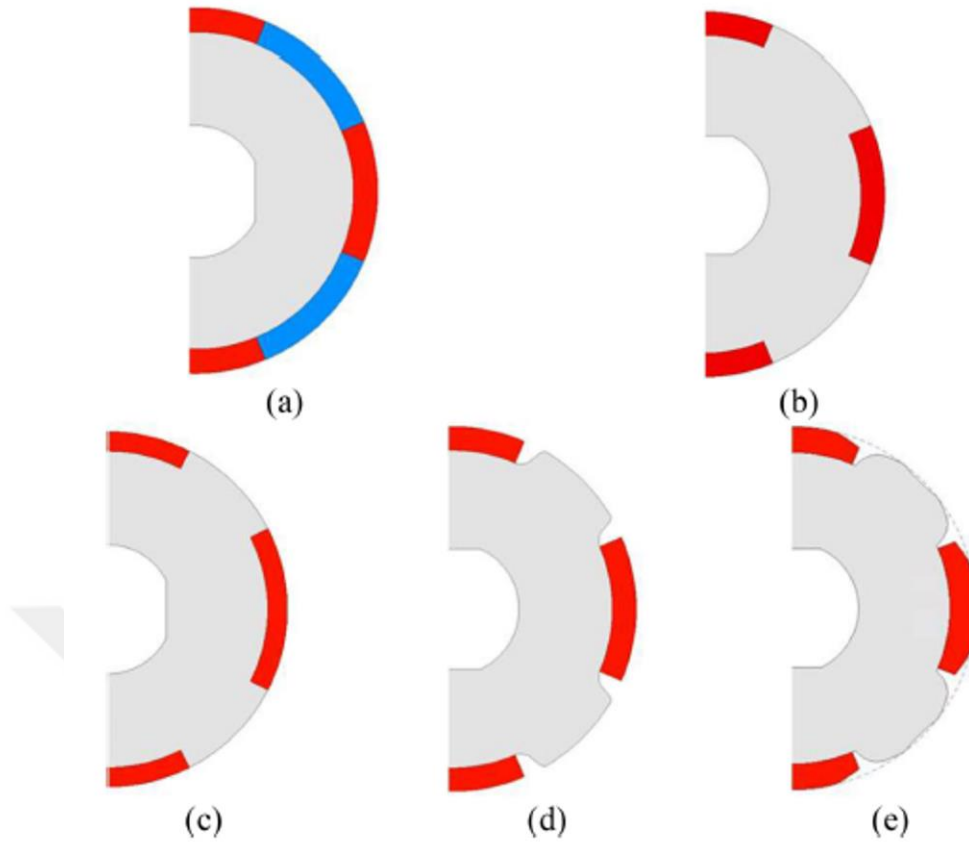
ana tercihtir. Ancak bu yaklaşım statoru karmaşık hale getirmekte, üretimi zorlaştırmakta, maliyeti arttırmakta ve makinenin aksenal uzunluk seçimini az da olsa sınırlandırabilmektedir. [14]

Çalışma kapsamında, oluklara kaykısı verilmiş referans motor ve önerilen yaklaşım (kutup genişlikleri farklı ve segmente rotor) için karşılaştırmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar üretilen prototipler ile doğrulanmıştır. Önerilen motorun ve orijinal motorun rotor kesit görünümü Şekil 1.7’de gösterilmiştir. Önerilen yöntemin kullanılmasından önce ve sonra toplam mıknatıs miktarının aynı kaldığı görülmektedir. Önerilen motordaki vurutu momenti ve moment dalgalanmasının kaykısı motorunkine yakın sonuç verdiği gözlenmiştir. Dolayısıyla normal oluklu statorun kullanılması üretim maliyetinin azalmasına yardımcı olacağı için daha avantajlıdır. Bu duruma ilave olarak önerilen motor, optimum moment sabiti değeri civarında yeterli moment performansı sergilemektedir. [14]



Şekil 1.7 Kesit görünümü a) orijinal rotor ve b) önerilen rotor [14]

Qi ve arkadaşları tarafından 2022 yılında yapılan çalışmada [15], diğer çalışmalardan farklı bir şekilde konu ele alınmıştır. SMSM için klasik bir SPM (yüzey montajlı mıknatısa sahip) topoloji ve CP (consequent pole – bağlı kutuplu) topolojinin motor performansına etkisinin karşılaştırılması, FEM ve deneysel çalışmalar ile gerçekleştirilmiştir. CP topoloji için birden fazla konfigürasyon ele alınmıştır (bkz. Şekil 1.8).



Şekil 1.8 SPM ve CP tip rotor topolojileri [15]

CP tip sürekli mıknatıslı (PM) makineler, daha geleneksel PM makine topolojilerine kıyasla mıknatıs miktarını ve dolayısıyla maliyetini azaltma olanağı sunar. Bu tür makinelerde; rotor kutup yayı, kutup şekillendirme yöntemleriyle moment dalgalanmasını azaltmak için kullanılır ve genellikle en yüksek çıkış momentini elde etmek üzere optimize edilir. Ancak bu tür yaklaşımlar, kutup şekillerine uygulanan kısıtlamalarla sınırlı olabilmektedir. [15]

Gerçekleştirilen çalışmada, farklı mıknatıs ve demir kutup şekilleri ile SPM'e göre vuruş momenti, moment dalgalanması ve kayıplar azaltılmıştır. Ancak ortalama moment değeri de düşmüştür. Bununla birlikte, relüktans moment dalgalanmasının CP'deki varlığı nedeniyle bu tasarımla moment dalgalanması daha fazla azaltılamamaktadır, bunu düşürmek için başka teknikler gerekmektedir. [15]

Suriano-Sanchez ve arkadaşları tarafından 2022 yılında yapılan çalışmada [16], radyal akılı sürekli mıknatıslı (PM) motorlar için literatürdeki birçok moment dalgalanmasının azaltılması yöntemleri ile ilgili çalışmalar ele alınmış ve

özetlenmiştir. Bu bakımdan çalışmadaki ilgili kısımlar detaylıca incelenmiş ve burada paylaşılmıştır.

Sürekli mıknatıslı (PM) motorların moment dalgalanması tasarım veya kontrol yoluyla azaltılabilmektedir. Genellikle kontrol teknikleri gözden geçirildiğinden ve tasarım yöntemleri incelenmediğinden, bu çalışma, moment dalgalanmasını farklı yaklaşımlarla azaltmak için çeşitli tasarım tekniklerinin bir karşılaştırmasını sunmakta ve bunları kategorize etmektedir. [16]

Moment dalgalanması, sürekli mıknatıslı motorlarda istenmeyen fakat doğal olan özelliklerden birisidir. Moment dalgalanmasının ana nedenleri ideal olmayan ters EMK dalga biçimleri, makinenin manyetik devresinin doygunluğu ve vuruğu momentidir. [16]

Makinenin manyetik devresinin doygunluğu, moment dalgalanmasının daha az görülen bir kaynağıdır. Çünkü getirdiği diğer sorunlar nedeniyle tasarımlarda her zaman kaçınılmaktadır. Doygunluk moment dalgalanmalarını arttırabilir, çünkü manyetik akının tamamı olması gereken yoldan geçemez. Dolayısıyla manyetik akı, mıknatısa geri dönüş yolunu bulmak için hava boşluğunda daha da ilerlemek zorundadır. Bu süreçte hava aralığı akı yoğunluğu dağılımı etkilenir ve hava aralığı akı yoğunluğu doğrudan momentle ilişkili olduğundan daha yüksek dalgalanmalar ortaya çıkabilmektedir. [16]

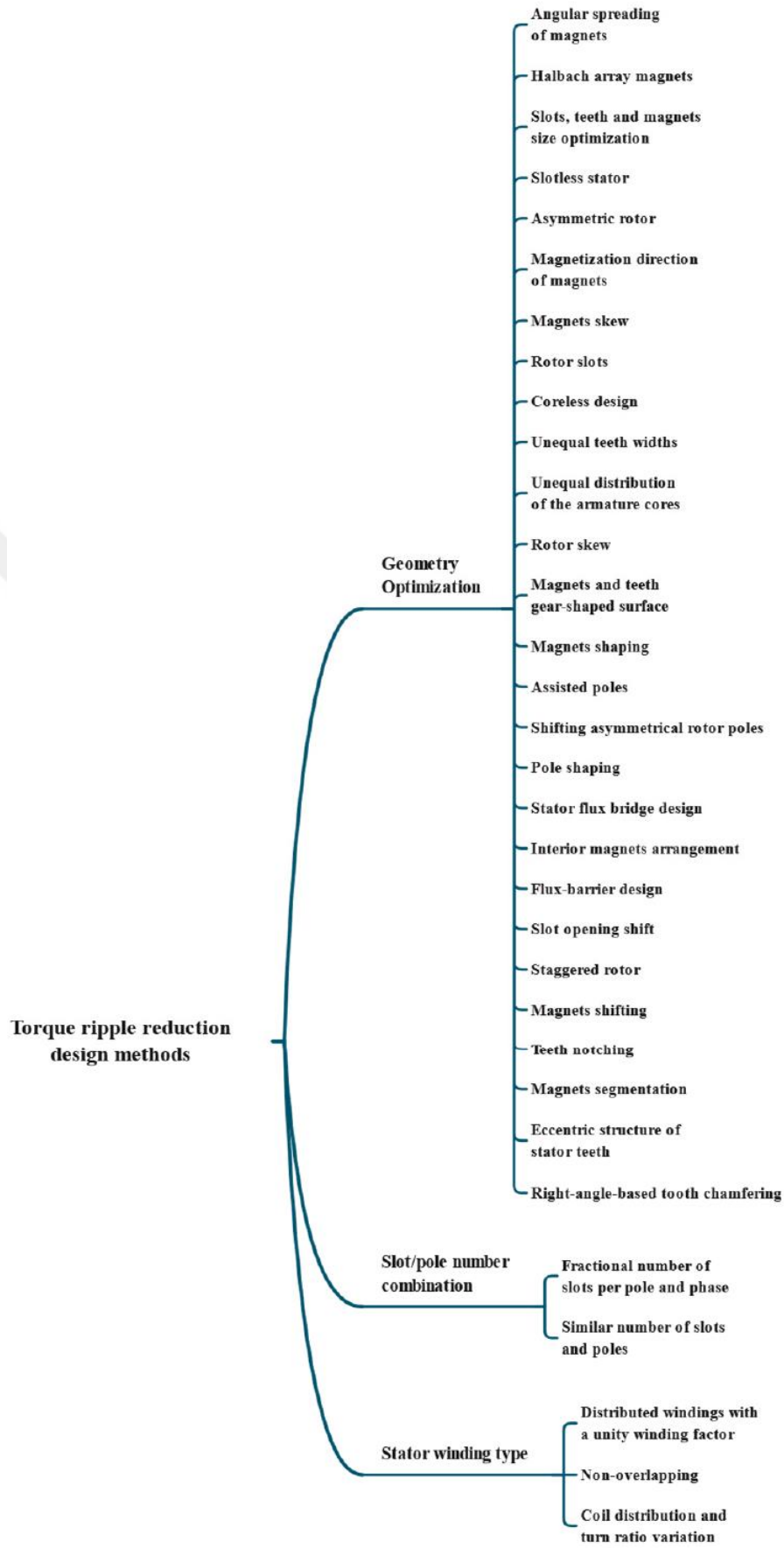
Diğer taraftan, ideal olmayan ters EMK dalga biçimleri moment dalgalanmasının önemli bir nedenidir. Hava boşluğunu geçen mıknatıs akısı nedeniyle stator sargılarında bir gerilim endüklenir. Rotor ve stator geometrileri nedeniyle endüklenen gerilimin dalga biçimi genellikle sinüzoidal değildir. Bu da, ters EMK'nın moment üretimine müdahale eden harmoniklere sahip olduğu anlamına gelmektedir. [16]

Sürekli mıknatıslı motorların yenilikleri ve tasarım metodolojileri üzerine yapılan son çalışmalarda, vuruğu momenti ve moment dalgalanmasının azaltılmasının sıklıkla araştırılan konular olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, bu alanda çok çeşitli yenilikler olmasına rağmen, moment dalgalanmasını azaltmaya yönelik kontrol teknikleri, tasarım yöntemlerinden daha sık gözden geçirilmekte ve karşılaştırılmaktadır. Çünkü makine zaten tasarlanıp optimize edildiğinden, sıklıkla kontrol yöntemleri tercih edilmektedir. İlâveten geometriyi değiştirerek moment

dalgalanmasını azaltmaya çalışmak, istenen performansı etkileyebilmektedir. Ayrıca tasarım yöntemleri üretim sürecini karmaşıktırabilir ve dolayısıyla maliyetleri arttırabilir. Diğer taraftan, moment dalgalanmasının kontrol yoluyla azaltılması ekstra elektronik devre gerektirir. Bu da daha yüksek arıza riskine ve daha fazla bakım ihtiyacına yol açar. [16]

Kontrol teknikleri, literatürde daha geniş bir şekilde gözden geçirildiğinden, bu makalenin amacı, sürekli mıknatıslı motorların çeşitli topolojilerinde moment dalgalanmasının azaltılması için farklı tasarım yöntemleri hakkında bilgi sağlamaktır. Bu amaçla tasarım yöntemleri üç grupta sınıflandırılmıştır; geometri optimizasyonu, oluk-kutup kombinasyonu ve stator sargı şekilleri. [16]

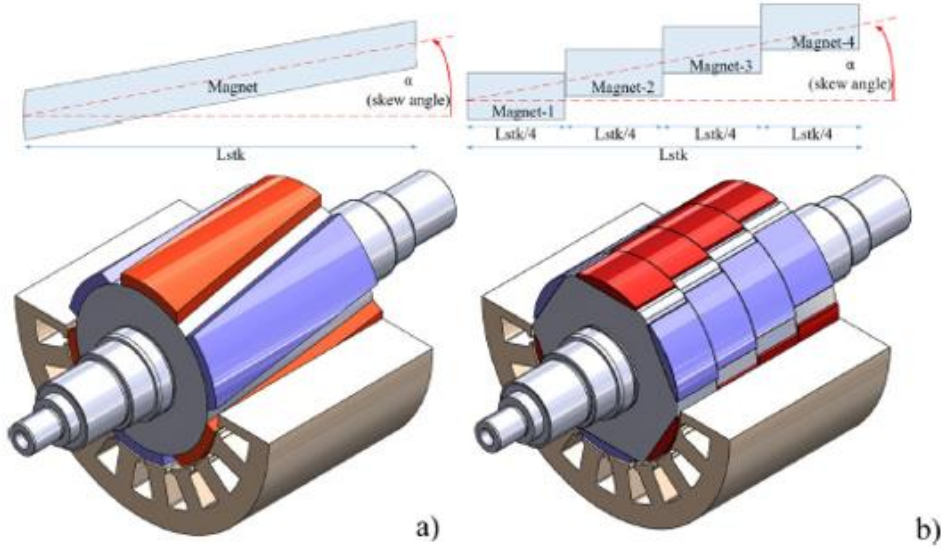
Şekil 1.9'da, incelenen genel moment dalgalanması azaltma yaklaşımları ve bunların her birindeki farklı tasarım yöntemleri gösterilmektedir. Geometri optimizasyonunun en geniş kategori olduğu, ardından stator sargı şekli ve oluk-kutup kombinasyonlarının geldiği görülmektedir. [16]



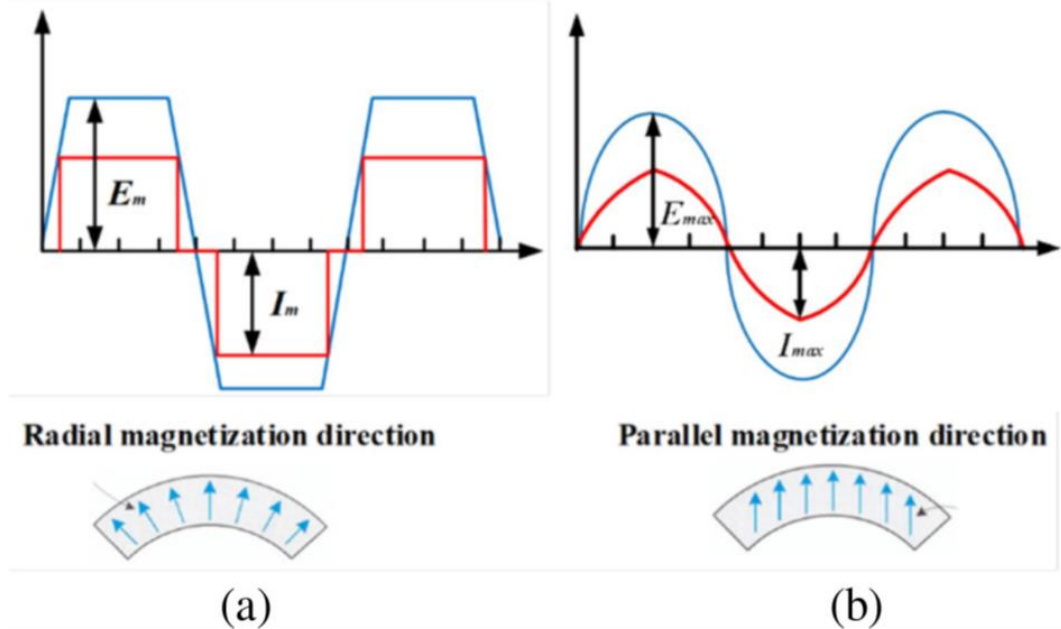
Şekil 1.9 Moment dalgalanması azaltma yöntemleri [16]

İlaveten aşağıdaki yöntemler ile mıknatısa müdahale edilen çalışmalar da literatürde yer almaktadır. [16]

- Mıknatısa/rotora kaykı verme (bkz. Şekil 1.10)
- Özel yönlendirilmiş mıknatıs çeşitleri (bkz. Şekil 1.11)
- Farklı mıknatıs şekilleri (bkz. Şekil 1.12)

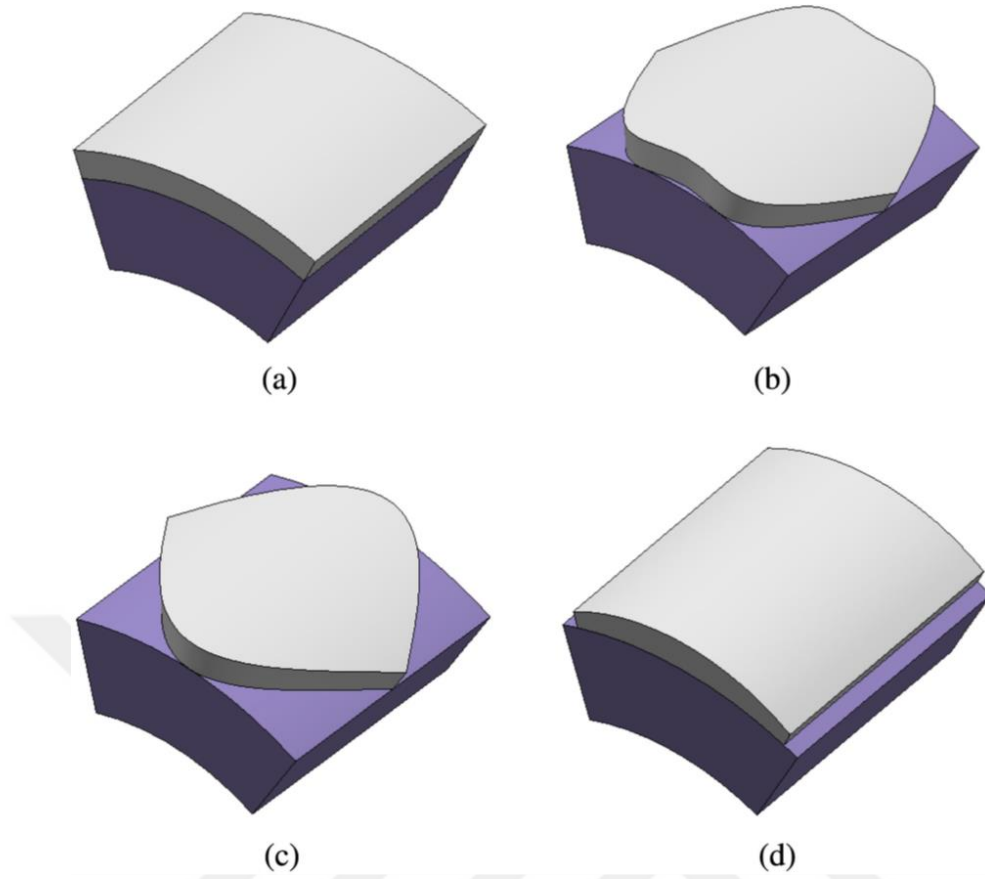


Şekil 1.10 Rotor görseli a) mıknatısa ve b) rotora kaykı verme [17]



Şekil 1.11 Yönlendirilmiş mıknatıslar ve ters EMK dalga biçimleri a) radyal mıknatıslama (trapezoidal EMK) ve b) paralel mıknatıslama (sinüzoidal EMK)

[18]



Şekil 1.12 Mıknatıs şekilleri a) dikdörtgen, b) kelebek, c) yumurta ve d) somun şeklinde [19]

İncelenen çalışmaların çoğu, ortalama momenti etkilemeden veya kullanılan sürekli mıknatıs malzemesi miktarını optimize etmeden moment değişimlerini en aza indirdiğini iddia etse bile, yalnızca birkaçı testlerin sonunda makinenin verimliliğini dikkate almıştır. Optimum enerji kullanımının her zaman istendiği günümüzde bu önemli bir sorundur. Dolayısıyla, ortalama moment söz konusu olduğunda verimlilik seviyeleri her zaman karşılaştırılmalı ve moment dalgalanmasının azaltılması ile verimlilik arasındaki denge bu tür çalışmalarda açıklanmalıdır. [16]

Yapılan çalışmada, gelecek çalışmalar için öneriler şöyledir. [16]

- Moment dalgalanmasını düşürmenin verimlilik üzerindeki etkisinin incelenmesi, bu sayede farklı uygulamalar için yöntemin uygunluğunun belirlenmesi
- Moment dalgalanmasını düşürme miktarının ne seviyede başarılı olduğunu paylaşılması

- Moment dalgalanmasını azaltmak için seçilen yöntemin farklı PM motor topolojileri üzerindeki etkisinin incelenmesi

Moment dalgalanmasını azaltmak için kullanılan tasarım yöntemleri, motor topolojisine göre farklı sonuçlara sahip olabiliyor. [16] Dolayısıyla çoğu literatür çalışmasında yapıldığı gibi, bu tez çalışması kapsamında da tek bir motor tipi için farklı tasarım yöntemleri ele alınmıştır.

Moment dalgalanmasını azaltmak için stator ve rotor tasarımında kullanılan çeşitli yöntemlerin aynı anda uygulanması da bazı yayınlarda belirtilmiştir. Özellikle asimetriyi etkileyen tasarımlar, daha karmaşık yapıları oluşturmakta, üretimi zorlaştırmakta ve maliyeti ciddi oranda arttırmaktadır. Bu sebeple moment dalgalanmasını azaltmak için kontrol/sürücü tarafında kullanılan teknikler sıklıkla popüler olmaktadır.

Ancak bu tez çalışmasında, yukarıda bahsedilen dezavantajlar kısmen göz aradı edilerek referans bir SMSM modeli için moment dalgalanmasının incelenmesi ve azaltılmasına yönelik farklı tasarım metodolojileri ele alınmıştır.

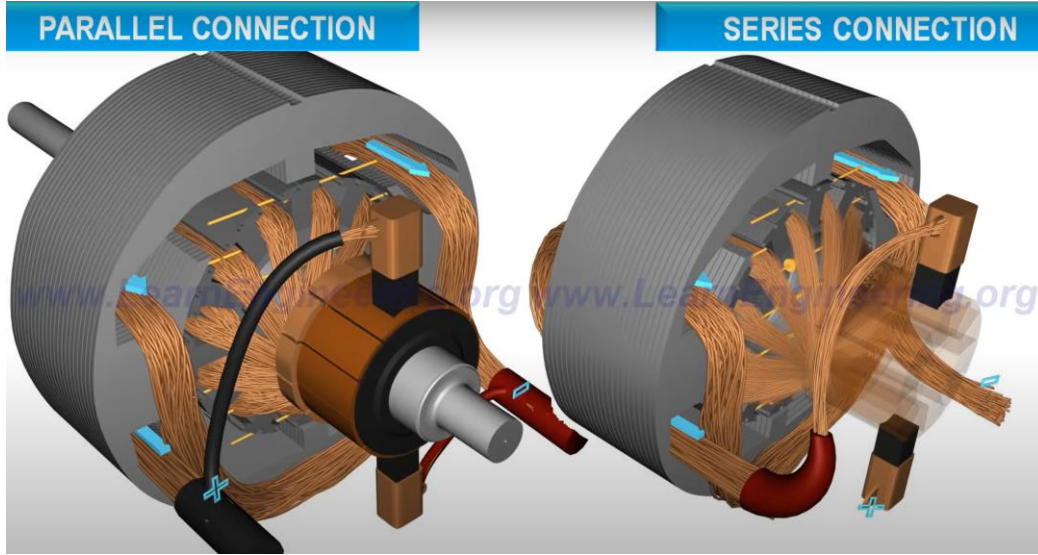
SÜREKLİ MİKNATISLI SENKRON MOTORLAR

Sürekli mıknatıslı senkron makineler, Giriş bölümünde belirtildiği üzere motorlar ve generatörler/alternatörler olarak kullanılabilir. Bu tez çalışmasına konu olması ve piyasada yaygın olarak kullanılması sebebiyle bu makinelerin, elektrik motoru özellikleri burada anlatılmıştır.

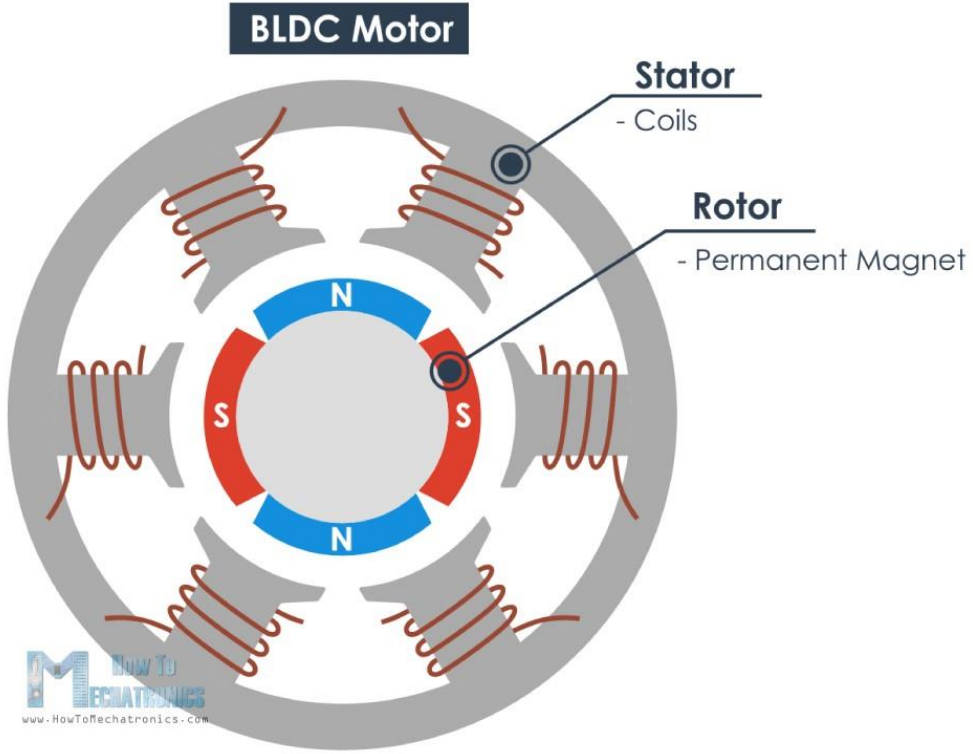
2.1 Genel Özellikler

Nadir bulunan mıknatısların, 1970-1980 yıllarında üretimindeki gelişmeler sayesinde yüksek enerjiye sahip olması ve ucuz hale gelmesi sağlanmıştır. Benzer yıllarda yarı iletken malzeme teknolojilerindeki gelişmeler de güç elektroniği ve kontrol yöntemlerindeki çalışmaları bir üst seviyeye taşımıştır. Bu gelişmeler de sürekli mıknatıslı senkron motorların (SMSM) kullanımını arttırmaya başlamıştır. Günden güne gelişmekte olan mıknatıs teknolojisi ile yüksek enerjiye sahip ve maliyeti düşük mıknatısların üretimi mümkün olmaktadır. Bu sayede sürekli mıknatısların makinelerde kullanımı her geçen gün artmakta ve yüksek güce sahip sürekli mıknatıslı motorların üretimi mümkün olmaktadır.

Doğru akım (DC) motorlarında bulunan uyarma/alan sargısı, fırçasız motorlarda (BLDC ve SMSM) yoktur (bkz. Şekil 2.1 ve Şekil 2.2). Uyarma/besleme işlemi motora yerleştirilen sabit/sürekli mıknatıslar ile sağlanmaktadır, dolayısıyla fırçasız motorlar dışardan DC uyartıma gerek duymazlar. Bu durumda, DC motorda uyarma sargısının fırça ve kolektör/bilezik yapısı ile birlikte sağladığı komütasyon işlemi, fırçasız motorlarda sabit ve sürekli olan mıknatıslar ile sağlanmaktadır. Dolayısıyla komütasyon işlemi için gereken fırça ve kolektöre ihtiyaç bulunmamaktadır. Bu sayede fırça ve kolektörün sebep olduğu dezavantajlar (ses, sürtünme, bakım ihtiyacı ve mekanik kayıplar) ortadan kalkmaktadır. Fırçasız motorlarda (BLDC ve SMSM) komütasyon işlemi ise, sensörler ve elektronik bileşenlerin desteği ile sağlanmaktadır.



Şekil 2.1 Paralel ve seri bağlı fırçalı ve kolektörlü DC motorlar [23]



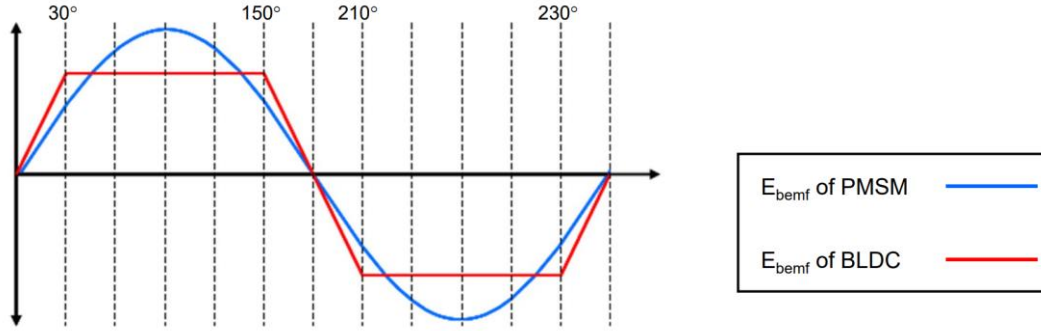
Şekil 2.2 Fırçasız motor [24]

Fırçasız motorlar (veya sürekli mıknatıslı AC motorlar (PMAC)) genel olarak ikiye ayrılır.

- Fırçasız Doğru Akım (BLDC) Motoru
- Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor (BLAC veya SMSM)

Bu motorlar, sargılarında endüklenen gerilimin (ters EMK) dalga biçimine ve kontrol yöntemine göre birbirlerinden farklılaşmaktadır.

BLDC motor, trapezoidal ve/veya kare dalga formunda EMK'ya sahip olup buna göre besleme/uyartım verilmesi gerekmektedir. SMSM ise, sinüzoidal forma sahiptir. Bu sebeple BLDC'deki moment dalgalanması SMSM'ye göre daha yüksektir. Şekil 2.3'te bu farklar gösterilmiştir.



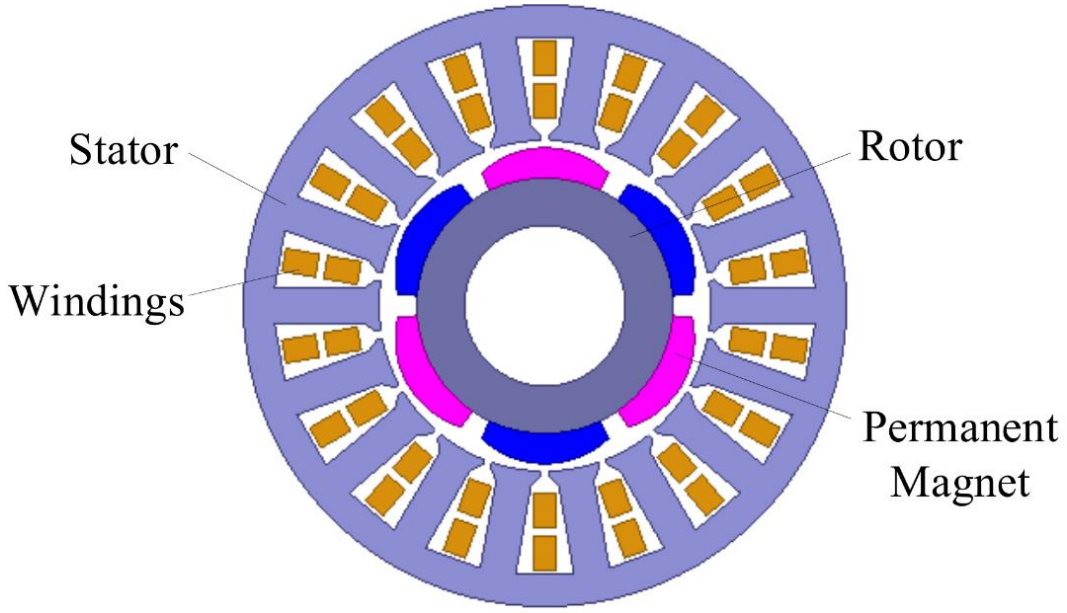
Şekil 2.3 BLDC ve SMSM için EMK dalga formu [25]

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM) veya genel olarak fırçasız motorlar, uyarma/alan sargıları olmadığı için mıknatıslar kullanılarak manyetik alan oluştururlar. Bu manyetik alan fazların (genel olarak 3 fazın) etkisiyle döner bir yapıdadır. Rotor ve manyetik alan aynı hızda dönmektedir ve bu sayede gerilim statorda endüklenir. Moment ve hız çıktıları da böylece elde edilmektedir.

SMSM'lerin rotorlarında sargı bulunmaması, sargılarda bakır kayıplarının ve sıcaklığın oluşmamasını ve verim değerinin (elektriksel ve termal açıdan) yüksek olmasını sağlamaktadır. Bu rotor yapısı sayesinde, rotorunda sargı bulunan motorlara göre, motor hacmi daha düşük ve dolayısıyla güç yoğunluğu daha yüksektir.

Elektrik motorunun çalışma prensibi, manyetik malzemelerin zıt kutuplarının birbirlerini çekmesi veya aynı kutupların birbirlerini itmesi temeline dayanmaktadır.

SMSM'lerde; rotorda mıknatıslar, rotor ve statorda ferromanyetik malzemeler (sac nüveler) ve statorda bakır sargılar bulunmaktadır (bkz. Şekil 2.4). Rotordaki mıknatıslar, itme-çekme prensibi gereği statordaki enerjili sargıları (diğer adıyla elektromıknatısları) takip etme eğilimindedir.



Şekil 2.4 SMSM bileşenleri [26]

Rotor mıknatıslarında doğal olarak ve -harici besleme sayesinde enerjili olan- stator sargılarında manyetik akılar oluşmaktadır. Statordaki akı, mıknatısların oluşturduğu akı ile sensör ve güç elektroniği devreleri (komütasyon ve anahtarlama özellikleri) sayesinde çakışık konuma getirilmektedir.

Komütasyon ve anahtarlama sayesinde statordaki enerjili sargılar ve dolaylı olarak manyetik akı değişmektedir. Rotordaki mıknatıslar da statordaki bu değişimi takip edeceği için rotor hareket edecektir. Bu hareketin kontrollü ve istenen şekilde olması için de sensör ve elektronik devreler (güç elektroniği ve kontrol teknikleri) kullanılmaktadır.

SMSM'lerde, akı yoğunluğu sınırlıdır ve hava aralığındaki akı yoğunluğu kontrol edilemez. Bu sebeple makinenin gerilimi de kolaylıkla ayarlanamaz. Dolayısıyla sensörlere ve güç elektroniği devrelerine, komütasyon işlemine ilave olarak motorun gerilimini ve kontrolünü sağlaması amacıyla da mutlaka ihtiyaç duyulmaktadır.

Düşük moment dalgalanmaları ve vuruş momenti gerektiren uygulamalarda genel olarak SMSM kullanılır. Vuruş momenti, mıknatısların stator oluklarına göre konumlarından oluşmakta ve titreşim veya moment dalgalanmalarının temel etmenlerindedir.

Hassasiyet istenen uygulamalarda (konum ve hız kontrol uygulamalarında) ve insan-makine etkileşiminin yüksek olduğu uygulamalarda, titreşim ve akustik gürültünün az olması ve kullanılan motorun düzgün çalışması için minimum moment dalgalanmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

2.2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Çeşitleri

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar;

- Akı yönüne göre
 - Radyal akılı SMSM
 - Eksenel akılı SMSM
- Rotor konumuna göre
 - İç rotorlu SMSM
 - Dış rotorlu SMSM
- Mıknatısın rotordaki konumuna göre
 - Yüzey mıknatıslı SMSM
 - Gömülü mıknatıslı SMSM
- Sarım şekline göre
 - Dağıtılmış sargılı SMSM
 - Konsantre sargılı SMSM
- Stator yapısına göre
 - Nüvesiz (coreless) SMSM
 - Oluklu SMSM
 - Oluksuz (slotless) SMSM
- Gövde yapısına göre
 - Çerçevesiz SMSM
 - Çerçevesiz (frameless) SMSM

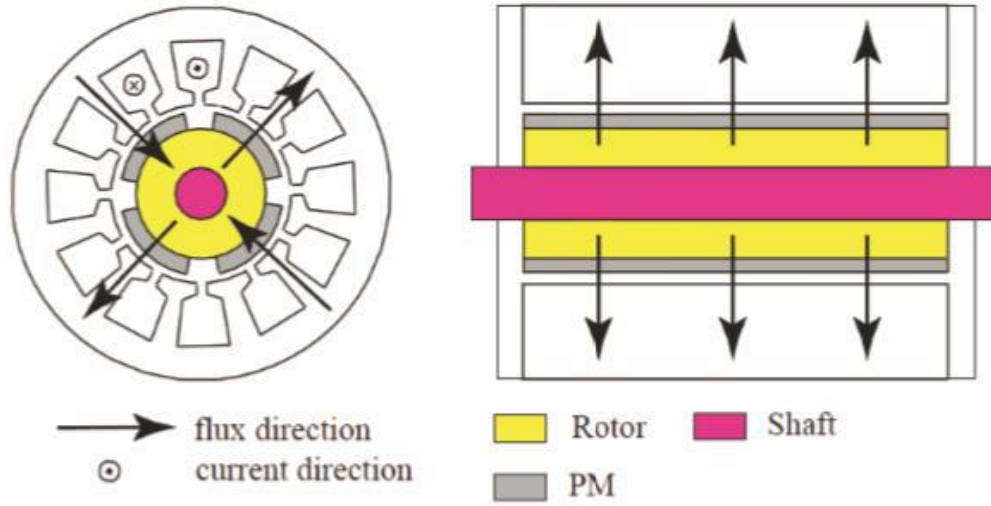
olmak üzere farklı şekillerde sınıflara ve özelliklere ayrılmaktadır. Bu sınıflar ve özellikleri ve/veya farklılıkları aşağıda kısaca açıklanmıştır.

2.2.1 Akı Yönüne Göre Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar

SMSM'ler akı yönüne göre radyal ve eksenel akılı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

2.2.1.1 Radyal Akılı SMSM

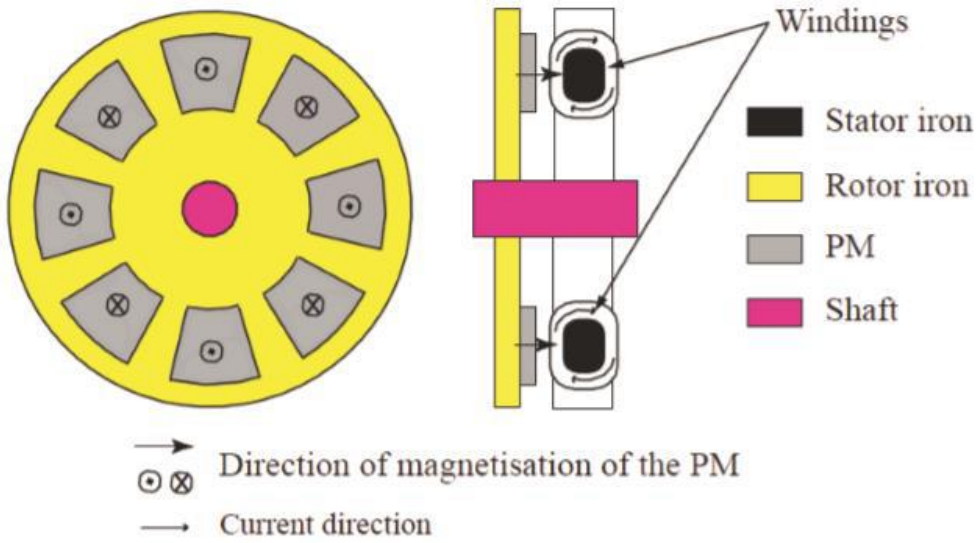
Rotor ve stator arasındaki manyetik alan, mıknatısların geometrik olarak bulunduğu konum itibarıyla radyal olarak etkileşim halindedir (bkz. Şekil 2.5). Motorun boyu/çapı büyütülerek daha büyük güçlerde makineler yapılabilir. Eksenel akılı makinelere göre daha düşük güç yoğunluğuna ve maliyete sahiptir.



Şekil 2.5 Radyal akılı SMSM [20]

2.2.1.2 Eksenel Akılı SMSM

Rotor ve stator arasındaki manyetik alan, mıknatısların geometrik olarak bulunduğu konum itibarıyla eksenel olarak etkileşim halindedir (bkz. Şekil 2.6). Boyları radyal akılı makinelere göre kısadır. En önemli avantajı yüksek moment ve güç yoğunluğuna sahip olmasıdır. Tek rotor ve tek stator ile dengeli çalışamaz, dolayısıyla iki stator veya iki rotor içeren tasarımlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Üretim zorluklarından dolayı radyal akılı makinelere göre maliyeti oldukça yüksektir.



Şekil 2.6 Eksenel akılı SMSM [20]

2.2.2 Rotor Konumuna Göre Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar

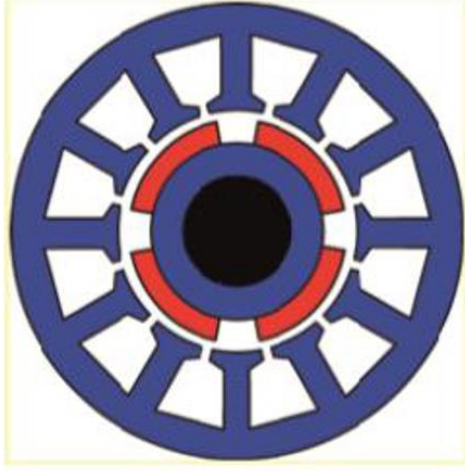
SMSM'ler rotor konumuna göre iç ve dış rotorlu olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

2.2.2.1 İç Rotorlu SMSM

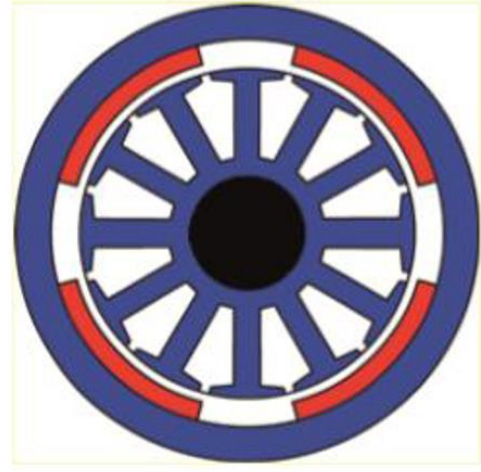
Rotorun içerde ve statorun dışarda olduğu motorlardır (bkz. Şekil 2.7). Statorun motor gövdesine ve dış dünyaya yakın olmasından dolayı sargıların soğutulması daha kolay olmaktadır. Dış rotorlu makinelerin sargı soğutma ve üretim zorluklarından dolayı iç rotorlu makineler daha çok kullanılmaktadır.

2.2.2.2 Dış Rotorlu SMSM

Rotorun dışarda ve statorun içerde olduğu motorlardır (bkz. Şekil 2.7). Dış rotorlu makineler aynı kutup adımı daha fazla mıknatıs bulundurabilir. Bu sayede birim hacimde iç rotorlu motorlara göre daha yüksek moment üretmektedir. Ayrıca mıknatıslar dış gövdeye yakın olduğu için merkezkaç kuvvetine daha iyi direnir.



a)



b)

Şekil 2.7 SMSM gösterimi a) iç rotorlu ve b) dış rotorlu [20]

2.2.3 Mıknatısın Rotordaki Konumuna Göre Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar

SMSM'ler mıknatısın rotordaki konumuna göre yüzey mıknatıslı (SPM) ve gömülü mıknatıslı (IPM) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

2.2.3.1 Yüzey Mıknatıslı SMSM

Mıknatısların rotor yüzeyine monte edildiği makinelerdir (bkz. Şekil 2.8).



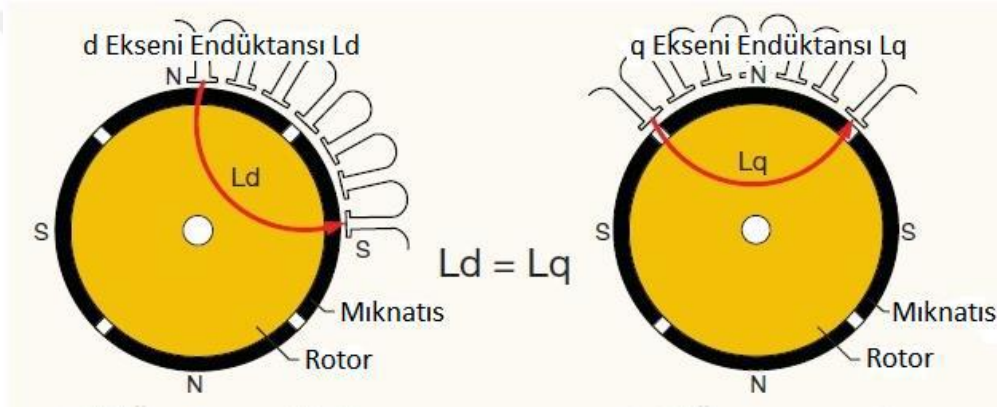
Şekil 2.8 Yüzey montajlı mıknatıs [20]

Yüzey mıknatıslı (SPM) motorlarda, hava aralığı akı yoğunluğu en yüksektir. Dolayısıyla moment yoğunluğu oldukça yüksektir. İlaveten mıknatıslar rotor

yüzeyinde olduğu için işçiliği ve maliyeti düşüktür. Bu sebeple piyasada çok yaygın olarak kullanılmaktadır.

Mıknatıslar merkezkaç kuvvetinden etkilenmemesi için rotor yüzeyine yapıştırılır ve manyetik olmayan rotor kılıfı kullanılır. Yüksek hızlı uygulamalar için bu durum sorun olduğundan kullanımı kısıtlıdır.

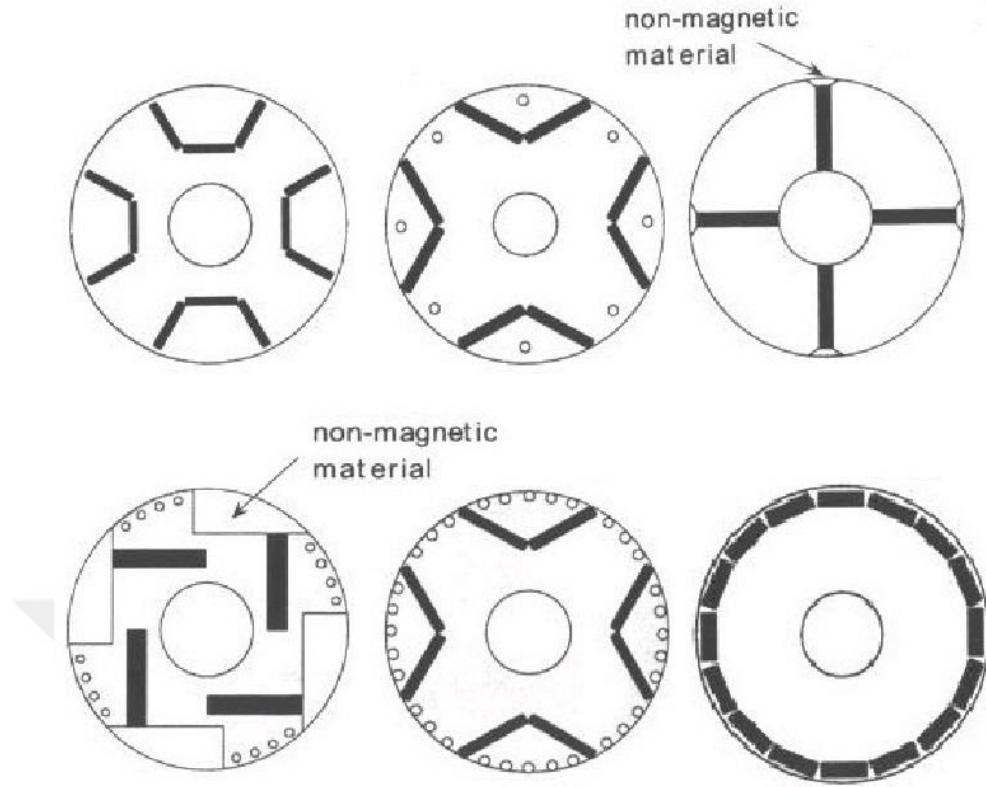
Mıknatısların manyetik geçirgenliği havanınkine yakın olduğu için SPM motordaki hava aralığı etkisi fazladır. Dolayısıyla d ve q eksenlerinin manyetik akıları neredeyse birbirine eşittir. Bu sebeple, d ve q endüktansları da rotor konumundan bağımsız olarak sabit ve eşit kabul edilir (bkz. Şekil 2.9). Bu etkilerin sonucu olarak da motorda relüktans momenti oluşmaz.



Şekil 2.9 SPM motorun d-q eksenli endüktansları [27]

2.2.3.2 Gömülü Mıknatıslı SMSM

Mıknatısların rotorun içine gömülü olduğu makinelerdir. Mıknatıs şekline göre çok farklı çeşitleri vardır (bkz. Şekil 2.10). Gömülü mıknatıs konfigürasyonunun temel amacı düşük güçlü mıknatısların kullanımını sağlamaktır.

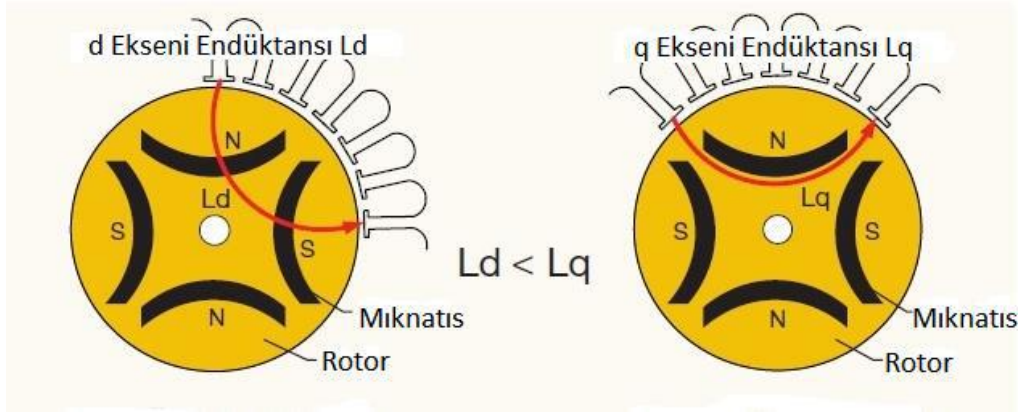


Şekil 2.10 Gömülü mıknatıslı konfigürasyonlar [20]

Gömülü mıknatıslı (IPM) motorlarda, hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunu arttırmak için mıknatıslar, -rotora gömülü olduğundan sınırlı bir hacme sahip olduğu için- radyal doğrultudan farklı açılarda rotora yerleştirilebilmektedir, bu sayede mıknatısın etkin alanı/hacmi artırılmaktadır (bkz. Şekil 2.10). Bu durum özel üretim ve işçilik gerektirdiği için IPM motorların maliyeti SPM motora göre yüksek olmaktadır.

Mıknatısın gömülerek yerleştirilmesinden dolayı merkezkaç kuvvetinin mıknatıslara herhangi bir etkisi olmamaktadır. Bu nedenle IPM motorlar, yüksek hızlı uygulamalara daha elverişlidir ve bu uygulamalarda özellikle tercih edilebilmektedir.

IPM motorlarda, mıknatısın etrafı hava yerine manyetik malzeme ile kaplı olduğu için d ve q eksenli endüktans değerleri birbirinden farklıdır (bkz. Şekil 2.11). Bu nedenle relüktans momenti oluşmaktadır.



Şekil 2.11 IPM motorun d-q eksenli endüktansları [27]

IPM motorlarda mıknatısların rotora gömülü olması sayesinde vuruğu momenti, ses ve titreşim seviyeleri SPM motorlara göre düşüktür. Ayrıca IPM motorların kontrolü (d eksenli akım bileşeninin varlığıyla birlikte), SPM'lere göre daha zordur, ancak güç elektroniğı alanındaki gelişmeler sayesinde bu tip motorların kullanımı artmaya başlamıştır.

2.2.4 Sarım Şekline Göre Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar

SMSM'ler statordaki sargıların sarım şekline göre dağıtılmış ve konsantre sargılı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

İlaveten sargıların oluklardaki dağılımına göre, tek ve çift katmanlı sargılar olarak bir sınıflandırma da yapılabilir. Tek katmanlı sargılarda, bir olukta tek faz için sarım bulunur. Çift katmanlı sargılarda ise, bir olukta iki farklı faza ait sarım bulunmaktadır. Katmanlara ait örnek bir sargı yapısı Şekil 2.12'de verilmiştir.

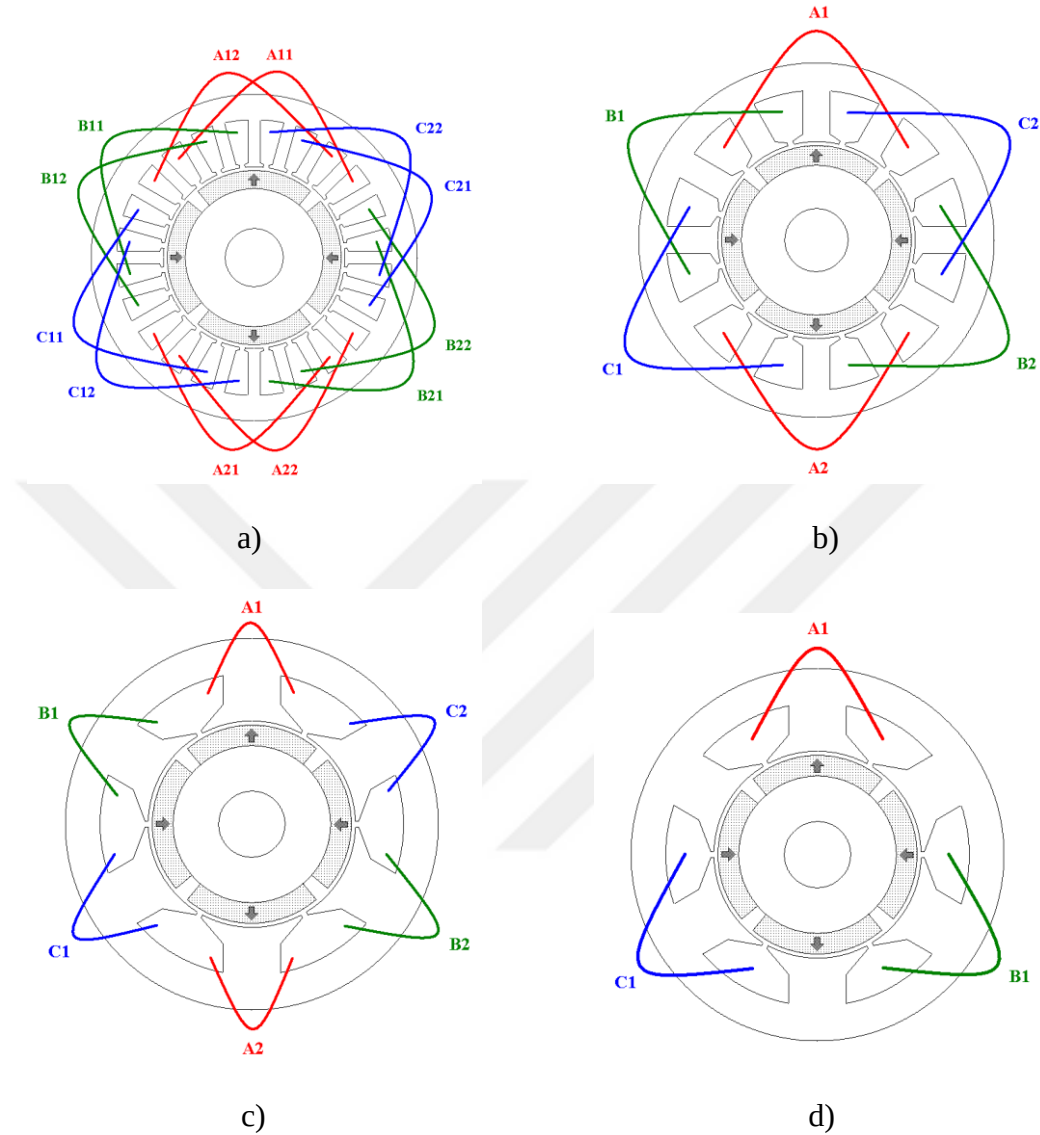
2.2.4.1 Dağıtılmış Sargılı SMSM

Geleneksel bir sarım yöntemidir. Harmonik içermeyen sinüzoidal ters EMK dalga formu için ideal sargı şeklidir. Sargı faktörleri yüksektir, fakat sargı başları uzundur. Bu da bakır kayıplarını artırarak motorun verimini düşürebilmektedir. Dağıtılmış sargı yapısı Şekil 2.12'de verilmiştir.

2.2.4.2 Konsantre Sargılı SMSM

SMSM performansını arttırmak amacıyla geleneksel dağıtılmış sargılardan daha ucuz ve kolay bir sarım yöntemi olarak ortaya çıkmıştır. Sargı başları kısadır. Sargılar dikdörtgen şeklinde yapılabilir. Bu da oluk doluluk faktörünü ve moment yoğunluğunu arttırmaktadır. İlaveten düşük vuruğu momenti açısından da

elverişlidir. Ancak konsantre sargılar kaçak endüktansı arttırırlar. Konsantre sargı yapısı Şekil 2.12’de verilmiştir.



Şekil 2.12 Sargı yapıları a) tek katmanlı ve dağıtılmış üst üste gelen, b) tek katmanlı ve konsantre üst üste gelen, c) çift katmanlı ve konsantre üst üste gelmeyen ve d) tek katmanlı ve konsantre üst üste gelmeyen sargılar [20]

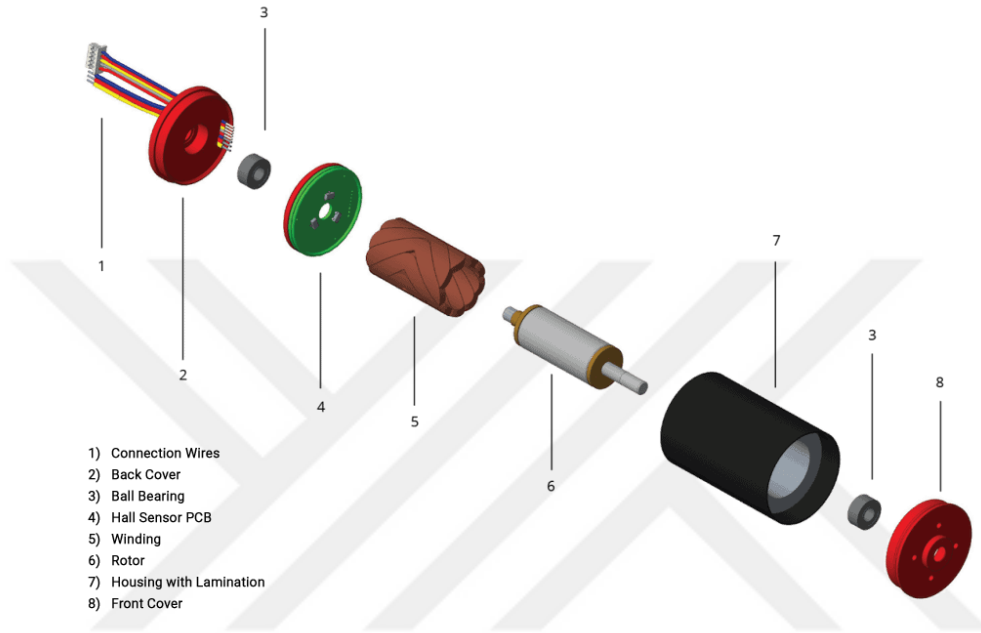
2.2.5 Stator Yapısına Göre Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar

SMSM’ler stator yapısına göre nüvesiz, oluklu ve oluksuz olmak üzere üçe ayrılmaktadır.

2.2.5.1 Nüvesiz SMSM

Stator sargıları bir nüve yerine havaya sarılmış yapılardır. Nüve kullanılmadığı için demir kayıpları düşüktür. Ancak termal anlamda, ısı dağılımını hızlıca

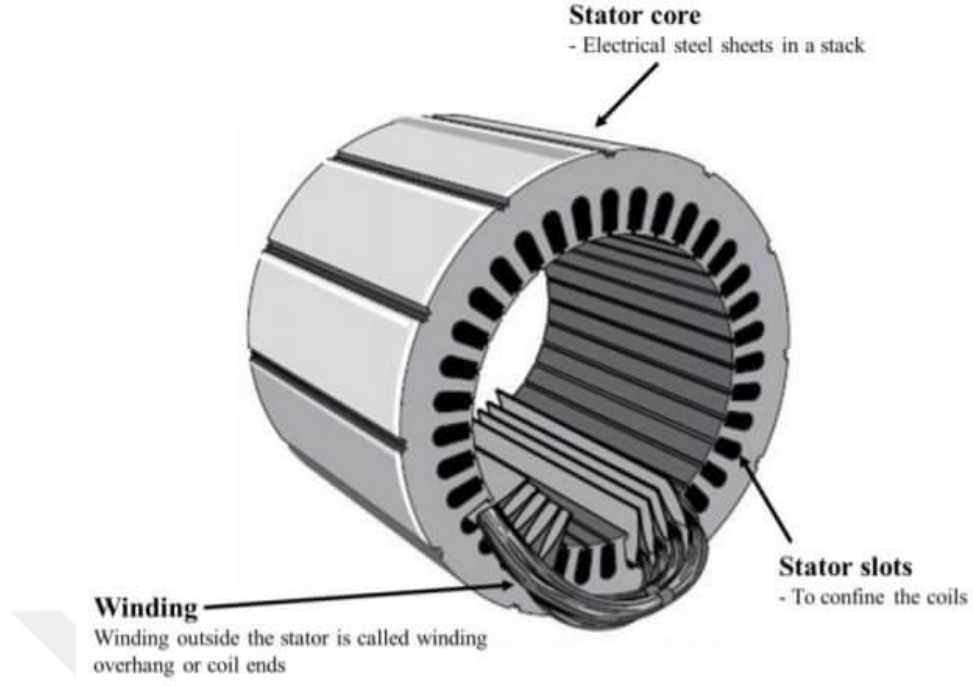
sağlayamadığı için dezavantajlıdır. Ayrıca statorda nüve olmadığı için birim hacimdeki elektromanyetik performans ve dolayısıyla motor performansı da düşüktür. Genel olarak mini motorlarda ve eksenel akılı motorlarda kullanılmaktadır. Örnek bir nüvesiz stator ve motor yapısı Şekil 2.13'te gösterilmiştir.



Şekil 2.13 Nüvesiz statora sahip mini BLDC motor [28]

2.2.5.2 Oluklu SMSM

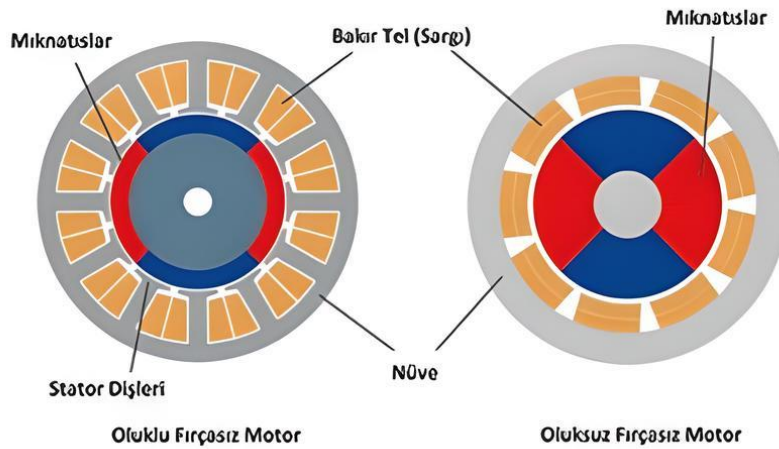
Stator nüvesi içeren, nüvesinde oluk bulunan ve bu oluklarda sargıları bulunduran yapılardır (bkz. Şekil 2.14 ve Şekil 2.15). Standart ve en çok kullanılan stator yapısıdır. Çünkü birim hacimde en yüksek gücü ve performansı sağlamaktadır. Stator nüvesinin oluklu olarak üretilmesi süreci zorludur, diğer tüm açılardan oldukça avantajlıdır.



Şekil 2.14 Oluklu stator yapısı [29]

2.2.5.3 Oluksuz SMSM

Stator nüvesinde oluk bulunmayan yapılardır. Oluklu statorlara göre farkı Şekil 2.15’te gösterilmiştir. Oluksuz statorlarda, nüve boru şeklindedir ve dışarıda sarılmış sargılar nüveye yerleştirilmektedir. Bu sebeple, nüvesiz ve oluklu statorlara göre işçilik ve maliyeti daha yüksektir. İlaveten oluk yapısı bulunmadığı için tasarım aşamasındaki elektromanyetik optimizasyon süreci zordur. Genellikle, mini motorlarda kullanılmaktadır.



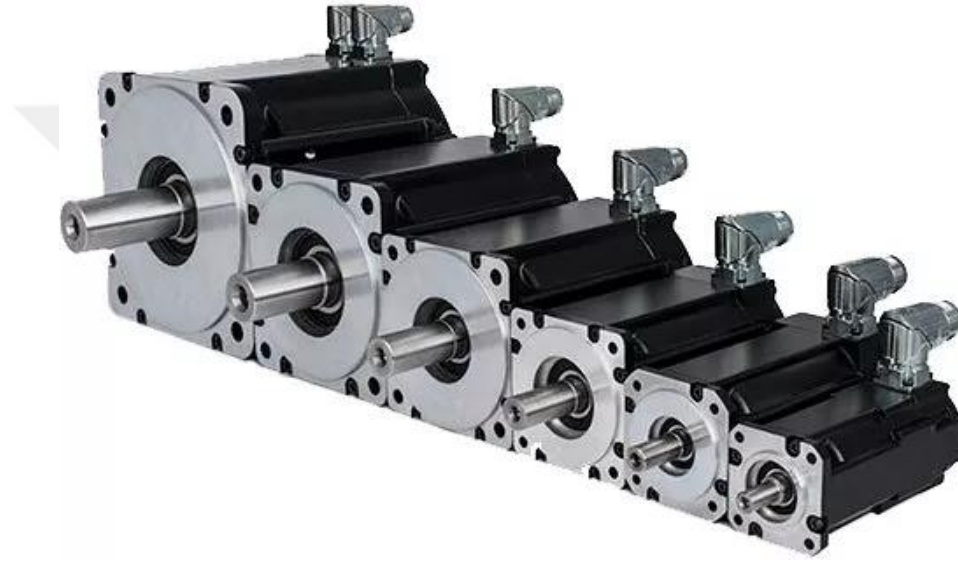
Şekil 2.15 Oluklu ve oluksuz motorlar [30]

2.2.6 Gövde Yapısına Göre Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar

SMSM'ler gövde yapısına göre çerçeveli ve çerçevesiz olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

2.2.6.1 Çerçeveli SMSM

Stator/motor dışında gövde veya çerçeve bulunan motorlardır (bkz. Şekil 2.16). Standart olarak tüm motorlar çerçevelidir. Kullanılacağı uygulamaya doğrudan monte edilebilecek elektrik ve mekanik arayüzleri bulunmaktadır. Çerçeve/gövde bileşenlerinin üretimi sebebiyle maliyeti çerçevesiz motorlardan yüksektir.



Şekil 2.16 Çerçeveli senkron motorlar [31]

2.2.6.2 Çerçevesiz SMSM

Stator/motor dışında gövde veya çerçeve bulunmayan motorlardır (bkz. Şekil 2.17). Genellikle çerçeveli motorlara göre eksenel uzunlukları kısa ve çapları büyüktür. Bu sayede moment değerleri yüksek, hız aralığı düşüktür. Dolayısıyla tork motorları olarak da isimlendirilebilmektedir. Stator ve rotor bileşenlerinden oluştuğu için kullanılacağı uygulama için mekanik yerleşim ve elektrik bağlantıları değerlendirilerek montajı yapılmalıdır.



Şekil 2.17 Çerçevesiz senkron motor [32]

SMSM'ler yukarıda anlatıldığı üzere farklı açılardan sınıflandırılabilmekte ve çok farklı özellikleri içerebilmektedir. Bu tez çalışmasında, aşağıdaki özelliklerde bir sürekli mıknatıslı senkron motor üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

- Radyal akılı
- İç rotorlu
- Yüzey mıknatıslı
- Dağıtılmış sargılı
- Oluklu
- Çerçevesiz

Bu özelliklerin yanı sıra incelenen motor, sürekli mıknatıslı senkron motorların özel bir çeşidi olan servo motordur.

Servo motor; pozisyonun, hızın ve momentin hassas şekilde kontrol edilmesini sağlayan bir çeşit sürekli mıknatıslı senkron motordur. Servo motor, servo sistemlerde kullanılmaktadır.

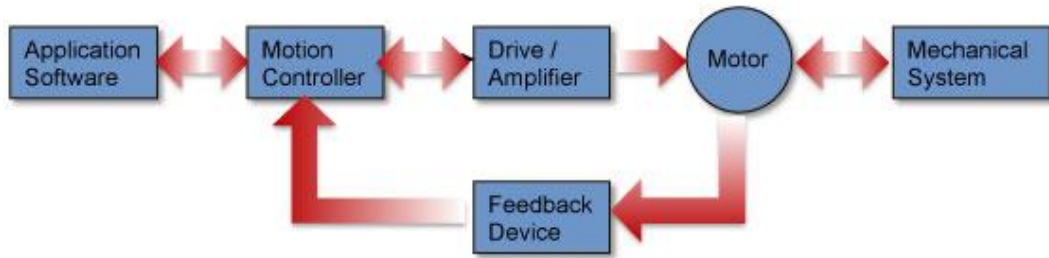
Servo sistem; eyleyici, sürücü ve sensörden oluşmaktadır. Servo sistemler;

- yüksek hassasiyet ve doğruluk,
- yüksek verimlilik,
- hızlı ve dinamik tepkiler,
- düzgün ve dengeli çalışma

istenen uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu özellikleri;

- ✓ içerisinde bulunan ve geri besleme elemanı olarak kullanılan sensör,
- ✓ aldığı geri bildirim ve komutla karar verebilen ve uygulayan sürücü,
- ✓ sürücünün yönlendirmesi ile istenen hareketi sağlayan eyleyici/motor

bileşenleri sayesinde gerçekleştirilebilmektedir. Bu sistemlerde kullanılan elektrik motoruna da servo motor denilmektedir. Örnek bir servo sistem blok şeması Şekil 2.18’de verilmiştir.

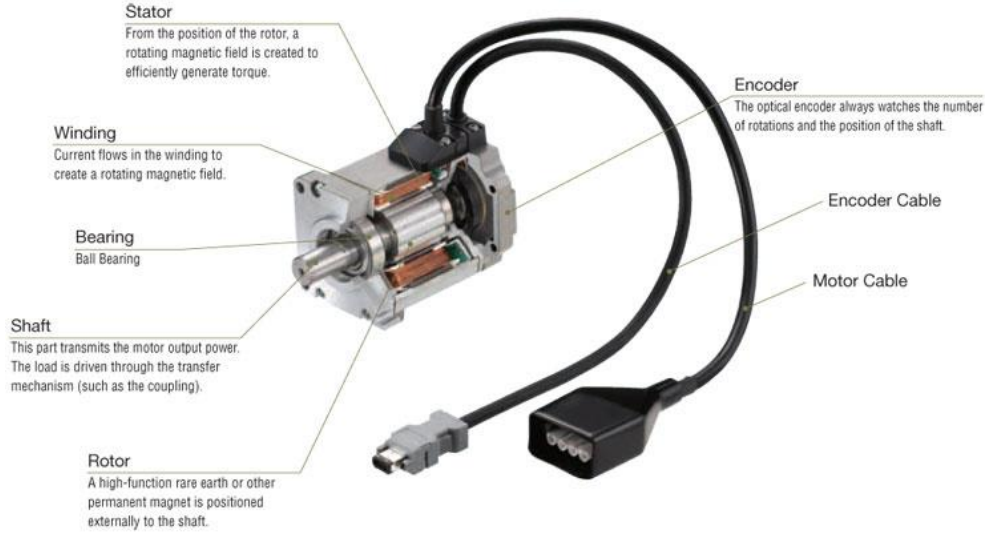


Şekil 2.18 Servo sistem blok şeması [33]

Servo motorlar, yukarıda da belirtildiği üzere, bulunduğu sisteme hassas bir kontrol imkanı sağlar. Bunu motorun/sistemin içerisinde bulunan sensör ile gerçekleştirebilmektedir. Dolayısıyla kapalı çevrim bir kontrol sistemi oluşmaktadır. Kapalı çevrim kontrol sistemi, sistemdeki mevcut çıkışı baz alır ve bu çıkışı istenen koşul ile değiştirir.

Servo motorlar, sistemdeki diğer bileşenler (sensör, sürücü ve kapalı çevrim kontrol) sayesinde geniş bir moment ve hız aralığında son derece hassas bir performans sergiler.

Servo motorlar; geniş aralıkta hız kontrolü sağlaması, bakımlarının olmaması ve arıza oranlarının düşük olması sebebiyle tercih edilmektedir. Belirtilen tüm özellikleri sebebiyle servo motorlar; -düzgün ve hassas hareketin istendiği- robotik ve otomasyon, CNC, otomatik seri üretim, sağlık ve savunma sistemleri uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Servo motorun örnek bir gösterimi Şekil 2.19’da verilmiştir.



Şekil 2.19 Servo motor örneği [34]

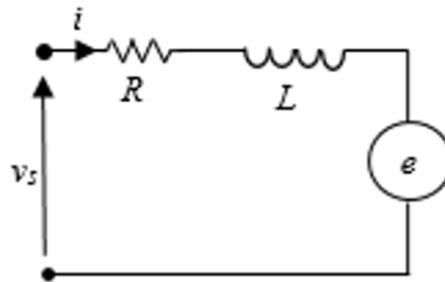
Belirtilen özellikleri servo motorları, sürekli mıknatıslı senkron motorların (SMSM) özel bir çeşidi yapmaktadır. Standart bir SMSM'ye göre servo motor, içerisinde konum sensörünü de bulundurmaktadır (bkz. Şekil 2.19).

2.3 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Matematiksel Modeli

Sürekli mıknatıslı senkron motorun veya servo motorun, tasarımı ve kontrolü için matematiksel modeli oluşturulmalıdır. Motorun matematiksel modeli uzay vektörleri kullanılarak tanımlanabilmektedir. Dengeli ve 3 fazlı bir senkron motor için matematiksel modelleme burada anlatılmıştır.

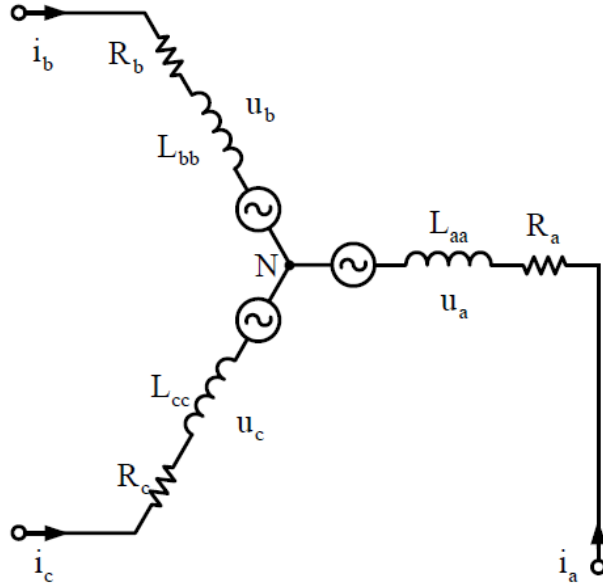
Senkron motorun 1 faz eş değer devresi Şekil 2.20'de gösterilmiştir. Bu devredeki matematiksel model (2.1)'de verilmiştir. 3 fazlı bir motorda her bir faz için bu gerilim denklemi yazılmalıdır.

$$V_s = R * i + L * \frac{di}{dt} + e \quad (2.1)$$



Şekil 2.20 Senkron motorun 1 faz eş değer devresi [35]

3 fazlı motor için eş değer devre Şekil 2.21’de gösterilmiştir. Bu devre yapısı için matematiksel ifadeler (2.2), (2.3) ve (2.4)’te verilmiştir. Burada motorun yıldız bağlı, dengeli ve homojen bir sargı yapısına sahip olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 2.21 Senkron motorun 3 faz eş değer devresi [27]

$$u_a = R_a * i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} \quad (2.2)$$

$$u_b = R_b * i_b + \frac{d\lambda_b}{dt} \quad (2.3)$$

$$u_c = R_c * i_c + \frac{d\lambda_c}{dt} \quad (2.4)$$

Burada u faz gerilimi, R sargı direnci, i faz akımı ve λ halkalanan akı olmak üzere a-b-c fazları için ayrı ayrı verilmiştir. Halkalanan akı denklemleri ise, (2.5), (2.6) ve (2.7)’deki gibidir. Bu denklemlerde L öz ve karşıt endüktansları, ψ mıknatıs akısını ifade etmektedir.

$$\lambda_a = L_{aa} * i_a + L_{ab} * i_b + L_{ac} * i_c + \psi_{Ma} \quad (2.5)$$

$$\lambda_b = L_{ba} * i_a + L_{bb} * i_b + L_{bc} * i_c + \psi_{Mb} \quad (2.6)$$

$$\lambda_c = L_{ca} * i_a + L_{cb} * i_b + L_{cc} * i_c + \psi_{Mc} \quad (2.7)$$

SMSM’de endüktansların ve akıların değeri rotor açısına bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla bu değerler rotor açısına bağlı olarak ifade edilirler.

Yukarıda belirtilen matematiksel denklemler açıkça ifade edilir ve halkalanan akı denklemleri, gerilim denklemlerinde yerine yazılır. Ardından motorun (2.8) - (2.12) aralığında detayları belirtilen temel güç eşitliğinde bu ifadeler kullanıldığında (2.13)'deki genel moment ifadesi elde edilir. Burada, motorun doyum durumu ve kayıpları dikkate alınmamıştır.

$$\text{Elektriksel Güç (Pe)} = \text{Mekanik Güç (Pm)} \quad (2.8)$$

$$Pe = 3 * u * i * \cos(\theta_e) \quad (2.9)$$

$$Pm = T * \omega_m \quad (2.10)$$

$$\omega_m = \frac{\omega_e}{p} \quad (2.11)$$

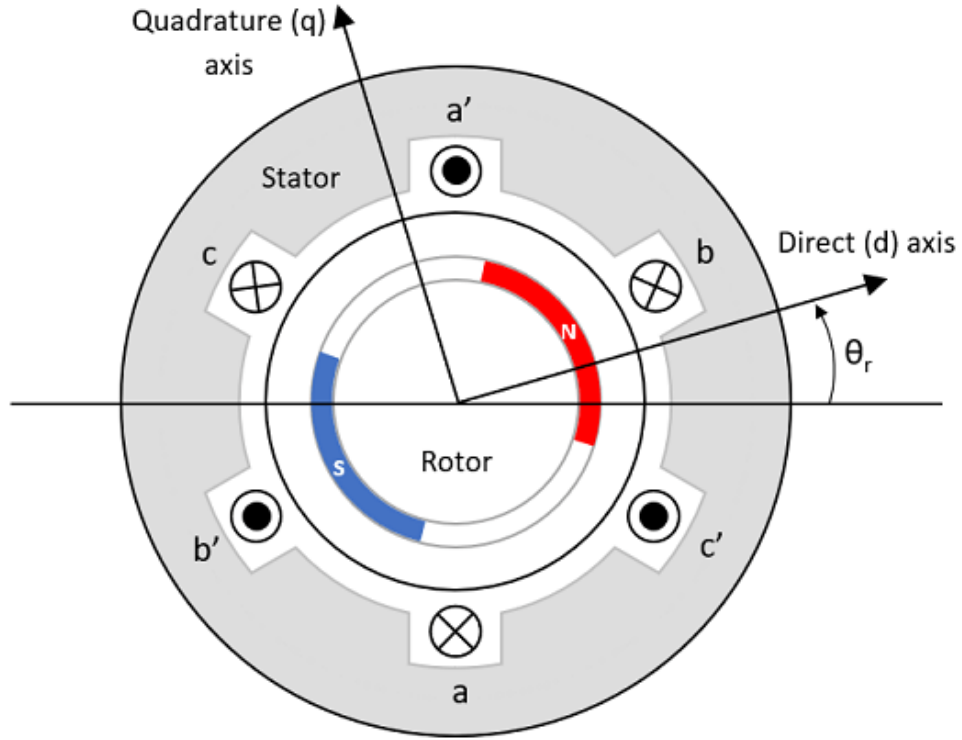
$$\omega_e = \frac{d\theta_e}{dt} \quad (2.12)$$

$$T = p * \left[\frac{1}{2} * [i_{abc}]^T * \frac{\partial [L_{abc}]}{\partial \theta_e} * [i_{abc}] + [i_{abc}]^T * \frac{\partial [\psi_{abc}]}{\partial \theta_e} \right] \quad (2.13)$$

Bu denklemlerde; θ_e elektriksel açı, T moment, ω_m rotorun mekanik açısal hızı, ω_e elektriksel açısal hızı, p kutup çifti sayısı, i_{abc} 3 faz akım matrisi, L_{abc} 3 faz endüktans matrisi ve ψ_{abc} 3 faz mıknatıs akısı matrisi olarak ifade edilmektedir. Görüldüğü üzere, buradaki denklemlerin açığa ve zamana bağlı olması bu denklemleri karmaşık bir hale getirmektedir.

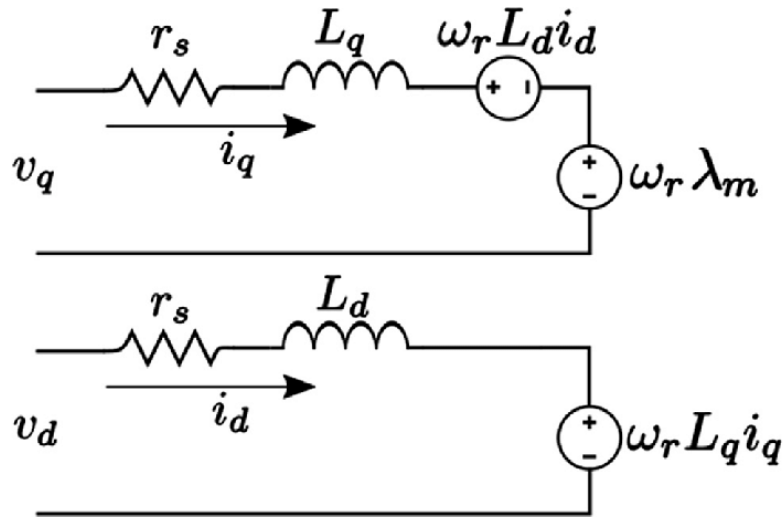
3 fazlı senkron motorda, matematiksel denklemlerin karmaşıklığı sebebiyle, değişkenlerin sayısını azaltmak ve motor dinamik modelini basitleştirmek için referans eksen dönüşümleri yapılır. Böylece matematiksel çözümler daha hızlı yapılır ve sürücü/kontrolcü performansı artar. Referans eksen dönüşümleri, 3 faz ekseninden 2 faz eksenine Clarke ve Park denklemleri ile yapılmaktadır. Bu sayede AC makineler/motorlar, DC makinelere benzetilmiş ve kontrolü kolaylaştırılmış olur. 2 faz ekseninden 3 faz eksenine geri dönmek için de ilgili dönüşüm denklemlerinin tersi kullanılır.

SMSM'nin 3 faz ve 2 faz eksen takımlarına ait örnek bir modeli Şekil 2.22'de gösterilmiştir.



Şekil 2.22 a-b-c fazları ve d-q eksenlerinin SMSM modelinde gösterimi [36]

2 faz ekseninde d ve q bileşenleri/eksenleri vardır. Bu bileşenlerden d eksenı akıyı, q eksenı de momentı ifade etmektedir.



Şekil 2.23 d-q eksenleri için SMSM eş değer devre yapıları [37]

Şekil 2.23'te d ve q eksenleri için eş değer devre yapıları gösterilmiştir. Clarke-Park denklemleri kullanılarak yapılan bu dönüşüm sonucunda, d-q eksenleri için (2.14)-(2.17) arasındaki ifadeler elde edilmektedir. Bu ifadelerde de doyum ve kayıplar dikkate alınmamıştır.

$$v_d = R * i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_e * \lambda_q \quad (2.14)$$

$$v_q = R * i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_e * \lambda_d \quad (2.15)$$

$$\lambda_d = L_d * i_d + \psi_m \quad (2.16)$$

$$\lambda_q = L_q * i_q \quad (2.17)$$

Bu denklemlerde; $v_{d,q}$ gerilimleri, $i_{d,q}$ akımları, $\lambda_{d,q}$ halkalanan akıları, $L_{d,q}$ endüktans değerlerini, ψ_m mıknatıs akısını ifade etmektedir. Bu denklemler kullanılarak -yukarıdaki gibi güç eşitliği üzerinden- moment elde edilmeye çalışıldığında, (2.18)'deki moment denklemi oluşmaktadır.

$$T = \frac{3}{2} * p * (\lambda_d * i_q - \lambda_q * i_d) \quad (2.18)$$

(2.18)'de, (2.16) ve (2.17) ifadeleri yerlerine yazıldığında (2.19) denklemi elde edilir.

$$T = \frac{3}{2} * p * (\psi_m * i_q + (L_d - L_q) * i_d * i_q) \quad (2.19)$$

(2.19), SMSM'lerin genel moment denklemdir. Bu moment ifadesi, mıknatıs ve relüktans momenti olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler ayrıldığında, mıknatıs momenti (2.20) ve relüktans momenti (2.21) olarak ifade edilir.

$$T_{mıknatıs} = \frac{3}{2} * p * (\psi_m * i_q) \quad (2.20)$$

$$T_{relüktans} = \frac{3}{2} * p * ((L_d - L_q) * i_d * i_q) \quad (2.21)$$

Yüzey mıknatıslı (SPM) motorlarda, d ve q eksenli endüktansları (2.22)'de gösterildiği gibi yaklaşık olarak birbirine eşit kabul edilir. Bu sebeple SPM motorlarda, relüktans momenti oluşmaz. Bu moment, d ve q endüktansları eşit olmayan gömülü mıknatıslı (IPM) motorlarda oluşur.

$$L_d \cong L_q \quad (2.22)$$

Bu doğrultuda, SPM motorlar için genel moment ifadesi (2.20)'deki gibi olmaktadır.

2.4 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Moment Dalgahlılığı ve Bileşenleri

Önceki bölümde verilen ifadelerden görüleceği üzere; moment denklemi, yüzey mıknatıslı (SPM) servo motorda harekete bağlı olarak oluşan endüktans ve akı gibi değişimleri içermemektedir. Bu nedenle moment üzerinde oluşan dalgalanmalar da matematiksel olarak ifade edilememektedir. Dolayısıyla SMSM'nin moment dalgalanmasının oluşmasında etkili olan bileşenler iyi analiz edilmelidir.

Genel olarak, sürekli mıknatıslı bir motorun toplam momentinin üç bileşeni vardır.

- Ortalama moment
- Vuruntu momenti
- Moment dalgalanması

Ortalama moment, sabit olan ve sürekli olarak sağlanan moment değeridir. Net moment bileşeni olarak ifade edilebilir.

Vuruntu momenti, rotordaki mıknatıslar ve statordaki oluk-diş yapısı sebebiyle oluşmaktadır. Rotor döndükçe mıknatısların üzerindeki stator diş ve oluklarının relüktansının veya hava aralığı geçirgenliğinin değişmesinden kaynaklı vuruntu momenti oluşur ve istenmeyen bir etkidir. Stator yapısı ve kutup sayısına bağlı olarak rotor açısının periyodik bir fonksiyonudur, bu şekilde modellenebilir.

Moment dalgalanması ise esas olarak, alan dağılımındaki ve MMK'sındaki (manyeto-motor kuvvetindeki) dalgalanmalardan kaynaklanır.

Moment dalgahlılığı, tepeden tepeye moment genliğinin ortalama moment değerine oranı ile belirlenmektedir ve (2.23)'deki denklem ile ifade edilmektedir.

$$T_{dalgalanma} = \frac{T_{maksimum} - T_{minimum}}{T_{ortalama}} \quad (2.23)$$

Daha önceden de bahsedildiği üzere, moment dalgalanmasına etki eden parametreler genel olarak şöyle sıralanabilir.

- Motor mekaniği ve üretimi kaynaklı
- Vuruntu (cogging) momenti kaynaklı
- Kontrolcü/elektronik kaynaklı

Bu parametrelerin detaylı açıklamaları önceki bölümde “Literatür Özeti” başlığında verilmiştir.

Bu tez kapsamında, motor mekaniği ve vurunu momenti kaynaklı oluşan moment dalgalanmaları üzerine çalışma gerçekleştirilmiştir. Çünkü (2.20)’deki moment ifadesinden görüleceği üzere, SPM servo motorların moment dalgalanmasına - yukarıda yapılan açıklamalar da dikkate alınarak- mıknatıs akısının doğrudan etki ettiği söylenebilir. Bu doğrultuda, referans bir servo motorun mıknatıs geometrisi değiştirilerek moment dalgalanması incelenmiş ve iyileştirilmeye çalışılmıştır.

Tez kapsamında, elektronik kaynaklı moment dalgalanması üzerine herhangi bir çalışma gerçekleştirilmemiştir.



3

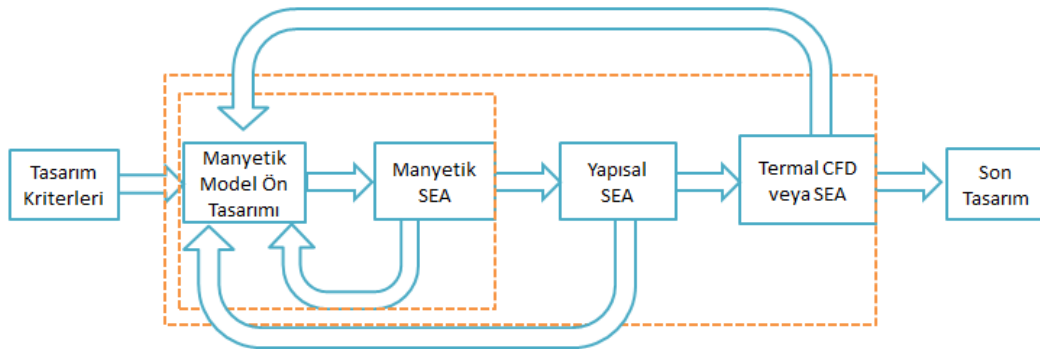
SERVO MOTORUN NÜMERİK MODELLEMESİ

Elektrik motorunun tasarlanması çok disiplinli bir mühendislik çalışması gerektirmektedir. Sürekli mıknatıslı senkron veya servo motor tasarım süreci, elektrik ve manyetik modelleme ile başlamaktadır.

Tasarım kriterleri kapsamında oluk-kutup kombinasyonu belirlenir ve elektromanyetik modelleme süreci başlar. Temel geometrik ölçülerin belirlenmesi ve optimizasyonu ile ön tasarım süreci tamamlanmış olur. Ön tasarım sonunda elde edilen performansa yönelik bilgiler (moment, güç, verim, hacim vb.) için farklı optimizasyon çalışmaları yapılabilir. Elde edilen tasarımlar ve FEM kullanılarak amaçlanan nihai tasarım elde edilmeye çalışılır. Buraya kadarki süreç motorun elektromanyetik modellemesini (tasarım ve analiz çalışmalarını) kapsamaktadır.

Elektromanyetik modelleme çalışmalarında istenmeyen sonuçların elde edilmesi veya eksik noktaların tespiti durumunda ön tasarım sürecine geri dönülür ve sonraki modelleme aşamalarına geçilmez. Elektromanyetik modelleme aşaması tamamlanırsa, sonraki aşamalara (mekanik ve termal modellemelere) geçiş yapılabilir.

Herhangi bir aşamayı geçemeyen tasarım/model geriye dönülerek, hatta gerekirse en başa dönülerek, iyileştirilir (bkz. Şekil 3.1). İşte bu sebeple elektrik motoru çok disiplinli bir çalışma gerektirir. Birbirini takip eden tasarım ve analiz süreçleri tüm aşamaları ile eksiksiz tamamlanınca SMSM veya servo motor tasarımı veya modellemesi tamamlanmış olur.



Şekil 3.1 Elektrik motoru tasarım süreci [4]

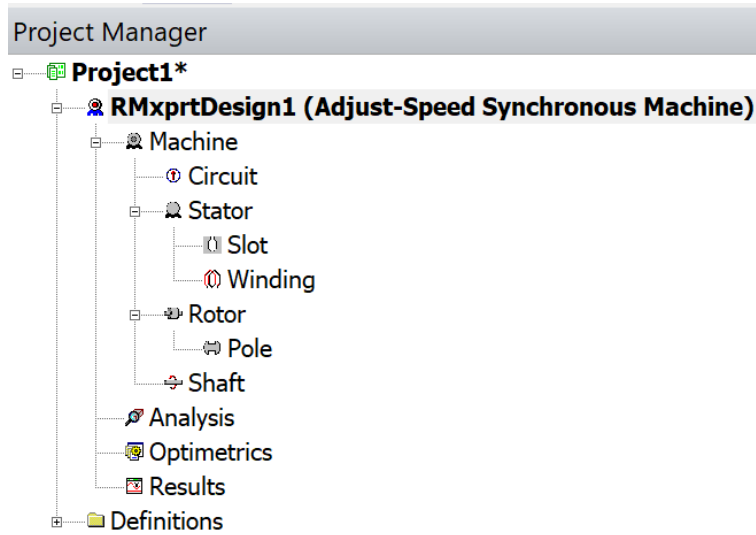
Bu tez çalışmasında referans alınarak incelenen ve üzerine çalışmalar gerçekleştirilen servo motora ait özellikler aşağıdaki gibidir. Servo motorun genel özellikleri ise bir önceki bölümde açıklanmıştır.

3.1 Manyetik Modelleme

Elektrik motorlarının tasarlanması, modellenmesi ve analizi için çeşitli bilgisayar destekli yazılım araçları kullanılmaktadır. Bu araçlardan en yaygın olarak kullanılanı ANSYS yazılım ailesine ait “Electronics Desktop” arayüzüdür. Bu arayüzdeki “RMxprt” ve “Maxwell 2D” modülleri kullanılarak tez çalışması kapsamında tasarım, modelleme ve analizler gerçekleştirilmiştir.

“RMxprt” modülü analitik hesaplamalar ile elektrik motorunun modelleme ve optimizasyon çalışmalarının hızlıca yapılmasını sağlamaktadır. Bu yeteneği, içerisinde gömülü olarak bulunan motor topolojileri ile gerçekleştirilebilmektedir.

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar için seçilen topoloji ve bu topolojiye ait girdi bilgileri Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Genel olarak “RMxprt” modülüne bu bilgilerin girişi yapılarak elektrik motorunun modellemesi ve optimizasyonu gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 3.2 RMxprt modülü

Yazılıma girişi yapılan referans servo motora ait temel özellikler Tablo 3.1’de gösterilmiştir. Bu özelliklerdeki servo motor, saha uygulamalarında sıkça

kullanıldığı için tercih edilmiştir. İlaveten klasik içten rotorlu SMSM’ler, görece yüksek moment ve düşük hız uygulamalarında kullanıldığı için seçilen motora ait performans özelliklerinin de bu kapsamda olmasına dikkat edilmiştir.

Tablo 3.1 Servo motor özellikleri

Özellik	Değer
DC Bara Gerilimi	48 VDC
Nominal Moment	54 Nm
Nominal Hız	1500 rpm
Nominal Güç	8500 W
Nominal Akım	200 Arms
Maksimum Akım	565 Arms
Kutup Sayısı	12
Bağlantı Yapısı	Yıldız
Sargı Yapısı	Dağıtılmış ve Çift Katmanlı

Servo motorda kullanılan malzemelere ait bilgiler Tablo 3.2’de gösterilmiştir. Bu malzemelere ait detaylar Başlık 3.1.1’de açıklanmıştır.

Tablo 3.2 Servo motorda kullanılan malzemeler

Bileşen	Malzeme
Stator Nüvesi	M19 serisi
Rotor Nüvesi	M19 serisi
Mıknatıs	SmCo 5 serisi
İletken Tipi	Bakır

Referans servo motora ait yukarıda belirtilen bilgilerin detaylıca “RMxprrt” modülüne girilmesi ve servo motorun modellenmesi sonucu program çalıştırılmıştır. “RMxprrt”te basit matematiksel hesaplamalar ile elde edilen bazı önemli sonuçlar Tablo 3.3’te verilmiştir.

Tablo 3.3 “RMxprrt”teki elektriksel ve manyetik hesap sonuçları

Özellik	Değer
d Eksenli Endüktansı (Ld)	38,6 uH
q Eksenli Endüktansı (Lq)	38,6 uH
Sargı Direnci	1,98 mΩ
Stator Dış Akı Yoğunluğu	1,18 T
Hava Aralığı Akı Yoğunluğu	0,68 T
Mıknatıs Akı Yoğunluğu	0,73 T
Vuruntu Momenti	0,5 Nm
Stator Akım Yoğunluğu	3,39 A/mm ²
Verim	% 95,83

Elde edilen sonuçlar sırasıyla değerlendirildiğinde;

- d ve q eksenli endüktanslarının SPM servo motorlarda olması gerektiği gibi eşit olduğu,
- stator dış akı yoğunluğunun kullanılan sac malzemenin doyum noktasına (1,5-1,6 T) erişmediği,
- hava aralığı akı yoğunluğunun mıknatıs akı yoğunluğuna yakın bir değerde olduğu,
- akım yoğunluğunun Tablo 3.4'te gösterilen ve soğutmasız durum için belirtilen limitler içerisinde olduğu,
- verimin istenen şekilde % 90-95 aralığında veya daha büyük olduğu

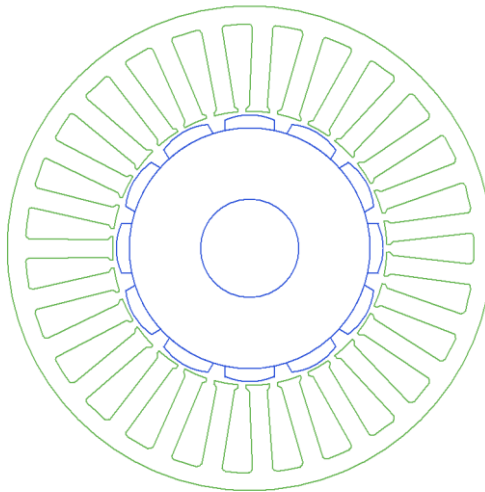
gözlenmiştir.

İlaveten vuruğu momenti değeri “Maxwell 2D” modülünde detaylıca ele alınacağı için burada değerlendirilmemiştir. Sadece elde edilen sonucun, anormal bir değerde ve dalga şeklinde (bkz. Şekil 3.8) olmadığından emin olunmuştur.

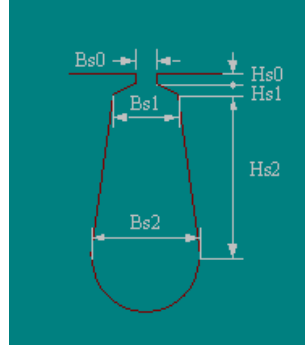
Tablo 3.4 Soğutma durumu için akım yoğunlukları [20]

Durum	Akım Yoğunluğu (A/mm ²)
Soğutmasız ve Tamamen Kapalı	1-5
Hava Soğutmalı	5-10
Sıvı Soğutmalı	10-30

Yapılan modelleme sonucunda elde edilen “RMxprt” modülü çıktıları Şekil 3.3 – Şekil 3.11 aralığında verilmiştir.

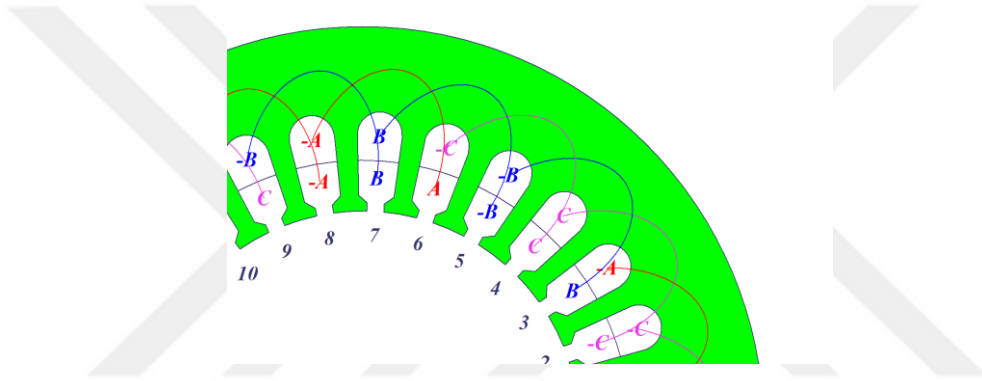


Şekil 3.3 Servo motor modeli



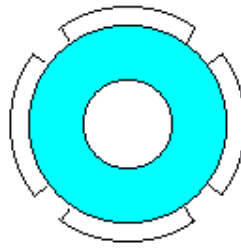
Şekil 3.4 Servo motor stator oluk yapısı

Şekil 3.4'te servo motora ait oluk yapısı gösterilmiştir. Şekil 3.5'te ise, Tablo 3.1'de belirtilen sargı yapısına ait görsel verilmiştir.



Şekil 3.5 Servo motor stator sargı yapısı

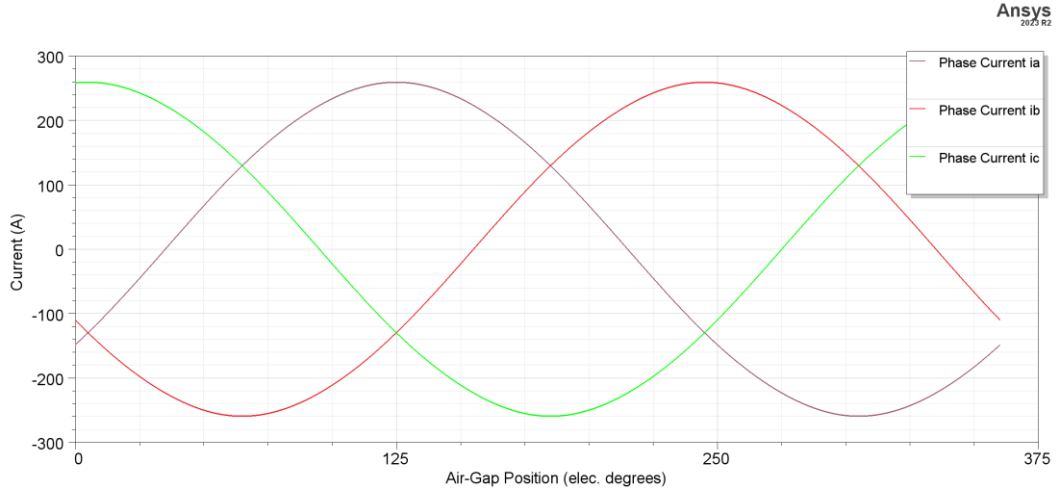
Şekil 3.6'da rotor yapısı gösterilmiştir.



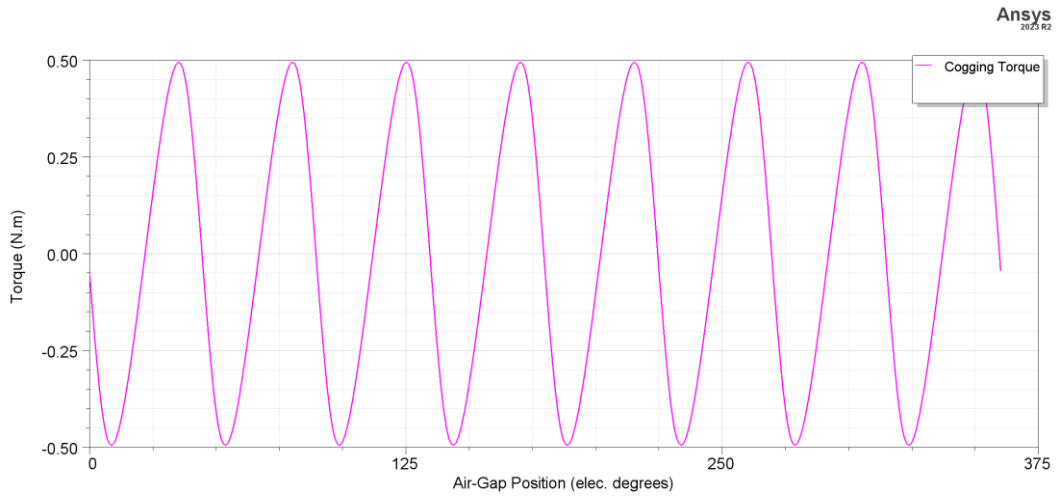
Şekil 3.6 Servo motor rotor kutup yapısı

Şekil 3.7'de, faz akımlarının nominal yük altındaki değeri ve dalga şekli verilmiştir. Buradaki değerlerin, Tablo 3.1'de verilen nominal akım değeri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Şekil 3.8'de vurunu momenti dalga şeklinin 1 elektriksel tur için homojen ve sinüzoidal formda olduğu gözlenmiştir.



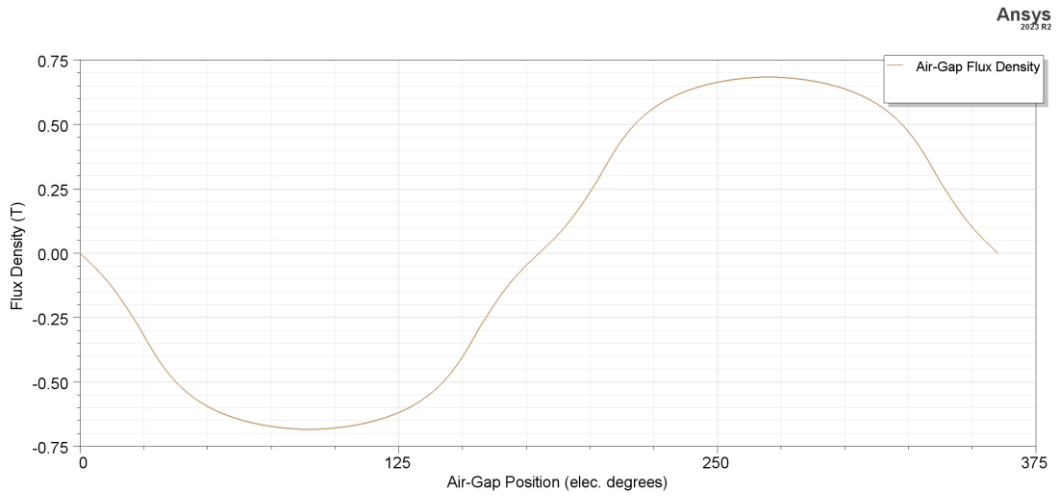
Şekil 3.7 Nominal yükteki faz akımlarının grafikleri



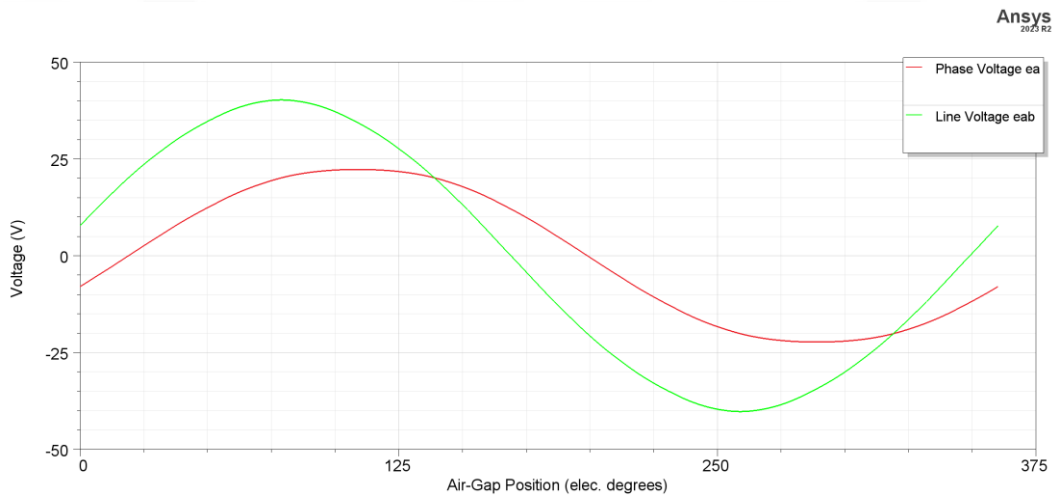
Şekil 3.8 Vuruntu momenti dalga şekli

Şekil 3.9’da hava aralığı akı yoğunluğunun 1 elektriksel tur için düzgün bir sinüzoidal formda olduğu gözlenmiştir. Bu durum moment dalgalanmasının minimum seviyede olması açısından istenen bir sonuçtur.

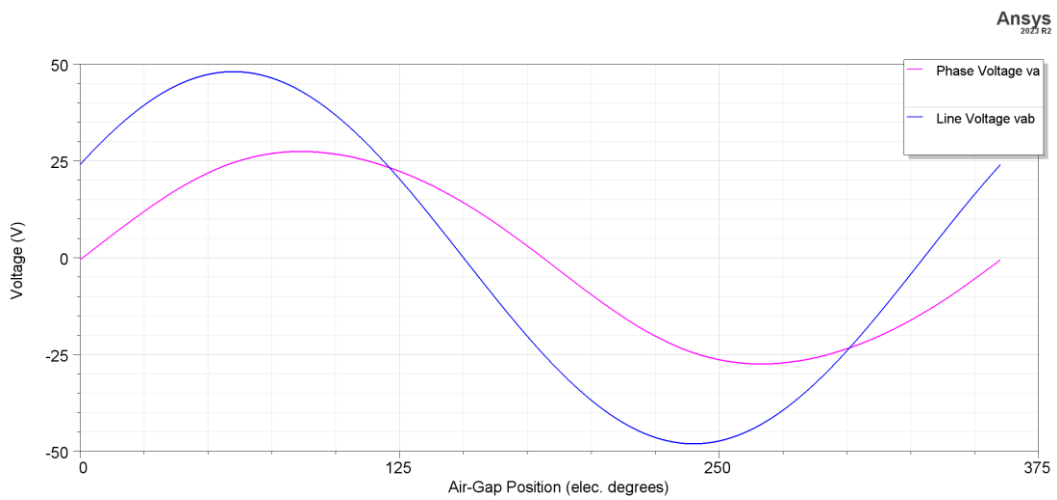
Şekil 3.10’da 1 elektriksel tur için faz ve fazlar arası endüklenen gerilim grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerin saf sinüzoidal formda olması performans değerleri ve moment dalgalanması açısından önemlidir. Bu bakımdan istenen sonuç gözlenmiştir.



Şekil 3.9 Hava aralığı akı yoğunluğu



Şekil 3.10 Nominal hızdaki endüklenen gerilim grafikleri



Şekil 3.11 Nominal yükteki terminal gerilimi grafikleri

Şekil 3.11’de nominal yük altında faz ve fazlar arası terminal gerilimi grafikleri gösterilmiştir. Fazlar arası gerilim değerinin 48 V DC bara gerilimine eşit olduğu burada gözlenmiştir. Dalga şeklinin de sinüzoidal formda olması istenen sonuçların alındığını göstermektedir.

3.1.1 Malzeme Bilgileri

Tablo 3.2’de belirtildiği üzere, referans servo motorun rotor ve stator yapılarında aşağıdaki malzemeler kullanılmıştır.

- M19 serisi çelik
- SmCo 5 serisi mıknatıs
- Bakır iletken

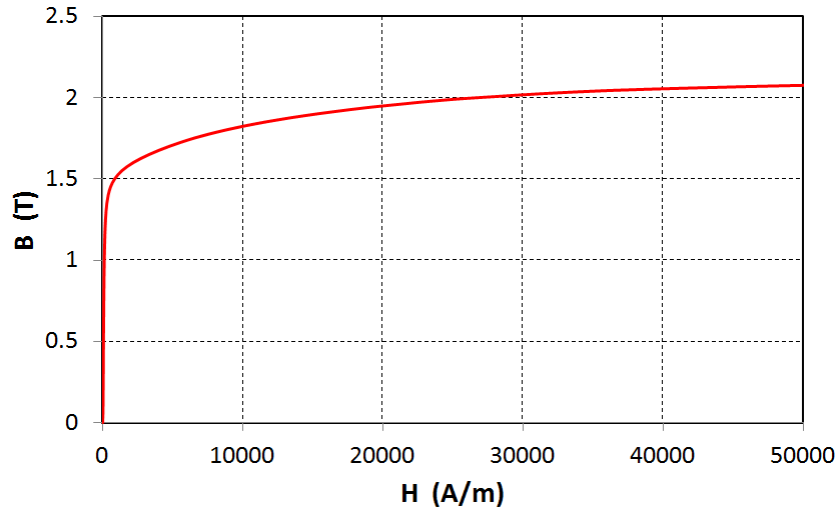
Bu malzemelerin detay özellikleri ise sırasıyla şöyledir.

M19 serisi çelik: Elektrik motorlarının rotor ve stator nüveleri (çekirdekleri) silisli manyetik saclardan oluşmaktadır. M19 serisi çelik sacların en önemli özelliği, taşıdığı alaşım elementleri sayesinde manyetik kayıpları minimuma indirmesi ve manyetik özellikleri maksimuma çıkarmasıdır. Bu sayede elektrik makinelerinde, manyetik özellikleri yüksek seviyede tutarak verimliliği arttırmaktadır.

Kullanılan M19 sacın bazı özellikleri şöyledir.

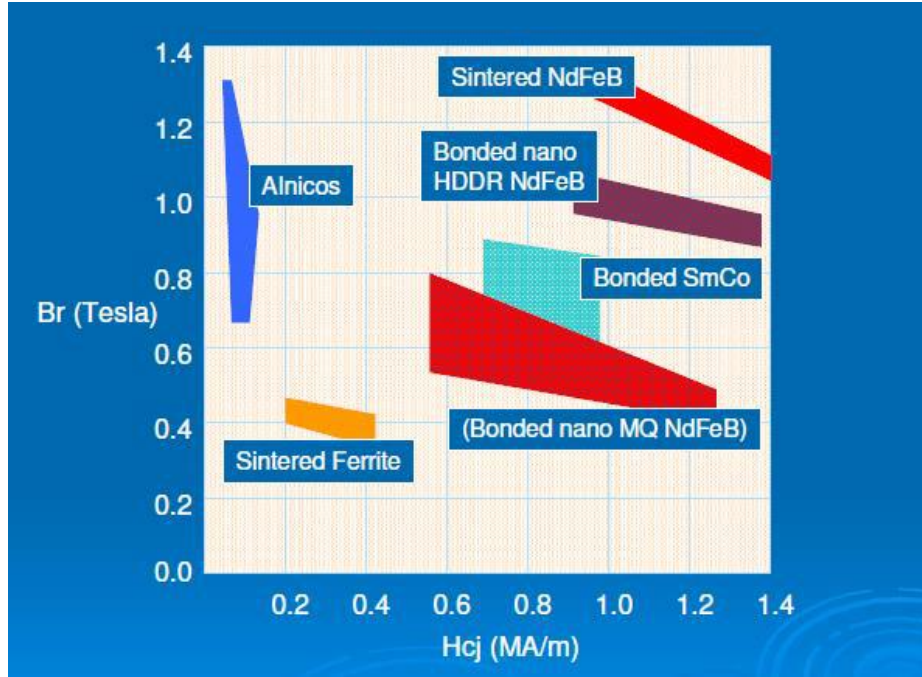
- ✓ Mıknatıslanma Özelliği (@ 50 Hz): 1,5 T (@ 1500 A/m) – 1,7 T (@ 7000 A/m)
- ✓ Maksimum Kayıp (@ 1,5 T, 50 Hz): 2,5 W/kg
- ✓ Bağlı Geçirgenlik (@ 1,5 T): 700

M19 serisi için örnek bir sacın B-H karakteristiği Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12 Örnek bir sac için B-H karakteristiği [38]

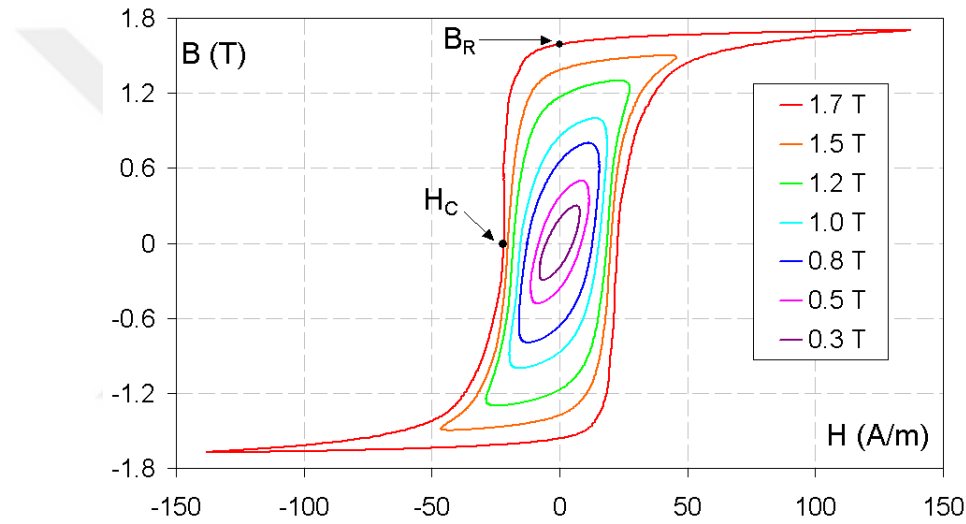
SmCo 5 serisi mıknatıs: Günümüzde elektrik makinelerinde yüksek enerjili sabit/sürekli mıknatısların (NdFeB (neodmiyum) ve SmCo (samaryum kobalt)) kullanımı tercih edilmektedir. Bu mıknatıslar, nadir element (rare earth) mıknatısları olarak sınıflandırılmaktadır, ilaveten standart Ferrite (demir) ve AlNiCo (alüminyum nikel kobalt) mıknatıslara göre daha kuvvetlidir, ancak sıcaklık dayanımları daha düşüktür. Şekil 3.13'te elektrik makinelerinde kullanılan mıknatısların enerji yoğunlukları gösterilmiştir.



Şekil 3.13 Mıknatısların enerji yoğunlukları [20]

Sıcaklık dayanımı bakımından karşılaştırıldığında SmCo, NdFeB'den daha yüksek sıcaklıklara dayanabilmektedir. Ancak SmCo mıknatısların yüksek fiyatları ve NdFeB mıknatısların daha yüksek manyetik alan şiddetine sahip olması elektrik makinelerinde NdFeB mıknatısların daha fazla tercih edilmesini sağlamaktadır.

Mıknatısların performansı için iki parametre önemlidir, artık mıknatısiyet (B_r) ve manyetik gidergenlik (H_c). Artık mıknatısiyet (B_r), mıknatısın oluşturabileceği manyetik alan şiddetinin ölçüsüdür. Manyetik gidergenlik (H_c) ise, mıknatısın demagnetize (manyetik olarak bozulma) olmadan harici bir manyetik alana karşı koyabilme ölçüsüdür. Bu iki parametreden oluşan örnek bir histeresiz eğrisi ve çevrimi Şekil 3.14'te gösterilmiştir.



Şekil 3.14 Mıknatısın histeresiz çevrimi [20]

Kullanılan SmCo 5 mıknatısın bazı özellikleri şöyledir.

- ✓ Br: 0,9 T
- ✓ Hc: ~700 kA/m
- ✓ Maksimum çalışma sıcaklığı: 250 °C

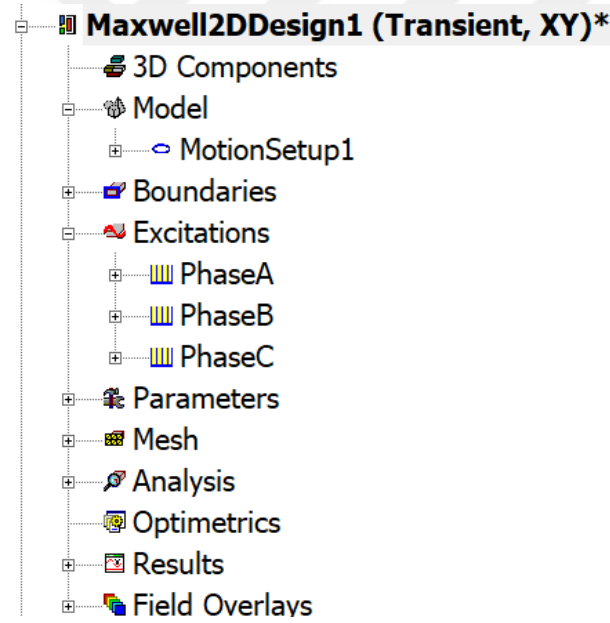
Bakır iletken: Yüksek elektriksel ve termal iletkenlik, yumuşaklık ve lehimlenebilirlik, yüksek erime noktası, korozyona ve yıpranmaya karşı yüksek dayanıklılık gibi fiziksel özelliklerinden dolayı en çok kullanılan iletken malzemedir. Bakıra alternatif en sık kullanılan diğer bir iletken alüminyumdur. Alüminyum iletken bakıra göre; daha ucuz ve aynı elektrik direnci için daha hafif olmasına rağmen, iletkenliği düşük ve dolayısıyla kayıp miktarı daha fazladır. Bu nedenle elektrik motorlarında genellikle bakır iletken kullanılmaktadır.

3.2 Analiz Sonuçları

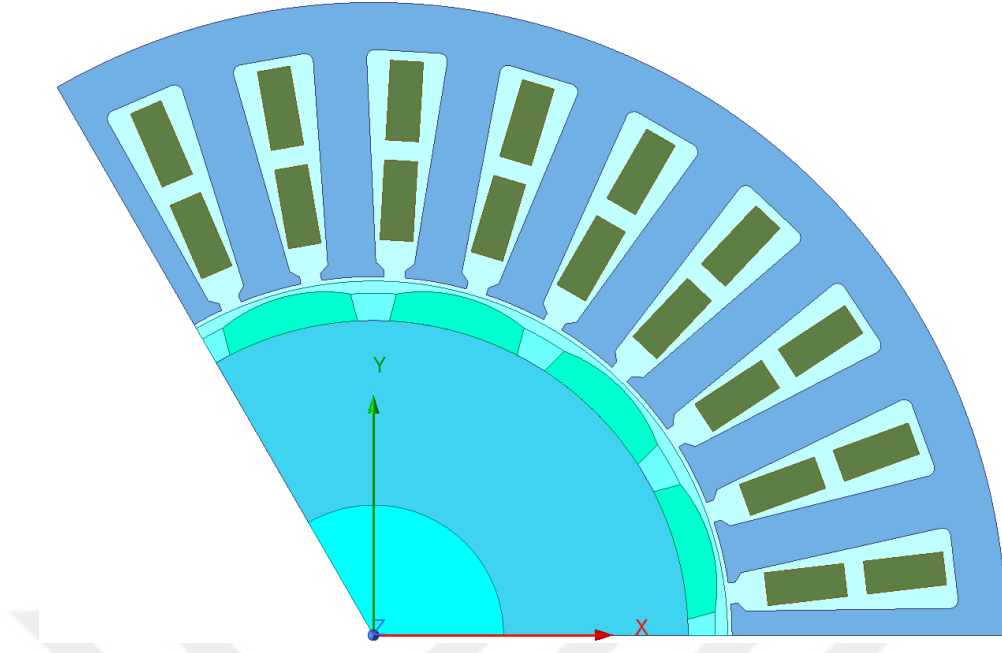
Elektrik motorunun “RMxp” modülünde yapılan modellemesi ve optimizasyon çalışmaları sonrası, detay nümerik analizler gerçekleştirilmektedir. Analiz faaliyetleri ANSYS’in “Maxwell 2D” modülünde yürütülmektedir.

“Maxwell 2D” modelleme ve optimizasyon yetenekleri ile “RMxp”’in özelliklerini içermektedir. İlaveten sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile hızlı analitik çözümler yerine uzun, detaylı ve gerçekçi nümerik çözümler sunmaktadır.

“Maxwell 2D” modülünde sıfırdan bir tasarım ve modelleme yapılabileceği gibi “RMxp” modülünden “Maxwell 2D” modülüne geçiş de yapılabilmektedir. Bu tez çalışmasında, modüller arası geçiş yöntemiyle servo motor model verileri nümerik analize aktarılmıştır. Veri aktarımı sonrası “Maxwell 2D”de oluşan bilgiler ve motor görseli sırasıyla Şekil 3.15 ve Şekil 3.16’da gösterilmiştir.



Şekil 3.15 Maxwell 2D modül bilgileri



Şekil 3.16 Maxwell 2D servo motor kesiti

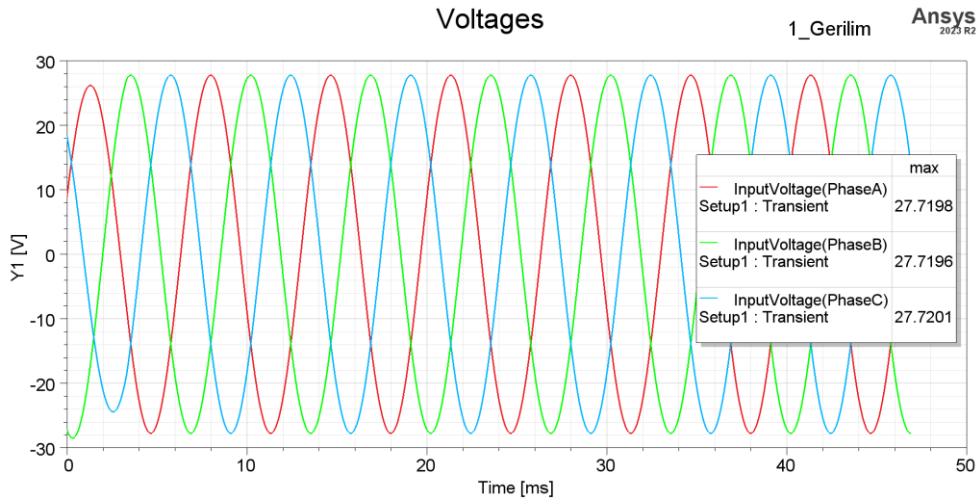
Şekil 3.16’da görüleceği üzere; “Maxwell 2D”, analizin süresini kısaltmak için motor geometrisinin simetrik bir bileşenini ele almaktadır. Şekil 3.16’daki simetrik kesit üzerinden analiz çalışmaları yürütülmüştür.

Modüller arası geçişte, ilgili modüller birbiriyle iletişim halinde olduğu için servo motorun uyarım/besleme bilgileri otomatik olarak ayarlanmaktadır. Bu uyarım, gerilim beslemesi şeklindedir. Moment dalgalanmasının incelenmesi ve iyileştirilmesi de dikkate alınarak “Maxwell 2D”de aşağıdaki uyarım şekilleriyle analizler gerçekleştirilmiştir.

- Gerilim beslemeli
- Nominal akım beslemeli
- Maksimum akım beslemeli
- Beslemesiz (vuruntu momenti için)

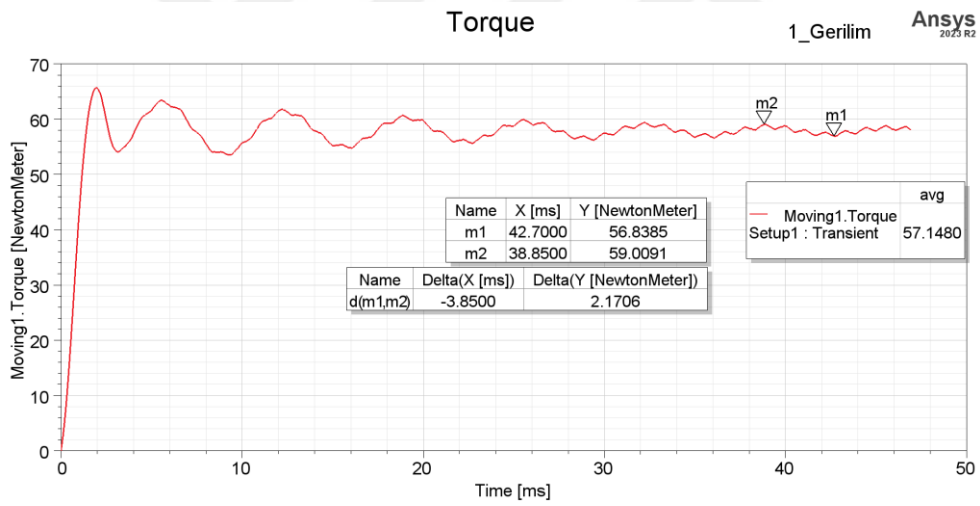
Gerilim beslemeli analiz ile aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Şekil 3.17’de besleme gerilimine ait grafik gösterilmiştir. Bu besleme şeklinde Şekil 3.18 – Şekil 3.23 aralığındaki sonuçlar elde edilmiştir.

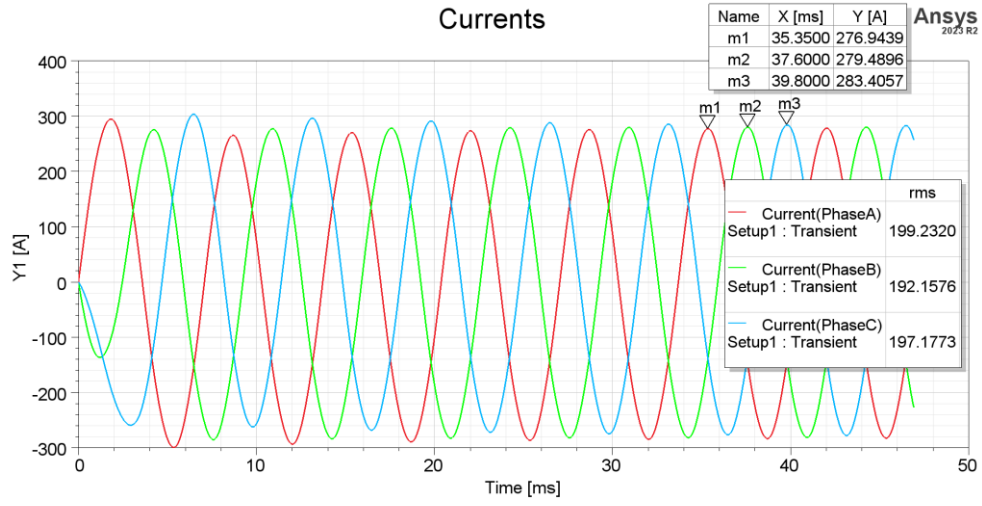


Şekil 3.17 Nominal besleme gerilimi – zaman grafiği

Şekil 3.18’de momentin zamana bağlı değişimi ve sürekli hal (steady-state) için moment dalgalanma miktarı gösterilmiştir. Momentin ortalama değeri, beklenen şekilde “RMxprrt” sonuçları ile uyumludur.

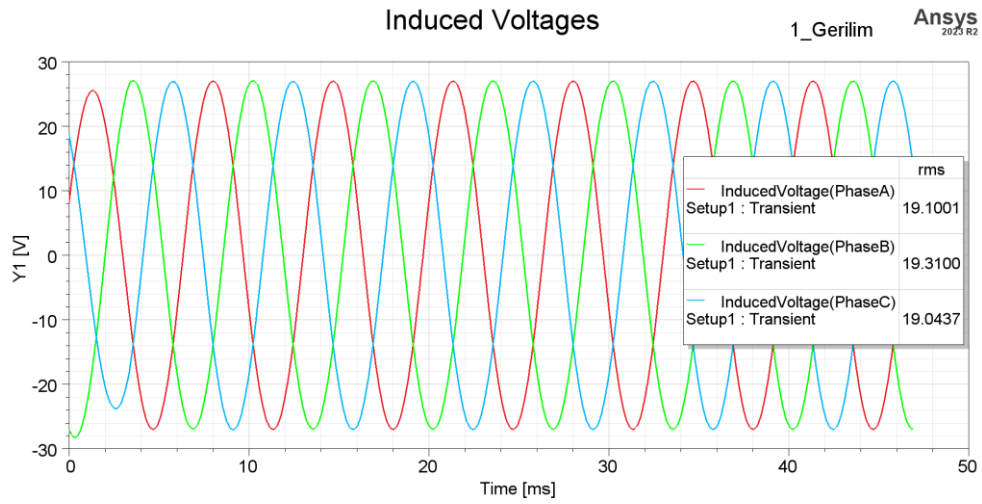


Şekil 3.18 Moment – zaman grafiği

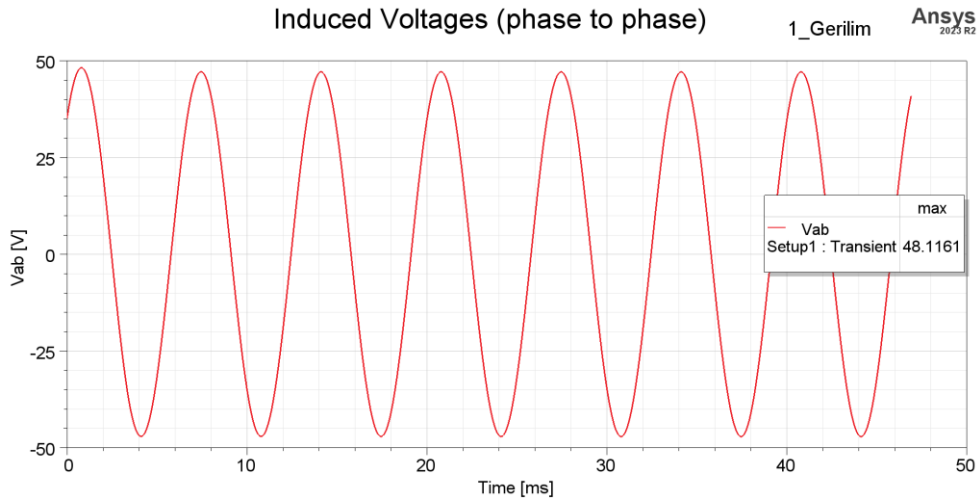


Şekil 3.19 Akım – zaman grafiği

Şekil 3.19’da akımın zamana bağlı değişimi verilmiştir. Burada akımın zamanla sürekli hal değerine geldiği gözlenmiştir. Bu durum Şekil 3.18’de momentin zamanla kararlı duruma gelmesini sağlamaktadır.

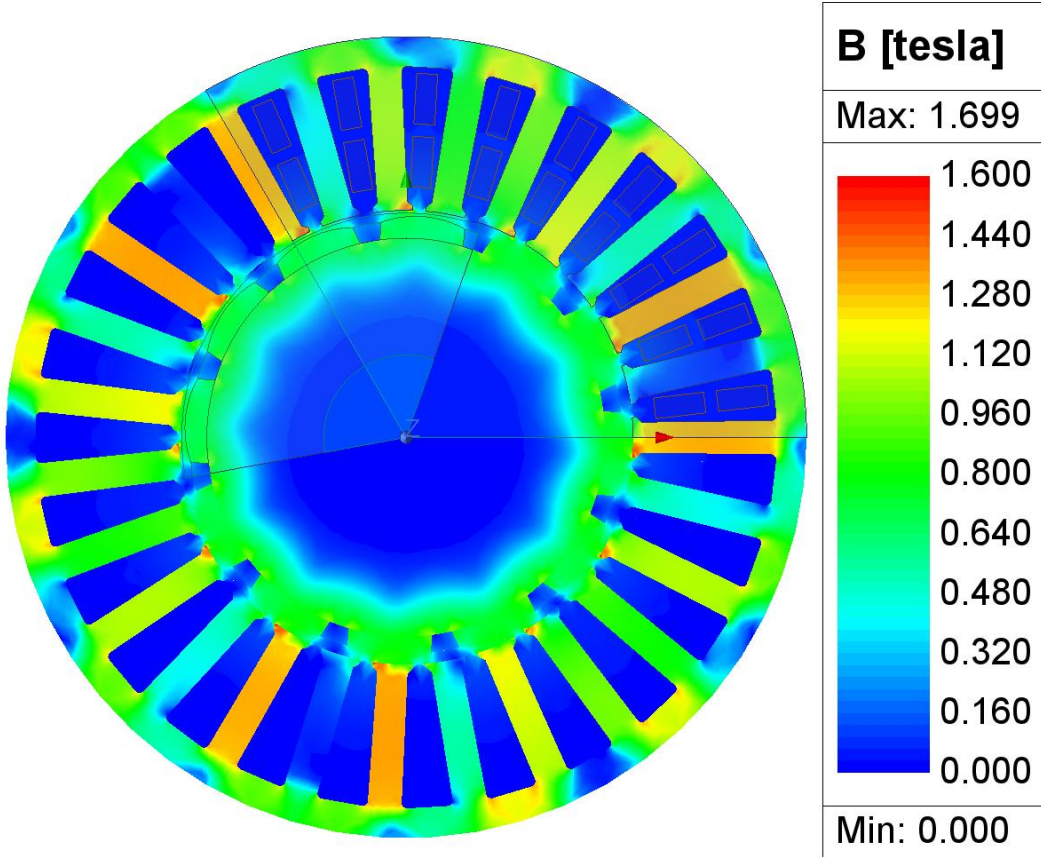


Şekil 3.20 Endüklenen gerilim – zaman grafiği



Şekil 3.21 Fazlar arası endüklenen gerilim – zaman grafiği

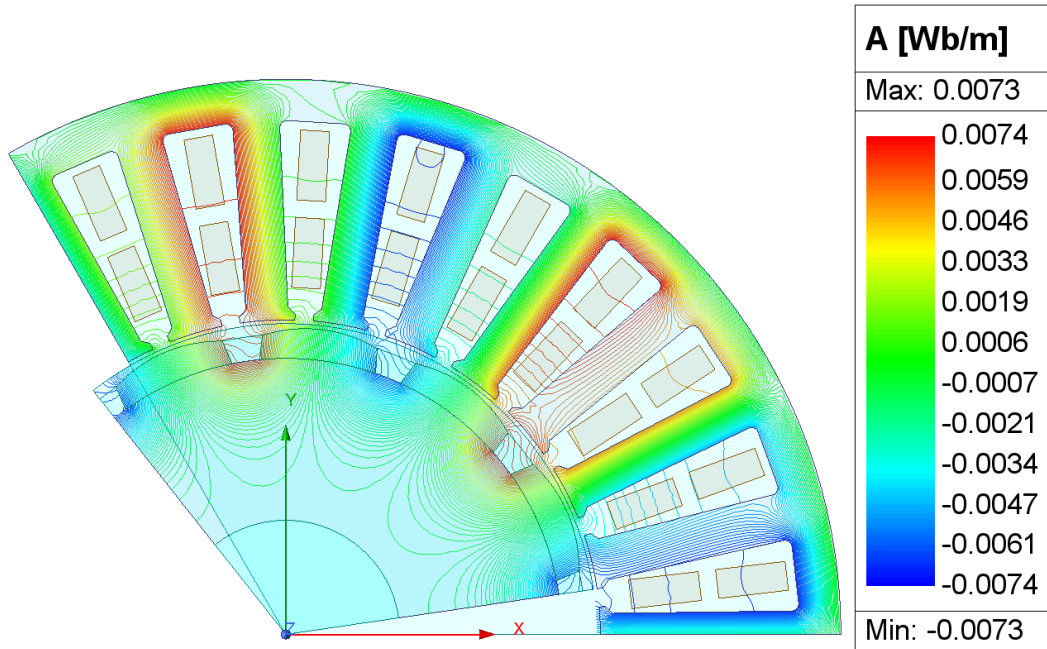
Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de endüklenen gerilim değerleri verilmiştir. Dalga formlarının saf sinüzoidal ve 3 faz için homojen yapıda olması istenen bir sonuçtur. Ayrıca fazlar arası endüklenen gerilimin tepe değerinin, 48 V DC bara gerilimine eşit olduğu gözlenmiştir. Bu durum istenen diğer bir sonuçtur.



Şekil 3.22 Nominal gerilim beslemesi için manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Şekil 3.22’de gösterilen manyetik akı yoğunluğu dağılımının tüm motor için düzgün ve homojen olması güzel bir sonuçtur. İlaveten mıknatıs, stator diş ve boyunduruk bölgelerindeki akı yoğunluğu değerlerinin beklenen şekilde olduğu gözlenmiştir. Özellikle elektrik motorlarında sac malzemesi için doyumun başladığı ilk nokta stator dişleridir. Nominal yükte çalışan servo motor için stator dişlerinde en fazla 1,4 T seviyesinde akı yoğunluğu olduğu ve böylelikle limiti aşmadığı Şekil 3.22’de görülmektedir.

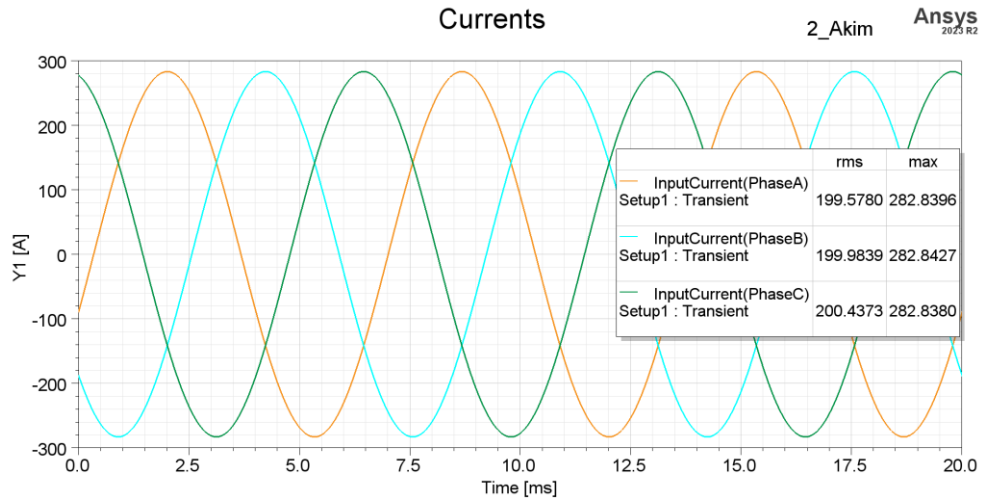
Şekil 3.23’de manyetik akı çizgilerinin dağılımı gösterilmiştir. Burada akı çizgilerinin birbirleriyle kesişmemesi ve kaçak akı çizgilerinin minimum seviyede olması istenen bir sonuçtur.



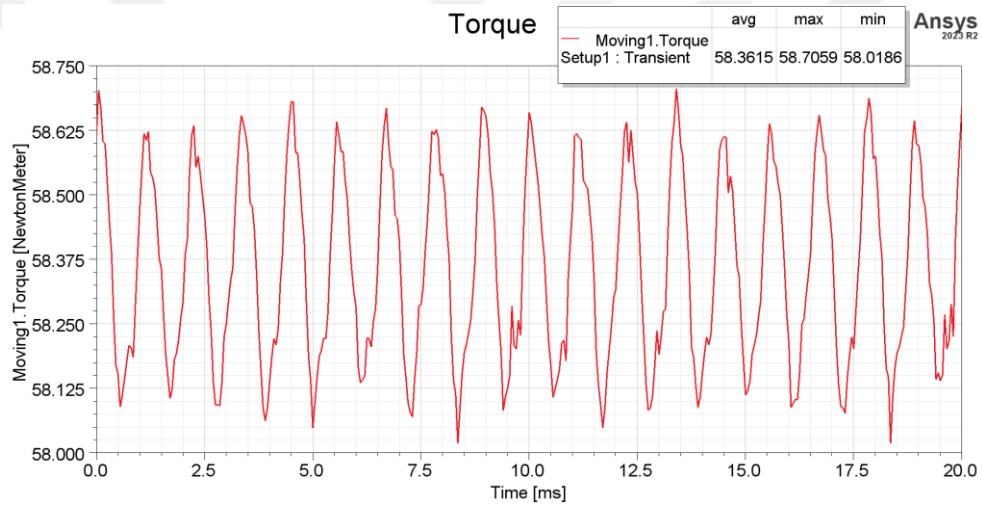
Şekil 3.23 Nominal gerilim beslemesi için manyetik akı çizgileri

Nominal akım beslemeli analiz ile aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Nominal akım değeri, Şekil 3.19 referans alınarak belirlenmiştir.

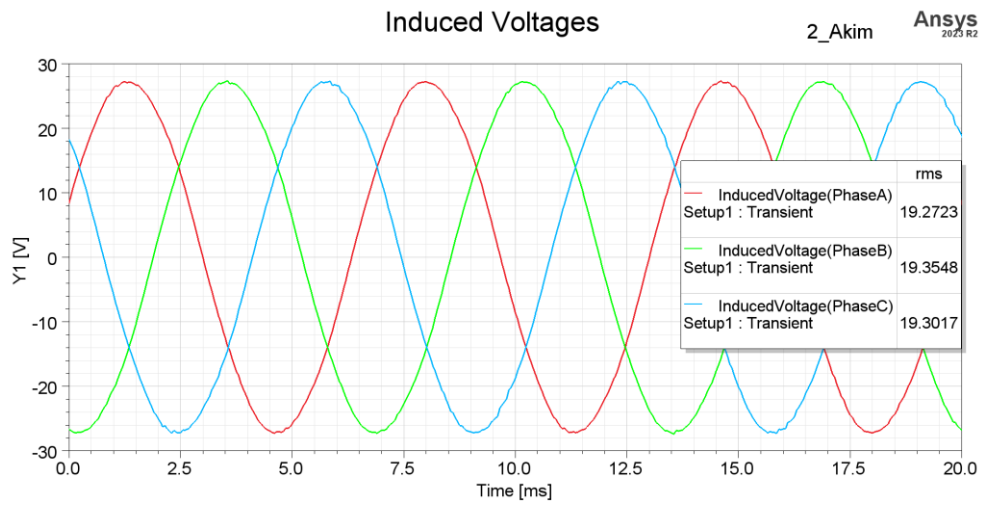
Şekil 3.24’te besleme akımına ait grafik gösterilmiştir. Bu besleme şeklinde, Şekil 3.25 – Şekil 3.29 aralığındaki sonuçlar elde edilmiştir.



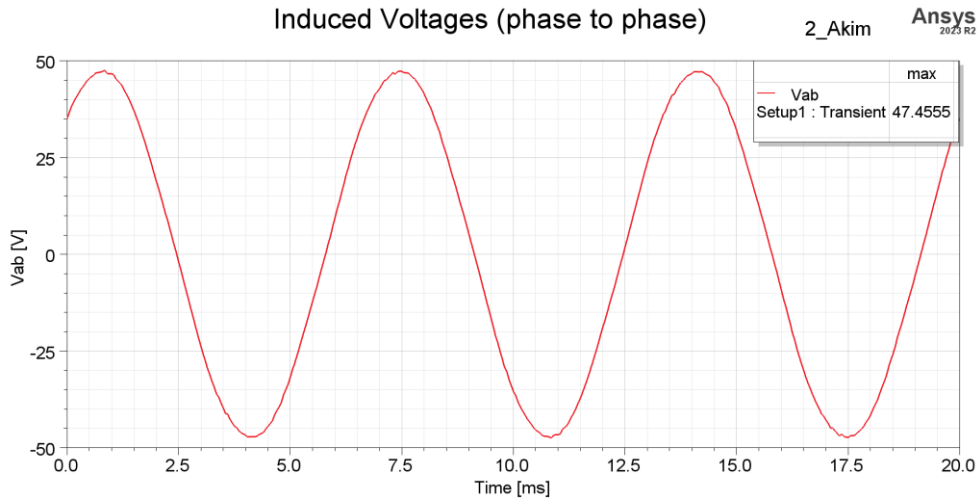
Şekil 3.24 Nominal besleme akımı – zaman grafiği



Şekil 3.25 Nominal moment – zaman grafiği



Şekil 3.26 Nominal akım beslemesi için endüklenen gerilim – zaman grafiği

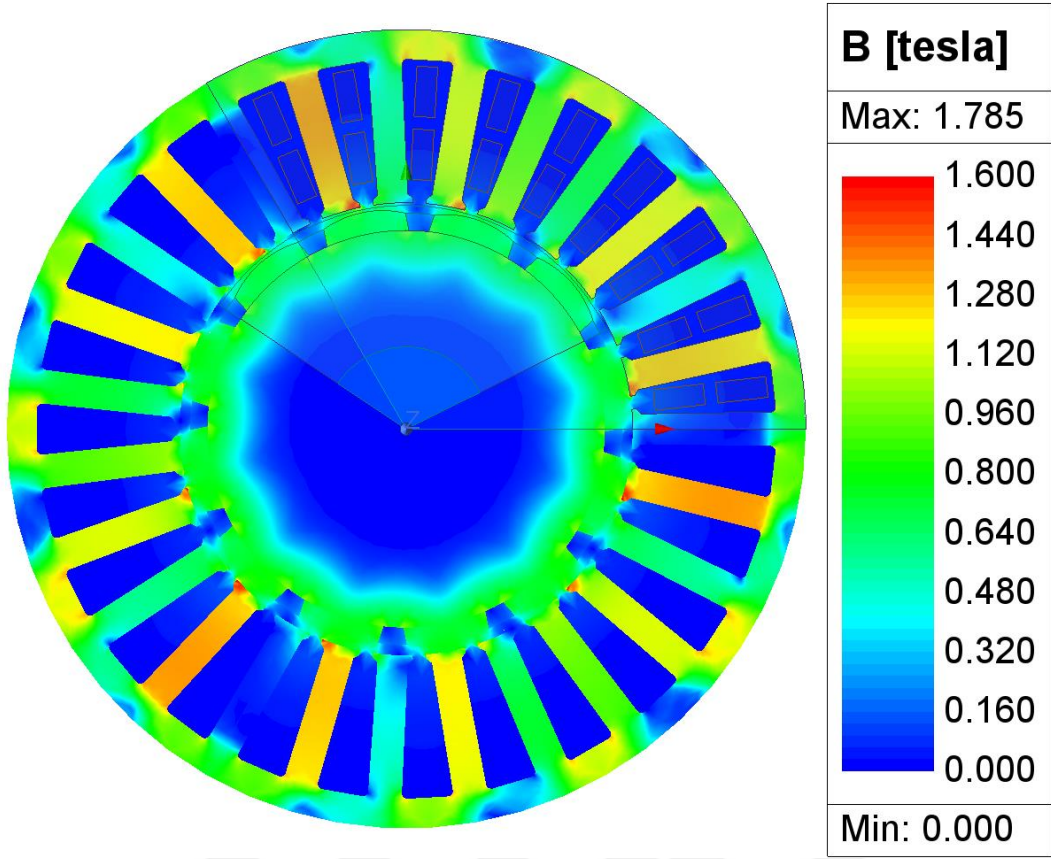


Şekil 3.27 Nominal akım beslemesi için fazlar arası endüklenen gerilim – zaman grafiği

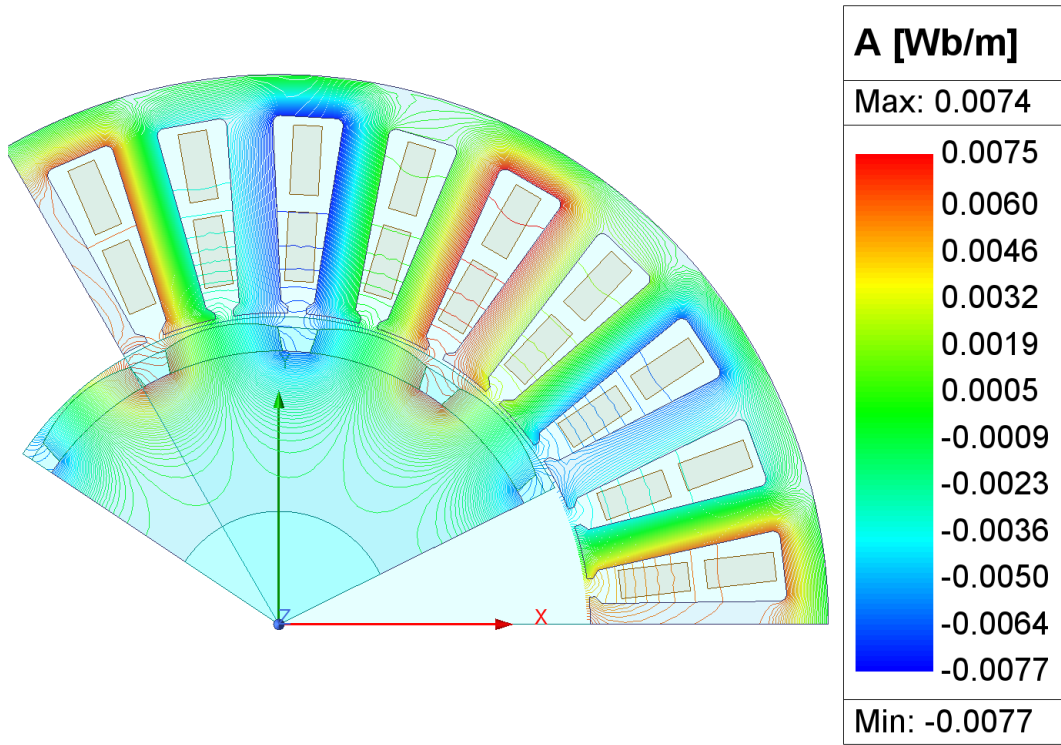
Şekil 3.25’de, momentin sürekli hal (steady-state) durumu ve dalgalanma miktarı görülmektedir. Momentin ortalama değeri, beklenen şekilde “RMxp” ve gerilim beslemeli analiz (bkz. Şekil 3.18) sonuçları ile uyumludur.

Şekil 3.26 ve Şekil 3.27’de gözlenen endüklenen gerilim grafikleri, gerilim beslemeli analiz sonuçları ile çok benzerdir (bkz. Şekil 3.20 ve Şekil 3.21). Bu sonuçlar, aynı şekilde yorumlanabilir.

Şekil 3.28 ve Şekil 3.29’daki manyetik akı yoğunluğu ve çizgileri de gerilim beslemeli analiz sonuçları ile aynıdır.



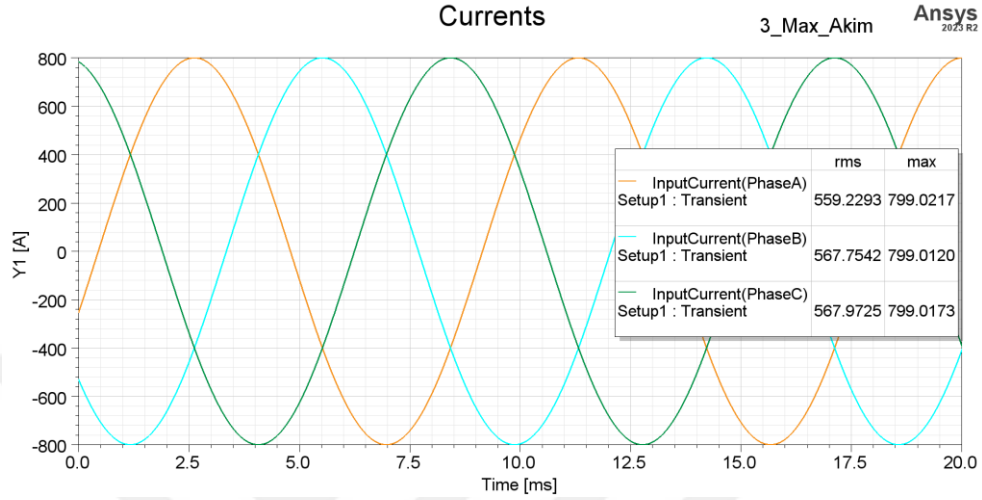
Şekil 3.28 Nominal akım beslemesi için manyetik akı yoğunluğu dağılımı



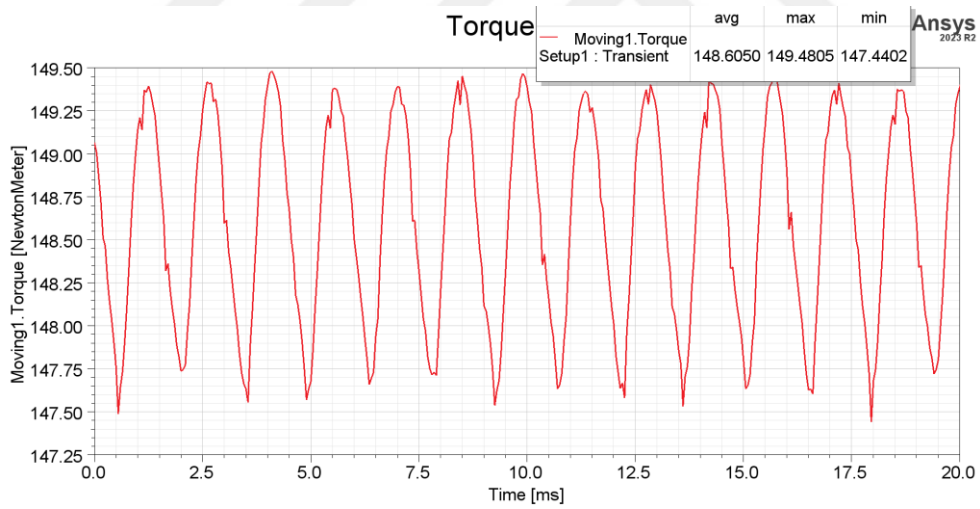
Şekil 3.29 Nominal akım beslemesi için manyetik akı çizgileri

Maksimum akım beslemeli analiz ile aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Maksimum akım değeri, Tablo 3.1’den alınmıştır.

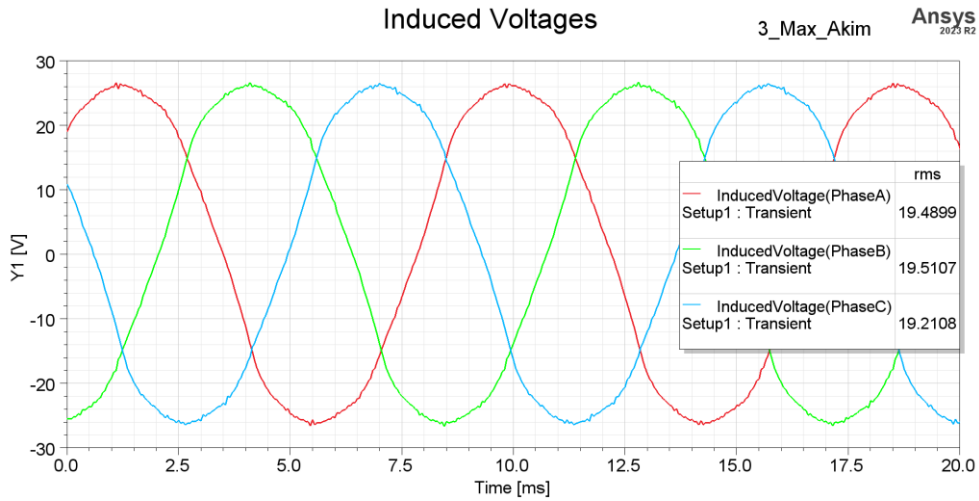
Şekil 3.30’da maksimum besleme akımına ait grafik gösterilmiştir. Bu besleme şeklinde, Şekil 3.31 – Şekil 3.35 aralığındaki sonuçlar elde edilmiştir.



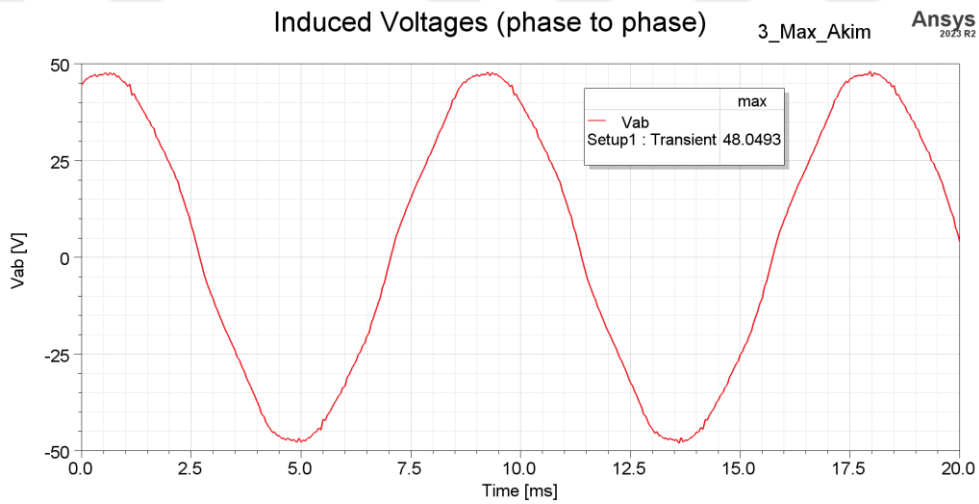
Şekil 3.30 Maksimum besleme akımı – zaman grafiği



Şekil 3.31 Maksimum moment – zaman grafiği



Şekil 3.32 Endüklenen gerilim – zaman grafiği



Şekil 3.33 Fazlar arası endüklenen gerilim – zaman grafiği

Şekil 3.31’de maksimum momentin sürekli hal (steady-state) durumu ve dalgalanma miktarı görülmektedir.

Şekil 3.32 ve Şekil 3.33’te maksimum yükleme durumu için endüklenen gerilim grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerin düzgün bir sinüzoidal formda ve dengeli 3 faz yapısında olması istenen bir sonuçtur. İlâveten fazlar arası gerilimin tepe değeri de, 48 V DC bara gerilimine eşit olması istenen diğer bir sonuçtur.

Şekil 3.34’te maksimum yükleme durumu için servo motorun manyetik akı yoğunluğu dağılımı verilmiştir. Mıknatıs, stator diş ve boyunduruk bölgelerindeki akı yoğunlukları limitleri aşmamıştır. Mıknatıslarda yaklaşık 0,9-1 T değeri gözlenmiştir. Stator dişlerinde, malzemenin doyma değeri olan 1,8 T değeri gözlenmiştir, dolayısıyla çelik sac malzeme tam performansta kullanılmıştır. Stator

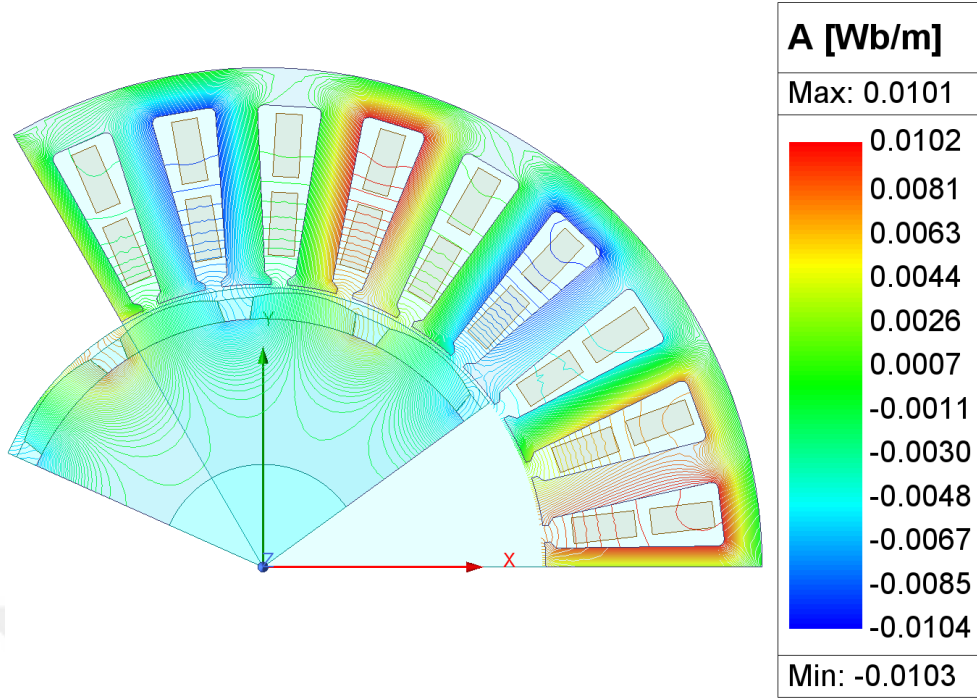
B [tesla]

Max: 2.087

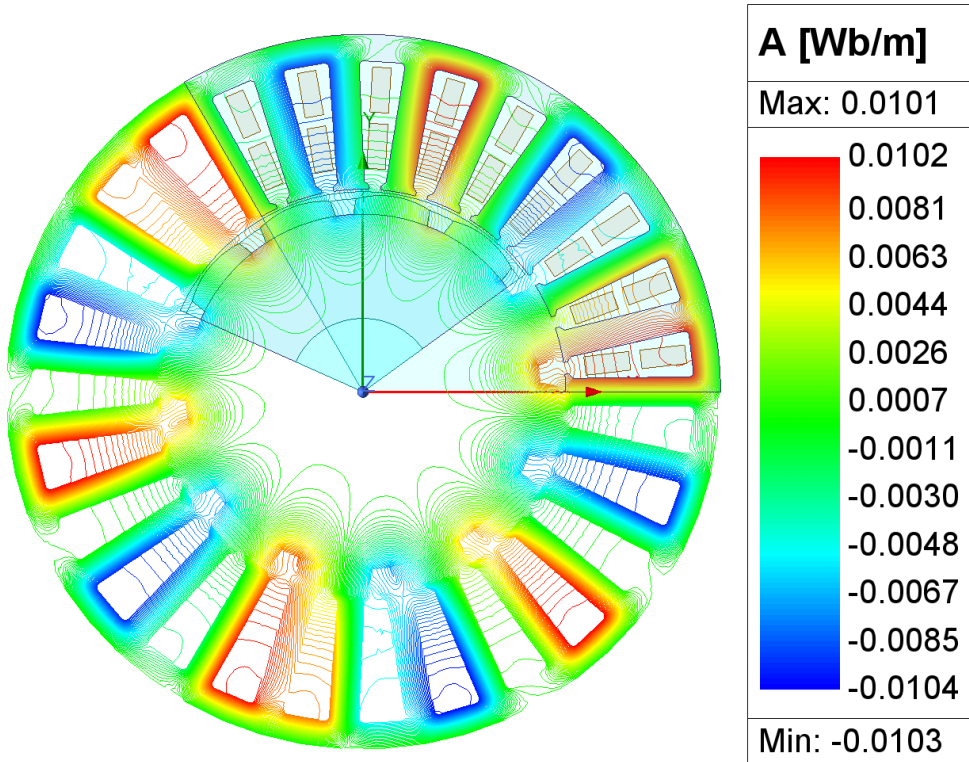
1.800
1.620
1.440
1.260
1.080
0.900
0.720
0.540
0.360
0.180
0.000

Min: 0.000

Şekil 3.35 ve Şekil 3.36’da maksimum yükleme durumu için manyetik akı çizgileri gösterilmiştir. Burada da akı çizgilerinin birbirleriyle kesişmemesi ve kaçak akı çizgilerinin minimum seviyede olması istenen bir sonuçtur.



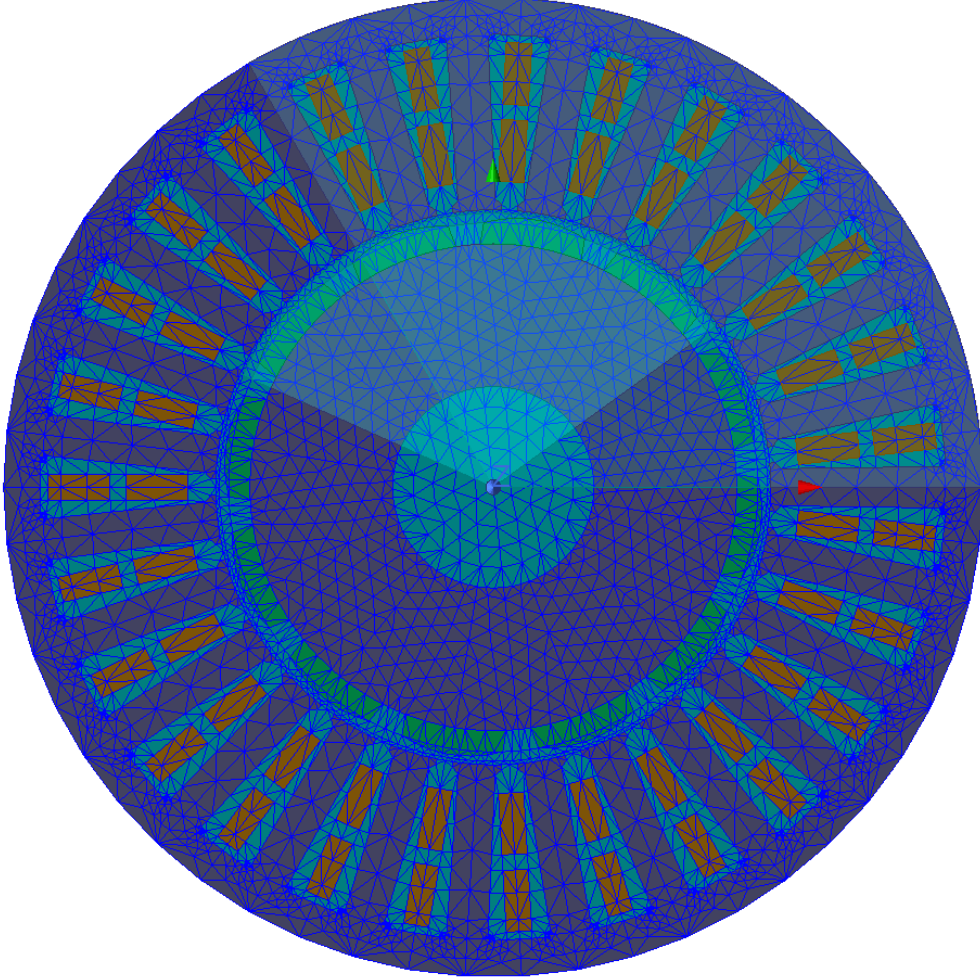
Şekil 3.35 Maksimum akım için manyetik akı çizgileri



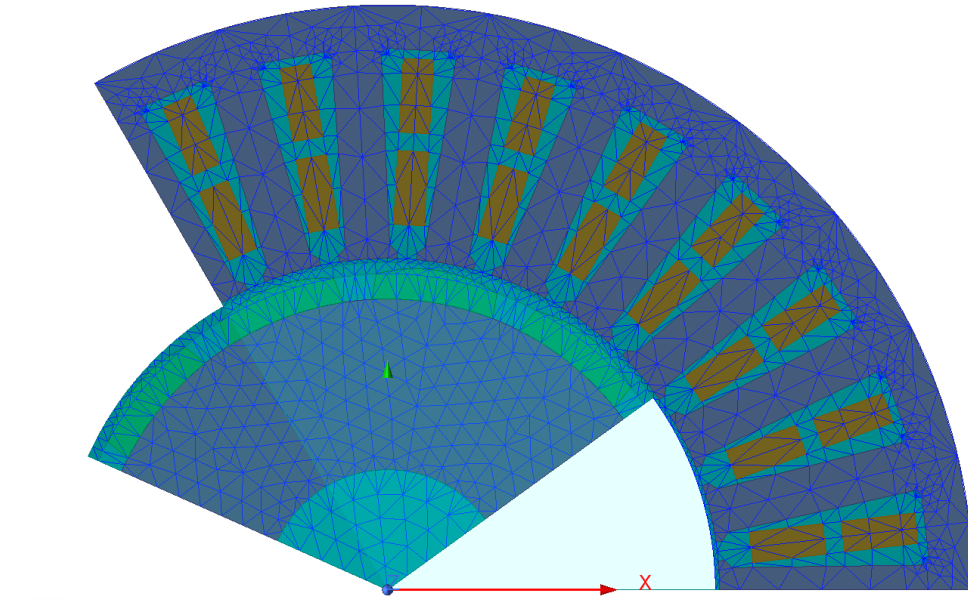
Şekil 3.36 Maksimum akım için servo motorun tüm manyetik akı çizgileri

Bu aşamaya kadar yapılan analizlerde, Şekil 3.37 ve Şekil 3.38'deki ağ (mesh) yapısı kullanılmıştır. Ağ yapısı, FEM analizlerinde önemli bir etkidir. Şekil 3.38'de detaylıca görüldüğü üzere, stator-rotor kesişim bölgelerinde (mıknatıslar ve

hava aralığı) ve stator boyunduruklarında -daha gerçekçi bir sonuç almak için- daha fazla ađ yapısı kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına etki değeri dūřuk diğer bölgelerde ise daha az ađ yapısı kullanılmıştır.

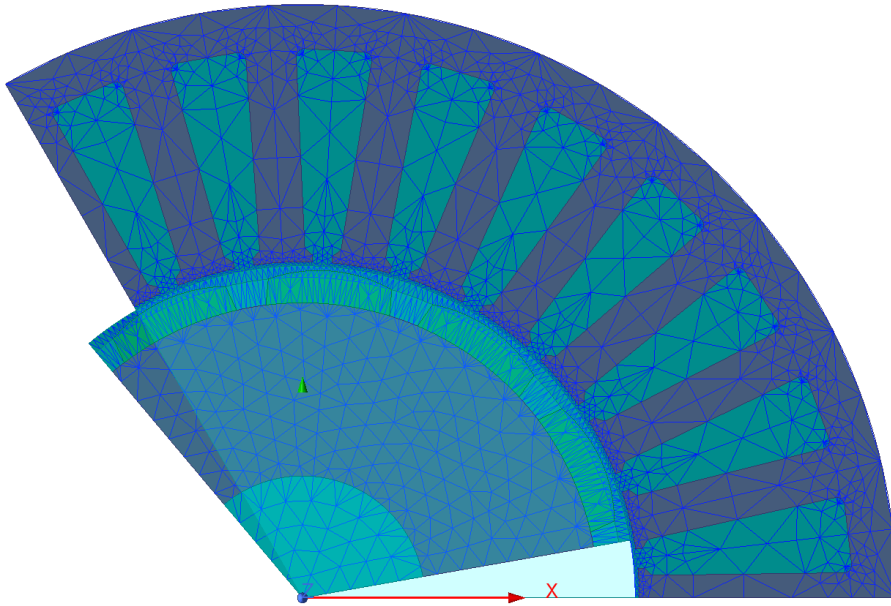


şekil 3.37 Servo motorun ađ (mesh) yapısı



Şekil 3.38 Servo motor kesitinin ağ (mesh) yapısı

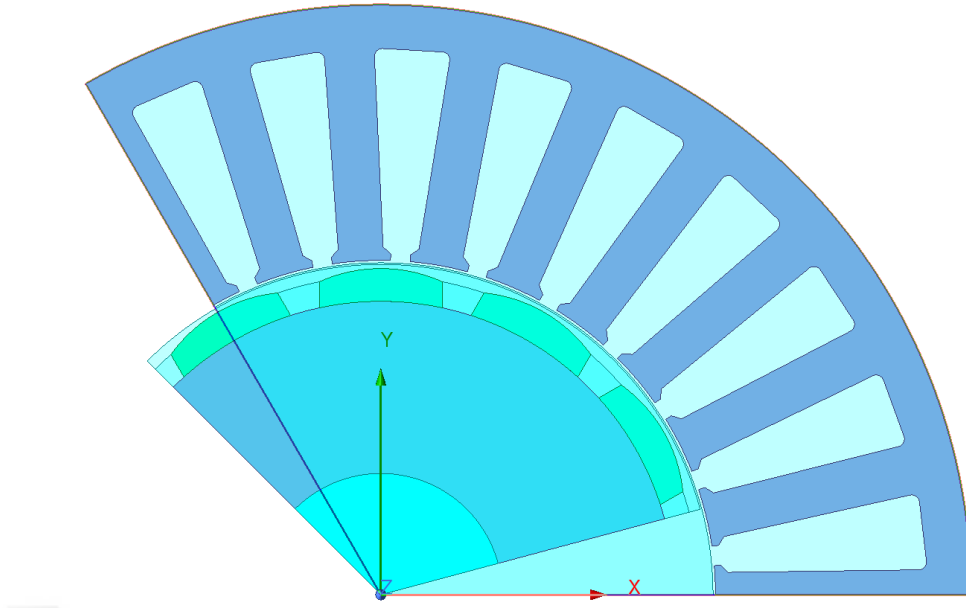
Vuruntu momenti için yapılan beslemesiz analizde ise, daha yoğun bir ağ yapısı kullanılmıştır. Ağ yapısına ait görsel Şekil 3.39'da verilmiştir.



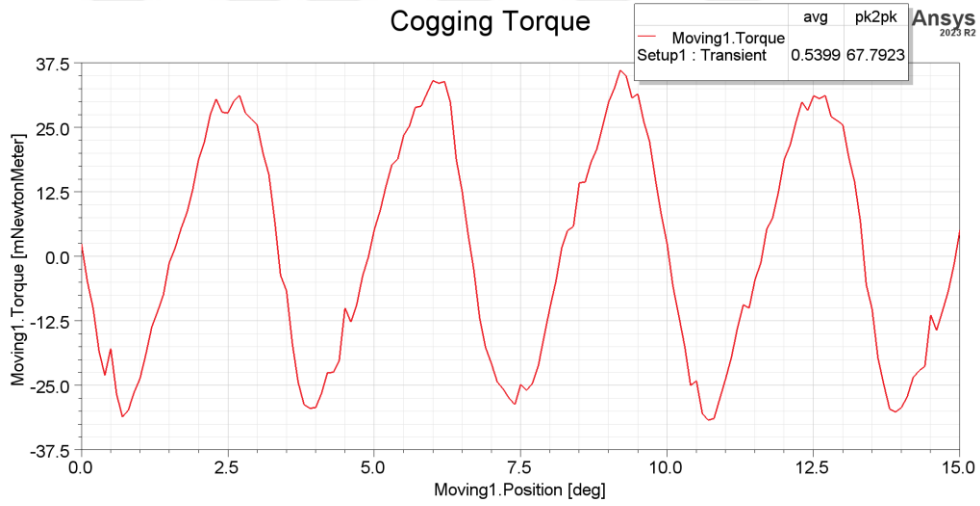
Şekil 3.39 Vuruntu momenti için ağ yapısı

Beslemesiz analiz ile aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Vuruntu momenti için yapılan bu analizde, tüm beslemeler ve sargılar kaldırılarak motorun $1^\circ/\text{s}$ hızla dönmesi sağlanmıştır (bkz. Şekil 3.40). Bu analizde, Şekil 3.41'deki vuruntu momenti grafiği elde edilmiştir.



Şekil 3.40 Beslemesi olmayan servo motor kesiti



Şekil 3.41 Vuruntu momenti – pozisyon grafiği

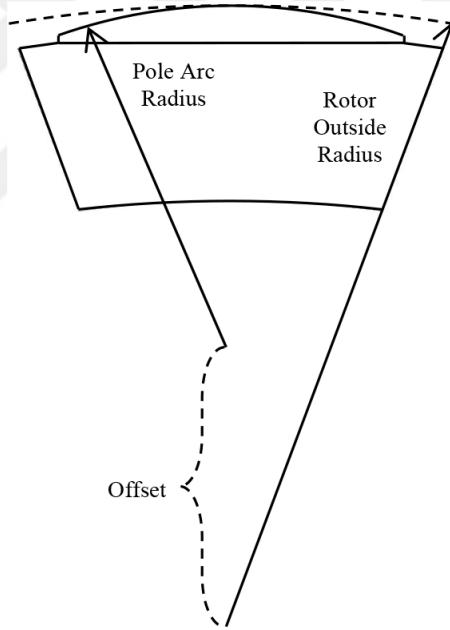
Şekil 3.41’de, vuruntu momenti grafiğinin düzgün bir yapıda ve periyodik bir formda olduğu görülmektedir. İlaveten vuruntu momentinin ortalama değerinin 0’a yakın olduğu gözlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar güzel ve istenen bir durumdur.

Yapılan tüm analiz çalışmalarının sonuçları, sonraki bölümlerde ele alınacak motor çeşitleri ile kıyaslamada kullanılacaktır.

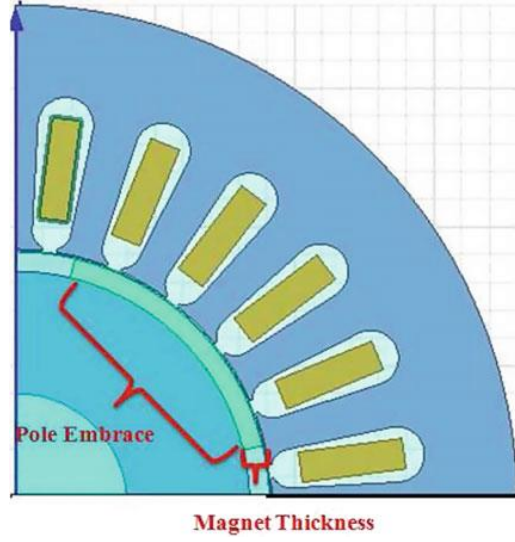
ALTERNATİF SERVO MOTOR TASARIMLARI

Önceki bölümde referans olarak ele alınan ve modelleme – analiz faaliyetleri gerçekleştirilen servo motor için moment dalgalanmasının incelenmesi ve iyileştirilmesi amacıyla alternatif tasarımlar ortaya çıkarılmıştır. Bu tasarımlar, daha önceden de belirtildiği üzere, mıknatıs geometrisi değiştirilerek elde edilmiştir.

Alternatif motor tasarımları için mıknatıs geometrisinde iki bileşen değiştirilmiştir. Bu bileşenler, mıknatıs yüzey öteleme (magnet offset) ve mıknatıs genişliği (magnet embrace) parametreleridir. Bu parametrelere ait görseller sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1 Mıknatıs öteleme gösterimi [39]



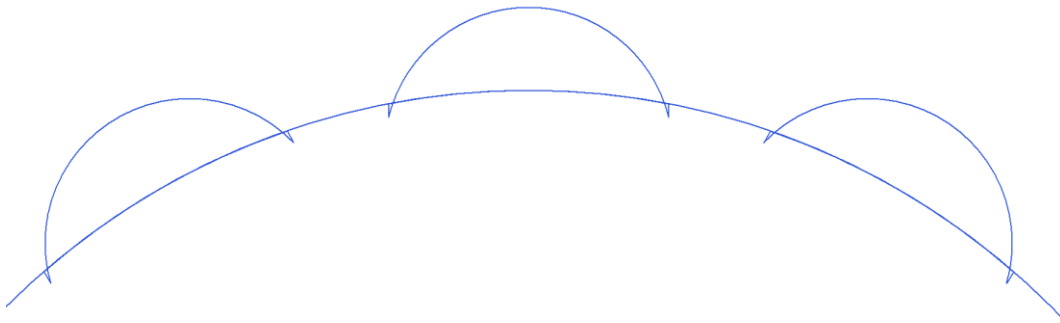
Şekil 4.2 Mıknatıs genişliği gösterimi [40]

4.1 Mıknatıs Yüzey Öteleme Değişikliği ile Elde Edilen Alternatif Servo Motorlar

Mıknatıs yüzey öteleme değişimi ile, mıknatıs şeklinde bir kabarıklık/bombe oluşmaktadır (bkz. Şekil 4.1). Bu kabarıklık mıknatısı ve hava aralığını değiştirdiği için moment ve bağlı bileşenlerinde de değişikliğe sebep olmaktadır.

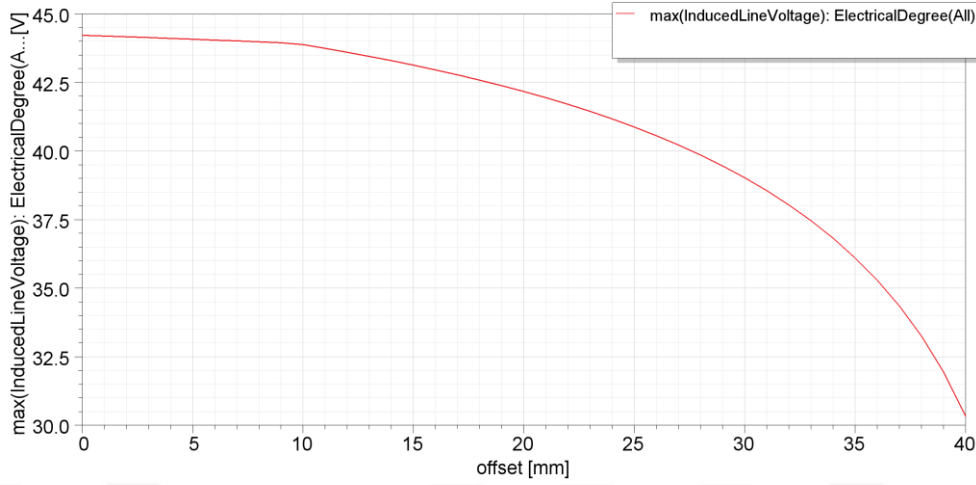
Referans servo motor için mıknatıs yüzey öteleme değeri 27 mm'dir. Bu değer 0 ile 40 mm arasında değiştirilmiştir. Bu limitler aşağıda açıklandığı gibi belirlenmiştir.

- 0 mm → Daha düşük bir öteleme miktarı sayısal olarak mümkün olmadığı için alt limit olarak belirlenmiştir.
- 40 mm → Daha yüksek bir öteleme miktarı fiziki bozulmalara sebep olduğu için üst limit olarak belirlenmiştir. Örneğin; 41 mm için rotor görseli Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

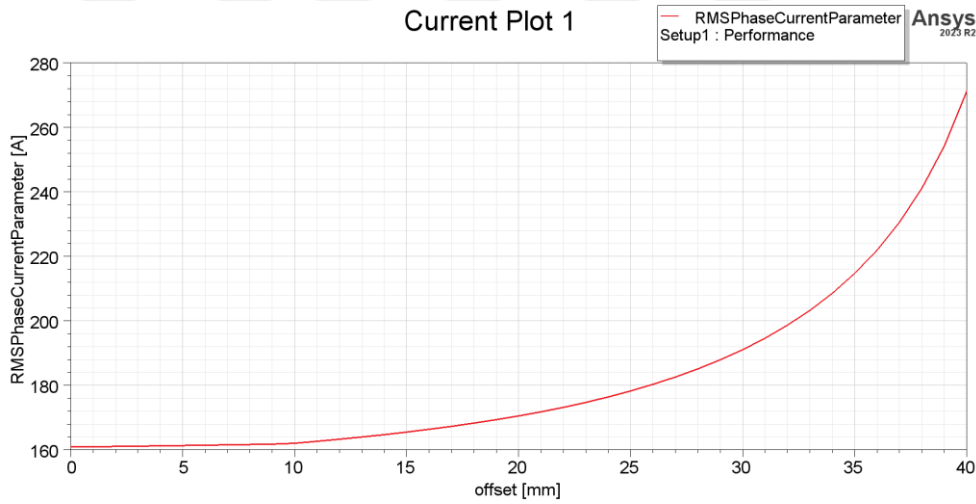


Şekil 4.3 41 mm mıknatıs öteleme için rotor kesiti

Belirlenen limitler ile parametrik çözümler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar, Şekil 4.4 – Şekil 4.10 aralığında gösterilmiştir.

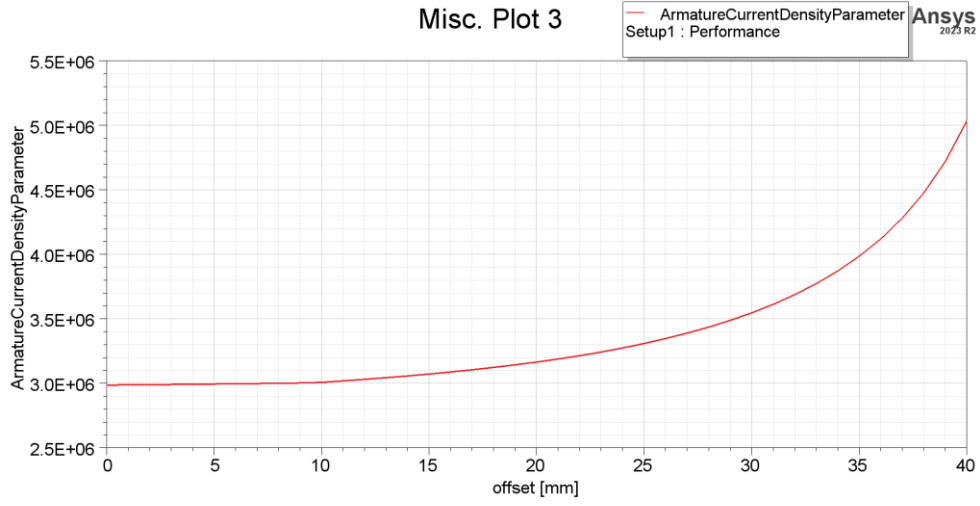


Şekil 4.4 Endüklenen gerilimin mıknatıs yüzey ötelenmesine göre değişimi

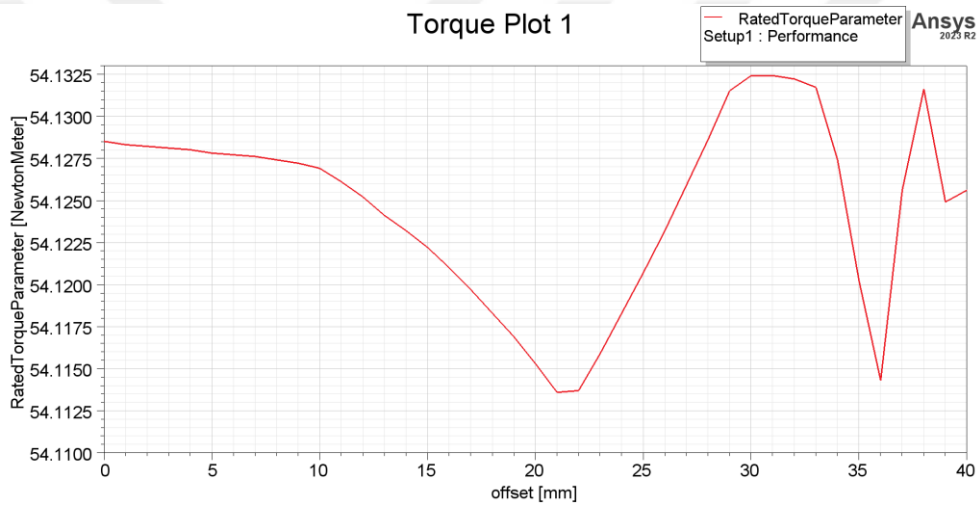


Şekil 4.5 Faz akımının mıknatıs yüzey ötelenmesine göre değişimi

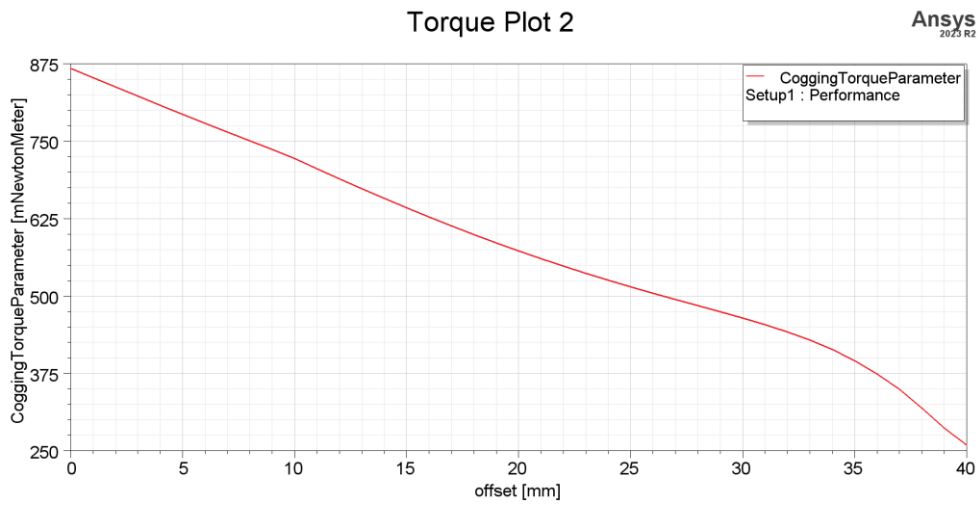
Şekil 4.5'te, faz akımının radikal bir şekilde değişmesi moment katsayısının değişeceğini göstermektedir. Akım arttığı için benzer şekilde Şekil 4.6'da akım yoğunluğu da artmıştır. Ancak akım yoğunluğu, seçilen aralık (0-40 mm) için halen istenen limitlerdedir.



Şekil 4.6 Akım yoğunluğunun mıknatıs yüzey ötelenmesine göre değişimi



Şekil 4.7 Momentin mıknatıs yüzey ötelenmesine göre değişimi



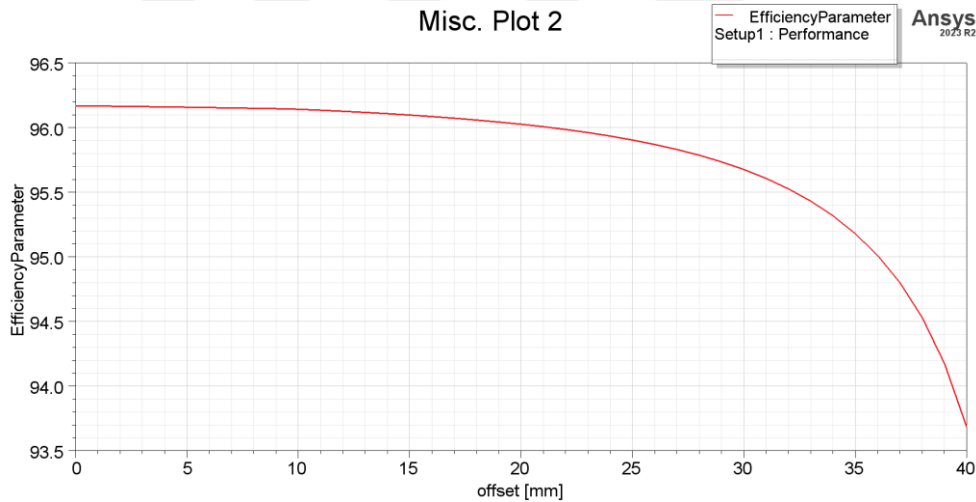
Şekil 4.8 Vuruntu momentinin mıknatıs yüzey ötelenmesine göre değişimi

Seçilen aralık (0-40 mm) için Şekil 4.7’de momentin minimal seviyede deėiştėđi gözlenmiştir. Ancak moment dalgalılığının değiştirmesi yapılacak analizler ile belirlenecektir.

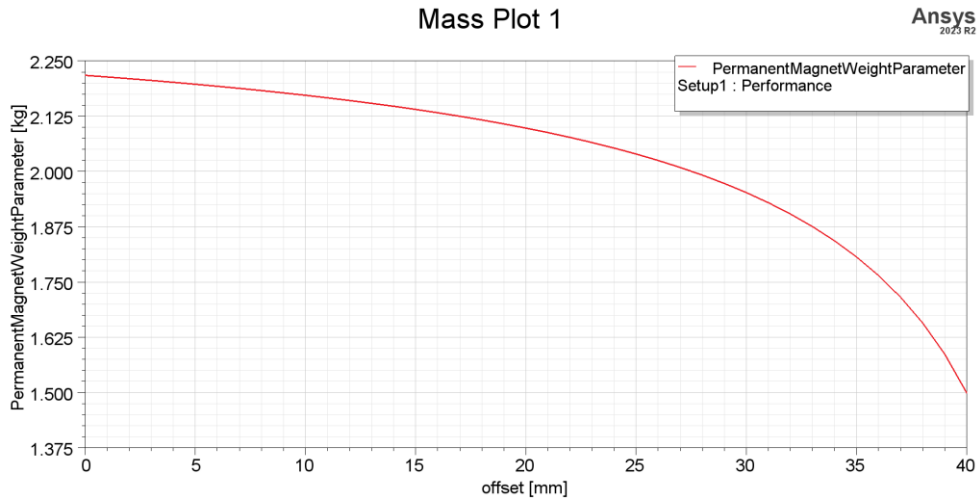
Şekil 4.8’de, vurunu momentinin ciddi seviyede deėiştėđi gözlenmiştir. Bu durum moment dalgalanmasına da doğrudan etki edecektir.

Şekil 4.9’da, seçilen aralık (0-40 mm) için verimin %93’den fazla olduğu görölmektedir. Bu durum ilgili tüm değerlerin verim açısından ciddi bir değiştikliğe sebep olmayacağını göstermektedir.

Şekil 4.10’da, mıknatıs kütesinin doğal olarak azaldığı görölmektedir. Bu durum, minimum mıknatıs kullanımı ile maksimum performansın elde edilmesi açısından önemlidir. Ancak mıknatısta yapılacak yüzey öteleme işlemi maliyetli ve zaman alan bir işlemdir. Dolayısıyla mıknatıs kütesi için maliyet-performans analizi bu kapsamda yapılmalıdır.



Şekil 4.9 Verimin mıknatıs yüzey ötelenmesine göre değiştirmesi

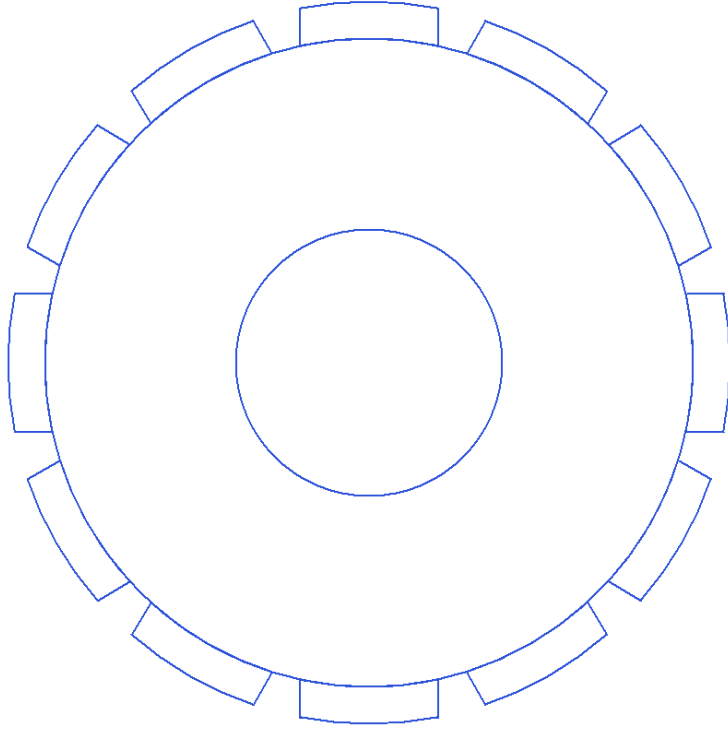


Şekil 4.10 Mıknatıs kütlelerinin mıknatıs yüzey ötelenmesine göre değişimi

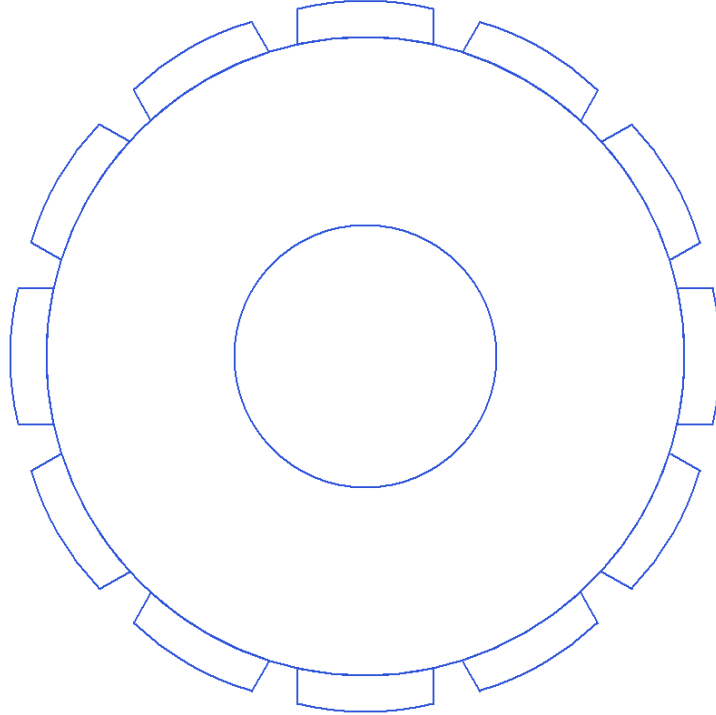
Elde edilen sonuçların değerlendirilmesi kapsamında, aşağıdaki mıknatıs yüzey öteleme miktarları seçilmiştir.

- 0 mm
- 10 mm
- 31 mm
- 36 mm

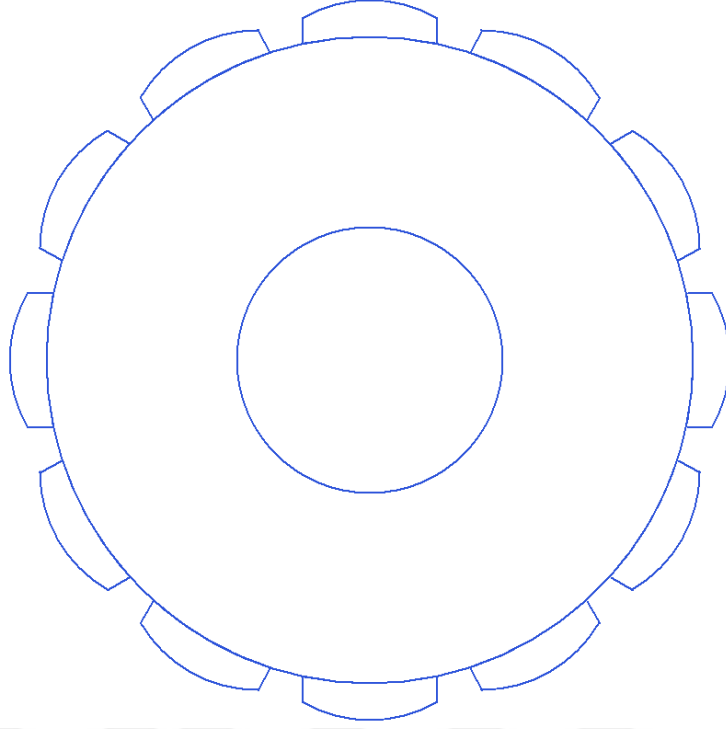
Seçilen değerlere ait rotor görselleri Şekil 4.11 – Şekil 4.14 aralığında verilmiştir.



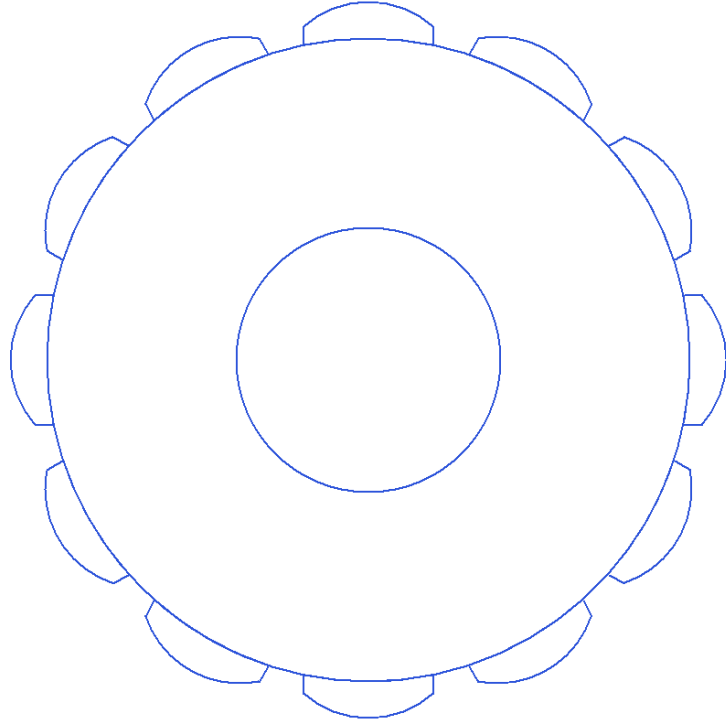
Şekil 4.11 0 mm mıknatıs yüzey öteleme için rotor görseli



Şekil 4.12 10 mm mıknatıs yüzey öteleme için rotor görseli



Şekil 4.13 31 mm mıknatıs yüzey öteleme için rotor görseli



Şekil 4.14 36 mm mıknatıs yüzey öteleme için rotor görseli

Seçilen bu değerler için sonraki aşamada, referans servo motor ile benzer şekilde analiz çalışmaları gerçekleştirilecektir.

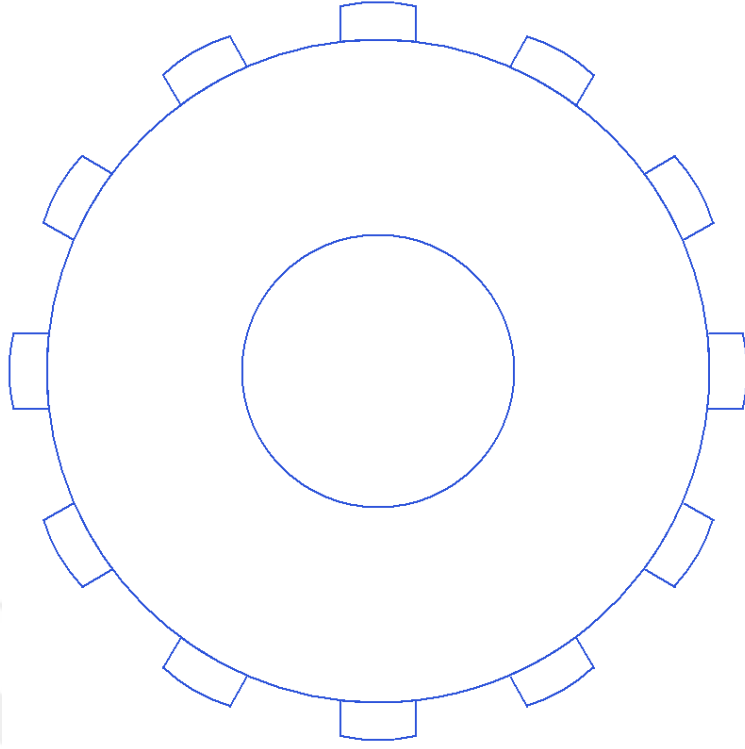
Mıknatıs yüzey öteleme değişikliği sürecinde stator yapısı hiçbir şekilde değiştirilmemiştir.

4.2 Mıknatıs Genişliği Değişikliği ile Elde Edilen Alternatif Servo Motorlar

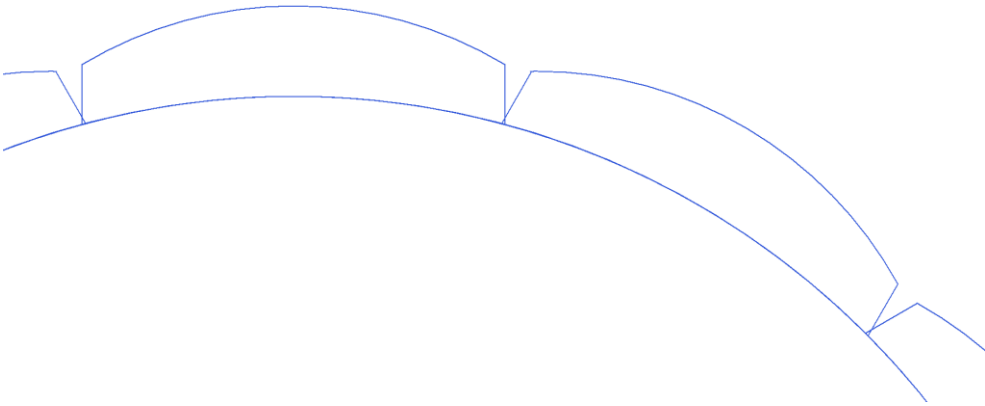
Mıknatıs genişliği değişimi ile, rotor yüzey alanında bulunan mıknatıs miktarı değişmektedir (bkz. Şekil 4.2). Bu durum performans değişimine, moment ve bağlı bileşenlerinin değişimine sebep olmaktadır. Çünkü servo motordaki mıknatıs hacmi ve rotor yüzeyi alanına yerleşimi tüm performans kriterlerine doğrudan etki etmektedir.

Referans servo motor için mıknatıs genişliği oranı 0,74'tür. Bu değer 0,4 ile 0,93 arasında değiştirilmiştir. Bu limitler aşağıda açıklandığı gibi belirlenmiştir.

- 0,4 → Rotor yüzey alanının %40'ından daha az bir alanda mıknatıs bulunması performans kriterleri açısından anlamlı değildir (bkz. Şekil 4.15). Bir servo motorda yüksek performans elde edilmesi için olabildiğince mıknatıs içermesi gerekmektedir. Bu sebeple alt limit olarak belirlenmiştir.
- 0,93 → Daha yüksek değerli bir oran fiziki bozulmalara sebep olduğu için üst limit olarak belirlenmiştir. Örneğin; 0,94 değeri için rotor görseli Şekil 4.16'da gösterilmiştir.

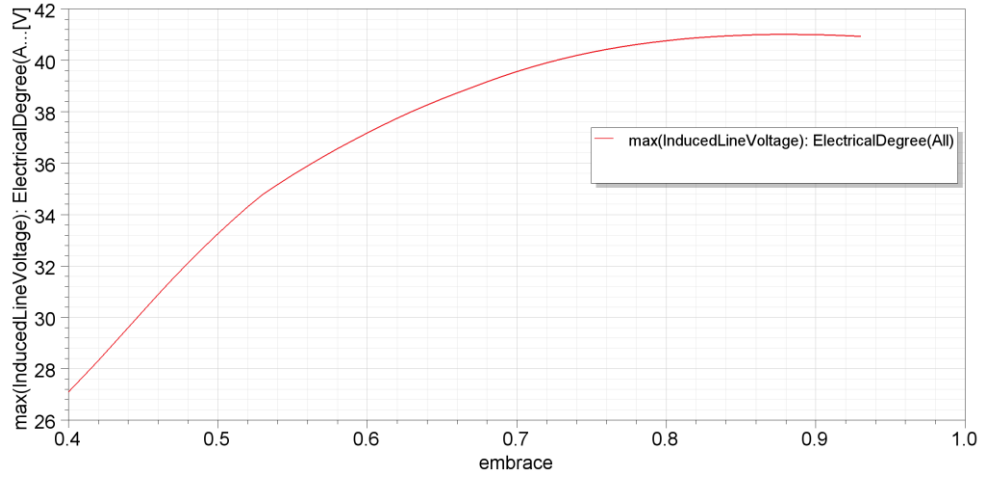


Şekil 4.15 0,4 mıknatıs genişliği oranı için rotor görseli

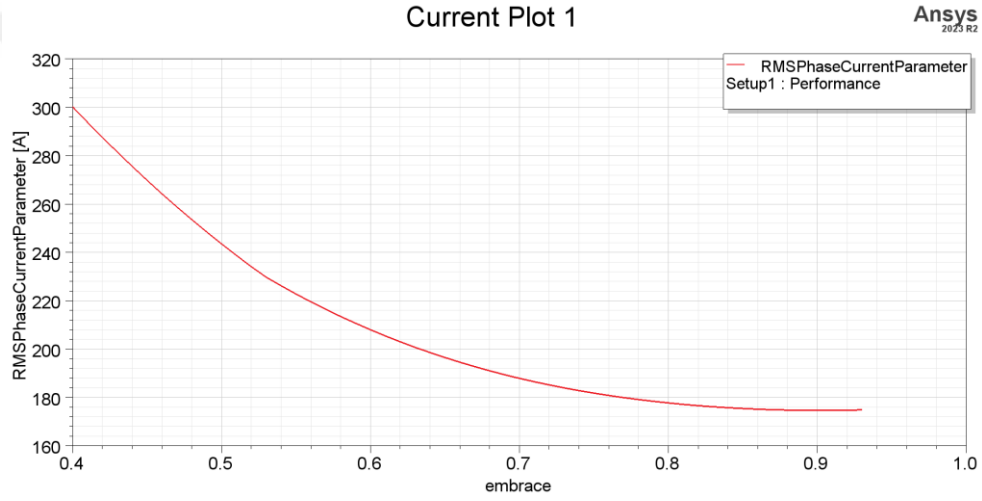


Şekil 4.16 0,94 mıknatıs genişliği oranı için rotor kesiti

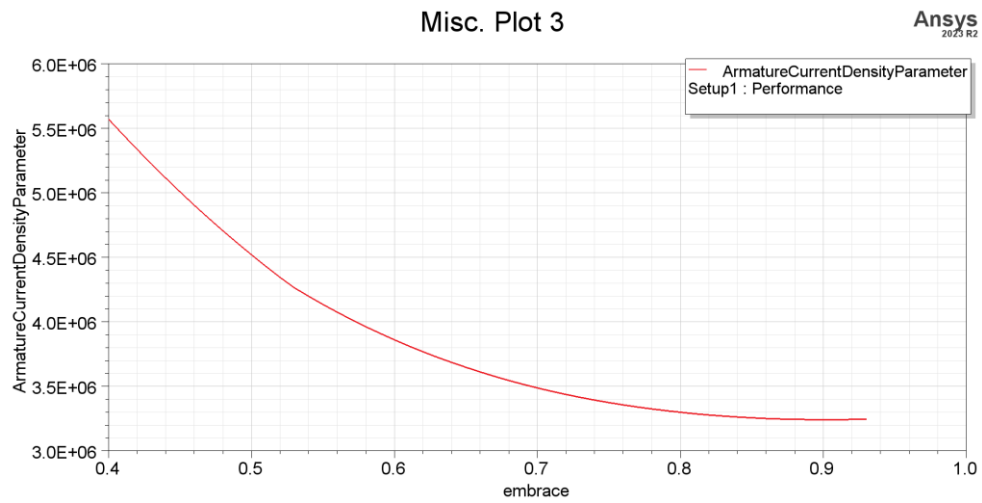
Belirlenen limitler ile parametrik çözümler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar, Şekil 4.17 – Şekil 4.23 aralığında gösterilmiştir.



Şekil 4.17 Endüklenen gerilimin mıknatıs genişliğine göre değişimi



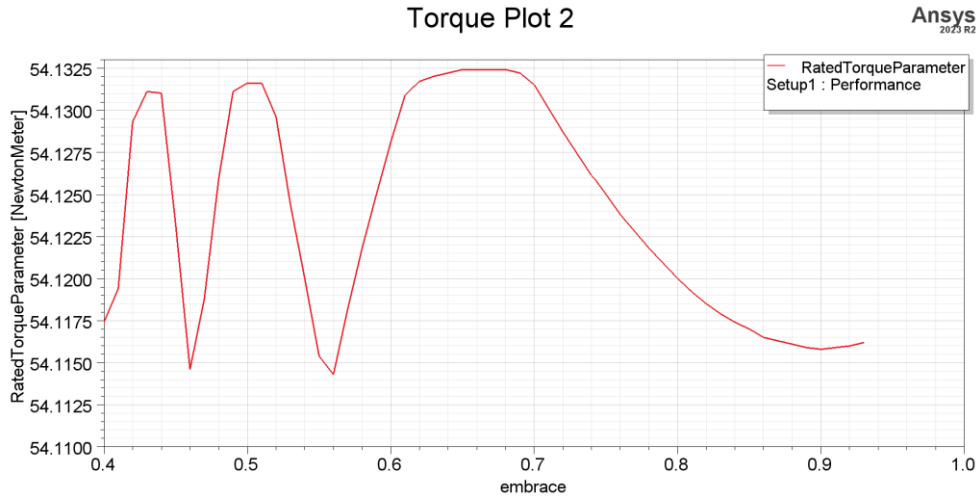
Şekil 4.18 Faz akımının mıknatıs genişliğine göre değişimi



Şekil 4.19 Akım yoğunluğunun mıknatıs genişliğine göre değişimi

Şekil 4.18’de görülen faz akımının ciddi değişimi yine moment katsayısının değişeceğini göstermektedir. Akımın değişimine benzer şekilde Şekil 4.19’da akım yoğunluğu da değişmiştir. Akım yoğunluğu, seçilen aralık (0,4-0,93) için halen istenen limitlerdedir.

Şekil 4.20’de, moment değişiminin yine minimal seviyede olduğu gözlenmiştir. Moment dalgalılığı yapılacak analizler ile incelenecektir.

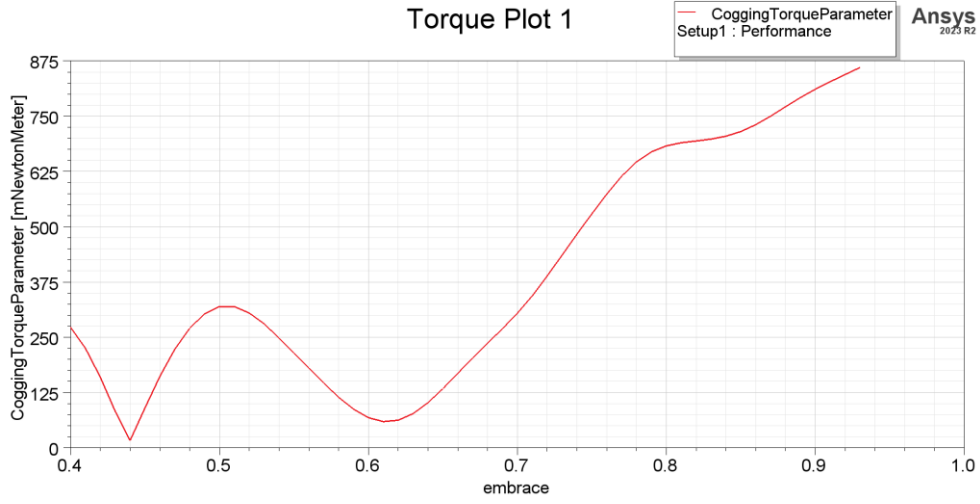


Şekil 4.20 Momentin mıknatıs genişliğine göre değişimi

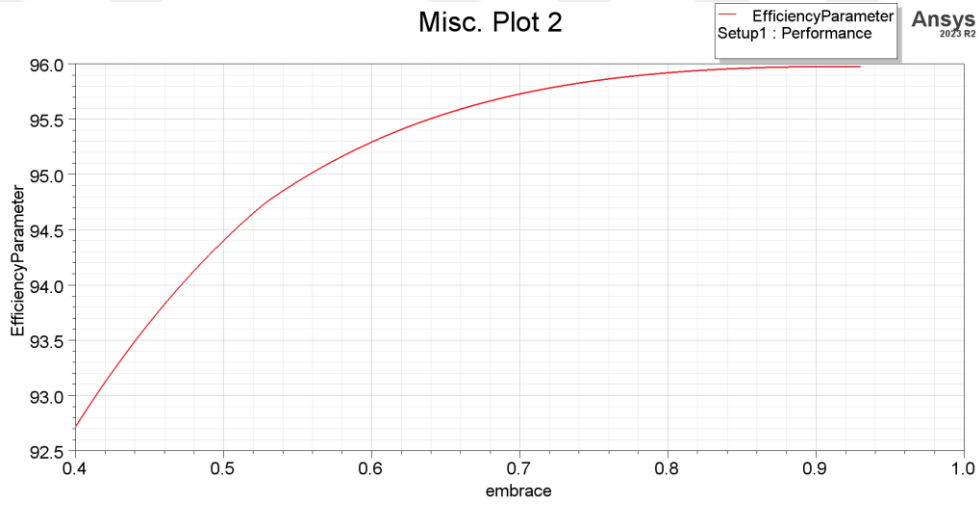
Şekil 4.21’de, 0,7 değerinden düşük bölgelerde, vuruğu momentinin belli bir aralıkta salınım yaptığı gözlenmektedir. Salınım olan bölgede, vuruğu momentinin maksimum değeri oldukça düşüktür. Bu durum moment dalgalanmasına da pozitif anlamda etki edecektir. 0,7 değerinden yüksek bölgelerde ise, vuruğu momenti artarak devam etmektedir.

Şekil 4.22’de, verimin %92’den fazla olduğu görülmektedir. Bu kapsamda, seçilen aralıkta (0,4-0,93) verim açısından ciddi bir değişiklik olmayacağı gözlenmiştir.

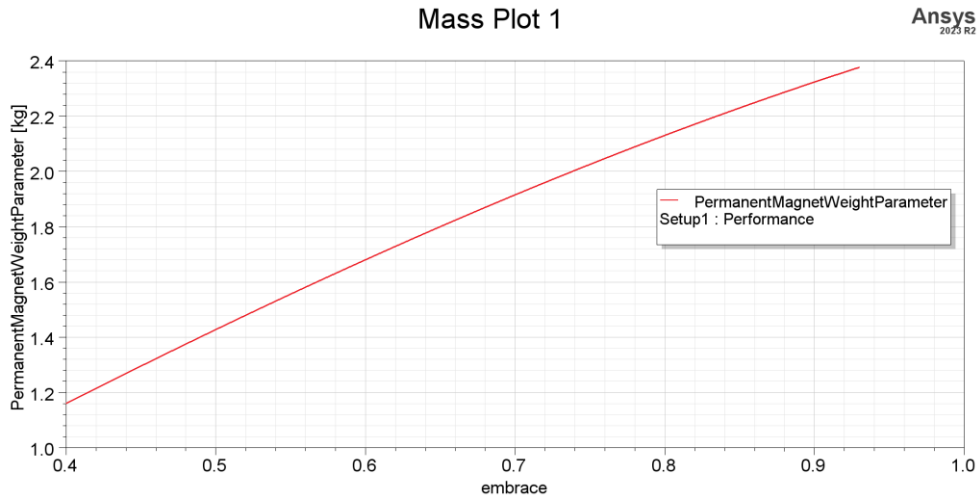
Şekil 4.23’te, mıknatıs kütlesinin arttığı gözlenmektedir. Çünkü rotor yüzey alanında bulunan mıknatıs miktarı, mıknatıs genişliği oranı arttıkça artmaktadır. Burada yine minimum mıknatıs kullanımı ile maksimum performansın elde edilmesi önemlidir. Böylece daha düşük maliyetle daha yüksek performans elde edilebilir. Ancak mıknatıs miktarının azaltılması performans değerlerini de düşürmektedir. Dolayısıyla yine mıknatıs kütlesi için maliyet-performans analizi yapılmalıdır.



Şekil 4.21 Vuruntu momentinin mıknatıs genişliğine göre değişimi



Şekil 4.22 Verimin mıknatıs genişliğine göre değişimi

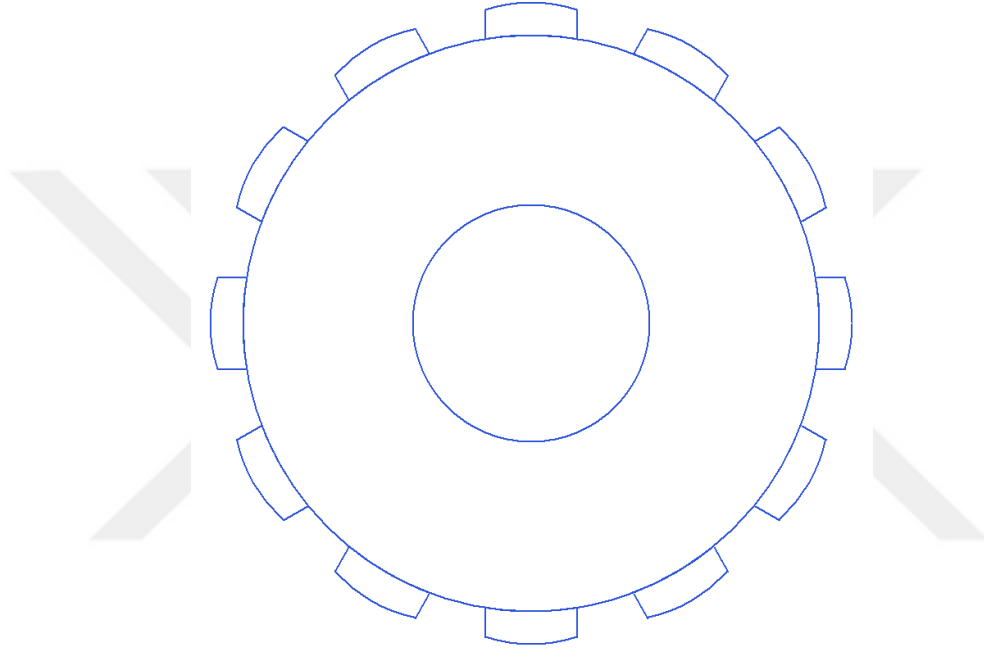


Şekil 4.23 Mıknatıs kütlesinin mıknatıs genişliğine göre değişimi

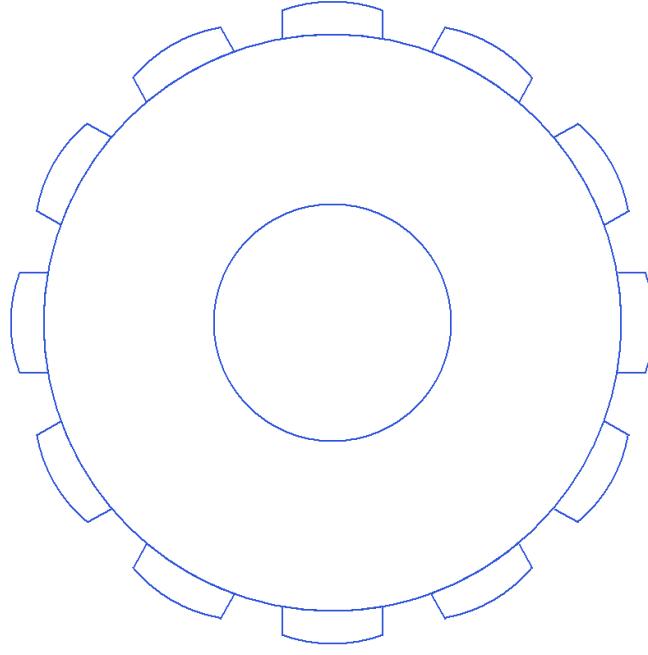
Elde edilen sonuçların değerlendirilmesi kapsamında, aşağıdaki mıknatıs genişliği oranları seçilmiştir.

- 0,56
- 0,61
- 0,9

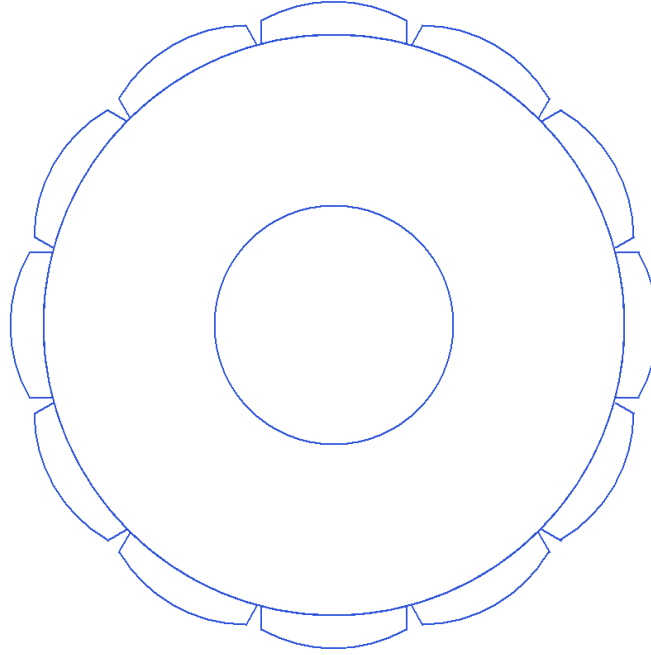
Seçilen değerlere ait rotor görselleri Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da verilmiştir.



Şekil 4.24 0,56 mıknatıs genişliği oranı için rotor görseli



Şekil 4.25 0,61 mıknatıs genişliği oranı için rotor görseli



Şekil 4.26 0,9 mıknatıs genişliği oranı için rotor görseli

Seçilen bu değerler için sonraki aşamada, referans servo motor ile benzer şekilde analiz çalışmaları gerçekleştirilecektir.

Mıknatıs genişliği değişikliği sürecinde stator yapısı hiçbir şekilde değiştirilmemiştir.

5

SERVO MOTORLARIN ANALİZ SONUÇLARI VE KARŞILAŞTIRILMASI

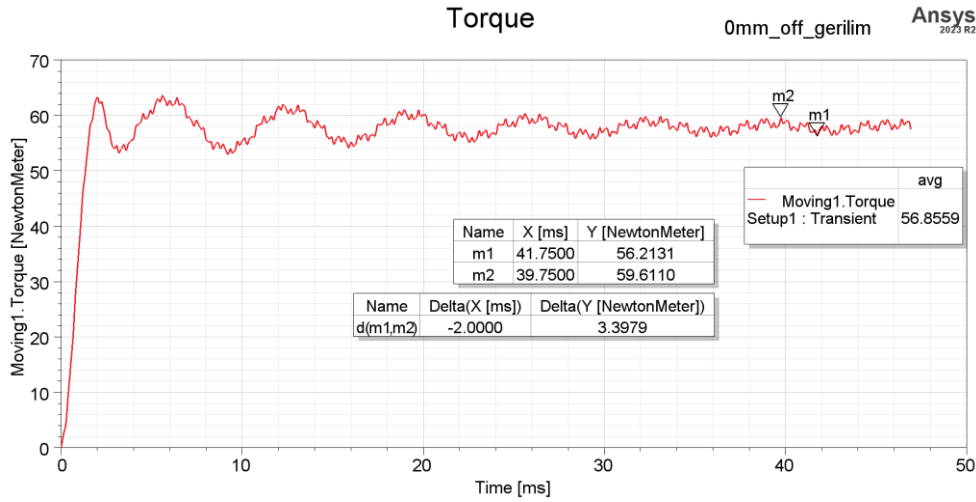
Önceki bölümde değerleri belirlenen alternatif tasarımların detaylı analizleri, referans servo motor ile aynı şekilde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, karşılaştırmalı olarak bu bölümde ele alınmıştır.

Burada alternatif tasarımlar, kendi başlıkları için ayrı ayrı olacak şekilde karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir. Aşağıda detayları paylaşılmıştır.

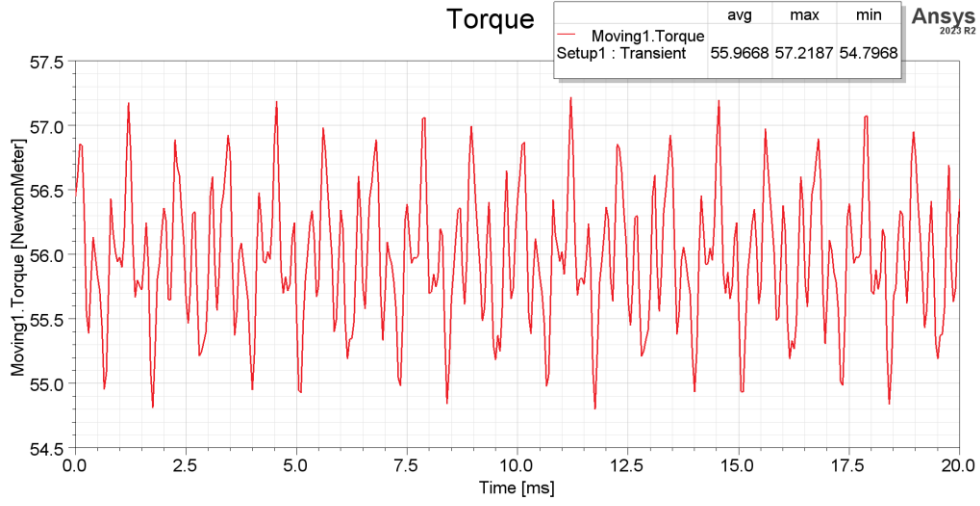
5.1 Moment Dalgallılığı Açısından Karşılaştırma

5.1.1 Mıknatıs Yüzey Öteleme Değişimi Açısından Karşılaştırma

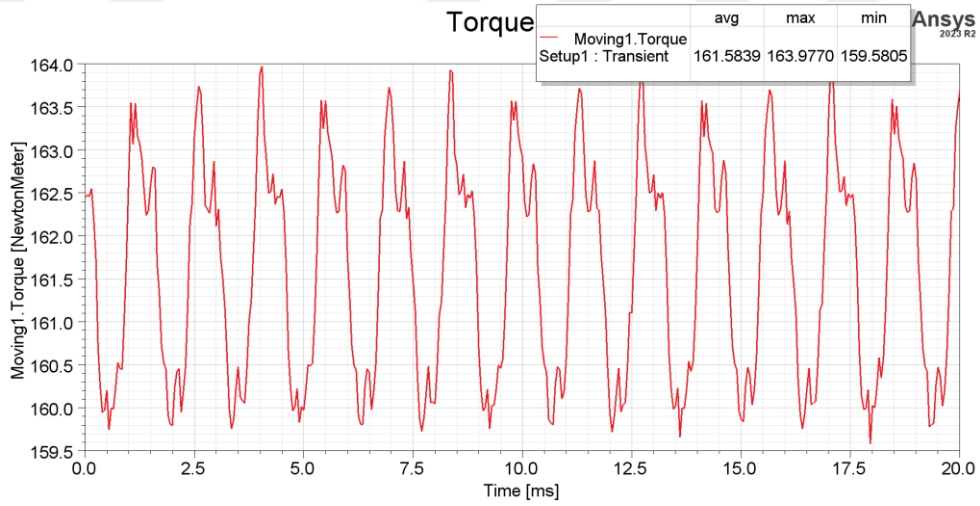
Mıknatıs yüzey öteleme değişikliği açısından 4 farklı alternatif tasarım belirlenmişti (0, 10, 31 ve 36 mm). Bu tasarımlar için gerilim, nominal akım ve maksimum akım beslemeli analiz sonuçları Şekil 5.1 – Şekil 5.12 aralığında verilmiştir.



Şekil 5.1 0 mm için gerilim analizi moment – zaman grafiği

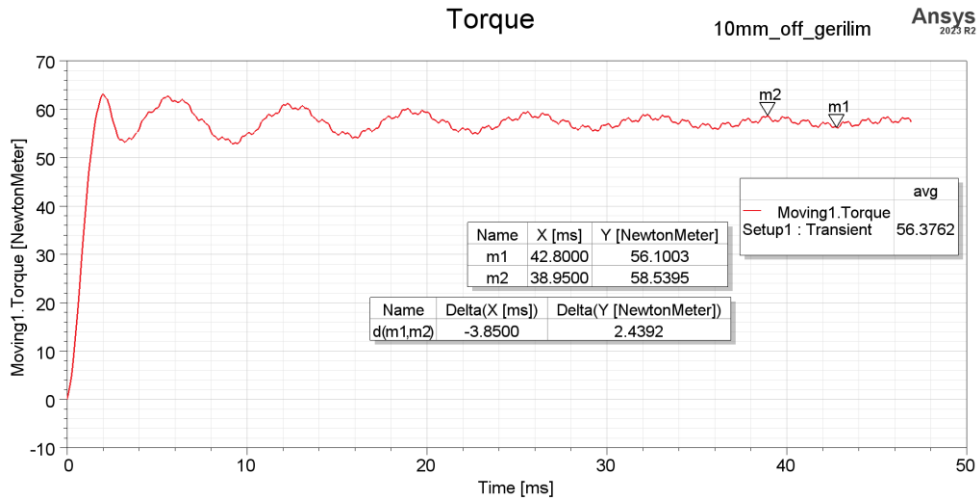


Şekil 5.2 0 mm için 175 Arms nominal akım analizi moment – zaman grafiği

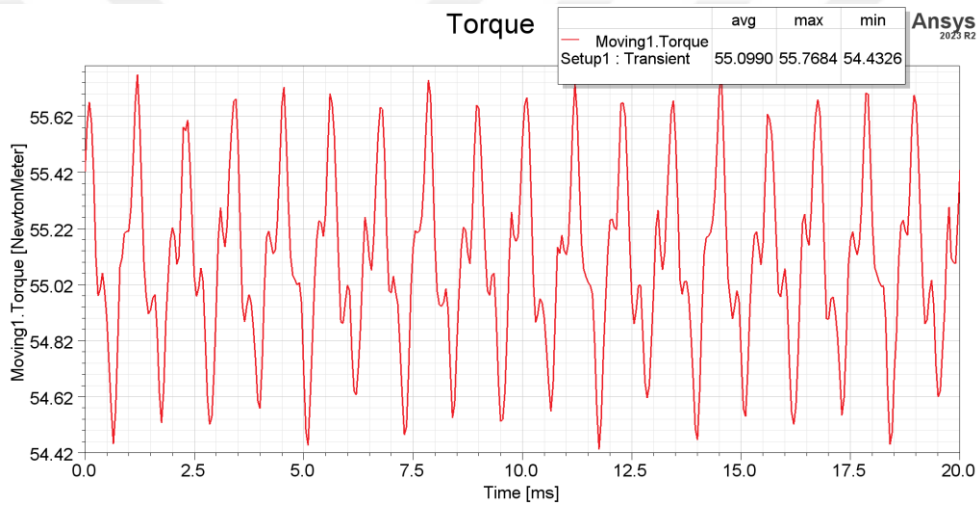


Şekil 5.3 0 mm için 565 Arms maksimum akım analizi moment – zaman grafiği

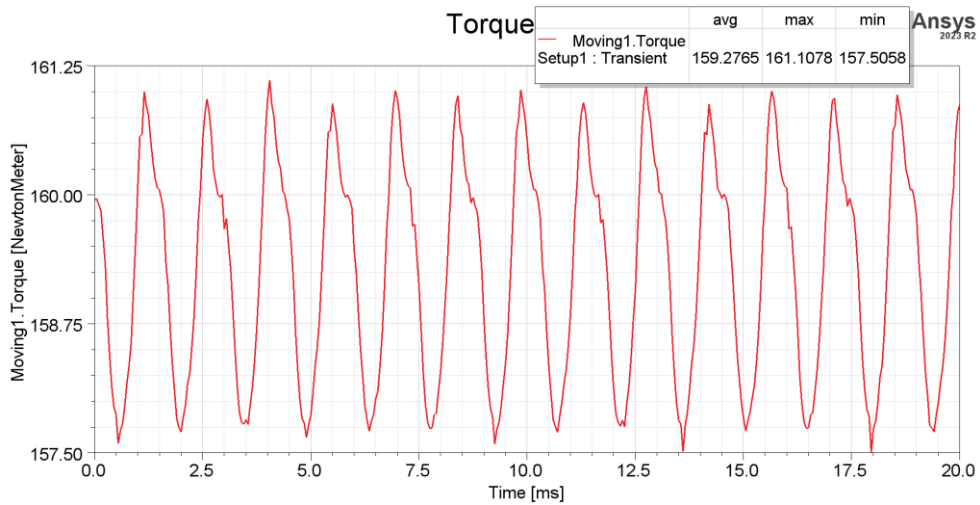
0 mm için yapılan analizlerden görüleceği üzere, referans servo motora göre moment dalgalılığı ve moment katsayısı daha yüksektir. Referans servo motora göre aynı akımda daha yüksek moment elde edilmektedir. İlaveten dalga formlarında, düşük frekanslı harmonik bileşenleri olduğu gözlenmiştir. Bu da titreşimli bir çalışmaya sebep olacaktır.



Şekil 5.4 10 mm için gerilim analizi moment – zaman grafiği

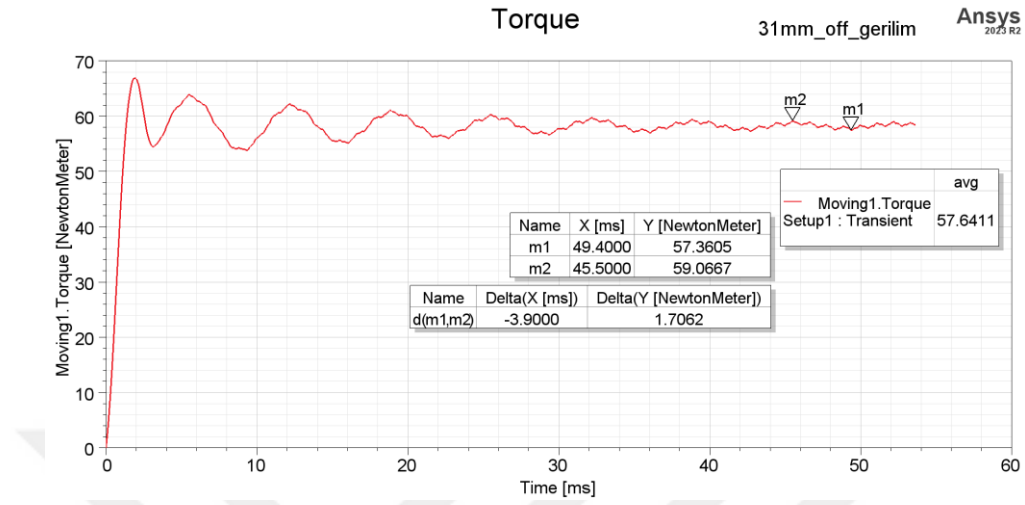


Şekil 5.5 10 mm için 175 Arms nominal akım analizi moment – zaman grafiği

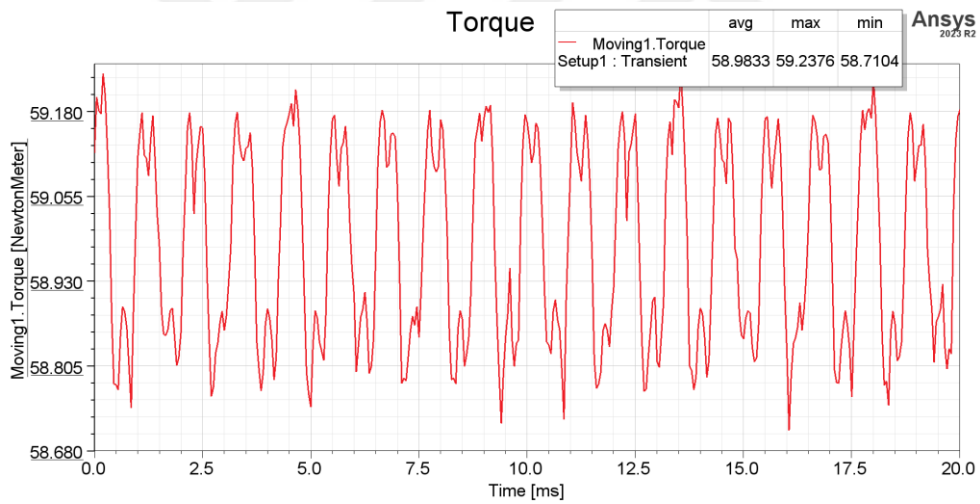


Şekil 5.6 10 mm için 565 Arms maksimum akım analizi moment – zaman grafiği

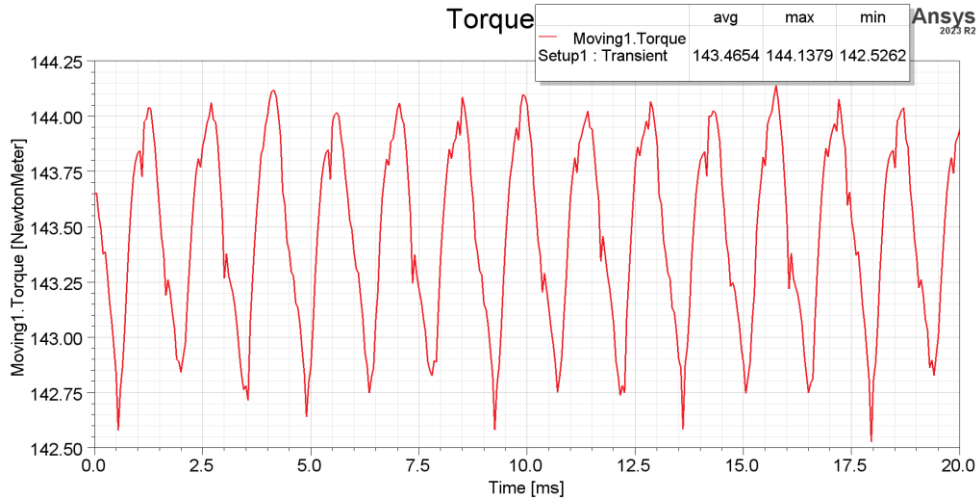
10 mm için analiz sonuçlarında, 0 mm'ye göre düşük ancak referans servo motora göre yüksek moment dalgalılığı görülmektedir. Moment katsayısı için de benzer durum söz konusudur.



Şekil 5.7 31 mm için gerilim analizi moment – zaman grafiği

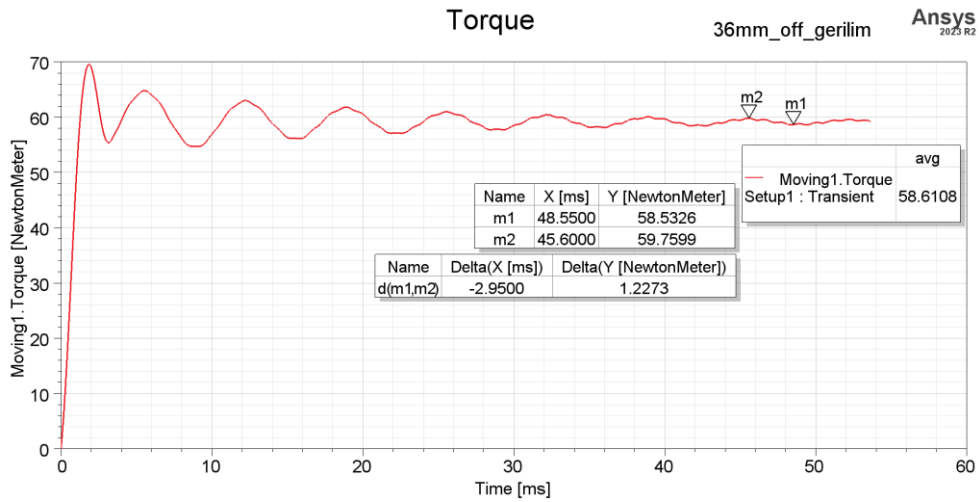


Şekil 5.8 31 mm için 210 Arms nominal akım analizi moment – zaman grafiği

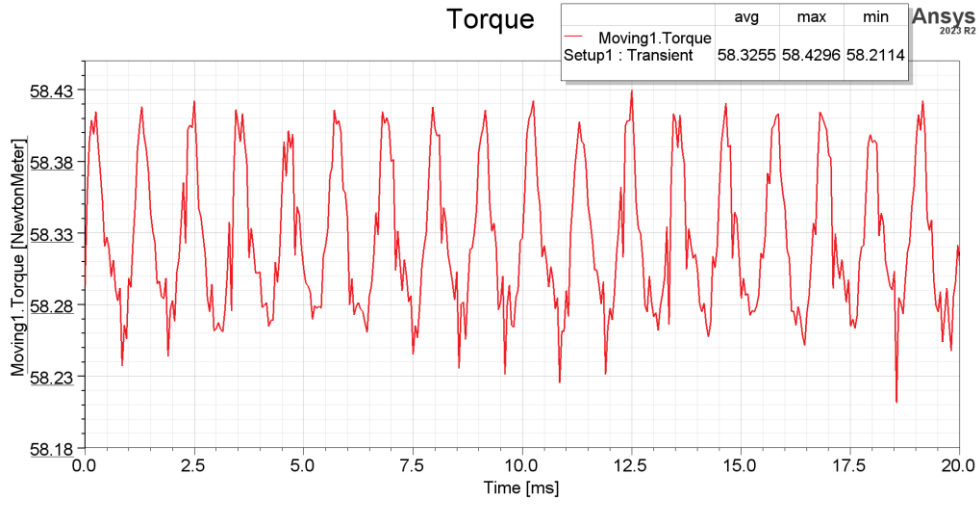


Şekil 5.9 31 mm için 565 Arms maksimum akım analizi moment – zaman grafiği

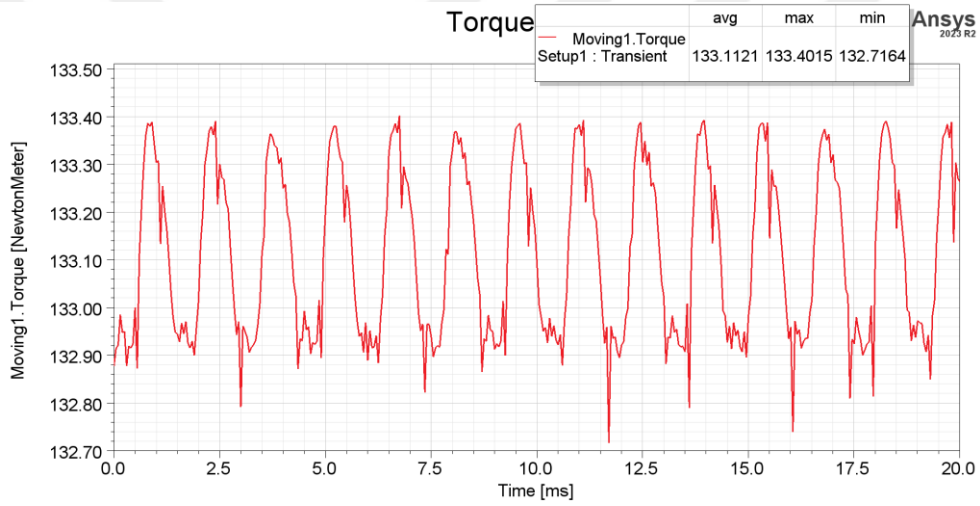
31 ve 36 mm için yapılan analizlerde, referans servo motora göre daha düşük moment dalgalanması ve katsayısı gözlenmiştir. Moment katsayısının düşük olması performans kaybına sebep olmaktadır. Diğer taraftan dalga formlarında, yüksek frekanslı harmonik bileşenler gözlenmiştir. Bu durum daha düzgün bir dalga formu elde edilmesine ve düşük seviyede titreşimli bir çalışmaya sebep olacaktır.



Şekil 5.10 36 mm için gerilim analizi moment – zaman grafiği

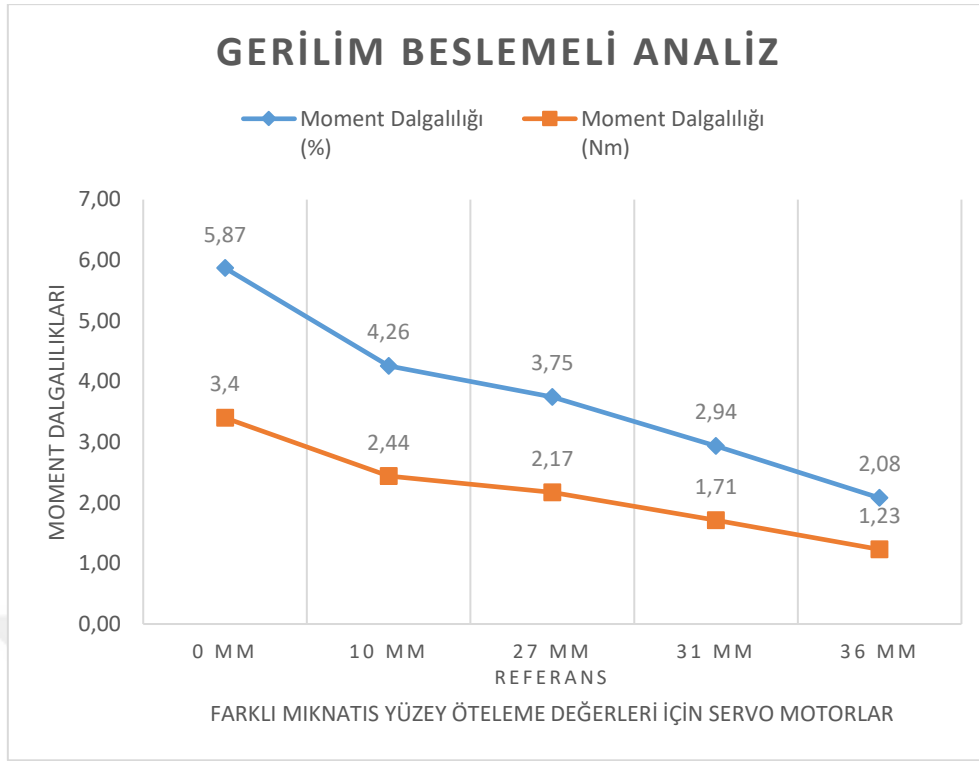


Şekil 5.11 36 mm için 225 Arms nominal akım analizi moment – zaman grafiği

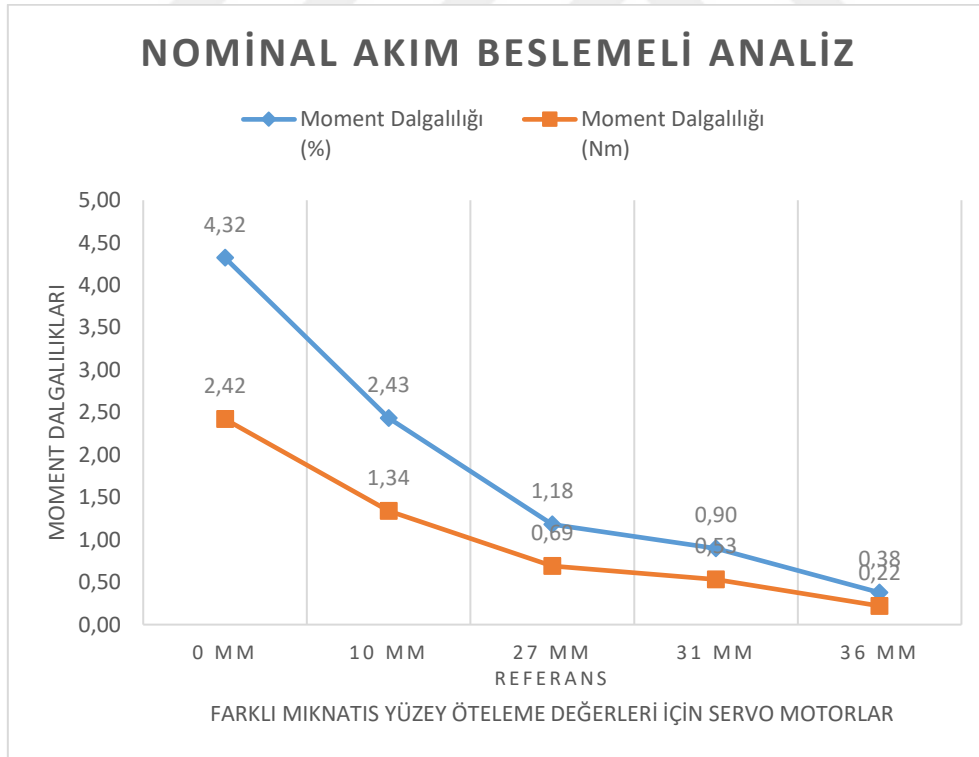


Şekil 5.12 36 mm için 565 Arms maksimum akım analizi moment – zaman grafiği

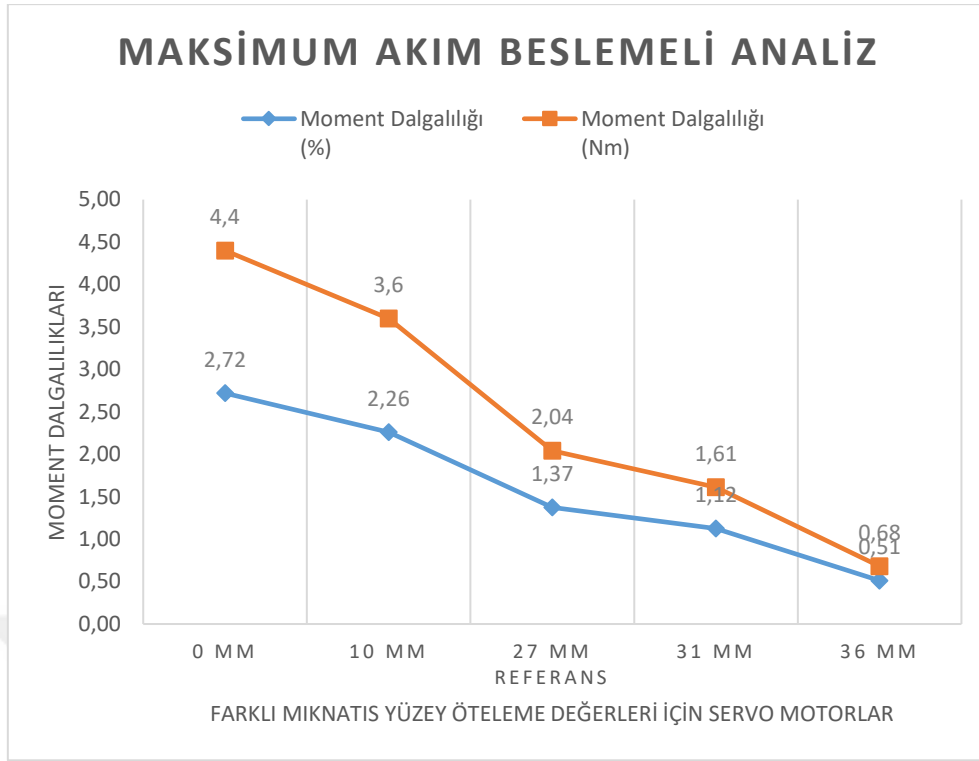
Bu sonuçlar, referans servo motor ile birlikte 3 ayrı kategoride (gerilim, nominal ve maksimum akım açısından) değerlendirilirse Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15 görselleri elde edilmektedir.



Şekil 5.13 Gerilim beslemeli analiz için moment dalgalanmaları



Şekil 5.14 Nominal akım beslemeli analiz için moment dalgalanmaları

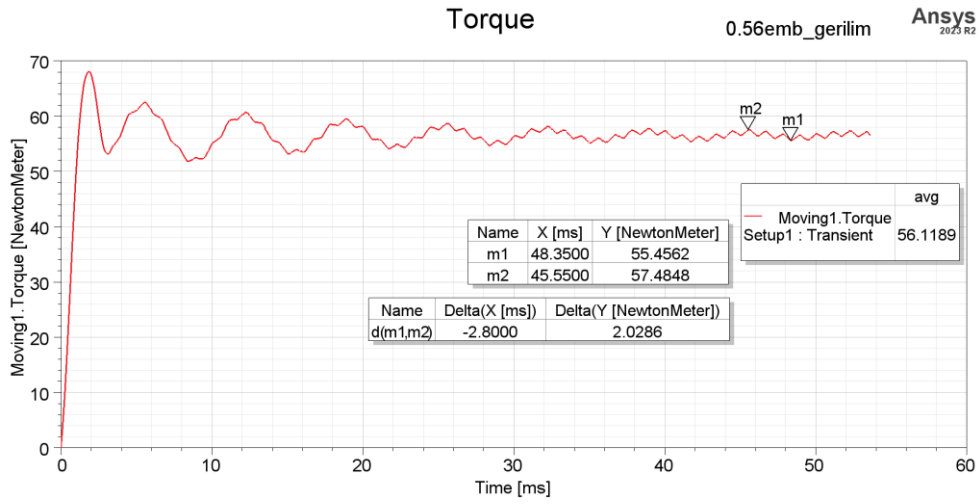


Şekil 5.15 Maksimum akım beslemeli analiz için moment dalgalanmaları

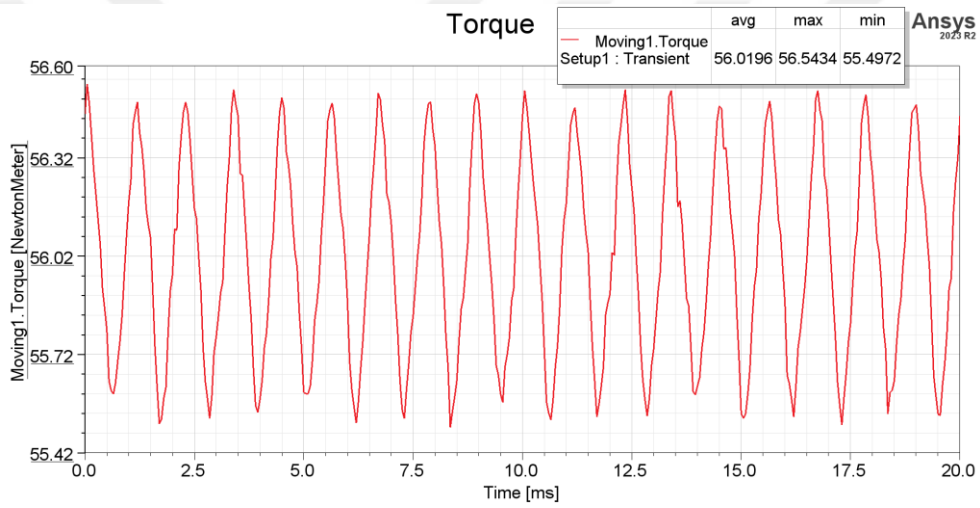
Görüldüğü üzere, referans servo motora göre yüksek değerli mıknatıs yüzey öteleme değerlerinde moment dalgalanması düşerek iyileşmektedir. Ancak bu durum moment katsayısı açısından dezavantajlı olduğu için performans kaybına sebep olmaktadır. Dolayısıyla servo motorun kullanılacağı uygulamaya göre burada bir seçim yapılmalıdır.

5.1.2 Mıknatıs Genişliği Değişimi Açısından Karşılaştırma

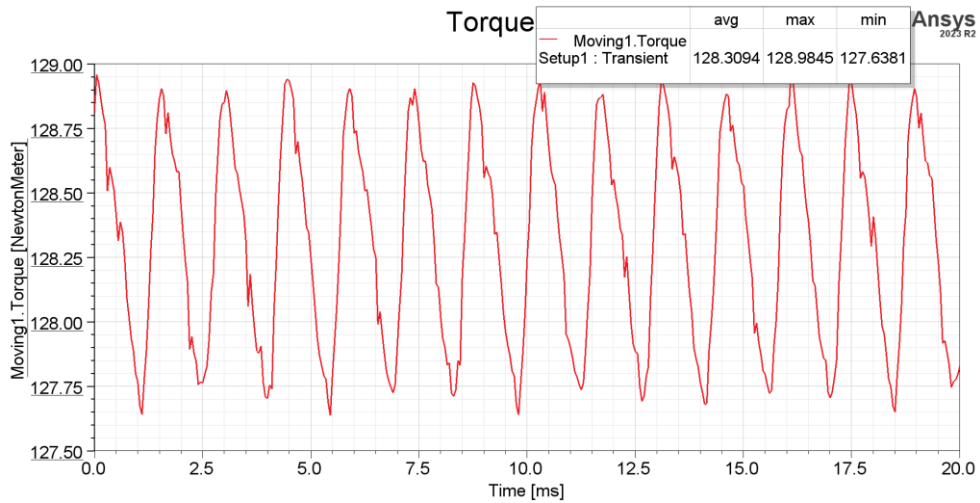
Mıknatıs genişliği değişikliği açısından 3 farklı alternatif tasarım belirlenmişti (0,56, 0,61 ve 0,9 değerleri). Bu tasarımlar için gerilim, nominal akım ve maksimum akım beslemeli analiz sonuçları Şekil 5.16 – Şekil 5.24 aralığında verilmiştir.



Şekil 5.16 0,56 için gerilim analizi moment – zaman grafiği

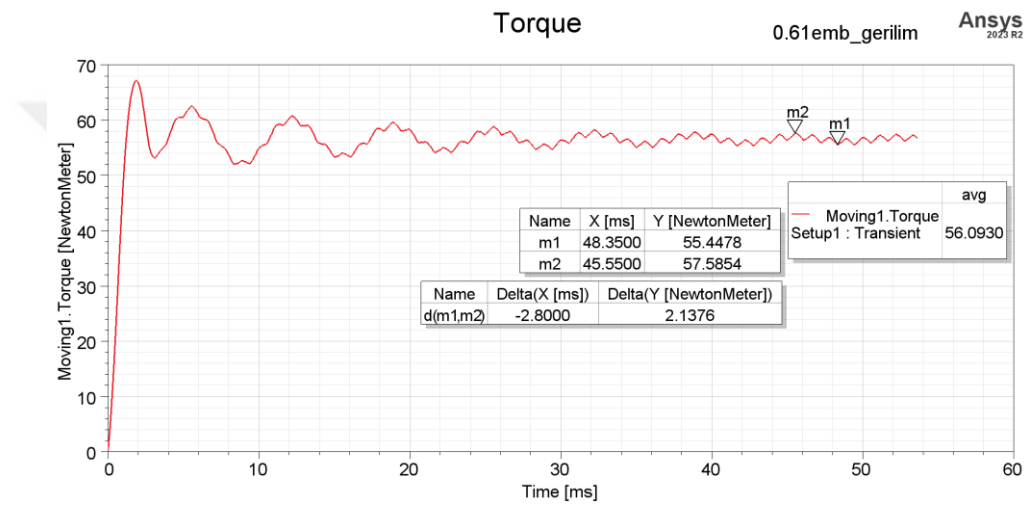


Şekil 5.17 0,56 için 225 Arms nominal akım analizi moment – zaman grafiği

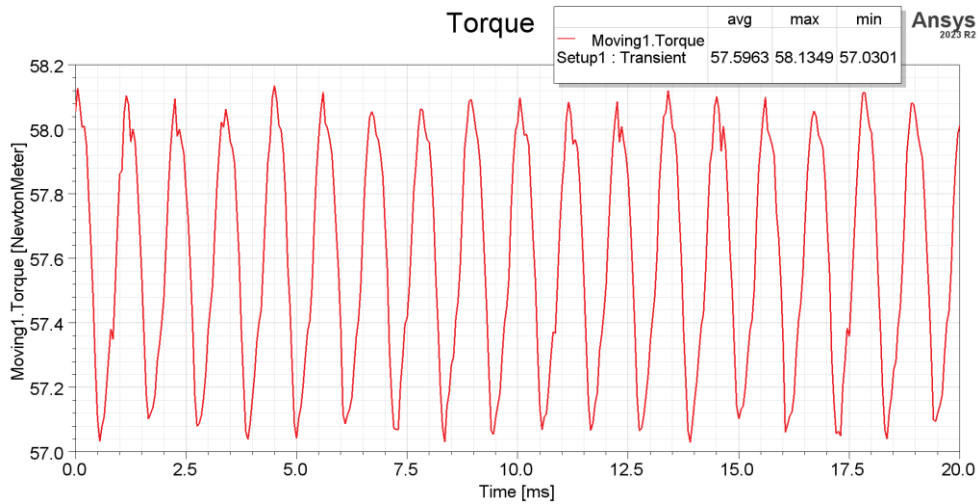


Şekil 5.18 0,56 için 565 Arms maksimum akım analizi moment – zaman grafiği

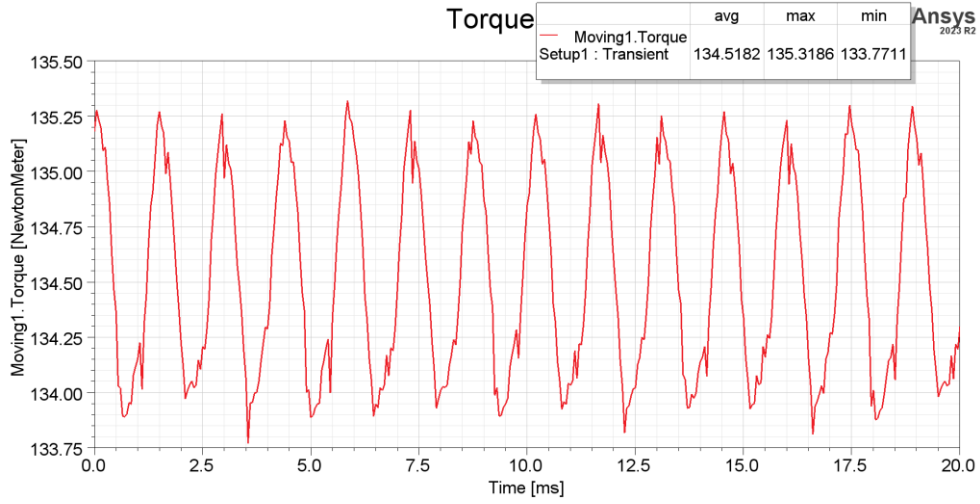
0,56 ve 0,61 değerleri için yapılan analizlerden görüleceği üzere, referans servo motora göre moment dalgalılığında neredeyse bir değişiklik olmamıştır, minimal bir değişiklik söz konusudur. Moment katsayısı ise, referans servo motora göre daha düşüktür. Dolayısıyla daha yüksek akımlarda aynı moment değeri elde edilebilmiştir. Diğer taraftan dalga formlarına bakıldığında, gerilim beslemeli analizler için düşük frekanslı harmonik bileşenler gözlenmiştir. Akım beslemeli analizlerde ise, harmonik bileşen çok yüksek frekanslarda mevcut olup yok denilecek seviyededir, bu bakımdan dalga formlarının ideal sinüzoidal yapıya yakın olduğu gözlenmiştir.



Şekil 5.19 0,61 için gerilim analizi moment – zaman grafiği

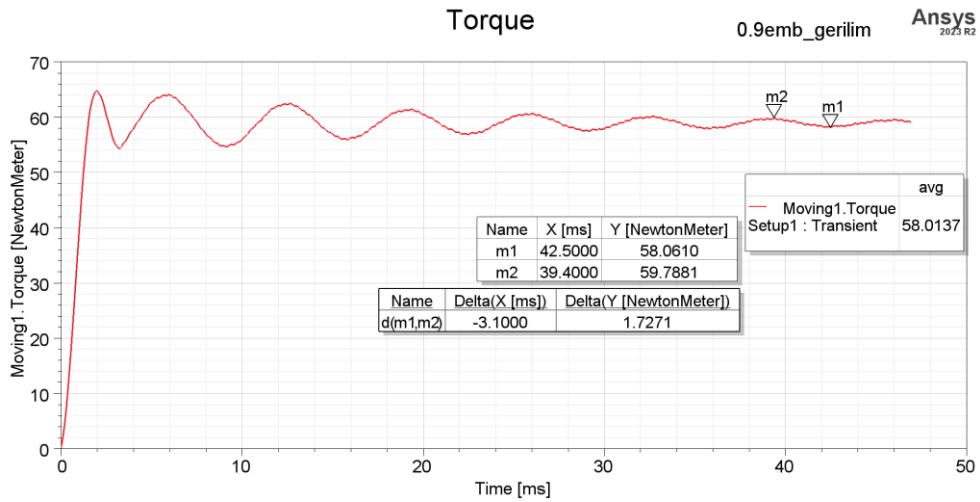


Şekil 5.20 0,61 için 220 Arms nominal akım analizi moment – zaman grafiği

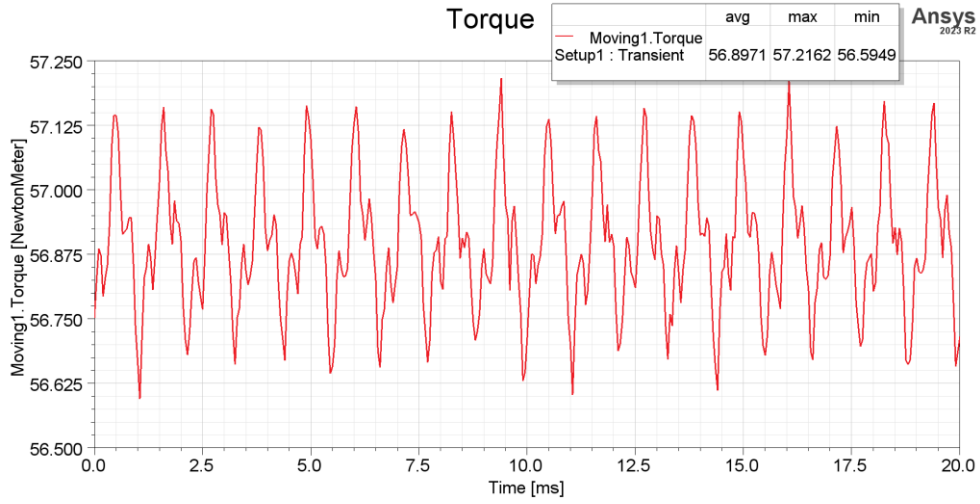


Şekil 5.21 0,61 için 565 Arms maksimum akım analizi moment – zaman grafiği

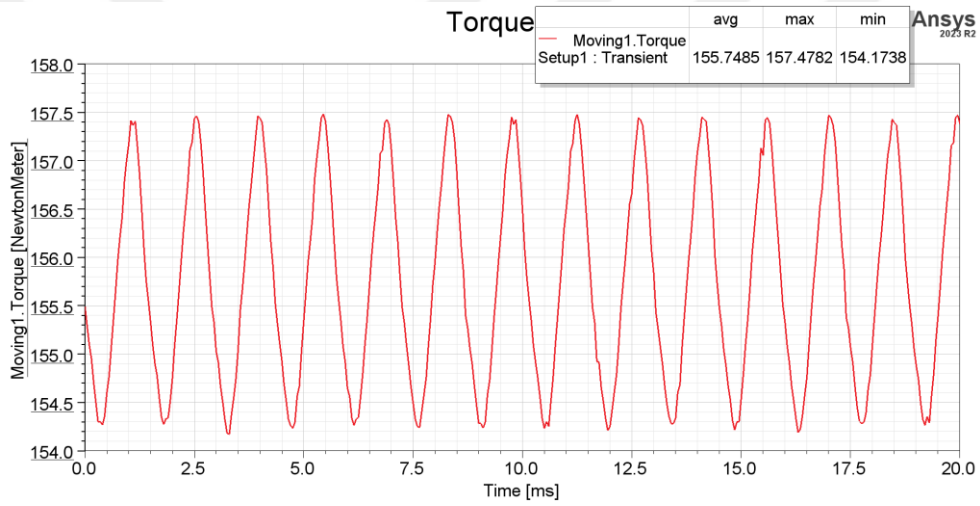
0,9 değeri için analiz sonuçlarında, moment dalgalanmasının referans servo motora göre düşük seviyede iyileştiği gözlenmiştir. Moment katsayısının da daha yüksek olduğu görülmüştür. İlaveten dalga formlarında, harmonik bileşen neredeyse gözlenmemiş olup titreşimsiz ve ideal sayılabilecek bir çalışma çıktısı elde edilmiştir.



Şekil 5.22 0,9 için gerilim analizi moment – zaman grafiği

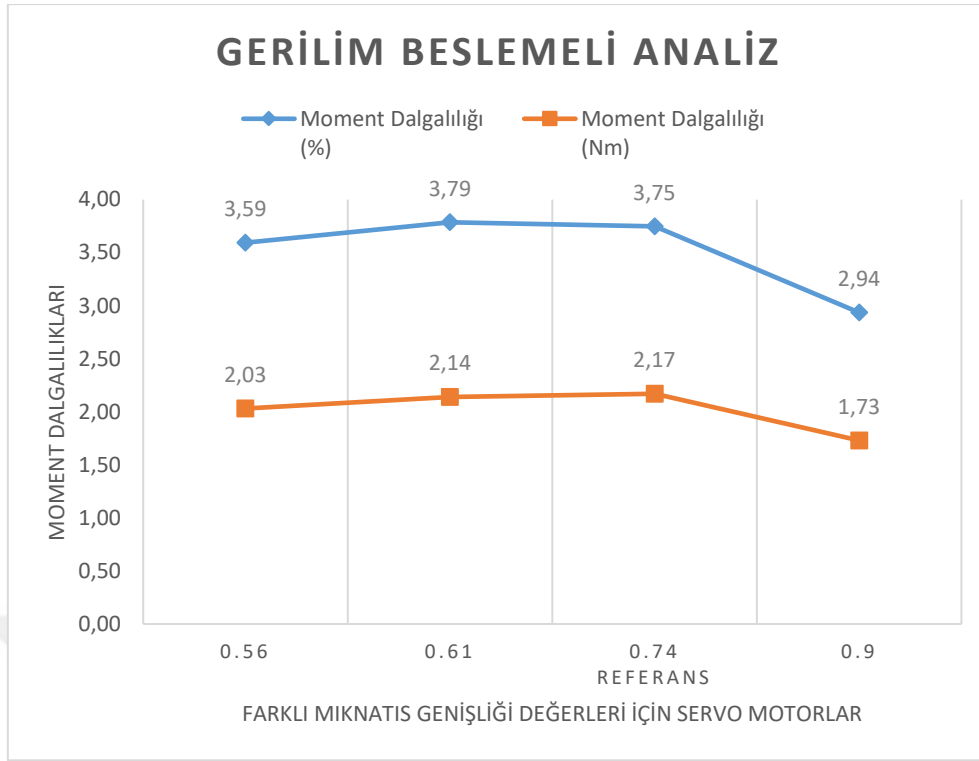


Şekil 5.23 0,9 için 185 Arms nominal akım analizi moment – zaman grafiği

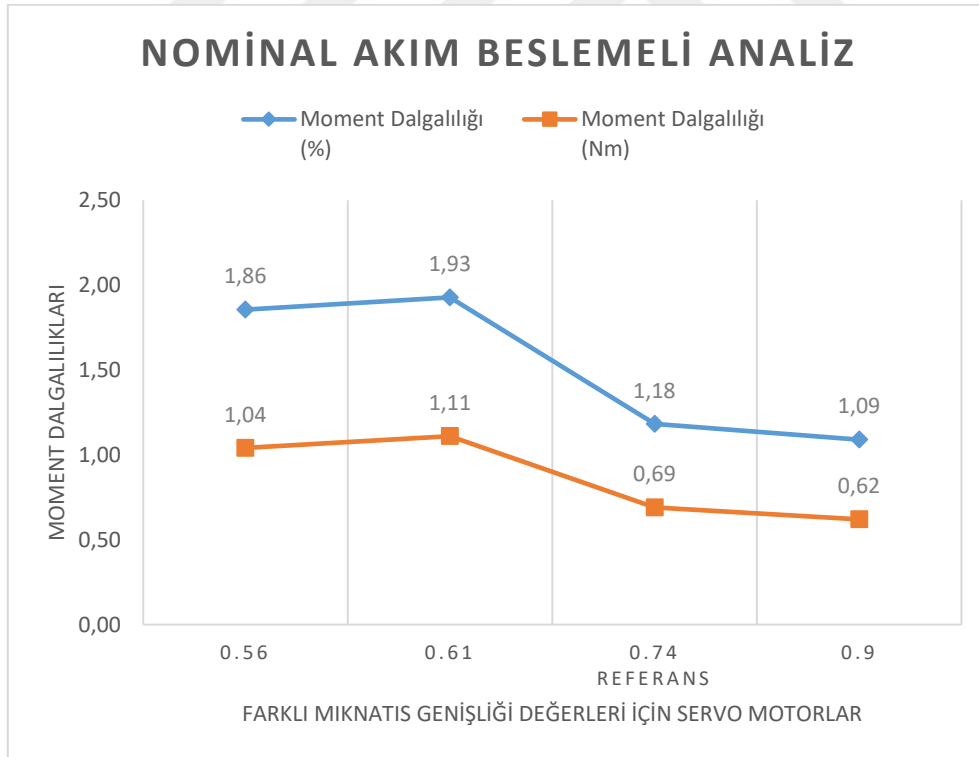


Şekil 5.24 0,9 için 565 Arms maksimum akım analizi moment – zaman grafiği

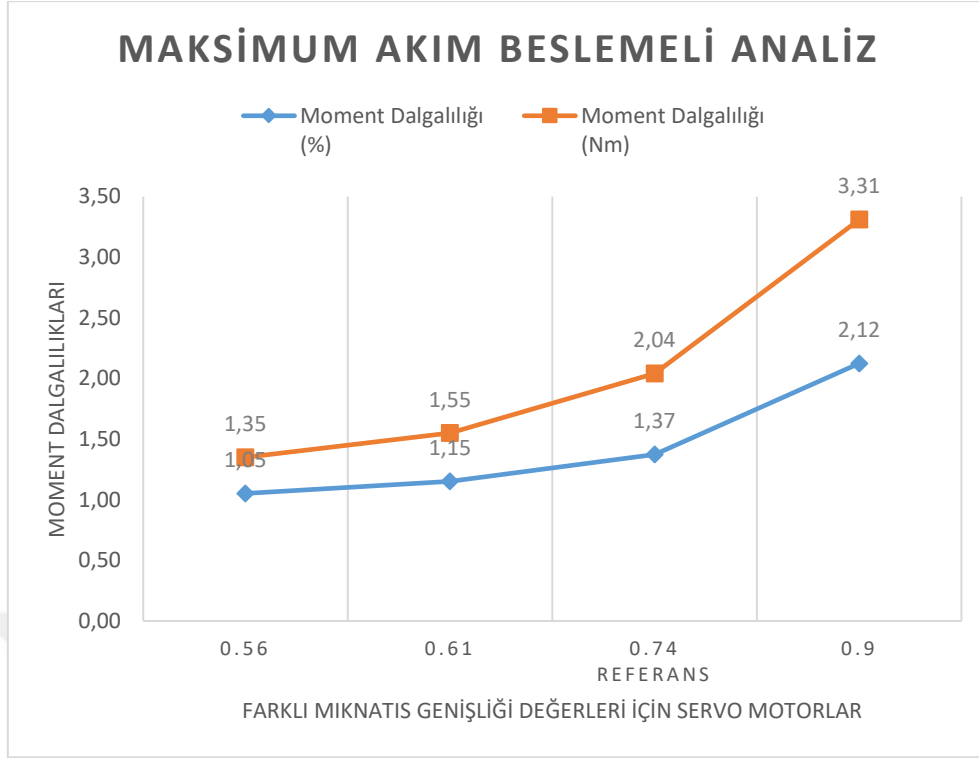
Bu sonuçlar, referans servo motor ile birlikte 3 ayrı kategoride (gerilim, nominal ve maksimum akım açısından) değerlendirilirse Şekil 5.25, Şekil 5.26 ve Şekil 5.27 görselleri elde edilmektedir.



Şekil 5.25 Gerilim beslemeli analiz için moment dalgalanmaları



Şekil 5.26 Nominal akım beslemeli analiz için moment dalgalanmaları



Şekil 5.27 Maksimum akım beslemeli analiz için moment dalgalanmaları

Görüldüğü üzere, referans servo motora göre her kategoride ayrı bir sonuç elde edilmiştir. Bu durum mıknatıs genişliğinin değiştirilmesiyle servo motor performansının ciddi anlamda değiştiğini göstermektedir. Sonuçlar aşağıdaki şekilde değerlendirilebilir.

- Gerilim beslemeli analiz sonuçları, moment dalgalanmasında çok düşük bir değişiklik olabileceğini göstermiştir.
- Nominal akım beslemeli analiz sonuçları, mıknatıs genişliği arttıkça moment dalgalanmasının iyileşebileceğini göstermiştir.
- Maksimum akım beslemeli analiz sonuçları ise, nominal akım beslemeli analiz sonuçlarının tam tersi bir şekilde, mıknatıs genişliği arttıkça moment dalgalanmasının kötüleşeceğini göstermiştir.

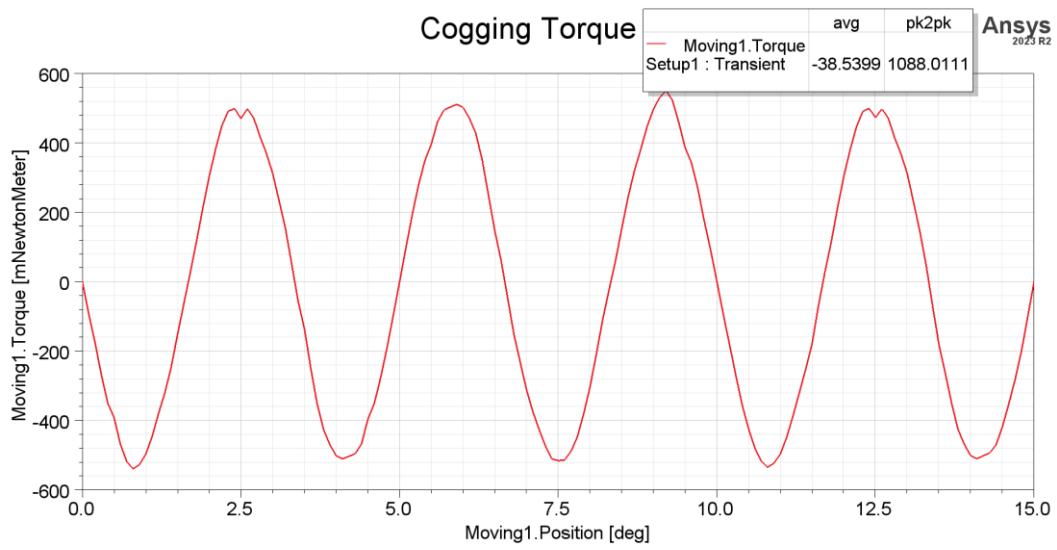
Bu sonuçlar, moment dalgalanması için servo motorun kullanılacağı uygulamaya ve diğer performans kriterlerine göre mıknatıs genişliği açısından bir seçim yapılması gerektiğini göstermektedir.

5.2 Vuruntu Momenti Açısından Karşılaştırma

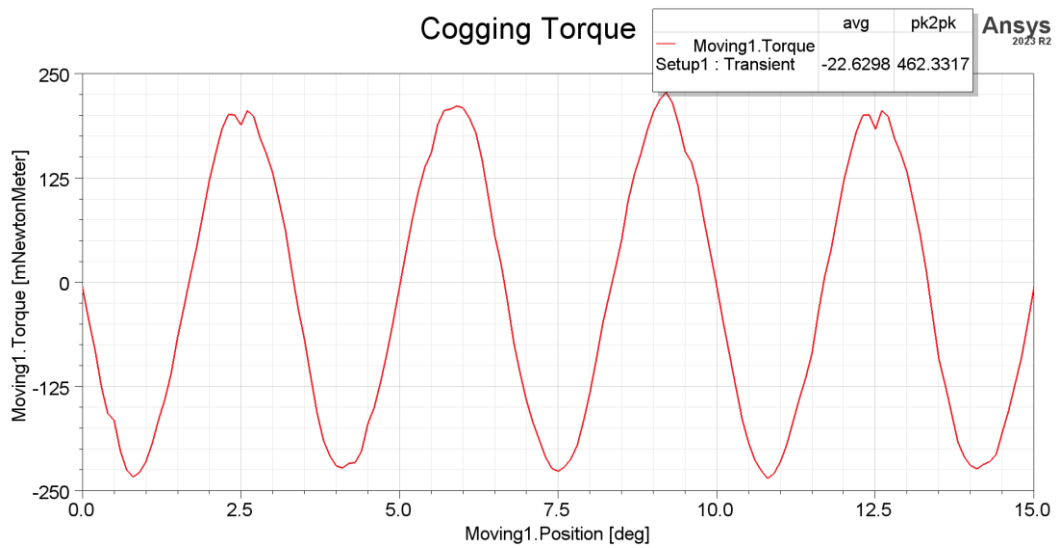
Burada, önceki başlıkta moment dalgalılığı açısından yapılan karşılaştırma gibi vuruntu momenti açısından da karşılaştırmalar yapılmıştır. Vuruntu momenti analizleri, -diğer analiz faaliyetleri gibi- referans servo motorun analizleri ile aynı şekilde gerçekleştirilmiştir.

5.2.1 Mıknatıs Yüzey Öteleme Değişimi Açısından Karşılaştırma

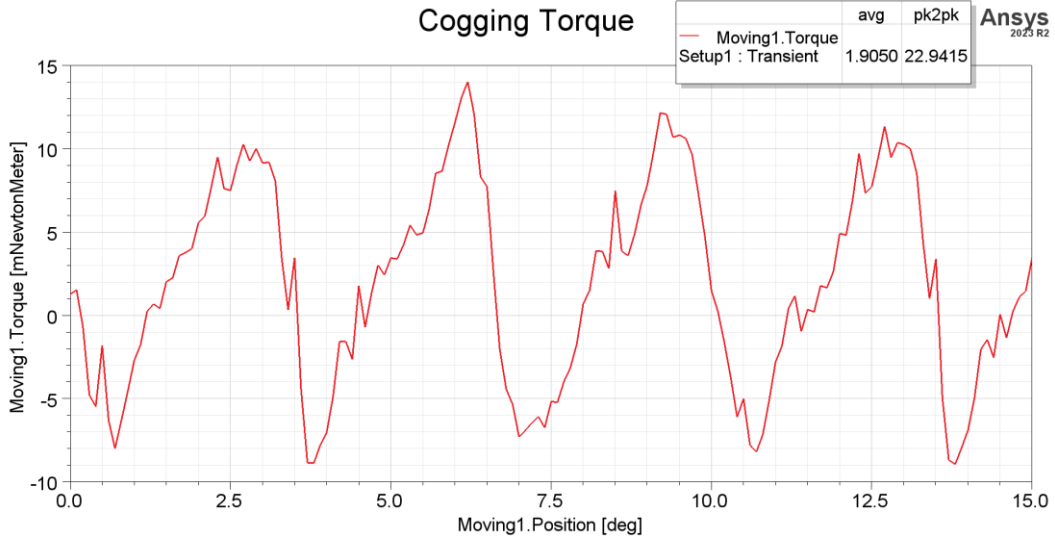
Mıknatıs yüzey öteleme değişikliği ile elde edilen alternatif servo motor tasarımları için vuruntu momenti analiz sonuçları Şekil 5.28 – Şekil 5.31 aralığında verilmiştir.



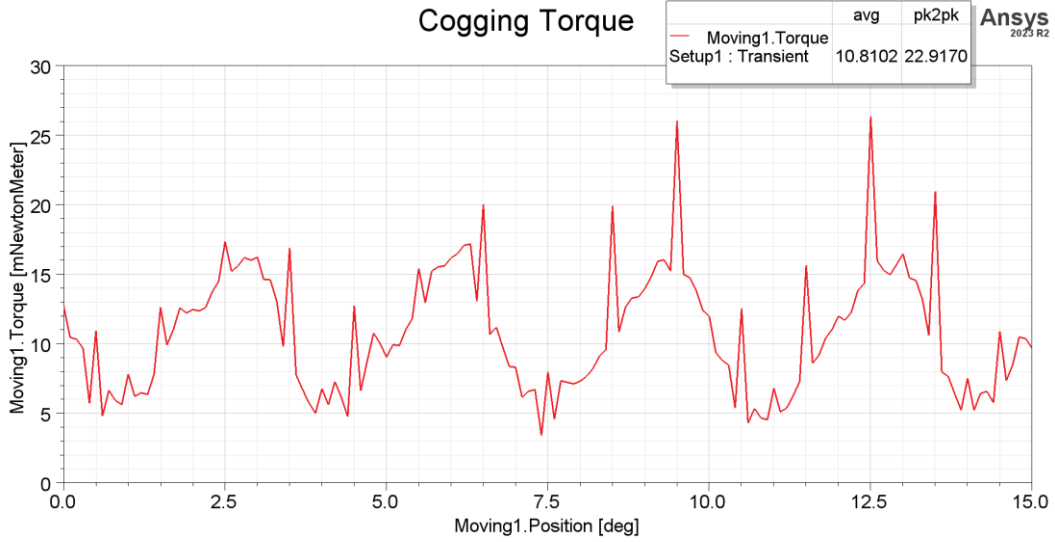
Şekil 5.28 0 mm için vuruntu momenti – pozisyon grafiği



Şekil 5.29 10 mm için vuruntu momenti – pozisyon grafiği



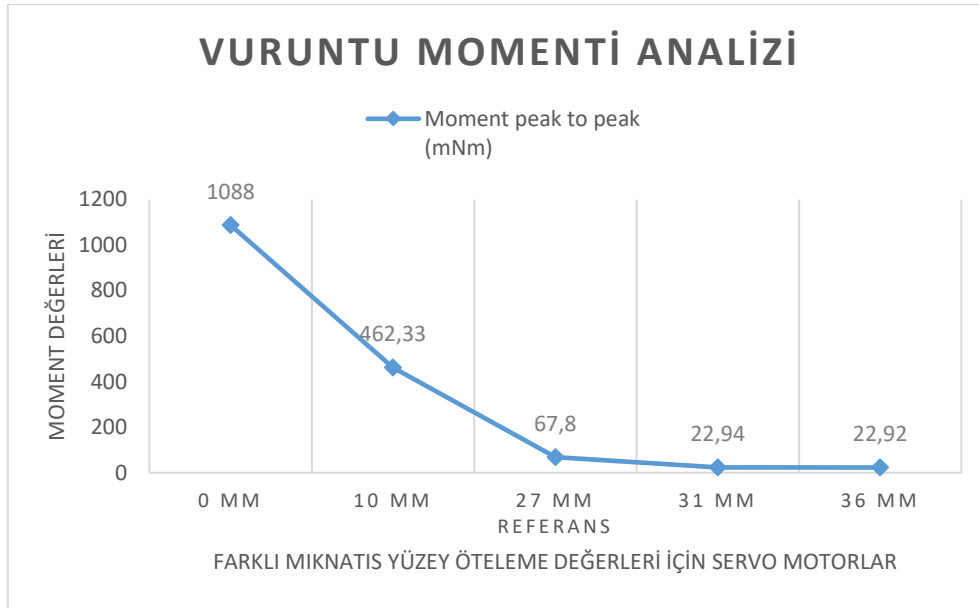
Şekil 5.30 31 mm için vuruntu momenti – pozisyon grafiği



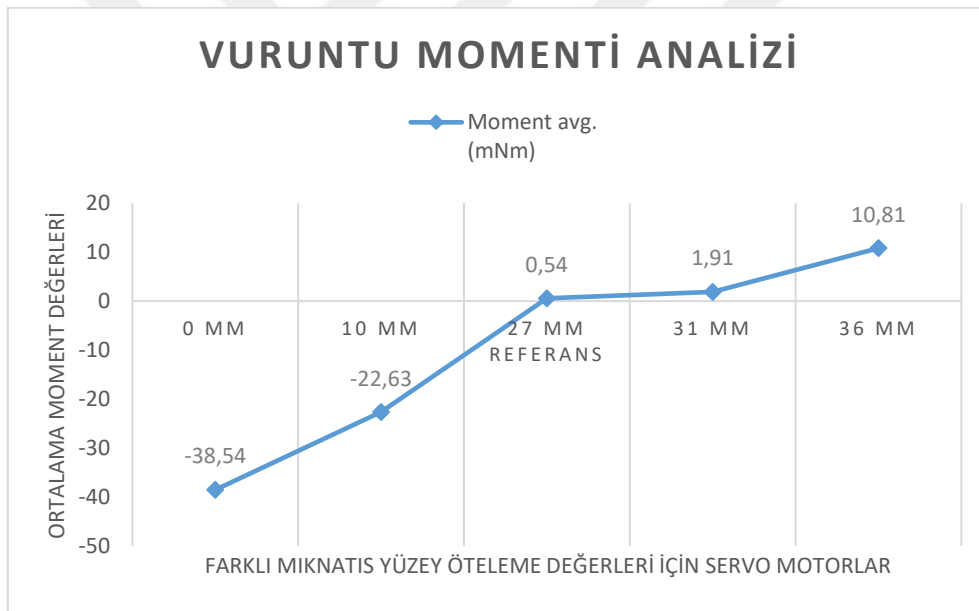
Şekil 5.31 36 mm için vuruntu momenti – pozisyon grafiği

Bu analiz sonuçları, mıknatıs yüzey öteleme değerinin artması ile vuruntu momenti genliğinin düştüğünü göstermektedir. Detaylı görsel Şekil 5.32’de verilmiştir. Bu durum moment dalgalanmasına pozitif katkı sağlamaktadır. Zaten benzer sonuçlar önceki başlıkta da gözlenmiştir.

Mıknatıs yüzey öteleme değerinin artması ile dalga formunun giderek bozulması ise, vuruntu momenti genliğinin düşmesi ile doğal bir sonuç olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca vuruntu momenti ortalama değerlerinin de 0 moment etrafında, (-) ve (+) alternansta bir salınım yaptığı görülmüştür (bkz. Şekil 5.33).



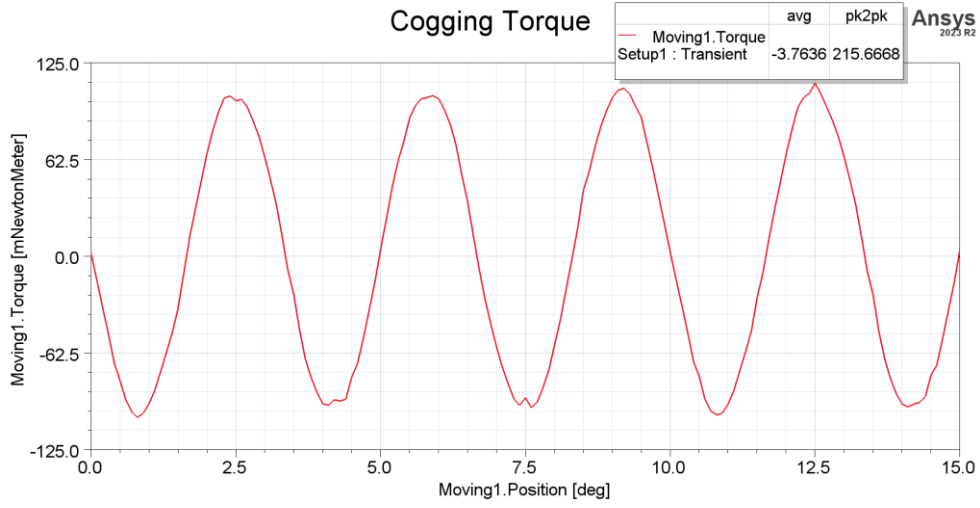
Şekil 5.32 Vuruntu momenti genlikleri



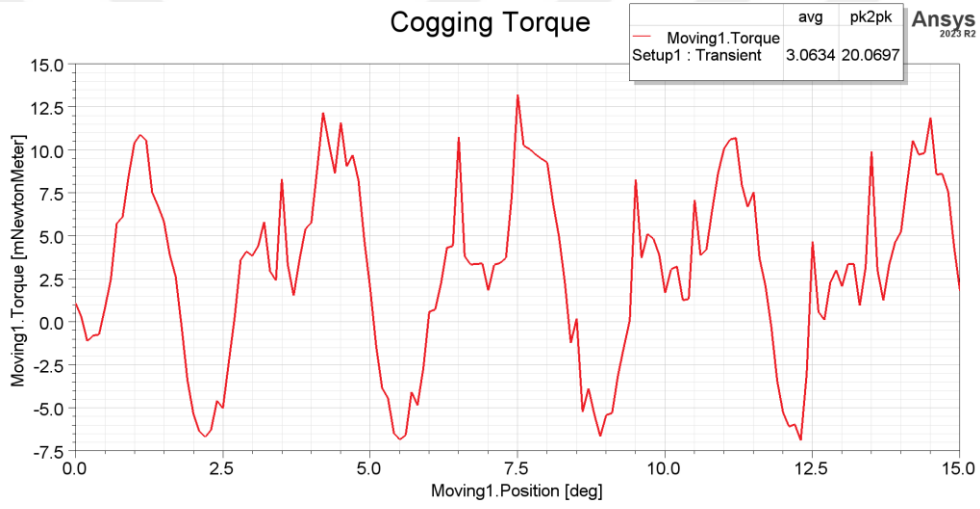
Şekil 5.33 Vuruntu momenti ortalama değerleri

5.2.2 Mıknatıs Genişliği Değişimi Açısından Karşılaştırma

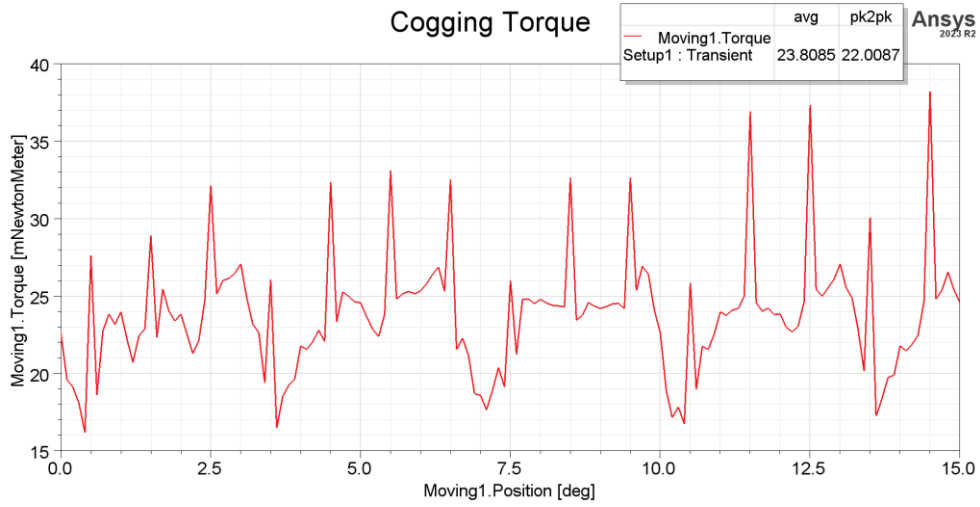
Mıknatıs genişliği değişikliği ile elde edilen alternatif servo motor tasarımları için vuruntu momenti analiz sonuçları Şekil 5.34, Şekil 5.35 ve Şekil 5.36'da verilmiştir.



Şekil 5.34 0,56 için vurutu momenti – pozisyon grafiği



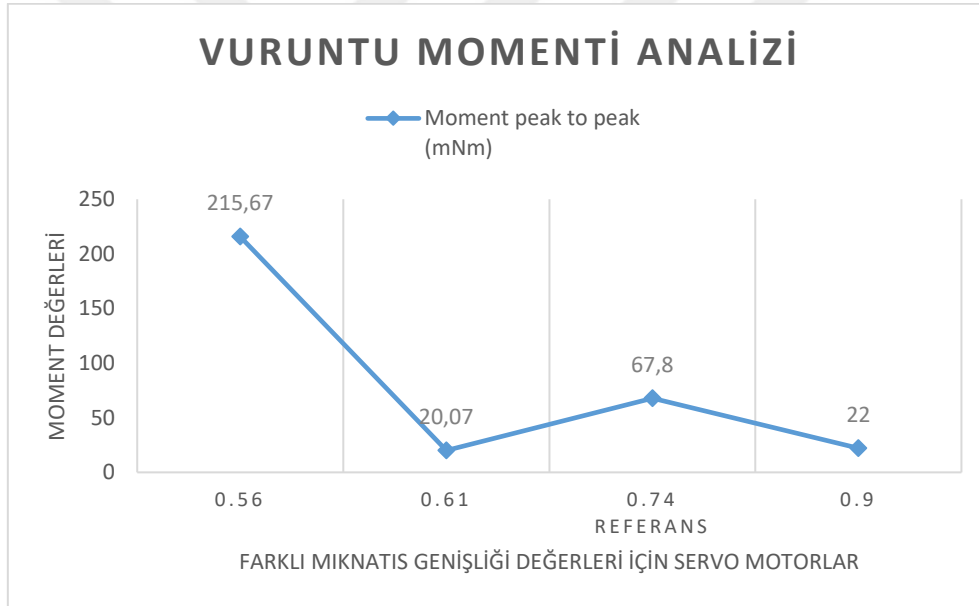
Şekil 5.35 0,61 için vurutu momenti – pozisyon grafiği



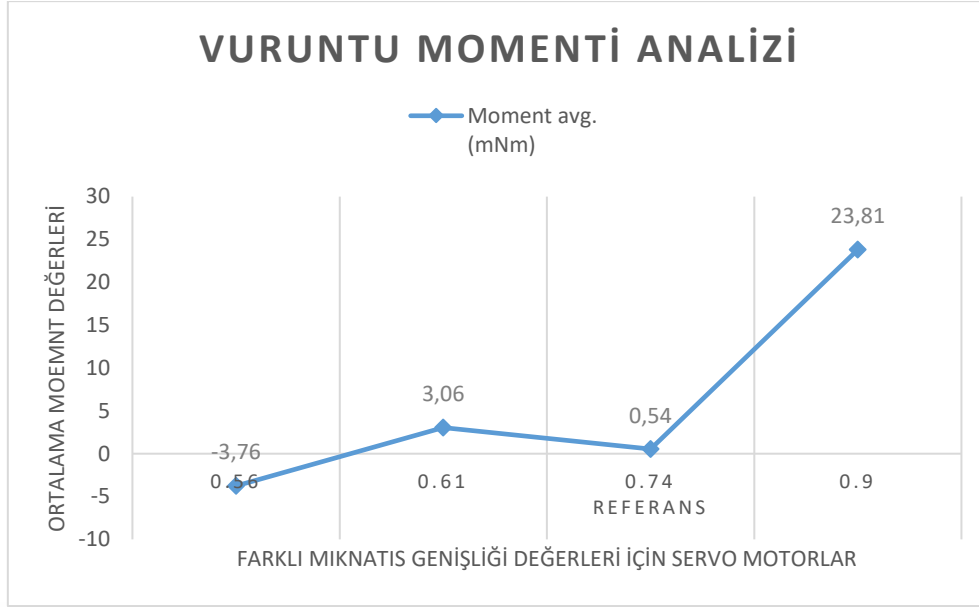
Şekil 5.36 0,9 için vurutu momenti – pozisyon grafiği

Bu analiz sonuçları, mıknatıs genişliği değerinin referans servo motora göre hem artması hem de azalması ile vuruñtu momenti genliğinin düştüğünü göstermektedir (0,56 değeri hariç). Bu durum moment dalgalanmasına pozitif katkı sağlamaktadır. Detaylı görsel Şekil 5.37’de verilmiştir.

Vuruñtu momenti genliğinin düşmesi ile dalga formunun giderek bozulması ise, yine doğal bir sonuç olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca vuruñtu momenti ortalama değerlerinin de 0 moment etrafında olduğu Şekil 5.38’de de görülmüştür (0,9 değeri hariç). 0,9 değeri için vuruñtu momenti ortalama değerinin yüksek olması, Şekil 4.26 ile açıklanabilir, çünkü mıknatıslar arasında neredeyse hiç boşluk olmadığı için vuruñtu momenti 0 etrafında salınım yapamamaktadır. Dolayısıyla ortalama değeri, referans ve alternatif diğer servo motorlara göre 0’dan oldukça uzakta olmaktadır.



Şekil 5.37 Vuruñtu momenti genlikleri



Şekil 5.38 Vuruntu momenti ortalama değerleri

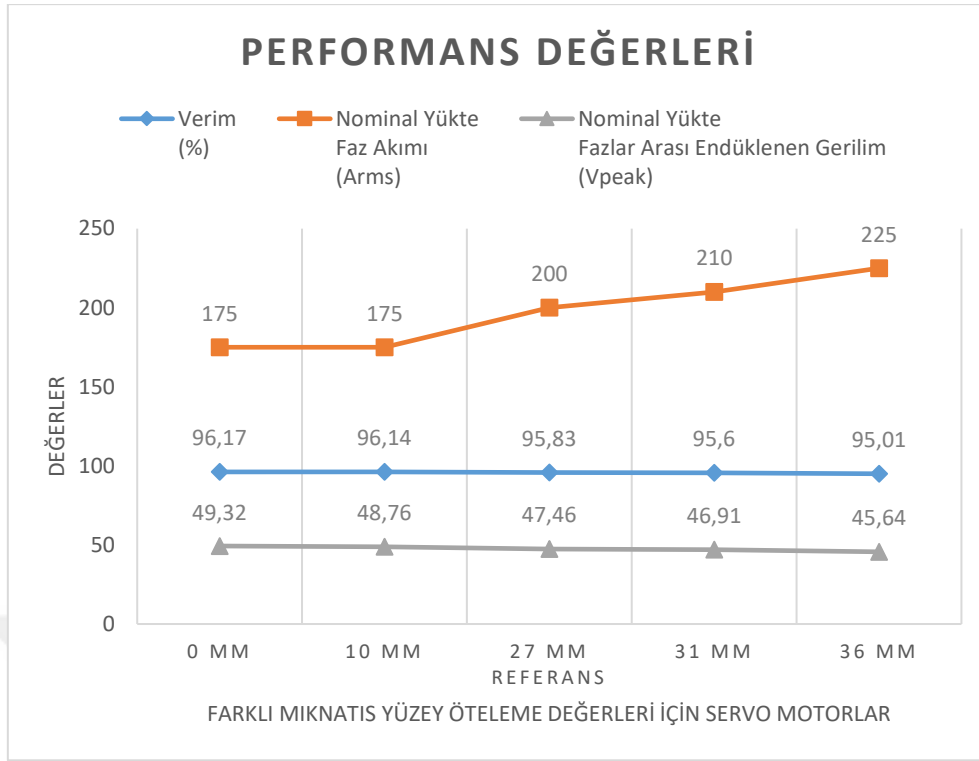
5.3 Genel Performans Açısından Karşılaştırma

Bu başlık altında, genel performans kriterlerine etki eden parametreler açısından servo motorlar karşılaştırılmıştır.

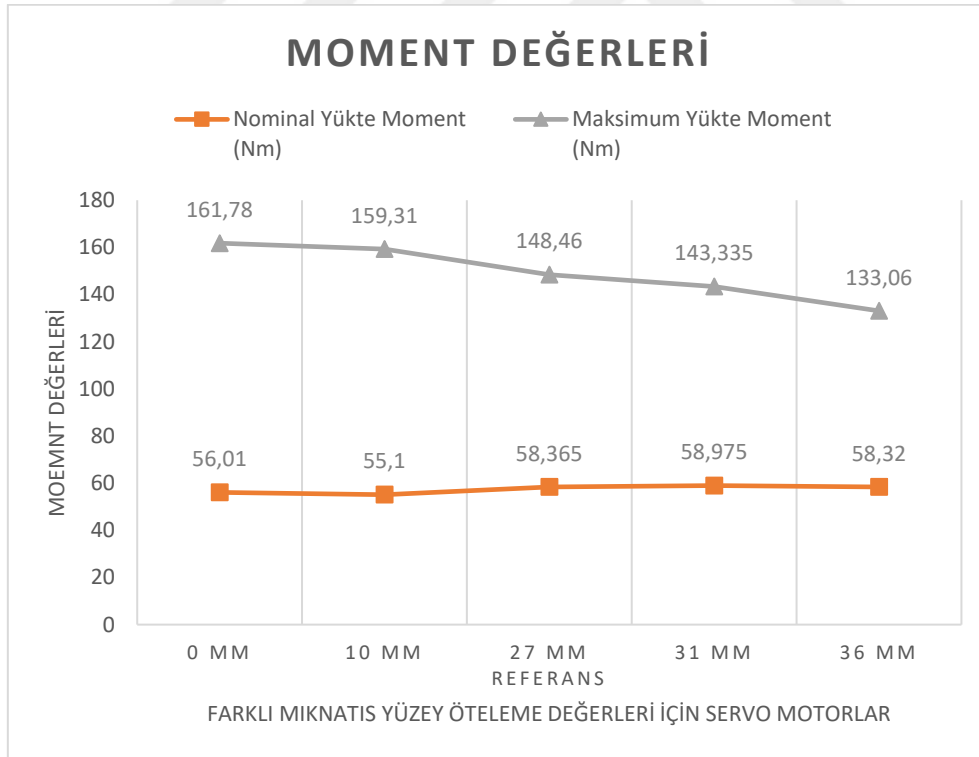
Performans kriterleri için;

- verim,
- nominal yükte faz akımı,
- nominal yükte fazlar arası endüklenen gerilim,
- nominal yükte moment ve
- maksimum yükte moment

parametreleri seçilmiştir.



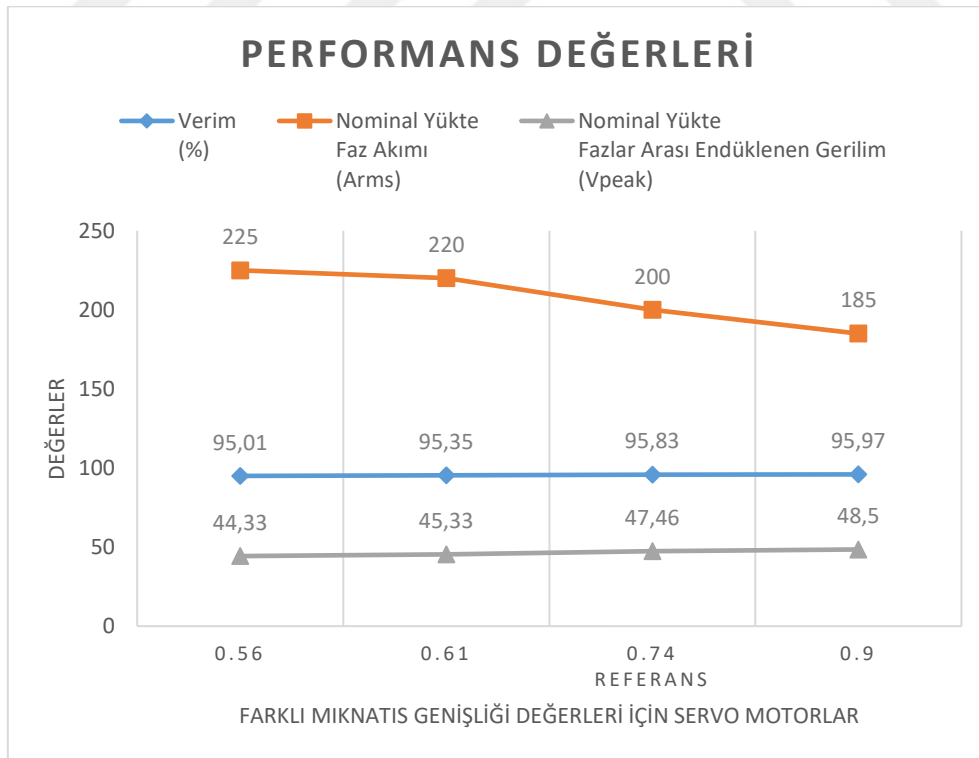
Şekil 5.39 Mıknatıs yüzey öteleme değişikliği için performans değerleri



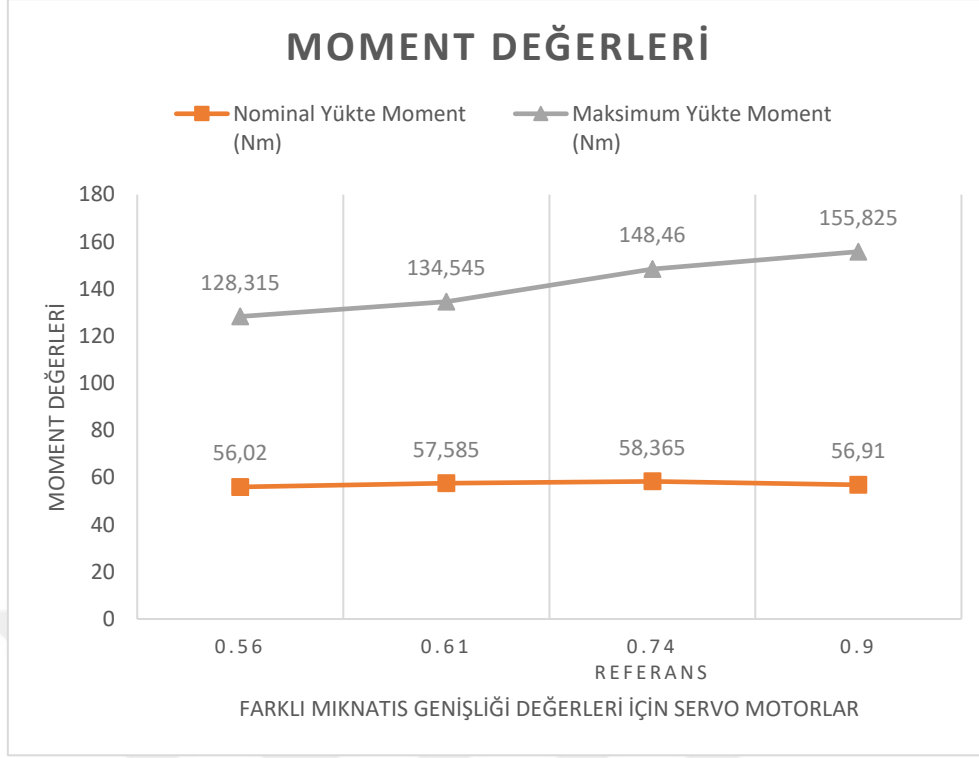
Şekil 5.40 Mıknatıs yüzey öteleme değişikliği için moment değerleri

Mıknatıs yüzey öteleme değişikliği kapsamında elde edilen sonuçlar Şekil 5.39 ve Şekil 5.40'ta verilmiştir. Bu sonuçlarda, mıknatıs yüzey öteleme değeri arttıkça;

- verimin ihmal edilebilecek seviyede az değiştiği gözlenmiştir.
- faz akımının arttığı gözlenmiştir. Bu durum, moment katsayısının düşmesine sebep olmaktadır. Dolayısıyla aynı moment değeri için daha fazla akım gerekecek ve daha fazla ısınma söz konusu olacaktır.
- fazlar arası endüklenen gerilimin tepe değeri (yani DC bara gerilimi) düşmüştür. Bu sonuç, düşük mıknatıs yüzey öteleme değerlerinde nominal hızın düşük olduğunu; yüksek değerlerde ise, hızın yüksek olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla motorun nominal hız değeri de bu değişiklikten etkilenmektedir. Ancak bu etki değeri azdır. Çünkü nominal hızın değişim oranı, gerilimin değişim oranı ile doğru orantılıdır ve gerilimin değişim oranı düşüktür.
- nominal moment değeri minimal (neredeyse ihmal edilebilecek) seviyede artmıştır.
- maksimum moment değeri %15-20 seviyesinde düşmüştür. Bu durum faz akımının artmasıyla uyumludur. Çünkü maksimum yük, 565 Arms yükleme koşulunda elde edilmektedir. Aynı maksimum moment değerini elde etmek için daha fazla akım verilmesi gerekmektedir.



Şekil 5.41 Mıknatıs genişliği değişikliği için performans değerleri



Şekil 5.42 Mıknatıs genişliği değişikliği için moment değerleri

Mıknatıs genişliği değişikliği kapsamında elde edilen sonuçlar Şekil 5.41 ve Şekil 5.42’de verilmiştir. Bu sonuçlarda, mıknatıs genişliği değeri arttıkça;

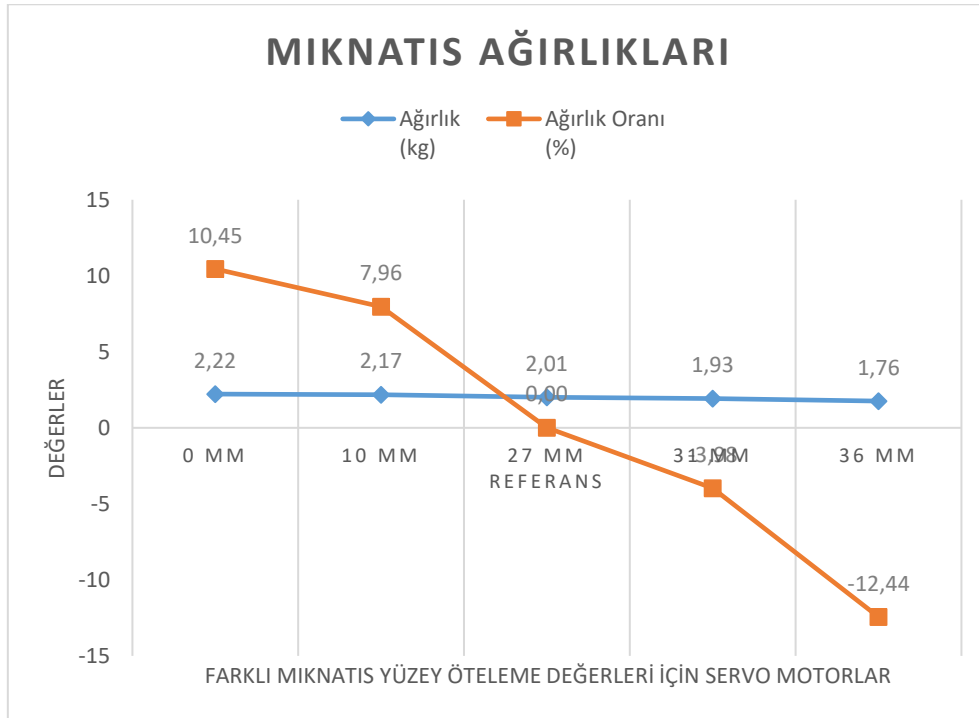
- verimin yine ihmal edilebilecek seviyede az değiştiği gözlenmiştir.
- faz akımının azaldığı gözlenmiştir. Bu durum, moment katsayısının artmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla aynı moment değeri için daha az akım gerekecek ve daha az ısınma söz konusu olacaktır.
- fazlar arası endüklenen gerilimin tepe değeri (yani DC bara gerilimi) artmıştır. Bu sonuç, düşük mıknatıs genişliği değerlerinde nominal hızın yüksek olduğunu; yüksek değerlerde ise, hızın düşük olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla motorun nominal hız değeri de benzer şekilde bu değişiklikten etkilenmektedir.
- nominal moment değeri yine ihmal edilebilecek seviyede değişmiştir.
- maksimum moment değeri %20 oranında artmıştır. Bu durum akım ve moment katsayısı değişimi ile uyumludur. Çünkü daha az akım ile aynı moment değeri elde edilebileceği için 565 Arms maksimum yükleme koşulunda daha fazla moment alınabilmektedir.

5.4 Maliyet Açısından Karşılaştırma

Maliyet karşılaştırması, mıknatıslar açısından yapılmıştır. Çünkü alternatif servo motor tasarımlarında, referans servo motora göre sadece mıknatıs geometrilerinde değişiklik olmuştur. Stator, sargılarda ve rotorda herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Dolayısıyla bu bileşenler ihmal edilerek değerlendirme yapılmıştır.

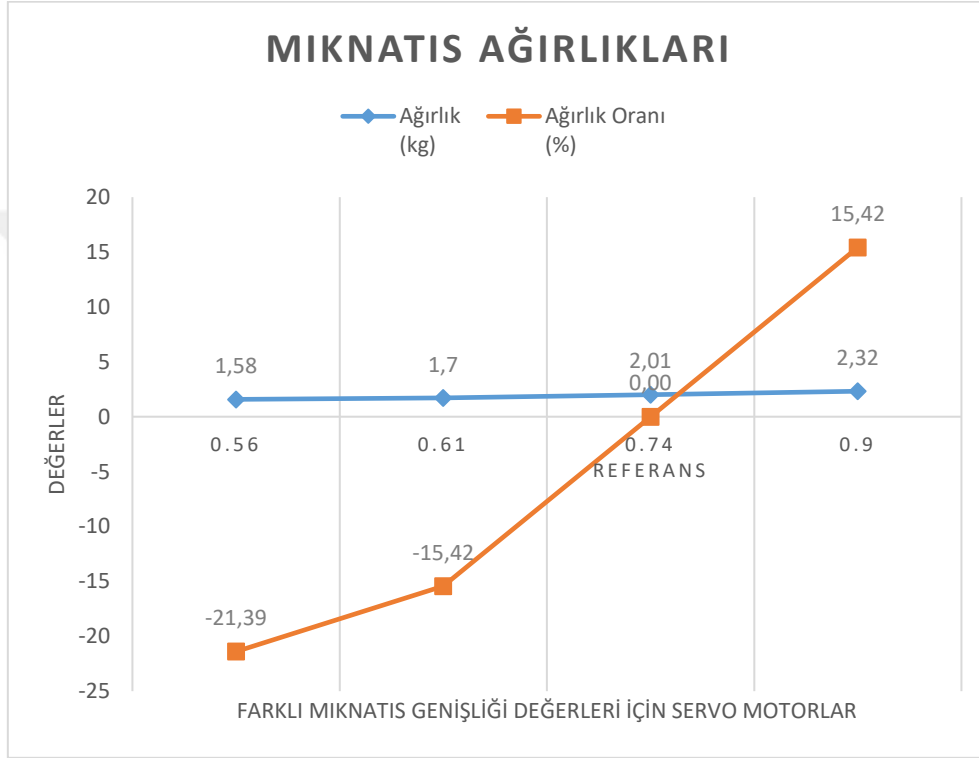
Mıknatıs yüzey öteleme değişikliği için mıknatıs ağırlıkları Şekil 5.43'te verilmiştir. Burada mıknatıs kütlesinin değişimi azdır. Ancak oransal olarak referans servo motora göre %10-15'lere varan değişimler söz konusudur. Bu durum doğrudan maliyete etki etmektedir.

Diğer taraftan, mıknatıs yüzey öteleme işlemi de mıknatıs üretimi açısından maliyet ve zaman gerektiren bir süreçtir. 0 mm mıknatıs yüzey ötelemesi, düz bir yüzey anlamına gelmektedir. Dolayısıyla burada işlem için bir maliyet oluşmayacaktır. Bu durum göz önüne alındığında %10'lara varan mıknatıs maliyet artışı, işlem maliyeti olmaması nedeniyle toplamda diğer tasarımlar ile benzer maliyete sahip olabilmektedir. Benzer durum 36 mm için de geçerlidir. %12 düşük olan mıknatıs maliyeti, işlem maliyetinin yüksek olması ile toplamda dengelenmektedir. Yani işlem maliyeti de dikkate alındığında mıknatıs yüzey öteleme değişikliğinde, tüm tasarımlar için neredeyse benzer bir maliyet değeri ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5.43 Mıknatıs yüzey öteleme değişikliği için mıknatıs ağırlıkları

Mıknatıs genişliği değişikliği için mıknatıs ağırlıkları Şekil 5.44'te verilmiştir. Buradaki mıknatıs kütlesinin değişimi, Şekil 5.43'e göre biraz daha fazladır. Oransal olarak da referans servo motora göre %15-20'lere varan değişimler söz konusudur. Bu durum da yine maliyete etki etmektedir. Diğer taraftan burada mıknatıs üretimi için ekstra bir işlem ve maliyet olmayacaktır. Dolayısıyla mıknatıs genişliği değişikliğinde, mıknatıs ağırlığı değişimi doğrudan maliyet değişimi olarak değerlendirilebilir.



Şekil 5.44 Mıknatıs genişliği değişikliği için mıknatıs ağırlıkları

6 SONUÇ

Servo motor; pozisyonun, hızın ve momentin hassas şekilde kontrol edilmesini sağlayan bir çeşit sürekli mıknatıslı senkron motordur.

Servo motorlar; geniş aralıkta hız kontrolü sağlaması, bakımlarının olmaması ve arıza oranlarının düşük olması sebebiyle son zamanlarda sıklıkla tercih edilmektedir. Belirtilen özellikleri sebebiyle servo motorlar; -düzgün ve hassas hareketin istendiği- robotik ve otomasyon, CNC, otomatik seri üretim, sağlık ve savunma sistemleri uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Teknolojinin hızlı gelişimi ile her uygulamada olduğu gibi elektrik motoru kullanan uygulamalarda da daha yüksek kalite ve hassasiyet istenmektedir. Elektrik motorlarından beklenti de moment kalitesinin ve güç yoğunluğunun daha yüksek olması şeklindedir. Bu durum servo motorlar için de geçerlidir.

Bu çalışmanın amacı, moment kalitesini arttırmak amacıyla mıknatıs geometrisi değişikliği ile moment dalgalanmasının incelenmesi ve değerlendirilmesidir.

Bu çalışmada, servo motorların veya genel ismiyle sürekli mıknatıslı senkron motorların özellikleri, uygulama alanları, çalışma prensibi, sınıflandırılması, çeşitleri, matematiksel modeli ve tasarım süreci detaylıca paylaşılmıştır. İlaveten moment dalgalanmasının iyileştirilmesi için literatürdeki çalışmalar incelenmiştir. Referans bir servo motorun modellemesi ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile analizi gerçekleştirilmiş, mıknatıs geometrisi değişikliği ile alternatif servo motor tasarımları oluşturulmuş ve benzer şekilde FEM analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları detaylıca paylaşılmış ve moment dalgalanması, vuruş momenti ve maliyet etkisi açılarından değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar genel olarak aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- ✓ ANSYS'in "Electronics Desktop" yazılım arayüzü kullanılarak "RMxprt" ve "Maxwell 2D" modüllerinde servo motor modellemesi ve FEM analizleri başarıyla gerçekleştirilmiştir.
- ✓ Servo motor tasarımı referans alınarak ve sadece mıknatıs geometrisinde (mıknatıs yüzey öteleme (magnet offset) ve mıknatıs genişliği (magnet embrace) parametrelerinde) değişiklikler yapılarak alternatif tasarımlar

oluşturulmuştur. Bu alternatifler içerisinde belli kriterler dikkate alınarak seçimler ve analizler yapılmıştır.

- ✓ Belirlenen servo motorlar için moment dalgalanması, vuruğu momenti, genel performans değerleri ve maliyet açılarından karşılaştırmalar ve değerlendirmeler yapılmıştır.
- ✓ Moment dalgalanmasının ve vuruğu momentinin farklı servo motor tasarımlarına göre değişimleri Tablo 6.1 ve Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.1 Mıknatıs yüzey öteleme değişikliği için nominal moment, moment dalgalanması ve vuruğu momenti değişimleri

Mıknatıs Yüzey Öteleme Değeri	Nominal Moment Değeri (Nm)	Moment Dalgalılığı (Nm)	Vuruğu Momenti Genliği (mNm)
0 mm	56,01	2,42	1088
10 mm	55,1	1,34	462,33
27 mm (referans)	58,365	0,69	67,8
31 mm	58,975	0,53	22,94
36 mm	58,32	0,22	22,92

Tablo 6.2 Mıknatıs genişliği değişikliği için nominal moment, moment dalgalanması ve vuruğu momenti değişimleri

Mıknatıs Genişliği Değeri	Nominal Moment Değeri (Nm)	Moment Dalgalılığı (Nm)	Vuruğu Momenti Genliği (mNm)
0.56	56,02	1,04	215,67
0.61	57,585	1,11	20,07
0.74 (referans)	58,365	0,69	67,8
0.9	56,91	0,62	22

- ✓ Moment dalgalanmasının iyileşme miktarına bağlı olarak benzer oranda performans kayıpları oluşabilmektedir (bkz. Tablo 6.3 ve Tablo 6.4). Burada uygulamaya göre bir seçim yapılmalıdır. Moment dalgalanmasının çok düşük olması istenen uygulamalarda verim, moment genliği, hız, akım ve ısınma gibi temel performans kriterlerinden taviz verilmesi gerekebilir.
- ✓ Moment dalgalanmasının iyileşmesine bağlı olarak moment katsayısı da değişmektedir. Nominal yükteki moment değerinde değişiklik olmasa da akımın değişimi, -aynı akım değerinden elde edilen- maksimum momentin ciddi seviyede değişmesine sebep olabilmektedir (bkz. Tablo 6.3 ve Tablo 6.4). Dolayısıyla moment dalgalanmasının düşük olması istenen

uygulamalarda, beklenen/hedeflenen maksimum moment de göz önüne alınarak bir tasarım seçimi yapılmalıdır.

Tablo 6.3 Mıknatıs yüzey öteleme değişikliği için performans özelliklerinin değişimi

Mıknatıs Yüzey Öteleme Değeri	Nominal Faz Akımı (Arms)	Maksimum Moment Değeri (Nm)	Verim (%)
0 mm	175	161,78	96,17
10 mm	175	159,31	96,14
27 mm (referans)	200	148,46	95,83
31 mm	210	143,335	95,6
36 mm	225	133,06	95,01

Tablo 6.4 Mıknatıs genişliği değişikliği için performans özelliklerinin değişimi

Mıknatıs Genişliği Değeri	Nominal Faz Akımı (Arms)	Maksimum Moment Değeri (Nm)	Verim (%)
0.56	225	128,315	95,01
0.61	220	134,545	95,35
0.74 (referans)	200	148,46	95,83
0.9	185	155,825	95,97

- ✓ Vuruntu momenti değerinin iyileşmesi moment dalgalanmasının iyileşmesi ile doğru orantılıdır (bkz. Tablo 6.1 ve Tablo 6.2). Yapılan analizlerde bu durum gözlenmiştir. Vuruntu momentinin ciddi seviyede iyileşebildiği, analiz sonuçlarında gözlenmiştir.
- ✓ Rotor yüzey alanında kullanılacak mıknatıs miktarını belirleyen mıknatıs genişliği parametresi, mıknatıs yüzey öteleme parametresine göre maliyet üzerinde daha büyük bir etkiye sahiptir. Dolayısıyla moment dalgalanması ve performans kriterleri üzerinde yapılacak iyileştirmelerin, maliyet açısından mıknatıs yüzey öteleme değişikliği ile yapılması önerilmektedir.

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar kapsamında, gelecekte yapılabilecek çalışmalar aşağıda önerilmiştir.

- Ele alınan servo motorların prototiplenmesi ile moment dalgalanması, maliyet ve diğer performans kriterleri için yapılan çalışmaların gerçekleştirilmesi. Elde edilecek deneysel sonuçların, tasarım ve analiz çıktıları ile karşılaştırılması.

- Mıknatıs yüzey öteleme ve mıknatıs genişliği parametrelerinin aynı anda değiştirilmesi ile oluşacak çeşitli kombinasyonlar arasından moment dalgalanması ve performans kriterleri için optimum çözümün elde edilmesi.
- Mıknatıs kalınlığı değişikliği ve rotora/mıknatısa kaykır verme işlemlerini de mevcut değişiklik yöntemleriyle birleştirerek performans kaybının olmayacağı şekilde moment dalgalanmasının iyileştirilmesi.



- [1] Dönmezer, Y. (2009). Fırçasız doğru akım motorlarında moment titreşimlerinin azaltılması (Master's thesis, İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü).
- [2] Çavuşoğlu, K. (2023). İç mıknatıslı senkron motor tasarımı ve mıknatıs asimetrisi ile tork dalgalılığının azaltılması (Master's thesis, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [3] Ocak, O. (2012). 1.3 kw gücünde dahili mıknatıslı bir senkron motorun analizi, tasarımı ve gerçekleştirilmesi (Master's thesis, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [4] Ocak, O. (2021). Sürekli mıknatıslı senkron motorlarda moment kalitesini artırmaya yönelik melez mıknatıs yerleşimli yeni bir rotor yapısı tasarımı ve deneysel doğrulaması (PhD thesis, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [5] Islam, R., Husain, I., Fardoun, A., & McLaughlin, K. (2007, September). Permanent magnet synchronous motor magnet designs with skewing for torque ripple and cogging torque reduction. In 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting (pp. 1552-1559). IEEE.
- [6] Chaieb, M., Tounsi, S., Neji, R., & Sellami, F. (2008, May). Optimum geometry for torque ripple minimization of permanent magnet motor by the finite element method. In MELECON 2008-The 14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (pp. 459-464). IEEE.
- [7] Finken, T., Hombitzer, M., & Hameyer, K. (2010, November). Study and comparison of several permanent-magnet excited rotor types regarding their applicability in electric vehicles. In 2010 Emobility-Electrical Power Train (pp. 1-7). IEEE.
- [8] Vakil, G. I., & Rajagopal, K. R. (2010, December). Performance comparison of sinusoidally-fed PM BLDC motors having different rotor topologies. In 2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India (pp. 1-5). IEEE.
- [9] Islam, M. S., Islam, R., & Sebastian, T. (2010). Experimental verification of design techniques of permanent-magnet synchronous motors for low-torque-ripple applications. IEEE Transactions on Industry Applications, 47(1), 88-95.
- [10] Kim, T. W., & Chang, J. H. (2012). Influence of cogging torque reduction method on torque ripple in a surface-mounted permanent magnet synchronous motor. Journal of Magnetism, 17(2), 109-114.
- [11] Brahim, L. C., Boughrara, K., & Ibtouen, R. (2015). Cogging torque minimization of surface-mounted permanent magnet synchronous machines using hybrid magnet shapes. Progress In Electromagnetics Research B, 62, 49-61.
- [12] Athanasopoulos, D. K., Kastros, V. I., & Kappatou, J. C. (2016, September). Electromagnetic analysis of a PMSM with different rotor topologies. In 2016

- XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM) (pp. 306-312). IEEE.
- [13] Zeng, Y., Cheng, M., Liu, G., & Zhao, W. (2019). Effects of magnet shape on torque capability of surface-mounted permanent magnet machine for servo applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(4), 2977-2990.
 - [14] Peng, C., Wang, D., Wang, B., Li, J., Xu, C., & Wang, X. (2022). Torque ripple and electromagnetic vibration suppression in permanent magnet synchronous motor using segmented rotor with different pole widths. *IEEE Transactions on Magnetics*, 58(9), 1-5.
 - [15] Qi, J., Zhu, Z. Q., Yan, L., Jewell, G. W., Gan, C., Ren, Y., ... & Hilton, C. (2022). Effect of pole shaping on torque characteristics of consequent pole PM machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 58(3), 3511-3521.
 - [16] Suriano-Sánchez, S. I., Ponce-Silva, M., Olivares-Peregrino, V. H., & De León-Aldaco, S. E. (2022). A review of torque ripple reduction design methods for radial flux PM motors. *Eng*, 3(4), 646-661.
 - [17] <https://innovationspace.ansys.com/forum/forums/topic/rotor-skewing/>, Haziran 2024.
 - [18] Liu, H. C., Kim, H. W., Jang, H. K., Jang, I. S., & Lee, J. (2020). Ferrite PM optimization of SPM BLDC motor for oil-pump applications according to magnetization direction. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 30(4), 1-5.
 - [19] Du, Z. S., & Lipo, T. A. (2019). High torque density and low torque ripple shaped-magnet machines using sinusoidal plus third harmonic shaped magnets. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(3), 2601-2610.
 - [20] Kantar, F. B., Dedecan, H., Denizhan, Y. (2015). Lisanssız elektrik üretimi için rüzgar türbini uygulamalarında daimi mıknatıslı senkron generatör tasarımı ve imalatı (Graduation thesis, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü).
 - [21] Chabchoub, M., Salah, I. B., Krebs, G., Neji, R., & Marchand, C. (2012, March). PMSM cogging torque reduction: Comparison between different shapes of magnet. In *2012 First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology* (pp. 206-211). IEEE.
 - [22] Özmen, T. (2021). Yüzey yerleşimli kalıcı mıknatıslı senkron generatörde karşılaştırmalı performans analizi (Master's thesis, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
 - [23] <https://www.youtube.com/watch?v=LAtPHANefQo>, Haziran 2024.
 - [24] <https://tr.wikipedia.org/wiki/Dosya:F%C4%B1rcasiz-dc-motor-nedir-1.png>, Haziran 2024.
 - [25] https://e2e.ti.com/cfs-file/_key/communityserver-discussions-components-files/171/BLDC-vs-PMSM.pdf, Haziran 2024.
 - [26] Duan, X., Zhang, X., Tang, Y., & Hao, M. (2021). Cogging torque reduction in pmsm in wide temperature range by response surface methodology. *Symmetry*, 13(10), 1877.

- [27] Gündoğan, A. (2018). Sabit mıknatıslı senkron makinelerin model tabanlı akım referansı kontrolü ile moment dalgalanmalarının azaltılması (Master's thesis, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [28] <https://assunmotor.com/products/brushless-coreless-motor>, Haziran 2024.
- [29] <http://www.electricalterminology.com/stator-vs-rotor/>, Haziran 2024.
- [30] https://www.femsan.com/docs/MSI_201810.pdf, Haziran 2024.
- [31] <https://www.kollmorgen.com/tr-tr/products/motors/servo/akm-series/akm2g/akm2g-servo-motorlar>, Haziran 2024.
- [32] <https://www.kollmorgen.com/tr-tr/products/motors/direct-drive/tbm2g-serisi-g%C3%B6vdesiz>, Haziran 2024.
- [33] <https://www.motioncontroltips.com/what-is-meant-by-general-motion-control/>, Haziran 2024.
- [34] <https://www.orientalmotor.com/servo-motors/technology/servo-motor-overview.html>, Haziran 2024.
- [35] <https://www.mathworks.com/help/sps/ref/pmsmsinglephase.html>, Haziran 2024.
- [36] <https://www.mathworks.com/help/autoblks/ref/surfacemountpmsm.html>, Haziran 2024.
- [37] Ahmed, W. A. E. M., Adel, M. M., Taha, M., & Saleh, A. A. (2021). PSO technique applied to sensorless field-oriented control PMSM drive with discretized RL-fractional integral. *Alexandria Engineering Journal*, 60(4), 4029-4040.
- [38] Lubin, T., & Rezzoug, A. (2014). Steady-state and transient performance of axial-field eddy-current coupling. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(4), 2287-2296.
- [39] Hariri, A. M., Damaki Aliabad, A., Ghafarzadeh, M., & Shamlou, S. (2020). Design, analysis, and fabrication of a direct drive permanent NdFeB magnet synchronous motor for precision position control. *IET Electric Power Applications*, 14(8), 1438-1445.
- [40] Derbel, N., Ghommam, J., & Zhu, Q. (Eds.). (2020). *Diagnosis, Fault Detection & Tolerant Control*. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer.
- [41] <https://sourcemagnets.com/samarium-cobalt-magnet-grade/>, Haziran 2024.
- [42] J Chapman, S. (2004). *Electric Machinery Fundamentals*.
- [43] Pyrhonen, J., Jokinen, T., & Hrabovcova, V. (2013). *Design of rotating electrical machines*. John Wiley & Sons.
- [44] Murthy, K. V. (2008). *Computer-aided design of electrical machines* (pp. 223-276). Hyderabad, India: BS Publications.
- [45] Mese, E., Ayaz, M., & Tezcan, M. M. (2016). Design considerations of a multitasked electric machine for automotive applications. *Electric Power Systems Research*, 131, 147-158.
- [46] Tezcan, M., Mese, E., Ustoglu, I., & Ayaz, M. (2017). Analytical modeling of dual winding surface-mounted permanent magnet synchronous machine for

hybrid electric vehicle accessory drive systems. *Electric Power Components and Systems*, 45(12), 1353-1369.



TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Dedecan, H., Ayçiçek, E., Aydeniz, M. G. (2024). Investigation of torque ripple in permanent magnet synchronous motors (PMSM) with different magnet geometry. 13th International Congress on Engineering, Architecture and Design, 2024(11), 659, İstanbul, TÜRKİYE.

