

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**ÇİFT STATORLU PARÇALI ROTOR YAPILI
ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORU
(ÇSARM) TASARIMI**

Kadir DOĞAN

Danışman: Prof. Dr. İbrahim AVGIN

2'nci Danışman: Prof. Dr. İrfan ALAN

Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Doktora Programı

İzmir

2024

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “ÇİFT STATORLU PARÇALI ROTOR YAPILI ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORU (ÇSARM) TASARIMI” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

29/03/2024

Kadir DOĞAN

ÖZET**ÇİFT STATORLU PARÇALI ROTOR YAPILI ANAHTARLAMALI
RELÜKTANS MOTORU (ÇSARM) TASARIMI**

DOĞAN, Kadir

Doktora Tezi, Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İbrahim AVGIN

2'nci Tez Danışmanı: Prof. Dr. İrfan ALAN

Mart 2024, 178 sayfa

Bu tez çalışmasında, Anahtarlama Relüktans Motorlarının (ARM) başlıca problemlerinden olan tork dalgalılığını en aza indirmek için iç içe geçmiş bir iç rotorlu ARM ile bir dış rotorlu ARM'nin parçalı rotorlarının alüminyum bloğa gömülerek birleştirilmesi ile oluşan biri uzun adım sarımlı diğeri kısa adım sarımlı iki farklı tip Çift Statorlu Parçalı Rotor Yapılı Anahtarlama Relüktans Motoru (ÇSARM) önerilmiştir. Elektromanyetik tasarımı yapılan iki farklı tip ÇSARM'lerin tork dalgalılığını azalttığı benzetim sonuçlarıyla gösterilmiştir. Uzun adım sarımlı ÇSARM'nin prototip üretimi gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçları verilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Anahtarlama Relüktans Motoru (ARM), Çift Statorlu Anahtarlama Relüktans Motoru, Parçalı Yapılı Rotor, İç Rotorlu ARM, Dış Rotorlu ARM, Elektrik Motoru Tasarımı, Tork Dalgalanması

ABSTRACT

DOUBLE STATOR SEGMENTED ROTOR SWITCHED RELUCTANCE MOTOR (DSSR-SRM) DESIGN

DOĞAN, Kadir

PhD in Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. İbrahim AVGIN

2nd Supervisor: Prof. Dr. İrfan ALAN

March 2024, 178 pages

In this thesis study, a Double Stator Segmented Rotor Switched Reluctance Motor (DSSR-SRM) with two different types, one with fully-pitched winding and the other with a single tooth winding, has been proposed to minimize torque ripple, which is one of the main problems of Switched Reluctance Motors (SRM). These DSSR-SRMs are created by embedding the segmented rotors of an inrunner SRM and an outrunner SRM into an aluminum block. Simulation results have demonstrated that both types of DSSR-SRMs designed in terms of electromagnetic characteristics reduce torque ripple. The prototype of the fully-pitched winding DSSR-SRM has been manufactured and experimental results are presented.

Keywords: Switched Reluctance Motor, Double Stator Switched Reluctance Motor, Segmented Rotor, Inrunner SRM, Outrunner SRM, Electric Motor Design, Torque ripple

ÖNSÖZ

Anahtarlamalı Relüktans Motorları (ARM), tork dalgalanması ve akustik gürültü problemlerine rağmen basit yapısı, güvenilirliği, rotorunda sargı bulundurmaması ve mıknatıs ihtiva etmemesinden dolayı daha az maliyetli olması sebepleriyle ilgi çekmektedirler. Son zamanlarda tork yoğunluğu artırılmış parçalı rotor yapılı ve çift statorlu ARM’lerin sunulması ile özellikle elektrikli araçlarda kullanılmasına yönelik çalışmalar artış göstermektedir.

Elektromanyetik tasarımı, prototip üretimi, test ortamının oluşturulması ve performans testlerinin gerçekleştirilmesi adımlarının her birinde büyük bilgi ve tecrübeler kazandığım, tork dalgalanmasını önemli ölçüde azaltan ‘Çift Statorlu Parçalı Rotor Yapılı Anahtarlamalı Relüktans Motoru (ÇSARM) Tasarımı’ adlı bu çalışmamın endüstride özellikle otomotiv ve enerji sektöründe kullanılması benim için bir mutluluk kaynağı olacaktır.

İZMİR

29/03/2024

Kadir DOĞAN



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI.....	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ.....	xi
İÇİNDEKİLER.....	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvi
TABLolar DİZİNİ.....	xxxii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Motivasyon	1
1.2 Problem Tanımı	2
1.2.1 Tork dalgalanması	2
1.3 Tez Katkısı.....	3
1.4 Organizasyon Planı.....	3
2. GENEL BİLGİLER	6
2.1 ARM Çalışma Prensibi ve Temel Denklemleri	11
2.2 ARM Çıkış Eşitliğinin Elde Edilmesi.....	16
2.3 ARM Sürücü Devresi	20
2.4 ARM Tork-Hız Karakteristiği	21
3. UZUN ADIM SARIMLI PARÇALI ROTOR YAPILI ÇSARM	
ELEKTROMANYETİK TASARIMI.....	25
3.1 Parçalı Rotor Yapılı ARM Temel Prensipleri.....	29
3.2 Uzun Adım Sarımlı Anahtarlama Relüktans Motorun Parametrik Çizimi.....	32
3.3 Stator Oluk Alanı Hesaplama	34
3.4 Sargı Direnci Hesaplama	36
3.5 Boyutsal Tarama ile Parçalı Rotor Yapılı ÇSARM Tasarımı.....	38
3.5.1 İç rotorlu ARM stator ve rotor kutup başı açılarının motor performansına etkisi ...	40
3.5.2 Dış rotorlu ARM stator ve rotor kutup başı açılarının motor performansına etkisi.	46
3.6. Uzun Adım Sarımlı ÇSARM Benzetim Sonuçları	63
3.6.1 Paketleme boyunun motor performansına etkisi	63
3.6.2 Sarım sayısının motor performansına etkisi	64
3.6.3 Stator boyunduruk kalınlığının motor performansına etkisi.....	66
3.6.4 Stator kutup genişliğinin motor performansına etkisi.....	68

İÇİNDEKİLER (Devam)

Sayfa

3.6.5 Faz akımları açma-kapama açılarının motor performansına etkisi.....	69
3.7 İç Rotorlu ARM Benzetim Sonuçları	74
3.8 Dış Rotorlu ARM Benzetim Sonuçları.....	75
3.9 İç ve Dış Rotorlu ARM Etkileşimi	81
3.9.1 Ortak endüktansları inceleme	81
3.9.2 Hava aralıkları manyetik akı yoğunluklarının incelenmesi	82
3.10 Çift Rotorlu ARM ve Benzetim Sonuçları	83
3.11 Uzun Adım Sarımlı ÇSARM Sargı Polarite Analizi	88
3.12 ÇSARM Statik Analizi	91
3.12.1 İç rotorlu ARM statik analizi.....	91
3.12.2 Dış rotorlu ARM statik analizi	93
3.13 Dinamik Benzetim Çalışmaları	95
3.13.1 Akım kontrollü dinamik benzetim.....	95
3.13.2 PI tabanlı hız kontrollü dinamik benzetim.....	96
4. ÇİFT STATORLU ARM YAPILANDIRMALARI	102
4.1 Stator ve Rotorları Kaydırılmamış 6 Fazlı ÇSARM Yapılandırması	102
4.2 Stator ve Rotorları Kaydırılmamış 3 Fazlı ÇSARM Yapılandırması	106
4.3 Stator ve Rotorları Kaydırılmış 6 Fazlı ÇSARM Yapılandırması.....	111
4.4 Stator ve Rotorları Kaydırılmış 3 Fazlı ÇSARM Yapılandırması	113
5. KISA ADIM SARIMLI PARÇALI ROTOR YAPILI ÇSARM ELEKROMANYETİK TASARIMI.....	119
5.1 Kısa Adım Sarımlı ÇSARM Parametrik Çizimi.....	119
5.2 Boyutsal Tarama ile Kısa Adım Sarımlı Parçalı Rotor Yapılı ÇSARM Tasarımı	123
5.2.1 Kısa adım sarımlı iç rotorlu ARM'nin stator ve rotor kutup başı açılarının motor performansına etkisi	124
5.2.2 Kısa adım sarımlı dış rotorlu ARM'nin stator ve rotor kutup başı açılarının motor performansına etkisi	128
5.3. Kısa Adım Sarımlı ÇSARM Benzetim Sonuçları	133
5.4 Kısa Adım Sarımlı ÇSARM Statik Analizi	137
5.4.1 Kısa adım sarımlı iç rotorlu ARM statik analizi.....	138
5.4.2 Kısa adım sarımlı dış rotorlu ARM statik analizi.....	139
6. UZUN ADIM SARIMLI ÇSARM PROTOTİP ÜRETİMİ	143
7. TEST ORTAMI VE YÜK TESTLERİ.....	149

İÇİNDEKİLER (Devam)

Sayfa

7.1 Test Ortamının Hazırlanması.....	150
7.2 Sürücü Devrenin Özellikleri ve Çalışma Prensibi	151
7.3 Dış Rotorlu ARM Yük Testleri	151
7.4 İç Rotorlu ARM Yük Testleri.....	154
7.5 ÇSARM Yük Testleri	156
7.5.1 ÇSARM 48 VDC yük testleri	156
7.5.2 ÇSARM 66 VDC yük testleri	161
7.5.3 ÇSARM 72 VDC yük testleri	162
7.6. Prototip Üretim Kalitesinin ÇSARM Performansı Üzerine Etkileri.....	164
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	165
TEŞEKKÜR	177
ÖZGEÇMİŞ.....	178

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 3 Fazlı ARM Tork Dalgalanması.....	2
2.1 12/8 Parçalı Rotor Yapılı ARM (Mecrow et al., 2002)	7
2.2 12/10 Parçalı Rotor Yapılı ARM (Mecrow et al., 2003)	8
2.3 Faz Sayılarına Göre Anatarlamalı Relüktans Motor Yapıları a) 2 fazlı 4/2 kutuplu ARM b) 3 fazlı 6/4 kutuplu ARM c) 4 fazlı 8/6 kutuplu ARM ç) 5 fazlı 10/8 kutuplu ARM d) 6 fazlı 12/10 kutuplu ARM e) 7 fazlı 14/6 kutuplu ARM f) 3 fazlı 12/8 kutuplu ARM g) 3 fazlı 18/12 kutuplu ARM.....	10
2.4 Faz Sayılarına Göre Anatarlamalı Relüktans Motor Yapıları a) 3 fazlı 6/4 kutuplu dış rotorlu ARM b) 4 fazlı 6/8 kutuplu dış rotorlu ARM.....	11
2.5 6/4 kutuplu iç rotorlu ARM rotor pozisyonuna göre faz enerjilendirme, oluşan akı çizgileri ve ardışıl rotor hareketi a,ç,f) Hizalı Olmayan Konum b,d,g) Ara Konum c,e,h) Hizalı Konum	12
2.6 6/4 kutuplu ARM'nin tek faz endüktans değişimi	13
2.7 ARM'nin elektromekanik enerji dönüşümü gösterimi	13
2.8 ARM'nin tek faz eşdeğer devresi.....	14
2.9 6/4 kutuplu ARM için idealize sürekli tork üretimi.....	16
2.10 6/4 kutuplu ARM temel boyutları.....	17
2.11 ARM için Halkanma akısı-Faz akımı grafiği (Krishnan, 2001)	17
2.12 3 fazlı ARM asimetrik köprü dönüştürücü devresi.....	20

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.13 ARM tek faz sürüm modları a) İletim anı b) Serbest dolaşım anı c) Kesim anı	20
2.14 Sert ve yumuşak anahtarlama ile ARM histeresiz kontrolü (Krishnan, 2001)	21
2.15 ARM Tork Hız grafiği.....	21
2.16 Histeresiz akım kontrolü.....	22
2.17 ARM tek darbeli akım kontrolü.....	22
2.18 ARM tek darbeli akım kontrolü.....	23
2.19 ARM tek darbeli akım kontrolü.....	23
2.20 İdealize endüktans ve en uygun akım dalga şekli a) Düşük Hız b) Yüksek Hız (Hamouda and Szamel, 2018).....	24
3.1 Halkanlanma akısı-faz akımı değişimi	26
3.2 3 fazlı uzun adım sarımlı parçalı rotorlu ARM (Mecrow et al., 2002) a) Hizalı konum b) Hizalı olmayan konum	29
3.3 Rotor ve Stator koni açıları.....	31
3.4 Uzun adım sarımlı ÇSARM parametrik çizimi	32
3.5 Uzun adım sarımlı ÇSARM.....	33
3.6 ÇSARM temel boyutları	33
3.7 Stator oluk alanı hesaplanması	34

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.8 Uzun adım sarım yöntemi (A fazı)	36
3.9 ÇSARM faz sargıları ve polariteleri	40
3.10 İç rotorlu ARM β_{sp} ve β_{rp} değişimin rotor açısına göre faz torku değişimine etkisi.....	42
3.11 İç rotorlu ARM β_{sp} ve β_{rp} değişimin faz ortalama torkuna etkisi	42
3.12 İç rotorlu ARM tek faz torkları	43
3.13 İç rotorlu ARM torku $\beta_{sp} = 150^\circ$, $\beta_{rp} = 320^\circ$ a) Her bir faza ait torklar b) Toplam tork	43
3.14 İç rotorlu ARM torku $\beta_{sp} = 250^\circ$, $\beta_{rp} = 400^\circ$ a) Her bir faza ait torklar b) Toplam tork	44
3.15 İç rotorlu ARM torku $\beta_{sp} = 270^\circ$, $\beta_{rp} = 370^\circ$ a) Her bir faza ait torklar b) Toplam tork	44
3.16 İç rotorlu ARM torku $\beta_{sp} = 260^\circ$, $\beta_{rp} = 380^\circ$ a) Her bir faza ait torklar b) Toplam tork	45
3.17 İç rotorlu ARM β_{sp} ve β_{rp} değişimin rotor açısına göre faz endüktansına etkisi	45
3.18 İç rotorlu ARM β_{sp} ve β_{rp} değişimin rotor açısına göre halkalanma akısına etkisi	46
3.19 Dış rotorlu ARM β_{spo} ve β_{rpo} değişimin rotor açısına göre faz torkuna etkisi	47
3.20 Dış rotorlu ARM β_{spo} ve β_{rpo} değişimin faz ortalama torkuna etkisi	48

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.21 Dış rotorlu ARM tek faz torku.....	48
3.22 Dış rotorlu ARM torku $\beta_{spo} = 150$, $\beta_{rpo} = 300$ a) Her bir faza ait torklar b) Toplam tork	49
3.23 Dış rotorlu ARM torku $\beta_{spo} = 270$, $\beta_{rpo} = 370$ a) Her bir faza ait torklar b) Toplam tork	49
3.24 Dış rotorlu ARM torku $\beta_{spo} = 260$, $\beta_{rpo} = 380$ a) Her bir faza ait torklar b) Toplam tork	50
3.25 Dış rotorlu ARM torku $\beta_{spo} = 250$, $\beta_{rpo} = 400$ a) Her bir faza ait torklar b) Toplam tork	50
3.26 Dış rotorlu ARM faz endüktansı	51
3.27 Dış rotorlu ARM faz halkalanma akısı.....	51
3.28 Rotor durumlarına göre ÇSARM a) Rotorları aynı hizada 3 fazlı ÇSARM b) Rotorları birbirine göre kaydırılmış 6 fazlı ÇSARM.....	52
3.29 Stator ve rotorları kaydırılmış 3 fazlı ÇSARM yapısı	52
3.30 Rotorları aynı hizada 3 fazlı ÇSARM yapısının tork dalgalanmasına etkisi.	53
3.31 Rotorları birbirine göre kaydırılmış 6 fazlı ÇSARM yapısının tork dalgalanmasına etkisi	53
3.32 Rotorları Aynı Hizada 3 Fazlı ÇSARM Tork Dalgalanmasına Etkisi.....	54
3.33 Rotorları Birbirine Göre Kaydırılmış 6 Fazlı ÇSARM Tork Dalgalanmasına Etkisi	54

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Sekil

Sayfa

3.34 Sonlu Elemanlar Analizinde kullanılan ağ yapısı	54
3.35 İç rotorlu ARM'ye uygulanan trapezoidal faz akımları.....	55
3.36 60 A trapezoidal akım ile ÇSARM tork eğrileri	55
3.37 Trapezoidal akım formu ile ÇSARM tork eğrileri.....	58
3.38 ÇSARM 6 fazlı sürücü devresi	59
3.39 ÇSARM $\beta_{rp} = \beta_{sp} + 150$, $\beta_{rpo} = \beta_{spo} + 150$ stator ve rotor kutup başı açılarına göre tork eğrileri	60
3.40 ÇSARM tork eğrileri.....	61
3.41 ÇSARM tork eğrileri.....	61
3.42 $\beta_{sp} = \beta_{spo} = 250$ ve $\beta_{rp} = \beta_{rpo} = 400$ durumunda faz akımları ve toplam tork	62
3.43 ÇSARM tork eğrileri.....	62
3.44 ÇSARM paketleme boyunun ortalama tork ve tork dalgalanmasına etkisi ...	63
3.45 ÇSARM faz sarım sayısının torka etkisi.....	65
3.46 ÇSARM faz akımları (Hız 850 d/d)	65
3.47 ÇSARM faz sarım sayısının motor torkuna etkisi (Hız 850 d/d).....	65
3.48 ÇSARM faz akımları (Hız 850 d/d)	66

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.49 ÇSARM faz akımı açma kapama açılarının motor torkuna etkisi (Hız 850 d/d).....	66
3.50 ÇSARM stator boyunduruk kalınlığının motor torkuna etkisi	67
3.51 ÇSARM stator kutup genişliklerinin motor torkuna etkisi.....	69
3.52 ÇSARM stator hava aralığı çapının motor torkuna etkisi	69
3.53 Faz akımları açma kapama açılarının torka etkisi	70
3.54 Uzun adım sarımlı ÇSARM görünümü a) Kesit görünümü b) Stator ve rotor parçaları.....	72
3.55 Tasarımı tamamlanmış ÇSARM tork eğrisi (Hız 500 d/d).....	72
3.56 Tasarımı tamamlanmış ÇSARM faz akımları şekilleri	72
3.57 Tasarımı tamamlanmış ÇSARM çeşitli yüklerde tork eğrileri (Rotor Hızı 500d/d).....	74
3.58 İç rotorlu ARM tork eğrisi.....	74
3.59 İç rotorlu ARM 3 faz akım eğrileri.....	75
3.60 Dış rotorlu ARM tork eğrisi	75
3.61 Dış rotorlu ARM 3 faz akım eğrileri	76
3.62 ÇSARM, iç ve dış rotorlu ARM tork eğrileri.....	76
3.63 12/8 parçalı rotor yapıları ARM yapıları a) Dış rotorlu ARM b) İç rotorlu ARM	77

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Sekil

Sayfa

3.64 İç ve dış rotorlu ARM tork ve toplam tork eğrileri.....	77
3.65 İç ve dış rotorlu (statoru kaydırılmış) ARM tork ve toplam tork eğrileri	78
3.66 Uzun adım sarımlı ÇSARM ve iç rotorlu ARM bir faz enerji dönüşümü	79
3.67 Faz akımı-Halkalanma akısı eğrileri	79
3.68 Uzun adım sarımlı ÇSARM ve dış rotorlu ARM bir faz enerji dönüşümü ...	80
3.69 Dış rotorlu ARM Faz akımı-Halkalanma akısı eğrileri	80
3.70 Dış Rotorlu ARM'nin oluşturduğu ortak endüktanslar a) Motora ait diğer fazlarla oluşan ortak endüktans b) İç rotorlu ARM'nin fazlarıyla oluşturduğu ortak endüktans	81
3.71 İç Rotorlu ARM'nin oluşturduğu ortak endüktanslar a) Motora ait diğer fazlarla oluşan ortak endüktans b) Dış rotorlu ARM'nin fazlarıyla oluşturduğu ortak endüktans	81
3.72 İç rotorlu ARM'nin oluşturduğu manyetik akı yoğunlukları.....	82
3.73 Dış Rotorlu ARM'nin oluşturduğu manyetik akı yoğunlukları	83
3.74 Çift Rotorlu ARM.....	84
3.75 Çift rotorlu ARM tork dalga şekilleri (İç Rotorlu ARM)	84
3.76 Çift Rotorlu ARM tork dalga şekilleri (Dış Rotorlu ARM).....	85
3.77 Çift Rotorlu ARM tork dalga şekilleri (İç ve Dış Rotorlu ARM tork toplamı)	85

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.78 Çift rotorlu ARM manyetik akı çizgileri ve manyetik akı yoğunluğu.....	86
3.79 Çift rotorlu ARM tork eğrileri ve matematiksel toplamı.....	86
3.80 Çift rotorlu ARM faz akımları dalga şekilleri	87
3.81 Çift Rotorlu ARM faz akım-endüktans dalga şekilleri (İç Rotorlu ARM)....	87
3.82 Çift Rotorlu ARM faz akım-endüktans dalga şekilleri (Dış Rotorlu ARM) .	87
3.83 İç ve Dış Rotorlu ARM enerji dönüşümü.....	88
3.84 3 fazlı ÇSARM sargı polariteleri a) Normal polarite b) Ters polarite.....	88
3.85 3 fazlı ÇSARM normal polarite (Mavi) ve ters polarite (Kırmızı) tork eğrileri	89
3.86 3 fazlı ÇSARM normal polarite manyetik akı yoğunluğu ve akı çizgileri	89
3.87 3 fazlı ÇSARM ters polarite manyetik akı yoğunluğu ve akı çizgileri.....	89
3.88 Stator ve rotorları kaydırılmış 3 fazlı ÇSARM faz akımı ve endüktansı (Faz gerilimi 96V) a) Normal polarite b) Ters polarite	90
3.89 ÇSARM Sargı polariteleri a) Normal polarite b) Ters polarite	90
3.90 Ters polarite durumunda ÇSARM Manyetik Akı Yoğunlukları ve Akı Çizgileri.....	90
3.91 Ters polarite durumunda ÇSARM tork eğrisi	91
3.92 İç rotorlu ARM rotor konumuna göre faz akımı değişiminin torka etkisi.....	92

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil

Sayfa

3.93 İç rotorlu ARM rotor konumuna göre faz akımı değişiminin endüktansa etkisi	92
3.94 İç rotorlu ARM rotor konumuna göre faz akımı değişiminin halkalanma akısına etkisi.....	93
3.95 İç rotorlu ARM hizalı olmayan ve hizalı konumda Akım-Halkalanma akısı eğrisi.....	93
3.96 Dış rotorlu ARM rotor konumuna göre faz akımı değişiminin torka etkisi...	94
3.97 Dış rotorlu ARM rotor konumuna göre faz akımı değişiminin endüktansa etkisi	94
3.98 Dış rotorlu ARM rotor konumuna göre faz akımı değişiminin halkalanma akısına etkisi.....	95
3.99 Dış rotorlu ARM hizalı olmayan ve hizalı konumda Halkalanma akısı-Akım eğrisi.....	95
3.100 ÇSARM tork-zaman grafiği.....	96
3.101 ÇSARM faz akımları grafiği.....	96
3.102 ÇSARM Hız-Zaman grafiği.....	96
3.103 ÇSARM PI Tabanlı Hız Kontrolü.....	97
3.104 ÇSARM Hız-Zaman Grafiği.....	97
3.105 ÇSARM Akım Grafiği	97

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.106 ÇSARM çeşitli yüklerde tork grafiği.....	97
3.107 Uzun adım sarımlı ÇSARM tork eğrileri.....	99
3.108 Uzun adım sarımlı ÇSARM çeşitli yüklerde benzetimi (310 VDC, 3000 d/d)	100
3.109 Uzun adım sarımlı ÇSARM çeşitli yüklerde benzetimi (310 VDC, 3000 d/d)	100
3.110 Uzun adım sarımlı ÇSARM faz akımı ve endüktansı (310 VDC, 3000 d/d)	101
3.111 Uzun adım sarımlı ÇSARM faz akımları (310 VDC, 3000 d/d)	101
4.1 Stator ve rotorları kaydırılmamış 6 fazlı ÇSARM yapılandırması.....	102
4.2 Stator ve rotorları kaydırılmamış 6 fazlı ÇSARM manyetik akı yoğunluğu ve akı çizgileri (Hızlı Konum)	103
4.3 Stator ve rotorları kaydırılmamış 6 fazlı ÇSARM faz akımı ve endüktansı..	103
4.4 Stator ve rotorları kaydırılmamış 6 fazlı ÇSARM faz akımları	103
4.5 Stator ve rotorları kaydırılmamış 6 fazlı ÇSARM tork eğrileri.....	104
4.6 Rotorları birleştirilmiş 6 fazlı ÇSARM yapısı.....	105
4.7 Rotorları birleştirilmiş 6 fazlı ÇSARM manyetik akı yoğunluğu ve akı çizgileri (Hızlı Konum)	105
4.8 Rotorları birleştirilmiş 6 fazlı ÇSARM faz akımları	105

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.9 Rotorları birleştirilmiş 6 fazlı ÇSARM tork eğrisi	106
4.10 Stator ve rotorları kaydırılmamış 3 fazlı ÇSARM yapılandırması	106
4.11 Stator ve rotorları kaydırılmamış 3 Fazlı ÇSARM manyetik akı yoğunluğu ve akı çizgileri (Hızlı Konum)	107
4.12 Stator ve rotorları kaydırılmamış 3 fazlı ÇSARM faz akımı ve endüktansı (Faz Gerilimi 72VDC)	107
4.13 Stator ve rotorları kaydırılmamış 3 fazlı ÇSARM faz akımları (Faz Gerilimi 72VDC)	108
4.14 Stator ve rotorları kaydırılmamış 3 fazlı ÇSARM tork eğrisi (Faz Gerilimi 72VDC)	108
4.15 Stator ve rotorları kaydırılmamış 3 fazlı ÇSARM faz akımı ve endüktansı (Faz Gerilimi 96VDC)	108
4.16 Stator ve rotorları kaydırılmamış 3 fazlı ÇSARM faz akımları (Faz Gerilimi 96VDC)	109
4.17 Stator ve rotorları kaydırılmamış 3 fazlı ÇSARM tork eğrisi (Faz Gerilimi 96VDC)	109
4.18 Stator ve rotorları kaydırılmamış 3 fazlı ÇSARM yapılandırması	110
4.19 3 fazlı ÇSARM sürücü devresi	110
4.20 Stator ve rotorları kaydırılmamış 3 fazlı ÇSARM tork eğrisi (Faz Gerilimi 48V).....	110

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.21 Stator ve rotorları kaydırılmamış 3 fazlı ÇSARM faz akımları (Faz Gerilimi 48V)	111
4.22 Stator ve rotorları kaydırılmış 6 fazlı ÇSARM yapılandırması.....	112
4.23 Stator ve rotorları kaydırılmış 6 Fazlı ÇSARM manyetik akı yoğunluğu ve akı çizgileri (Hızlı Konum)	112
4.24 Stator ve rotorları kaydırılmamış 6 fazlı ÇSARM faz akımları (Faz Gerilimi 48V)	113
4.25 Stator ve rotorları kaydırılmış 6 fazlı ÇSARM tork eğrileri.....	113
4.26 Stator ve rotorları kaydırılmış 3 fazlı ÇSARM yapılandırması.....	114
4.27 Stator ve rotorları kaydırılmış 3 fazlı ÇSARM manyetik akı yoğunluğu ve akı çizgileri (Hızlı Konum) (Faz Gerilimi 72 VDC).....	114
4.28 Stator ve rotorları kaydırılmış 3 fazlı ÇSARM faz akımları (Faz Gerilimi 72 VDC).....	114
4.29 Stator ve rotorları kaydırılmış 3 fazlı ÇSARM tork eğrisi (Faz Gerilimi 72 VDC).....	115
4.30 Stator ve rotorları kaydırılmış 3 fazlı ÇSARM faz akımı ve endüktansı (Faz Gerilimi 96V).....	115
4.31 Stator ve rotorları kaydırılmış 3 fazlı ÇSARM faz akımları (Faz Gerilimi 96V)	115
4.32 Stator ve rotorları kaydırılmış 3 fazlı ÇSARM tork eğrisi (Faz Gerilimi 96V)	116

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.33 Stator ve rotorları kaydırılmış 3 fazlı ÇSARM yapılandırması (Faz Gerilimi 48 VDC)	116
4.34 3 fazlı ÇSARM sürücü devresi	117
4.35 Stator ve rotorları kaydırılmış 3 fazlı ÇSARM tork eğrisi.....	117
4.36 Stator ve rotorları kaydırılmış 3 fazlı ÇSARM faz akımları.....	117
5.1 3 Fazlı Parçalı Rotorlu ARM a,b) Uzun Adım Sarımlı ARM c,d) Kısa Adım Sarımlı ARM (Mecrow et al.,2003)	119
5.2 Kısa adım sarımlı ÇSARM parametrik çizimi.....	122
5.3 Kısa adım sarımlı ÇSARM	122
5.4 Kısa adım sarımlı ÇSARM temel boyutları	123
5.5 Kısa adım sarımlı ÇSARM yapılandırması	124
5.6 Kısa adım sarımlı iç rotorlu ARM tek faz tork eğrileri.....	126
5.7 Kısa adım sarımlı iç rotorlu ARM tek faz tork eğrileri.....	126
5.8 İç rotorlu ARM torku $\beta_{sp} = \beta_{rp} = 260$, $\beta_{sp1} = 100$ a) Her bir faza ait torklar b) Toplam tork	126
5.9 İç rotorlu ARM torku $\beta_{sp} = \beta_{rp} = 330$, $\beta_{sp1} = 200$ a) Her bir faza ait torklar b) Toplam tork	127
5.10 Kısa adım sarımlı iç rotorlu ARM tek faz endüktans eğrileri.....	127
5.11 Kısa adım sarımlı iç rotorlu ARM tek faz halkalanma akısı.....	128

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.12 Kısa adım sarımlı dış rotorlu ARM tek faz tork eğrileri	129
5.13 Kısa adım sarımlı dış rotorlu ARM tek faz tork eğrileri	130
5.14 Dış rotorlu ARM torku $\beta_{spo} = \beta_{rpo} = 25^\circ$, $\beta_{spo1} = 12^\circ$ a) Her bir faza ait torklar b) Toplam tork.....	130
5.15 Dış rotorlu ARM torku $\beta_{spo} = \beta_{rpo} = 33^\circ$, $\beta_{spo1} = 18^\circ$ a) Her bir faza ait torklar b) Toplam tork.....	131
5.16 Dış rotorlu ARM torku $\beta_{spo} = \beta_{rpo} = 33^\circ$, $\beta_{spo1} = 20^\circ$ a) Her bir faza ait torklar b) Toplam tork.....	131
5.17 Kısa adım sarımlı dış rotorlu ARM tek faz endüktans eğrileri.....	131
5.18 Kısa adım sarımlı dış rotorlu ARM halkanma akısı eğrileri	132
5.19 Kısa adım sarımlı 3 fazlı ÇSARM'nin tork dalgalanmasına etkisi	132
5.20 Kısa adım sarımlı 6 fazlı ÇSARM'nin tork dalgalanmasına etkisi	132
5.21 Kısa adım sarımlı ÇSARM stator ve rotor kutup başı açılarının tork dalgalanmasına etkisi	134
5.22 Kısa adım sarımlı iç rotorlu ARM tork eğrisi.....	134
5.23 Kısa adım sarımlı dış rotorlu ARM tork eğrisi.....	134
5.24 Kısa adım sarımlı ÇSARM tork eğrisi	135
5.25 Kısa adım sarımlı ÇSARM faz akımları.....	135
5.26 Kısa adım sarımlı ÇSARM ve iç ve dış rotorlu ARM tork eğrileri.....	135

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Sekil

Sayfa

5.27 Kısa adım sarımlı 12/8 parçalı rotor yapılı ARM yapıları a) Dış rotorlu ARM b) İç rotorlu ARM	136
5.28 Kısa adım sarımlı 12/8 parçalı rotor yapılı iç ve dış rotorlu ARM torku ve Toplam tork eğrileri	136
5.29 Kısa adım sarımlı iç rotorlu ARM rotor açısına göre faz akımının tork değişimine etkisi.....	138
5.30 Kısa adım sarımlı iç rotorlu ARM rotor açısına göre faz akımının endüktans değişimine etkisi.....	138
5.31 Kısa adım sarımlı iç rotorlu ARM rotor açısına göre faz akımının halkalanma akısı değişimine etkisi.....	139
5.32 Kısa adım sarımlı dış rotorlu ARM rotor açısına göre faz akımının tork değişimine etkisi.....	139
5.33 Kısa adım sarımlı dış rotorlu ARM rotor açısına göre faz akımının endüktans değişimine etkisi.....	140
5.34 Kısa adım sarımlı dış rotorlu ARM rotor açısına göre faz akımının halkalanma akısı değişimine etkisi.....	140
6.1 Prototip İmalat.....	143
6.2 ÇSARM stator ve rotor parçaları	144
6.3 ÇSARM rotor gövdesi kesimi.....	145
6.4 ÇSARM statorları üretimi.....	146
6.5 ÇSARM rotor gövdesi ve rotor parçaları	147

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.6 ÇSARM arka kapak.....	148
7.1 Test ortamı ve test ekipmanları.....	149
7.2 Test Blok Diyagramı.....	150
7.3 Dış rotorlu ARM verim haritası.....	153
7.4 Dış rotorlu ARM 48VDC 504 d/d ölçüm sonuçları	153
7.5 İç rotorlu ARM verim haritası	155
7.6 İç rotorlu ARM 48VDC 505 d/d ölçüm sonuçları	156
7.7 ÇSARM verim haritası	158
7.8 ÇSARM 48VDC 513 d/d ölçüm sonuçları	159
7.9 ÇSARM 48VDC 755 d/d ölçüm sonuçları	159
7.10 ÇSARM 48VDC 500 d/d birer faz akım gerilim grafiği	161
7.11 ÇSARM 48VDC 900 d/d birer faz akım gerilim grafiği	161
7.12 ÇSARM 66VDC Tork Verim Grafiği	162
7.13 ÇSARM 72VDC 1274 d/d ölçüm sonuçları	163

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 ÇSARM Temel Boyutları ve Boyutsal Tarama Sınırları	28
3.2 Hava Aralığı Çapının Belirlenmesi.....	39
3.3 İç Rotorlu ARM Stator ve Rotor Kutup Açılarının Faz Torkuna Etkisi	40
3.4 Dış Rotorlu ARM Stator ve Rotor Kutup Açılarının Faz Torkuna Etkisi	46
3.5 Stator ve Rotor Kutup Açılarının Faz Torkuna Etkisi	56
3.6 Stator ve rotor kutup başı açılarına göre torkun değişimi	57
3.7 Stator ve rotor kutup başı açılarına göre torkun değişimi	61
3.8 Paketleme Boyunun Motor Torkuna Etkisi	63
3.9 Stator Boyunduruk Kalınlıklarına Göre Torkun Değişimi	68
3.10 500d/d hız için faz akımı açma kapama açısının motor performansına etkisi .	71
3.11 Tasarımı Tamamlanan Uzun Adım Sarımlı ÇSARM Boyutları	73
3.12 Uzun Adım Sarımlı ÇSARM Hacim ve Ağırlığının Hesaplanması	98
4.1 ÇSARM Yapılandırmaları	118
5.1 Kısa Adım Sarımlı ÇSARM Temel Boyutları ve Boyutsal Tarama Sınırları	121
5.2 İç Rotorlu ARM Stator ve Rotor kutup başı açılarına göre torkun değişimi .	125
5.3 Kısa Adım Sarımlı Dış Rotorlu ARM Stator ve Rotor Kutup Başı Açılarına Göre Torkun Değişimi	128

TABLOLAR DİZİNİ (Devam)

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
5.4 Kısa Adım Sarımlı ÇSARM Stator ve Rotor Kutup Başı Açıklarına Göre Torkun Değişimi	133
5.5 Tasarımı Tamamlanan Kısa Adım Sarımlı ÇSARM Temel Boyutları.....	137
5.6 Kısa Adım Sarımlı ÇSARM Hacim ve Ağırlığının Hesaplanması	141
7.1 Test ortamında kullanılan ekipmanlar	149
7.2 Dış Rotorlu ARM Yük Testleri	152
7.3 İç Rotorlu ARM Yük Testleri.....	154
7.4 48VDC ÇSARM Yük Testleri.....	157
7.5 ÇSARM 66 VDC Yük Testleri.....	162
7.6 ÇSARM 72 VDC Yük Testleri.....	163

1. GİRİŞ

1.1 Motivasyon

Elektrik motorları elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren elektromekanik cihazlardır. Relüktans motor, hareketli parçasını (rotor) uyartım sargısının endüktansının en büyük olduğu yere hareket ettirme eğilimi ile tork üreten elektrik motorudur (T.J.E., Miller, 2001).

Anahtarlama Relüktans Motorlar (ARM), 1980'den daha önce stator ve rotorunun çıkık kutup yapısından dolayı, hava aralığındaki relüktans değişimi prensibini temel aldıklarından ve faz endüktanslarının değişken olmasından dolayı Değişken Relüktanslı Motorlar olarak tanımlanmışlardır. Güç elektroniğinin gelişmesiyle faz sargılarının MOSFET, IGBT gibi yarı iletken anahtar elemanlar tarafından devreye alınıp çıkarılmasına istinaden Anahtarlama Relüktans Motoru adı daha yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

ARM'lerin sadece statorunda sargıları vardır, rotorunda mıknatıs ve sargı bulundurmazlar. ARM'ler, rotorunda mıknatıs barındıran kalıcı mıknatıslı motorlar ve rotorunda sargı bulunduran indüksiyon motorlarına göre ucuz, basit ve dayanıklı bir yapıya sahiptirler. Statoru ve rotoru ferromanyetik malzemeden yapılmış çıkık kutuplu makine olan ARM'lerin yaygın kullanımını engelleyen yüksek tork dalgalılığı ve gürültü problemi mevcuttur.

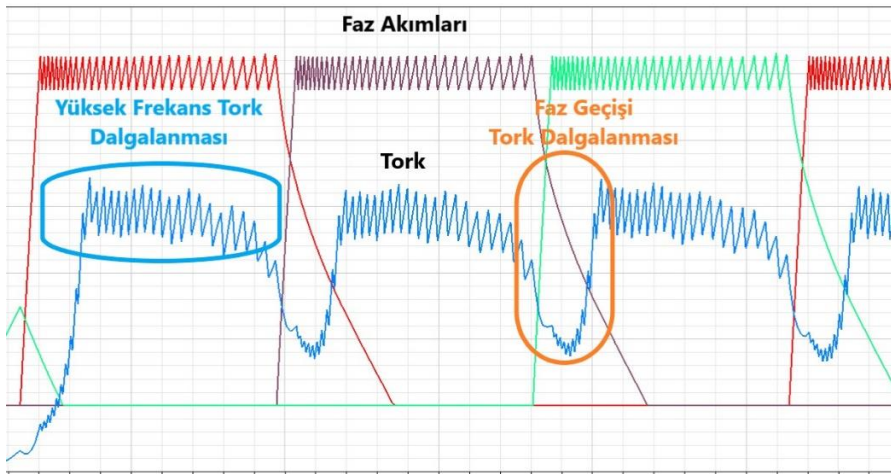
Literatürde hem makine yapısı üzerinde değişiklikler yapılarak hem de farklı kontrol yöntemleri kullanılarak bu problemleri azaltmak veya ortadan kaldırmak için birçok çalışma yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında ARM'lerin endüstride ve otomotiv sektöründe yaygın kullanımını artırmak için tork dalgalılığını en aza indiren farklı iki tip Çift Statorlu Parçalı Rotor Yapılı Anahtarlama Relüktans Motoru (ÇSARM) önerilmiştir. İç ve dış rotor parçaları birbirine göre kaydırılarak bir alüminyum silindir blok içine sabitlenmiş iç ve dış rotorlu ARM'lerin iç içe yerleştirilmesi ile oluşan ÇSARM yapılarının tork dalgalılığını önemli ölçüde azalttığı gösterilmiştir.

1.2 Problem Tanımı

1.2.1 Tork dalgalanması

Tork dalgalanması ARM'lerin en önemli sorunlarının başında gelir ve bu ARM kullanımını sınırlayan bir durumdur. Çıkık kutuplu ARM'nin karşılıklı rotorlarının bir çifti, komşu iki stator kutbunun tam ortasında iken yani rotoru hizalı olmayan bir konumda iken iki komşu stator kutuplarından biri enerjilendirildiğinde relüktans tork oluşur ve rotor enerjilendirilen stator kutbu ile aynı konuma gelmeye çalışır, faz endüktansı rotor ve stator kutupları aynı konuma gelene kadar artarken, relüktansı düşer ve bu hizalı konumda en küçük relüktans değerini alır. Endüktans artarken $dL/d\theta$ pozitif olduğundan tork denkleminde (Denklem 2.9) torkun pozitif olduğu açıkça görülmektedir. Rotor kutupları enerjilendirilmiş stator kutuplarını geçtikten sonra endüktans düşmeye başlar ve $dL/d\theta$ negatif olur dolayısıyla negatif veya frenleme torku oluşur. Rotor üzerindeki bu olumsuz etkiyi önlemek için rotor hizalanmış konumdayken ya da hizalanmış konuma gelmeden hemen önce stator kutupuna ait fazın enerjisi kesilmelidir. Rotorun dönüşünü sürekli kılmak için daha sonra veya aynı anda ikinci bir faza enerji verilir. Böylelikle pozitif tork korunur ve rotorun dönüşü devam eder. Sürekli dönüş, stator kutuplarına sırasıyla enerji verilmesi ve enerjisinin kesilmesiyle oluşur. Ani tork, yukarıda açıklanan her bir faza ait torkların toplamıdır. Şekil 1.1'de gösterildiği gibi geleneksel bir ARM'de aynı anda yalnızca bir faza enerji verildiğinden fazlar arası geçişte makinenin ürettiği düşen ve yükselen tork olgusuna tork dalgalanması adı verilir. Faz akımını istenilen bir seviyede tutmak için yapılan anahtarlama esnasında yüksek frekans tork dalgalanması oluşmaktadır.



Şekil 1.1 3 Fazlı ARM Tork Dalgalanması

Tork dalgalanması oranı T_{do} ;

$$T_{do} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{ort}} 100 \quad (1.1)$$

olarak hesaplanır.

1.3 Tez Katkısı

Bu tez çalışmasında, Anahtarlama Relüktans Motorlarının (ARM) başlıca problemlerinden olan tork dalgalılığını en aza indirmek için iç içe geçmiş bir iç rotorlu ARM ile bir dış rotorlu ARM'nin parçalı rotorlarının alüminyum bloğa gömülerek birleştirilmesi ile oluşan farklı iki tip uzun ve kısa adım sarımlı Çift Statorlu Parçalı Rotor Yapılı Anahtarlama Relüktans Motoru (ÇSARM) önerilmiştir.

Bu tez çalışmasına özgü farklı iki tip ÇSARM yapısı parametrik olarak çizilmiş ve boyutsal tarama ile optimizasyona hazır hale getirilmiştir. Motor geometrisinde önerilen prensipler doğrultusunda bağlantılar kurularak bağımsız değişkenlerin sayısı azaltılmış dolayısıyla parametrik analiz sayısı azalmış ve benzetim süresi kısalmıştır.

İç ve dış rotorlu ARM'lerden oluşan ÇSARM, motorların ayrı ayrı çalıştırıldıklarında oluşturdukları toplam torktan daha fazla tork üretimi gerçekleştirmiş ve tork yoğunluğunu artırmıştır.

Sağlam yapılı, hata toleransı yüksek, rotorunda sargı bulundurmayan, mıknatıs ihtiva etmeyen, yüksek tork ve güç yoğunluğuna sahip ÇSARM yapılarının tork dalgalılığının %10 civarına düşürülmesi ile birlikte özellikle otomotiv sektöründe elektrikli araçlara uygulanması ve endüstride kullanım alanlarının artması beklenmektedir.

1.4 Organizasyon Planı

Bu tez, giriş bölümü ile birlikte toplam 8 bölümden oluşmaktadır;

'GENEL BİLGİLER' bölümünde Anahtarlama Relüktans Motorları hakkında bilgiler verilmiş, literatürde bulunan tork dalgalanmasını azaltıcı yöndeki

alışmalar, parçalı rotor yapıları ve ift Statorlu ve ift Rotorlu ARM yapıları hakkında yapılan çalışmalar özetlenmiştir. ARM'nin çalışma prensibi, tork ifadesinin elde edilmesi, ARM temel çıkış denklemleri, tork-hız karakteristiğı ve tezde kullanılan sürücü hakkında bilgiler verilmiştir.

'UZUN ADIM SARIMLI PARÇALI ROTOR YAPILI SARM ELEKTROMANYETİK TASARIMI' bölümünde uzun adım sarımlı parçalı rotorlu ARM prensipleri doğrultusunda SARM parametrik çizimi gerçekleştirilmiş, Sonlu Elemanlar Yöntemini kullanan programda boyutsal tarama ile tork dalgalılığını en aza indiren benzetimleri yapılmıştır. Statik ve dinamik benzetim sonuçları verilmiştir. Sadece iç rotorlu ARM ve sadece dış rotorlu ARM ayrı ayrı oluşturulup benzetim sonuçları verilmiştir. Fiziksel olarak birleştirilmiş iç ve dış rotorlu ARM rotorları birbirinden ayrılarak bağımsız dönen ift Rotorlu ARM yapısı elde edilmiş, boyutsal tarama ile tork dalgalanmasını en aza indiren stator kutup başları ve rotor parçaları açıları elde edilmiştir. Uzun adım sarımlı SARM faz gerilimi 310 VDC olacak şekilde benzetimi yapılmış 3000d/d hız için benzetim sonuçları verilmiştir.

'ÇİFT STATORLU ARM YAPILANDIRMALARI' bölümünde stator ve rotorların birbirine göre konumlarıyla oluşturulan 3 ve 6 fazlı SARM yapılandırmaları tanıtılmış ve benzetimleri yapılarak ortalama tork ve tork dalgalanmaları karşılaştırılmıştır.

'KISA ADIM SARIMLI PARÇALI ROTOR YAPILI SARM ELEKTROMANYETİK TASARIMI' bölümünde kısa adım sarımlı parçalı rotorlu ARM prensipleri doğrultusunda SARM parametrik çizimi gerçekleştirilmiş, Sonlu Elemanlar Yöntemini kullanan programda boyutsal tarama ile tork dalgalılığını en aza indiren benzetimleri yapılmıştır. Statik ve dinamik benzetim sonuçları verilmiştir. Sadece iç rotorlu ARM ve sadece dış rotorlu ARM ayrı ayrı oluşturulup benzetim sonuçları verilmiştir.

'SARM PROTOTİP ÜRETİMİ' bölümünde üretim basamakları verilmiş, karşılaşılan zorluklar ve çözüm yolları anlatılmıştır.

'TEST ORTAMI VE YÜK TESTLERİ' bölümünde test ortamı, ekipmanları, bağlantıları ve sürücü devre ve özellikleri tanıtılmıştır. 48 VDC gerilim ile beslenerek yalnızca iç rotorlu ARM, yalnızca dış rotorlu ARM ve ikisi birlikte SARM çeşitli yük ve hızlarda test edilip test sonuçları kaydedilmiştir. Her bir

motorun verim haritası çıkarılmıştır. ÇSARM 66 VDC ve 72 VDC gerilim ile beslenerek çeşitli hızlarda çalıştırılmış sistem verimi ölçülmüştür.

‘*SONUÇ VE ÖNERİLER*’ bölümünde tez çalışmasında elde edilen sonuçlar ve sonraki çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.



2. GENEL BİLGİLER

ARM'ler sabit mıknatıslı motorlarda olduğu gibi yapılarında kalıcı mıknatısların olmaması ve de indüksiyon motorlarında olduğu gibi rotorunda sargıların bulunmaması elektrik motor üretim maliyetini düşürür (Chiba et al., 2011; Bilgin et al., 2019). Sabit mıknatıslar olmadığından rotor daha yüksek sıcaklıklarda çalıştırılabilir. Sadece statorunda sargı bulunduğundan soğutması kolaydır (Viajante et al., 2013). Her fazın elektrik ve manyetik olarak birbirinden bağımsız olması, hatalara karşı güvenilirliği artırır ve kolay bakım gerektirir (Soares and Costa Branco, 2001). Yüksek hız uygulamalarına uygundur (Soares and Costa Branco, 2001). Fakat ARM yüksek tork dalgalanması, titreşim ve gürültü problemlerine sahiptir (Chiba et al., 2011; Soares and Costa Branco, 2001), bu dezavantajları yok etmek için motor geometrisi, yapısı ve kontrol yöntemlerini konu alan çok çeşitli çalışmalar bulunmaktadır.

ARM'nin hava aralığı, stator ve rotor dış çapları, stator sarım sayısı ve stator ve rotor kutup açıları tork dalgalanması üzerinde çok büyük bir etkiye sahiptir (Krishnan, 2001). Motor geometrisinde değişiklikler yapılarak tork dalgalanmasını en aza indirmek için çalışmalar yapılmıştır (Guangjin et al., 2012; Yong Kwon et al., 2007; Hur et al., 2004; Sheth and Rajagopal, 2003; Ojeda et al., 2008; Hong et al., 2002; Choi et al., 2007; Lee et al., 2004; Ou and Zheng, 2009).

Bunun dışında motor performans parametrelerini iyileştirmek için rotor kutuplarına belirli bir derece eğim verme, testere dişi rotor kutbu kullanma, rotor kutbunun yüzeyini genişletme ve rotor kutbunun kenarlarına eğim verme gibi geometriksel çalışmalar yapılmıştır (Arumugam et al., 1988; Moallem et al., 1990; Miller, 2002; Mecrow et al., 2002; Rasmussen et al., 2000).

Ayrıca kutup genişliğinin tork üretimine etkisi (Harris et al., 1977; Lawrenson et al., 1980; Harris et al., 1975; Neagoe et al., 1997) ve akustik gürültüyü azaltma (Wu and Pollock, 1995; Sanada et al., 2000; Pilay and Chai, 1999), kutup sayısının ortalama tork üzerine etkisi (Lovatt and Stephenson, 1992), tork dalgalanmasını azaltıcı tasarımlar (Wallace and Taylor, 1990; Sahin et al., 1996) ve stator kutup başlarına konik şekil verme gibi optimum şekil araştırmaları (Neagoe et al., 1997; Hoang et al., 1994) yer almaktadır.

ARM sadece demir çekirdek ve sargılardan oluştuğundan ARM'nin performansı büyük ölçüde çekirdek malzemenin manyetik özelliklerine bağlıdır.

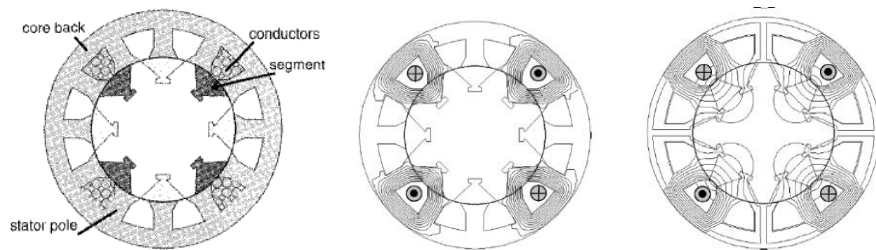
Dolayısıyla çekirdek malzeme olarak silisyum saç yerine permendur kullanılarak ARM tasarımı yapılan çalışma mevcuttur. Bu çalışmada, son derece yüksek doyma akı yoğunluğu ve çok düşük çekirdek kaybı olan permendur malzemeden yapılmış yeni bir ARM geliştirilmiştir ve bu permendurdan yapılmış ARM'nin torkunun, geleneksel yönlendirilmemiş Si çelikten yapılmış ARM'ye göre % 20 daha yüksek olduğu gösterilmiştir (Hasegawa et al., 2010).

Tork dalgalılığını azaltmak için çok katmanlı ARM tasarımları yapılmıştır. Tork dalgalılığı, katmanlarda bulunan rotorların birbirlerine göre belirli bir açıda konumlandırılması (Rotor Shifting Technique, RST) yöntemiyle klasik ARM'lere göre azaltılmıştır (Daldaban and Ustkoyuncu, 2008; Siadatan and Afjei, 2012; Torkaman et al., 2012).

Son yıllarda çok çeşitli yeni ARM tasarımları literatüre sunulmuştur. Çalışması manyetik relüktansı en aza indirmek için rotorun hareket etmesi prensibine dayanan ARM'nin performansını artırmak için manyetik akı yolları modifiye edilmiş ve yüksek tork yoğunluğu elde edilmiştir:

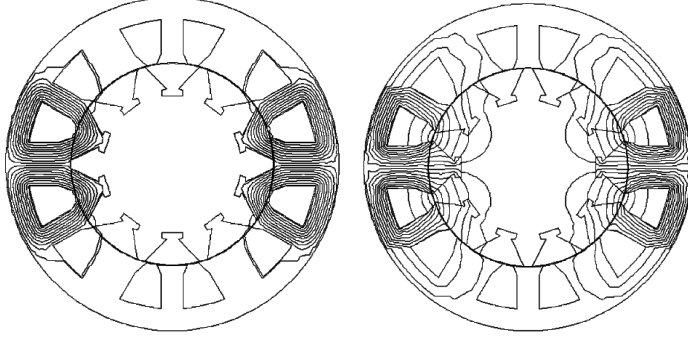
Sargı sonu uzunluğunu artırmasına rağmen, makinenin elektrik kullanımını artırmak ve dolayısıyla tork kapasitesini artırmak için uzun adımlı sarımların kullanıldığı gelişmeler olmuştur (Mecrow, 1993, 1996).

İlk olarak Mecrow tarafından klasik ARM'ye alternatif bir elektromanyetik tasarım önerildi ve ayrıntılı olarak incelendi (Şekil 2.1). Yeni tip üç fazlı 12/8 parçalı rotor yapılı ARM üretildi ve test edildi. Klasik ARM'den daha fazla bir tork/ağırlık kapasitesine sahip bu yeni motorun %40 daha fazla tork ürettiği gösterilmiştir (Mecrow et al., 2002,; Mecrow et al., 2004).



Şekil 2.1 12/8 Parçalı Rotor Yapılı ARM (Mecrow et al., 2002)

Yine Mecrow tarafından önerilen stator yapısı optimize edilmiş konsantre sargılı 12/10 kutuplu parçalı rotor yapılı ARM (Şekil 2.2) 12/8 klasik ARM'lere göre %44 daha fazla tork ürettiği gösterilmiştir (Mecrow et al., 2003).



Şekil 2.2 12/10 Parçalı Rotor Yapılı ARM (Mecrow et al., 2003)

Kısa adım sargıları ve optimizasyon ile performansı artırılmış parçalı rotor yapılı ARM'nin geliştirilmiş versiyonu sunulmuştur (Mecrow et al., 2004; Widmer and Mecrow, 2011).

Rotor parçaları alüminyum blok içine gömülmüş 6 stator ve 4 parçalı rotora sahip tork dalgalılığı fazla olan ARM tasarımı yapılmıştır (Oyama et al., 2005). Bu çalışmanın devamı niteliğinde tork dalgalılığını azaltmak için faz sayısı artırılmış aynı anda iki fazı enerjilendirilen ARM tasarımları sunulmuştur (Higuchi et al., 2009).

Başka bir yeni 12/8 parçalı rotor yapılı çalışmada klasik ARM'lere göre çekirdek kayıpları azaltılmış ve verimliliği yükseltilmiş parçalı rotor yapılı ARM tasarımı yapılmıştır (Zhang et al., 2014).

Vandana ve arkadaşları klasik ARM, parçalı rotor yapılı ARM ve yeni dairesel oluklu parçalı rotor yapılı ARM'yi karşılaştırdığında sunulan yeni ARM'nin klasik ARM'ye göre 2 kat tork yoğunluğuna sahip olduğunu ve parçalı rotor yapılı ARM'ye göre tork-ağırlık oranının %27 iyileştiğini göstermiştir (Vandana et al., 2008).

Tekerlek içine uygulamalı, elektrikli araçlar için tasarlanmış eksenel akıllı parçalı rotor yapılı yeni ARM benzetim sonuçlarıyla sunulmuştur (Madhavan and Fernandes, 2010).

E ve L şekilli stator boyunduruğu kullanan bir çalışmada bazı stator kutupları iki faz arasında paylaşılmaktadır. Akı yolu kısaltılarak ve demir bakır ağırlığı düşürülerek tork yoğunluğu ve motor verimliliği artırılmıştır (Lee and Krishnan, 2009).

Peng ve arkadaşları rulmansız çift statorlu yeni bir 12/8 kutuplu ARM tasarlamış ve imal etmişlerdir. Makinede dış ve iç statorlar arasına yerleştirilmiş dişli rotor vardır. Dış stator tork üretimi için uyarılır ve iç stator, rotoru askıda tutmak için kontrollü radyal kuvvet üretir (Peng et al., 2012).

Tork yoğunluğu artırılmış yeni bir çift statorlu ARM önerilmiş ve prototipi gerçekleştirilmiştir. Bu tasarım, 8/6 kutuplu dış ve iç stator çifti arasında kalan rotor parçalarından ibarettir. Üzerinde sargıları olan iki stator birleştirilmiş ve birlikte uyarma sağlanmıştır. Çift statorlu ARM tasarımı sarım alanını dolayısıyla uyartımı artırması sebebiyle yüksek tork sağlamaktadır (Abbasian et al., 2010a, 2010b).

Elektrikli araçlar için tekerlek içine monteli π şekilli parçalı stator yapısıyla çekirdek kayıplarını minimize eden kalıcı mıknatıslı yeni bir ARM tasarımı yapılmıştır (Kim et al., 2012). Benzetim sonuçları, ortalama torkun %23 arttığını ve tork dalgalılığının %41 azaldığını göstermektedir.

Aynı yazar grubu benzer konseptle çift rotorlu π^2 çekirdekli ARM olarak adlandırılan sırt sırta verilmiş π şekilli parçalı statorları bulunan yüksek torklu ve düşük tork dalgalılığına sahip motoru sunmuştur.

Hibrit elektrikli araçlar için çift rotorlu tek statorlu yeni ARM'ler tasarlanmıştır (Cui et al., 2008; Aravind et al., 2011; Yang et al., 2016).

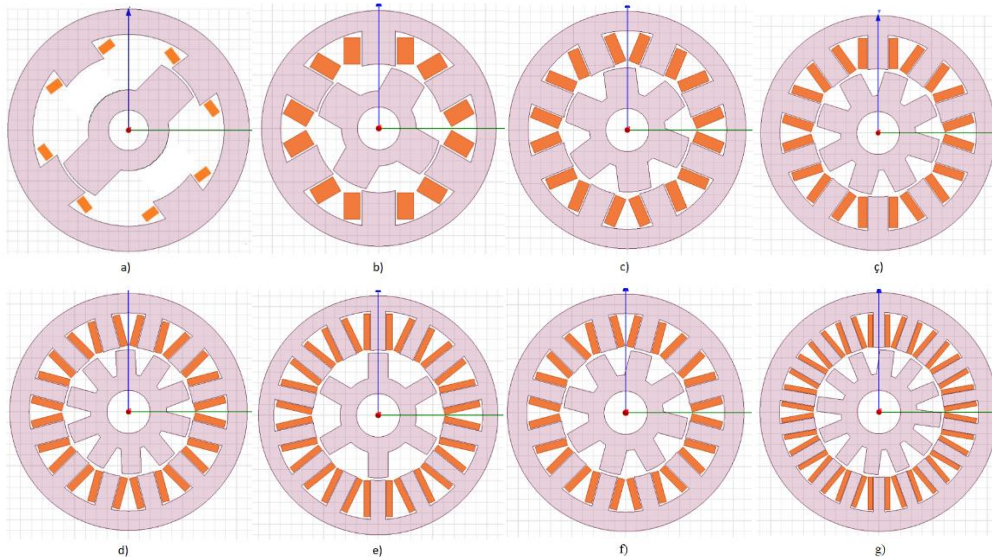
Klasik ARM'ler ile karşılaştırıldığında %10 daha fazla tork üretimi gerçekleştiren disk tipi ARM tasarlanmıştır (Daldaban and Ustkoyuncu, 2007).

Rotor kutup sayısı stator kutup sayısından daha fazla olan çeşitli ARM tasarımları yapılmıştır (Desai et al., 2010; Bilgin et al., 2012; Widmer and Mecrow, 2013; Eskari and Mirsalim, 2013). Simülasyon sonuçları; klasik ARM ile karşılaştırıldığında yeni motorun birim hacim başına daha fazla tork ürettiğini ve benzer tork dalgalılığına sahip olduğunu göstermiştir.

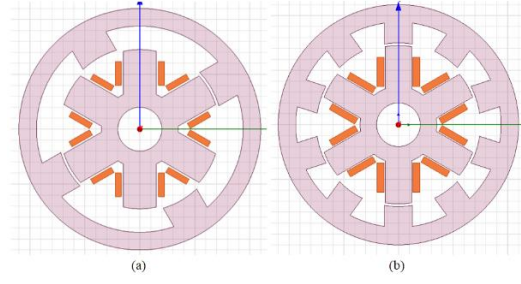
Tork üretimi klasik ARM'lere kıyasla bir miktar daha iyi olan, kısa akı yollu, 2 fazlı 4/3 kutuplu (Ahn, 2013), 2 fazlı 4/5 kutuplu (Ahn, 2012) ve 3 fazlı 6/5 kutuplu (Tanujava et al., 2012) ARM tasarımları yapılmıştır.

Kontrol stratejileri kullanılarak tork dalgalanmasını azaltmak için çeşitli yaklaşımlardan literatürdeki tork paylaşım fonksiyonları (TSF) ve optimize edilmiş akım dalga şekilleri (Arumugam et al., 1988; Husain and Ehsani, 1996), doğrudan ani tork kontrol (DITC) (Fuengwarodsakul et al., 2004; Gallegos-Lopez et al., 1999), doğrudan ortalama tork kontrol (DATC) (Inderka et al., 2003), bulanık mantık kontrol metotları (Aumugam et al., 1988; Sahin et al., 1996; Rizk et al., 2003), uyarlamalı tork kontrol metotları (Bovie, 1993; Faiz and Fich, 1993) gibi çalışmalar verilebilir.

Anahtarlamalı Relüktans Motorları stator ve rotor kutup sayılarına göre adlandırılır. Örneğin, 6/4 kutuplu ARM 6 stator ve 4 rotor kutuplarından oluşur. Stator ve rotor sayılarının ARM'nin başlama ve yön kabiliyeti, tork yoğunluğu, tork dalgalanması ve akustik gürültü gibi çalışma ve performans parametreleri üzerinde büyük etkisi vardır (Miller, 1993). ARM'de başlangıç çalışmasından emin olmak için en az iki faz ve başlangıç dönüş yönünü sağlamak için en az üç faz gereklidir. Başlangıç çalışmasını sağlamak için rotor kutup sayısı ile stator kutup sayısı da farklı seçilmelidir. Şekil 2.3'de faz sayılarına göre iç rotorlu ARM ve Şekil 2.4'te ise faz sayılarına göre dış rotorlu ARM örnekleri verilmiştir.



Şekil 2.3 Faz Sayılarına Göre Anahtarlamalı Relüktans Motor Yapıları a) 2 fazlı 4/2 kutuplu ARM b) 3 fazlı 6/4 kutuplu ARM c) 4 fazlı 8/6 kutuplu ARM d) 5 fazlı 10/8 kutuplu ARM e) 6 fazlı 12/10 kutuplu ARM f) 7 fazlı 14/6 kutuplu ARM g) 3 fazlı 18/12 kutuplu ARM



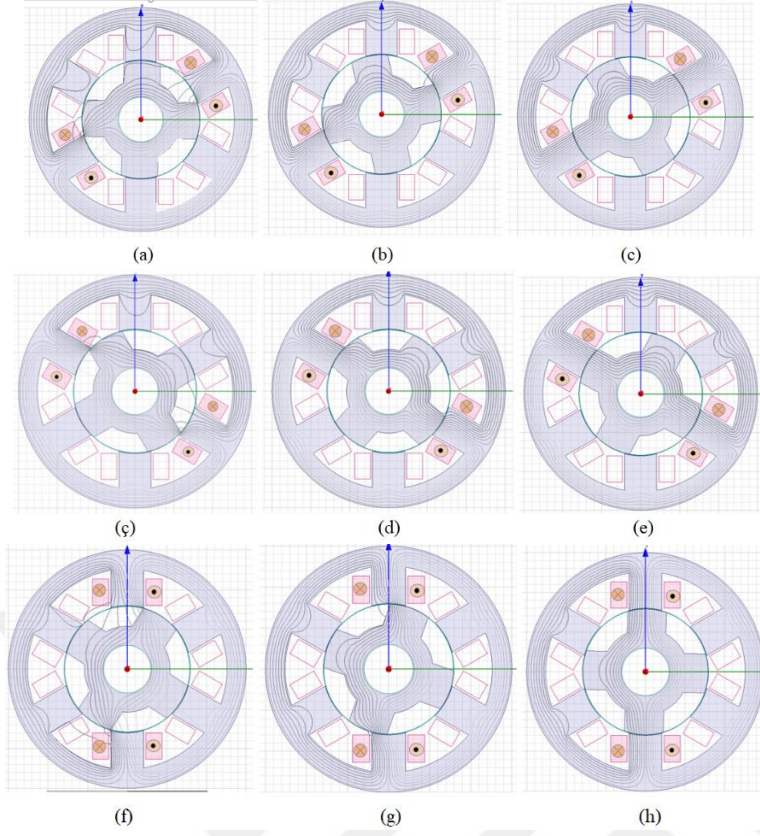
Şekil 2.4 Faz Sayılarına Göre Anatarlamalı Relüktans Motor Yapıları a) 3 fazlı 6/4 kutuplu dış rotorlu ARM b) 4 fazlı 6/8 kutuplu dış rotorlu ARM

2.1 ARM Çalışma Prensibi ve Temel Denklemleri

Bir Anahtarlamalı Relüktans Motorunda faz sargılarından biri enerjilendirildiğinde rotor, relüktansı en az yapmak için enerjilendirilmiş stator ile aynı hizaya gelmeye çalışır ve bir adım açısı dönme hareketi yapar. ARM rotorunun bir tam dönüş yapması için, m faz sayısı, N_r rotor sayısı olmak üzere mN_r defa adım atması gerekir. Mekanik adım açısı;

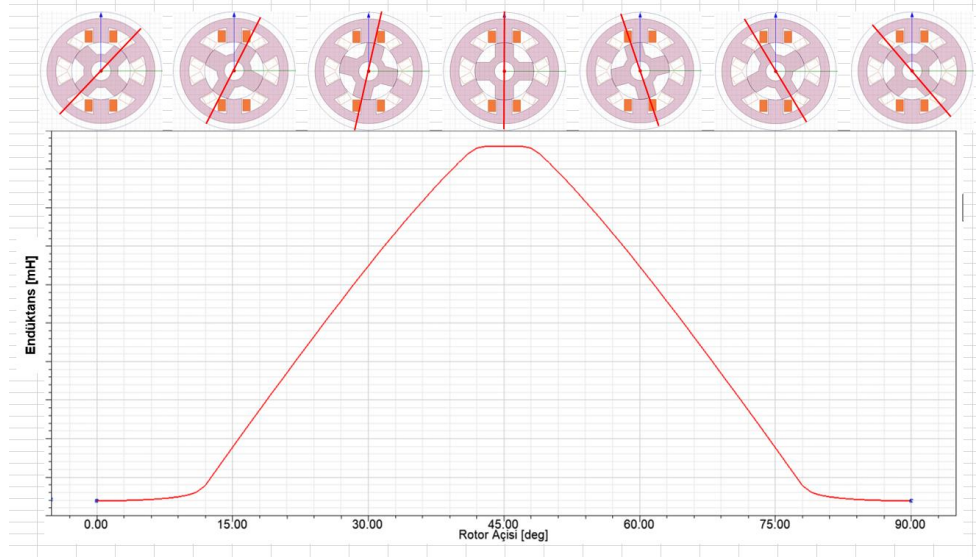
$$\theta = \frac{2\pi}{N_r} \quad (2.1)$$

olarak hesaplanabilir. Şekil 2.5’de verilen 6/4 ARM saat yönünün tersinde döndürülmek istenirse Şekil 2.5.a’daki fazı enerjilendirildiğinde stator ile hizalı konumda olmayan rotor 30°lik adım açısıyla dönme hareketi yapar ve enerjilendirilmiş stator ile aynı hizaya gelir (Şekil 2.5.a-c). Bu durumda veya hemen öncesinde rotor ile hizalı konuma gelmiş statorun faz akımının kesilmiş olması gerekmektedir. Şekil 2.5.ç’de saat yönündeki komşu stator fazı enerjilendirildiğinde rotor bir adım açısı daha dönme hareketi yapar (Şekil 2.5.ç-e). Rotorun saat yönünün tersindeki dönüşünü devam ettirebilmesi için bir sonraki saat yönündeki komşu statora ait fazın enerjilendirilmesi gerekir (Şekil 2.5.f). Böylelikle rotor bir adım açısı daha dönmüş olur (Şekil 2.5.f-h). Dönüşü sürekli kılmak fazları saat yönünde sırasıyla enerjilendirmeye devam ettirmekle mümkün olur. Rotor bu şekilde 12 adım attığında bir tam dönüşünü tamamlamış olur.



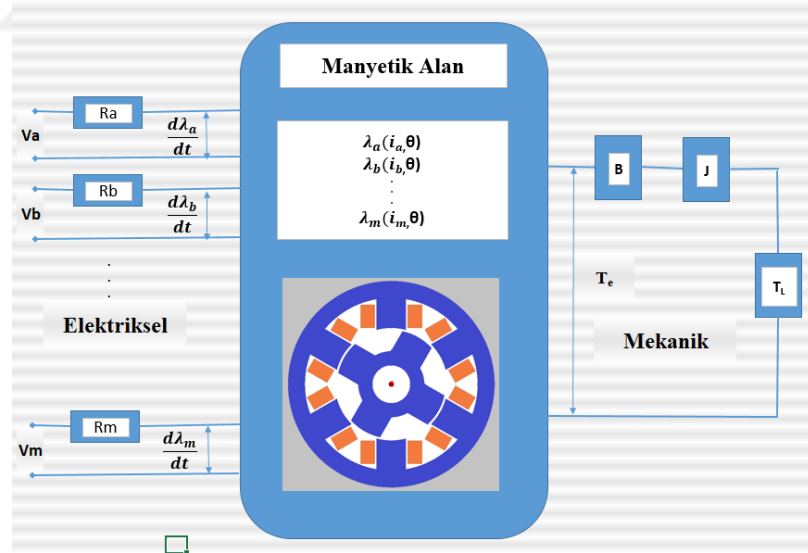
Şekil 2.5 6/4 kutuplu iç rotorlu ARM rotor pozisyonuna göre faz enerjilendirme, oluşan akı çizgileri ve ardışıl rotor hareketi a,ç,f) Hizalı Olmayan Konum b,d,g) Ara Konum c,e,h) Hizalı Konum

Anahtarlamalı Relüktans Motorlarda tork üretimi relüktansın dolayısıyla endüktansın rotor konumuna göre değişimine bağlı olduğundan motorun endüktans profilinin bilinmesi motorun doğru ve verimli bir şekilde sürülmesi için önemlidir. Şekil 2.6, 6/4 iç rotorlu ARM'nin rotor konumuna göre endüktans değişimini göstermektedir. Rotor hizalı olmayan konumunda iken relüktansı en büyük ve endüktansı en küçük değerdedir ve bu konumda tork üretimi olmaz. Rotor ile hizalı olmayan stator fazlarından biri enerjilendirildiğinde, rotor relüktans değerini en aza indirmek için enerjilendirilen stator dişli çifti ile aynı konuma gelmeye çalışır, relüktansı düşerken endüktansı artar. Endüktans eğiminin pozitif olduğu bu bölgede pozitif tork üretilir. Rotor, stator ile aynı konuma geldiğinde genellikle rotor kutup açısı stator kutup açısından büyük seçildiğinden, açı farkı kadar akı yolu değişmediğinden endüktansın değeri sabittir ve en büyük olarak kalmaya devam eder. Fazdan akım geçmesine rağmen endüktans değişimi olmadığından tork üretimi olmaz fakat anahtarlama sağlandığında faz akımının sıfıra düşmesine zaman kazandırarak negatif tork oluşumunu engeller. Rotor hizalı konumdan ayrılmaya başladığında endüktansın eğimi negatif olduğundan negatif tork oluşur.



Şekil 2.6 6/4 kutuplu ARM'nin tek faz endüktans değişimi

Anahtarlama Relüktans Motorların temel çalışma prensibi diğer elektromekanik cihazlarla benzerdir. Şekil 2.7'de birden çok elektrik terminali olan (giriş portu) ve tek mekanik terminali olan (çıkış portu) iki portlu bir cihaz gibi düşünebileceğimiz m fazlı ARM'ye ait elektromekanik enerji dönüşümü gösterilmiştir.



Şekil 2.7 ARM'nin elektromekanik enerji dönüşümü gösterimi

Genellikle fazlar arasındaki ortak endüktanslar ihmal edildiğinden (T. J. E. Miller, 1993), ARM'nin tork ifadesi Şekil 2.8'de verilen basit elektrik devresi üzerinden hesaplanabilir.



Şekil 2.8 ARM'nin tek faz eşdeğer devresi

V terminal gerilimi (volt), i faz akımı (amper), λ halkalanan akım (Volt-saniye), R faz direnci (ohm) ve θ rotor pozisyonu (rad) olmak üzere faz geriliminden yola çıkarak güç ve tork ifadeleri elde edilebilir.

$$V = iR + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (2.1)$$

$$\lambda(\theta, i) = iL(\theta, i) \quad (2.2)$$

$$V = iR + \frac{d[iL(\theta, i)]}{dt} = iR + \frac{di}{dt}L(\theta, i) + i \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2.3)$$

$$P_e = i^2 R + i \frac{di}{dt}L(\theta, i) + i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2.4)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} i^2 L(\theta, i) \right) = i \frac{di}{dt}L(\theta, i) + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2.5)$$

$$P_e = i^2 R + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} i^2 L(\theta, i) \right) + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2.6)$$

$$\frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega \quad (2.7)$$

$$P_m = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega = T \omega \quad (2.8)$$

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (2.9)$$

a, b, c faz indisleri, L endüktans ve M ortak endüktans olmak üzere 3 fazlı ARM için genel tork denklemi aşağıda verilmiştir. Genel tork denkleminde tork, hem öz endüktans hem de ortak endüktansın rotor konumuna göre değişim hızının bir fonksiyonudur.

$$T = \frac{1}{2} \left(\frac{dL_a}{d\theta} i_a^2 + \frac{dL_b}{d\theta} i_b^2 + \frac{dL_c}{d\theta} i_c^2 \right) + \frac{dM_{ab}}{d\theta} i_{ab} + \frac{dM_{bc}}{d\theta} i_{bc} + \frac{dM_{ac}}{d\theta} i_{ac} \quad (2.10)$$

Klasik ARM'lerde ortak endüktans değerleri ihmal edilebilir düzeyde olduğundan genel tork denklemin son 3 terimi kullanılmaz ve tork denklemi faz akımlarının karesi ve öz endüktanslarının rotor konumuna göre değişim hızına bağlı bir fonksiyon halini alır.

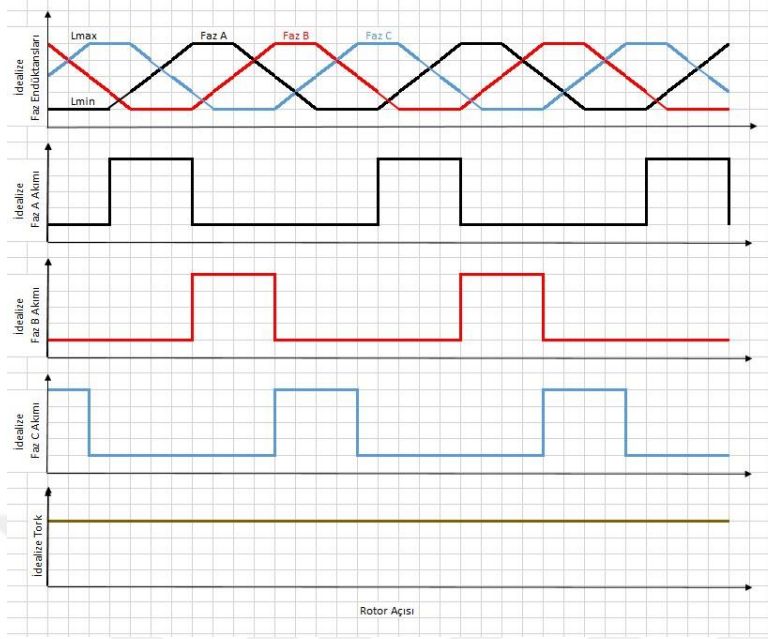
$$T = \frac{1}{2} \left(\frac{dL_a}{d\theta} i_a^2 + \frac{dL_b}{d\theta} i_b^2 + \frac{dL_c}{d\theta} i_c^2 \right) \quad (2.11)$$

Formülden görüldüğü üzere ARM'de tork üretimi hem akımın karesi ile doğru orantılıdır hem de endüktansın rotor konumu ile olan değişimine ($dL/d\theta$) bağlıdır.

Bu sınıf elektrik makinelerin en yüksek performansı ve dolayısıyla relüktans tork kapasitesi; motor endüktansını çakışık durumda en üst seviyeye çıkarmak ve çakışık olmayan durumda ise en aza indirmek suretiyle mümkün olduğu kadar büyük $dL / d\theta$ oranı (L endüktans ve θ dönme açısı) üretmek ile sınırlıdır (Widmer and Mecrow, 2011).

Motor, ataletsel, sürtünme ve istenen yük torkunu üretebilmelidir. Elektromanyetik tork, J makine ve sistemin ataletsel torku, B sürtünme katsayısı ve T_L yük torku olmak üzere aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$T_e = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + T_L = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (2.12)$$

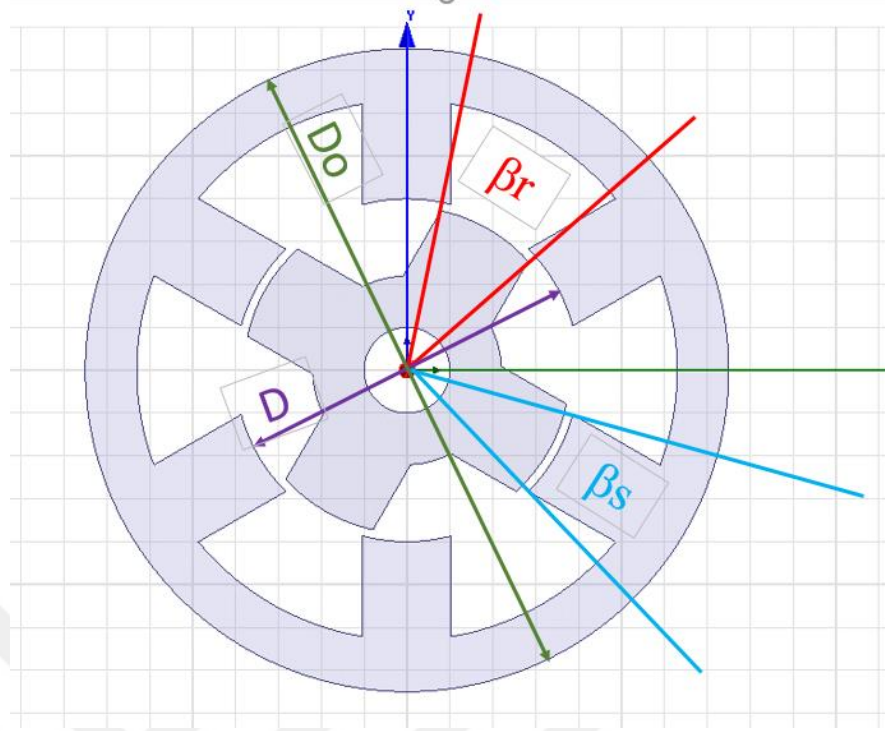


Şekil 2.9 6/4 kutuplu ARM için idealize sürekli tork üretimi

Şekil 2.9’da sabit faz akımında stator-rotor konumlarına göre oluşan faz endüktansı ve tork değişimi gösterilmiştir. Fazlara endüktans eğrisinin eğiminin pozitif olduğu bölgede akım uygulanmıştır. Motor torku her fazın oluşturduğu torkların toplamıdır. İdealize tork eğrisinde tork dalgalanması bulunmamaktadır.

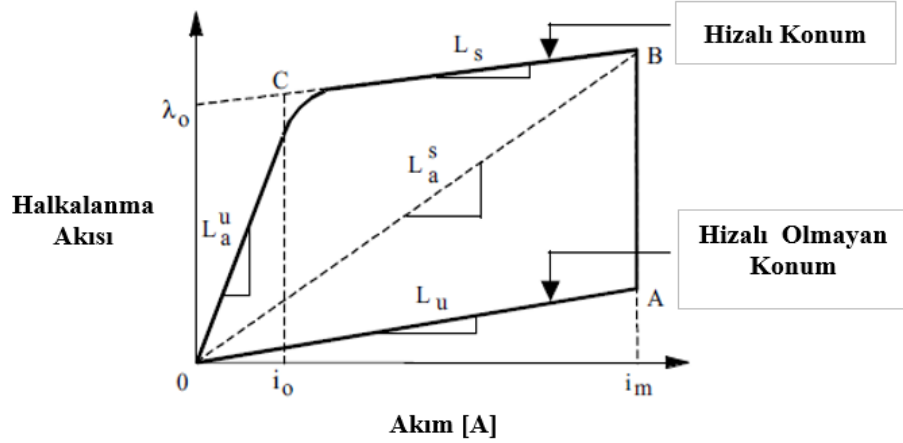
2.2 ARM Çıkış Eşitliğinin Elde Edilmesi

Klasik bir 3 fazlı 6/4 kutuplu ARM’nin temel boyutları Şekil 2.10’da verilmiştir. D_o stator dış çapını, D stator iç çapını, β_s stator kutup açısını ve β_r rotor kutup açısını göstermektedir.



Şekil 2.10 6/4 kutuplu ARM temel boyutları

Şekil 2.11’de rotor ve statorun çakışık (hızlı) olmayan ve tam çakışık durumlarında halkalanma akısı-akım karakteristiği verilmiştir. Stator kutup merkezi komşu iki rotor kutbunun tam ortasında kaldığında stator ve rotor kutuplarının çakışık olmayan pozisyonu oluşur.



Şekil 2.11 ARM için Halkanma akısı-Faz akımı grafiği (Krishnan, 2001)

Şekil 2.11’de OABCO arasında kalan kapalı alan motorun bir adımda vereceği mekanik enerjidir. Faz direncinden kaynaklı gerilim düşümü ihmal edilirse

uygulanan gerilim halkalanan akı değişim hızına eşit olur. Krishnan'a (2001) göre tork ifadesi 2.13-2.32 denklemleri ile ifade edilmektedir.

V uygulanan faz gerilimi, R faz direnci, i faz akımının tepe noktası, L_a^s çakışık durumda doymuş faz endüktansı, L_u çakışık olmayan durumda faz endüktans değeri, t rotorun çakışık olmayan durumdan çakışık duruma gelinceye kadar geçen süresini göstermek üzere;

$$V = iR + \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.13)$$

Faz direnci üzerinde oluşan gerilim düşümü ihmal edilirse;

$$V = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{\Delta\lambda}{\Delta t} = \frac{\lambda_a - \lambda_u}{t} = \frac{(L_a^s - L_u)i}{t} \quad (2.14)$$

β_s radyan cinsinden stator kutup açısı, ω_m rad/s cinsinden rotor hızı olmak üzere;

$$t = \frac{\beta_s}{\omega_m} \quad (2.15)$$

$$V = \frac{(L_a^s - L_u)i}{\frac{\beta_s}{\omega_m}} \quad (2.16)$$

σ_s ve σ_u denklem 2.17 ve denklem 2.18'deki gibi tanımlanırsa, gerilim eşitliği denklem 2.19'daki halini alır. L_a^u çakışık durumda doymamış endüktası göstermektedir.

$$\sigma_s = \frac{L_a^s}{L_a^u} \quad (2.17)$$

$$\sigma_u = \frac{L_a^u}{L_u} \quad (2.18)$$

$$V = \frac{\omega_m}{\beta_s} L_a^s i \left(1 - \frac{1}{\sigma_s \sigma_u}\right) \quad (2.19)$$

$$L_a^s i = \phi T_{ph} = BA_{sp} T_{ph} = BDL\beta_s T_{ph}/2 \quad (2.20)$$

ϕ çakışık durumda akı değerini, A_{sp} stator kutup alanını, B çakışık durumda stator manyetik akı yoğunluğunu, T_{ph} sarım sayısını, P_r rotor kutup sayısını, N_r rotor hızını, m aynı anda iletimde olan faz sayısını, θ_i akım iletim açısını ve q toplam faz sayısını göstermektedir. L stator uzunluğudur.

Elektriksel yüklenme A_s denklem 2.21’de tanımlanmıştır. Denklem 2.22’de verim (k_e) ve denklem 2.23’te tanımlanan görev oranına (k_d) bağlı güç ifadesi verilmiştir. Makine boyutlarına bağlı genel tork ifadesi denklem 2.29’dadır.

$$A_s = \frac{2T_{ph}im}{\pi D} \quad (2.21)$$

$$P_d = k_e k_d V i m \quad (2.22)$$

$$k_d = \frac{\theta_i q P_r}{360} \quad (2.23)$$

$$P_d = k_e k_d \frac{\pi^2}{120} \left(1 - \frac{1}{\sigma_s \sigma_u}\right) B A_s D^2 L N_r \quad (2.24)$$

$$P_d = k_e k_d k_1 k_2 B A_s D^2 L N_r \quad (2.25)$$

$$k_1 = \frac{\pi^2}{120} \quad (2.26)$$

$$k_2 = 1 - \frac{1}{\sigma_s \sigma_u} \quad (2.27)$$

$$T = \frac{P_d}{\omega_m} = \frac{k_e k_d k_1 k_2 B A_s D^2 L N_r}{\frac{2\pi N_r}{60}} \quad (2.28)$$

$$T = k_e k_d k_3 k_2 B A_s D^2 L \quad (2.29)$$

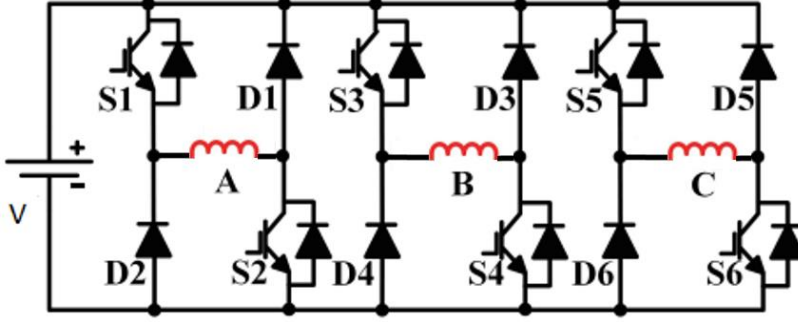
$$k_3 = \frac{\pi}{4} \quad (2.30)$$

$$0,65 < k_2 < 0,75 \quad (2.31)$$

$$25000 < A_s < 90000 \quad (2.32)$$

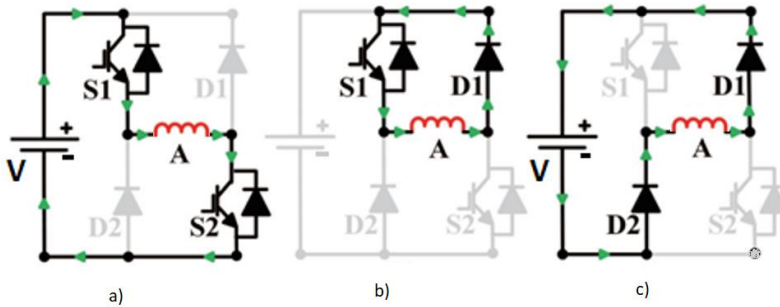
2.3 ARM Sürücü Devresi

Anahtarlama Relüktans Motorlarda tork üretimi faz akım yönünden bağımsız olduğu için sürücü devre olarak genellikle Şekil 2.12’de 3 fazlı ARM için verilen asimetrik köprü dönüştürücü devresi kullanılır.

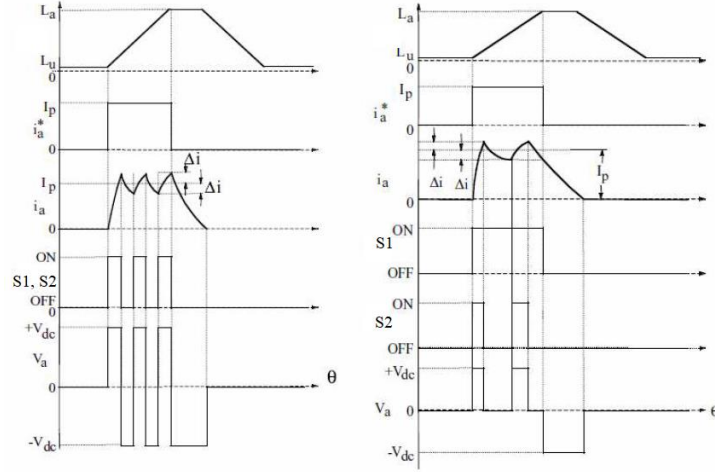


Şekil 2.12 3 fazlı ARM asimetrik köprü dönüştürücü devresi

Asimetrik köprü dönüştürücü devresi ARM’nin faz akımlarını istenilen seviyede tutmak için kullanılır. ARM’nin bir fazına ait iletim, serbest dolaşım ve kesim modları Şekil 2.13’te verilmiştir. S1 ve S2 anahtarları iletime geçirildiğinde kaynak gerilimi (+V), faz sargısına uygulanmış olur ve akım yükselmeye başlar (Şekil 2.13.a). Akım istenen seviyeye geldiğinde ($I_p + \Delta i$) anahtarlardan her ikisi birden kesilirse faz sargısına negatif gerilim ($-V$) uygulanmış olur (Şekil 2.13.c) ve akım düşmeye başlar. Anahtarlardan her ikisi yerine sadece biri kesime sokulursa faz sargısına gerilim uygulanmamış olur ($V=0$) ve faz akımı iletimde olan anahtar ile diyot arasında serbest dolaşım yapar (Şekil 2.13.b). Buna yumuşak anahtarlama denir. Akım istenen alt seviyeye düştüğünde ($I_p - \Delta i$) anahtarlar tekrar iletime geçirilir ve akım yeniden artmaya başlar. Bu döngü ile Şekil 2.14’te gösterildiği gibi akım istenilen bir bant içerisinde ($2\Delta i$) kontrol edilebilir.



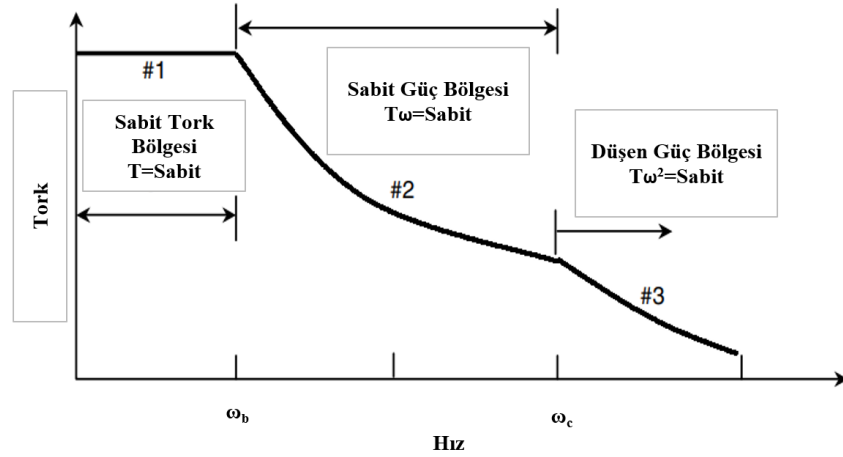
Şekil 2.13 ARM tek faz sürüm modları a) İletim anı b) Serbest dolaşım anı c) Kesim anı



Şekil 2.14 Sert ve yumuşak anahtarlama ile ARM histeresiz kontrolü (Krishnan, 2001)

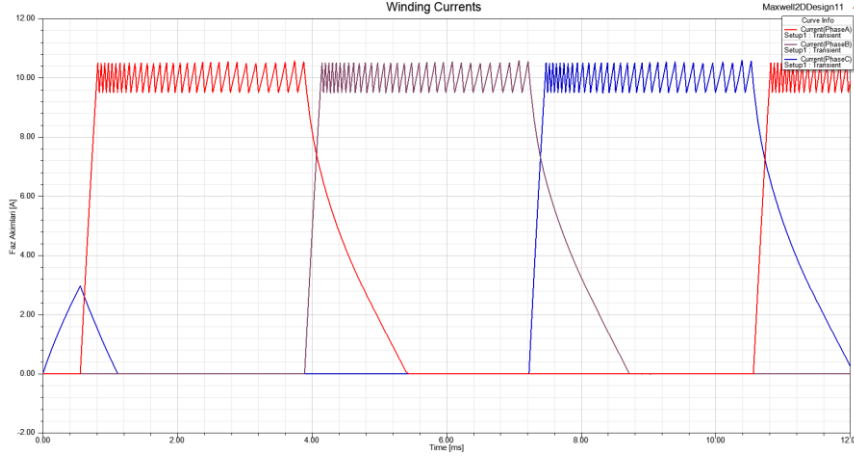
2.4 ARM Tork-Hız Karakteristiği

ARM'de tork-hız karakteristiği Şekil 2.15'den görüldüğü üzere üç bölgede incelenir. Temel hız ω_b , sabit tetikleme açıları ile nominal gerilim ve akımda motora maksimum akım uygulandığında oluşan en yüksek hızdır. ω_b maksimum torkun alınabildiği son hızdır. Sabit tork bölgesi; temel hız ω_b 'nin solunda kalan bölgedir.



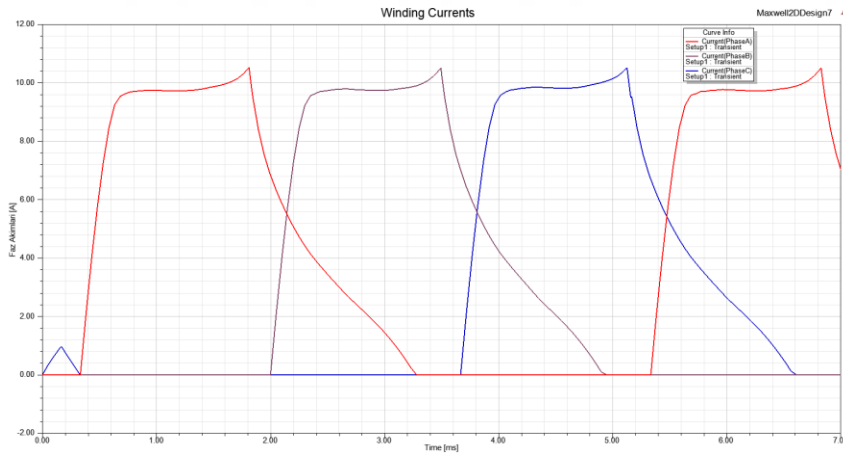
Şekil 2.15 ARM Tork Hız grafiği

Sabit Tork Bölgesi; düşük hızlı çalışma bölgesinde ters elektromotor kuvveti (EMK) küçük olduğu için motor fazına akım uygulandığında çok kısa bir sürede faz akımı yükselir. Akım, Şekil 2.16'da gösterildiği gibi istenen bir band genişliği içinde kontrol edilebilmektedir.



Şekil 2.16 Histeresiz akım kontrolü

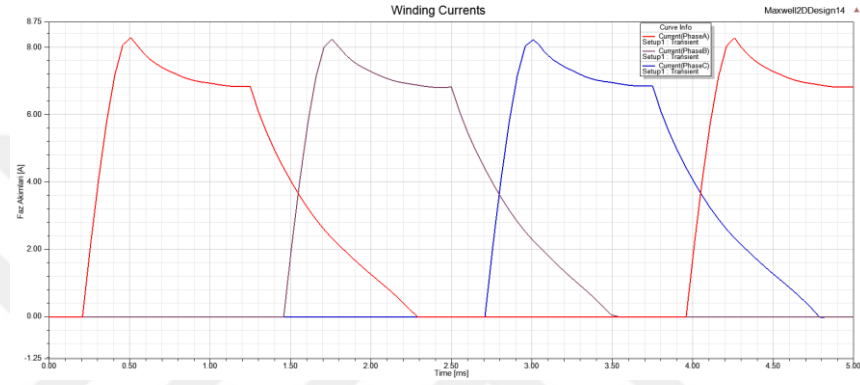
Motor hızlandıkça ters EMK gerilimi hızlı bir şekilde doğru akım (DA) bara gerilim seviyesine yükselmektedir. Akımın daha düşük bir ters elektromotor kuvvetine karşı istenen seviyeye yükselebilmesi için faz akımı, iletim açısıyla hıza bağlı değişken olarak kontrol edilmelidir. Maksimum torku elde etmek için maksimum akım değeri, kontrol teknikleri ile motora uygulanmalıdır. Negatif tork oluşmaması için rotor, statorla hizalanmış konuma gelmeden önce faz akımı kesilmelidir. Hız yükseldikçe Şekil 2.17’de verilen tek darbeli akım kontrolü uygulanır. Buradaki hızda akım istenen seviyededir.



Şekil 2.17 ARM tek darbeli akım kontrolü

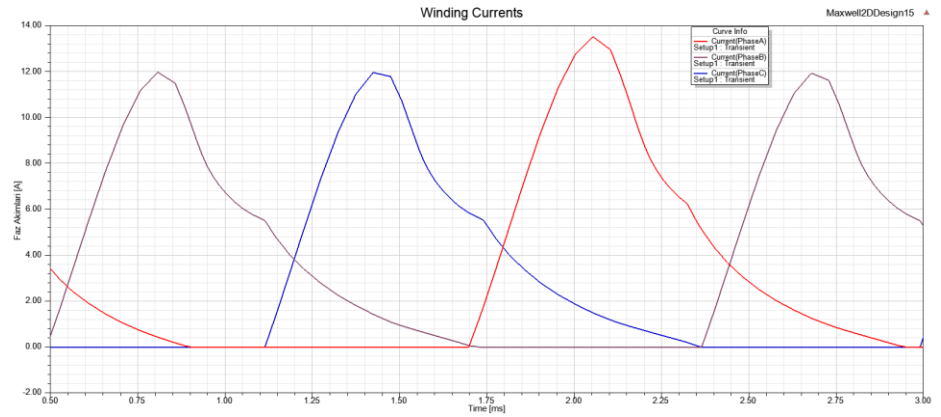
Sabit Güç Bölgesi; temel hızın üstüne çıkılan yüksek hızlı çalışmada ters EMK gerilimi DA bara gerilimini geçmektedir. Rotor, statorla hizalanmaya başladığında akım düşmeye başladığından akım istenen seviyeye gelemez dolayısıyla akım kontrolü uygulanamaz duruma gelir (Şekil 2.18). Sabit gerilim ve sabit iletim açısı ARM’nin doğal karakteristiği gereği hızla ters orantılı olarak değiştiğinden hız arttıkça faz akımı ve uygulama süresi azalmaktadır. Bu sebeple

üretileen tork, akımın karesi ile doğru, hız ile ters orantılıdır. Faz akımı uygulama süresini arttırmak, fazdaki aktif akımı artırabilmektedir. Tork üretimi tek darbeli çalışma modu ile iletim açısı ayarlanarak bu bölgede yeterince yüksek bir seviyede tutulmaktadır. Kontrolör, torku hız ile ters orantılı olarak korur bu sebeple bu bölge sabit güç bölgesi olarak isimlendirilir. Sabit güç bölgesinin geniş olması sebebiyle çok yüksek hızlarda çalışmak mümkündür. ω_c maksimum gücün alınabildiği son hızdır. Akım kontrolünün histeresizden tek darbeli akım kontrolüne geçtiği hız geçiş hızı olarak adlandırılır. Bu geçiş hızında artan endüktans bölgesinin başlangıcında ters EMK gerilimi DA bara gerilimine eşittir.



Şekil 2.18 ARM tek darbeli akım kontrolü

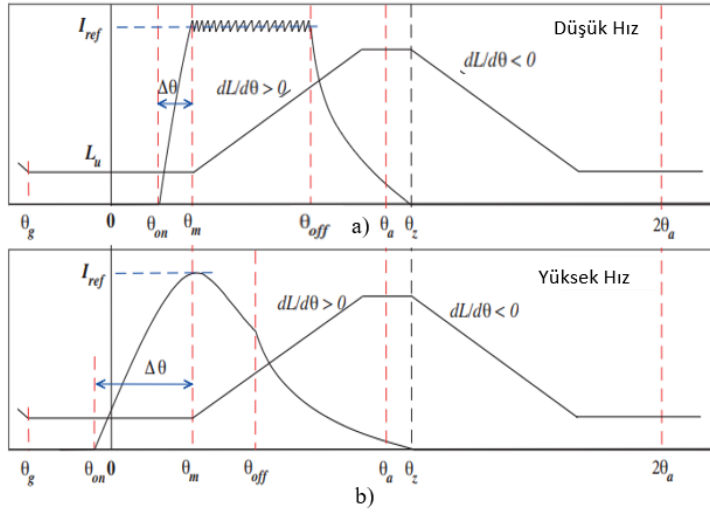
Düşen Güç Bölgesi; faz akımının sürekli hale gelmemesi için iletim açısının artırılabilirdiği son sınırdır (Şekil 2.19). Bu bölgedeki tork doğal özelliklerle yönetilmektedir. Tork hızın karesi ile ters orantılı olarak değişmektedir.



Şekil 2.19 ARM tek darbeli akım kontrolü

ARM kontrolünde tork hız karakteristiğinin bilinmesi ve faz akımları açma kapama açılarının belirlenmesi makine verimi için gereklidir.

Faz akımı açma açısı (Şekil 2.20’de θ_{on}), faz endüktansının artmaya başlayacağı (Şekil 2.20’de θ_m) yani makinenin pozitif tork oluşturmaya başlayacağı anda faz akımının istenen değere (Şekil 2.20’de I_{ref}) ulaşmasını sağlamalıdır (Sozer et al., 2003; Shun-Chung and Wen-Han, 2004). Aynı şekilde faz akımı kapama açısı (Şekil 2.20’de θ_{off}), faz endüktans eğiminin negatif olmasından önce (Şekil 2.20’de θ_z) yani makinenin negatif veya frenleme torku oluşturmaya başlamasından önce faz akımının sıfıra ulaşmasını sağlamalıdır. Faz akımının faz endüktans eğiminin pozitif olduğu bir bölgede istenen değere ulaşması veya faz akımının sıfıra yukarıda belirtilen durumdan daha önce ulaşması ortalama torkun düşmesine ve tork dalgalanmasının artmasına neden olur.



Şekil 2.20 İdealize endüktans ve en uygun akım dalga şekli a) Düşük Hız b) Yüksek Hız (Hamouda and Szamel, 2018)

3. UZUN ADIM SARIMLI PARÇALI ROTOR YAPILI ÇSARM ELEKTROMANYETİK TASARIMI

Bu tez çalışmasında Parçalı Rotor Yapılı ARM için analitik modelleme çalışması yapılmamıştır. ARM analitik modellemesi için Krishnan (2001), makine boyutlarını da içeren Radun'un (1999, 2000) çalışmaları incelenebilir. Literatürde ortak endüktanslı ARM analitik modellemesi (Uddin and Sozer, 2017), parçalı rotor yapılı doğrusal ARM analitik modellemesi (Golzarzadeh, M. and Ganji, B., 2019; Li et al., 2023) ve kısa adım sarımlı parçalı rotor yapılı ARM analitik modellemesi (Sun et al., 2020) çalışmaları yapılmıştır.

ARM'lerin performansı ve etkili kontrolü için akım ve rotor konumunun doğrusal olmayan fonksiyonları olan halkalanma akısı ve tork bilgisi gerekir. Doğrusal olmayan özelliklerinden dolayı, ARM'leri optimize etmek için sonlu elemanlar analizi gibi sayısal modelleme tekniklerine gereksinim vardır. Bu tez çalışmasında gelişmiş yazılım platformu sayesinde ÇSARM yapıları karakterize ve optimize edilmeye çalışılmıştır.

Halkalanma akısının hesaplanması aşağıda verilmiştir (Bilgin et al., 2019).

$$v = Ri + \omega \frac{d\lambda}{d\theta} \quad (3.1)$$

$$\frac{d\lambda}{d\theta} = \frac{1}{\omega} (v - Ri) \quad (3.2)$$

$$d\lambda = \frac{1}{\omega} (v - Ri) d\theta \quad (3.4)$$

$$\lambda = \lambda_0 + \int \frac{1}{\omega} (v - Ri) d\theta \quad (3.5)$$

$$\lambda(\theta_2) = \lambda(\theta_1) + \frac{1}{\omega} (v(\theta_2) - Ri)(\theta_2 - \theta_1) \quad (3.6)$$

$$\lambda(\theta_3) = \lambda(\theta_2) + \frac{1}{\omega} (v(\theta_3) - Ri)(\theta_3 - \theta_2) \quad (3.7)$$

$$\lambda(\theta_3) = \lambda(\theta_1) + \frac{1}{\omega} (v(\theta_2) - Ri)(\theta_2 - \theta_1) + \frac{1}{\omega} (v(\theta_3) - Ri)(\theta_3 - \theta_2) \quad (3.8)$$

$$\lambda(\theta_4) = \lambda(\theta_3) + \frac{1}{\omega}(v(\theta_4) - Ri)(\theta_4 - \theta_3) \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} \lambda(\theta_4) = \lambda(\theta_1) + \frac{1}{\omega}(v(\theta_2) - Ri)(\theta_2 - \theta_1) + \frac{1}{\omega}(v(\theta_3) - Ri)(\theta_3 - \theta_2) \\ + \frac{1}{\omega}(v(\theta_4) - Ri)(\theta_4 - \theta_3) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Böylelikle halkalanma akısı vektörü,

$$[\lambda]_{k-1 \times 1} = \lambda(\theta_{k-1}) + \sum_{k=2}^j \frac{1}{\omega}(v(\theta_k) - Ri)(\theta_k - \theta_{k-1}) \quad (3.11)$$

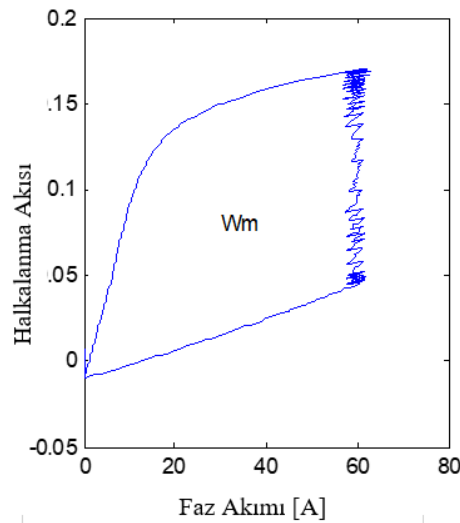
olarak hesaplanır. Burada başlangıç halkalanma akısının bilinmesi gerekmektedir. Hizalı olmayan konumda analitik olarak veya SEY programıyla bulunabilir.

Elektromanyetik tork, koenerjinin rotor pozisyonu ile değişim hızından bulunur. Halkalanma akısı [Wb], koenerjinin akım ile değişim hızıdır.

$$\lambda = \left. \frac{\partial W_c}{\partial i} \right|_{\theta=sbt} \quad (3.12)$$

$$T_e = \left. \frac{\partial W_c}{\partial \theta} \right|_{i=sbt} \quad (3.13)$$

ARM'nin tork üretim kapasitesi manyetik malzemenin doymuş bölgede çalışması ile artış gösterir.



Şekil 3.1 Halkalanma akısı-faz akımı değişimi

Faz akımının bir fonksiyonu olarak verilen halkalanma akısı Şekil 3.1’de gösterildiği gibi her bir faz için bir adımda veya iletim aralığında kapalı eğri oluşturur. W_m ile gösterilen bu kapalı eğri içinde kalan alan elektrik enerjisinden mekanik enerjiye dönüşen enerjidir (Miller, 2002). Eğer mekanik enerji W_m [J] bilinirse rotor bir turda mN_r (m faz sayısı ve N_r rotor sayısı) defa adım attığından toplam enerji dönüşümü;

$$W_t = mN_r W_m \text{ [J]} \quad (3.14)$$

olur. Rotor bir turu $\frac{2\pi}{\omega_m}$ sn.de aldığından ortalama güç ifadesi;

$$P_{ort} = \frac{W_t}{t} = \frac{mN_r W_m}{\frac{2\pi}{\omega_m}} = \frac{mN_r W_m}{2\pi} \omega_m \text{ [watt]} \quad (3.15)$$

olur. Burada ω_m rad. cinsinden rotor hızıdır. Ortalama elektromanyetik tork;

$$T_{eort} = \frac{mN_r W_m}{2\pi} \text{ [Nm]} \quad (3.16)$$

ifadesiyle elde edilir.

Çift Statorlu Parçalı Rotor Yapılı ARM, iç ve dış statorlar arasına yerleştirilmiş alüminyum blok içine gömülen birbirine göre kaydırılmış rotor parçalarından oluşmaktadır. Ayrıca stator ve rotorların birbirine göre kaydırılmış veya kaydırılmamış durumlarına göre üçer veya altışar fazlı ÇSARM yapılandırmaları ortalama tork ve tork dalgalanması bakımından karşılaştırılabilir. Rotor parçalarını sabitlemek için prototip üretiminin daha kolay olacağı düşünülerek örneğin polieter eterketon (PEEK) malzeme yerine motor verimini etkileyecek Eddy akımı kayıpları pahasına alüminyum blok kullanılmıştır. Düşük tork dalgalanması elde etmek için iç ve dış rotorlu ARM’lerin 3’er fazlı 12/8 kutuplu olması düşünülmüş dolayısıyla ÇSARM 6 fazlı olarak tasarlanmıştır.

Alçak gerilim 48 VDC ile beslenecek 12/8 kutuplu iç ve dış rotorlu ARM’lerden oluşan Çift Statorlu Parçalı Rotor Yapılı ARM’ye ait temel boyutlar ve optimizasyon için tarama yapılacak sınırlar Tablo 3.1’de verilmiştir. Temel hız 500 devir/dakika (d/d) olarak seçilmiştir. Akım sabit kalmak koşulu ile dönüştürücü gerilimi artırılırsa temel hız artırılabilir.

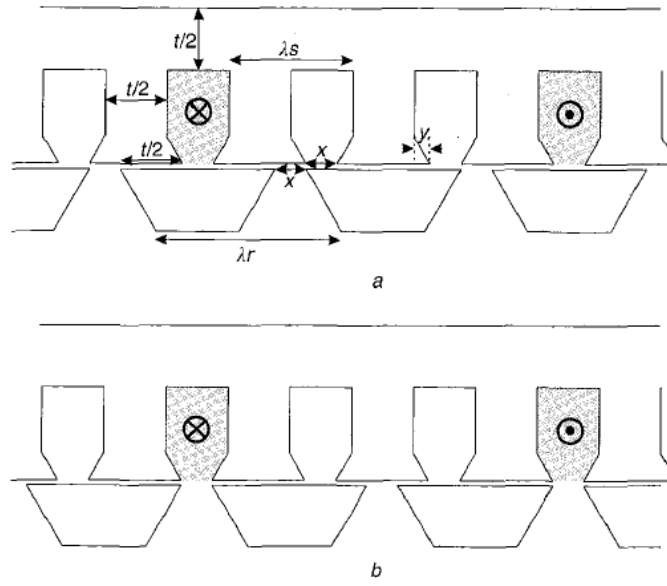
Tablo 3.1 ÇSARM Temel Boyutları ve Boyutsal Tarama Sınırları

Sembol	Tanım	Aralık
Ds	Stator dış çapı [mm]	210
L	Stator ve rotor uzunluğu [mm]	100
Dg	Hava aralığı çapı [mm]	144-170
g	Hava aralığı [mm]	0,3
bsy	Stator boyunduruk kalınlığı [mm]	6-12
hs	Stator kutup yüksekliği [mm]	$Ds/2-Dg/2-g/2-bsy$
hsp	Trapezoid yüksekliği [mm]	3-6
ws	Stator kutup genişliği [mm]	$k_p \cdot bsy$
hr	Rotor parçası yüksekliği [mm]	bsy
hk	Rotor parçası kuyruk yüksekliği [mm]	3-4
β_{sp}	Stator kutup başı açısı [deg.]	15-28
β_{rp}	Rotor parçası kutup açısı [deg.]	30-43
GG	İç ve dış rotor parçaları tabanları arası mesafe [mm]	(-5)-(-5)
wso	Stator kutup genişliği [mm]	$k_{po} \cdot bsyo$
bsyo	Stator boyunduruk kalınlığı [mm]	6-10
Dso	Stator dış çapı [mm]	$Dgo-go/2$
Dgo	Hava aralığı çapı [mm]	$2(Dg/2-(hr+hro+hk+hko+GG+g/2+go/2))$
go	Hava aralığı [mm]	0,3
hso	Stator kutup yüksekliği [mm]	$Dg/2-Dsft/2-bsyo$
hspo	Trapezoid yüksekliği [mm]	3-5
hro	Rotor parçası yüksekliği [mm]	6-12
β_{spo}	Stator kutup başı açısı [deg.]	15-28
β_{rpo}	Rotor kutup açısı [deg.]	30-43
hko	Rotor parçası kuyruk yüksekliği [mm]	3-4
Dsft	Şaft çapı [mm]	30

3.1 Parçalı Rotor Yapılı ARM Temel Prensipleri

Klasik ARM’de dişli yapıdaki rotor yerine manyetik olarak izole edilmiş bir dizi rotor parçaları yerleştirilerek Parçalı Rotor Yapılı ARM oluşturulur.

Biri uzun adım sarımlı diğeri kısa adım sarımlı olmak üzere 3’er fazlı iç ve dış rotorlu ARM’lerden oluşan iki tip Parçalı Rotor Yapılı ÇSARM tasarlanmıştır. Stator kısımlarında tasarım farklılığı olsa da her iki motorun çalışması aynı esasa dayanmaktadır: Rotor parçalarından en az biri veya daha fazlası stator oluğu ile aynı hizaya geldiğinde rotor parçası, oluğu oluşturan komşu iki stator dişlisi ve boyunduruğu ile manyetik kısa akı yolu oluşturur. Hizalı olmayan konumda ise rotor parçası stator oluk açıklığından uzakta konumlandırılmıştır. Mecrow’un (2002) uzun adım sarımlı parçalı rotor yapıları ARM geometrisi Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2 3 fazlı uzun adım sarımlı parçalı rotorlu ARM (Mecrow et al., 2002) a) Hizalı konum b) Hizalı olmayan konum

Şekil 3.2 incelendiğinde stator oluk açıklığının yay uzunluğu, komşu rotor parçaları arasındaki açıklığın yay uzunluğuna eşit olmalıdır; bu, hizalanmamış akı yolu için hava aralığının en fazla olmasını sağlarken aynı zamanda hizalanmış konumda stator dişleri ile rotor parçası arasında en fazla örtüşmeyi sağlar. Eşit düzeyde manyetik doygunluğu sağlamak için stator oluğuyla hizalı durumda bulunan rotor parçası, stator oluğunu oluşturan komşu iki stator dişlisi ve stator

boyunduruğu boyunca akı yolunun eşit genişlikte olması istenir. Bu gereksinimler ile motor geometrik yapısındaki bazı parametreler arasında ilişki kurulabilir.

Uzun adım sarımlı Parçalı Rotor Yapılı ARM için;

bsy stator boyunduruk kalınlığı, ws stator kutup genişliği, hr rotor parçası yüksekliği olmak üzere;

$$ws \geq bsy \quad (3.17)$$

$$ws = k_p bsy \quad (3.18)$$

$1 \leq k_p \leq 1,35$ aralığında bir katsayı olarak alınmıştır.

Kısmen de olsa iki fazın enerjilendirildiği durumlar olduğundan erken doyumu önlemek için stator kutup genişliği boyunduruk kalınlığından daha fazla seçilebilir.

Rotor parçası yüksekliği stator boyunduruk kalınlığına eşit seçilebilir.

$$hr = bsy \quad (3.19)$$

Dg hava aralığı çapı, N_s stator kutup sayısı, N_r rotor kutup sayısı, β_{sp} stator kutup başı açısı, β_{rp} rotor parçası açısı olmak üzere;

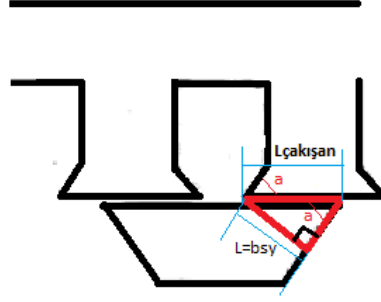
$$\frac{360^\circ}{N_s} - \beta_{sp} = \frac{360^\circ}{N_r} - \beta_{rp} \quad (3.20)$$

$$\frac{360^\circ}{12} - \beta_{sp} = \frac{360^\circ}{8} - \beta_{rp} \quad (3.21)$$

$$30^\circ - \beta_{sp} = 45^\circ - \beta_{rp} \quad (3.22)$$

$$\beta_{rp} = \beta_{sp} + 15^\circ \quad (3.23)$$

olarak alınır. Bu durumda hava aralığı boyunca stator oluk açıklığı ile rotor parçaları arasındaki açıklık eşit olur.



Şekil 3.3 Rotor ve Stator koni açıları

Şekil 3.3'te stator ve rotor koni açıları eşit olduğunda stator ve rotor koni kenarları arasında paralelkenar oluşur ve iki paralel kenar arasındaki en yakın mesafe (L uzunluğu) paralel kenarların birbirini dik kestiği mesafedir. Stator kutup genişliği, stator boyunduruk kalınlığı ve L'nin eşit genişlikte olması koşulundan koni açıları bulunabilir;

$$L = bsy = l_{\text{çakışan}} \sin(a) \quad (3.24)$$

olur.

$$l_{\text{çakışan}} = \frac{1}{2} \left[\beta_{rp} - \left(\frac{360^\circ}{N_s} - \beta_{sp} \right) \right] \frac{\pi}{180^\circ} \frac{D_g}{2} \quad (3.25)$$

Eğer β_{rp} , β_{sp} 'den bağımsız olarak incelenecekse;

$$a = \arcsin \left(\frac{2bsy}{\left(\beta_{rp} + \beta_{sp} - 30^\circ \right) \frac{\pi D_g}{360^\circ}} \right) \quad (3.26)$$

olarak alınır. Aksi halde;

$$l_{\text{çakışan}} = \frac{1}{2} \left[\beta_{sp} + 15^\circ - \left(\frac{360^\circ}{12} - \beta_{sp} \right) \right] \frac{2\pi}{360^\circ} \frac{D_g}{2} \quad (3.27)$$

$$l_{\text{çakışan}} = \frac{1}{2} \left[\beta_{sp} + 15^\circ - (30^\circ - \beta_{sp}) \right] \frac{\pi D_g}{360^\circ} \quad (3.28)$$

$$l_{\text{çakışan}} = (\beta_{sp} - 7,5^\circ) \frac{\pi D_g}{360^\circ} \quad (3.29)$$

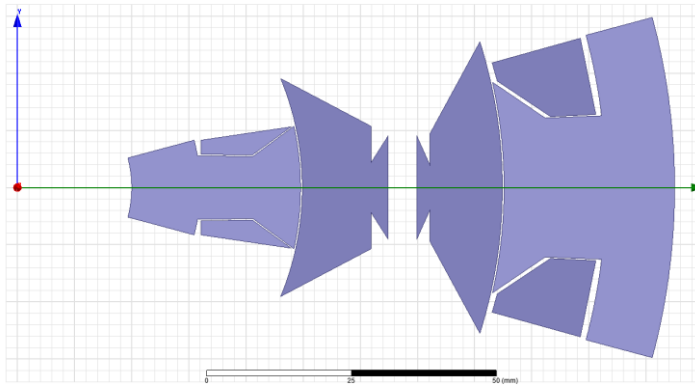
$$a = \arcsin \left(\frac{bsy}{(\beta_{sp} - 7,5^\circ) \frac{\pi D_g}{360^\circ}} \right) \quad (3.30)$$

olarak alınır. Bu durumda sadece bsy , D_g ve β_{sp} bağımsız değişken olarak alınacağından parametrik analiz sayısı ve benzetim süresi oldukça azalacaktır.

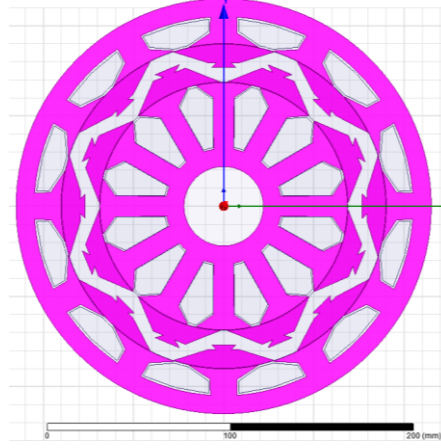
3.2 Uzun Adım Sarımlı Anahtarlama Relüktans Motorun Parametrik Çizimi

İç ve dış parçalı rotor yapılı uzun adım sargılı Anahtarlama Relüktans Motorlarının parametrik temel çizimi Mecrow'un (2002) önerdiği prensipler doğrultusunda yapılmıştır. Böylelikle istenilen kutup sayısında ve boyutlarda sadece iç rotorlu veya sadece dış rotorlu veya her ikisi birlikte Çift Statorlu Parçalı Rotor Yapılı Anahtarlama Relüktans Motorları optimizasyona hazır bir şekilde kolayca oluşturulabilmektedir.

Şekil 3.4'te ÇSARM'nin birer stator ve rotor parçalarının parametrik çizimi verilmiştir, bütün boyutlar parametriktr. Şekil 3.5'te temel parametrik çizimle oluşturulan optimizasyona hazır ÇSARM verilmiştir.

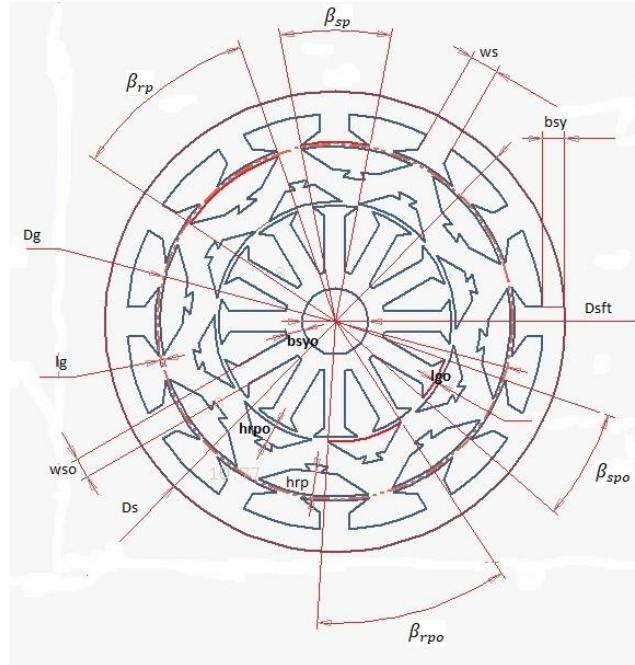


Şekil 3.4 Uzun adım sarımlı ÇSARM parametrik çizimi



Şekil 3.5 Uzun adım sarımlı ÇSARM

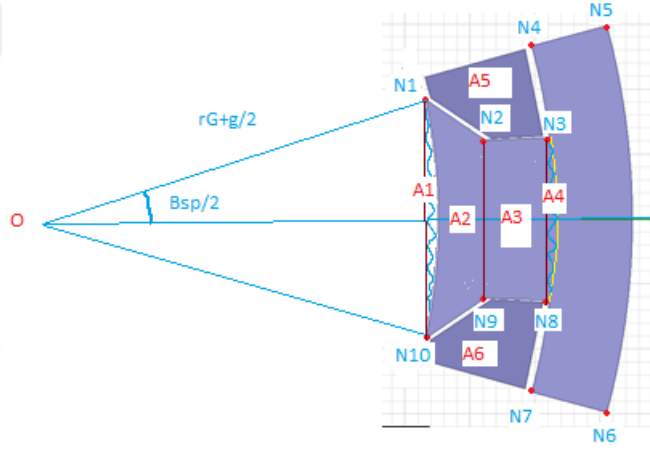
Yukarıda Şekil 3.5'te parametrik temel çizimden faydalanılarak 12 stator kutuplu 8 parçalı rotorlu birer iç ve dış rotorlu Anahtarlama Relüktans Motorlarından oluşan tezin konusu olan Çift Statorlu Parçalı Rotor Yapılı Anahtarlama Relüktans Motoru verilmiştir. Bütün boyutlar parametrik ve sonlu elemanlar yöntemini kullanan analiz programında malzeme seçimi, sarım sayısı ve polariteleri, ağ yapısı, sınır koşulu, çözüm tipi ve sargı enerjilendirme durumları ayarlamaları tamamlandıktan sonra yapılacak elektromanyetik analizi için boyutsal taramalı optimizasyona uygun hale gelir.



Şekil 3.6 ÇSARM temel boyutları

3.3 Stator Oluk Alanı Hesaplama

Stator oluk alanı bakır kayıplarının azaltılması ve motor veriminin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Tasarım esnasında oluk alanı biliniirse akım yoğunluğu hesaplanabilir. Ya da J akım yoğunluğu 4-6 A/mm² alınarak oluk doluluk oranı yaklaşık olarak hesaplanabilir. Örneğin oluk için belirlenen etkin AmperTur değeri 960 ve stator oluk alanı (SOA) da 320 mm² hesaplanmışsa $J=6$ A/mm² için oluk doluluk oranı $ODO = \frac{\frac{NI}{J}}{\frac{NI}{SSA}} 100 = \frac{960}{320} 100 = \%50$ ve $J=4$ A/mm² için ise $ODO = \frac{\frac{NI}{J}}{\frac{NI}{SSA}} 100 = \frac{960}{4} 100 = \%75$ olarak bulunur. %75 doluluk oranını elde etmek çok zor olduğundan tasarımcı boyutları yenilemelidir. Bu çalışmada oluk doluluk oranının % 55 seviyelerinde olması hedeflenmiştir.



Şekil 3.7 Stator oluk alanı hesaplanması

Parametrik çizime ait N1-N10 noktaları aşağıda verilmiştir.

$$N1(x,y)=((rG+g/2)*\cos(BSp/2), (rG+g/2)*\sin(BSp/2))$$

$$N2(x,y)=((rG+g/2+hSp)*\cos(BS/2), (rG+g/2+hSp)*\sin(BS/2))$$

$$N3(x,y)=((rS-bSy)*\cos(BSt/2), (rS-bSy)*\sin(BSt/2))$$

$$N4(x,y)=((rS-bSy)*\cos((BSS-BSt)/2), (rS-bSy)*\sin((BSS-BSt)/2))$$

$$N5(x,y)=(rS*\cos(BSS/2), rS*\sin(BSS/2))$$

$$N6(x,y)=N5(x,-y), N7(x,y)=N4(x,-y), N8(x,y)=N3(x,-y)$$

$$N9(x,y)= N2(x,-y), N10(x,y)= N1(x,-y)$$

$$hSp= N2(x)-N1(x)$$

$$BSS=360/Ns$$

$$BS= 2*\tan(0.5*kp*bSy/(rG+hSp))$$

$$BSt= 2*\tan(0.5*kp*bSy/(rS-bSy))$$

$$hS=rS-bSy-hSp=N3(x)-N2(x)$$

$$hSp=tana*((rR*\sin(BSp/2))-(0.5*kp*bSy))$$

$$tana= \tan(\sin(bsy/Lol))$$

$$Lol= 0.5*((BRp-(360deg/Ns-BSp))*(\pi*2*rR/360deg))$$

Şekilde A1 ile gösterilen alan, ON1N10 daire diliminin alanından ON1N10 ile oluşan üçgenin alanı çıkarılarak bulunabilir.

$$A1 = \pi R^2 \frac{\beta_s}{360} - \frac{1}{2} R^2 \sin(\beta_s) \quad (3.31)$$

$$R=rG+g/2 \quad (3.32)$$

Şekilde A2 ile gösterilen N1N2N9N10 ile oluşan ikizkenar yamuk bölgenin alanı;

$$A2 = \frac{1}{2} ((N1(y) - N10(y)) + (N2(y) - N9(y))) hSp \quad (3.32)$$

Şekilde A3 ile gösterilen N2N3N8N9 ile tasarıma göre ikizkenar yamuk olabileceği de düşünülerek oluşan bölgenin alanı;

$$A3 = \frac{1}{2} ((N3(y) - N8(y)) + (N2(y) - N9(y))) (rS - bSy - hSp - R) \quad (3.33)$$

Şekilde A4 ile gösterilen alan, ON3N8 daire diliminin alanından ON3N8 ile oluşan üçgenin alanı çıkarılarak bulunabilir.

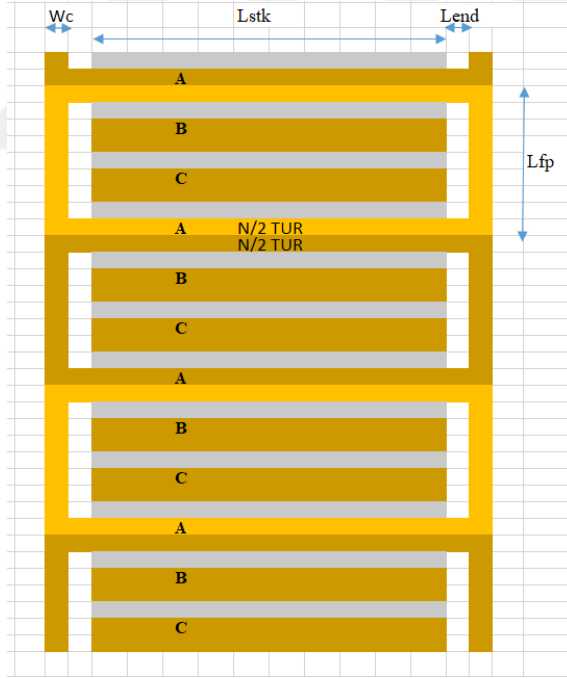
$$A4 = \pi(rs - bSy)^2 \frac{\beta_{St}}{360} - \frac{1}{2}(rs - bSy)^2 \sin(\beta_{St}) \quad (3.34)$$

Stator oluk alanı;

$$SSA = A5 + A6 = \pi \frac{\beta_{SS}}{360} ((rs - bSy)^2 - R^2) + A1 - A2 - A3 - A4 \quad (3.35)$$

N oluk başına tur sayısını, D_c bakır telin çapını göstermek üzere Oluk Doluluk Oranı; $ODO = \frac{N\pi \frac{D_c^2}{4}}{SSA}$ olarak hesaplanır.

3.4 Sargı Direnci Hesaplama



Şekil 3.8 Uzun adım sarım yöntemi (A fazı)

Şekil 3.8’de statorun açılmış hali gösterilmiştir. Kısa adım sarımda iletken tel tek stator dişinin çevresine sarılırken uzun adım sarımda tel 2 stator dişlisini atlayıp 3 stator dişlisi etrafına sarılır. Yukarıda gösterilen ve boyutları verilen uzun adım sarım yönteminden ortalama tel uzunluğu hesaplanabilir.

$$L_{ort}=2L_{stk}+4L_{end}+2L_{fp}+\pi W_c \quad (3.36)$$

L_{stk} , stator laminasyon uzunluğunu, L_{end} sargı sonu boşluğunu, L_{fp} uzun adım sarım boyunu (stator dış çevre uzunluğunun çeyreği), W_c ise sargı kalınlığını (burada iki stator dişlisi arasındaki mesafenin yani oluk genişliğinin yarısı) m cinsinden göstermektedir.

İletken direnci,

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3.37)$$

formülü ile hesaplanır. Burada ρ iletkenin öz direncini (Bakır iletkenin öz direnci 293K yani 20°C’de $\rho=0,0168 \cdot 10^{-6} \Omega m$), l m cinsinden iletkenin uzunluğunu (L_{ort}) ve A ise m^2 cinsinden iletkenin kesit alanını göstermektedir.

Örneğin 10 adet 0.95 mm çaplı bakır kablo kullanıldığı ve ortalama iletken uzunluğunun 28.4 m olduğu varsayıldığında, faz direnci;

$$R_{faz}(20^\circ C) = \frac{0,0168 \cdot 10^{-6} \cdot 28,4}{0,70882 \cdot 10^{-6} \cdot 10} = 0,0673 \Omega$$

olarak bulunur. Bakır kaybı ise,

$$P_{cu} = I^2 R \text{ [watt]} \quad (3.38)$$

formülüyle hesaplanır. Burada I , akımın etkin değerini göstermektedir.

İletken direnci ve sıcaklık arasında yaklaşık doğrusal bir fonksiyon tanımlanmıştır.

$$\rho(T) = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (3.39)$$

Bu denklemde T_0 referans sıcaklık değeri, ρ_0 iletkenin referans sıcaklıktaki öz direnci ve α sıcaklık katsayısını göstermektedir. T sıcaklığında bakır öz direncini (Bakır için sıcaklık katsayısı 0.003862 K^{-1}) aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$\rho(T) = 0,0168 \cdot 10^{-6} [1 + 0,003862 (T - 293)]$$

80°C için ($273+80=353\text{K}$) bakırın öz direnci;

$\rho(80^{\circ}C) = 0,0168 \cdot 10^{-6} [1 + 0,003862(353 - 293)] = 0,0207 \cdot 10^{-6}$ olarak hesaplanır. $60^{\circ}C$ 'de faz direnci de;

$$R_{faz}(80^{\circ}C) = \frac{0,0207 \cdot 10^{-6} \cdot 28,4}{0,70882 \cdot 10^{-6} \cdot 10} = 0,083\Omega \text{ olarak hesaplanır.}$$

$120^{\circ}C$ için ($273+120=393K$) bakırın öz direnci;

$\rho(120^{\circ}C) = 0,0168 \cdot 10^{-6} [1 + 0,003862(393 - 293)] = 0,0233 \cdot 10^{-6}$ olarak hesaplanır. $120^{\circ}C$ 'de faz direnci de;

$$R_{faz}(120^{\circ}C) = \frac{0,0233 \cdot 10^{-6} \cdot 28,4}{0,70882 \cdot 10^{-6} \cdot 10} = 0,093\Omega \text{ olarak hesaplanır.}$$

$120^{\circ}C$ çalışma sıcaklığında bakır kayıpları $80^{\circ}C$ çalışma sıcaklığına göre %12 artmış olacaktır. Dolayısıyla motor verimi için çalışma sıcaklığı önemli bir parametre olmaktadır.

3.5 Boyutsal Tarama ile Parçalı Rotor Yapılı ÇSARM Tasarımı

ÇSARM prototipinin daha kolay üretimi için başlangıç olarak ÇSARM dış çapı 210 mm, stator ve rotor laminasyon uzunlukları 100 mm olarak seçilmiştir. İç ve dış rotorlu ARM'lerin aynı tepe akımında yaklaşık olarak aynı akım yoğunluğuna sahip olmaları için oluk alanlarının birbirine yakın olması gerekmektedir. Bu durumdan yola çıkarak boyutsal tarama esnasında oluk alanları arasında %10'dan fazla fark olanlar göz ardı edilebilir. Dış rotorlu ARM'nin sabitleme milinin içinden faz sargıları ve pozisyon sensörü kablosunun geçirileceği düşünülerek shaft çapı 30 mm olarak sabitlenmiştir. Böylelikle ÇSARM çizim parametresi olan iç rotorlu ARM'ye ait hava aralığı çapı tarama için daha dar bir aralığa indirgenmiş olur.

İç ve dış rotorlu ARM'lerin stator boyunduruk kalınlıkları;

$$bsy=8mm, bsyo=8mm$$

$$bsy=10mm, bsyo=8mm$$

$$bsy= 10mm, bsyo=10mm$$

durumlarında, stator ve rotor kutup başı açıları da;

$\beta_{sp} = 26^\circ$, $\beta_{rp} = 38^\circ$ ve $\beta_{spo} = 26^\circ$, $\beta_{rpo} = 38^\circ$ alınarak iç rotorlu ARM'ye ait hava aralığı çapı 2 mm adımlarla 144 mm - 170 mm arasında taranarak stator oluk alanları hesaplanmıştır. Tablo 3.1 incelendiğinde $bsy=10mm$, $bsyo=8mm$ durumunda hava aralığı çapının 162 mm ve $bsy=10mm$, $bsyo=10mm$ iken hava aralığı çapının 166 mm civarında olduğunda iç ve dış rotorlu ARM'lerin stator oluk boşluklarının birbirine yakın olduğu hesaplanmıştır. 6 A/mm² akım yoğunluğunu aşmaması için başlangıç olarak iç rotorlu ARM hava aralığı çapı 162 mm alınmıştır.

Tablo 3.2 Hava Aralığı Çapının Belirlenmesi

bsy=8mm bsy=8mm			bsy=10mm bsy=8mm			bsy=10mm bsy=10mm		
İç Rotorlu ARM Hava Aralığı Yarı Çapı [mm]	İç Rotorlu ARM Oluk Boşluğu [mm ²]	Dış Rotorlu ARM Oluk Boşluğu [mm ²]	İç Rotorlu ARM Hava Aralığı Yarı Çapı [mm]	İç Rotorlu ARM Oluk Boşluğu [mm ²]	Dış Rotorlu ARM Oluk Boşluğu [mm ²]	İç Rotorlu ARM Hava Aralığı Yarı Çapı [mm]	İç Rotorlu ARM Oluk Boşluğu [mm ²]	Dış Rotorlu ARM Oluk Boşluğu [mm ²]
71	750	205	71	627	176	71	627	109
73	692	236	73	570	206	73	570	131
75	630	269	75	512	236	75	512	156
77	566	304	77	456	269	77	456	182
79	500	340	79	388	304	79	388	210
81	431	380	81	324	341	81	324	241
83	360	420	83	256	380	83	256	274
85	289	464	85	187	420	85	187	308

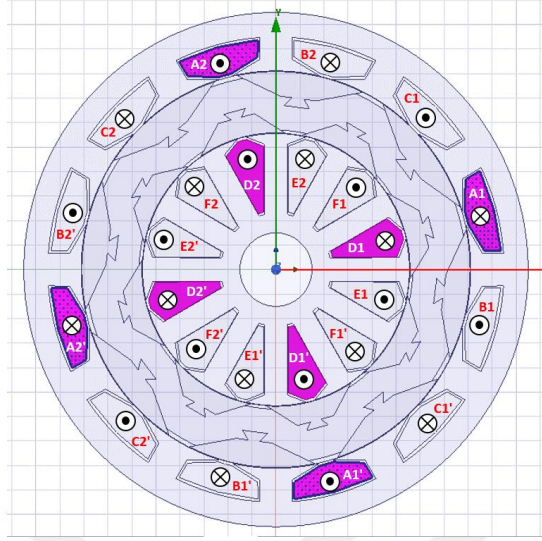
İç rotorlu ARM hava aralığı çapı başlangıç olarak 162 mm alınarak ÇSARM oluşturulmuş, faz sargıları ve polariteleri uzun adım sarım yöntemine göre Şekil 3.9'daki gibi düzenleme yapılmıştır. Burada örneğin A1 ve A1' ile A2 ve A2' bir fazı oluşturan seri bağlı uzun adımlı iki sargıdır.



Faz akımının sayfa düzleminden içeri doğru olduğunu gösterir.



Faz akımının sayfa düzleminden dışı doğru olduğunu gösterir.



Şekil 3.9 ÇSARM faz sargıları ve polariteleri

3.5.1 İç rotorlu ARM stator ve rotor kutup başı açılarının motor performansına etkisi

Motorun relüktans prensibine göre tork üreteceği düşünüldüğünde stator kutup başı $\beta_{sp} < \frac{360^\circ}{N_s} = \frac{360^\circ}{12} = 30^\circ$ 'den küçük seçilmelidir. Sargı telinin oluğa geçebilmesi için iki stator kutup başı arasında boşluk olması göz önünde bulundurulmalıdır. Rotor parçası açısı $\beta_{rp} < \frac{360^\circ}{N_r} = \frac{360^\circ}{8} = 45^\circ$ 'den küçük olmalıdır.

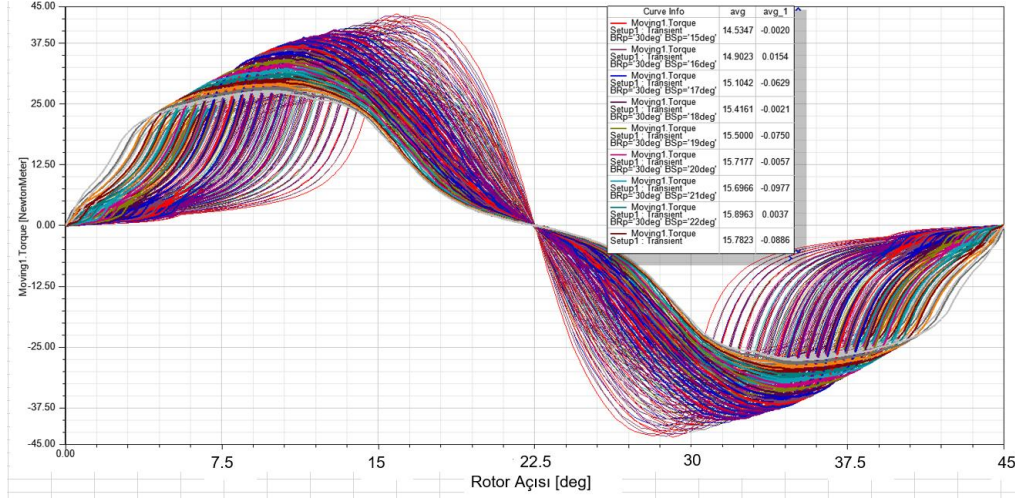
İç rotorlu ARM'nin stator boyunduruk kalınlığı $b_{sy}=10$ mm olarak alınarak ve faza 60A tepe değeri uygulanarak stator ve rotor kutup başı açıları $15^\circ \leq \beta_{sp} \leq 28^\circ$ ve $30^\circ \leq \beta_{rp} \leq 42^\circ$ aralığında 1'er derecelik adımlarla taranmıştır. Benzetim sonucu oluşan toplam $14 \times 13 = 182$ adet bir faza ait ortalama tork ve tepe tork değerleri Tablo 3.3'de paylaşılmıştır.

Tablo 3.3 İç Rotorlu ARM Stator ve Rotor Kutup Açılarının Faz Torkuna Etkisi

S. No	Kutup Açıları [Derece]		Tork [Nm]		S. No	Kutup Açıları [Derece]		Tork [Nm]		S. No	Kutup Açıları [Derece]		Tork [Nm]	
	β_{rp}	β_{sp}	Ortalama	Tepe Değeri		β_{rp}	β_{sp}	Ortalama	Tepe Değeri		β_{rp}	β_{sp}	Ortalama	Tepe Değeri
1	30	15	14,37	43,15	62	34	20	16,64	37,28	123	38	25	17,15	30,57
2	30	16	14,73	42,25	63	34	21	16,61	35,51	124	38	26	17,09	29,75
3	30	17	14,92	40,92	64	34	22	16,76	34,41	125	38	27	16,94	28,88
4	30	18	15,23	39,76	65	34	23	16,69	33,11	126	38	28	16,80	28,16
5	30	19	15,31	38,16	66	34	24	16,74	31,76	127	39	15	16,12	39,28
6	30	20	15,53	36,81	67	34	25	16,64	30,69	128	39	16	16,30	38,65

S. No	Kutup Açılımları [Derece]		Tork [Nm]		S. No	Kutup Açılımları [Derece]		Tork [Nm]		S. No	Kutup Açılımları [Derece]		Tork [Nm]	
	β_{rp}	β_{sp}	Ortalama	Tepe Değeri		β_{rp}	β_{sp}	Ortalama	Tepe Değeri		β_{rp}	β_{sp}	Ortalama	Tepe Değeri
7	30	21	15,50	35,39	68	34	26	16,61	29,68	129	39	17	16,47	38,05
8	30	22	15,71	34,15	69	34	27	16,44	28,87	130	39	18	16,62	37,27
9	30	23	15,59	32,77	70	34	28	16,33	27,99	131	39	19	16,74	36,38
10	30	24	15,73	31,66	71	35	15	15,73	41,63	132	39	20	16,87	35,47
11	30	25	15,55	30,48	72	35	16	16,00	40,93	133	39	21	16,98	34,48
12	30	26	15,62	29,59	73	35	17	16,16	40,12	134	39	22	17,06	33,34
13	30	27	15,39	28,62	74	35	18	16,40	39,13	135	39	23	17,16	32,33
14	30	28	15,35	27,87	75	35	19	16,50	38,06	136	39	24	17,21	31,33
15	31	15	14,76	42,99	76	35	20	16,64	36,84	137	39	25	17,17	30,42
16	31	16	15,00	41,91	77	35	21	16,77	35,54	138	39	26	17,08	29,47
17	31	17	15,28	40,77	78	35	22	16,79	34,25	139	39	27	16,99	28,67
18	31	18	15,51	39,71	79	35	23	16,80	33,02	140	39	28	16,78	27,86
19	31	19	15,60	38,04	80	35	24	16,77	31,78	141	40	15	16,14	38,89
20	31	20	15,74	36,62	81	35	25	16,73	30,73	142	40	16	16,30	38,62
21	31	21	15,80	35,30	82	35	26	16,63	29,59	143	40	17	16,47	37,74
22	31	22	15,88	33,91	83	35	27	16,52	28,76	144	40	18	16,60	37,30
23	31	23	15,85	32,66	84	35	28	16,35	27,83	145	40	19	16,74	36,18
24	31	24	15,90	31,49	85	36	15	15,93	41,07	146	40	20	16,84	35,62
25	31	25	15,81	30,40	86	36	16	16,13	40,82	147	40	21	16,95	34,21
26	31	26	15,79	29,41	87	36	17	16,35	39,68	148	40	22	17,02	33,56
27	31	27	15,68	28,56	88	36	18	16,51	38,86	149	40	23	17,13	32,14
28	31	28	15,51	27,72	89	36	19	16,69	37,62	150	40	24	17,22	31,33
29	32	15	15,06	43,49	90	36	20	16,91	36,65	151	40	25	17,27	30,23
30	32	16	15,43	42,22	91	36	21	16,98	35,35	152	40	26	17,16	29,42
31	32	17	15,75	40,99	92	36	22	16,99	34,12	153	40	27	17,07	28,43
32	32	18	15,88	39,68	93	36	23	17,05	33,03	154	40	28	16,87	27,61
33	32	19	16,07	38,30	94	36	24	16,98	31,85	155	41	15	16,14	38,33
34	32	20	16,17	36,91	95	36	25	16,99	30,90	156	41	16	16,31	37,79
35	32	21	16,27	35,51	96	36	26	16,88	29,94	157	41	17	16,46	37,24
36	32	22	16,35	34,16	97	36	27	16,76	28,99	158	41	18	16,59	36,58
37	32	23	16,34	32,93	98	36	28	16,59	28,03	159	41	19	16,71	35,67
38	32	24	16,33	31,66	99	37	15	16,09	40,59	160	41	20	16,82	34,92
39	32	25	16,26	30,77	100	37	16	16,32	39,96	161	41	21	16,93	33,94
40	32	26	16,21	29,61	101	37	17	16,52	39,17	162	41	22	17,00	32,93
41	32	27	16,07	28,82	102	37	18	16,68	38,43	163	41	23	17,08	32,00
42	32	28	15,93	27,91	103	37	19	16,82	37,38	164	41	24	17,12	30,96
43	33	15	15,44	42,96	104	37	20	16,96	36,43	165	41	25	17,25	30,07
44	33	16	15,72	42,15	105	37	21	17,09	35,16	166	41	26	17,18	28,96
45	33	17	15,97	41,25	106	37	22	17,16	34,04	167	41	27	17,09	28,27
46	33	18	16,16	39,93	107	37	23	17,16	32,88	168	41	28	16,96	27,57
47	33	19	16,28	38,56	108	37	24	17,16	31,86	169	42	15	15,98	37,66
48	33	20	16,39	36,98	109	37	25	17,13	30,88	170	42	16	16,20	37,47
49	33	21	16,43	35,50	110	37	26	17,03	29,85	171	42	17	16,35	36,81
50	33	22	16,52	34,15	111	37	27	16,87	29,03	172	42	18	16,47	36,16
51	33	23	16,47	32,77	112	37	28	16,74	28,19	173	42	19	16,52	35,28
52	33	24	16,51	31,63	113	38	15	16,14	40,13	174	42	20	16,62	34,52
53	33	25	16,41	30,53	114	38	16	16,32	39,33	175	42	21	16,73	33,60
54	33	26	16,39	29,59	115	38	17	16,50	38,83	176	42	22	16,80	32,67
55	33	27	16,20	28,60	116	38	18	16,64	37,78	177	42	23	16,92	31,59
56	33	28	16,11	27,89	117	38	19	16,82	36,92	178	42	24	16,97	30,51
57	34	15	15,61	42,37	118	38	20	16,90	35,89	179	42	25	17,02	29,65
58	34	16	15,89	41,65	119	38	21	17,02	34,87	180	42	26	17,08	28,91
59	34	17	16,13	40,80	120	38	22	17,16	33,82	181	42	27	16,98	28,12
60	34	18	16,34	39,75	121	38	23	17,21	32,60	182	42	28	16,87	27,44
61	34	19	16,47	38,46	122	38	24	17,23	31,68					

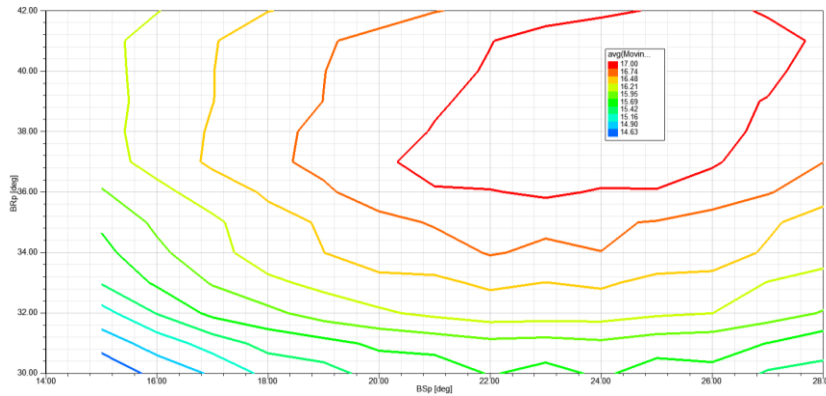
Oluşan tork dalga şekilleri Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10 İç rotorlu ARM β_{sp} ve β_{rp} değişimin rotor açısına göre faz torku değişimine etkisi

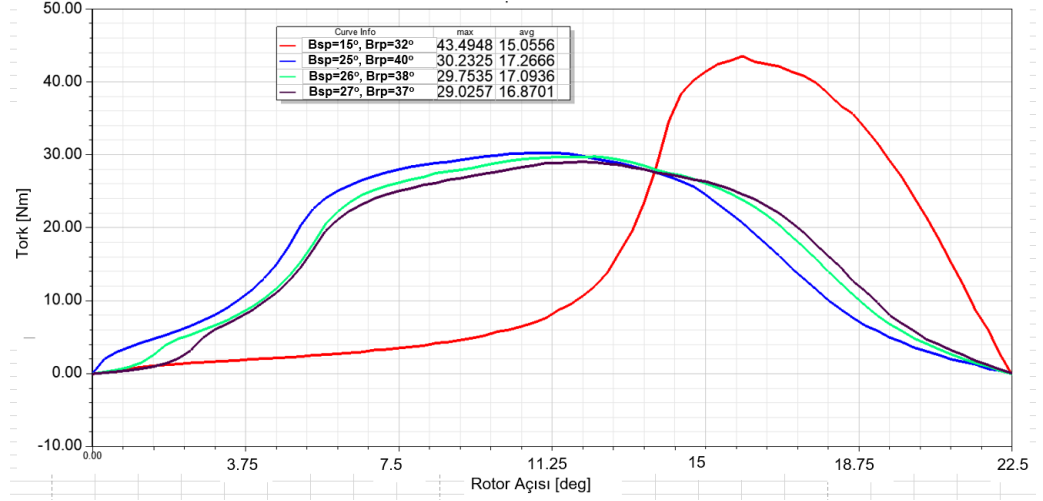
β_{sp} ve β_{rp} 'nin seçilen başlangıç değerleri için faz torku tepe noktasının en büyük olduğu bölgelerdir, buna karşın değerler arttıkça faz torkunun eğrisi dikdörtgen şekline daha çok yaklaşmakta ve simetrik bir yapıya sahip olmaktadır. Tork tepe noktaları 27,44 Nm - 43,49 Nm arasında, ortalama tork değerleri 14,37 Nm - 17,27 Nm arasında değişmektedir.

β_{sp} ve β_{rp} değişimin faz ortalama torkuna etkisi Şekil 3.11'da verilmiştir. $25^\circ \leq \beta_{sp} \leq 28^\circ$ ve $37^\circ \leq \beta_{rp} \leq 40^\circ$ değerleri arasında faz ortalama torkunun daha yüksek olduğu görülmektedir.



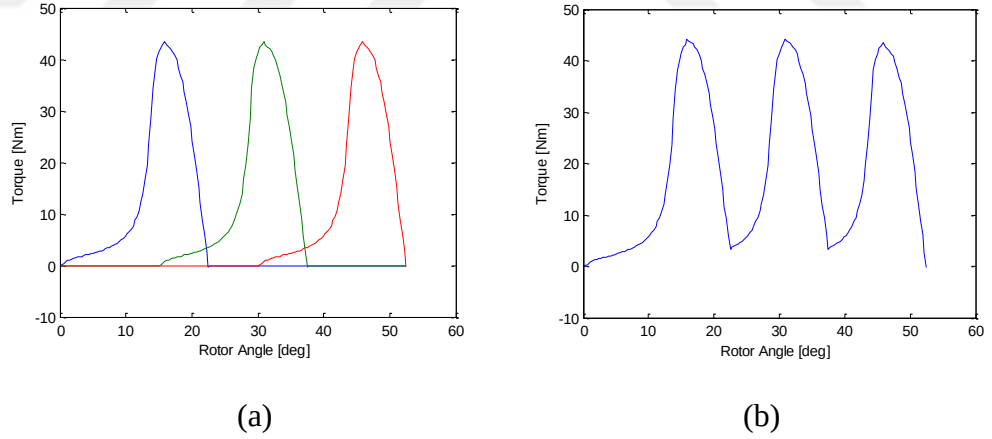
Şekil 3.11 İç rotorlu ARM β_{sp} ve β_{rp} değişimin faz ortalama torkuna etkisi

Benzetim sonucu elde edilen faz torklarından kritik olarak görülenlerden bazıları 15'er derece kaydırılarak diğer iki faza ait torklar oluşturulmuş ve faz torkları toplanmış ve tork dalgalanmaları incelenmiştir.



Şekil 3.12 İç rotorlu ARM tek faz torkları

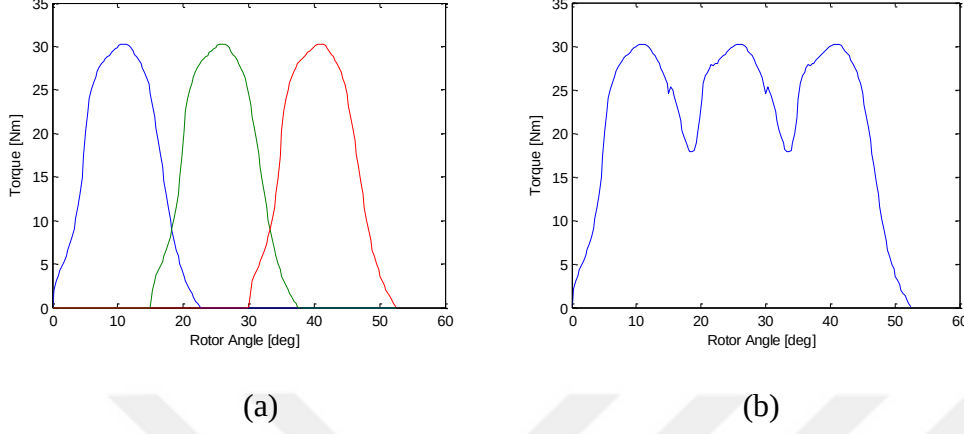
$\beta_{sp} = 15^\circ$, $\beta_{rp} = 32^\circ$ iken fazlar tarafından üretilen torklar Şekil 3.13.a'da ve toplam tork Şekil 3.13.b'de verilmiştir. Bu, üretilen torklar arasında tepe torku en fazla olan durumdur. Fakat toplam tork eğrisine bakıldığında tork dalgalanmasının çok yüksek olduğu görülmektedir. Tepe tork değeri 43,5 Nm ve ortalama torku 15,05 Nm'dir.



Şekil 3.13 İç rotorlu ARM torku $\beta_{sp} = 15^\circ$, $\beta_{rp} = 32^\circ$ a) Her bir faza ait torklar b) Toplam tork

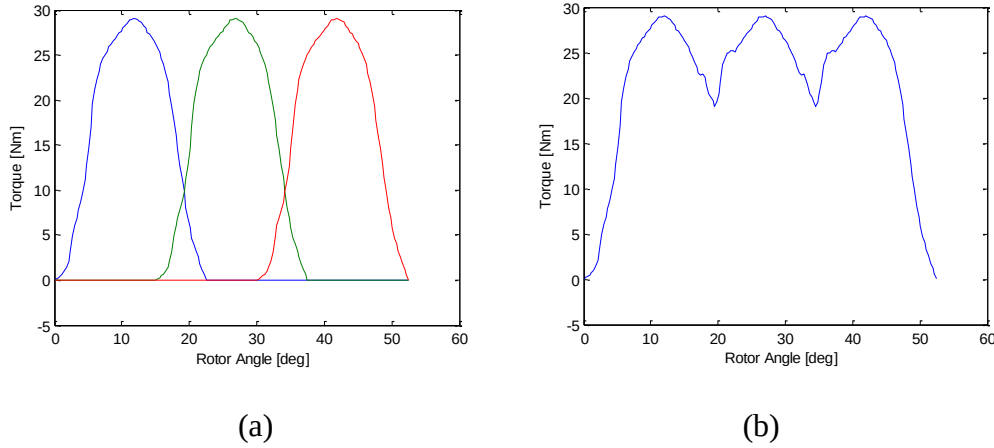
$\beta_{sp} = 25^\circ$, $\beta_{rp} = 40^\circ$ iken fazlar tarafından üretilen torklar Şekil 3.14.a'da ve toplam tork Şekil 3.14.b'de verilmiştir. Tepe tork değeri 30,23 Nm ve ortalama torku 17,27 Nm'dir.

Bu durumda $\beta_{sp} = 25^\circ$ ve $\beta_{rp} = \beta_{sp} + 15^\circ = 40^\circ$ Mecrow (2002) geometrisine uygun olarak ortalama tork en fazladır. Tork dalgalanması yaklaşık %50 olarak hesaplanır.



Şekil 3.14 İç rotorlu ARM torku $\beta_{sp} = 25^\circ$, $\beta_{rp} = 40^\circ$ a) Her bir faza ait torklar b) Toplam tork

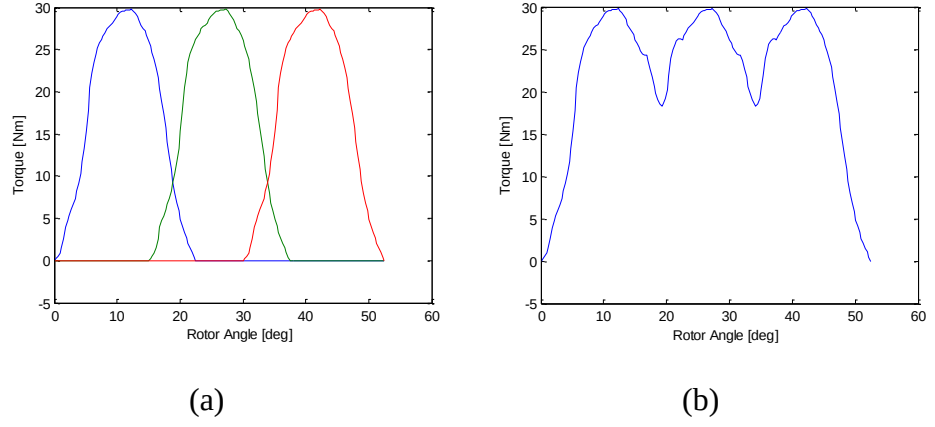
$\beta_{sp} = 27^\circ$, $\beta_{rp} = 37^\circ$ iken fazlar tarafından üretilen torklar Şekil 3.15.a'da ve toplam tork Şekil 3.15.b'de verilmiştir. Tepe tork değeri 29,02 Nm ve ortalama torku 16,87 Nm'dir. Tork dalgalanması oranı diğerlerine göre daha düşüktür.



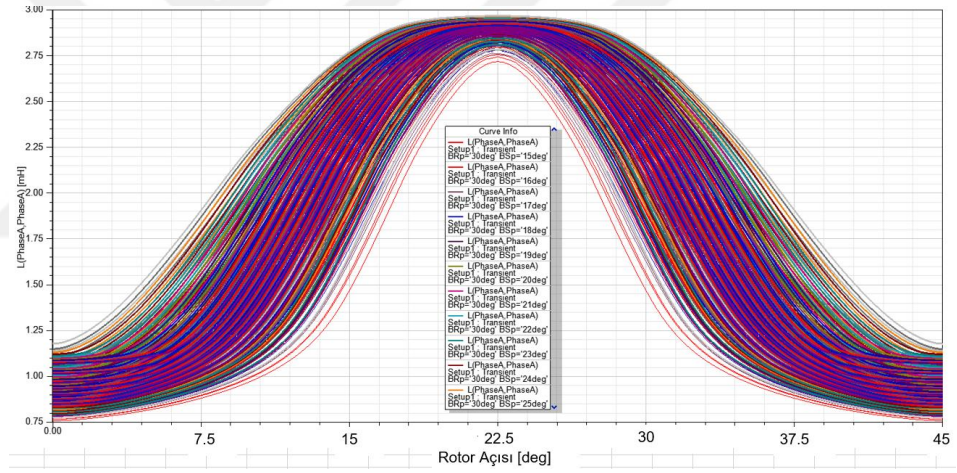
Şekil 3.15 İç rotorlu ARM torku $\beta_{sp} = 27^\circ$, $\beta_{rp} = 37^\circ$ a) Her bir faza ait torklar b) Toplam tork

$\beta_{sp} = 26^\circ$, $\beta_{rp} = 38^\circ$ iken fazlar tarafından üretilen torklar Şekil 3.16.a'da ve toplam tork Şekil 3.16.b'de verilmiştir. Tepe tork değeri 29,75 Nm ve ortalama torku 17,10 Nm'dir.

Her bir faza ait tork dalga şekilleri dikdörtgen forma yaklaştıkça tork dalgalanması da azalmaktadır.

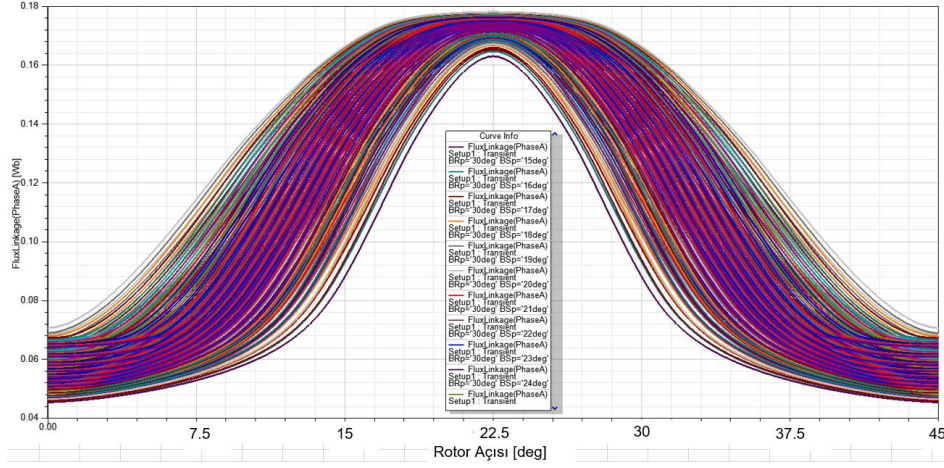


Şekil 3.16 İç rotorlu ARM torku $\beta_{sp} = 26^\circ$, $\beta_{rp} = 38^\circ$ a) Her bir faza ait torklar b) Toplam tork



Şekil 3.17 İç rotorlu ARM β_{sp} ve β_{rp} değişimin rotor açısına göre faz endüktansına etkisi

Benzetim sonucu oluşan endüktans eğrileri Şekil 3.17’de ve halkalanma akısı eğrileri Şekil 3.18’de verilmiştir.



Şekil 3.18 İç rotorlu ARM β_{sp} ve β_{rp} değişimin rotor açısına göre halkalanma akısına etkisi

3.5.2 Dış rotorlu ARM stator ve rotor kutup başı açılarının motor performansına etkisi

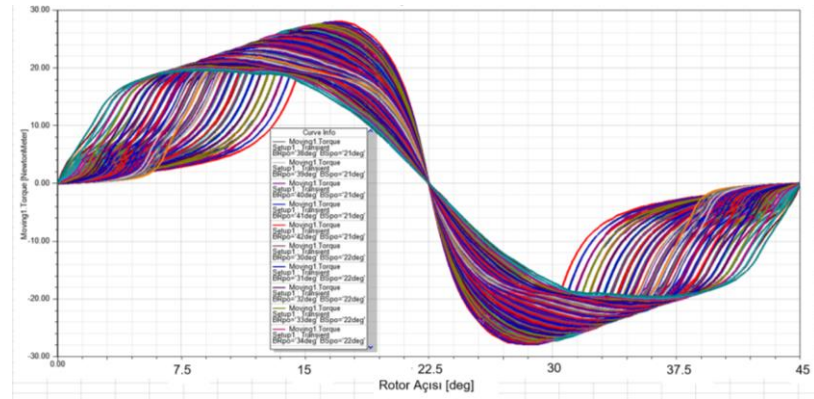
Dış rotorlu ARM'nin stator boyunduruk kalınlığı $b_{syo}=8$ mm olarak alınarak ve faza 60A tepe değeri uygulanarak $15^\circ \leq \beta_{spo} \leq 28^\circ$ ve $30^\circ \leq \beta_{rpo} \leq 42^\circ$ aralığında 1'er derece aralıklarla taranmıştır. Toplam $14 \times 13 = 182$ adet bir faza ait ortalama tork ve tepe tork değerleri Tablo 3.4'de paylaşılmıştır.

Toplam $14 \times 13 = 182$ adet bir faza ait tork değerleri Şekil 3.19'da verilmiştir.

Tablo 3.4 Dış Rotorlu ARM Stator ve Rotor Kutup Açılarının Faz Torkuna Etkisi

S. No	Kutup Açıları [Derece]		Tork [Nm]		S.No	Kutup Açıları [Derece]		Tork [Nm]		S.No	Kutup Açıları [Derece]		Tork [Nm]	
	β_{rpo}	β_{spo}	Ortalama	Tepe Değeri		β_{rpo}	β_{spo}	Ortalama	Tepe Değeri		β_{rpo}	β_{spo}	Ortalama	Tepe Değeri
1	30	15	10,50	27,99	62	39	19	13,49	23,75	123	35	24	13,61	23,63
2	31	15	10,83	27,69	63	40	19	13,47	23,18	124	36	24	13,82	23,39
3	32	15	11,06	27,56	64	41	19	13,44	22,66	125	37	24	13,93	23,04
4	33	15	11,47	27,45	65	42	19	13,38	22,17	126	38	24	14,09	22,68
5	34	15	11,65	26,94	66	30	20	12,08	26,76	127	39	24	14,16	22,32
6	35	15	11,98	26,37	67	31	20	12,32	26,45	128	40	24	14,20	21,98
7	36	15	12,03	25,67	68	32	20	12,63	26,19	129	41	24	14,20	21,61
8	37	15	12,14	24,95	69	33	20	12,86	26,12	130	42	24	14,12	21,23
9	38	15	12,29	24,43	70	34	20	13,12	25,88	131	30	25	12,42	23,86
10	39	15	12,39	23,74	71	35	20	13,28	25,47	132	31	25	12,67	23,67
11	40	15	12,40	23,15	72	36	20	13,44	25,04	133	32	25	12,96	23,55
12	41	15	12,41	22,54	73	37	20	13,57	24,54	134	33	25	13,33	23,54
13	42	15	12,37	22,03	74	38	20	13,62	24,11	135	34	25	13,47	23,34
14	30	16	10,89	27,82	75	39	20	13,73	23,69	136	35	25	13,60	23,04
15	31	16	11,20	27,46	76	40	20	13,64	23,11	137	36	25	13,80	22,78
16	32	16	11,52	27,39	77	41	20	13,62	22,58	138	37	25	14,04	22,6
17	33	16	11,83	27,32	78	42	20	13,57	22,09	139	38	25	14,07	22,2
18	34	16	11,99	26,95	79	30	21	12,23	26,33	140	39	25	14,17	21,9
19	35	16	12,37	26,41	80	31	21	12,50	25,94	141	40	25	14,29	21,56
20	36	16	12,44	25,67	81	32	21	12,79	25,75	142	41	25	14,31	21,21
21	37	16	12,48	25,16	82	33	21	13,13	25,71	143	42	25	14,26	20,86
22	38	16	12,60	24,53	83	34	21	13,23	25,44	144	30	26	12,37	23,28

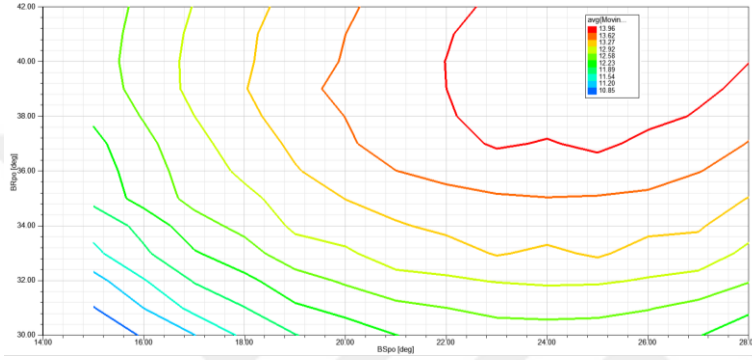
S. No	Kutup Açılırları [Derece]		Tork [Nm]		S.No	Kutup Açılırları [Derece]		Tork [Nm]		S.No	Kutup Açılırları [Derece]		Tork [Nm]	
	β_{rpo}	β_{spo}	Ortalama	Tepe Değeri		β_{rpo}	β_{spo}	Ortalama	Tepe Değeri		β_{rpo}	β_{spo}	Ortalama	Tepe Değeri
23	39	16	12,70	23,83	84	35	21	13,43	25,07	145	31	26	12,59	23,01
24	40	16	12,75	23,27	85	36	21	13,61	24,66	146	32	26	12,90	22,91
25	41	16	12,70	22,64	86	37	21	13,77	24,28	147	33	26	13,12	22,76
26	42	16	12,67	22,17	87	38	21	13,84	23,87	148	34	26	13,37	22,74
27	30	17	11,18	27,61	88	39	21	13,90	23,42	149	35	26	13,55	22,54
28	31	17	11,64	27,34	89	40	21	13,84	22,89	150	36	26	13,76	22,25
29	32	17	11,91	27,15	90	41	21	13,80	22,39	151	37	26	13,87	21,95
30	33	17	12,20	27,21	91	42	21	13,74	21,96	152	38	26	14,05	21,71
31	34	17	12,44	26,9	92	30	22	12,34	25,66	153	39	26	14,17	21,39
32	35	17	12,68	26,34	93	31	22	12,57	25,39	154	40	26	14,24	21,05
33	36	17	12,72	25,63	94	32	22	12,88	25,18	155	41	26	14,28	20,66
34	37	17	12,83	25,07	95	33	22	13,10	25,04	156	42	26	14,27	20,35
35	38	17	12,92	24,53	96	34	22	13,36	25,03	157	30	27	12,24	22,62
36	39	17	13,01	23,89	97	35	22	13,52	24,66	158	31	27	12,49	22,45
37	40	17	13,00	23,28	98	36	22	13,71	24,3	159	32	27	12,79	22,3
38	41	17	12,99	22,73	99	37	22	13,82	23,86	160	33	27	13,16	22,3
39	42	17	12,94	22,18	100	38	22	13,93	23,49	161	34	27	13,30	22,12
40	30	18	11,61	27,53	101	39	22	13,96	23,06	162	35	27	13,44	21,87
41	31	18	11,87	27,14	102	40	22	13,97	22,64	163	36	27	13,63	21,65
42	32	18	12,15	26,87	103	41	22	13,94	22,21	164	37	27	13,89	21,53
43	33	18	12,44	26,79	104	42	22	13,89	21,78	165	38	27	13,94	21,12
44	34	18	12,67	26,6	105	30	23	12,40	25,13	166	39	27	14,02	20,74
45	35	18	12,83	26,06	106	31	23	12,67	24,84	167	40	27	14,15	20,45
46	36	18	13,00	25,56	107	32	23	12,94	24,7	168	41	27	14,28	20,24
47	37	18	13,08	24,97	108	33	23	13,30	24,62	169	42	27	14,28	20,03
48	38	18	13,19	24,41	109	34	23	13,39	24,39	170	30	28	12,07	21,99
49	39	18	13,26	23,87	110	35	23	13,59	24,16	171	31	28	12,28	21,74
50	40	18	13,22	23,25	111	36	23	13,75	23,82	172	32	28	12,60	21,65
51	41	18	13,21	22,73	112	37	23	14,01	23,55	173	33	28	12,82	21,49
52	42	18	13,16	22,22	113	38	23	14,09	23,18	174	34	28	13,08	21,49
53	30	19	11,87	27,21	114	39	23	14,09	22,72	175	35	28	13,26	21,33
54	31	19	12,19	26,91	115	40	23	14,12	22,32	176	36	28	13,48	21,07
55	32	19	12,43	26,53	116	41	23	14,09	21,92	177	37	28	13,60	20,72
56	33	19	12,79	26,59	117	42	23	14,01	21,53	178	38	28	13,78	20,48
57	34	19	12,98	26,31	118	30	24	12,44	24,53	179	39	28	13,90	20,3
58	35	19	13,09	25,83	119	31	24	12,67	24,28	180	40	28	13,97	20,02
59	36	19	13,25	25,31	120	32	24	12,98	24,14	181	41	28	14,04	19,8
60	37	19	13,34	24,79	121	33	24	13,19	23,97	182	42	28	14,11	19,54
61	38	19	13,42	24,31	122	34	24	13,44	23,93					



Şekil 3.19 Dış rotorlu ARM β_{spo} ve β_{rpo} değişimin rotor açısına göre faz torkuna etkisi

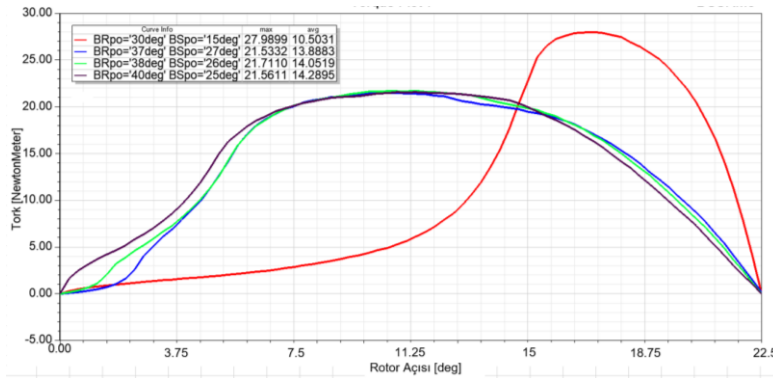
β_{spo} ve β_{rpo} 'nun seçilen başlangıç değerleri için faz torku tepe noktasının en büyük olduğu bölgelerdir, buna karşın değerler arttıkça faz torkunun eğrisi dikdörtgen şekline daha çok yaklaşmakta ve simetrik bir yapıya sahip olmaktadır. Tork tepe noktaları 19,54 Nm-28 Nm arasında, ortalama tork değerleri 10,50 Nm-14,31 Nm arasında değişmektedir.

β_{spo} ve β_{rpo} değişimin ortalama faz torkuna etkisi Şekil 3.20’de verilmiştir. $25^\circ \leq \beta_{spo} \leq 28^\circ$ ve $37^\circ \leq \beta_{rpo} \leq 40^\circ$ değerleri arasında ortalama faz torkunun daha yüksek olduğu görülmektedir.

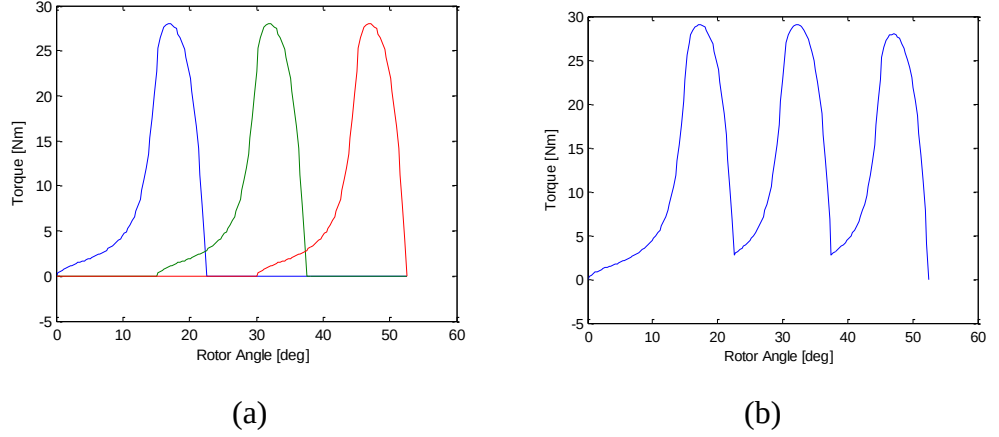


Şekil 3.20 Dış rotorlu ARM β_{spo} ve β_{rpo} değişimin faz ortalama torkuna etkisi

Aynı şekilde dış rotorlu ARM için benzetim sonucu elde edilen faz torklarından kritik olarak görülenlerden bazıları 15’er derece kaydırılarak diğer iki faza ait torklar oluşturulmuş ve faz torkları toplanmış ve tork dalgalanmaları incelenmiştir.

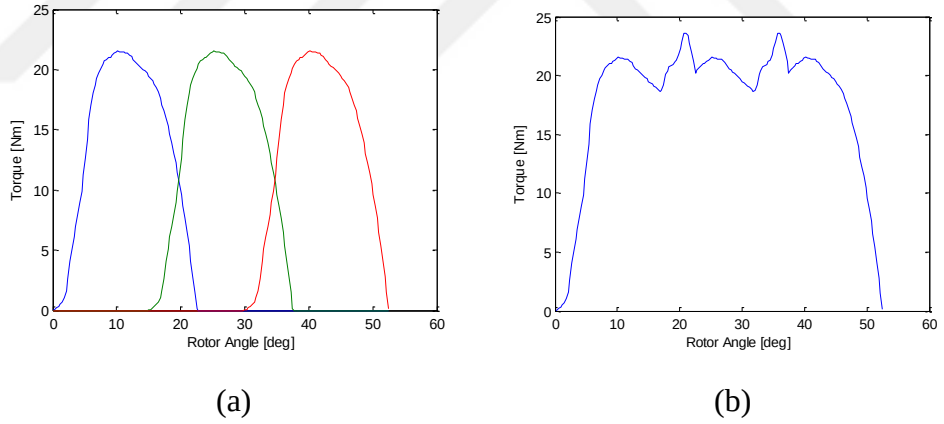


Şekil 3.21 Dış rotorlu ARM tek faz torku



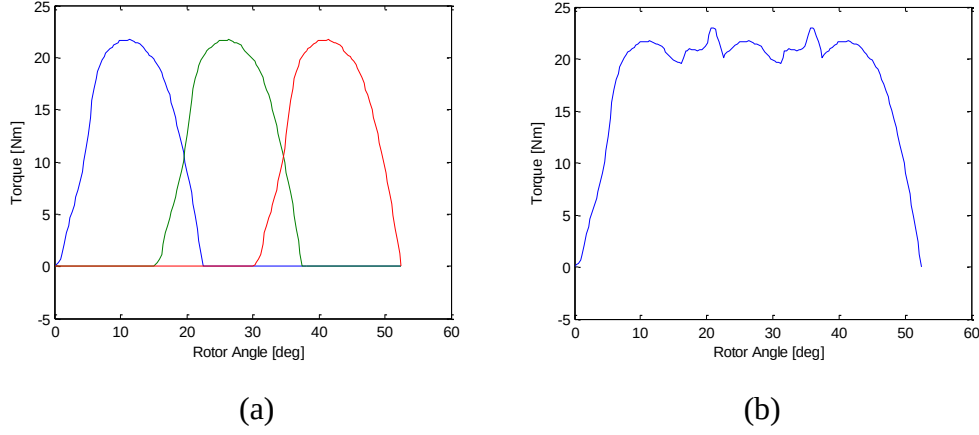
Şekil 3.22 Dış rotorlu ARM torku $\beta_{spo} = 15^\circ$, $\beta_{rpo} = 30^\circ$ a) Her bir faza ait torklar b) Toplam tork

$\beta_{spo} = 15^\circ$, $\beta_{rpo} = 30^\circ$ iken fazlar tarafından üretilen torklar Şekil 3.22.a'da ve toplam tork Şekil 3.22.b'de verilmiştir. Bu, üretilen torklar arasında tepe torku en fazla olan durumdur. Fakat toplam tork eğrisine bakıldığında tork dalgalanmasının çok yüksek olduğu görülmektedir. Tepe tork değeri 28 Nm ve ortalama torku 10,50 Nm'dir.



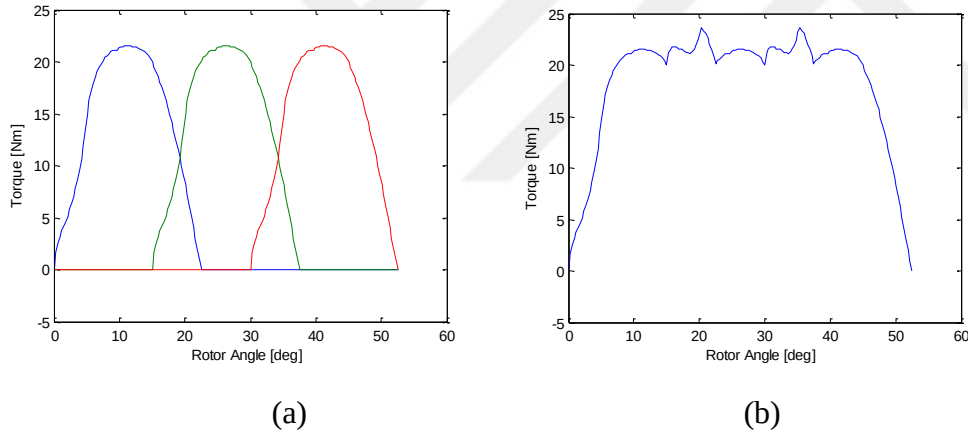
Şekil 3.23 Dış rotorlu ARM torku $\beta_{spo} = 27^\circ$, $\beta_{rpo} = 37^\circ$ a) Her bir faza ait torklar b) Toplam tork

$\beta_{spo} = 27^\circ$, $\beta_{rpo} = 37^\circ$ iken fazlar tarafından üretilen torklar Şekil 3.23.a'da ve toplam tork Şekil 3.23.b'de verilmiştir. Tepe tork değeri 21,53 Nm ve ortalama torku 13,88 Nm'dir.



Şekil 3.24 Dış rotorlu ARM torku $\beta_{spo} = 26^\circ$, $\beta_{rpo} = 38^\circ$ a) Her bir faza ait torklar b) Toplam tork

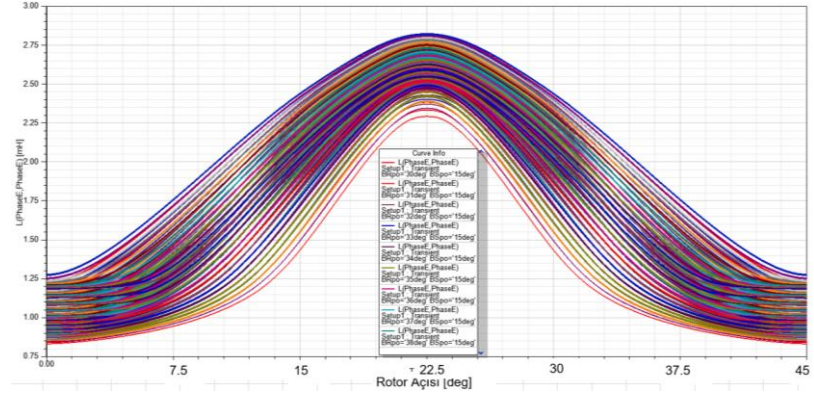
$\beta_{spo} = 26^\circ$, $\beta_{rpo} = 38^\circ$ iken fazlar tarafından üretilen torklar Şekil 3.24.a'da ve toplam tork Şekil 3.24.b'de verilmiştir. Tepe tork değeri 21,71 Nm ve ortalama torku 14,05 Nm'dir.



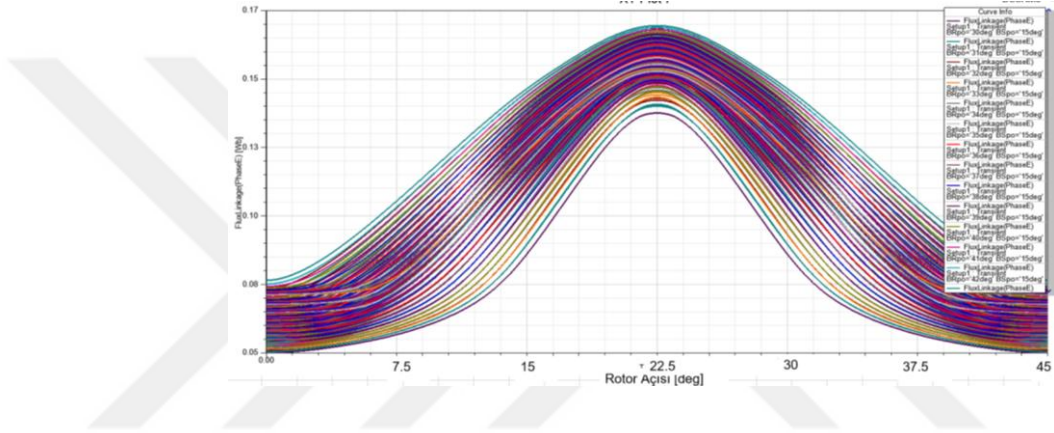
Şekil 3.25 Dış rotorlu ARM torku $\beta_{spo} = 25^\circ$, $\beta_{rpo} = 40^\circ$ a) Her bir faza ait torklar b) Toplam tork

$\beta_{spo} = 25^\circ$, $\beta_{rpo} = 40^\circ$ iken fazlar tarafından üretilen torklar Şekil 3.25.a'da ve toplam tork Şekil 3.25.b'de verilmiştir. Tepe tork değeri 21,56 Nm ve ortalama torku 14,29 Nm'dir. Bu durum ortalama torkun en fazla olduğu stator ve rotor kutup başı açı değerleridir.

Benzetim sonucu oluşan endüktans eğrileri Şekil 3.26'da ve halkalanma akısı eğrileri Şekil 3.27'de verilmiştir.

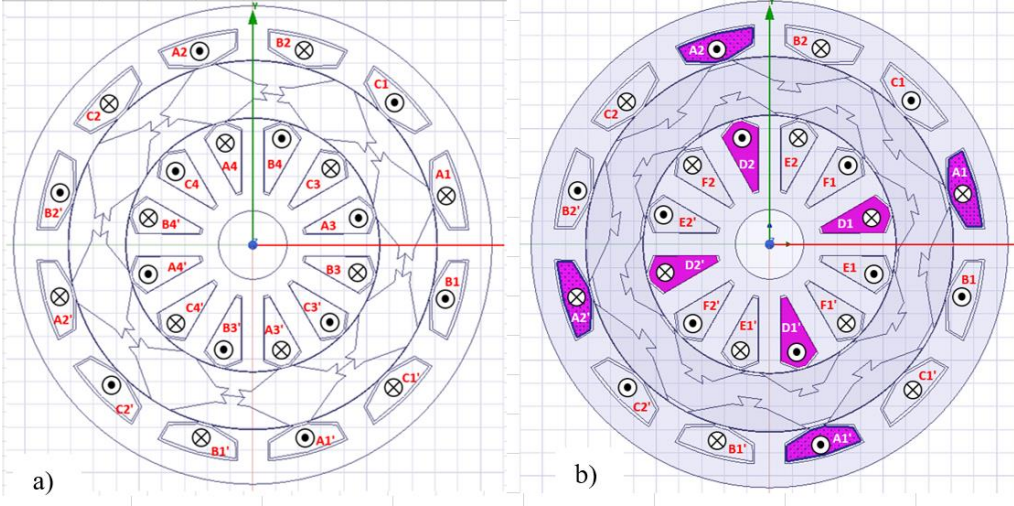


Şekil 3.26 Dış rotorlu ARM faz endüktansı

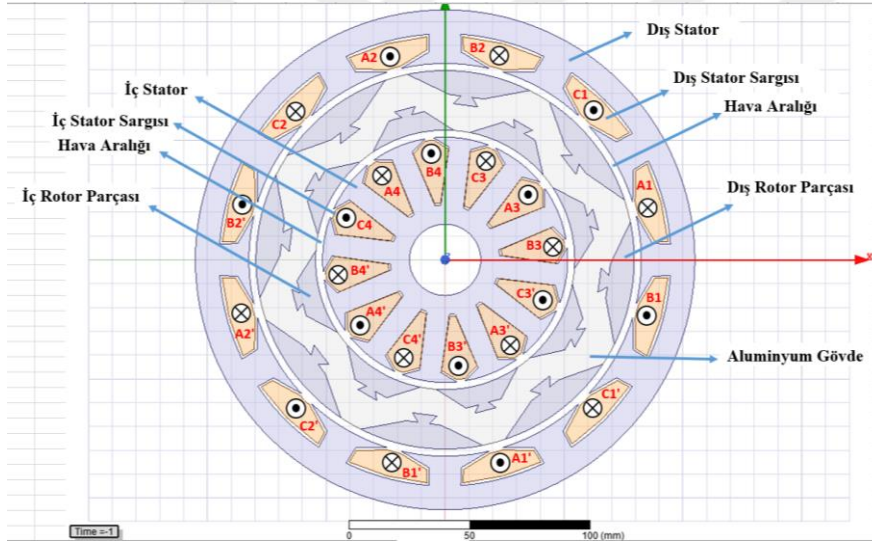


Şekil 3.27 Dış rotorlu ARM faz halkalanma akısı

ÇSARM rotor yapısının tork dalgalanması üzerindeki etkisi rotorlarının birbirlerine göre konumu ile oluşturulan 3 fazlı ve 6 fazlı ÇSARM yapıları üzerinde incelenebilir. İç içe yerleştirilmiş iç ve dış rotorlu ARM rotorlarının Şekil 3.28.a’da gösterildiği gibi sırt sırta aynı hizada olduğu durumda 3 fazlı ÇSARM ve Şekil 3.28.b’de gösterildiği gibi rotorları birbirine göre kaydırılarak bu tezin konusu olan 6 fazlı ÇSARM yapıları oluşturulabilir. Stator ve rotorların birbirine göre konumları ile oluşturulan farklı 3 ve 6 fazlı ÇSARM yapılandırmaları ilerleyen bölümlerde verilmiştir. Şekil 3.29’da stator ve rotorları birbirine göre kaydırılmış 3 fazlı ÇSARM yapısı verilmiştir.



Şekil 3.28 Rotor durumlarına göre ÇSARM a) Rotorları aynı hizada 3 fazlı ÇSARM b) Rotorları birbirine göre kaydırılmış 6 fazlı ÇSARM



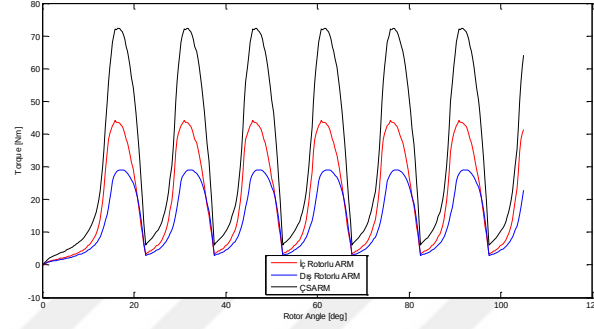
Şekil 3.29 Stator ve rotorları kaydırılmış 3 fazlı ÇSARM yapısı

İç ve dış rotorlu ARM'lere ait statik torklar Matlab programında rotorları birbirine göre kaydırılmamış ve kaydırılmış durumları ile toplam tork elde edilebilir ve tork dalgalanması üzerindeki etkisi görülebilir.

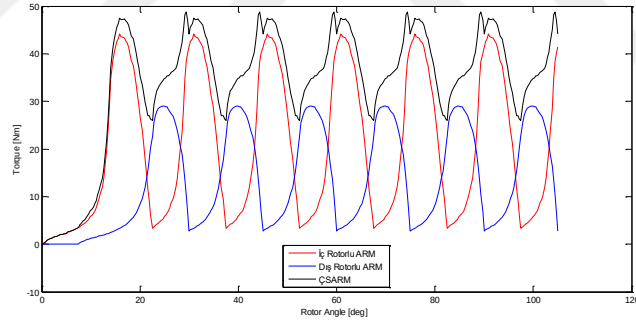
İç ve dış rotorlu ARM stator ve rotorları aynı hizada iken oluşturulan 3 fazlı ÇSARM'de iç ve dış rotorlu ARM torklarının toplamı ÇSARM'nin oluşturacağı torka eşit olacaktır. Bu yapıda iç ve dış rotorlu ARM faz değişimleri aynı zamanda olacağından bu esnada oluşan tork dalgalanmaları birbirini sönmülemeyecektir. İç ve dış rotorlu ARM rotorlarının birbirine göre kaydırılarak oluşturulmuş 6 fazlı ÇSARM yapısında faz değişimleri farklı zamanlarda olduğundan bu esnada oluşan

tork dalgalanmaları birbirini sönümleyici hale gelir ve tork dalgalanmasını önemli ölçüde azaltır.

Statik torklar içinde tork dalgalanması en fazla olanlardan stator ve rotor kutup açıları $\beta_{sp} = 15^\circ$, $\beta_{rp} = 32^\circ$ ve $\beta_{spo} = 15^\circ$, $\beta_{rpo} = 30^\circ$ durumlarını bu 3 fazlı ve 6 fazlı ÇSARM'ye uygulandığında tork dalgalanması üzerindeki etkisi Şekil 3.30 ve Şekil 3.31'de görülmektedir.

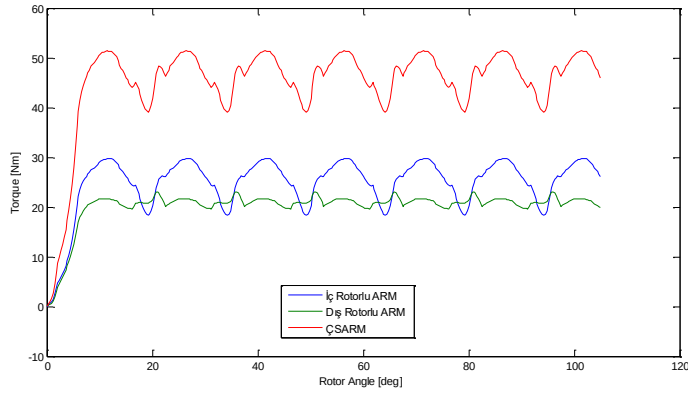


Şekil 3.30 Rotorları aynı hızda 3 fazlı ÇSARM yapısının tork dalgalanmasına etkisi

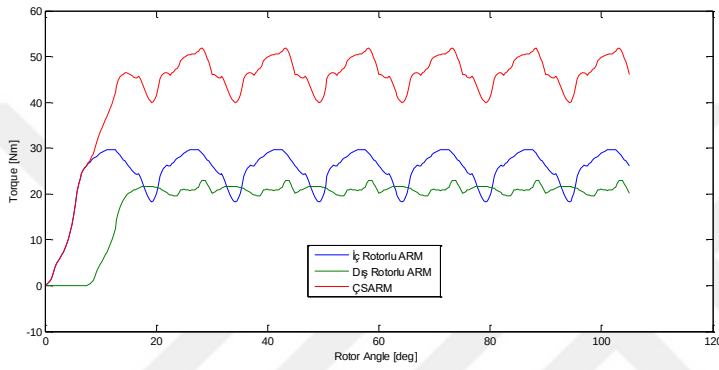


Şekil 3.31 Rotorları birbirine göre kaydırılmış 6 fazlı ÇSARM yapısının tork dalgalanmasına etkisi

$\beta_{sp} = 26^\circ$, $\beta_{rp} = 38^\circ$ ve $\beta_{spo} = 26^\circ$, $\beta_{rpo} = 38^\circ$ durumunda 3 fazlı ve 6 fazlı ÇSARM'ye uygulandığında tork dalgalanması üzerindeki etkisi Şekil 3.32 ve Şekil 3.33'de gösterilmiştir.

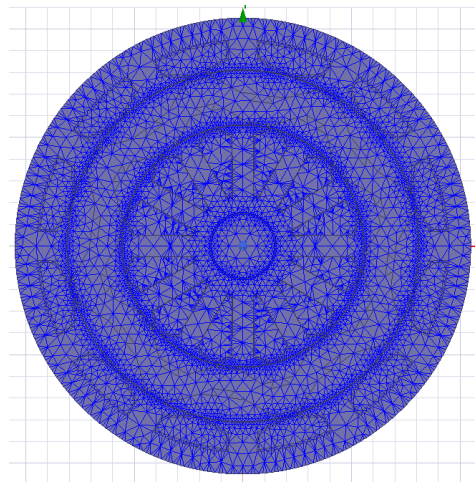


Şekil 3.32 Rotorları Aynı Hizada 3 Fazlı ÇSARM Tork Dalgalanmasına Etkisi



Şekil 3.33 Rotorları Birbirine Göre Kaydırılmış 6 Fazlı ÇSARM Tork Dalgalanmasına Etkisi

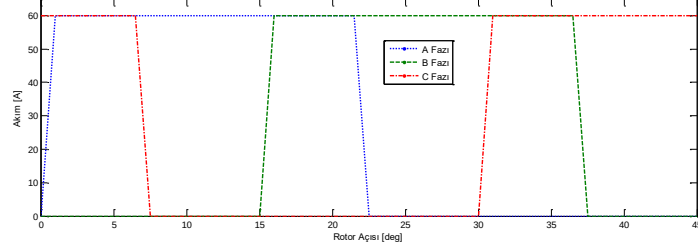
Şekil 3.34'te elektromanyetik çözüm için sonlu elemanlar analizinde kullanılan ağ yapısı verilmiştir.



Şekil 3.34 Sonlu Elemanlar Analizinde kullanılan ağ yapısı

Benzetim esnasında faz akımlarının açma kapama açılarının doğru olarak girilmemesi durumunda ortalama tork ve tork dalgalanması değerlerinin doğru

sonuçları veremeyeceğinden bu durumu aşmak için iç rotorlu ve dış rotorlu ARM fazlarına 60 A tepe değerine sahip trapezoidal akım uygulanmıştır. Akım yoğunluğu açısından her motor için aynı yükselme ve düşme eğimi ve aynı tepe değerine sahip Şekil 3.35'te verilen trapezoidal akım uygulanarak her motora birbirine yakın ortalama akım yoğunluğu sağlanmıştır.



Şekil 3.35 İç rotorlu ARM'ye uygulanan trapezoidal faz akımları

İç ve dış rotorlu ARM tek faz tork sonuçlarının değerlendirilmesi sonucu stator ve rotor kutup başı açıları;

$$26^{\circ} \leq \beta_{sp} \leq 28^{\circ}$$

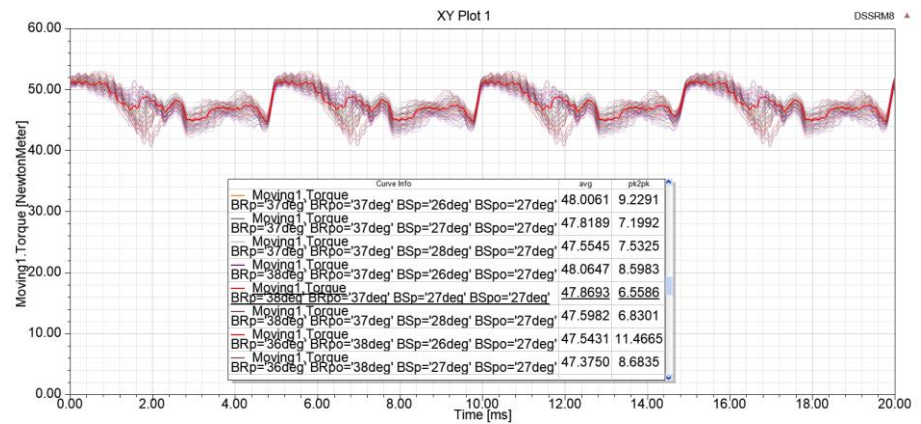
$$36^{\circ} \leq \beta_{rp} \leq 38^{\circ}$$

$$26^{\circ} \leq \beta_{spo} \leq 28^{\circ}$$

$$36^{\circ} \leq \beta_{rpo} \leq 38^{\circ}$$

aralığında 1° adımlarla taranmış ve toplamda $3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$ adet tarama yapılmıştır.

Benzetim sonucunda oluşan tork eğrileri Şekil 3.36'da verilmiştir.



Şekil 3.36 60 A trapezoidal akım ile ÇSARM tork eğrileri

Tablo 3.5 Stator ve Rotor Kutup Açılarının Faz Torkuna Etkisi

S. No	Kutup Başı Açıları				Tork		S. No	Kutup Başı Açıları				Tork	
	β_{rp} [deg]	β_{rp0} [deg]	β_{sp} [deg]	β_{spo} [deg]	Ortalama [Nm]	Dalgalanma [%]		β_{rp} [deg]	β_{rp0} [deg]	β_{sp} [deg]	β_{spo} [deg]	Ortalama [Nm]	Dalgalanma [%]
1	36	36	26	26	47,75	22,21	42	37	37	28	27	47,55	15,84
2	36	36	27	26	47,58	17,52	43	38	37	26	27	48,06	17,89
3	36	36	28	26	47,34	17,87	44	38	37	27	27	47,87	13,70
4	37	36	26	26	48,20	18,90	45	38	37	28	27	47,60	14,35
5	37	36	27	26	48,02	16,98	46	36	38	26	27	47,54	24,12
6	37	36	28	26	47,75	16,62	47	36	38	27	27	47,38	18,33
7	38	36	26	26	48,27	17,68	48	36	38	28	27	47,13	18,16
8	38	36	27	26	48,08	16,43	49	37	38	26	27	47,99	19,83
9	38	36	28	26	47,81	17,26	50	37	38	27	27	47,80	15,90
10	36	37	26	26	47,88	22,02	51	37	38	28	27	47,54	16,35
11	36	37	27	26	47,71	16,02	52	38	38	26	27	48,04	17,35
12	36	37	28	26	47,47	15,53	53	38	38	27	27	47,85	15,43
13	37	37	26	26	48,33	19,25	54	38	38	28	27	47,57	15,98
14	37	37	27	26	48,14	14,39	55	36	36	26	28	47,05	24,91
15	37	37	28	26	47,88	14,43	56	36	36	27	28	46,89	19,00
16	38	37	26	26	48,39	16,49	57	36	36	28	28	46,64	18,83
17	38	37	27	26	48,20	14,61	58	37	36	26	28	47,51	20,80
18	38	37	28	26	47,92	14,89	59	37	36	27	28	47,32	16,39
19	36	38	26	26	47,87	22,56	60	37	36	28	28	47,06	17,41
20	36	38	27	26	47,71	16,33	61	38	36	26	28	47,57	18,55
21	36	38	28	26	47,46	16,15	62	38	36	27	28	47,37	14,78
22	37	38	26	26	48,32	18,38	63	38	36	28	28	47,10	15,72
23	37	38	27	26	48,13	14,56	64	36	37	26	28	47,15	25,71
24	37	38	28	26	47,87	14,89	65	36	37	27	28	46,99	19,60
25	38	38	26	26	48,38	16,66	66	36	37	28	28	46,74	19,68
26	38	38	27	26	48,19	14,47	67	37	37	26	28	47,60	20,60
27	38	38	28	26	47,91	15,22	68	37	37	27	28	47,41	17,23
28	36	36	26	27	47,44	23,49	69	37	37	28	28	47,15	18,12
29	36	36	27	27	47,27	17,40	70	38	37	26	28	47,65	18,19
30	36	36	28	27	47,03	17,23	71	38	37	27	28	47,46	15,64
31	37	36	26	27	47,89	19,93	72	38	37	28	28	47,19	16,63
32	37	36	27	27	47,71	14,84	73	36	38	26	28	47,12	25,50
33	37	36	28	27	47,45	15,60	74	36	38	27	28	46,95	20,06
34	38	36	26	27	47,96	17,83	75	36	38	28	28	46,70	19,90
35	38	36	27	27	47,76	13,66	76	37	38	26	28	47,56	20,96
36	38	36	28	27	47,49	14,00	77	37	38	27	28	47,37	17,52
37	36	37	26	27	47,55	23,95	78	37	38	28	28	47,11	18,08
38	36	37	27	27	47,39	17,55	79	38	38	26	28	47,61	18,19
39	36	37	28	27	47,14	17,38	80	38	38	27	28	47,42	15,82
40	37	37	26	27	48,01	19,22	81	38	38	28	28	47,14	16,71
41	37	37	27	27	47,82	15,06							

$$\beta_{sp} = 26^\circ \quad \beta_{rp} = 38^\circ$$

$$\beta_{spo} = 26^\circ \quad \beta_{rpo} = 38^\circ$$

durumunda ortalama tork 48,4 Nm ve tork dalgalanması %16,6 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 3.34 incelendiğinde iç rotorlu ARM fazlarının etkin olduğu bölgelerde tork dalgalanmasının daha fazla olduğu gözlemlendiğinden tork dalgalanmasını azaltmak için iç rotorlu ARM fazlarına 55 A, dış rotorlu ARM fazlarına da 60 A tepe değerine sahip trapezoidal akım uygulanmıştır. İç ve dış rotorlu ARM tek faz tork sonuçlarının değerlendirilmesi sonucu stator ve rotor kutup başı açıları;

$$26^\circ \leq \beta_{sp} \leq 28^\circ \quad 36^\circ \leq \beta_{rp} \leq 38^\circ$$

$$26^\circ \leq \beta_{spo} \leq 28^\circ \quad 36^\circ \leq \beta_{rpo} \leq 38^\circ$$

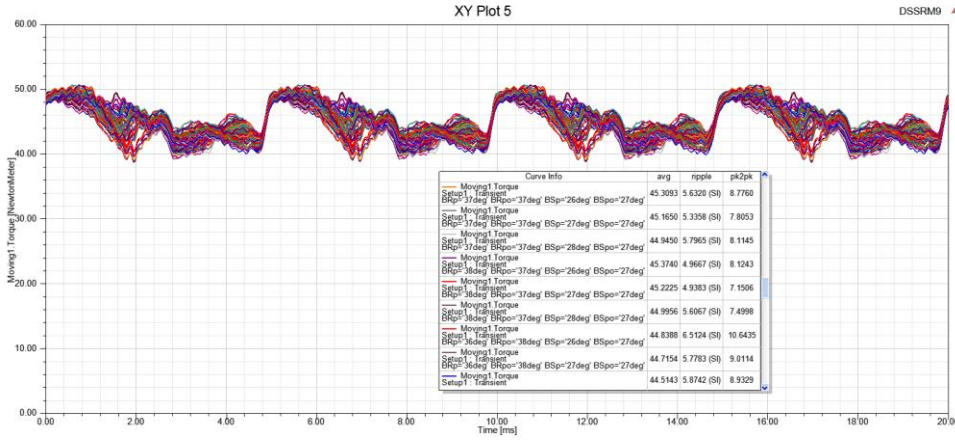
aralığında 1° adımlarla taranmış ve toplamda $3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$ adet tarama yapılmıştır.

Benzetim sonucunda elde edilen ortalama tork değeri, tork dalgalanması Tablo 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3.6 Stator ve rotor kutup başı açılarına göre torkun değişimi

S. No	Kutup Başı Açıları				Tork		S. No	Kutup Başı Açıları				Tork	
	β_{rp} [deg]	β_{rpo} [deg]	β_{sp} [deg]	β_{spo} [deg]	Ortalama [Nm]	Dalga- lanma [%]		β_{rp} [deg]	β_{rpo} [deg]	β_{sp} [deg]	β_{spo} [deg]	Ortalama [Nm]	Dalga- lanma [%]
1	36	36	26	26	45,05	22,49	42	37	37	28	27	44,95	18,05
2	36	36	27	26	44,93	20,69	43	38	37	26	27	45,37	17,91
3	36	36	28	26	44,73	21,16	44	38	37	27	27	45,22	15,81
4	37	36	26	26	45,51	20,43	45	38	37	28	27	45,00	16,67
5	37	36	27	26	45,36	20,03	46	36	38	26	27	44,84	23,74
6	37	36	28	26	45,15	19,79	47	36	38	27	27	44,72	20,15
7	38	36	26	26	45,58	20,32	48	36	38	28	27	44,51	20,07
8	38	36	27	26	45,43	19,07	49	37	38	26	27	45,29	19,78
9	38	36	28	26	45,20	20,20	50	37	38	27	27	45,15	18,49
10	36	37	26	26	45,18	21,86	51	37	38	28	27	44,92	18,45
11	36	37	27	26	45,05	18,10	52	38	38	26	27	45,35	18,63
12	36	37	28	26	44,85	18,69	53	38	38	27	27	45,20	17,75
13	37	37	26	26	45,63	19,20	54	38	38	28	27	44,97	18,26
14	37	37	27	26	45,49	17,14	55	36	36	26	28	44,37	24,57
15	37	37	28	26	45,27	17,08	56	36	36	27	28	44,24	20,86
16	38	37	26	26	45,70	17,56	57	36	36	28	28	44,04	21,11

S. No	Kutup Başı Açılırları				Tork		S. No	Kutup Başı Açılırları				Tork	
	β_{rp} [deg]	β_{rp0} [deg]	β_{sp} [deg]	β_{spo} [deg]	Ortalama [Nm]	Dalga- lanma [%]		β_{rp} [deg]	β_{rp0} [deg]	β_{sp} [deg]	β_{spo} [deg]	Ortalama [Nm]	Dalga- lanma [%]
17	38	37	27	26	45,55	16,72	58	37	36	26	28	44,82	20,76
18	38	37	28	26	45,32	17,51	59	37	36	27	28	44,67	18,81
19	36	38	26	26	45,17	22,45	60	37	36	28	28	44,45	19,77
20	36	38	27	26	45,05	18,47	61	38	36	26	28	44,89	18,46
21	36	38	28	26	44,85	18,38	62	38	36	27	28	44,73	17,36
22	37	38	26	26	45,62	18,34	63	38	36	28	28	44,50	18,19
23	37	38	27	26	45,48	17,10	64	36	37	26	28	44,45	25,52
24	37	38	28	26	45,26	16,86	65	36	37	27	28	44,33	21,50
25	38	38	26	26	45,68	17,78	66	36	37	28	28	44,13	21,65
26	38	38	27	26	45,53	16,47	67	37	37	26	28	44,91	20,55
27	38	38	28	26	45,30	17,53	68	37	37	27	28	44,76	19,37
28	36	36	26	27	44,75	23,25	69	37	37	28	28	44,54	20,35
29	36	36	27	27	44,63	19,32	70	38	37	26	28	44,97	18,24
30	36	36	28	27	44,42	19,31	71	38	37	27	28	44,82	18,10
31	37	36	26	27	45,20	20,00	72	38	37	28	28	44,59	19,10
32	37	36	27	27	45,06	17,04	73	36	38	26	28	44,42	25,11
33	37	36	28	27	44,84	17,83	74	36	38	27	28	44,29	21,93
34	38	36	26	27	45,27	17,78	75	36	38	28	28	44,09	21,78
35	38	36	27	27	45,12	16,22	76	37	38	26	28	44,86	21,14
36	38	36	28	27	44,89	16,51	77	37	38	27	28	44,72	19,59
37	36	37	26	27	44,86	23,68	78	37	38	28	28	44,50	20,19
38	36	37	27	27	44,73	19,56	79	38	38	26	28	44,92	18,37
39	36	37	28	27	44,53	19,60	80	38	38	27	28	44,77	18,02
40	37	37	26	27	45,31	19,37	81	38	38	28	28	44,54	18,97
41	37	37	27	27	45,17	17,28							

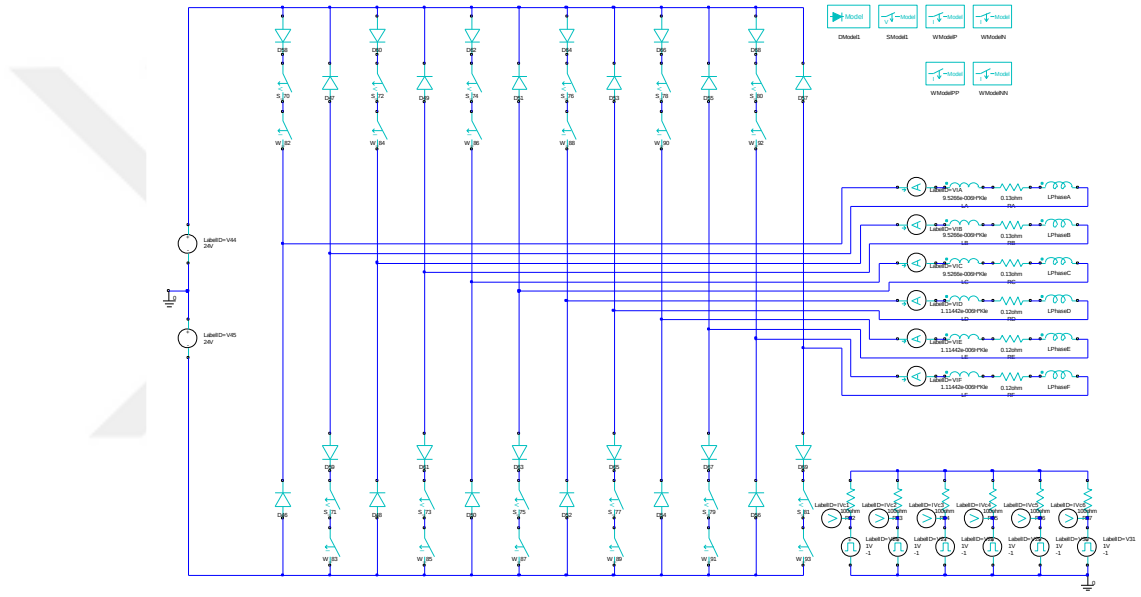


Şekil 3.37 Trapezoidal akım formu ile ÇSARM tork eğrileri

Şekil 3.37’de verilen ÇSARM tork eğrileri incelendiğinde tork dalgalanmasında önemli bir düşüş görülmemiştir ayrıca iç rotorlu ARM faz

akımının düşürülmesinden kaynaklı ortalama tork değerleri azalmıştır. Dolayısıyla bu akım durumları dikkate alınmayacaktır.

ÇSARM'yi sürmek için kullanılan 6 fazlı sürücü devresi Şekil 3.38'de verilmiştir. İç ve dış rotorlu ARM fazları farklı akımlarla kontrol edilebilmektedir. Faz akımları ve faz akımlarını açma kapama açıları parametrik olarak benzetim esnasında kullanılabilmektedir. Devrede kullanılan 'i' iç rotorlu ARM akımını, 'ic' dış rotorlu ARM akımını, 'thetaon' iç rotorlu ARM faz akımını açma açısını, 'thetaoff' kapama açısını ve 'thetaono' dış rotorlu ARM faz akımını açma açısını ve 'thetaoffo' kapama açısını göstermektedir.



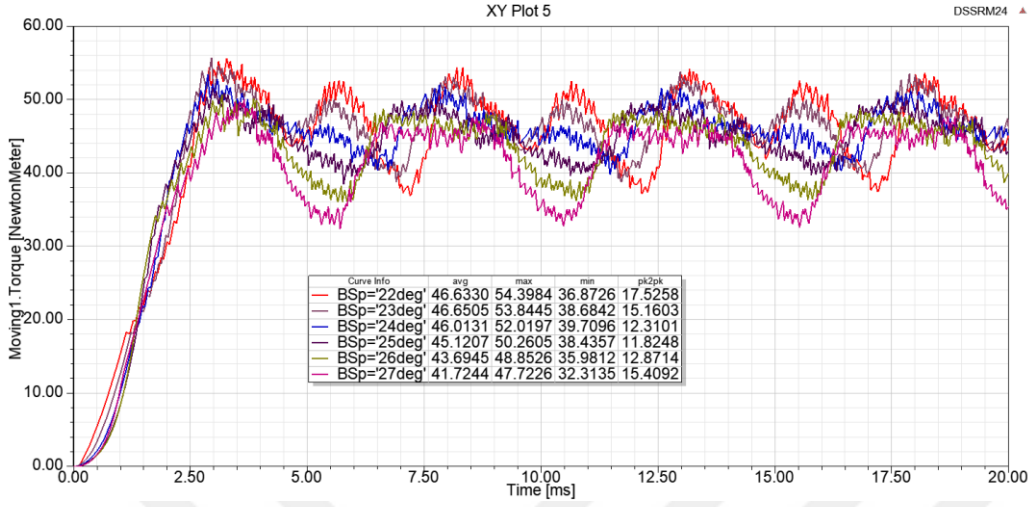
Şekil 3.38 ÇSARM 6 fazlı sürücü devresi

ÇSARM'nin denklem 3.23'e uygun olarak aşağıda verilen stator ve rotor kutup başı açıları için benzetimi yapılmıştır, oluşan tork eğrileri Şekil 3.39'da verilmiştir.

$\beta_{sp} = 22^\circ$ $\beta_{rp} = 37^\circ$ ve $\beta_{spo} = 22^\circ$ $\beta_{rpo} = 37^\circ$ olduğu durumda ortalama tork 46,63Nm ve tork dalgalanması %37

$\beta_{sp} = 23^\circ$ $\beta_{rp} = 38^\circ$ ve $\beta_{spo} = 23^\circ$ $\beta_{rpo} = 38^\circ$ olduğu durumda ortalama tork 46,65Nm ve tork dalgalanması %32

$\beta_{sp} = 24^\circ$ $\beta_{rp} = 39^\circ$ ve $\beta_{spo} = 24^\circ$ $\beta_{rpo} = 39^\circ$ olduğu durumda ortalama tork 46,63Nm ve tork dalgalanması %37



Şekil 3.39 ÇSARM $\beta_{rp} = \beta_{sp} + 15^\circ$, $\beta_{rpo} = \beta_{spo} + 15^\circ$ stator ve rotor kutup başı açılarına göre tork eğrileri

$\beta_{sp} = 25^\circ$ $\beta_{rp} = 40^\circ$ ve $\beta_{spo} = 25^\circ$ $\beta_{rpo} = 40^\circ$ olduğu durumda ortalama tork 46 Nm ve tork dalgalanması %26,7

$\beta_{sp} = 26^\circ$ $\beta_{rp} = 41^\circ$ ve $\beta_{spo} = 26^\circ$ $\beta_{rpo} = 41^\circ$ olduğu durumda ortalama tork 46,7Nm ve tork dalgalanması %29,4

$\beta_{sp} = 27^\circ$ $\beta_{rp} = 42^\circ$ ve $\beta_{spo} = 27^\circ$ $\beta_{rpo} = 42^\circ$ olduğu durumda ortalama tork 41,72Nm ve tork dalgalanması %37 olarak sonuçlanmıştır.

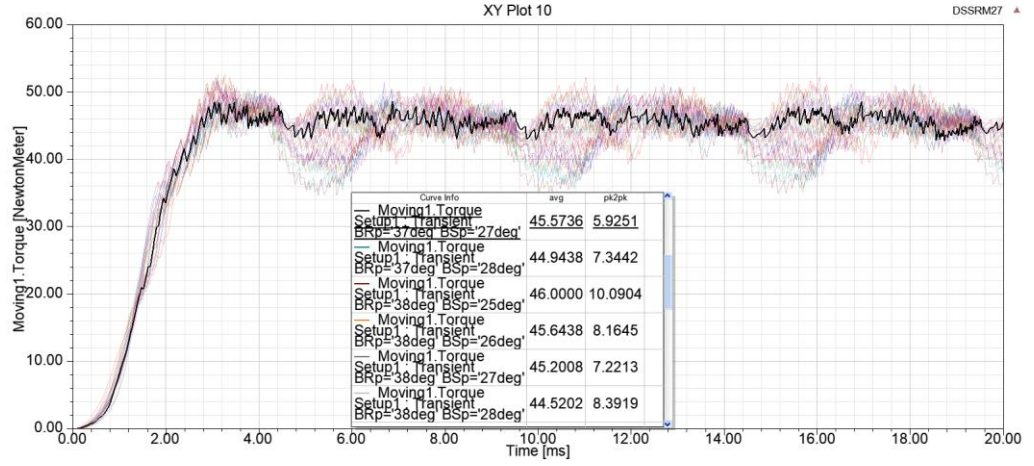
Rotor parçası açılarını (β_{rp} ve β_{rpo}) stator kutup başı açılarından (β_{sp} ve β_{spo}) bağımsız olarak tarayıp oluşan tork dalgalanmasını araştırmak için ÇSARM'nin yine ANSYS Maxwell programı Optimetrics ile stator ve rotorlarının kutup başı açılarını tarayan örnekler ve elde edilen tork benzetim sonuçları Şekil 3.40'da verilmiştir.

$$25^\circ \leq \beta_{sp} \leq 28^\circ$$

$$36^\circ \leq \beta_{rp} \leq 41^\circ$$

$$25^\circ \leq \beta_{spo} \leq 28^\circ$$

$$36^\circ \leq \beta_{rpo} \leq 41^\circ$$

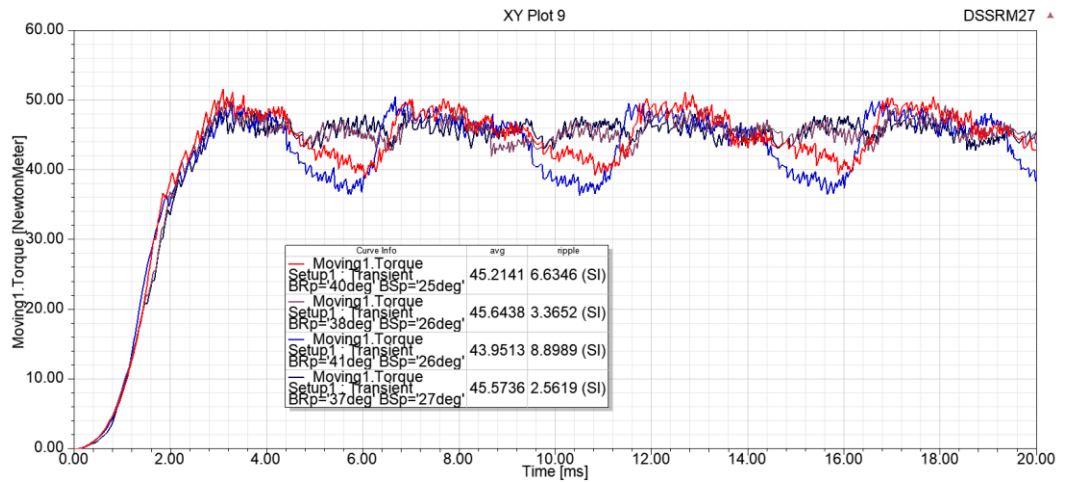


Şekil 3.40 ÇSARM tork eğrileri

Mecrow'un (2002) önerdiği geometri ($\beta_{rp} = \beta_{sp} + 15^\circ$, $\beta_{rpo} = \beta_{spo} + 15^\circ$) ile rotor parçası ve stator kutup başı açılarının birbirinden bağımsız olduğu örneklerden bazıları Tablo 3.7'de verilmiştir. Şekil 3.41'de bu örneklerle ait tork eğrileri gösterilmiştir.

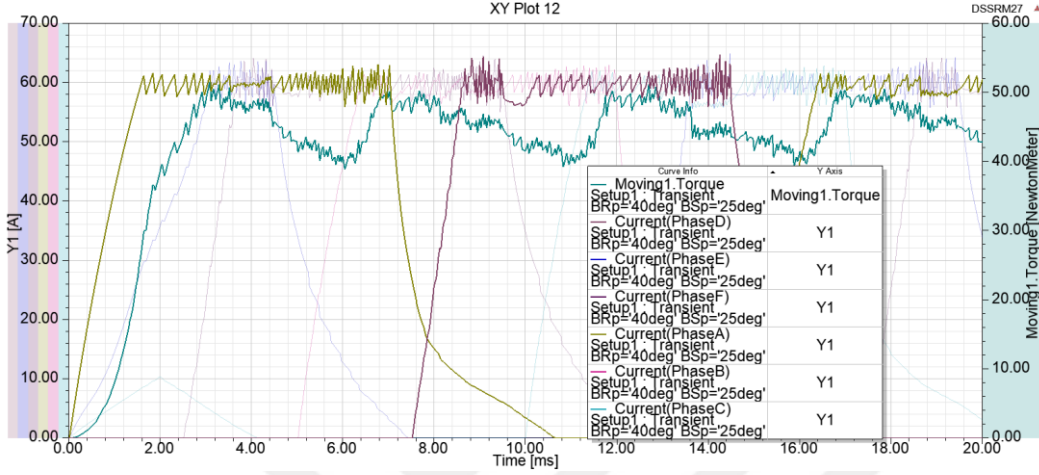
Tablo 3.7 Stator ve rotor kutup başı açlarına göre torkun değişimi

Rotor Parçası ve Stator Kutup Başı Açıları		Ortalama Tork [Nm]	Tork Dalgalanması [%]
$\beta_{sp} = \beta_{spo} = 25^\circ$	$\beta_{rp} = \beta_{rpo} = 40^\circ$	45,21	26,7
$\beta_{sp} = \beta_{spo} = 26^\circ$	$\beta_{rp} = \beta_{rpo} = 41^\circ$	43,95	29,4
$\beta_{sp} = \beta_{spo} = 26^\circ$	$\beta_{rp} = \beta_{rpo} = 38^\circ$	45,64	17,5
$\beta_{sp} = \beta_{spo} = 27^\circ$	$\beta_{rp} = \beta_{rpo} = 37^\circ$	45,57	13

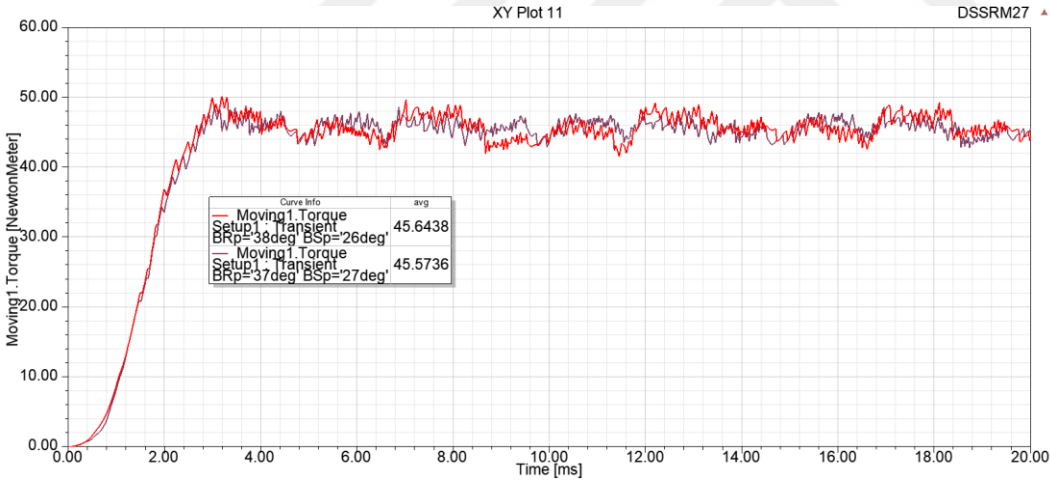


Şekil 3.41 ÇSARM tork eğrileri

$\beta_{sp} = 25^\circ$ $\beta_{rp} = 40^\circ$ ve $\beta_{spo} = 25^\circ$ $\beta_{rpo} = 40^\circ$ olduğu durumda faz akımları ve tork eğrisi Şekil 3.42’de birlikte verilmiştir. Burada oluşan tork dalgalanmasının faz akımlarının açma kapama açılarından kaynaklanmadığı görülmektedir. Rotor parçası ve stator kutup başı açılarının uygun olmaması yüksek tork dalgalanmasına sebep olmaktadır.



Şekil 3.42 $\beta_{sp} = \beta_{spo} = 25^\circ$ ve $\beta_{rp} = \beta_{rpo} = 40^\circ$ durumunda faz akımları ve toplam tork



Şekil 3.43 ÇSARM tork eğrileri

Benzetim sonuçları incelendiğinde aşağıda aralığı verilen rotor parçaları ve stator kutup başı açıları sürekli durum için yaklaşık olarak %10 tork dalgalanması sonucunu vermektedir.

$$26^\circ \leq \beta_{sp} \leq 27^\circ$$

$$37^\circ \leq \beta_{rp} \leq 38^\circ$$

$$26^\circ \leq \beta_{spo} \leq 27^\circ$$

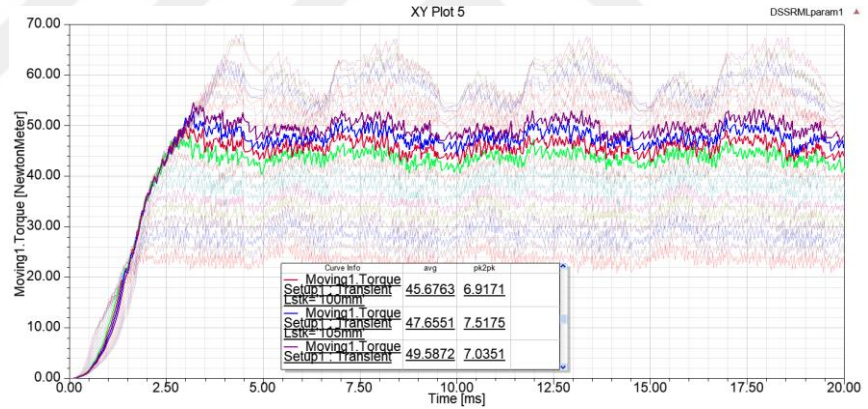
$$37^\circ \leq \beta_{rpo} \leq 38^\circ$$

Şekil 3.43’de elde edilen tork eğrileri birbirine çok yakındır, bu durum imalat esnasında oluşabilecek küçük sapmaların tork dalgalanması üzerine fazla bir etki bırakmasına izin vermeyecektir.

3.6. Uzun Adım Sarımlı ÇSARM Benzetim Sonuçları

3.6.1 Paketleme boyunun motor performansına etkisi

Diğer parametreler sabit tutularak ÇSARM’nin paketleme boyu 50 mm $\leq L_{stk} \leq 150$ mm aralığında 5mm adımlarla taranarak benzetimi yapılmış ve benzetim sonucu elde edilen tork eğrileri Şekil 3.44’te verilmiştir. Benzetim sonuçlarına göre paketleme boyu 100 mm $\leq L_{stk} \leq 115$ mm aralığında iken tork dalgalanmasının en az olduğu görülmektedir. Parçalı rotor yapısından dolayı prototip ÇSARM’nin kolay üretimi için paketleme boyu olan Lstk değerinin 100 mm olarak seçilmiş olmasında ortalama tork ve tork dalgalılığı bakımından herhangi bir sorun bulunmamaktadır. Paketleme boyu değişiminin sargı dirençlerinin değişmesine neden olduğu bilinmelidir.



Şekil 3.44 ÇSARM paketleme boyunun ortalama tork ve tork dalgalanmasına etkisi

Stator ve rotor paketleme boyunun ortalama tork ve tork dalgalanmasına etkisi Tablo 3.8’de paylaşılmıştır.

Tablo 3.8 Paketleme Boyunun Motor Torkuna Etkisi

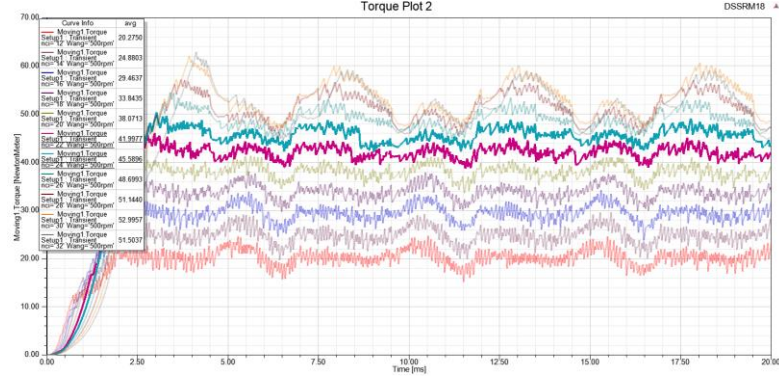
S.No	Lstk [mm]	Tork	
		Ortalama [Nm]	Dalgalanma [%]
1	50	23,68	28,02
2	55	26,07	27,03
3	60	28,33	25,20
4	65	30,57	23,21

S.No	Lstk [mm]	Tork	
		Ortalama [Nm]	Dalgalanma [%]
5	70	32,85	21,88
6	75	35,10	21,72
7	80	37,24	19,09
8	85	39,44	19,04
9	90	41,52	15,99
10	95	43,70	16,29
11	100	45,68	15,14
12	105	47,66	15,77
13	110	49,59	14,19
14	115	51,40	14,24
15	120	53,19	15,87
16	125	54,52	18,46
17	130	56,08	17,98
18	135	57,25	21,43
19	140	58,46	20,18
20	145	59,65	24,51
21	150	60,45	27,22

3.6.2 Sarım sayısının motor performansına etkisi

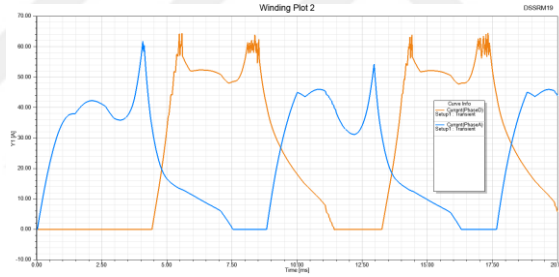
ARM'lerde sarım sayısı motorun temel hızını, bakır kaybını, motor ağırlığını ve endüktansı doğrudan etkiler. Sarım sayısı arttıkça endüktansı artar, motor büyük bir indüktör gibi davranır ve dolayısıyla giriş güç faktörü azalır. Güç faktörünün azalmasıyla birlikte dönüştürücünün VoltAmper (VA) gereksinimi artar ve dönüştürücünün boyutu ve maliyeti de artar.

Diğer parametreler sabit tutularak 48 VDC gerilim ile beslenen ÇSARM'nin sarım sayısının tork üretimi ve tork dalgalanması üzerindeki etkisini incelemek için motor 60 A tepe akımı ile histerezis akım kontrolü uygulanarak ve 500 d/d dönüş hızında iken oluk başına sarım sayısı 12'den 32'ye kadar ikişer artırılarak benzetimi yapılmıştır (Şekil 3.45). Oluk başına düşen sarım sayısı arttıkça sabit oluk doluluk oranı için akım yoğunluğu ve dolayısıyla makinenin soğutma ihtiyacı artacaktır. Akım yoğunluğu, ortalama torku ve tork dalgalanmaları incelendiğinde iç ve dış rotorlu ARM'ler için faz sarım sayısı 48 tur olarak seçilmiştir. Faz akımı açma açısı 0°, kapama açısı 21°'dir.

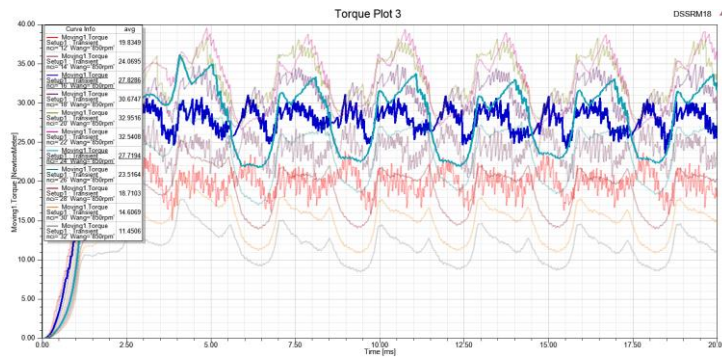


Şekil 3.45 ÇSARM faz sarım sayısının torka etkisi

Motor 850 devir/dakika hızında döndürülerek 500 d/d hızındaki faz akımları açma kapama açıları değiştirilmeden benzetim tekrarlandığında Şekil 3.46'dan da görüldüğü üzere iç rotorlu ARM faz akımlarının izin verilen tepe noktasına erişememesinden dolayı ortalama tork düşmektedir. Dolayısıyla rotor hızına göre faz akımları açma kapama açılarının değiştirilmesi gerekmektedir. Şekil 3.47'de 850d/d hız için sarım sayısı değişiminin motor torkuna etkisi gösterilmiştir.



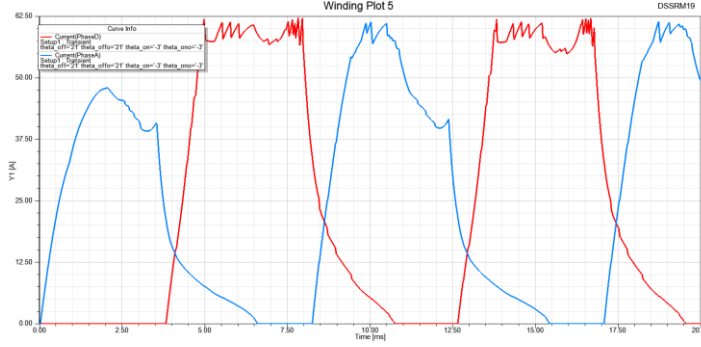
Şekil 3.46 ÇSARM faz akımları (Hız 850 d/d)



Şekil 3.47 ÇSARM faz sarım sayısının motor torkuna etkisi (Hız 850 d/d)

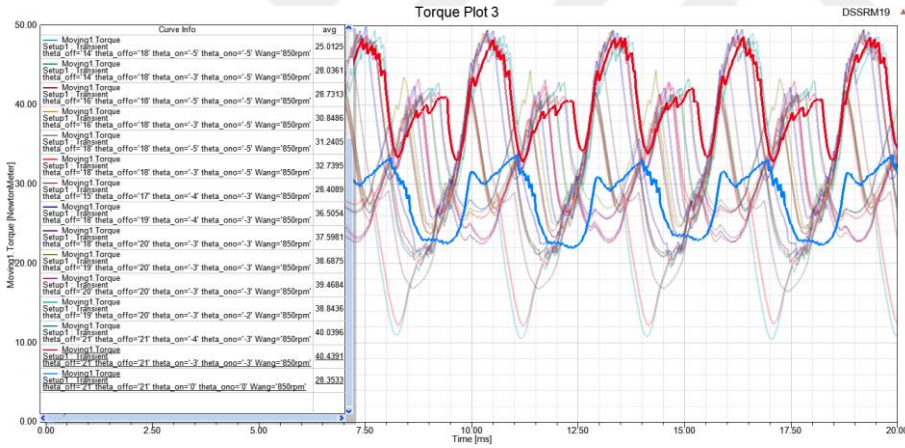
Faz sarım sayısı 48 tur olarak sabit tutulmuş ve faz akımları açma kapama açıları değiştirilerek faz akımlarının izin verilen tepe noktasına erişmesi ve dolayısıyla ortalama torkun artması hedeflenmiştir. Kabaca taranan açma kapama açıları arasında (Faz akımı açma açısı -3° , kapama açısı 18°) motor 850 d/d

hızındayken 40,4 Nm ortalama tork seviyesine ulaşılmıştır. Şekil 3.48’de mavi renkli iç rotorlu ARM faz akımının dalga şekline bakıldığında rotor parçasının stator ile kesişmeye başladığı anda akımın hızla düşmesinden dolayı motorun 500 d/d hızında çalışmasına göre daha fazla tork dalgalanması oluşmaktadır.



Şekil 3.48 ÇSARM faz akımları (Hız 850 d/d)

850 d/d rotor hızı için iç ve dış rotorlu ARM faz akımları açma ve kapama açılarının değişimi ile elde edilen ÇSARM tork eğrileri Şekil 3.49’da verilmiştir.



Şekil 3.49 ÇSARM faz akımı açma kapama açılarının motor torkuna etkisi (Hız 850 d/d)

3.6.3 Stator boyunduruk kalınlığının motor performansına etkisi

ARM tasarımında stator boyunduruk kalınlığının seçimi motor performansı için önemli bir parametredir. Olması gerekenden ince seçildiği takdirde stator boyunduruğu doyuma ulaşacak ve tork üretimi azalacaktır. Sabit stator dış çapı düşünüldüğünde stator boyunduruk kalınlığının olması gerekenden daha kalın seçilmesi stator oluk boşluğunun azalmasına ve akım yoğunluğunun artmasına neden olacaktır. Aynı zamanda stator ağırlığını da artıracığından kütleli tork yoğunluğunun azalmasına da neden olacaktır. Stator boyunduruk kalınlığı akustik gürültünün azalmasında ve yapısal bozukluğun engellenmesinde etkilidir.

ÇSARM'yi oluşturan iç rotorlu ARM'nin stator boyunduruk kalınlığı,

$$6mm \leq b_{sy} \leq 12mm \quad \text{aralığında,}$$

dış rotorlu ARM'nin stator boyunduruk kalınlığı,

$$6mm \leq b_{syo} \leq 10mm \quad \text{aralığında 2 mm adımlarla taranmıştır.}$$

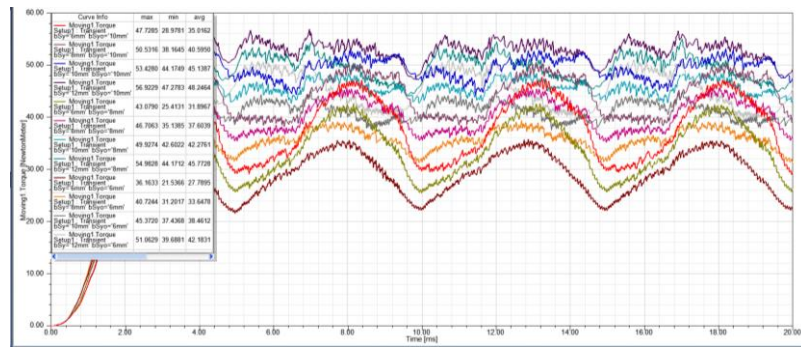
Stator kutup genişlikleri sabit tutulmamış,

$$w_s = k \cdot b_{sy} \quad k = 1,35$$

$$w_{so} = k_o \cdot b_{syo} \quad k_o = 1,25$$

olarak benzetim yapılmıştır. $k=1$ ve $k_o=1$ olarak alındığında stator oluk alanı artacaktır fakat aynı anda 2 fazın birden enerjilendirildiği durumlar olduğundan stator kutup genişliği stator boyunduruk kalınlığından daha fazla tutulmuştur. Bu durum bir sonraki aşamada verilmiştir.

Stator boyunduruk kalınlığı arttıkça ortalama tork artmıştır fakat oluk alanı azaldığından istenilen akım yoğunluğuna ulaşılamamıştır. ÇSARM için iç rotorlu ARM stator boyunduruk kalınlığı $b_{sy}=10mm$ ve dış rotorlu ARM stator boyunduruk kalınlığı $b_{syo}=8mm$ seçildiğinde oluk alanları $300mm^2 \pm 10mm^2$ sınırı içinde kalmıştır ve bu durum istenilen akım yoğunluğunu sağlamaktadır.



Şekil 3.50 ÇSARM stator boyunduruk kalınlığının motor torkuna etkisi

İç ve dış rotorlu ARM stator boyunduruk kalınlıklarının oluk alanları, ortalama tork ve tork dalgalanması üzerine etkisi Tablo 3.9'da verilmiştir.

Tablo 3.9 Stator Boyunduruk Kalınlıklarına Göre Torkun Değişimi

Sıra No	bSy [mm]	bSy _o [mm]	İç Rotorlu ARM Oluk Alanı [mm ²]	Dış Rotorlu ARM Oluk Alanı [mm ²]	Ortalama Tork [Nm]	Tork Dalgalanması [%]
1	6	10	514	256	38,2194	49,06
2	8	10	404	226	44,3672	27,87
3	10	10	306	196	49,4524	18,71
4	12	10	221	168	52,868	18,24
5	6	8	514	368	34,2564	51,57
6	8	8	404	330	40,5468	28,53
7	10	8	306	292	45,7561	16,01
8	12	8	221	260	49,6141	21,79
9	6	6	514	500	29,3665	49,81
10	8	6	404	454	35,8318	26,58
11	10	6	306	410	41,1917	19,26
12	12	6	221	370	45,2993	25,11

3.6.4 Stator kutup genişliğinin motor performansına etkisi

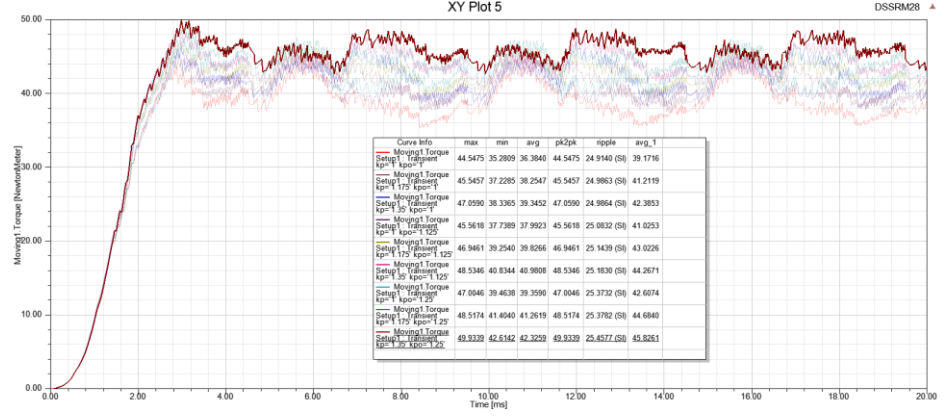
Bazı konumlarda aynı anda iki faza enerji verilmesi gerektiğinden enerjilendirilmiş iki faz arasındaki stator kutbunun erken doyuma ulaşmaması için stator kutup genişliği stator boyunduruk kalınlığından daha fazla olması gerekir.

ws iç rotorlu ARM'nin, wso dış rotorlu ARM'nin stator kutup genişlikleri olmak üzere

$$ws = k \cdot bsy, 1 \leq k \leq 1,35$$

$$wso = ko \cdot bsyo, 1 \leq ko \leq 1,25$$

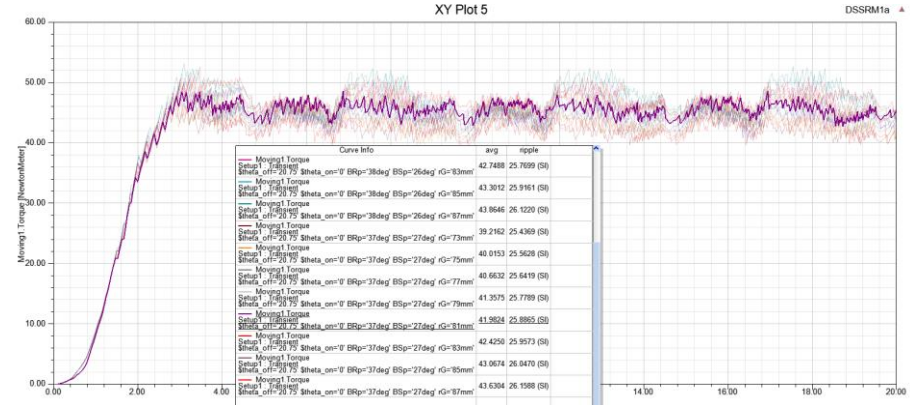
alınarak ve diğer parametreler sabit tutularak benzetim sonuçları Şekil 3.51'de verilmiştir. Dış rotorlu ARM'nin stator oluk alanı toleransı daha az olduğundan ko katsayısı 1,25 ile sınırlandırılmıştır. Benzetim sonucuna göre k=1,35 ve ko=1,25 alındığında hem ortalama tork değeri artmış hem de tork dalgalanması azalmıştır.



Şekil 3.51 ÇSARM stator kutup genişliklerinin motor torkuna etkisi

Tasarımın başlangıcında iç rotorlu ARM'nin hava aralığı çapı yaklaşık olarak belirlenmişti. Burada tekrar, belirlenen diğer parametreler sabit tutularak, $\beta_{sp} = \beta_{spo} = 26^\circ$, $\beta_{rp} = \beta_{rpo} = 38^\circ$ ve $\beta_{sp} = \beta_{spo} = 27^\circ$, $\beta_{rp} = \beta_{rpo} = 37^\circ$ durumları için hava aralığı çapı değişimin motor performansına etkisi Şekil 3.52'de benzetim sonuçları ile verilmiştir. Hava aralığı çapı $146\text{mm} \leq D_g \leq 174\text{mm}$ arasında 2mm adım ile taranmıştır ($D_g = 2\text{ rG}$).

Benzetim sonuçları incelendiğinde, yaklaşık aynı akım yoğunluğunu sağlamak için stator oluk alanları gözönüne alınarak iç rotorlu ARM hava aralığı çapı 162 mm olarak sabitlenmiştir.

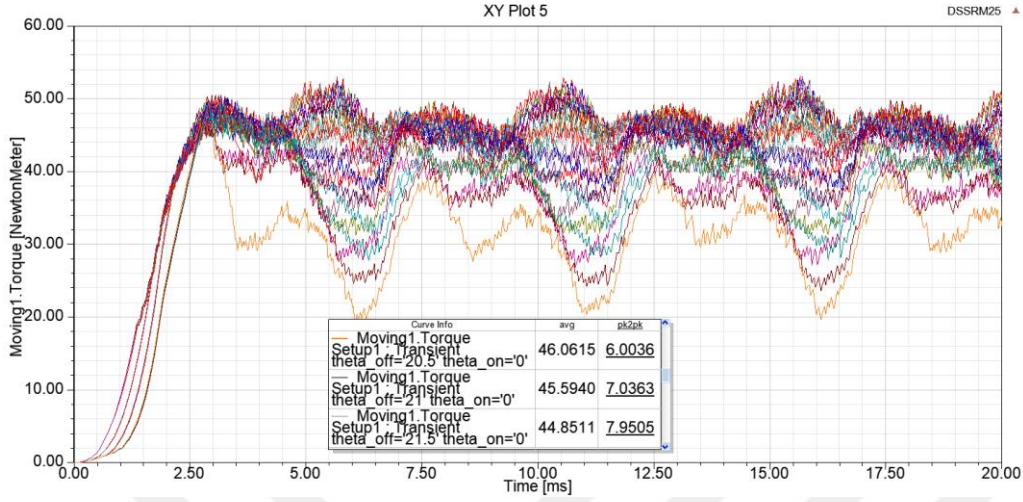


Şekil 3.52 ÇSARM stator hava aralığı çapının motor torkuna etkisi

3.6.5 Faz akımları açma-kapama açılarının motor performansına etkisi

Faz akımları açma-kapama açılarının ortalama tork, tork dalgalılığı ve motor verimi üzerinde büyük bir etkisi vardır. 48 Vdc besleme gerilimi ve 500 devir/dakika hızında $\beta_{sp} = \beta_{spo} = 26^\circ$ ve $\beta_{rp} = \beta_{rpo} = 38^\circ$ durumunda yaklaşık olarak en uygun faz akımları açma-kapama mekanik açılarını bulmak için taranmış,

Şekil 3.53’de oluşan tork dalga şekilleri ve Tablo 3.10’da oluşan ortalama tork ve tork dalgalanma oranı değerleri verilmiştir.



Şekil 3.53 Faz akımları açma kapama açılarının torka etkisi

Faz akımı açma açısının olması gerekenden daha geç olması akımın istenen seviyeye ulaşmasını engeller veya daha geç ulaşmasını sağlar dolayısıyla faza uygulanan etkin akım değeri azalır ve ortalama torkun düşmesine ve tork dalgalanmasının artmasına sebep olur. Faz akımı açma açısının olması gerekenden daha önce olması motor verimini düşürür.

Aynı şekilde faz akımı kapama açısının olması gerekenden daha geç olması akımın faz endüktansının negatif eğimli bölgede hala var olmasını sağlar ve negatif veya frenleme torku oluşturur ve dolayısıyla ortalama torku düşürür, tork dalgalanmasını artırır. Faz akımı kapama açısının olması gerekenden daha önce olması faza uygulanan etkin akım değerini ve ortalama torku düşürür. Bu sebeplerle en uygun faz akımları açma kapama açılarının belirlenmesi gerekmektedir.

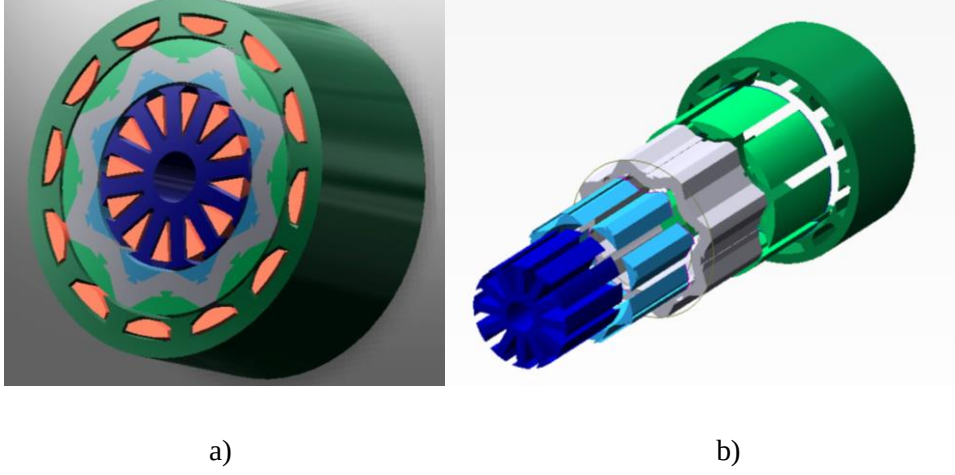
Burada belirlenen 500 d/d rotor hızı için faz akımları açma kapama açıları daha yüksek hızlarda kullanılamaz ve yeniden belirlenmesi gerekir. Bu durum ARM motorlarının çeşitli hızlarda sürülmesini zorlaştırır.

Tablo 3.10 incelendiğinde iç ve dış rotorlu ARM faz akımları açma açısı 0°, kapama açısı 20,5° veya 21° olduğunda tork dalgalanması yönünden en uygun açılar olduğu görülmektedir.

Tablo 3.10 500d/d hız için faz akımı açma kapama açısının motor performansına etkisi

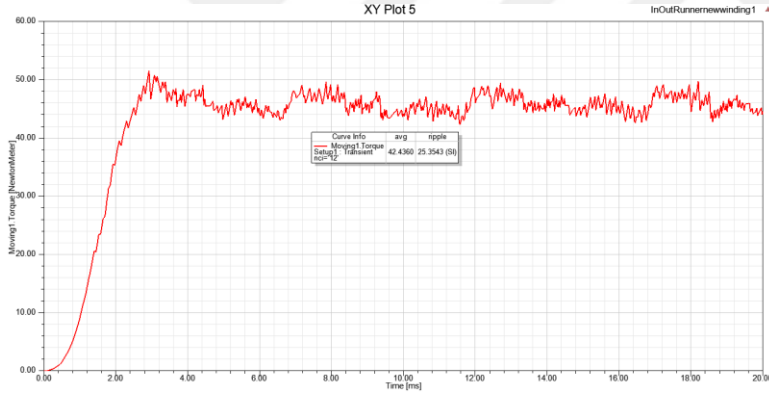
Sıra No	Faz Akımı Açma Açısı [deg]	Faz Akımı İletim Açısı [deg]	Faz Akımı Kapama Açısı [deg]	Ortalama Tork [Nm]	Tork Tepe Çukur Noktaları Farkı [Nm]	Tork Dalgalanması [%]
1	-2	19,5	17,5	45,178	18,39	40,70
2	-2	20,5	18,5	46,1777	14,17	30,69
3	-2	21,5	19,5	46,5215	11,84	25,46
4	-2	22,5	20,5	46,1559	9,02	19,55
5	-1	19,5	18,5	46,2997	13,99	30,21
6	-1	20,5	19,5	46,7033	9,74	20,85
7	-1	21,5	20,5	46,1891	9,01	19,50
8	-1	22,5	21,5	44,921	7,90	17,58
9	0	19,5	19,5	46,5313	8,42	18,10
10	0	20,5	20,5	46,0615	6,00	13,03
11	0	21	21	45,594	7,04	15,43
12	0	21,5	21,5	44,8511	7,95	17,73
13	0	22,5	22,5	43,0063	8,73	20,30
14	1	19,5	20,5	45,6436	8,30	18,19
15	1	20,5	21,5	44,4057	7,83	17,63
16	1	21,5	22,5	42,5958	9,81	23,02
17	1	22,5	23,5	39,8934	14,59	36,56
18	2	19,5	21,5	43,5967	11,09	25,43
19	2	20,5	22,5	41,8504	12,64	30,21
20	2	21,5	23,5	39,0056	15,21	39,00
21	2	22,5	24,5	36,3471	16,53	45,48
22	3	19,5	22,5	40,3428	15,32	37,99
23	3	20,5	23,5	37,6178	17,14	45,57
24	3	21,5	24,5	34,6019	19,82	57,29
25	3	22,5	25,5	31,0303	20,62	66,46

Benzetim sonuçlarına göre en az tork dalgalanmasını veren ÇSARM boyutları elde edilebilmiştir. Son boyutları ile ÇSARM'nin tork ve akım dalga şekilleri benzetim sonuçları verilmiştir. Bütün faz akımlarının tepe değeri 60A, ortalama tork değeri 45 Nm ve tork dalgalanması %10'dan küçüktür.

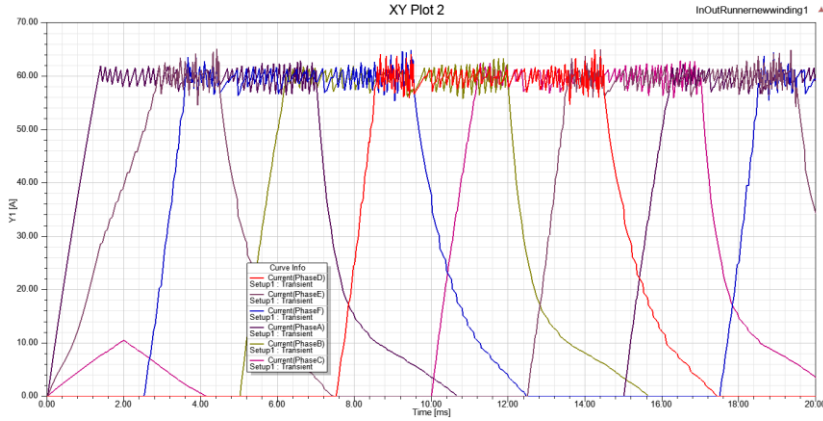


Şekil 3.54 Uzun adım sarımlı ÇSARM görünümü a) Kesit görünümü b) Stator ve rotor parçaları

Elektromanyetik tasarımı tamamlanmış Şekil 3.54’te verilen ÇSARM’ye ait tork eğrisi Şekil 3.55’de ve faz akımlarına ait eğriler Şekil 3.56’da gösterilmiştir. Boyutsal tarama yoluyla optimize edilmiş uzun adım sarımlı ÇSARM boyutları Tablo 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.55 Tasarımı tamamlanmış ÇSARM tork eğrisi (Hız 500 d/d)



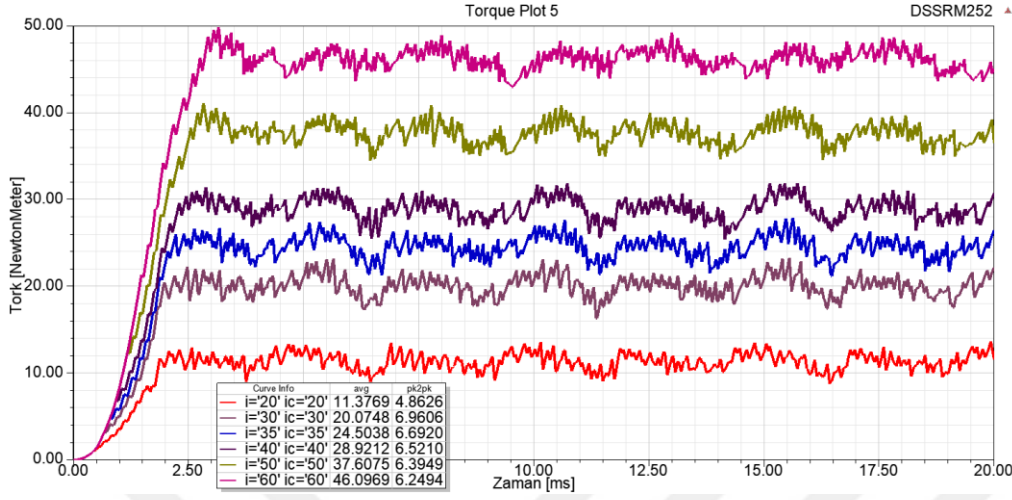
Şekil 3.56 Tasarımı tamamlanmış ÇSARM faz akımları şekilleri

Tablo 3.11 Tasarımı Tamamlanan Uzun Adım Sarımlı ÇSARM Boyutları

Sembol	Tanım	Değer
Ds	Stator dış çapı [mm]	210
L	Stator ve rotor uzunluğu [mm]	100
Dg	Hava aralığı çapı [mm]	162
g	Hava aralığı [mm]	0,3
bsy	Stator boyunduruk kalınlığı [mm]	10
hs	Stator kutup yüksekliği [mm]	13,85
hsp	Trapezoid yüksekliği [mm]	5
ws	Stator kutup genişliği [mm]	13,5
hr	Rotor parçası yüksekliği [mm]	10
hk	Rotor parçası kuyruk yüksekliği [mm]	4
β_{sp}	Stator kutup başı açısı [deg.]	26
β_{rp}	Rotor parçası kutup açısı [deg.]	38
GG	İç ve dış rotor parçaları tabanları arası mesafe [mm]	0
wso	Stator kutup genişliği [mm]	10
bsyo	Stator boyunduruk kalınlığı [mm]	8
Dso	Stator dış çapı [mm]	55,55
Dgo	Hava aralığı çapı [mm]	55,70
go	Hava aralığı [mm]	0,3
hso	Stator kutup yüksekliği [mm]	32,55
hspo	Trapezoid yüksekliği [mm]	4
hro	Rotor parçası yüksekliği [mm]	8
β_{spo}	Stator kutup başı açısı [deg.]	26
β_{rpo}	Rotor kutup açısı [deg.]	38
hko	Rotor parçası kuyruk yüksekliği [mm]	3
Dsft	Şaft çapı [mm]	30

ÇSARM 48 VDC gerilim altında 500d/d hızında çeşitli yüklerde benzetimi yapılmıştır. Yük değişimlerinde faz akımları açma kapama açıları sabit alınmıştır.

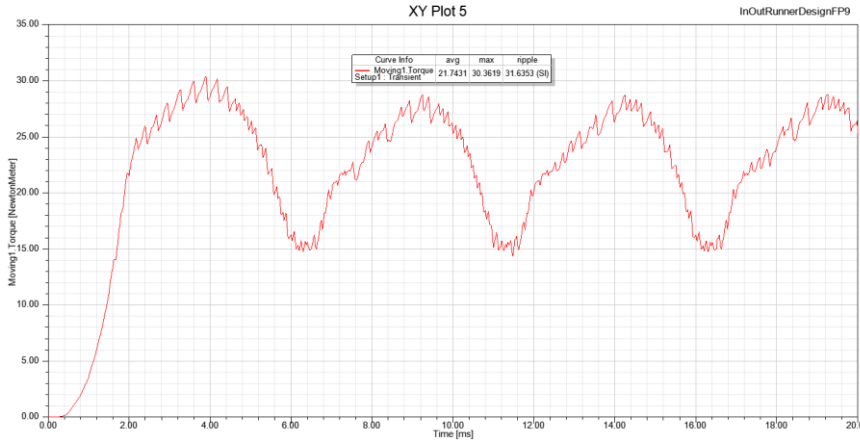
Ortalama tork ve tork dalgalanmaları Şekil 3.57’de gösterilmiştir. i, iç rotorlu ARM akımı ve ic ise dış rotorlu ARM akımıdır.



Şekil 3.57 Tasarımı tamamlanmış ÇSARM çeşitli yüklerde tork eğrileri (Rotor Hızı 500d/d)

3.7 İç Rotorlu ARM Benzetim Sonuçları

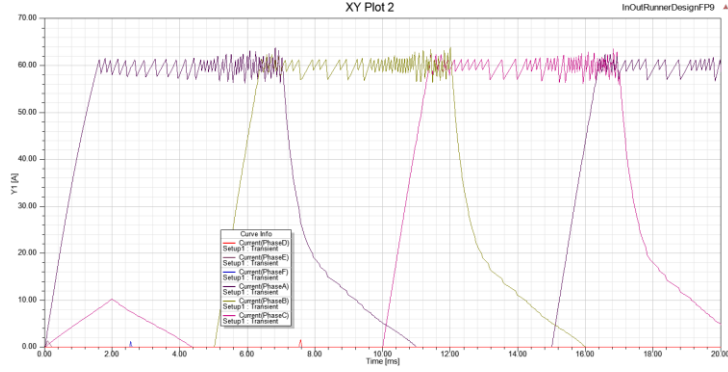
ANSYS Maxwell programıyla ÇSARM yapısında sadece iç rotorlu ARM’nin 48VDC besleme ve 500 d/d hızda benzetimi yapılmıştır. Benzetim sonucunda oluşan tork eğrisi Şekil 3.58’de ve faz akımları dalga şekilleri Şekil 3.59’da verilmiştir.



Şekil 3.58 İç rotorlu ARM tork eğrisi

Faz akımları açma açısı 0°, kapama açısı 21° ve faz akımları tepe değeri 60 A olarak benzetimi gerçekleştirilmiştir.

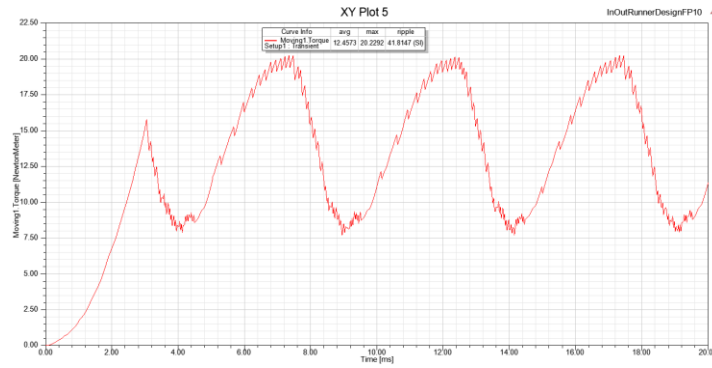
Şekil 3.58’de verilen tork grafiğinde ortalama torkun yaklaşık 24 Nm ve tork dalgalanmasının yaklaşık %54 olduğu görülmektedir.



Şekil 3.59 İç rotorlu ARM 3 faz akım eğrileri

3.8 Dış Rotorlu ARM Benzetim Sonuçları

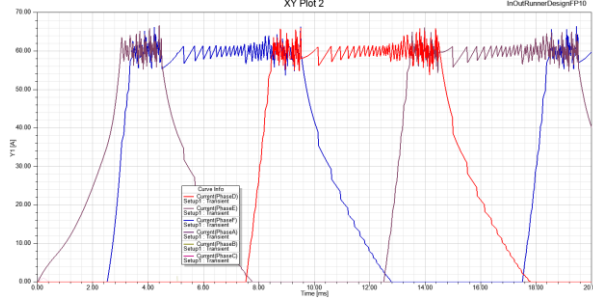
ANSYS Maxwell programıyla ÇSARM yapısında sadece dış rotorlu ARM’nin 48VDC besleme ve 500 d/d hızda benzetimi yapılmıştır. Benzetim sonucunda oluşan tork eğrisi Şekil 3.60’da ve faz akımları dalga şekilleri Şekil 3.61’de verilmiştir.



Şekil 3.60 Dış rotorlu ARM tork eğrisi

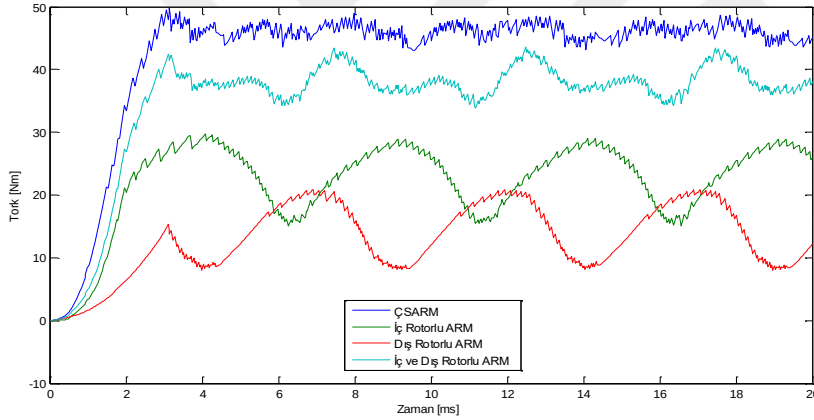
Faz akımları açma açısı 0° , kapama açısı 21° ve faz akımları tepe değeri 60 A olarak benzetimi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.60’da verilen tork grafiğinde ortalama torkun yaklaşık 14,5 Nm ve tork dalgalanmasının yaklaşık %85 olduğu görülmektedir.



Şekil 3.61 Dış rotorlu ARM 3 faz akım eğrileri

Bu tork dalga şekilleri matematiksel olarak toplanıp ÇSARM'nin ürettiği tork dalga şekliyle Şekil 3.62'de karşılaştırılmıştır. İç ve dış rotorlu ARM'lerin oluşturduğu toplam ortalama tork 38 Nm ve tork dalgalılığı %20 civarındadır. ÇSARM olarak çalıştırıldığında 46 Nm ortalama torku ve yaklaşık %10 tork dalgalılığı oluşmaktadır.

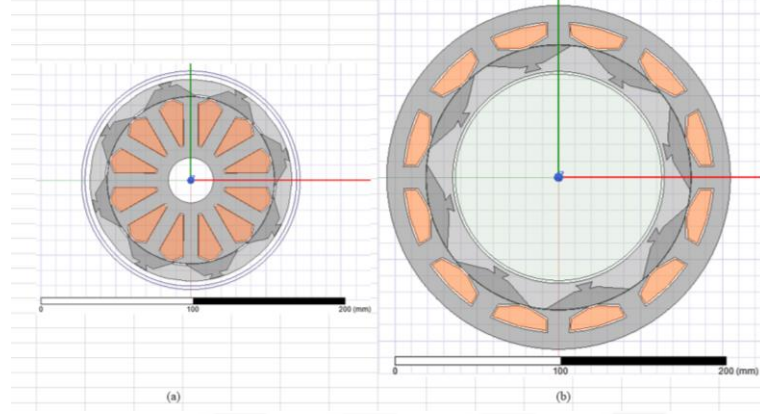


Şekil 3.62 ÇSARM, iç ve dış rotorlu ARM tork eğrileri

ÇSARM yapısında oluşan iç ve dış rotorlu ARM'lerin ayrı ayrı çalıştırılması ile oluşan torkların toplamının ÇSARM olarak çalıştırıldığında elde edilen torktan daha az olmasının nedenini araştırmak için Şekil 3.63'te verilen iç ve dış rotorlu ARM yapıları birbirinden bağımsız olarak oluşturulmuş ve elektromanyetik benzetimi yapılmıştır.

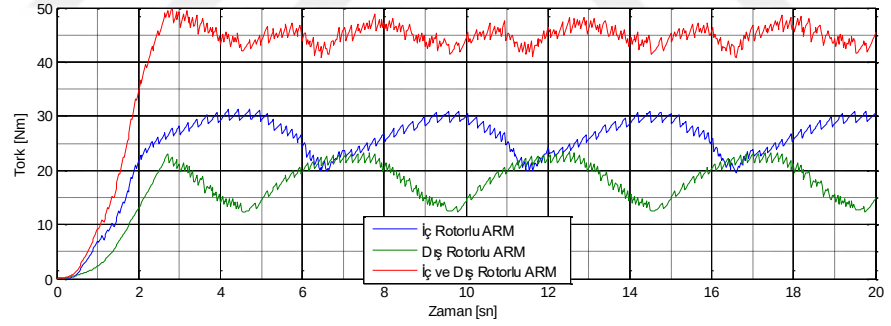
Boyutları ÇSARM yapısındaki iç ve dış rotorlu ARM boyutlarıdır. Dönüştürücü gerilimi 48 VDC ve rotor hızı 500 d/d'dır.

3'er fazlı 12/8 iç ve dış rotorlu ARM yapılarının faz akımları açma kapama açıları ÇSARM'de olduğu gibi alınmıştır. Faz akımları tepe değeri 60A olarak benzetimi yapılmıştır.



Şekil 3.63 12/8 parçalı rotor yapıları a) Dış rotorlu ARM b) İç rotorlu ARM

Şekil 3.64'te verilen benzetim sonucunda dış rotorlu ARM ortalama torku 18,5 Nm tork dalgalanması % 60, iç rotorlu ARM ortalama torku 26,3 Nm ve tork dalgalanması % 44 olarak bulunmuştur. İç ve dış rotorlu ARM'lerin ürettiği torkların toplamı 44,8 Nm ve tork dalgalanması da yaklaşık %10 olmaktadır.

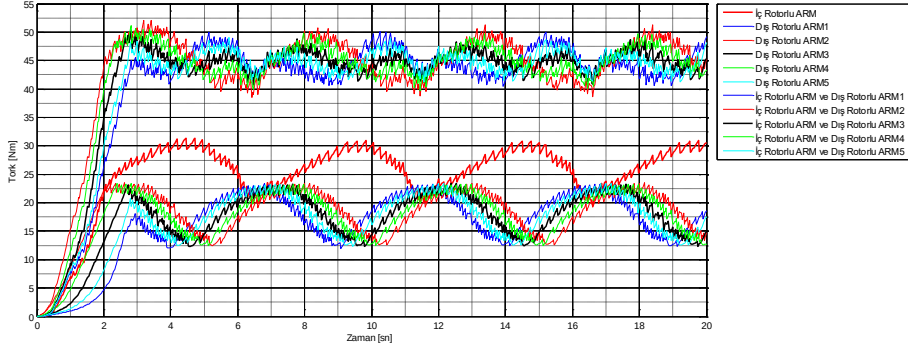


Şekil 3.64 İç ve dış rotorlu ARM tork ve toplam tork eğrileri

Birbirinden bağımsız olarak benzetimi yapılan 3'er fazlı 12/8 iç ve dış rotorlu ARM yapılarının oluşturdıkları torkların toplamı 6 fazlı uzun adım sarımlı ÇSARM yapısının ürettiği torka çok yakındır. Bu durumda ÇSARM yapısında iç ve dış rotorlu ARM'lerin ayrı ayrı çalıştırılması esnasında manyetik akı dağılmakta ve ortalama torkun azalmasına neden olmaktadır. ÇSARM yapısında iç ve dış rotorlu ARM'lerin birbirinden bağımsız olarak çalıştırılması verimi düşürecektir.

Dış rotorlu ARM statorunun saat yönünde ve saat yönünün tersinde birer ve ikişer derece kaydırılmış halleri ile iç rotorlu ARM'nin elektromanyetik

benzetimleri yapılmıştır. Daha sonra iç ve dış rotorlu ARM torkları toplanarak tork dalgallılığı üzerine olan etkisi incelenmiştir.



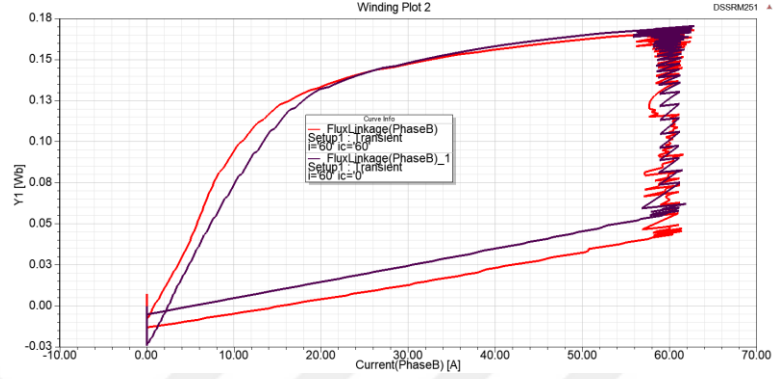
Şekil 3.65 İç ve dış rotorlu (statoru kaydırılmış) ARM tork ve toplam tork eğrileri

Dış rotorlu ARM statorunun kaydırılması sonucu oluşan dış rotorlu ARM tork eğrileri, iç rotorlu ARM torku ile toplandığında oluşan tork eğrileri Şekil 3.65'te verilmiştir. Şekil 3.65 incelendiğinde dış rotorlu ARM statorunun kaydırılması sonucunda iç ve dış rotorlu ARM torklarının toplamının oluşturduğu tork dalgalanmasını arttığı görülmektedir. Böylelikle iç ve dış rotorlu ARM statorlarının aynı hızda olduğu durumda tork dalgalanmasının en az olduğu gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasında 6 fazlı Çift Statorlu Parçalı Rotor Yapılı ARM'nin tork dalgalanması 48 VDC besleme geriliminde 500 d/d olarak tasarlanan temel hızında sürücü üzerinde kontrol teknikleri uygulanmadan %10 mertebesine indirilmiştir. 3'er fazlı 12/8 parçalı iç rotorlu ARM ve 12/8 parçalı dış rotorlu ARM yapılarının benzetimleri sonucunda oluşturdukları torklarının toplamı 6 fazlı ÇSARM yapısının benzetim sonucunda oluşturduğu torka yaklaşık olarak eşit olmaktadır. Ancak ÇSARM yapısı ile iç ve dış rotorlu ARM'lerin ayrı ayrı çalıştırıldıklarında elde edilen torkların toplamından %20 daha fazla tork elde edilmektedir dolayısıyla ÇSARM yapısı ile tork yoğunluğu artırılmış olmaktadır. Böylelikle ÇSARM'nin endüstride kullanım alanının artması beklenmekte özellikle otomotiv sektöründe elektrikli araçlarda kullanılması hedeflenmektedir.

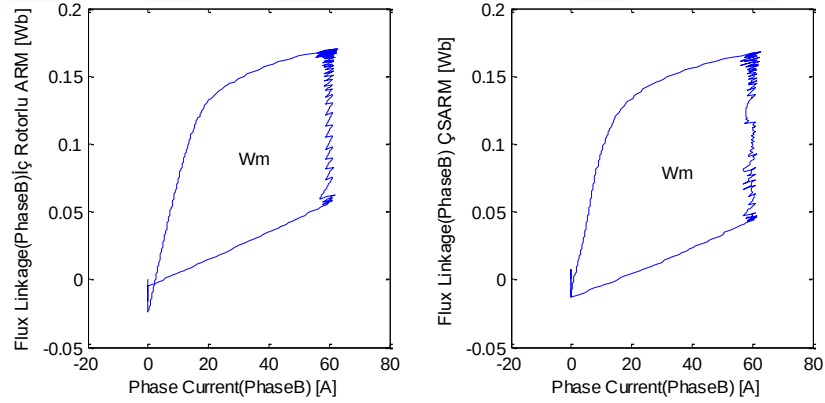
ÇSARM yapısında iç ve dış rotorlu ARM'lerin ayrı ayrı oluşturdukları torkların toplamının ÇSARM torkundan daha düşük olma nedenini açıklayabilmek için Şekil 3.66'da ÇSARM yapısında iç ve dış rotorlu ARM'ler birlikte çalışırken iç rotorlu ARM'nin bir fazına ait enerji dönüşümü ve sadece iç rotorlu ARM çalışırken oluşan aynı faza ait enerji dönüşümü verilmiştir.

Enerji dönüşümünde kapalı eğrinin oluşturduğu alan mekanik işi vermektedir. ÇSARM yapısında iç ve dış rotorlu ARM'ler birlikte çalışırken iç rotorlu ARM'nin bir fazının yaptığı mekanik iş sadece iç rotorlu ARM çalışırken aynı fazın oluşturduğu mekanik işten daha fazladır dolayısıyla üretilen ortalama tork da fazladır.



Şekil 3.66 Uzun adım sarımlı ÇSARM ve iç rotorlu ARM bir faz enerji dönüşümü

Denklem 3.16 kullanılarak iç rotorlu ARM'lerin ortalama torku hesaplanabilir. Şekil 3.67'de W_m ile gösterilen alanlar Matlab programında hesaplanmıştır.

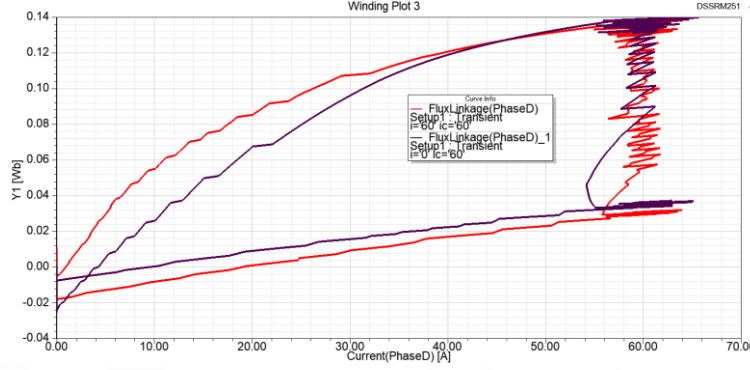


Şekil 3.67 Faz akımı-Halkalanma akısı eğrileri

$$T_e(\text{İçRotorluARM}) = 23.1 \text{ Nm} \quad T_e(\text{ÇSARM}) = 26.3 \text{ Nm}$$

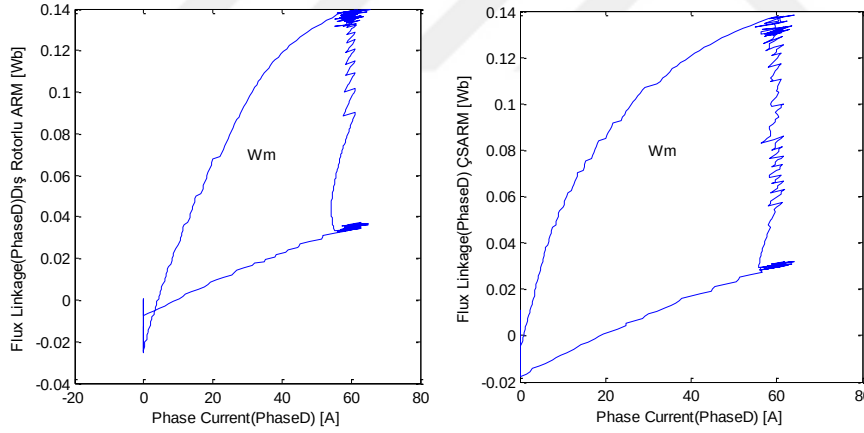
Şekil 3.68'te ÇSARM yapısında iç ve dış rotorlu ARM'ler birlikte çalışırken dış rotorlu ARM'nin bir fazına ait enerji dönüşümü ve sadece dış rotorlu ARM çalışırken oluşan aynı faza ait enerji dönüşümü verilmiştir.

ÇSARM yapısında iç ve dış rotorlu ARM'ler birlikte çalışırken dış rotorlu ARM'nin bir fazının yaptığı mekanik iş sadece dış rotorlu ARM çalışırken aynı fazın oluşturduğu mekanik işten daha fazladır dolayısıyla üretilen ortalama tork da fazladır.



Şekil 3.68 Uzun adım sarımlı ÇSARM ve dış rotorlu ARM bir faz enerji dönüşümü

Yine denklem 3.16 kullanılarak dış rotorlu ARM'lerin ortalama torku hesaplanabilir. Şekil 3.69'da W_m ile gösterilen alanlar Matlab programında hesaplanmıştır.



Şekil 3.69 Dış rotorlu ARM Faz akımı-Halkalanma akısı eğrileri

$$T_e(\text{DışRotorluARM}) = 14.85 \text{ Nm}$$

$$T_e(\text{ÇSARM}) = 19.65 \text{ Nm}$$

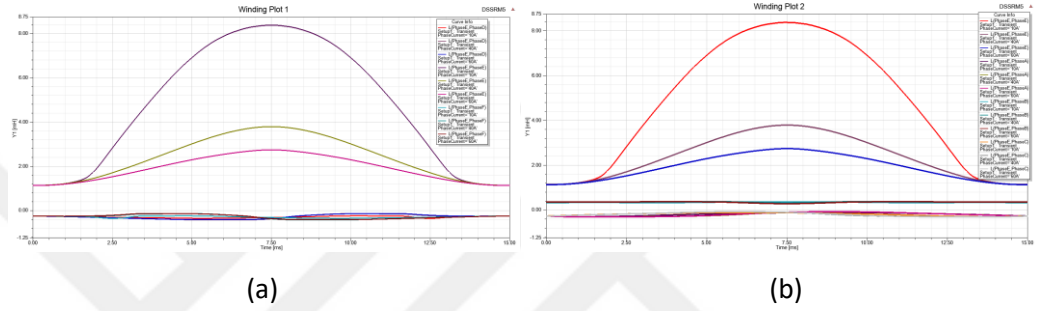
Sonuç olarak sadece iç rotorlu ARM'nin ürettiği tork 23,1 Nm, sadece dış rotorlu ARM'nin ürettiği tork 14,85 Nm ve matematiksel toplamı yaklaşık 38 Nm olarak hesaplanır. ÇSARM yapısında iç ve dış rotorlu ARM'ler birlikte çalışırken iç rotorlu ARM'nin ürettiği tork 26,3 Nm, dış rotorlu ARM'nin ürettiği tork 19,65 Nm olmaktadır. Toplam tork ÇSARM'nin ürettiği tork olan 46 Nm'ye yakındır.

3.9 İç ve Dış Rotorlu ARM Etkileşimi

İç ve dış rotorlu ARM'lerin birbiriyle olan etkileşimleri ortak endüktansları ve hava aralıklarında oluşan manyetik akı yoğunlukları incelenerek görülebilir.

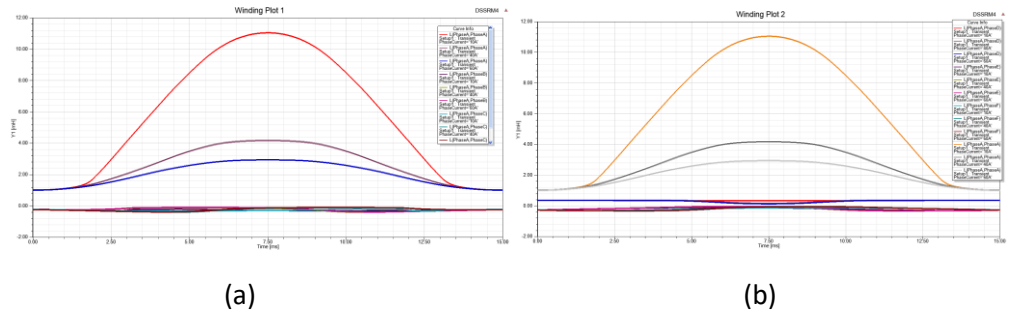
3.9.1 Ortak endüktansları inceleme

Dış rotorlu ARM'nin bir fazına 10A, 40A ve 60A tepe akımı uygulanarak hem motora ait diğer fazlarla oluşturduğu (Şekil 3.70.a) hem de iç rotorlu ARM'nin fazlarıyla oluşturduğu (Şekil 3.70.b) ortak endüktanslar Şekil 3.70'de verilmiştir.



Şekil 3.70 Dış Rotorlu ARM'nin oluşturduğu ortak endüktanslar a) Motora ait diğer fazlarla oluşan ortak endüktans b) İç rotorlu ARM'nin fazlarıyla oluşturduğu ortak endüktans

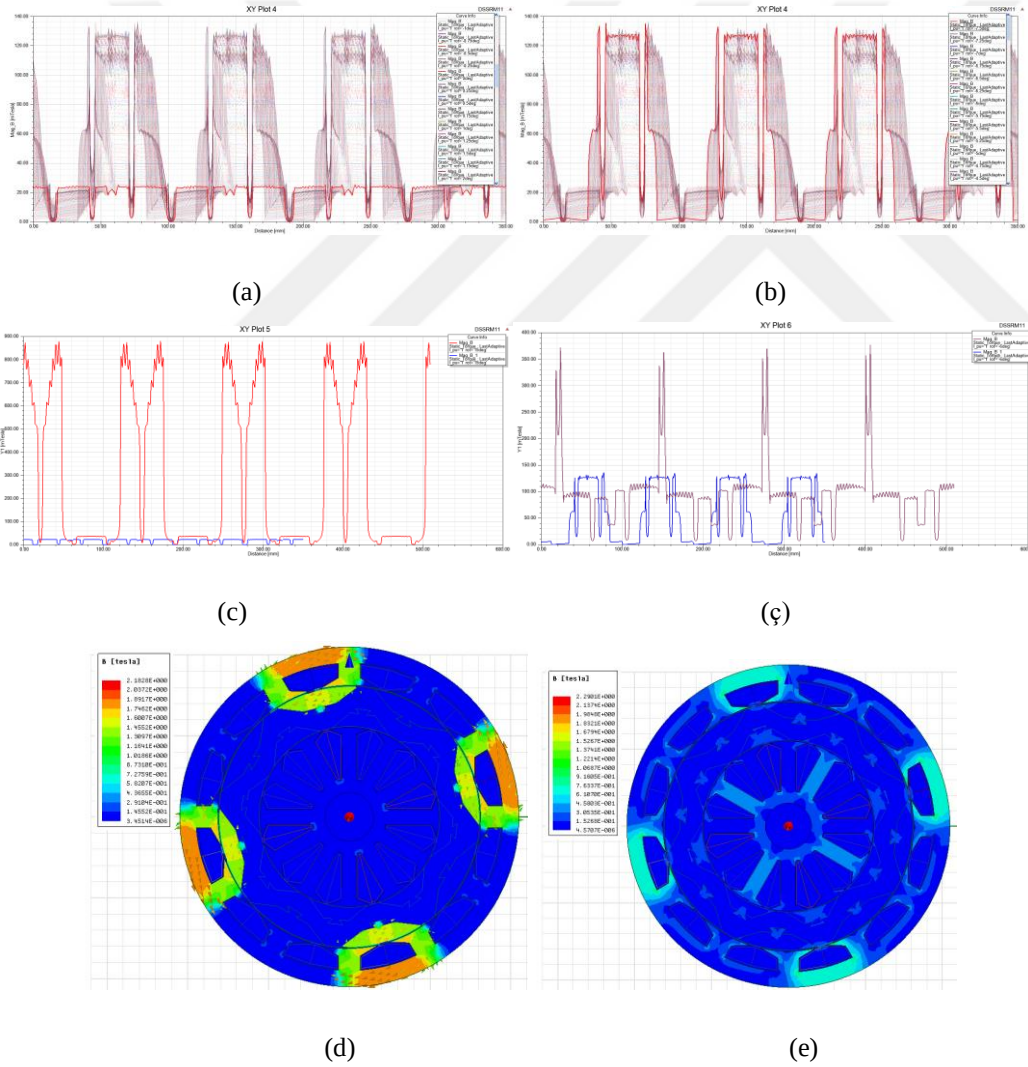
Benzer olarak iç rotorlu ARM'nin bir fazına 10A, 40A ve 60A tepe akımı uygulanarak hem motora ait diğer fazlarla oluşturduğu hem de dış rotorlu ARM'nin fazlarıyla oluşturduğu ortak endüktanslar Şekil 3.71'de verilmiştir. Benzetim sonuçlarından motorlar arasındaki fazlarda oluşan ortak endüktans değerlerinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu çıkarılabilir. Aynı motorda bulunan komşu fazlar arasında oluşan ortak endüktansları da ihmal edilebilir düzeydedir fakat motoru sürme esnasında komşu iki fazın belli bir süre aynı anda enerjilendirildiği durumlar vardır.



Şekil 3.71 İç Rotorlu ARM'nin oluşturduğu ortak endüktanslar a) Motora ait diğer fazlarla oluşan ortak endüktans b) Dış rotorlu ARM'nin fazlarıyla oluşturduğu ortak endüktans

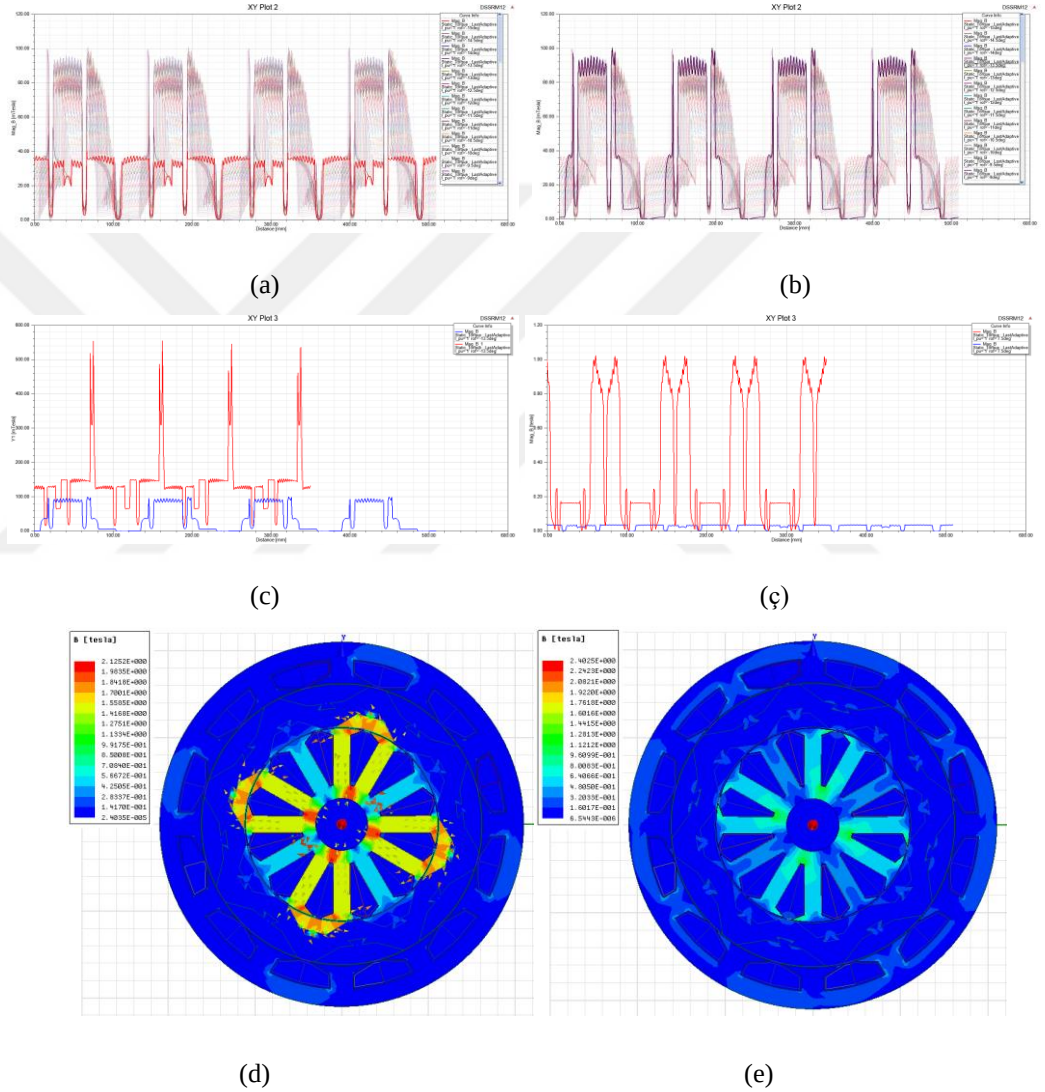
3.9.2 Hava aralıkları manyetik akı yoğunluklarının incelenmesi

İç ve dış rotorlu ARM'lerin hava aralıklarında oluşan manyetik akı yoğunluklarını incelemek için önce sadece iç rotorlu ARM'nin bir fazına 1440 Ampertur tepe değerinde mmf uygulanmıştır. Konuma göre dış rotorlu ARM hava aralığında oluşan en küçük manyetik akı yoğunluğu Şekil 3.72.a'da en büyük manyetik akı yoğunluğu Şekil 3.72.b'de gösterilmiştir. İç rotorlu ARM rotoru, hizalı konumdayken dış rotorlu ARM'nin hava aralığında 22 mT değerinde en düşük manyetik akı yoğunluğu (Şekil 3.72.c), hizalı olmayan konumdayken 120 mT değerinde en yüksek manyetik akı yoğunluğu (Şekil 3.72.ç) oluşmaktadır. Bu konumlarda ÇSARM üzerinde oluşan manyetik akı yoğunluğu Şekil 3.72.d ve Şekil 3.72.e'de verilmiştir.



Şekil 3.72 İç rotorlu ARM'nin oluşturduğu manyetik akı yoğunlukları

Aynı şekilde dış rotorlu ARM'nin bir fazı 1440 Ampertur tepe değerinde mmf uygulanmıştır. Konuma göre iç rotorlu ARM hava aralığında oluşan en küçük manyetik akı yoğunluğu Şekil 3.73.a'da en büyük manyetik akı yoğunluğu Şekil 3.73.b'de gösterilmiştir. Dış rotorlu ARM rotoru, hizalı konumdayken iç rotorlu ARM'nin hava aralığında 40 mT değerinde en düşük manyetik akı yoğunluğu (Şekil 3.73.c), hizalı olmayan konumdayken 90 mT değerinde en yüksek manyetik akı yoğunluğu (Şekil 3.73.ç) oluşmaktadır. Bu konumlarda ÇSARM üzerinde oluşan manyetik akı yoğunluğu Şekil 3.73.d ve Şekil 3.73.e'de verilmiştir.

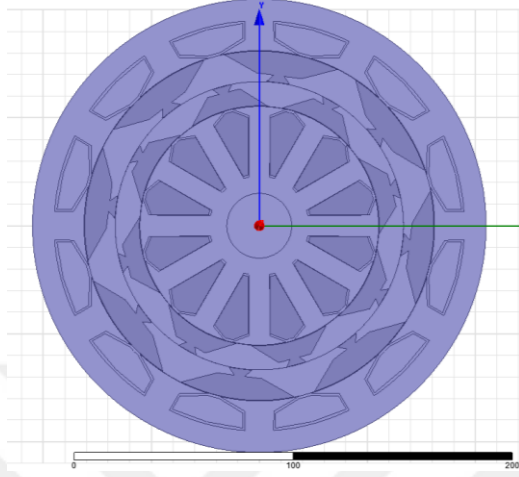


Şekil 3.73 Dış Rotorlu ARM'nin oluşturduğu manyetik akı yoğunlukları

3.10 Çift Rotorlu ARM ve Benzetim Sonuçları

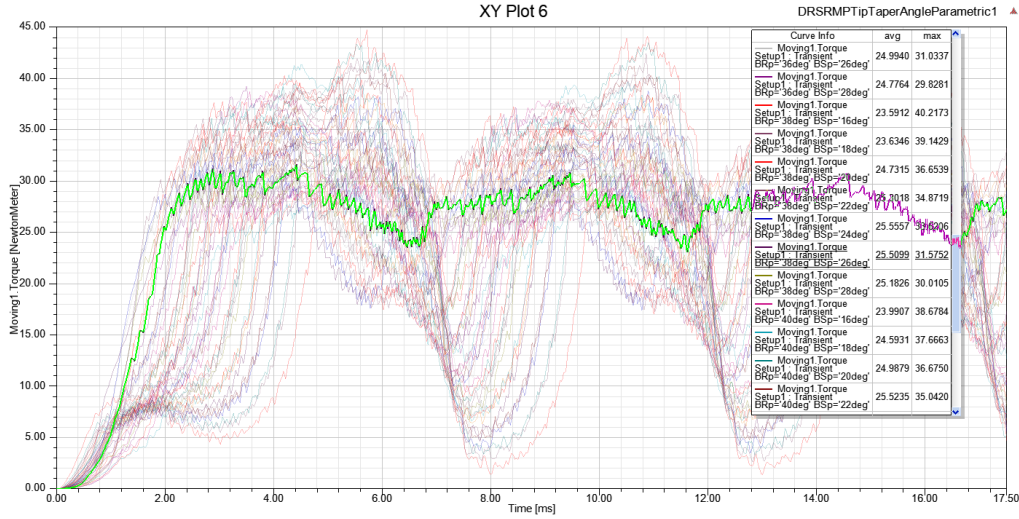
İç ve dış rotorları fiziksel olarak birleştirilmiş ÇSARM'nin rotorları ayrılarak Şekil 3.74'te verilen Çift Rotorlu Anahtarlama Relüktans Motoru elde edilmiştir.

ANSYS Maxwell’de birbirinden bağımsız dönen iç ve dış rotorlu ARM’nin benzetimi yapılmış ve tork ve akım dalga şekilleri aşağıda verilmiştir. Rotor hızları 500 d/d ve dönüştürücü gerilimi 48 VDC’dir. Faz akımları açma kapama açıları ÇSARM ile aynıdır.



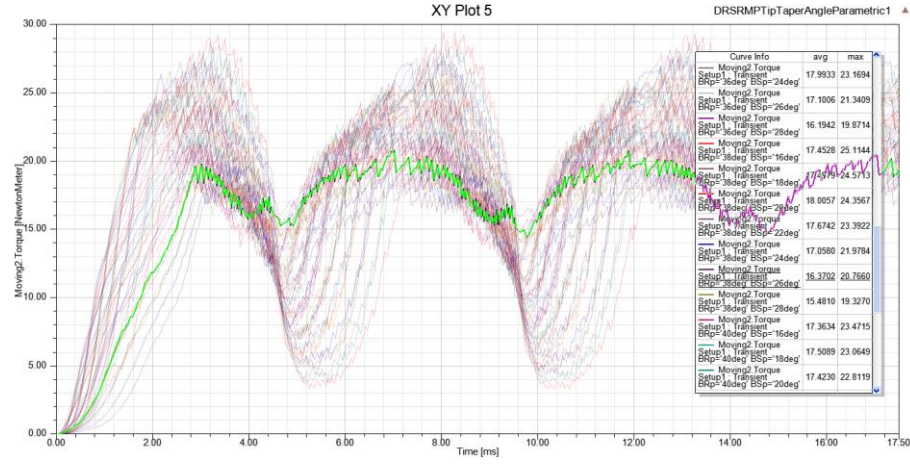
Şekil 3.74 Çift Rotorlu ARM

İç rotorlu ARM stator kutup başı ve rotor parçası açıları 2’şer derecelik adımlarla $16^\circ \leq \beta_{sp} \leq 28^\circ$ ve $30^\circ \leq \beta_{rp} \leq 42^\circ$ sınırları içinde değiştirilerek benzetimi yapılmış $7 \times 7 = 49$ adet tork dalga şekilleri Şekil 3.75’de verilmiştir.



Şekil 3.75 Çift rotorlu ARM tork dalga şekilleri (İç Rotorlu ARM)

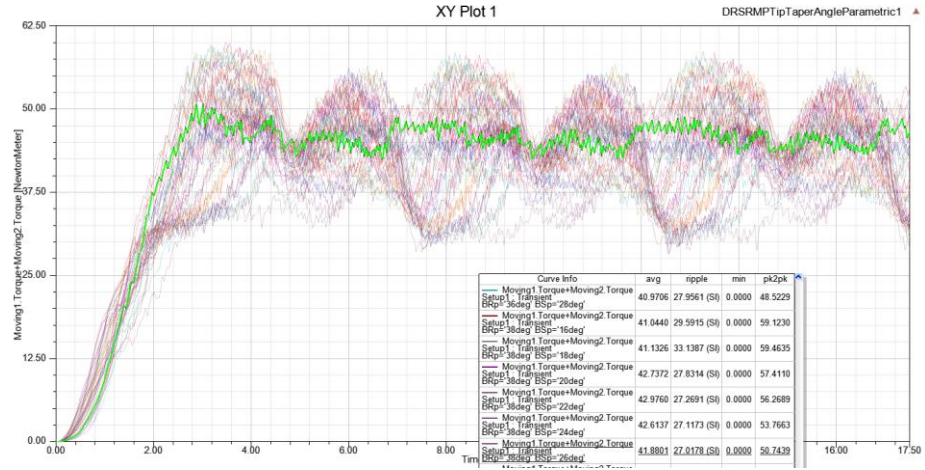
Dış rotorlu ARM stator kutup başı ve rotor parçası $16^\circ \leq \beta_{spo} \leq 28^\circ$, $30^\circ \leq \beta_{rpo} \leq 42^\circ$ sınırları içinde değiştirilerek benzetimi yapılmış $7 \times 7 = 49$ adet tork dalga şekilleri Şekil 3.76’da verilmiştir.



Şekil 3.76 Çift Rotorlu ARM tork dalga şekilleri (Dış Rotorlu ARM)

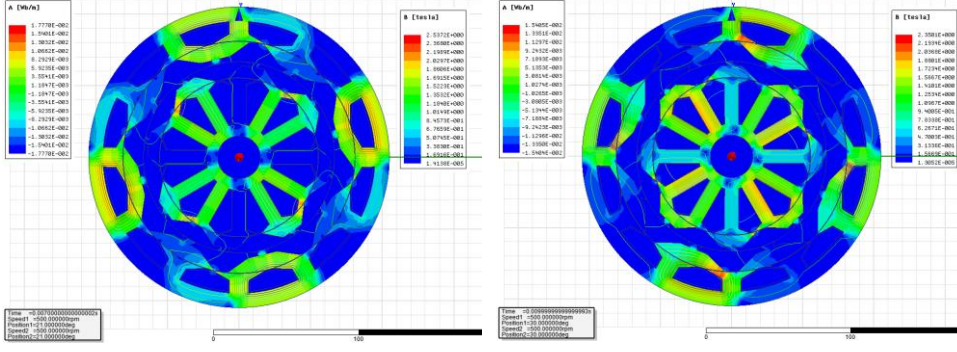
ANSYS Maxwell ile iç ve dış rotorlu ARM'ler için aynı anda sadece $7 \times 7 = 49$ adet benzetim yapılmıştır. İç ve dış rotorlu ARM tarafından üretilen torkların toplamı yaklaşık olarak ÇSARM torkuna eşit olacağından ÇSARM'ye ait $49 \times 49 = 2401$ adet tork eğrileri elde edilebilir ve ortalama tork ve tork dalgalanması incelenebilir. Böylelikle ÇSARM için normalde 2401 adet yapılacak benzetim sayısı 49'a indirilmiş ve dolayısıyla benzetim süresi oldukça azaltılmıştır.

Şekil 3.77'de ÇSARM tork dalga şekli olarak düşünülebilecek 49 adet iç ve dış rotorlu ARM torklarının toplamı olan tork dalga şekilleri verilmiştir.



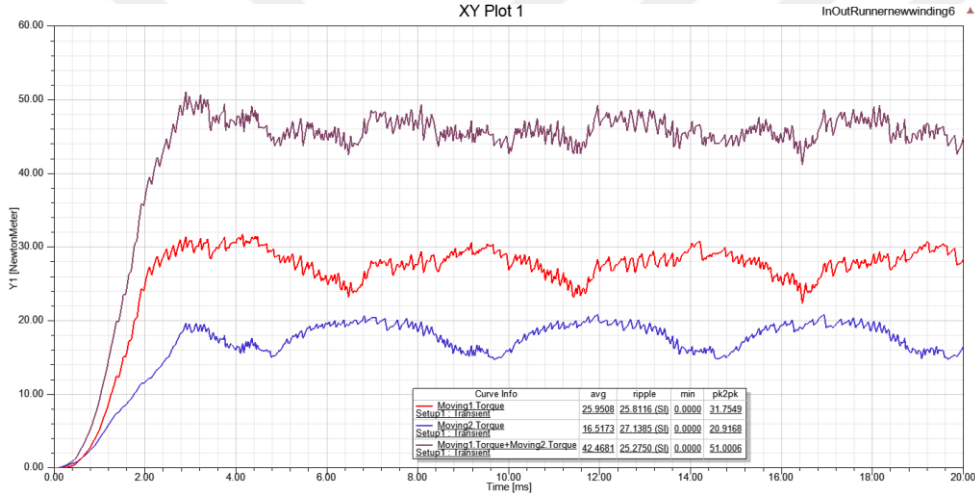
Şekil 3.77 Çift Rotorlu ARM tork dalga şekilleri (İç ve Dış Rotorlu ARM tork toplamı)

Benzetim sonucunda elde edilen çift rotorlu ARM'ye ait iki farklı konum için manyetik akı çizgileri ve manyetik akı yoğunluğu Şekil 3.78'de verilmiştir. Hem iç rotorlu ARM'nin hem de dış rotorlu ARM'nin hizalı ve hizalı olmayan konumları için benzetim sonuçları incelenebilir.



Şekil 3.78 Çift rotorlu ARM manyetik akı çizgileri ve manyetik akı yoğunluğu

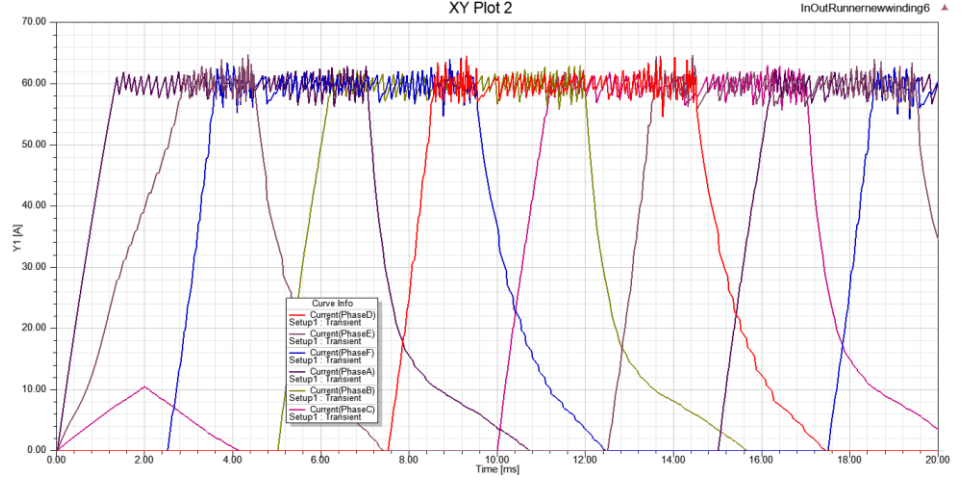
$\beta_{sp} = \beta_{spo} = 26^\circ$ ve $\beta_{rp} = \beta_{rpo} = 38^\circ$ ile elde edilen çift rotorlu (iç ve dış rotorlu) ARM torkları ve ÇSARM torku olarak düşünebileceğimiz toplam tork eğrileri Şekil 3.79’da verilmiştir.



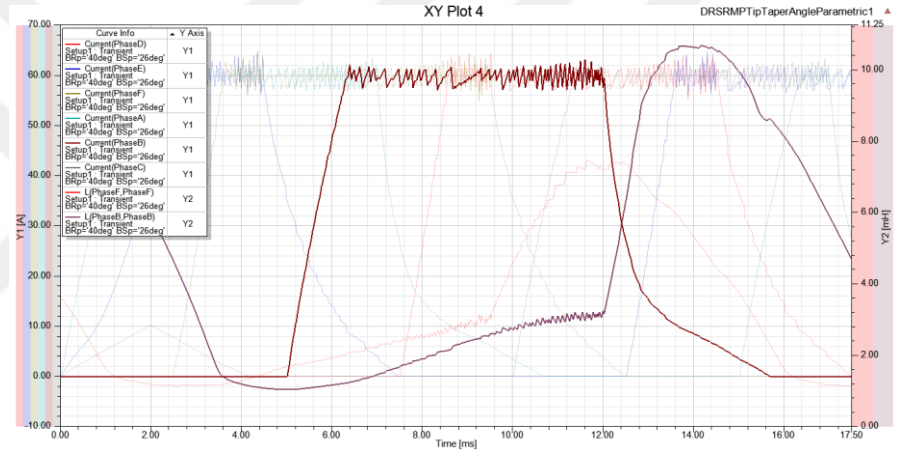
Şekil 3.79 Çift rotorlu ARM tork eğrileri ve matematiksel toplamı

Şekil 3.79’da İç Rotorlu ARM yaklaşık 18 Nm, Dış Rotorlu ARM yaklaşık 27,5 Nm ortalama tork üretmiştir. Matematiksel toplamı 45,5 Nm’dir ve ÇSARM’nin ürettiği torka çok yakındır.

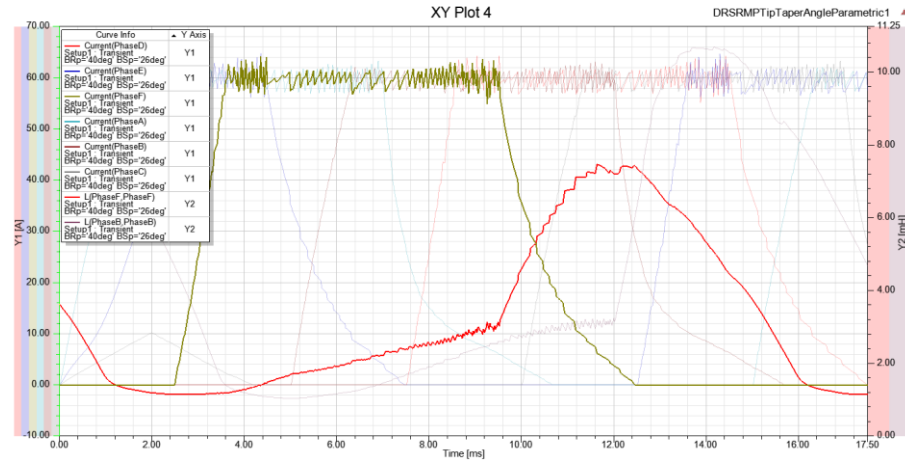
Şekil 3.80’de çift rotorlu ARM’nin faz akımları dalga şekilleri verilmiştir. Faz akımları tepe değeri 60 A ile sınırlandırılmıştır. Faz akımları açma kapama açılarının doğruluğu iç rotorlu ARM için Şekil 3.81’de dış rotorlu ARM için Şekil 3.82’de verilen faz akımı-endüktans grafiklerinden görülebilir.



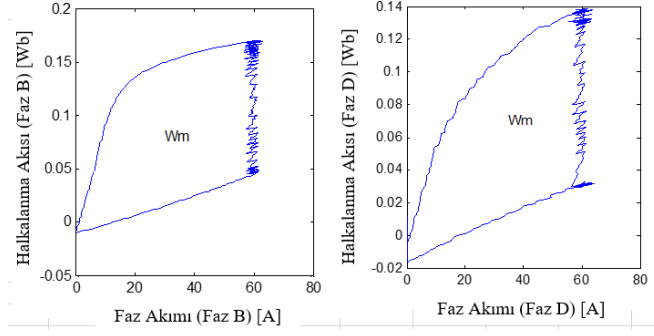
Şekil 3.80 Çift rotorlu ARM faz akımları dalga şekilleri



Şekil 3.81 Çift Rotorlu ARM faz akım-endüktans dalga şekilleri (İç Rotorlu ARM)



Şekil 3.82 Çift Rotorlu ARM faz akım-endüktans dalga şekilleri (Dış Rotorlu ARM)



Şekil 3.83 İç ve Dış Rotorlu ARM enerji dönüşümü

Denklem 3.16 kullanılarak iç ve dış rotorlu ARM'lerin ortalama torku hesaplanabilir. W_m ile gösterilen alanlar Matlab programında hesaplanmıştır.

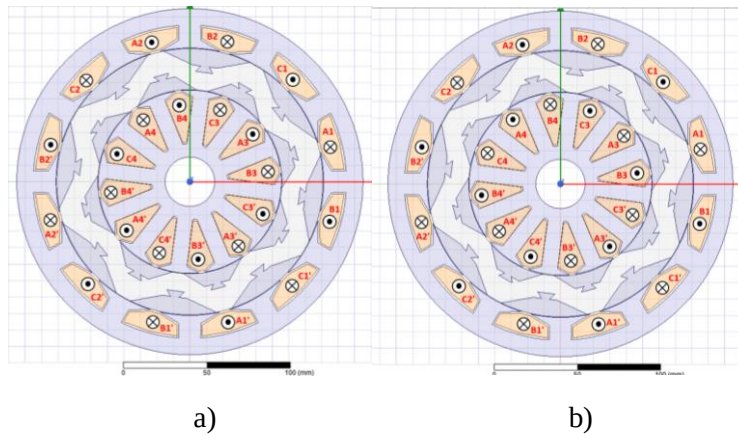
$$T_e (\text{İç Rotorlu ARM}) = 26,0833 \text{ Nm}$$

$$T_e (\text{Dış Rotorlu ARM}) = 19,2905 \text{ Nm}$$

$$T_e(\text{ÇRARM}) = T_e (\text{İç Rotorlu ARM}) + T_e (\text{Dış Rotorlu ARM}) = 45,3738 \text{ Nm}$$

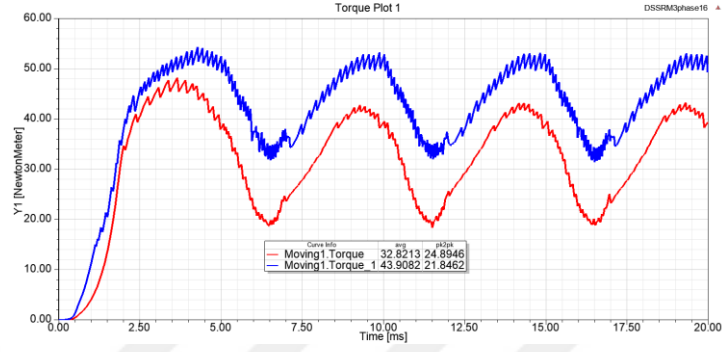
3.11 Uzun Adım Sarımlı ÇSARM Sargı Polarite Analizi

Öncelikle 3 fazlı uzun adım sarımlı ÇSARM'de iç statorun sargı polariteleri Şekil 3.84'de gösterildiği gibi değiştirilerek benzetimi yapılmıştır. Sargıları seri bağlanarak oluşturulmuş 3 fazlı ÇSARM yapısında 48 VDC ile istenilen faz akımı tepe değerine ulaşamadığından dönüştürücü gerilimi 96 VDC ve faz akımı tepe değeri 60A olarak alınmıştır.



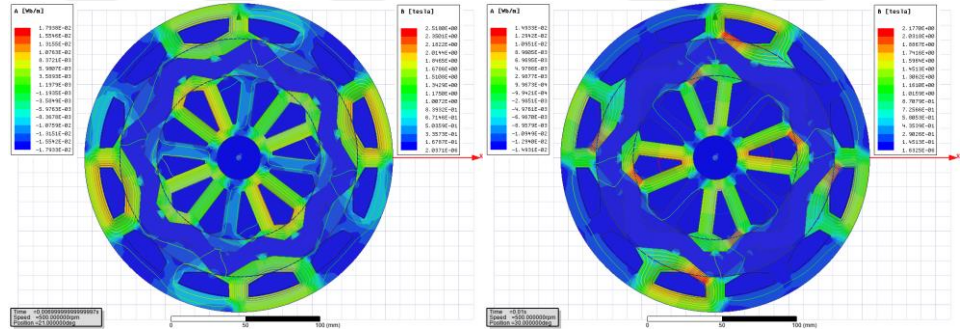
Şekil 3.84 3 fazlı ÇSARM sargı polariteleri a) Normal polarite b) Ters polarite

3 fazlı uzun adım sarımlı ÇSARM yapılandırmasında benzetim sonucu oluşan tork eğrileri Şekil 3.85'te verilmiştir. Normal polarite durumunda ortalama tork 44 Nm ve tork dalgalanması yaklaşık % 50 iken ters polarite durumunda ortalama tork 32,8 Nm ve tork dalgalanması yaklaşık % 75 olmaktadır. Benzetim sonuçlarından anlaşılacağı üzere iç ve dış stator fazlarının polariteleri tork üretiminde çok büyük önem arz etmektedir ve ters polarite durumunda tork yaklaşık %25 azalmaktadır.

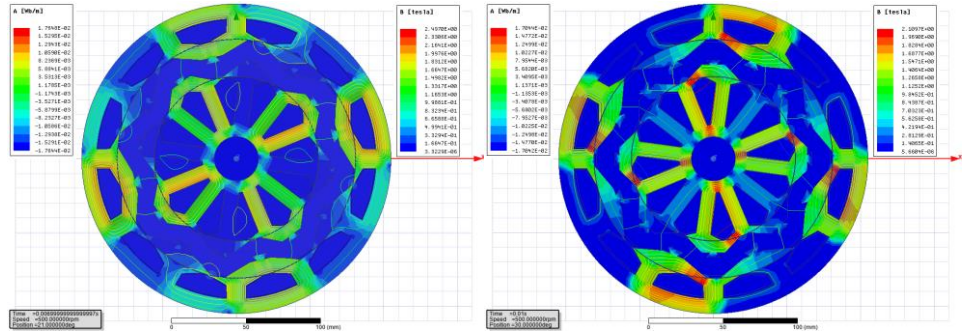


Şekil 3.85 3 fazlı ÇSARM normal polarite (Mavi) ve ters polarite (Kırmızı) tork eğrileri

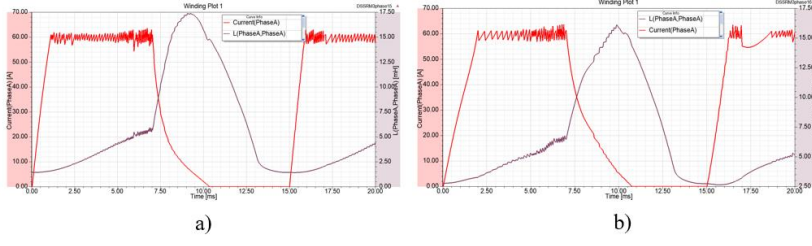
Normal polarite durumunda Şekil 3.86'da ve ters polarite durumunda Şekil 3.87'de hizalı ve orta hizalı konumda iken oluşan manyetik akı yoğunluğu ve akı çizgileri verilmiştir.



Şekil 3.86 3 fazlı ÇSARM normal polarite manyetik akı yoğunluğu ve akı çizgileri

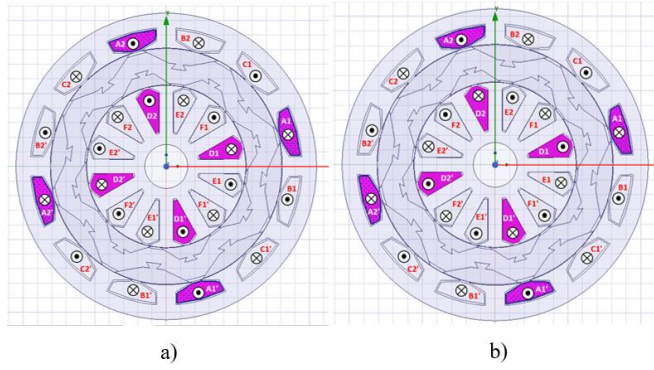


Şekil 3.87 3 fazlı ÇSARM ters polarite manyetik akı yoğunluğu ve akı çizgileri



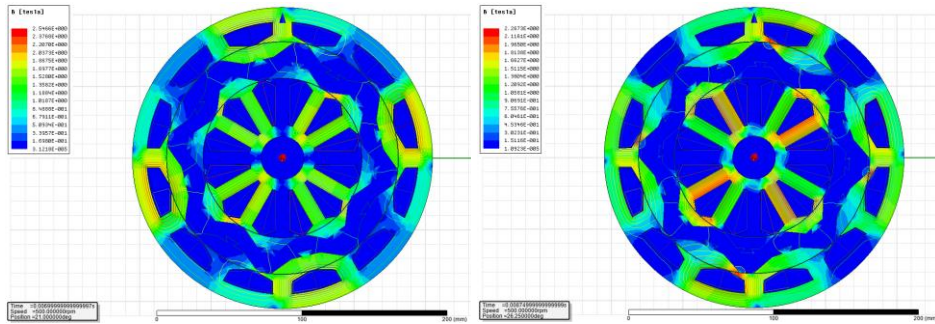
Şekil 3.88 Stator ve rotorları kaydırılmış 3 fazlı ÇSARM faz akımı ve endüktansı (Faz gerilimi 96V) a) Normal polarite b) Ters polarite

6 fazlı uzun adım sarımlı ÇSARM'ye ait dış rotorlu ARM'nin sargı polariteleri değiştirilerek (Şekil 3.89) ANSYS Maxwell benzetim çalışmalarına göre iki motor arasında birbirini frenleyici yönde kuplaj olduğu ve Şekil 3.90'dan dış rotorlu ARM'nin hizalı konumdayken doyuma girdiği ve ortalama tork düşürdüğü görülmektedir.

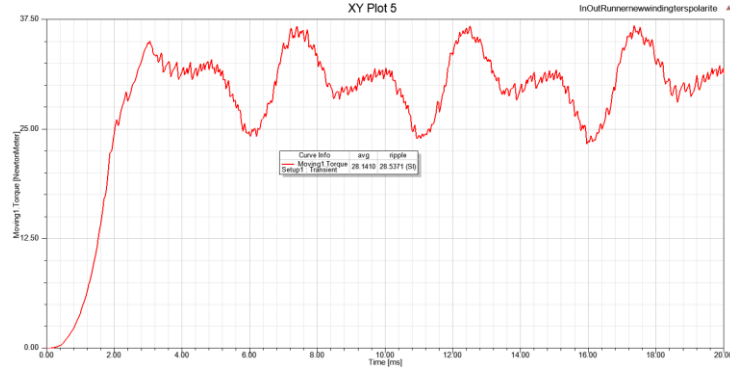


Şekil 3.89 ÇSARM Sargı polariteleri a) Normal polarite b) Ters polarite

ÇSARM normal polarite durumunda ortalama tork 45 Nm ve tork dalgalanması yaklaşık % 10 iken Şekil 3.91'de verilen ters polarite durumunda ortalama tork 31 Nm ve tork dalgalanması yaklaşık % 40 olmaktadır.



Şekil 3.90 Ters polarite durumunda ÇSARM Manyetik Akı Yoğunlukları ve Akı Çizgileri



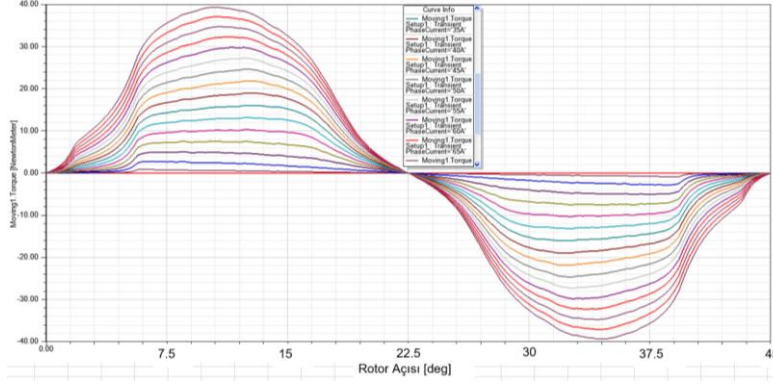
Şekil 3.91 Ters polarite durumunda ÇSARM tork eğrisi

3.12 ÇSARM Statik Analizi

Klasik ARM’de tork üretim mekanizması esasen stator ve rotorun çıkıntılı bir yapıya sahip olmasından kaynaklanır. Bu nedenle halkalanma akısı ve tork gibi ARM karakteristikleri rotor konumu ve faz akımının fonksiyonudur. Doğrusal olmayan durumları hesaba katmak için ARM karakteristikleri Sonlu Elemanlar Yöntemini (SEY) kullanan yazılımlar ile analiz edilebilir. Ortak endüktansları ihmal edilebilir olması nedeniyle, ARM'nin bir fazının karakteristikleri belirlendikten sonra bu bilgiler diğer fazlar için de kullanılabilir. Statik analiz ile elde edilen ARM karakteristikleri makinenin dinamik davranışı konusunda değerlendirilebilir. Bu karakteristikleri elde etmek için makinenin bir fazı bir elektrik çevrimi boyunca sabit akım ile uyarılır. Bu sebeple statik analiz adını alır. Benzetim sonuçları ARM’ye ait tork, endüktans ve halkalanma akısı eğrilerinin konumla değişimini göstermektedir. Analiz farklı akımlarla tekrarlanırsa ARM'nin manyetik çekirdeği doyuma ulaştıkça karakteristiğinin nasıl değiştiğini görmek mümkün olur.

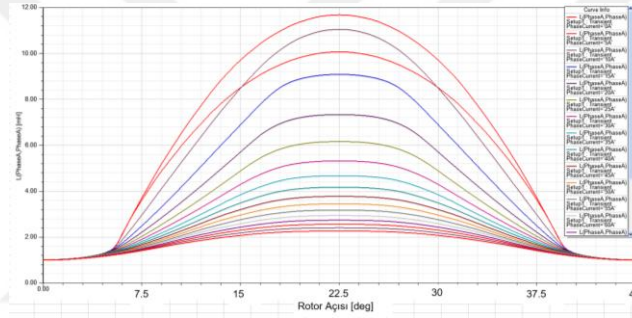
3.12.1 İç rotorlu ARM statik analizi

Şekil 3.92’de, 12/8 iç rotorlu ARM’nin bir fazına ait statik tork profili, rotor ve stator kutuplarının göreceli konumuyla birlikte 0-80 A aralığında 5’er amper artırılan sabit akımlarla uyartılarak elde edilmiştir. Şekil 3.92’de faz akımı 80A iken oluşan tork eğrisinin tepe değeri en fazla olmaktadır. Akım düştükçe tork eğrilerinin tepe değerleri de düşmektedir.



Şekil 3.92 İç rotorlu ARM rotor konumuna göre faz akımı değişiminin torka etkisi

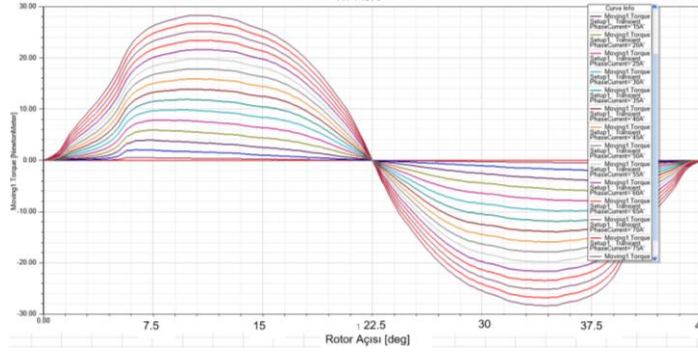
Şekil 3.93'te iç rotorlu ARM'nin endüktans karakteristiği verilmiştir. Faz akımı 5 A iken endüktans eğrisi en büyük tepe değerini alırken akım arttıkça endüktans eğrilerinin tepe değerleri azalmaktadır.



Şekil 3.93 İç rotorlu ARM rotor konumuna göre faz akımı değişiminin endüktansa etkisi

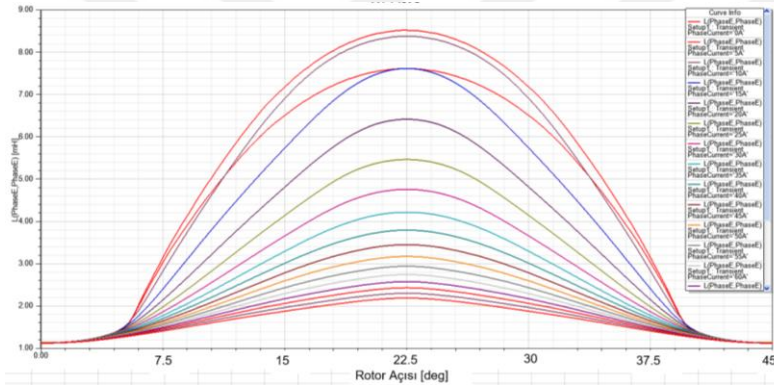
Hızlı olmayan konumda, rotor ile stator kutupları arasındaki bağıl mesafe en büyük olur. Şekil 3.94'te hizalanmamış konumda büyük hava aralığından dolayı halkalanma akısının en küçük değerde olduğu görülebilir. Bunun aksine, hızlı konumda iken yani rotor ve komşu iki stator kutuplarının tam ortasında konumlandığında, stator ve rotor kutupları arasında ortaya çıkan hava aralığı en aza indirilir. Burada halkalanma akısı en fazladır.

Halkalanma akısı aynı zamanda faz akımına da bağlıdır. Daha yüksek düzeyde akım uygulandığında, daha yüksek manyetik akı yoğunluğu oluşur ve dolayısıyla çekirdeğin doyma seviyesi nedeniyle halkalanma akısı değerinin artışı azalacaktır. Şekil 3.94'te gösterildiği gibi halkalanma akısındaki 55 A'den 60 A'e artış, 5 A'den 10 A'e artıştan çok daha küçüktür.



Şekil 3.96 Dış rotorlu ARM rotor konumuna göre faz akımı değişiminin torka etkisi

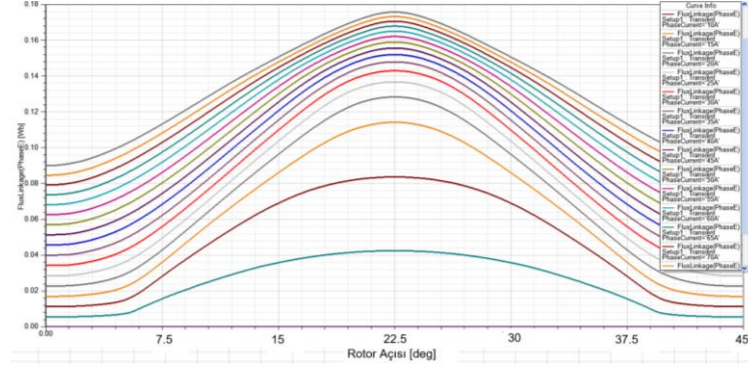
Şekil 3.97’de dış rotorlu ARM’nin endüktans karakteristiği verilmiştir. Faz akımı 5 A iken endüktans eğrisi en büyük tepe değerini alırken akım arttıkça endüktans eğrilerinin tepe değerleri azalmaktadır.



Şekil 3.97 Dış rotorlu ARM rotor konumuna göre faz akımı değişiminin endüktansa etkisi

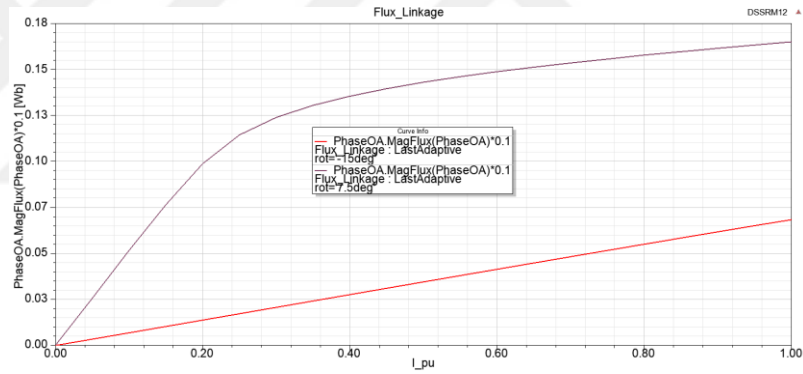
Şekil 3.98’de dış rotorlu ARM’nin halkalanma akısı karakteristiği verilmiştir. Faz akımı 5 A iken halkalanma akısı eğrisi en küçük tepe değerini alırken akım arttıkça halkalanma akısı eğrilerinin tepe değerleri artmaktadır. Akım arttıkça halkalanma akısı eğrilerinin tepe değerleri arasındaki fark azalmaktadır.

Faza daha yüksek düzeyde akım uygulandığında, daha yüksek manyetik akı yoğunluğu oluşur ve dolayısıyla çekirdeğin doyma seviyesi nedeniyle halkalanma akısı değerinin artışı azalacaktır. Şekil 3.98’den de görüleceği üzere halkalanma akısındaki 55 A’den 60 A’e artış, 5 A’den 10 A’e artıştan çok daha küçüktür.



Şekil 3.98 Dış rotorlu ARM rotor konumuna göre faz akımı değişiminin halkalanma akısına etkisi

Şekil 3.99’da dış rotorlu ARM’nin halkalanma akısı karakteristiğinin başka bir gösterimi verilmiştir. Burada rotorun hizalı olmayan ve hizalı konumları için halkalanma akısının faza uygulanan akım ile değişimi görülmektedir. Hizalı konumda akım tasarlanan tepe akımının %25’ini geçtikten sonra halkalanma akısı doğrusal olmayan bir şekilde artmaya başlar. Hizalı olmayan konumda halkalanma akısı akımla doğrusal olarak artmaktadır. Birim akım değeri 60 A’dır.

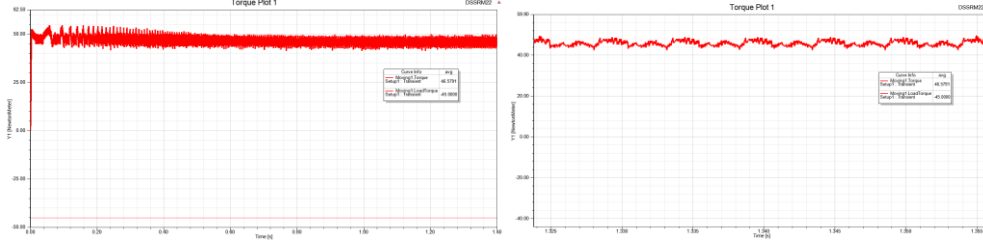


Şekil 3.99 Dış rotorlu ARM hizalı olmayan ve hizalı konumda Halkalanma akısı-Akım eğrisi

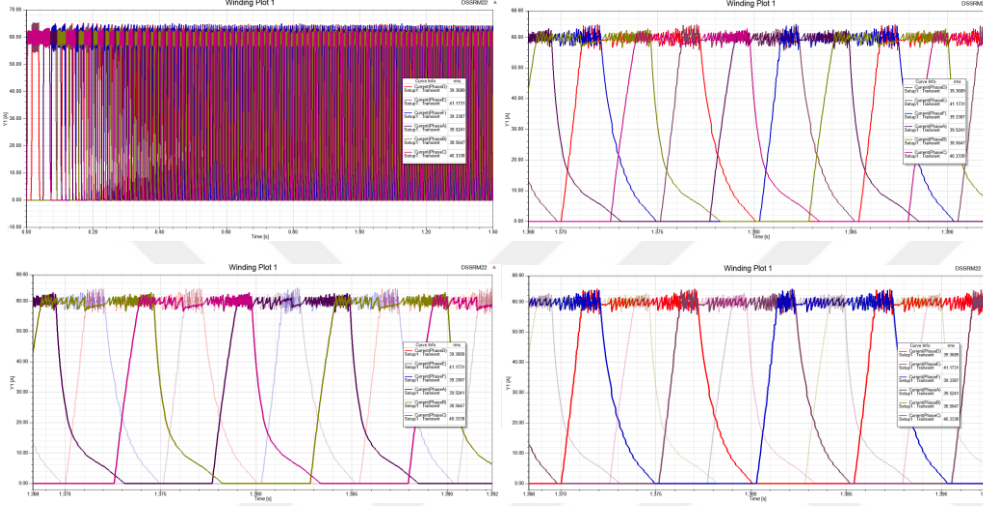
3.13 Dinamik Benzetim Çalışmaları

3.13.1 Akım kontrollü dinamik benzetim

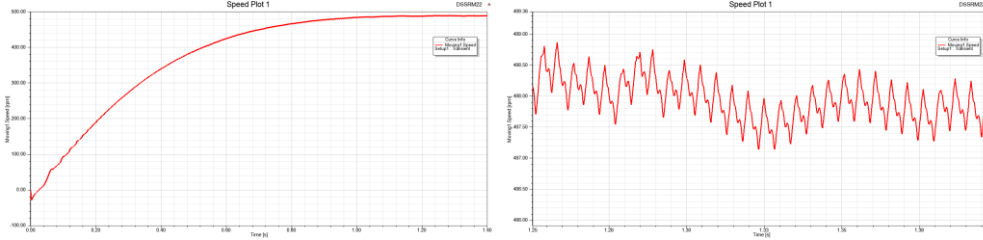
Dinamik benzetim için ÇSARM’nin ataletsel momentinin hesaplanması gerekmektedir. Ataletsel momenti 0.0275 kgm^2 ve sönümleme faktörü $0.01459025 \text{ Nms/rad}$ olarak alınmıştır. 60A tepe akımı kontrol edilerek 48V gerilim ile 45 Nm yük altında dinamik benzetimi yapılmıştır. Şekil 3.102’den görüleceği üzere yaklaşık olarak temel hız seviyesi olan 500 d/d’ya yakın bir değerde 488 d/d civarına oturmuştur. Ortalama torku 45 Nm ve tork dalgalanması %10 civarındadır.



Şekil 3.100 ÇSARM tork-zaman grafiği



Şekil 3.101 ÇSARM faz akımları grafiği

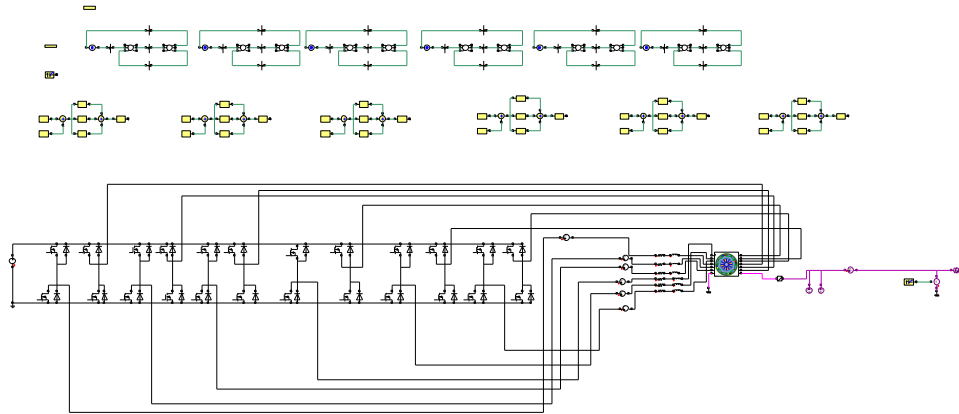


Şekil 3.102 ÇSARM Hız-Zaman grafiği

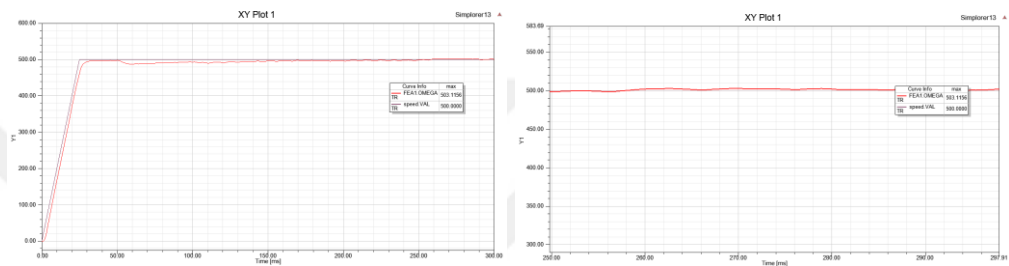
Şekil 3.100 oluşan tork eğrisini, Şekil 3.101 faz akımlarını ve Şekil 3.102 hız-zaman grafiğini göstermektedir.

3.13.2 PI tabanlı hız kontrollü dinamik benzetim

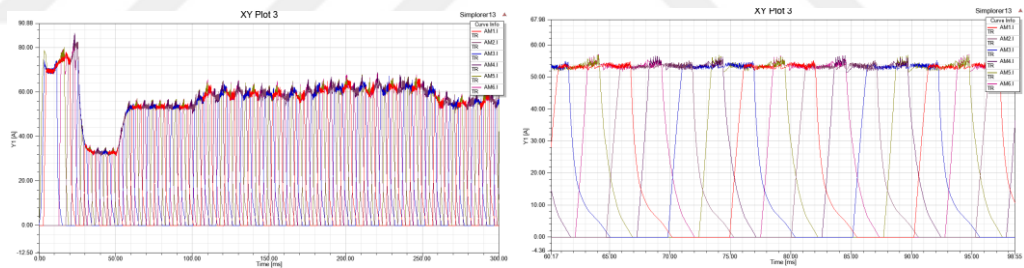
PI tabanlı hız kontrollü sistemin genel görünümü Şekil 3.103'te verilmiştir. Benzetim süresini kısaltmak için motor referans hıza geldikten sonra çeşitli yükler verilmiştir. 40 Nm yükte tork dalgalanması %10 sınırı içindeyken sadece hız kontrollü yapıldığından 42,5 Nm ve üzeri yüklerde tork dalgalanmasında artış gözlemlenmiştir.



Şekil 3.103 ÇSARM PI Tabanlı Hız Kontrolü

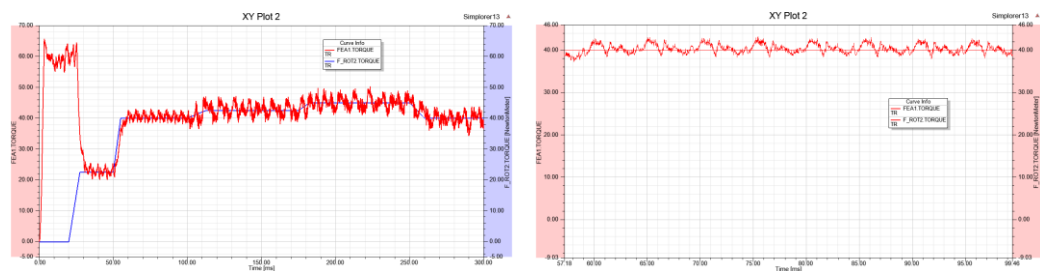


Şekil 3.104 ÇSARM Hız-Zaman Grafiği



Şekil 3.105 ÇSARM Akım Grafiği

Şekil 3.104 hız-zaman grafiğini, Şekil 3.105 faz akımlarını ve Şekil 3.106 oluşan tork grafiğini göstermektedir.



Şekil 3.106 ÇSARM çeşitli yüklerde tork grafiği

Tasarımı tamamlanan uzun adım sarımlı ÇSARM'nin stator ve rotor çekirdeklerinin ağırlığı, kullanılacak bakır telin ağırlığı, motorun hacmi hesaplanabilir. Benzetim sonucu çıkış torku, bakır ve çekirdek kayıpları bilindiğinden buna bağlı olarak motor verimi ile hacimsel ve kütsel tork yoğunlukları hesaplanabilir.

Tablo 3.12 Uzun Adım Sarımlı ÇSARM Hacim ve Ağırlığının Hesaplanması

ÇSARM Bölümü	Taban Alanı [mm ²]	Uzunluğu [mm]	Hacim [dm ³]	Özkütle [kg/dm ³]	Ağırlık [kg]	Toplam Ağırlık [kg]
İç Rotorlu ARM Statoru	9171	100	0,9171	7,65	7,02	14,75
İç Rotorlu ARM Rotoru	3081	100	0,3081	7,65	2,36	
Dış Rotorlu ARM Statoru	5152	100	0,5152	7,65	3,94	
Dış Rotorlu ARM Rotoru	1865	100	0,1865	7,65	1,43	
Aluminyum Blok	5789	100	0,5789	2,73	1,58	1,58
İç Rotorlu ARM Statoru Bakır Tel	0,7088	14500*10*2*3	0,6166	8,9	5,5	9,3
Dış Rotorlu ARM Statoru Bakır Tel	0,7088	10000*10*2*3	0,4252	8,9	3,8	

Tabloda bakır telin ağırlığını hesaplarken bakır telin uzunluğu, Tel Sayısı*Sargı sayısı*Faz sayısı olarak hesaplanmıştır. Prototip üretim için 10 adet 0,95 mm bakır tellerden kullanılması planlanmıştır.

$$\text{Oluk alanı} = 300 \text{ mm}^2 \pm 10 \text{ mm}^2$$

$$\text{Oluk doluluk oranı (\%)} = \frac{0,70882 \cdot 24 \cdot 10}{300} 100 = \frac{170}{300} 100 = \%56 \text{ (İç Rotorlu ARM)}$$

$$\text{Oluk doluluk oranı (\%)} = \frac{0,70882 \cdot 24 \cdot 10}{290} 100 = \frac{170}{290} 100 = \%58,6 \text{ (Dış Rotorlu ARM)}$$

$$\text{Akım yoğunluğu } J = \frac{40 \text{ A}}{0,70882 \text{ mm}^2 \cdot 10} = 5,65 \text{ A/mm}^2$$

$$\text{ÇSARM hacmi: } \pi D^2 L / 4 = (210 \text{ mm})^2 (100 \text{ mm}) / 4 = 3,463 \text{ dm}^3$$

Benzetim sonucu;

$$\text{Hacimsel tork yoğunluğu} = \frac{45 \text{ Nm}}{3,463 \text{ dm}^3} = 13 \text{ Nm/l}$$

$$\text{Kütleli tork yoğunluğu} = \frac{45 \text{ Nm}}{24,05 \text{ kg}} = 1,87 \text{ Nm/kg}$$

İç rotorlu ARM için faz direnci hesaplama;

$$R_{faz}(20^\circ C) = \frac{0,0168 \cdot 10^{-6} \cdot 29}{0,70882 \cdot 10^{-6} \cdot 10} = 0,0687 \Omega$$

$$\rho(60^\circ) = 0,0168 \cdot 10^{-6} [1 + 0,003862 (333 - 293)] = 0,0194$$

$$R_{faz}(60^\circ C) = \frac{0,0194 \cdot 10^{-6} \cdot 29}{0,70882 \cdot 10^{-6} \cdot 10} = 0,079 \Omega$$

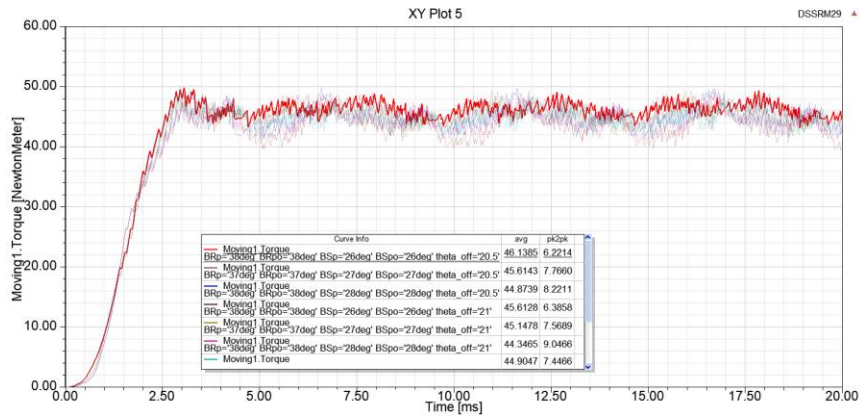
Dış rotorlu ARM için faz direnci hesaplama;

$$R_{faz}(20^\circ C) = \frac{0,0168 \cdot 10^{-6} \cdot 20}{0,70882 \cdot 10^{-6} \cdot 10} = 0,0474 \Omega$$

$$R_{faz}(60^\circ C) = \frac{0,0194 \cdot 10^{-6} \cdot 20}{0,70882 \cdot 10^{-6} \cdot 10} = 0,054 \Omega$$

Bakır kayıpları;

$$P_{cu} = 40^2 (0,079 + 0,054) \cdot 3 = 638 \text{ W olarak hesaplanır.}$$



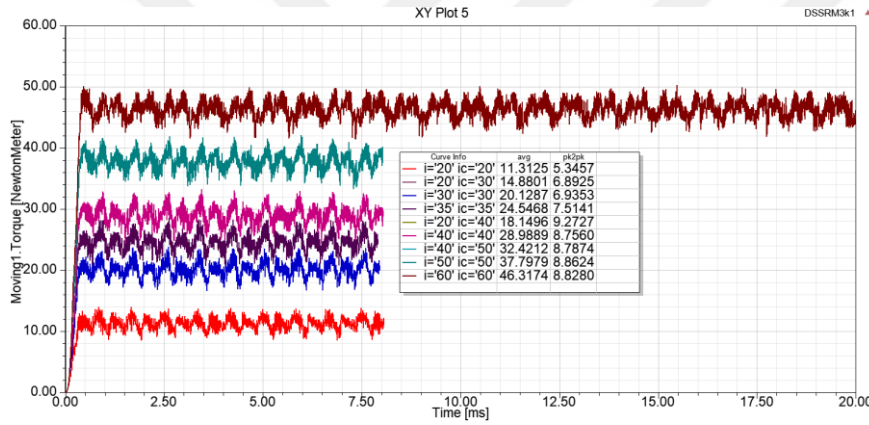
Şekil 3.107 Uzun adım sarımlı ÇSARM tork eğrileri

Uzun adım sarımlı ÇSARM benzetim sonucunda Şekil 3.107'den ortalama tork 45 Nm, tork dalgalılığı %10, çıkış gücü (P_{çıkış}) 2356 W, bakır kayıpları (P_{bakır}) ortalama 675W ve çekirdek kayıpları (P_{çekirdek}) yaklaşık 50 W olarak hesaplanmıştır. Bu durumda diğer kayıplar göz önünde bulundurulmadan ÇSARM verimi (η);

$$\eta = P_{\text{çıkış}} / (P_{\text{giriş}}) 100 = P_{\text{çıkış}} / (P_{\text{çıkış}} + P_{\text{bakır}} + P_{\text{çekirdek}}) 100$$

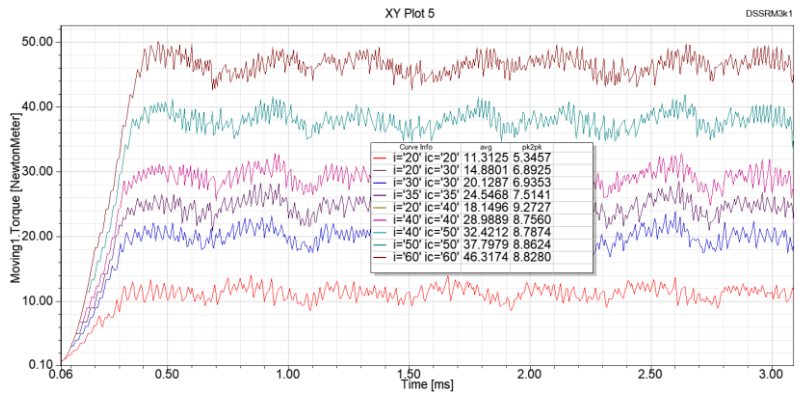
$$\eta = 2356 / (2356 + 675 + 50) 100 = \%76,4 \text{ olarak bulunur.}$$

Uzun adım sarımlı ÇSARM 310 VDC gerilim altında 3000 d/d hızında çeşitli yüklerde benzetimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.103). Faz gerilimi artırılınca temel hız da artmıştır. Rotor hızı 3000 d/d iken fazlara 60 A tepe akımı uygulandığında ortalama tork 46 Nm ve güç ise 14,45 kW olarak gerçekleşmiştir.



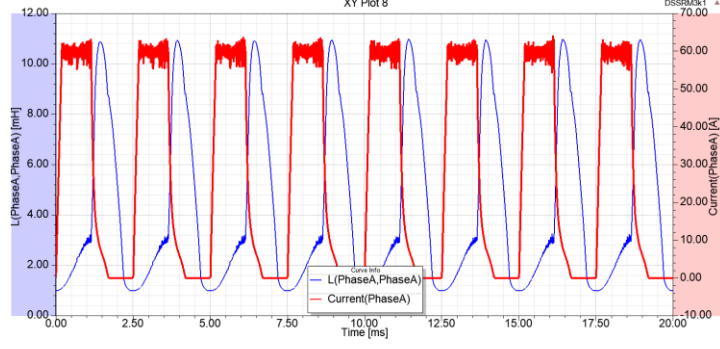
Şekil 3.108 Uzun adım sarımlı ÇSARM çeşitli yüklerde benzetimi (310 VDC, 3000 d/d)

Aynı faz akımı tepe değeri uygulandığından bakır kayıpları sabit kalır ve çekirdek kayıpları dikkate alınmazsa verim % 94 olarak hesaplanır.

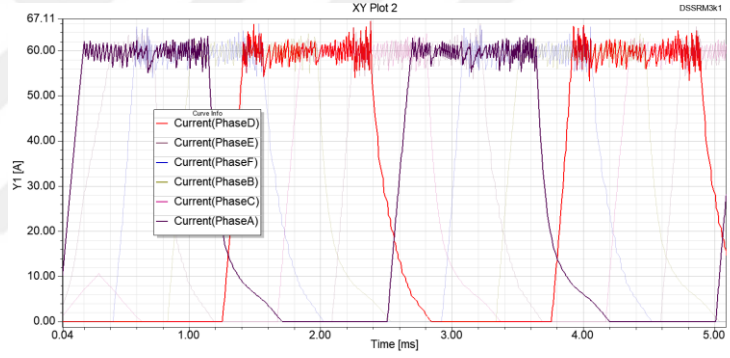


Şekil 3.109 Uzun adım sarımlı ÇSARM çeşitli yüklerde benzetimi (310 VDC, 3000 d/d)

Tork dalgalanmasının görülmesi için Şekil 3.109’da uzun adım sarımlı ÇSARM benzetimi belli bir zaman aralığında büyütülerek verilmiştir. Şekil 3.110’da faz akımı ve endüktansı verilerek faz akımı açma kapama açılarının doğruluğu gösterilmiştir. Şekil 3.111’de faz akımları verilmiştir.



Şekil 3.110 Uzun adım sarımlı ÇSARM faz akımı ve endüktansı (310 VDC, 3000 d/d)



Şekil 3.111 Uzun adım sarımlı ÇSARM faz akımları (310 VDC, 3000 d/d)

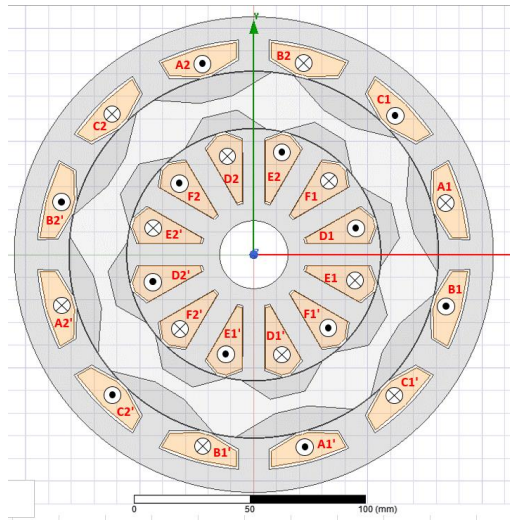
4. ÇİFT STATORLU ARM YAPILANDIRMALARI

Elektromanyetik tasarım sonucu boyutları belirlenen iç ve dış parçalı rotor yapıları ARM'lerin birbirine göre rotor veya statorları kaydırılmış veya kaydırılmamış durumları için 3 veya 6 fazlı ÇSARM yapıları oluşturulmuştur. Bu yapıların ortalama tork ve tork dalgalanması üzerine etkileri incelenmiştir. Bu yapılar tezin konusu 6 fazlı ÇSARM yapısı ile karşılaştırılmıştır.

3 fazlı ÇSARM yapıları için iç ve dış stator sargıları seri olarak bağlandığında 60 A faz akımı tepe değeri için dönüştürücü geriliminin artırılması gerekmektedir. İç ve dış stator sargıları arasında seri-paralel bağlanarak oluşturulan faz yapısıyla faz dirençlerini eşitlemek mümkün olabilir ancak bu durumda 48 VDC faz gerilimi ile fazı oluşturan her bir sargıda 60 A tepe akımının kontrol edilebildiğinin bilinmesi gerekir.

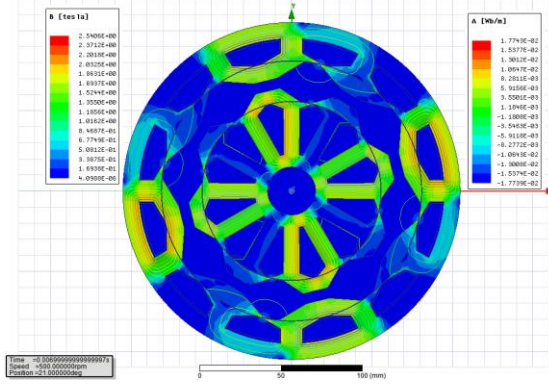
4.1 Stator ve Rotorları Kaydırılmamış 6 Fazlı ÇSARM Yapılandırması

İç ve dış stator kutupları birbiriyle aynı hizada ve rotor parçaları sırt sırta olacak şekilde Şekil 4.1'de gösterildiği gibi yapılandırıldığında iç ve dış stator faz dirençlerinin eşit olmamasından dolayı iç ve dış stator akımlarını aynı 60 A tepe akımında kontrol edebilmek için 6 fazlı dönüştürücü ile sürülerek benzetimi yapılmıştır. Örneğin A1-A1' ve A2-A2' sargıları seri bağlanarak A fazı oluşturulmuştur. Diğer sargılar da aynı şekilde seri bağlanarak iç ve dış rotorlu ARM fazları elde edilmiştir.

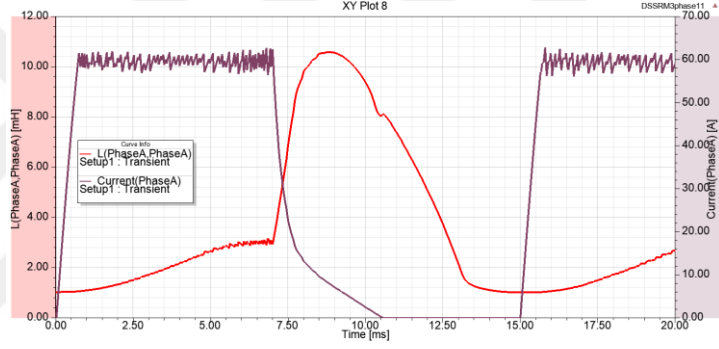


Şekil 4.1 Stator ve rotorları kaydırılmamış 6 fazlı ÇSARM yapılandırması

Benzetim sonucunda hizalı konumda oluşan manyetik akı yoğunluğu ve akı çizgileri Şekil 4.2’de faz akımı ve endüktans eğrileri Şekil 4.3’de verilmiştir.

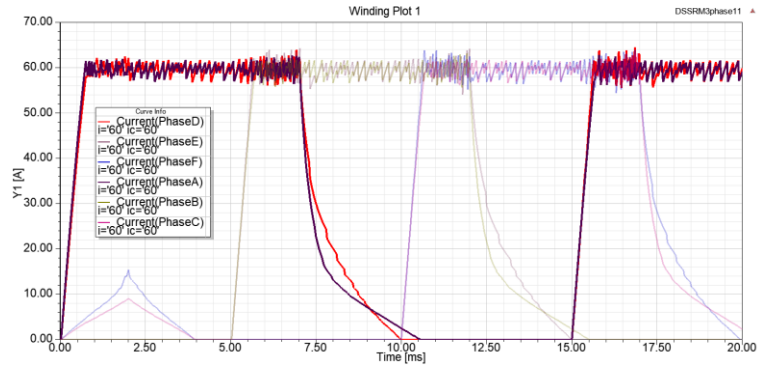


Şekil 4.2 Stator ve rotorları kaydırılmamış 6 fazlı ÇSARM manyetik akı yoğunluğu ve akı çizgileri (Hızlı Konum)



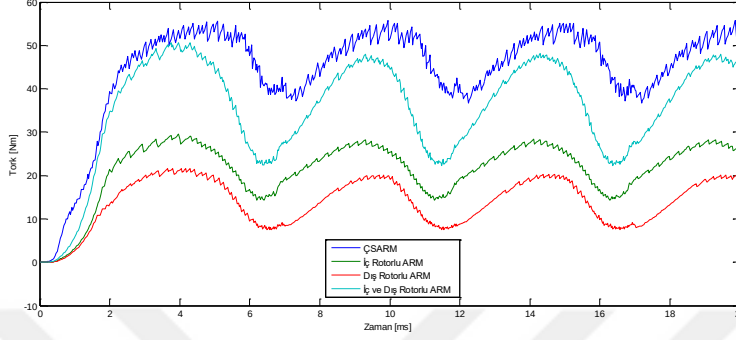
Şekil 4.3 Stator ve rotorları kaydırılmamış 6 fazlı ÇSARM faz akımı ve endüktansı

Şekil 4.4’de iç ve dış rotorlu ARM’lere ait faz akımları verilmiştir. İç rotorlu ARM’nin A fazı ile dış rotorlu ARM’nin D fazının akım açma ve kapama açıları aynı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.4 Stator ve rotorları kaydırılmamış 6 fazlı ÇSARM faz akımları

İç ve dış rotorlu ARM yapıları sadece iç rotorlu ARM, sadece dış rotorlu ARM ve her ikisi birlikte stator ve rotorları kaydırılmamış 6 fazlı ÇSARM olarak 48 VDC gerilim altında faz akımları 60 A tepe akımına sahip olacak şekilde benzetimi gerçekleştirilmiştir. Benzetim sonucunda oluşan tork eğrileri Şekil 4.5’de verilmiştir.

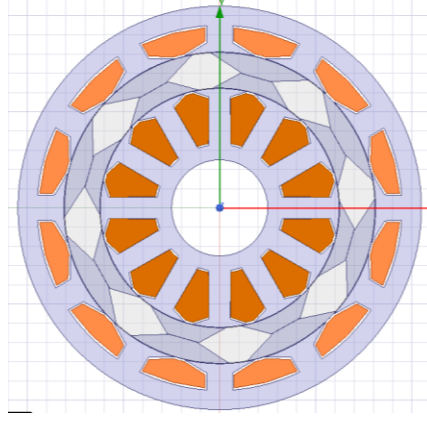


Şekil 4.5 Stator ve rotorları kaydırılmamış 6 fazlı ÇSARM tork eğrileri

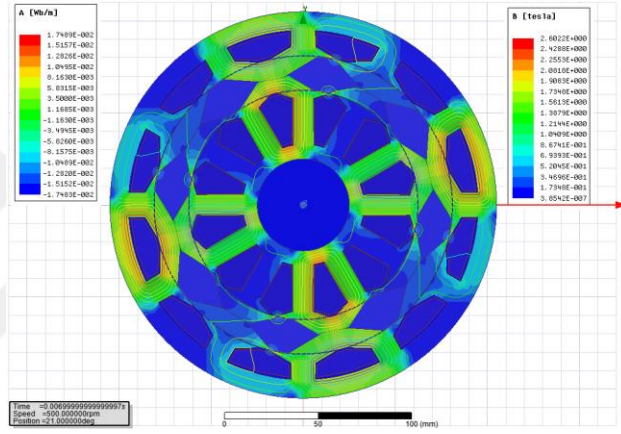
Sadece dış rotorlu ARM'nin oluşturduğu ortalama tork 14 Nm ve tork dalgalanması %85, sadece iç rotorlu ARM'nin oluşturduğu ortalama tork 22 Nm ve tork dalgalanması %70 civarındadır. İç ve dış rotorlu ARM'lerin ürettiği torkların matematiksel toplamı sonucunda oluşan ortalama tork 38 Nm ve tork dalgalanması % 65 seviyesindedir. Her ikisi birlikte stator ve rotorları kaydırılmamış 6 fazlı ÇSARM'nin oluşturduğu ortalama tork 46 Nm ve tork dalgalanması %32 olmaktadır. Bu durumda ÇSARM yapısı iç ve dış rotorlu ARM yapılarının ayrı ayrı oluşturduğu torkların toplamından yaklaşık %20 daha fazla tork üretmektedir ve tork dalgalanması da yaklaşık %50 azalmaktadır.

Bir özel durum olarak şaft çapı 30 mm'den 50 mm'ye çıkarılmış, içteki statorun oluk alanı %12 artırılmış ve iç stator kutup yüksekliği %10 azaltılmış haliyle rotor parçaları sırt sırta durumda iken birleştirilmiş Şekil 4.6'da verilen ÇSARM'nin benzetimi gerçekleştirilmiştir. İç ve dış stator akım yoğunlukları yaklaşık olarak aynıdır. Rotor parçalarının sırt sırta birleştirilmesi ile dış statorlu ARM'nin hava aralığı çapı arttığından dış rotorlu ARM torku artmış ve dolayısıyla ÇSARM ortalama torku yaklaşık %10 artmıştır.

Rotorları birleştirilmiş 6 fazlı ÇSARM'ye ait hızlı konumda oluşan manyetik akı yoğunluğu ve akı çizgileri Şekil 4.7'de verilmiştir. Bu konum fazlara 60 A tepe akımının uygulandığı son konumdur, bu konumdan itibaren faz akımları düşmeye başlamaktadır. İç ve dış rotorlu ARM'nin doğru polarizasyonu neticesinde rotorlarının birleştirilmesinin sorun teşkil etmediği görülmektedir.

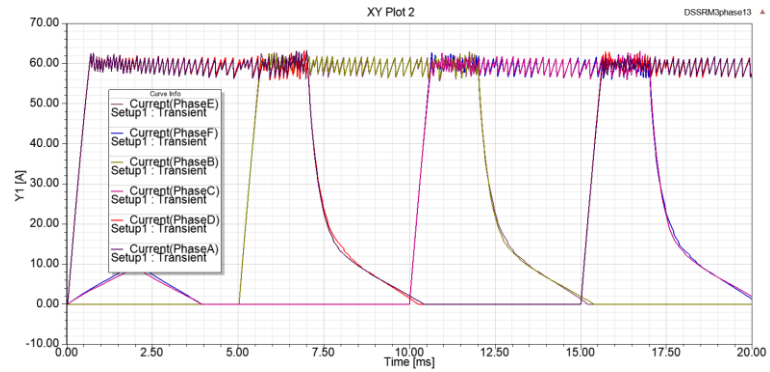


Şekil 4.6 Rotorları birleştirilmiş 6 fazlı ÇSARM yapısı

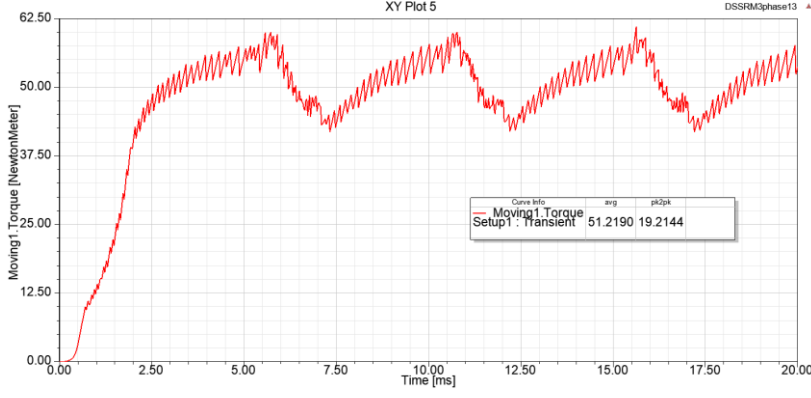


Şekil 4.7 Rotorları birleştirilmiş 6 fazlı ÇSARM manyetik akı yoğunluğu ve akı çizgileri (Hızalı Konum)

Faz akımları Şekil 4.8’de verilmiştir. Şekil 4.9’da verilen tork eğrisine göre ortalama tork 51 Nm ve tork dalgalanması da yaklaşık %37 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.8 Rotorları birleştirilmiş 6 fazlı ÇSARM faz akımları



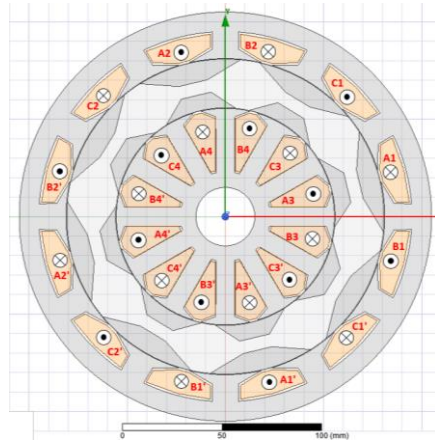
Şekil 4.9 Rotorları birleştirilmiş 6 fazlı ÇSARM tork eğrisi

4.2 Stator ve Rotorları Kaydırılmamış 3 Fazlı ÇSARM Yapılandırması

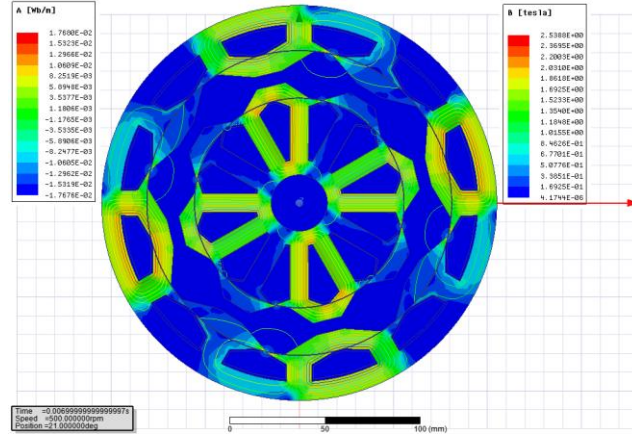
Fazları oluşturan sargıların seri ve paralel bağlanma durumlarına göre farklı 3 fazlı ÇSARM yapıları oluşturulmuştur.

İlk olarak iç ve dış stator sargıları birbirine seri bağlanarak faz sargıları oluşturulmuş ve Şekil 4.10’da verilen stator ve rotorları kaydırılmamış 3 fazlı ÇSARM yapısı elde edilmiştir. A1-A1’, A2-A2’, A3-A3’ ve A4-A4’ sargıları seri bağlanarak A fazı oluşturulmuştur. Diğer iki faz da aynı yöntemle elde edilmiştir.

Bu yapı ile hem faz dirençleri hem de faz endüktansları artırılmış olmaktadır. 48 VDC dönüştürücü gerilimi faz akımlarının 60 A tepe akımına ulaşmasına izin vermeyeceğinden dönüştürücü gerilimi 72 VDC alınarak benzetimi yapılmıştır.

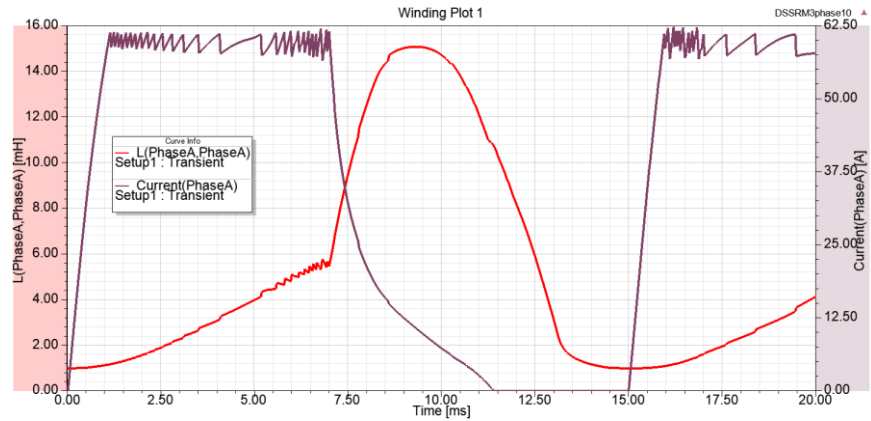


Şekil 4.10 Stator ve rotorları kaydırılmamış 3 fazlı ÇSARM yapılandırması

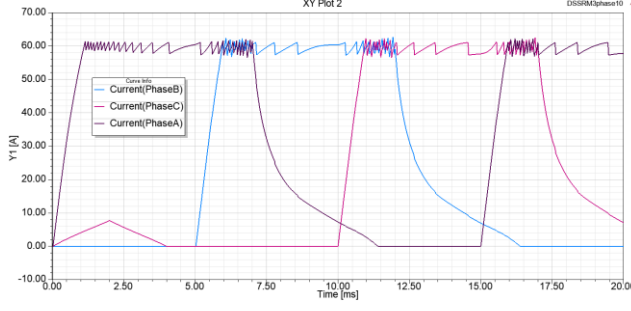


Şekil 4.11 Stator ve rotorları kaydırılmamış 3 Fazlı ÇSARM manyetik akı yoğunluğu ve akı çizgileri (Hızlı Konum)

Hızlı konumda iken manyetik akı yoğunluğu ve akı çizgilerinin verildiği Şekil 4.11’de rotor açısı 21° iken A fazı için 60 A tepe akımının uygulandığı son konumdur. Bu konumda B fazı da enerjilendirilmiş vaziyette olduğundan A ve B fazları arasında bulunan stator kutbunda A ve C fazları arasında bulunan stator kutbuna göre daha fazla manyetik akı yoğunluğu oluşmaktadır. Şekil 4.12’den de görüldüğü üzere rotor açısı 27° oluncaya kadar A fazı için faz endüktansının eğimi pozitif kalacağından faz akımının sıfıra düşmesi sırasında negatif veya frenleme torku oluşmayacaktır. Ancak rotor açısı tam hızlı konumu geçtikten sonra faz endüktansının eğimi negatif olacağından faz sargısı üzerinde kalan akımın karesi ile doğru orantılı olarak negatif veya frenleme torku oluşacaktır. Bu durum ortalama torkun düşmesine neden olacaktır. Faz akımları Şekil 4.13’te verilmiştir.

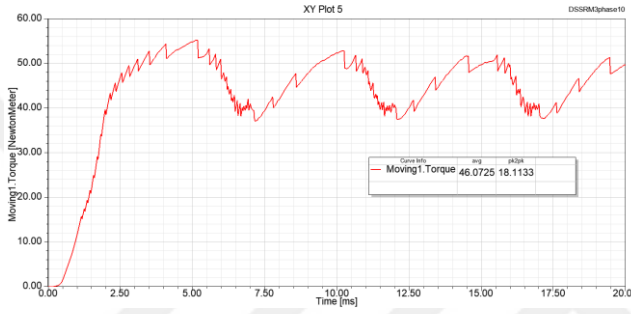


Şekil 4.12 Stator ve rotorları kaydırılmamış 3 fazlı ÇSARM faz akımı ve endüktansı (Faz Gerilimi 72VDC)



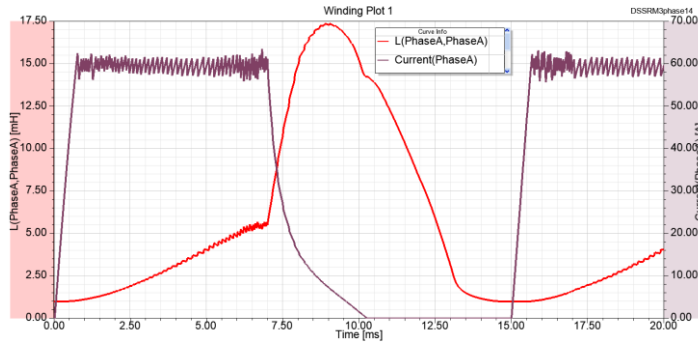
Şekil 4.13 Stator ve rotorları kaydırılmamış 3 fazlı ÇSARM faz akımları (Faz Gerilimi 72VDC)

Benzetim sonucunda Şekil 4.14’de verilen tork eğrisine göre ortalama tork 46 Nm tork dalgalanması yaklaşık %35 olarak bulunmuştur.



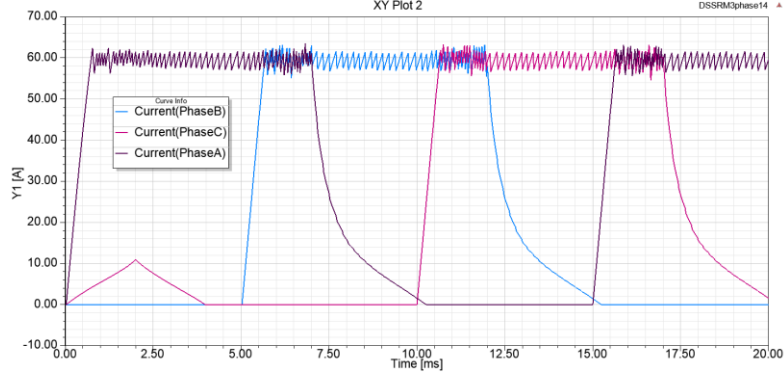
Şekil 4.14 Stator ve rotorları kaydırılmamış 3 fazlı ÇSARM tork eğrisi (Faz Gerilimi 72VDC)

Dönüştürücü gerilimi 96 VDC, faz akımının tepe değeri 60 A olacak şekilde benzetim tekrarlanmıştır. Şekil 4.15’den görüldüğü üzere faz endüktansının eğimi 27° ’den sonra negatif olmaya başladığından faz akımının sıfıra düşmesi için 6° ’lik mekanik açı, 500 d/d için 2 ms zamanı bulunmaktadır. Bara gerilimi 96 VDC olduğundan 72 VDC bara gerilimine göre faz akımı daha hızlı sıfıra inmekte dolayısıyla negatif tork oluşumunu ve ortalama torkun azalmasını önlemektedir.

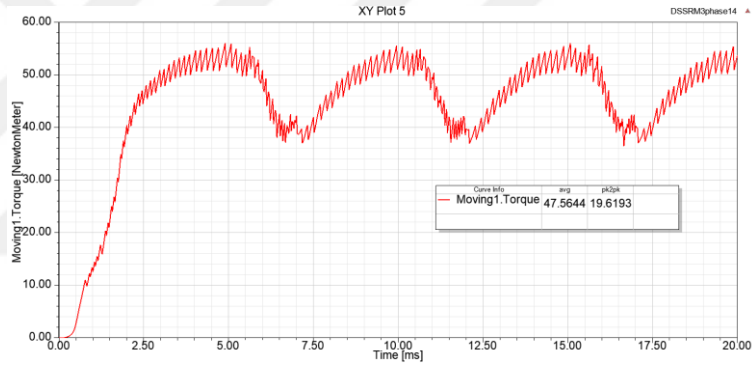


Şekil 4.15 Stator ve rotorları kaydırılmamış 3 fazlı ÇSARM faz akımı ve endüktansı (Faz Gerilimi 96VDC)

Benzetim sonucunda oluşan faz akımları Şekil 4.16’da verilmiştir. Şekil 4.17’de verilen tork eğrisine göre ortalama tork 47,5 Nm tork dalgalanması yaklaşık %40 olarak bulunmuştur.



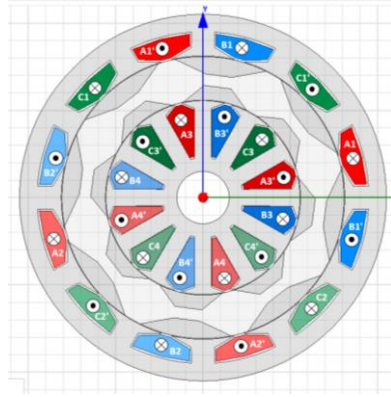
Şekil 4.16 Stator ve rotorları kaydırılmamış 3 fazlı ÇSARM faz akımları (Faz Gerilimi 96VDC)



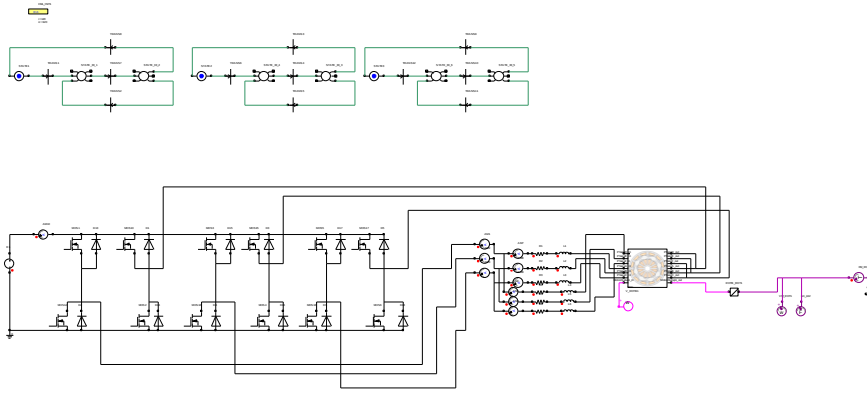
Şekil 4.17 Stator ve rotorları kaydırılmamış 3 fazlı ÇSARM tork eğrisi (Faz Gerilimi 96VDC)

İç ve dış stator çapları farklı ve oluk başına düşen sarım sayıları eşit olduğundan iç ve dış stator sargı dirençleri birbirinden farklıdır. Faz sargı dirençlerinin yaklaşık olarak eşit olduğu bir tasarımda ÇSARM 3 fazlı dönüştürücü ile sürülebilir. Stator ve rotorları kaydırılmamış ÇSARM’yi 48VDC gerilim ile beslemek için sargı tasarımı değiştirilmiştir. Faz sargı dirençlerini yaklaşık olarak eşitlemek için örneğin A1-A1’ ile A3-A3’ sargıları seri ve A2-A2’ ile A4-A4’ sargıları da seri bağlandıktan sonra her ikisi paralel bağlanarak bir faz sargısı oluşturulabilir. Şekil 4.18’de gösterildiği gibi diğer fazlar da bu şekilde oluşturulursa faz dirençleri eşitlenmiş 3 fazlı ÇSARM yapısı elde edilir ve Şekil 4.19’da verilen 48VDC 3 fazlı dönüştürücü devresi ile ÇSARM’yi sürmek mümkün olur. Seri bağlı sargıların paralel bağlanmasıyla oluşan faz sargılarından yaklaşık 60 A akım geçmesi için benzetim esnasında hat akımı 120 A olarak kontrol edilmiştir.

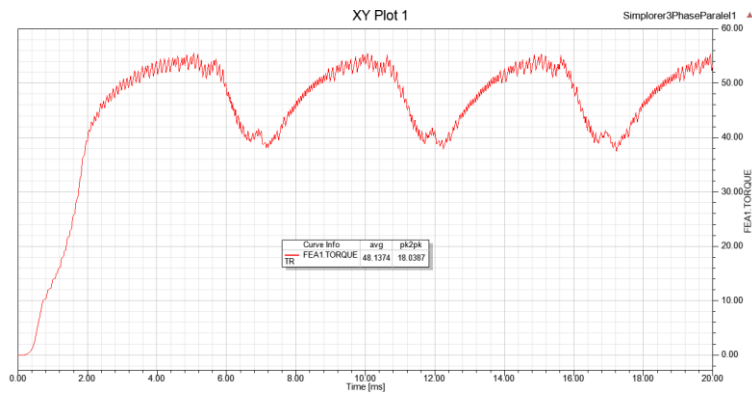
Benzetim sonucu oluşan 3 fazlı ÇSARM'ye ait tork eğrisi Şekil 4.20'de, kontrol ve faz akımları Şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.18 Stator ve rotorları kaydırılmamış 3 fazlı ÇSARM yapılandırması

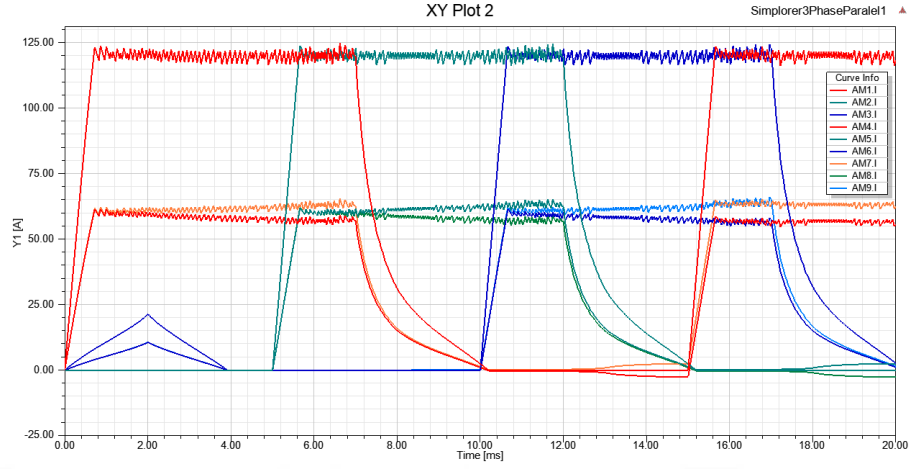


Şekil 4.19 3 fazlı ÇSARM sürücü devresi



Şekil 4.20 Stator ve rotorları kaydırılmamış 3 fazlı ÇSARM tork eğrisi (Faz Gerilimi 48V)

Şekil 4.20’de verilen tork eğrisine göre ortalama tork 48 Nm ve tork dalgalanması da yaklaşık %37,5 olarak bulunmuştur.



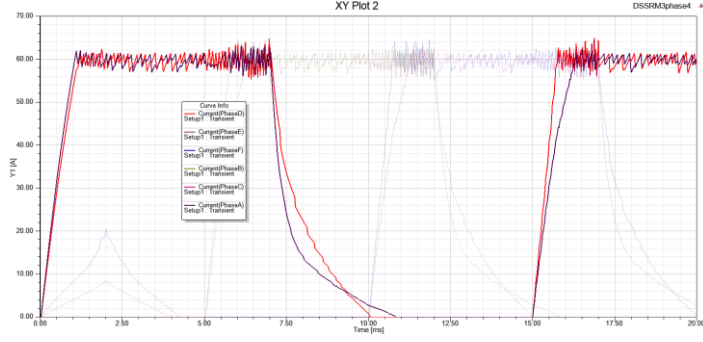
Şekil 4.21 Stator ve rotorları kaydırılmamış 3 fazlı ÇSARM faz akımları (Faz Gerilimi 48V)

Paralel bağlanarak faz sargısını oluşturan her bir seri bağlı sargıların oluşturduğu direnç yaklaşık olarak eşitlenmiş olsa bile 120 A ile kontrol edilen hat akımının bir fazı oluşturan paralel sargılara her zaman eşit dağılmadığı görülmektedir.

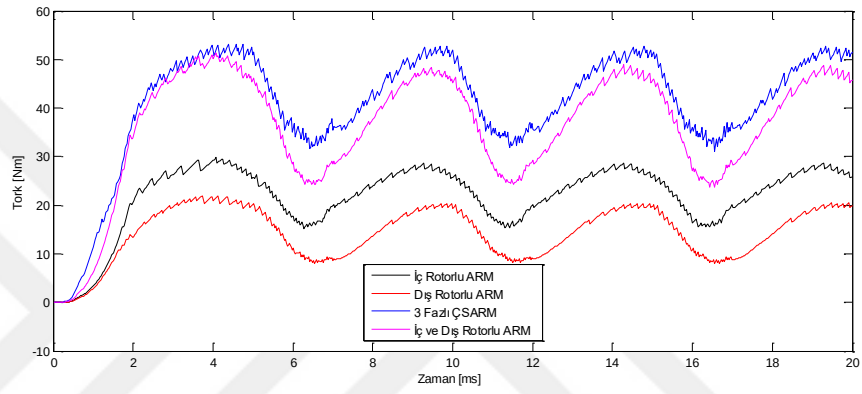
4.3 Stator ve Rotorları Kaydırılmış 6 Fazlı ÇSARM Yapılandırması

Dış rotorlu ARM stator ve rotorları iç rotorlu ARM stator ve rotorlarına göre 22,5° kaydırılarak Şekil 4.22’de yapısı verilen 6 fazlı ÇSARM elde edilmiştir. A1-A1’ ve A2-A2’ sargıları seri bağlanarak bir faz sargısı elde edilmiştir. Diğer fazlar da aynı yöntemle oluşturulmuştur.

Yine bu yapıda da iç ve dış rotorlu ARM’lere ait faz dirençleri eşit olmadığından 48VDC gerilim altında faz akımlarının 60 A tepe değerinde histeresis olarak ayrı ayrı kontrol edilebilmesi için 6 fazlı dönüştürücü devresine ihtiyaç duyulmuştur. 3 fazlı dönüştürücü devresi ile sürmek için faz dirençlerinin eşit ve iç ve dış rotorlu ARM faz sargılarının paralel bağlı olması gerekmektedir.



Şekil 4.24 Stator ve rotorları kaydırılmamış 6 fazlı ÇSARM faz akımları (Faz Gerilimi 48V)



Şekil 4.25 Stator ve rotorları kaydırılmış 6 fazlı ÇSARM tork eğrileri

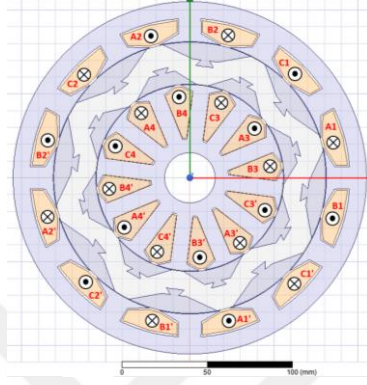
Sadece dış rotorlu ARM'nin oluşturduğu ortalama tork 14,8 Nm ve tork dalgalanması %95, sadece iç rotorlu ARM'nin oluşturduğu ortalama tork 23 Nm ve tork dalgalanması %63 civarındadır. İç ve dış rotorlu ARM'lerin ürettiği torkların matematiksel toplamı sonucunda oluşan ortalama tork 38 Nm ve tork dalgalanması % 65 seviyesindedir. Her ikisi birlikte stator ve rotorları kaydırılmış 6 fazlı ÇSARM'nin oluşturduğu ortalama tork 43,3 Nm ve tork dalgalanması %51 olmaktadır. Bu durumda ÇSARM yapısı iç ve dış rotorlu ARM yapılarının ayrı ayrı oluşturduğu torkların toplamından yaklaşık %15 daha fazla tork üretmektedir ve tork dalgalanması da yaklaşık %20 azalmaktadır.

4.4 Stator ve Rotorları Kaydırılmış 3 Fazlı ÇSARM Yapılandırması

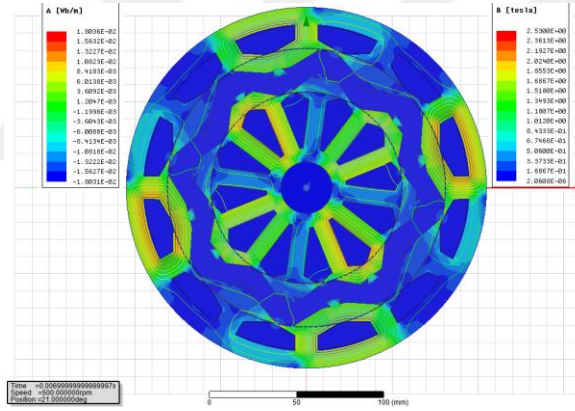
Dış rotorlu ARM stator ve rotorları iç rotorlu ARM stator ve rotorlarına göre 22,5° kaydırılarak ve faz sargıları yeniden yapılandırılarak 3 fazlı ÇSARM yapıları elde edilmiştir. İlk olarak iç ve dış stator sargıları birbirine seri bağlanarak faz sargıları oluşturulmuş ve Şekil 4.26'da verilen stator ve rotorları kaydırılmış 3 fazlı

ÇSARM yapısı elde edilmiştir. A1-A1', A2-A2', A3-A3' ve A4-A4' sargıları seri bağlanarak A fazı oluşturulmuştur. Diğer iki faz da aynı yöntemle elde edilmiştir.

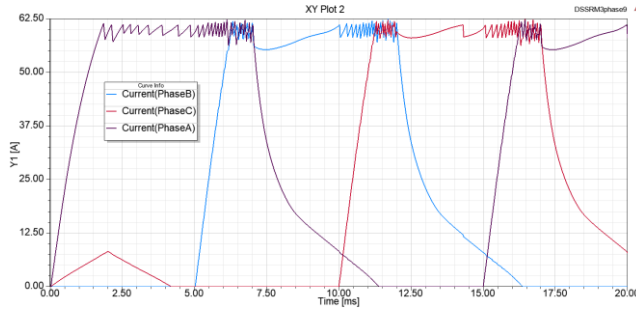
Bu yapı ile hem faz dirençleri hem de faz endüktansları artırılmış olduğundan faz akımlarının 60 A tepe akımına ulaşması için öncelikle dönüştürücü gerilimi 72 VDC alınarak benzetimi yapılmıştır.



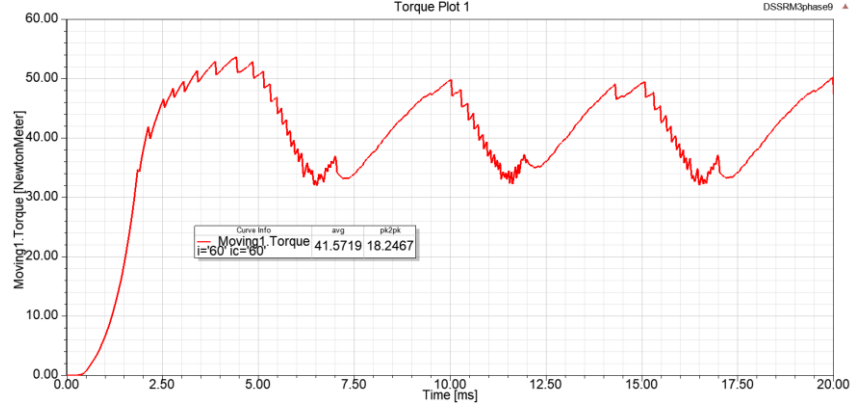
Şekil 4.26 Stator ve rotorları kaydırılmış 3 fazlı ÇSARM yapılandırması



Şekil 4.27 Stator ve rotorları kaydırılmış 3 fazlı ÇSARM manyetik akı yoğunluğu ve akı çizgileri (Hızlı Konum) (Faz Gerilimi 72 VDC)

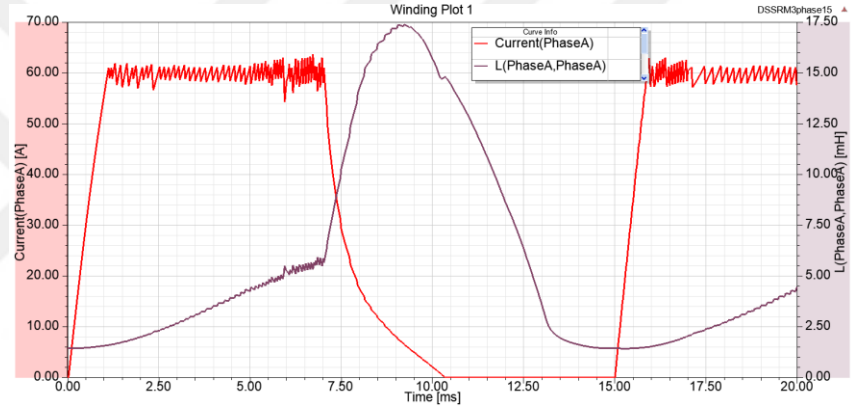


Şekil 4.28 Stator ve rotorları kaydırılmış 3 fazlı ÇSARM faz akımları (Faz Gerilimi 72 VDC)

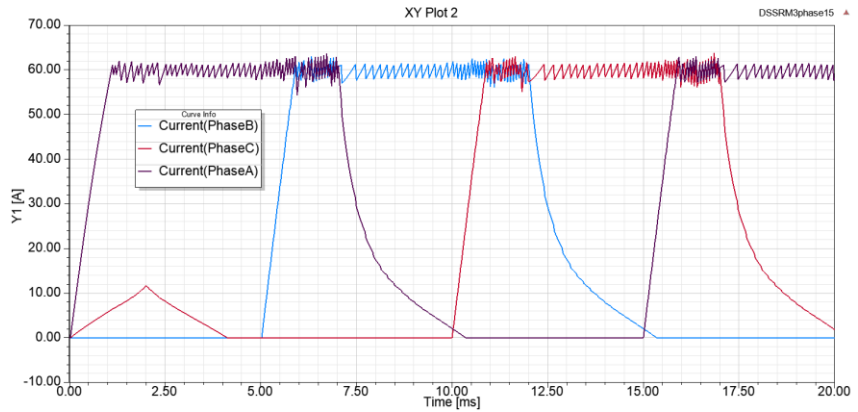


Şekil 4.29 Stator ve rotorları kaydırılmış 3 fazlı ÇSARM tork eğrisi (Faz Gerilimi 72 VDC)

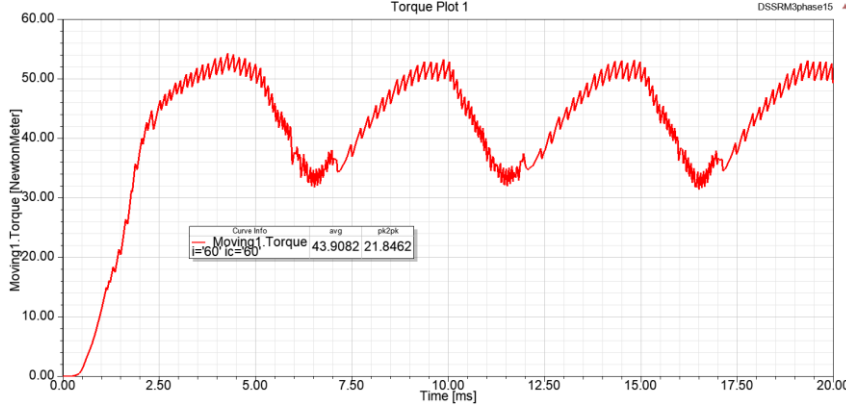
Dönüştürücü gerilim 96 VDC alınarak benzetim tekrarlanmış ve sonuçları Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32’de verilmiştir.



Şekil 4.30 Stator ve rotorları kaydırılmış 3 fazlı ÇSARM faz akımı ve endüktansı (Faz Gerilimi 96V)



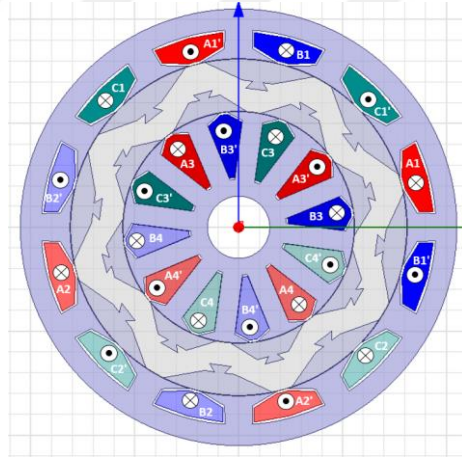
Şekil 4.31 Stator ve rotorları kaydırılmış 3 fazlı ÇSARM faz akımları (Faz Gerilimi 96V)



Şekil 4.32 Stator ve rotorları kaydırılmış 3 fazlı ÇSARM tork eğrisi (Faz Gerilimi 96V)

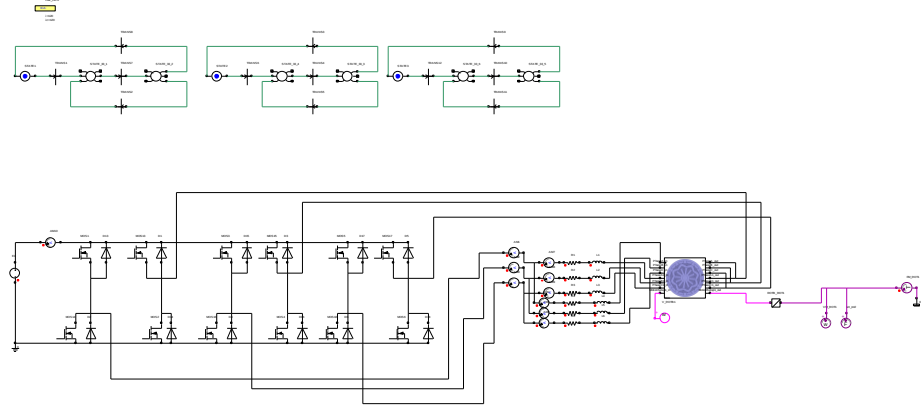
Yine burada 48 VDC gerilim altında 3 fazlı dönüştürücü ile sürmek için faz sargı dirençlerini yaklaşık olarak eşitlemek gerekmektedir. Örneğin A1-A1' ile A3-A3' sargıları seri ve A2-A2' ile A4-A4' sargıları da seri bağlandıktan sonra her ikisi paralel bağlanarak bir faz oluşturulabilir. Bu şekilde diğer fazlar oluşturulursa Şekil 4.33'de verilen 3 fazlı ÇSARM yapısını 48VDC gerilim ile sürmek mümkün olur.

Benzetimi Şekil 4.34'de verilen sürücü ile yapılan 3 fazlı ÇSARM'ye ait tork eğrisi Şekil 4.35'de, kontrol ve faz akımları Şekil 4.36'de verilmiştir.

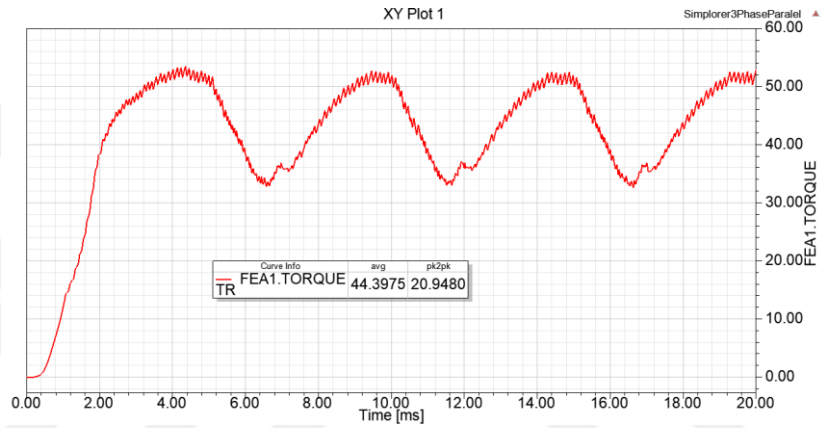


Şekil 4.33 Stator ve rotorları kaydırılmış 3 fazlı ÇSARM yapılandırması (Faz Gerilimi 48 VDC)

Simplorer ile eş zamanlı benzetim yapılırken ÇSARM 6 fazlı olarak düşünülmüş ve sürücü devre üzerinde sargılar paralellenmiş ve 3 fazlı ÇSARM yapısı oluşturulmuştur. Paralel sargıların her birine tepe değeri 60 A akım uygulanması gerektiğinden dönüştürücü hattın tepe akımı 120 A olarak kontrol edilmiştir.

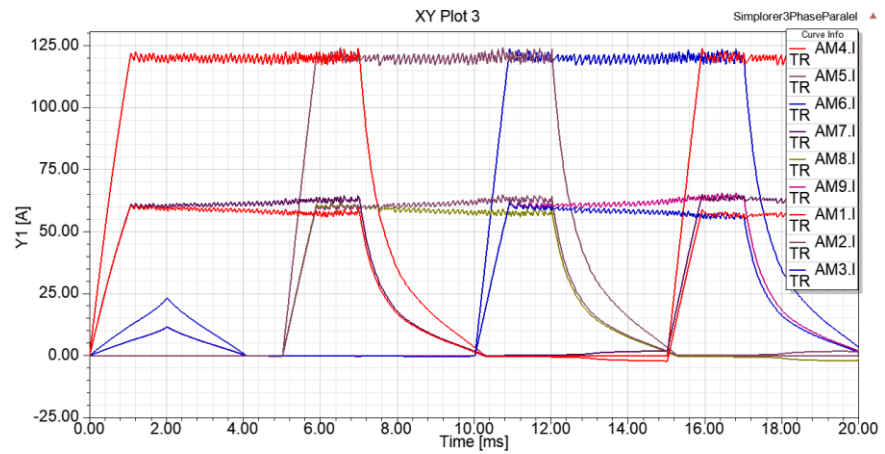


Şekil 4.34 3 fazlı ÇSARM sürücü devresi



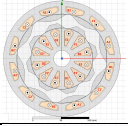
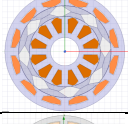
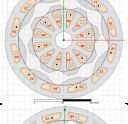
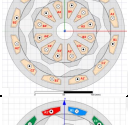
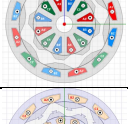
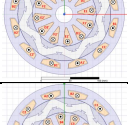
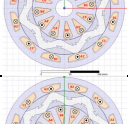
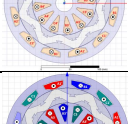
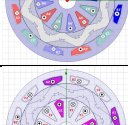
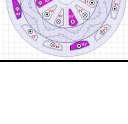
Şekil 4.35 Stator ve rotorları kaydırılmış 3 fazlı ÇSARM tork eğrisi

Şekil 4.35’de verilen tork eğrisine göre ortalama tork 44,4 Nm ve tork dalgalanması da yaklaşık %47 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.36 Stator ve rotorları kaydırılmış 3 fazlı ÇSARM faz akımları

Tablo 4.1 ÇSARM Yapılandırmaları

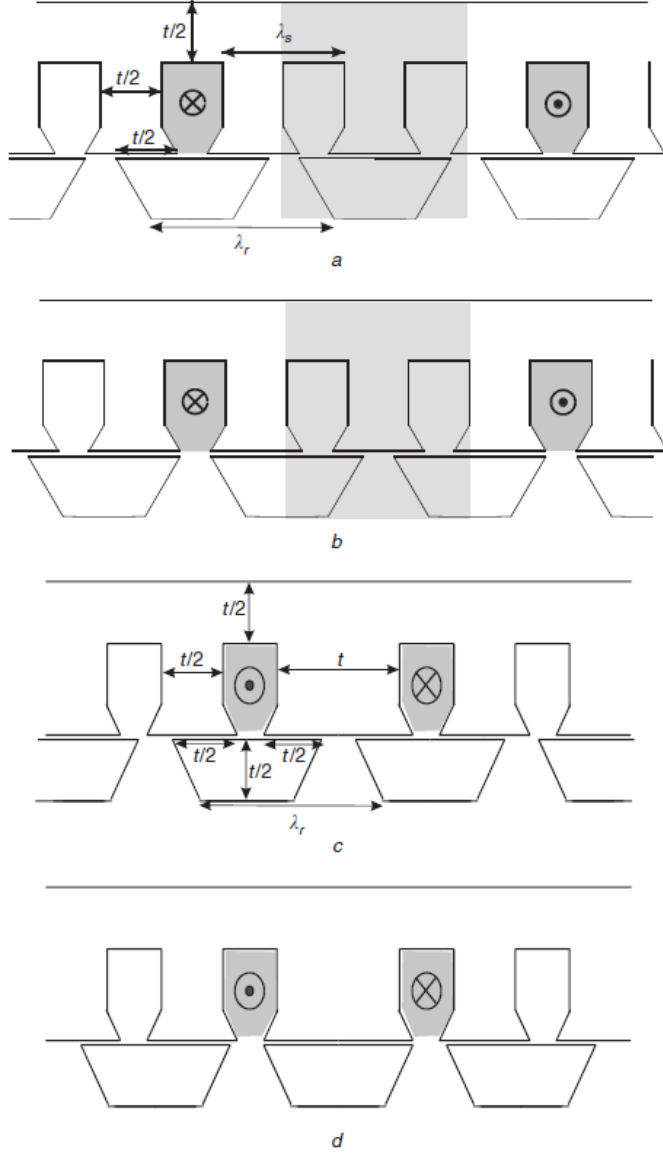
ÇSARM Tipi	Stator ve Rotor Durumu	Faz Sayısı	Faz Gerilimi [V]	Faz Tepe Akımı [A]	Dönüştürücü Tepe Akımı [A]	Ortalama Tork [Nm]	Tork Dalgalanması [%]
	Stator ve Rotorları kaydırılmamış	6	48	60	60	46	32
		6	48	60	60	51	38
		3	72	60	60	46	35
		3	96	60	60	47,5	40
		3	48	60	120	48	37,5
	Stator ve Rotorları kaydırılmış	6	48	60	60	43,3	51
		3	72	60	60	41,5	44
		3	96	60	60	44	50
		3	48	60	120	44,4	47
	Rotoru kaydırılmış (tez konusu)	6	48	60	60	46	10

Tablo 4.1’de ÇSARM yapılandırmaları karşılaştırılmıştır. Tez konusu sadece rotoru kaydırılmış 6 fazlı ÇSARM yapısının diğer ÇSARM yapılarına göre tork dalgalanmasını etkili bir şekilde azalttığı gösterilmiştir.

5. KISA ADIM SARIMLI PARÇALI ROTOR YAPILI ÇSARM ELEKROMANYETİK TASARIMI

5.1 Kısa Adım Sarımlı ÇSARM Parametrik Çizimi

Mecrow et.al (2003) kısa adım sarımlı parçalı rotorlu ARM'nin geometrik yapısını Şekil 5.1'de göstermiştir.



Şekil 5.1 3 Fazlı Parçalı Rotorlu ARM a,b) Uzun Adım Sarımlı ARM c,d) Kısa Adım Sarımlı ARM (Mecrow et al.,2003)

Şekil 5.1.d incelendiğinde hizalı olmayan konumda üzerine sarım yapılan stator kutup başı açısıyla rotor parçası açısının eşit olduğu görülmektedir. Aynı zamanda stator oluk açıklığının yay uzunluğu, komşu rotor parçaları arasındaki açıklığın yay uzunluğuna eşit olmalıdır ki hizalı olmayan konumda akı yolu için

hava aralığının en fazla dolayısıyla endüktansın en az olmasını sağlasın. Eşit düzeyde manyetik doygunluğu sağlamak için stator oluk boşluklarını ortalayan rotor parçaları (hizalı durum), üzerinde sargı bulunduran ve bulundurmeyen stator dişlileri ve stator boyunduruğu boyunca akı yolunun eşit genişlikte olması istenir. Bu gereksinimler ile motor geometrik yapısındaki bazı parametreler arasında ilişki kurulabilir.

Kısa adım sarımlı Parçalı Rotor Yapılı ARM için;

bsy stator boyunduruk kalınlığı, ws üzerinde sargı bulunan stator kutup genişliği, ws1 üzerinde sargı bulunmayan stator kutup genişliği ve hr rotor parçası yüksekliği olmak üzere;

$$ws = 2 \text{ bsy} \quad (5.1)$$

$$ws1 \geq \text{bsy} \quad (5.2)$$

Kısmen de olsa iki fazın enerjilendirildiği durumlar olduğundan erken doyumu önlemek için üzerinde sargı bulunmayan stator kutup genişliği boyunduruk kalınlığından daha fazla seçilebilir. Fakat bu durum stator oluk alanını azaltır, akım yoğunluğunu artırır dolayısıyla soğutma ihtiyacı doğurur veya aynı stator oluk alanına sahip olmak ve aynı akım yoğunluğunu elde etmek için stator dış çapının büyümesine sebep olur.

Rotor parçası yüksekliği stator boyunduruk kalınlığına eşit seçilebilir.

$$hr = \text{bsy} \quad (5.3)$$

Dg hava aralığı çapı, N_s stator kutup sayısı, N_r rotor kutup sayısı, β_{sp} stator kutup başı açısı, β_{sp1} üzerinde sarım bulundurmeyen stator kutup başı açısı ve β_{rp} rotor parçası açısı olmak üzere;

$$\beta_{sp} = \beta_{rp} \quad (5.4)$$

$$0,5 \left(\frac{360^\circ}{N_s/2} - \beta_{sp} - \beta_{sp1} \right) = \frac{360^\circ}{N_r} - \beta_{rp} \quad (5.5)$$

$$0,5 \left(\frac{360^\circ}{6} - \beta_{sp} - \beta_{sp1} \right) = \frac{360^\circ}{10} - \beta_{sp} \quad (5.6)$$

$$60^\circ - \beta_{sp} - \beta_{sp1} = 72^\circ - 2 \beta_{sp} \quad (5.7)$$

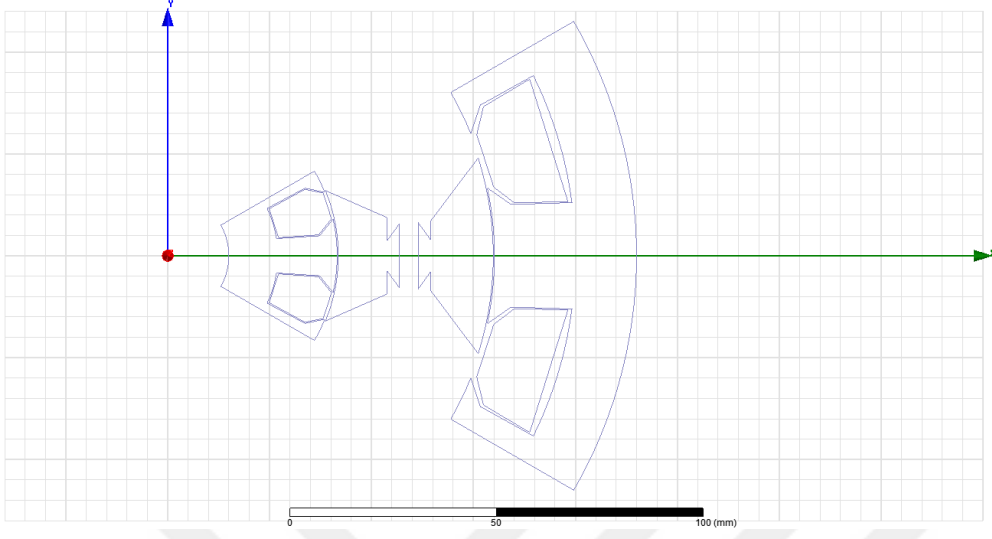
$$\beta_{sp1} = \beta_{sp} - 12^\circ \quad (5.8)$$

olarak alınır. Bu durumda hava aralığı boyunca stator oluk açıklığı ile rotor parçaları arasındaki açıklık eşit olur.

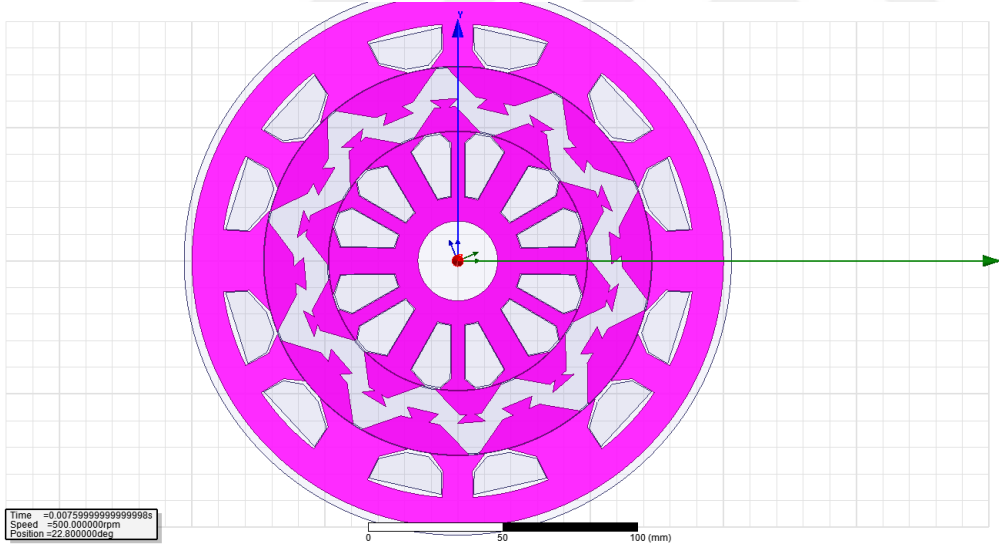
Tablo 5.1 Kısa Adım Sarımlı ÇSARM Temel Boyutları ve Boyutsal Tarama Sınırları

Sembol	Tanım	Aralık
Ds	Stator dış çapı [mm]	210
L	Stator ve rotor uzunluğu [mm]	100
Dg	Hava aralığı çapı [mm]	144-170
g	Hava aralığı [mm]	0,3
bsy	Stator boyunduruk kalınlığı [mm]	6-12
hs	Stator kutup yüksekliği [mm]	Ds/2-Dg/2-g/2-bsy
hsp	Trapezoid yüksekliği [mm]	3-6
ws	Stator kutup genişliği [mm]	2bsy
ws1	Sargısız stator kutup genişliği [mm]	bsy
hr	Rotor parçası yüksekliği [mm]	6-12
hk	Rotor parçası kuyruk yüksekliği [mm]	3-4
GG	İç ve dış rotor parçaları tabanları arası mesafe [mm]	(-5)-(5)
β_{sp}	Stator kutup başı açısı [deg.]	25-33
β_{sp1}	Sargısız stator kutup başı açısı [deg.]	10-21
β_{rp}	Rotor parçası kutup açısı [deg.]	β_{sp}
wso	Stator kutup genişliği [mm]	2bsyo
wso1	Sargısız stator kutup genişliği [mm]	bsyo
bsyo	Stator boyunduruk kalınlığı [mm]	6-10
Dso	Stator dış çapı [mm]	$2(Dg/2-hr-hro-hk-hko-GG-g/2-go)$
Dgo	Hava aralığı çapı [mm]	$Dso+go/2$
go	Hava aralığı [mm]	0,3
hso	Stator kutup yüksekliği [mm]	$Dso/2-Dsft/2-bsyo$
hspo	Trapezoid yüksekliği [mm]	3-5
hro	Rotor parçası yüksekliği [mm]	6-12
hko	Rotor parçası kuyruk yüksekliği [mm]	3-4
β_{spo}	Stator kutup başı açısı [deg.]	25-33
β_{spo1}	Sargısız stator kutup başı açısı [deg.]	10-21
β_{rpo}	Rotor kutup açısı [deg.]	β_{spo}
Dsft	Şaft çapı [mm]	28

ANSYS Maxwell ile hazırlanan kısa adım sarımlı Çift Statorlu Parçalı Rotor Yapılı ARM'nin parametrik çizimi Şekil 5.2'de verilmiştir.

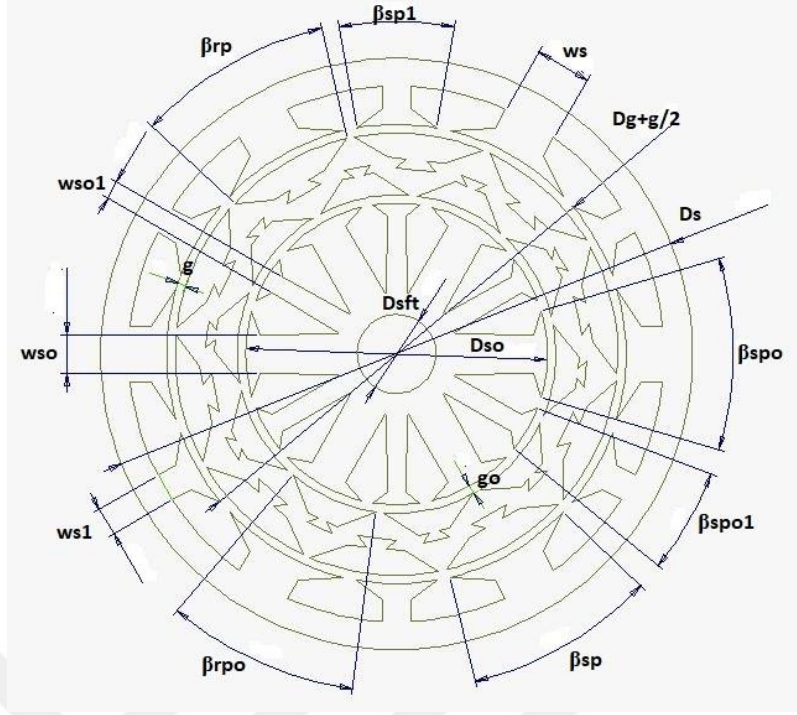


Şekil 5.2 Kısa adım sarımlı ÇSARM parametrik çizimi



Şekil 5.3 Kısa adım sarımlı ÇSARM

Şekil 5.3'de parametrik çizim kullanılarak oluşturulan 3'er fazlı 12/10 kutuplu iç ve dış rotorlu ARM yapılarının eş eksenli olarak oluşturdukları kısa adım sarımlı ÇSARM verilmiştir. Bu yapının temel boyutları Şekil 5.4'de gösterilmiştir.



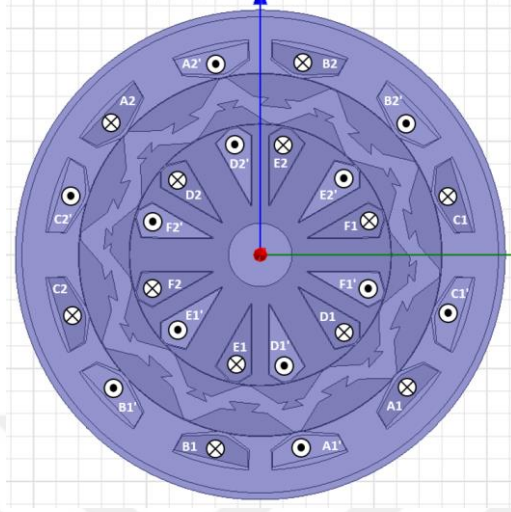
Şekil 5.4 Kısa adım sarımlı ÇSARM temel boyutları

5.2 Boyutsal Tarama ile Kısa Adım Sarımlı Parçalı Rotor Yapılı ÇSARM Tasarımı

İç ve dış rotorlu ARM'lerin yaklaşık olarak aynı akım yoğunluğunu sahip olabilmeleri için stator oyuk alanlarının birbirine yakın olması gerekeceğinden iç rotorlu ARM hava aralığı çapı $D_g=160$ mm olarak alınmıştır. Aynı stator dış çapına sahip uzun ve kısa adım sarımlı ÇSARM'lerin yaklaşık aynı manyetik akı yoğunluğu için kısa adım sarımlı ÇSARM yapısının daha az oyuk alanına sahip olduğu görülür. Uzun adım sarımlı ÇSARM yapısında iç rotorlu ARM için stator kutup genişliği $w_s=13,5$ mm olarak alınırsa 12 stator dişi olduğundan stator kutup genişlikleri toplamı 162 mm olurken kısa adım sarımlı ÇSARM yapısında Mecrow'un (2003) önerdiği motor geometrisine bağlı kalınarak üzerinde sarım olan statorun kutup genişliği stator boyunduruk kalınlığının iki katı, sargısız stator kutup genişliği de stator boyunduruk kalınlığı kadar olacağından stator kutup genişlikleri toplamı 180 mm olacaktır. Dolayısıyla bu iki ÇSARM'lerin stator oluk alanları farklı olduğundan hem akım yoğunlukları hem de çekirdek ağırlıkları farklı olacaktır. Kısa adım sarımlı ÇSARM'de çekirdek kayıpları artarken buna karşılık bakır ağırlığı düşecek ve bakır kayıpları azalacaktır.

bsy=10 mm, ws=19,5 mm, ws1=9,5 mm

bsyo=8 mm, wso=15 mm, wso1=7,5 mm olarak alınmıştır.



Şekil 5.5 Kısa adım sarımlı ÇSARM yapılandırması

Şekil 5.5'te iç rotorlu ARM hava aralığı çapı 160 mm alınarak faz sargı polariteleri düzenlenmiş 6 fazlı kısa adım sarımlı ÇSARM verilmiştir. Dış rotorlu ARM'nin stator oyuk alanını artırabilmek için iç ve dış rotorlarının kuyruklarının tabanları arasındaki mesafe -3 mm yapılarak iç kısımdaki rotor parçaları dış kısımdaki rotor parçalarının arasına yerleştirilmiştir. Böylelikle kullanılacak alüminyum bloğun ağırlığı da azaltılmış olmaktadır. Bu durum iç ve dış rotorlu ARM'ler arasında olumsuz bir etkileşim görülürse değiştirilebilir.

5.2.1 Kısa adım sarımlı iç rotorlu ARM'nin stator ve rotor kutup başı açılarının motor performansına etkisi

Kısa adım sarımlı iç rotorlu ARM stator ve rotor kutup başı açılarına göre;

$25^{\circ} \leq \beta_{sp} \leq 33^{\circ}$, $10^{\circ} \leq \beta_{sp1} \leq 20^{\circ}$ ve $\beta_{rp} = \beta_{sp}$ koşullarında β_{sp} için birer derecelik ve β_{sp1} için ikişer derecelik açı adımlarıyla 9x6=54 analiz gerçekleştirilerek bir faza ait ortalama ve tepe torkları Tablo 5.2'de verilmiştir.

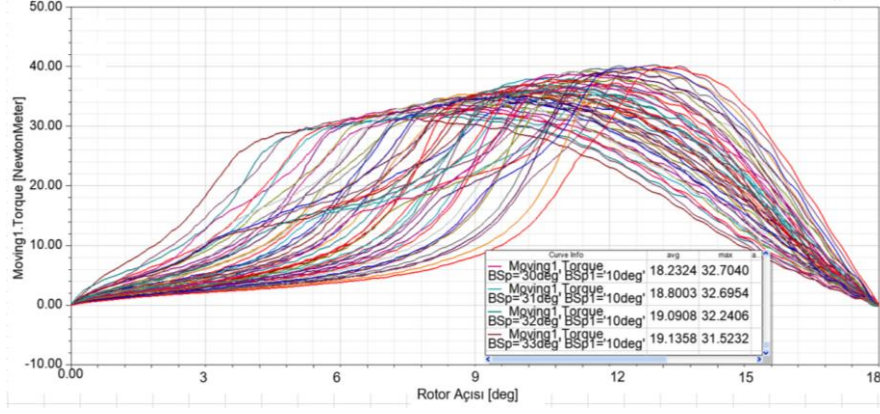
Tablo 5.2 İç Rotorlu ARM Stator ve Rotor kutup başı açılarına göre torkun değişimi

S.No	Kutup Başı Açıları		Tork	
	β_{sp} [deg]	β_{sp1} [deg]	Ortalama [Nm]	Tepe [Nm]
1	25	10	13,67	39,90
2	26	10	14,77	40,24
3	27	10	15,73	39,92
4	28	10	16,52	39,13
5	29	10	17,08	37,94
6	30	10	17,27	36,82
7	31	10	17,86	36,76
8	32	10	18,15	36,11
9	33	10	18,21	35,32
10	25	12	14,10	39,53
11	26	12	15,19	40,10
12	27	12	16,15	39,72
13	28	12	16,92	39,12
14	29	12	17,47	37,80
15	30	12	17,66	36,74
16	31	12	18,20	36,28
17	32	12	18,46	35,59
18	33	12	18,52	35,07
19	25	14	14,37	38,49
20	26	14	15,47	39,14
21	27	14	16,42	38,65
22	28	14	17,18	37,94
23	29	14	17,72	36,96
24	30	14	17,89	35,93
25	31	14	18,44	35,49
26	32	14	18,69	34,91
27	33	14	18,73	34,01
28	25	16	14,54	37,03
29	26	16	15,64	37,75
30	27	16	16,60	37,47
31	28	16	17,36	36,83
32	29	16	17,90	36,03
33	30	16	18,06	34,96
34	31	16	18,61	34,81
35	32	16	18,85	34,17
36	33	16	18,88	33,29
37	25	18	14,67	35,21
38	26	18	15,77	35,94
39	27	18	16,73	35,83
40	28	18	17,49	35,43
41	29	18	18,04	34,73
42	30	18	18,22	33,88
43	31	18	18,75	33,62
44	32	18	19,01	33,03
45	33	18	19,05	32,41
46	25	20	14,72	33,89
47	26	20	15,83	34,85
48	27	20	16,76	34,68
49	28	20	17,51	34,24
50	29	20	18,05	33,66
51	30	20	18,23	32,70
52	31	20	18,80	32,70
53	32	20	19,09	32,24
54	33	20	19,14	31,52

Stator kutup başları ve rotor parçası açılarının değişimiyle elde edilen kısa adım sarımlı iç rotorlu ARM tek faz tork eğrileri Şekil 5.6’da verilmiştir.

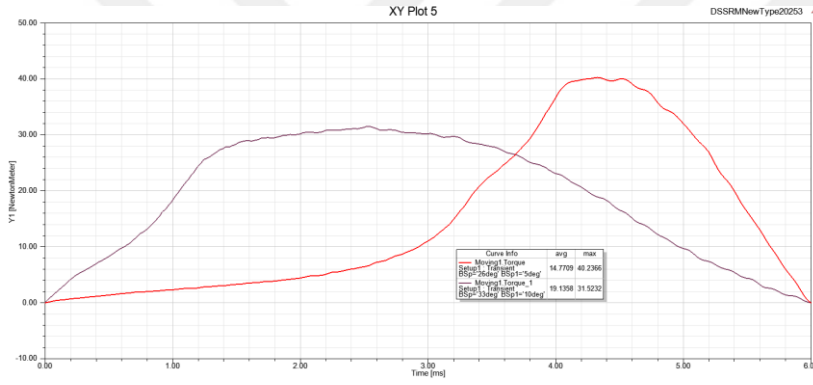
$\beta_{sp} = \beta_{rp} = 26^\circ$ ve $\beta_{sp1} = 10^\circ$ iken tork en büyük tepe değerine (40,24 Nm) sahiptir ve ortalama tork 14,77 Nm’dir.

$\beta_{sp} = \beta_{rp} = 33^\circ$ ve $\beta_{sp1} = 20^\circ$ iken ortalama tork en büyük değerine (19,14 Nm) ulaşmaktadır ve tork tepe değeri 31,52 Nm’dir.

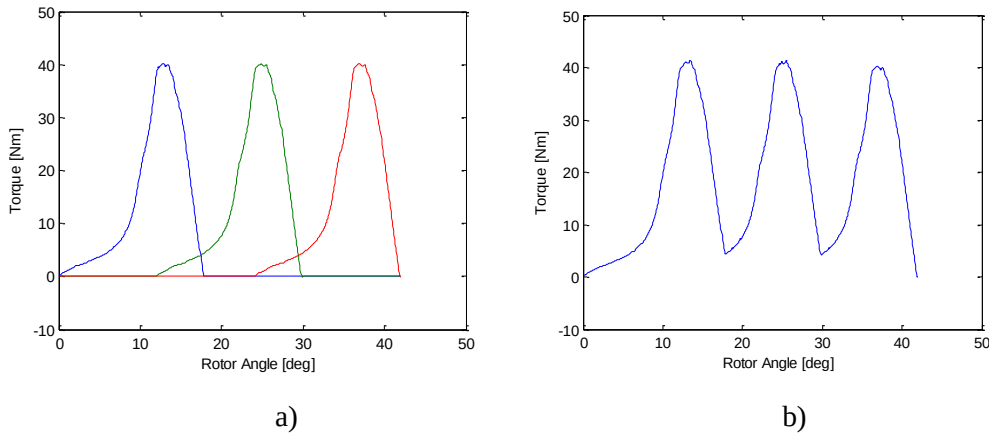


Şekil 5.6 Kısa adım sarımlı iç rotorlu ARM tek faz tork eğrileri

Benzetim sonucu elde edilen faz torklarından kritik olarak görülenlerden bazıları 12'şer derece kaydırılarak diğer iki faza ait torklar oluşturulmuş ve faz torkları toplanmış ve tork dalgalanmaları incelenmiştir.

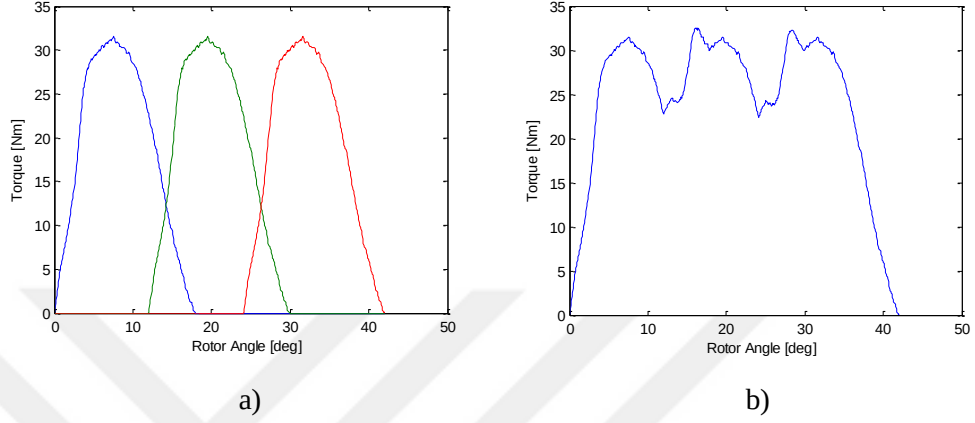


Şekil 5.7 Kısa adım sarımlı iç rotorlu ARM tek faz tork eğrileri



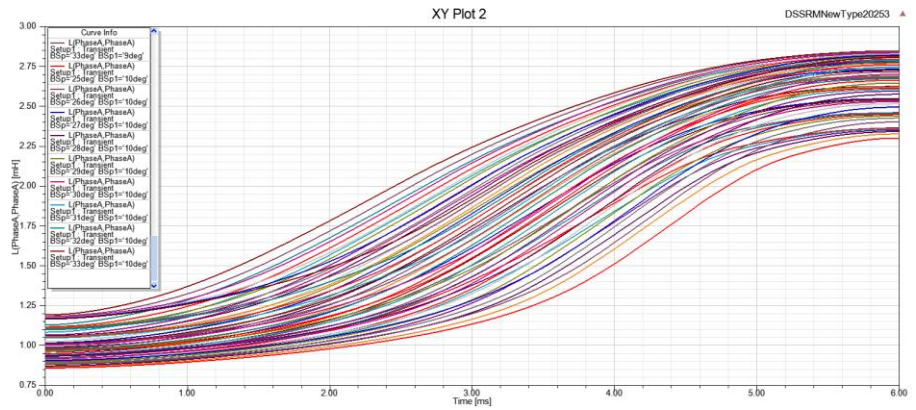
Şekil 5.8 İç rotorlu ARM torku $\beta_{sp} = \beta_{rp} = 26^\circ$, $\beta_{sp1} = 10^\circ$ a) Her bir faza ait torklar b) Toplam tork

$\beta_{sp} = \beta_{rp} = 26^\circ$ ve $\beta_{sp1} = 10^\circ$ iken fazlar tarafından üretilen torklar ve toplam tork Şekil 5.8’de verilmiştir. Bu, üretilen torklar arasında tepe torku en fazla olan durumdur. Fakat toplam tork eğrisine bakıldığında tork dalgalanmasının çok yüksek olduğu görülmektedir. Tepe tork değeri 40 Nm’dir.



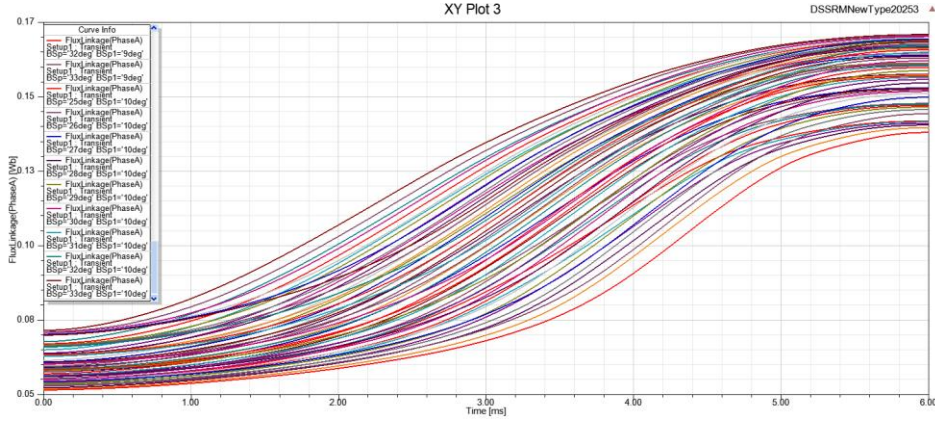
Şekil 5.9 İç rotorlu ARM torku $\beta_{sp} = \beta_{rp} = 33^\circ$, $\beta_{sp1} = 20^\circ$ a) Her bir faza ait torklar b) Toplam tork

$\beta_{sp} = \beta_{rp} = 33^\circ$ ve $\beta_{sp1} = 20^\circ$ iken fazlar tarafından üretilen torklar ve toplam tork Şekil 5.9’da verilmiştir. Bu, üretilen torklar arasında ortalama torku en fazla olan durumdur. Toplam tork eğrisine bakıldığında tork dalgalanmasının azaldığı görülmektedir. Tepe tork değeri 31,5 Nm’dir.



Şekil 5.10 Kısa adım sarımlı iç rotorlu ARM tek faz endüktans eğrileri

Benzetim sonucu oluşan endüktans eğrileri Şekil 5.10’da ve halkalanma akısı eğrileri Şekil 5.11’de verilmiştir.



Şekil 5.11 Kısa adım sarımlı iç rotorlu ARM tek faz halkalanma akısı

5.2.2 Kısa adım sarımlı dış rotorlu ARM'nin stator ve rotor kutup başı açılarının motor performansına etkisi

Kısa adım sarımlı dış rotorlu ARM stator ve rotor kutup başı açılarına göre;

$25^\circ \leq \beta_{spo} \leq 33^\circ$, $10^\circ \leq \beta_{spo1} \leq 20^\circ$ ve $\beta_{rpo} = \beta_{spo}$ koşullarında β_{spo} için birer derecelik ve β_{spo1} için ikişer derecelik açı adımlarıyla $9 \times 6 = 54$ analiz gerçekleştirilerek bir faza ait ortalama ve tepe torkları Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3 Kısa Adım Sarımlı Dış Rotorlu ARM Stator ve Rotor Kutup Başı Açılarına Göre Torkun Değişimi

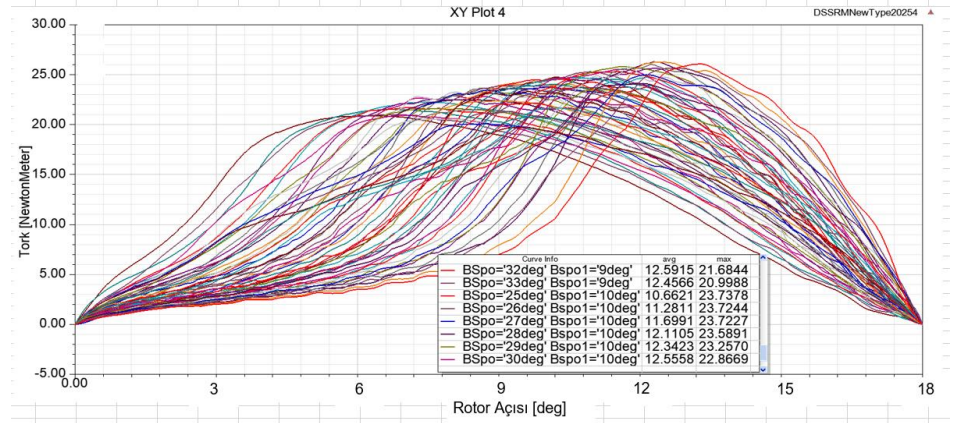
S.No	Kutup Başı Açıları		Tork	
	β_{spo} [deg]	β_{spo1} [deg]	Ortalama [Nm]	Tepe [Nm]
1	25	10	9,81	26,06
2	26	10	10,45	25,66
3	27	10	10,88	24,99
4	28	10	11,32	24,10
5	29	10	11,52	23,55
6	30	10	11,79	22,70
7	31	10	11,88	21,66
8	32	10	11,87	20,76
9	33	10	11,76	19,71
10	25	12	10,16	26,27
11	26	12	10,79	25,99
12	27	12	11,22	25,83
13	28	12	11,64	24,72
14	29	12	11,82	23,95
28	25	16	10,56	25,65
29	26	16	11,19	25,28
30	27	16	11,63	25,27
31	28	16	12,05	24,53
32	29	16	12,27	23,92
33	30	16	12,48	23,44
34	31	16	12,53	22,48
35	32	16	12,49	21,61
36	33	16	12,36	20,93
37	25	18	10,65	24,73
38	26	18	11,24	24,70
39	27	18	11,68	24,76
40	28	18	12,10	24,34
41	29	18	12,29	23,80

S.No	Kutup Başı Açıları		Tork	
	β_{spo} [deg]	β_{spo1} [deg]	Ortalama [Nm]	Tepe [Nm]
15	30	12	12,08	23,43
16	31	12	12,14	22,14
17	32	12	12,12	21,33
18	33	12	11,99	20,10
19	25	14	10,41	26,26
20	26	14	11,03	25,80
21	27	14	11,47	25,53
22	28	14	11,89	24,69
23	29	14	12,09	24,02
24	30	14	12,31	23,28
25	31	14	12,36	22,37
26	32	14	12,33	21,51
27	33	14	12,20	20,55

S.No	Kutup Başı Açıları		Tork	
	β_{spo} [deg]	β_{spo1} [deg]	Ortalama [Nm]	Tepe [Nm]
42	30	18	12,56	23,44
43	31	18	12,63	22,52
44	32	18	12,59	21,68
45	33	18	12,46	21,00
46	25	20	10,66	23,74
47	26	20	11,28	23,72
48	27	20	11,70	23,72
49	28	20	12,11	23,59
50	29	20	12,34	23,26
51	30	20	12,56	22,87
52	31	20	12,63	22,26
53	32	20	12,63	21,52
54	33	20	12,50	20,88

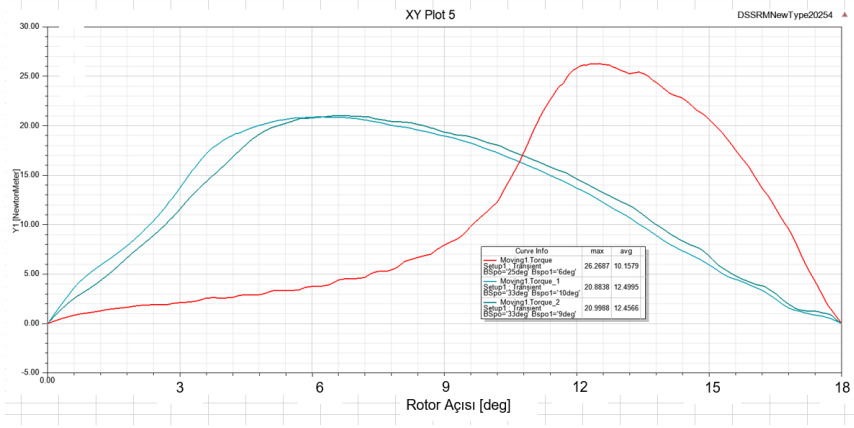
$\beta_{spo} = \beta_{rpo} = 25^\circ$ ve $\beta_{spo1} = 12^\circ$ iken tork en büyük tepe değerine (26,27 Nm) sahiptir ve ortalama tork 10,16 Nm'dir.

$\beta_{spo} = \beta_{rpo} = 31^\circ$ ve $\beta_{spo1} = 18^\circ$ iken ortalama tork en büyük değerine (12,63 Nm) ulaşmaktadır ve tork tepe değeri 22,52 Nm'dir.



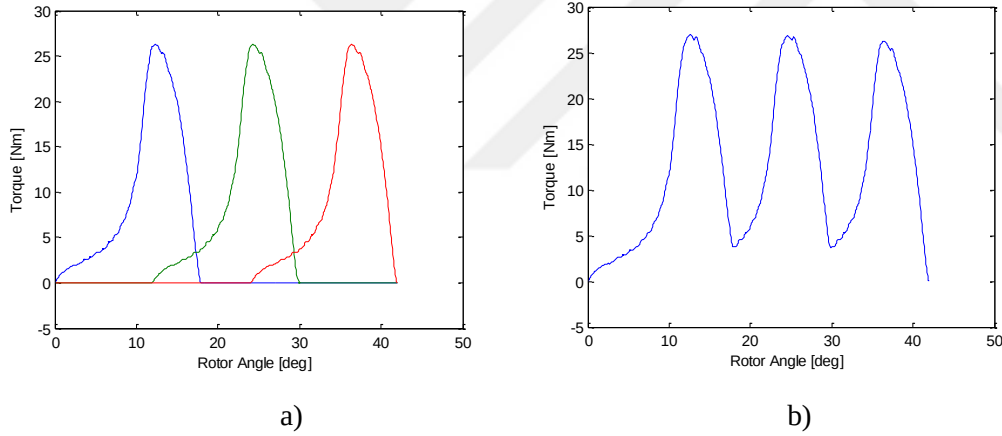
Şekil 5.12 Kısa adım sarımlı dış rotorlu ARM tek faz tork eğrileri

Stator kutup başları ve rotor parçası açılarının değişimiyle elde edilen kısa adım sarımlı dış rotorlu ARM tek faz tork eğrileri Şekil 5.12'de verilmiştir.



Şekil 5.13 Kısa adım sarımlı dış rotorlu ARM tek faz tork eğrileri

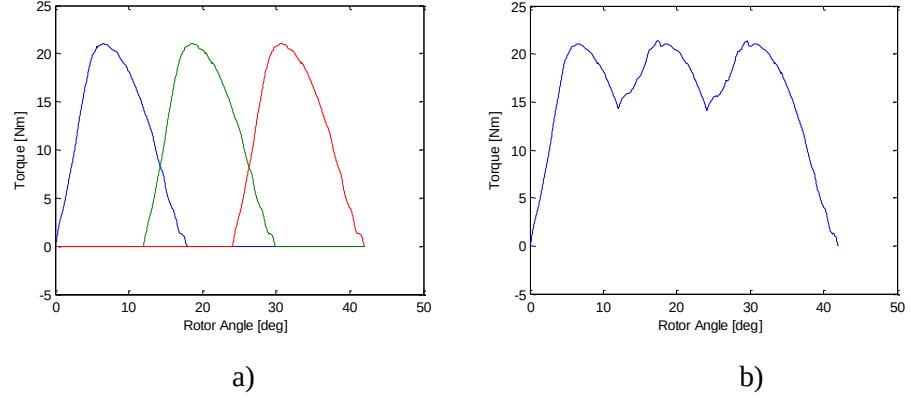
Benzetim sonucu elde edilen faz torklarından kritik olarak değerlendirilen bazıları 12'şer derece kaydırılarak diğer iki faza ait torklar oluşturulmuş ve faz torkları toplanmış ve tork dalgalanmaları incelenmiştir.



Şekil 5.14 Dış rotorlu ARM torku $\beta_{spo} = \beta_{rpo} = 25^\circ$, $\beta_{spo1} = 12^\circ$ a) Her bir faza ait torklar b) Toplam tork

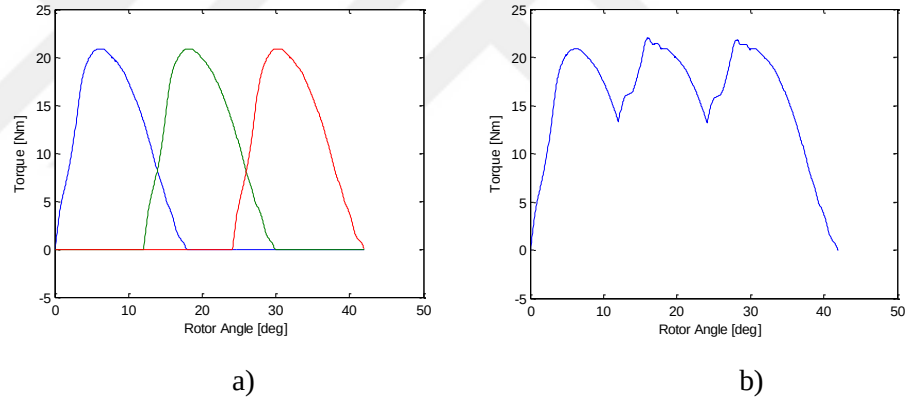
$\beta_{spo} = \beta_{rpo} = 25^\circ$ ve $\beta_{spo1} = 12^\circ$ iken fazlar tarafından üretilen torklar ve toplam tork Şekil 5.14'de verilmiştir. Bu, üretilen torklar arasında tepe torku en fazla olan durumdur. Fakat toplam tork eğrisine bakıldığında tork dalgalanmasının çok yüksek olduğu görülmektedir. Tepe tork değeri 26,3 Nm'dir.

$\beta_{spo} = \beta_{rpo} = 33^\circ$ ve $\beta_{spo1} = 18^\circ$ iken fazlar tarafından üretilen torklar ve toplam tork Şekil 5.15'de verilmiştir. Bu, üretilen torklar arasında ortalama torku en fazla olan durumlardan biridir. Toplam tork eğrisine bakıldığında tork dalgalanmasının azaldığı görülmektedir. Tepe tork değeri 12,5 Nm'dir.



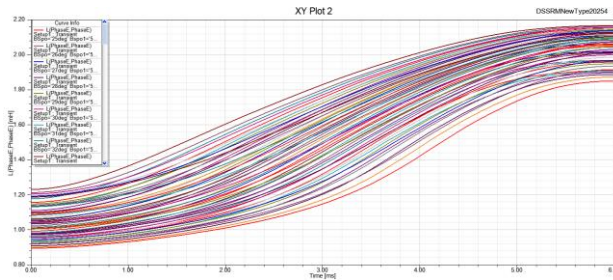
Şekil 5.15 Dış rotorlu ARM torku $\beta_{spo} = \beta_{rpo} = 33^\circ$, $\beta_{spo1} = 18^\circ$ a) Her bir faza ait torklar b) Toplam tork

$\beta_{spo} = \beta_{rpo} = 33^\circ$ ve $\beta_{spo1} = 20^\circ$ iken fazlar tarafından üretilen torklar ve toplam tork Şekil 5.16’da verilmiştir. Bu, üretilen torklar arasında ortalama torku en fazla olan durumlardan biridir. Toplam tork eğrisine bakıldığında tork dalgalanmasının azaldığı görülmektedir. Tepe tork değeri 12,5 Nm’dir.

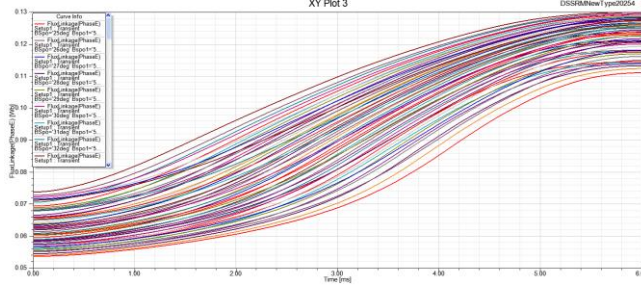


Şekil 5.16 Dış rotorlu ARM torku $\beta_{spo} = \beta_{rpo} = 33^\circ$, $\beta_{spo1} = 20^\circ$ a) Her bir faza ait torklar b) Toplam tork

Benzetim sonucu oluşan kısa adım sarımlı dış rotorlu ARM endüktans eğrileri Şekil 5.17’de ve halkalanma akısı eğrileri Şekil 5.18’de verilmiştir.

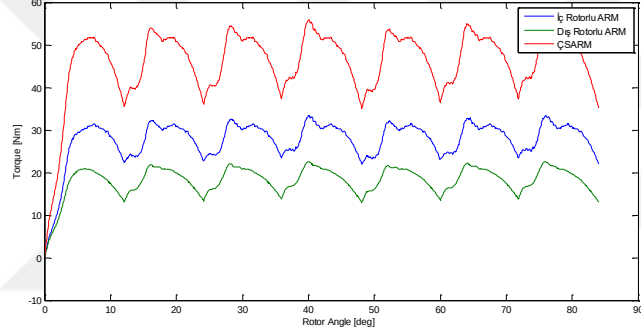


Şekil 5.17 Kısa adım sarımlı dış rotorlu ARM tek faz endüktans eğrileri



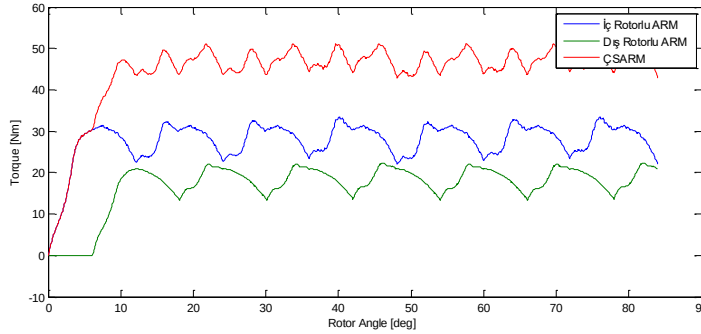
Şekil 5.18 Kısa adım sarımlı dış rotorlu ARM halkanma akısı eğrileri

Uzun adım sarımlı ÇSARM’de belirtildiği gibi 3 fazlı ve 6 fazlı ÇSARM yapısının tork dalgalanması üzerindeki etkisini görmek için kısa adım sarımlı ÇSARM 3 fazlı ve 6 fazlı olarak düşünüldü. İç ve dış rotorlu ARM torklarının toplamı ÇSARM torkunu vereceğinden Matlab programında torklar faz durumuna göre kaydırılarak toplandı.



Şekil 5.19 Kısa adım sarımlı 3 fazlı ÇSARM’nin tork dalgalanmasına etkisi

Şekil 5.19’da verilen 3 fazlı ÇSARM yapısına göre ortalama tork 46 Nm ve tork dalgalanması %35 civarında olmaktadır.



Şekil 5.20 Kısa adım sarımlı 6 fazlı ÇSARM’nin tork dalgalanmasına etkisi

Şekil 5.20’de verilen 6 fazlı ÇSARM yapısına göre ortalama tork 46 Nm ve tork dalgalanması %10 civarında olmaktadır.

5.3. Kısa Adım Sarımlı ÇSARM Benzetim Sonuçları

Kısa adım sarımlı ÇSARM yukarıdaki iç ve dış rotorlu ARM sonuçları değerlendirilerek;

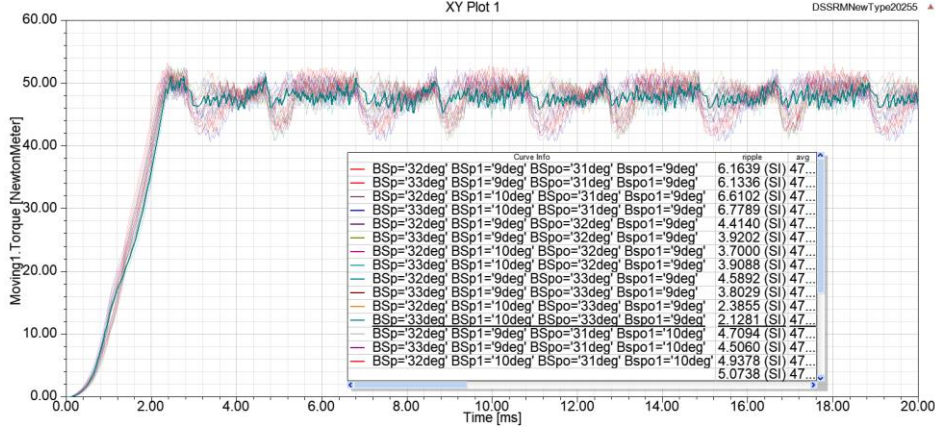
$$32^{\circ} \leq \beta_{sp} \leq 33^{\circ}, 18^{\circ} \leq \beta_{sp1} \leq 20^{\circ} \text{ ve } \beta_{rp} = \beta_{sp}$$

$$31^{\circ} \leq \beta_{spo} \leq 33^{\circ}, 18^{\circ} \leq \beta_{spo1} \leq 20^{\circ} \text{ ve } \beta_{rpo} = \beta_{spo}$$

koşullarında birer derece adımlarla toplam 24 adet benzetim yapılmıştır. Benzetim sonuçları Tablo 5.4'te verilmiştir.

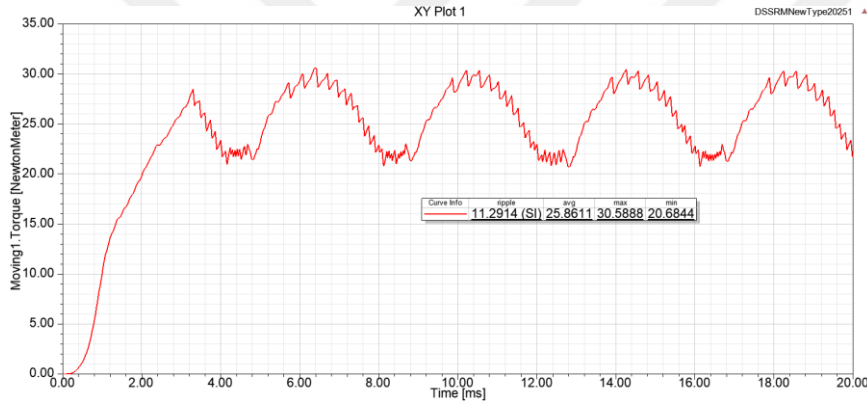
Tablo 5.4 Kısa Adım Sarımlı ÇSARM Stator ve Rotor Kutup Başı Açılarına Göre Torkun Değişimi

S.No	Kutup Başı Açıları		Kutup Başı Açıları		Tork	
	β_{sp} [deg]	$\beta_{sp1/2}$ [deg]	β_{spo} [deg]	$\beta_{spo1/2}$ [deg]	Ortalama [Nm]	Dalgalanma [%]
1	32	9	31	9	47,77	24,42
2	33	9	31	9	47,73	22,98
3	32	10	31	9	47,45	24,75
4	33	10	31	9	47,50	25,33
5	32	9	32	9	47,95	21,34
6	33	9	32	9	47,99	18,18
7	32	10	32	9	47,67	18,14
8	33	10	32	9	47,72	20,27
9	32	9	33	9	47,97	24,64
10	33	9	33	9	47,97	21,48
11	32	10	33	9	47,67	15,99
12	33	10	33	9	47,73	12,55
13	32	9	31	10	47,73	20,64
14	33	9	31	10	47,73	19,84
15	32	10	31	10	47,40	21,42
16	33	10	31	10	47,42	21,88
17	32	9	32	10	47,96	20,66
18	33	9	32	10	47,88	18,41
19	32	10	32	10	47,65	14,80
20	33	10	32	10	47,70	15,83
21	32	9	33	10	47,95	23,66
22	33	9	33	10	47,80	22,68
23	32	10	33	10	47,55	15,36
24	33	10	33	10	47,63	13,96

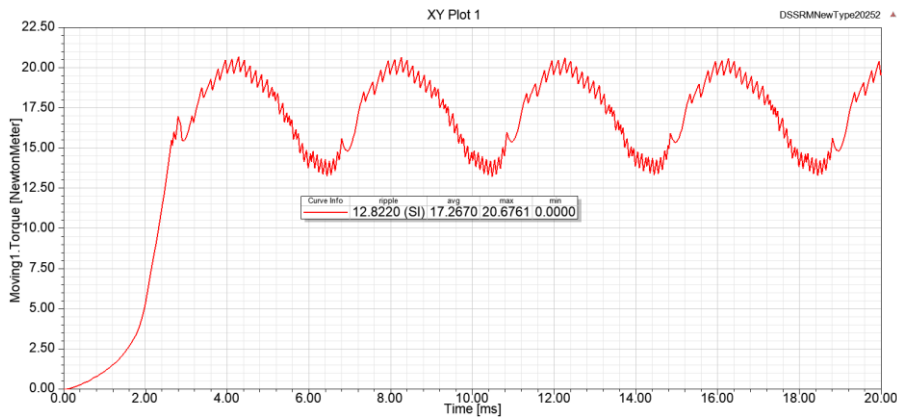


Şekil 5.21 Kısa adım sarımlı ÇSARM stator ve rotor kutup başı açılarının tork dalgalanmasına etkisi

Kısa adım sarımlı ÇSARM stator ve rotor kutup başı açılarının tork dalgalanmasına etkisini gösteren tork eğrileri Şekil 5.21’de verilmiştir.

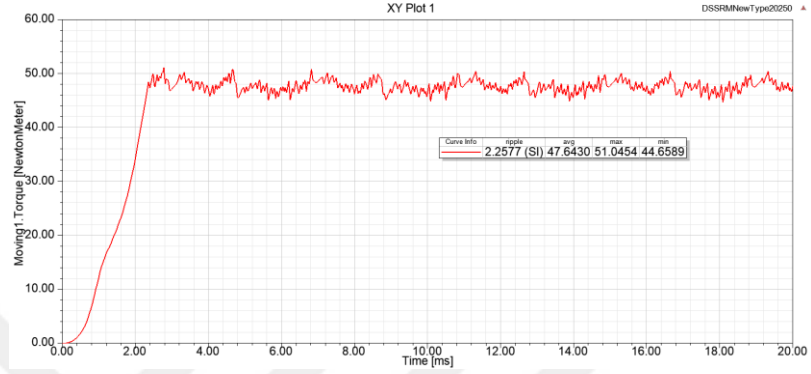


Şekil 5.22 Kısa adım sarımlı iç rotorlu ARM tork eğrisi

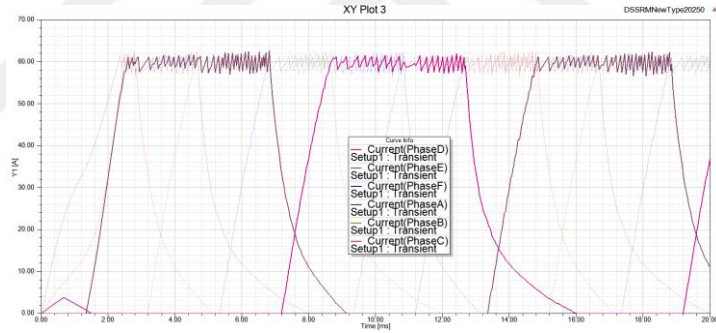


Şekil 5.23 Kısa adım sarımlı dış rotorlu ARM tork eğrisi

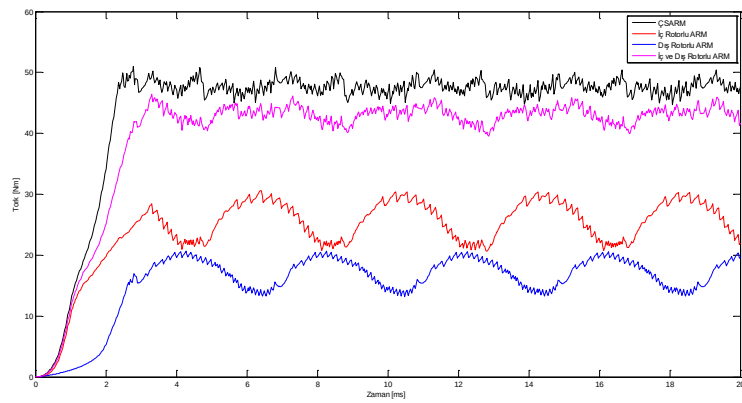
Kısa adım sarımlı ÇSARM yapısında yalnızca iç rotorlu ARM çalıştırıldığında elde edilen tork eğrisi Şekil 5.22’de ve yalnızca dış rotorlu ARM çalıştırıldığında elde edilen tork eğrisi Şekil 5.23’te verilmiştir. Her ikisi beraber kısa adım sarımlı ÇSARM olarak çalıştırıldığında elde edilen tork eğrisi Şekil 5.24’te verilmiştir. Kısa adım sarımlı ÇSARM faz akımları Şekil 5.25’te paylaşılmıştır.



Şekil 5.24 Kısa adım sarımlı ÇSARM tork eğrisi



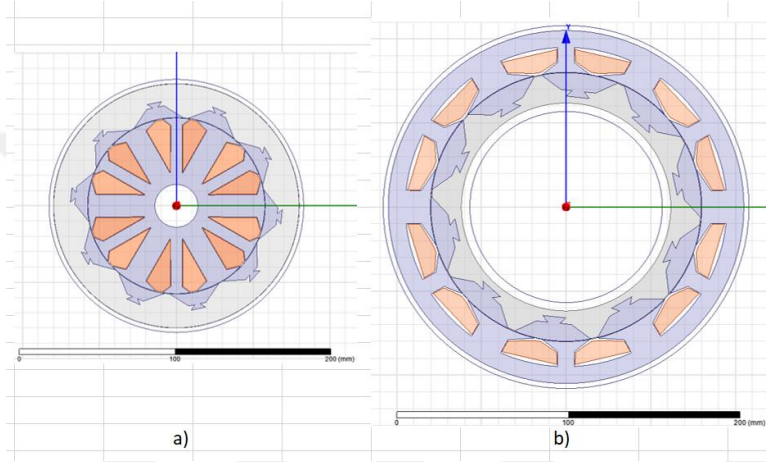
Şekil 5.25 Kısa adım sarımlı ÇSARM faz akımları



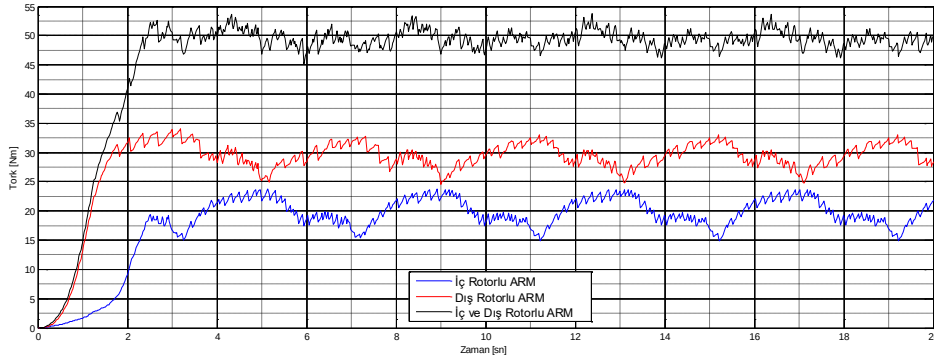
Şekil 5.26 Kısa adım sarımlı ÇSARM ve iç ve dış rotorlu ARM tork eğrileri

Şekil 5.26'da iç ve dış rotorlu ARM'lerin ürettiği tork dalga şekilleri matematiksel olarak toplanıp kısa adım sarımlı ÇSARM'nin ürettiği tork dalga şekliyle karşılaştırılmıştır. İç ve dış rotorlu ARM'lerin oluşturduğu ortalama tork toplamı 42,5 Nm ve tork dalgalılığı %15 civarındadır. ÇSARM olarak çalıştırıldığında ortalama torku 47,5 Nm ve tork dalgalılığı %10 olmaktadır.

Şekil 5.27'de verilen kısa adım sarımlı iç ve dış rotorlu ARM yapıları birbirinden bağımsız olarak oluşturulmuş ve elektromanyetik benzetimi yapılmıştır. Dönüştürücü gerilimi 48 VDC ve rotor hızı 500 d/d'dır.



Şekil 5.27 Kısa adım sarımlı 12/8 parçalı rotor yapıları a) Dış rotorlu ARM b) İç rotorlu ARM



Şekil 5.28 Kısa adım sarımlı 12/8 parçalı rotor yapıları için iç ve dış rotorlu ARM torku ve Toplam tork eğrileri

Şekil 5.28'de verilen benzetim sonucunda dış rotorlu ARM ortalama torku 20 Nm tork dalgalanması %45, iç rotorlu ARM ortalama torku 29,4 Nm ve tork dalgalanması %30 olarak bulunmuştur. İç ve dış rotorlu ARM'lerin ürettiği torkların toplamı 49,4 Nm ve tork dalgalanması da yaklaşık %10 olmaktadır.

Tablo 5.5 Tasarımı Tamamlanan Kısa Adım Sarımlı ÇSARM Temel Boyutları

Sembol	Tanım	Aralık
Ds	Stator dış çapı [mm]	210
L	Stator ve rotor uzunluğu [mm]	100
Dg	Hava aralığı çapı [mm]	160
g	Hava aralığı [mm]	0,3
bsy	Stator boyunduruk kalınlığı [mm]	10
hs	Stator kutup yüksekliği [mm]	14,85
hsp	Trapezoid yüksekliği [mm]	6
ws	Stator kutup genişliği [mm]	19,5
ws1	Sargısız stator kutup genişliği [mm]	9,5
hr	Rotor parçası yüksekliği [mm]	10
hk	Rotor parçası kuyruk yüksekliği [mm]	4
GG	İç ve dış rotor parçaları tabanları arası mesafe [mm]	-3
β_{sp}	Stator kutup başı açısı [deg.]	33
β_{sp1}	Sargısız stator kutup başı açısı [deg.]	21
β_{rp}	Rotor parçası kutup açısı [deg.]	33
wso	Stator kutup genişliği [mm]	15
wso1	Sargısız stator kutup genişliği [mm]	7,5
bsyo	Stator boyunduruk kalınlığı [mm]	8
Dso	Stator dış çapı [mm]	57,55
Dgo	Hava aralığı çapı [mm]	57,70
go	Hava aralığı [mm]	0,3
hso	Stator kutup yüksekliği [mm]	35,55
hspo	Trapezoid yüksekliği [mm]	4,5
hro	Rotor parçası yüksekliği [mm]	8
hko	Rotor parçası kuyruk yüksekliği [mm]	3
β_{spo}	Stator kutup başı açısı [deg.]	33
β_{spo1}	Sargısız stator kutup başı açısı [deg.]	21
β_{rpo}	Rotor kutup açısı [deg.]	33
Dsft	Şaft çapı [mm]	28

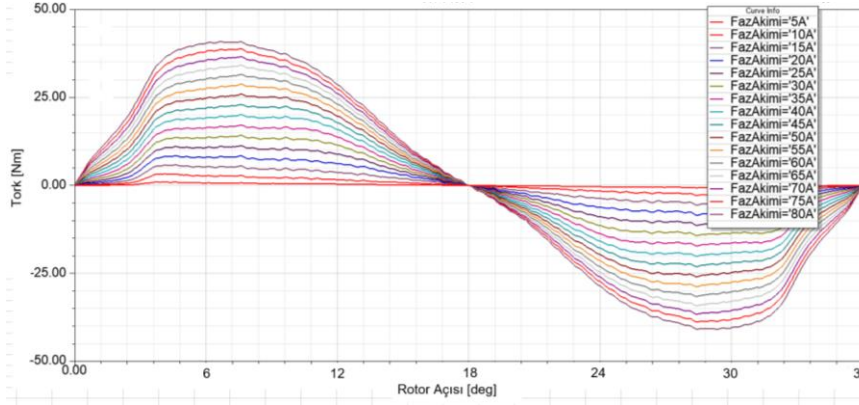
Elektromanyetik tasarımı tamamlanan kısa adım sarımlı ÇSARM'nin son boyutları Tablo 5.5'te verilmiştir.

5.4 Kısa Adım Sarımlı ÇSARM Statik Analizi

Uzun adım sarımlı ÇSARM'de yapıldığı gibi kısa adım sarımlı ÇSARM için de motoru karakterize eden tork, endüktans ve halkalanma akısı grafikleri oluşturulmuştur. Bu bilgiler gerektiğinde ÇSARM'nin modellenmesi için kullanılabilir.

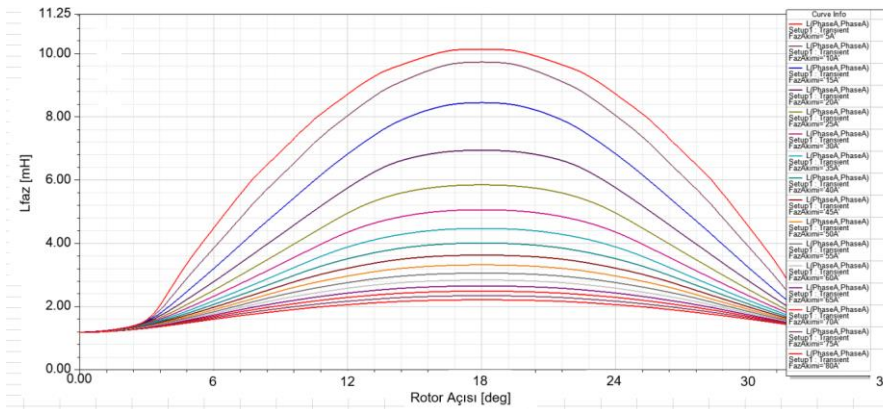
5.4.1 Kısa adım sarımlı iç rotorlu ARM statik analizi

Şekil 5.29'da, 12/8 kısa adım sarımlı iç rotorlu ARM'nin bir fazına ait statik tork profili, rotor ve stator kutuplarının göreceli konumuyla birlikte 5-80 A aralığında 5'er amper artırılan sabit akımlarla uyartılarak elde edilmiştir. Şekil 5.29'da faz akımı 80A iken oluşan tork eğrisinin tepe değeri en fazla olmaktadır. Akım düştükçe tork eğrilerinin tepe değerleri de düşmektedir.



Şekil 5.29 Kısa adım sarımlı iç rotorlu ARM rotor açısına göre faz akımının tork değişimine etkisi

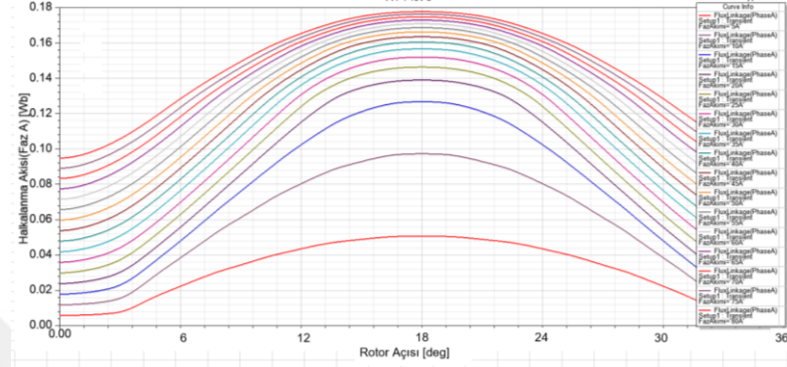
Şekil 5.30'da, 12/8 kısa adım sarımlı iç rotorlu ARM'nin bir fazına ait statik endüktans profili, rotor ve stator kutuplarının göreceli konumuyla birlikte 5-80 A aralığında 5'er amper artırılan sabit akımlarla uyartılarak elde edilmiştir. Şekil 5.30'da faz akımı 5A iken oluşan endüktans eğrisinin tepe değeri en fazla olmaktadır. Akım arttıkça endüktans eğrilerinin tepe değerleri de düşmektedir.



Şekil 5.30 Kısa adım sarımlı iç rotorlu ARM rotor açısına göre faz akımının endüktans değişimine etkisi

Şekil 5.31'de, 12/8 kısa adım sarımlı iç rotorlu ARM'nin bir fazına ait statik halkalanma akısı profili, rotor ve stator kutuplarının göreceli konumuyla birlikte 5-80 A aralığında 5'er amper artırılan sabit akımlarla uyartılarak elde edilmiştir. Şekil

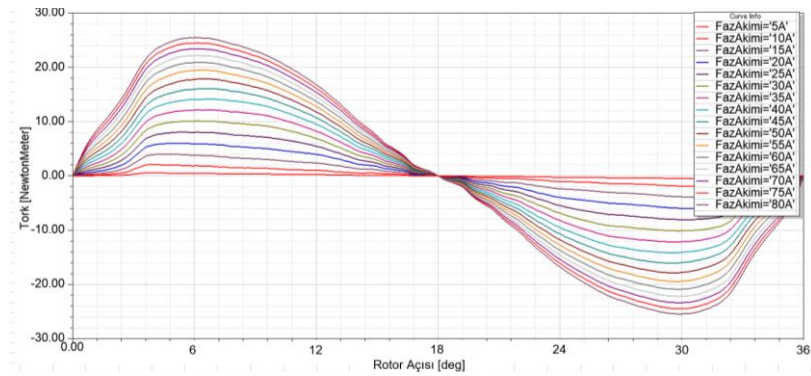
5.31’de faz akımı 80A iken oluşan halkalanma akısı eğrisinin tepe değeri en fazla olmaktadır. Akım azaldıkça halkalanma akısı eğrilerinin tepe değerleri de azalmaktadır. Faza daha fazla akım uygulandığında, daha fazla manyetik akı yoğunluğu oluşur ve dolayısıyla çekirdeğin doyma seviyesi nedeniyle halkalanma akısı değerinin artışı azalır. Şekil 5.31’den de görüleceği üzere halkalanma akısındaki 55 A’den 60 A’e artış, 5 A’den 10 A’e artıştan çok daha küçüktür.



Şekil 5.31 Kısa adım sarımlı iç rotorlu ARM rotor açısına göre faz akımının halkalanma akısı değişimine etkisi

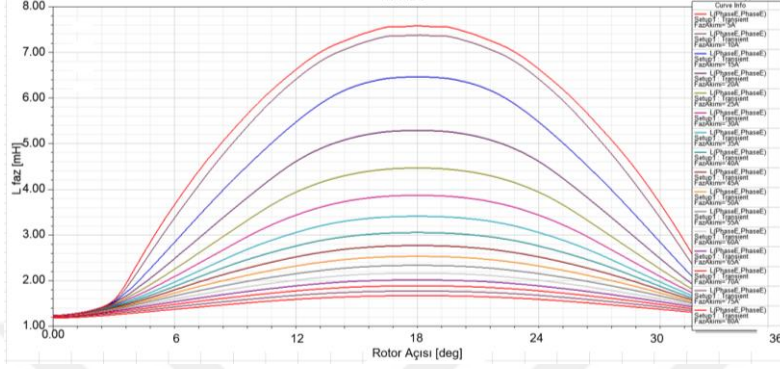
5.4.2 Kısa adım sarımlı dış rotorlu ARM statik analizi

Şekil 5.32’de, 12/8 kısa adım sarımlı dış rotorlu ARM’nin bir fazına ait statik tork profili, rotor ve stator kutuplarının göreceli konumuyla birlikte 5-80 A aralığında 5’er amper artırılan sabit akımlarla uyartılarak elde edilmiştir. Şekil 5.32’de faz akımı 80A iken oluşan tork eğrisinin tepe değeri en fazla olmaktadır. Akım azaldıkça tork eğrilerinin tepe değerleri de azalmaktadır.



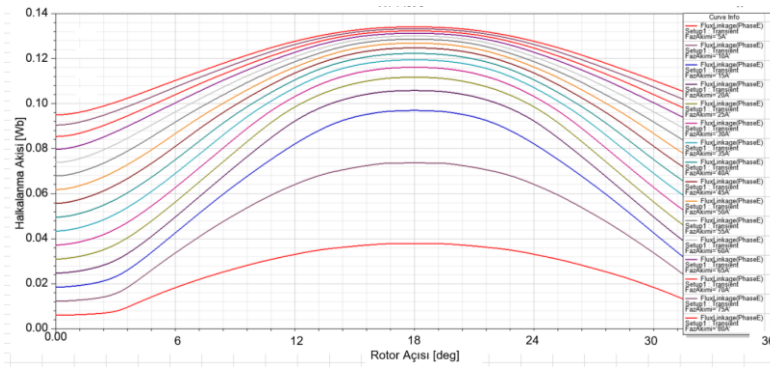
Şekil 5.32 Kısa adım sarımlı dış rotorlu ARM rotor açısına göre faz akımının tork değişimine etkisi

Şekil 5.33'de, 12/8 kısa adım sarımlı dış rotorlu ARM'nin bir fazına ait statik endüktans profili, rotor ve stator kutuplarının göreceli konumuyla birlikte 5-80 A aralığında 5'er amper artırılan sabit akımlarla uyartılarak elde edilmiştir. Şekil 5.33'de faz akımı 5A iken oluşan endüktans eğrisinin tepe değeri en fazla olmaktadır. Akım arttıkça endüktans eğrilerinin tepe değerleri de düşmektedir.



Şekil 5.33 Kısa adım sarımlı dış rotorlu ARM rotor açısına göre faz akımının endüktans değişimine etkisi

Şekil 5.34'te, 12/8 kısa adım sarımlı dış rotorlu ARM'nin bir fazına ait statik halkalanma akısı profili, rotor ve stator kutuplarının göreceli konumuyla birlikte 5-80 A aralığında 5'er amper artırılan sabit akımlarla uyartılarak elde edilmiştir. Faz akımı 80A iken oluşan halkalanma akısı eğrisinin tepe değeri en fazla olmaktadır. Akım azaldıkça halkalanma akısı eğrilerinin tepe değerleri de azalmaktadır. Faza daha fazla akım uygulandığında, daha fazla manyetik akı yoğunluğu oluşur ve dolayısıyla çekirdeğin doyma seviyesi nedeniyle halkalanma akısı değerinin artışı azalır. Şekil 5.34'ten de görüleceği üzere halkalanma akısındaki 55 A'den 60 A'e artış, 5 A'den 10 A'e artıştan çok daha küçüktür.



Şekil 5.34 Kısa adım sarımlı dış rotorlu ARM rotor açısına göre faz akımının halkalanma akısı değişimine etkisi

Tablo 5.6 Kısa Adım Sarımlı ÇSARM Hacim ve Ağırlığının Hesaplanması

ÇSARM Bölümü	Taban Alanı [mm ²]	Uzunluğu [mm]	Hacim [dm ³]	Özkütle [kg/dm ³]	Ağırlık [kg]	Toplam Ağırlık [kg]
İç Rotorlu ARM Statoru	9668	100	0,9668	7,65	7,40	16,50
İç Rotorlu ARM Rotoru	3872	100	0,3872	7,65	2,96	
Dış Rotorlu ARM Statoru	6057	100	0,6057	7,65	4,63	
Dış Rotorlu ARM Rotoru	1973	100	0,1973	7,65	1,51	
Aluminyum Blok	3651	100	0,3651	2,73	1,00	1
İç Rotorlu ARM Statoru Bakır Tel	0,7088	8000*10*2*3	0,48	8,9	4,27	8
Dış Rotorlu ARM Statoru Bakır Tel	0,7088	7000*10*2*3	0,42	8,9	3,74	

Tabloda bakır telin ağırlığını hesaplarırken bakır telin uzunluğu, Tel Sayısı*Sargı sayısı*Faz sayısı olarak hesaplanmıştır. Prototip üretim için 10 adet 0,95 mm bakır tellerden kullanılması planlanmıştır.

$$\text{Oluk alanı} = 290 \text{ mm}^2 \pm 10 \text{ mm}^2$$

$$\text{Oluk doluluk oranı (\%)} = \frac{0,70882 \cdot 24 \cdot 10}{300} 100 = \frac{170}{300} 100 = \%56 \text{ (İç Rotorlu ARM)}$$

$$\text{Oluk doluluk oranı (\%)} = \frac{0,70882 \cdot 24 \cdot 10}{280} 100 = \frac{170}{280} 100 = \%60 \text{ (Dış Rotorlu ARM)}$$

$$\text{Akım yoğunluğu } J = \frac{40 \text{ A}}{0,70882 \text{ mm}^2 \cdot 10} = 5,65 \text{ A/mm}^2$$

$$\text{ÇSARM hacmi: } \pi D^2 L / 4 = (210 \text{ mm})^2 (100 \text{ mm}) / 4 = 3,463 \text{ dm}^3$$

$$\text{Hacimsel tork yoğunluğu} = \frac{47,5 \text{ Nm}}{3,463 \text{ dm}^3} = 13,7 \text{ Nm/l}$$

$$\text{Kütleli tork yoğunluğu} = \frac{47,5 \text{ Nm}}{24,5 \text{ kg}} = 1,93 \text{ Nm/kg}$$

İç rotorlu ARM için faz direnci hesaplama;

$$R_{faz}(20^\circ C) = \frac{0,0168 \cdot 10^{-6} \cdot 16}{0,70882 \cdot 10^{-6} \cdot 10} = 0,038 \Omega$$

$$\rho(60^\circ) = 0,0168 \cdot 10^{-6} [1 + 0,003862 (333 - 293)] = 0,0194$$

$$R_{faz}(60^{\circ}C) = \frac{0,0194 \cdot 10^{-6} \cdot 16}{0,70882 \cdot 10^{-6} \cdot 10} = 0,044 \, \Omega$$

Dış rotorlu ARM için faz direnci hesaplama;

$$R_{faz}(20^{\circ}C) = \frac{0,0168 \cdot 10^{-6} \cdot 14}{0,70882 \cdot 10^{-6} \cdot 10} = 0,033 \, \Omega$$

$$R_{faz}(60^{\circ}C) = \frac{0,0194 \cdot 10^{-6} \cdot 14}{0,70882 \cdot 10^{-6} \cdot 10} = 0,0383 \, \Omega$$

Bakır kayıpları;

$$P_{cu} = 40^2 (0,044 + 0,0383) \cdot 3 = 395 \, W \text{ olarak hesaplanır.}$$

Çekirdek kayıpları yaklaşık 65 W olarak alınırsa, kısa adım sarımlı ÇSARM verimi hesaplanabilir;

$$\eta = 2487 / (2487 + 395 + 65) \cdot 100 = \%84 \text{ olarak hesaplanır.}$$

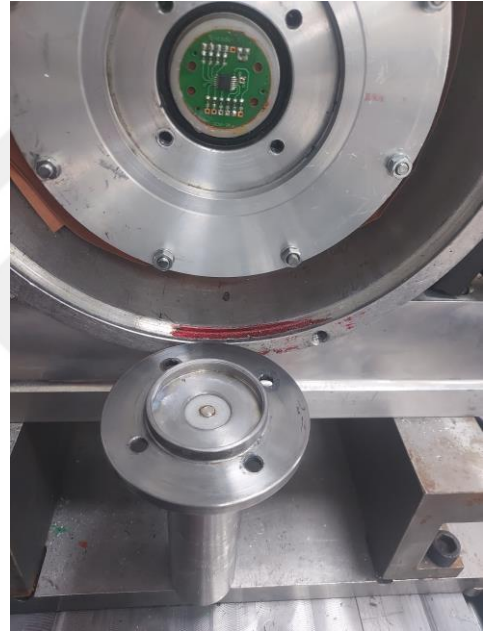
6. UZUN ADIM SARIMLI ÇSARM PROTOTİP ÜRETİMİ



a) Rotor ve Bileşenleri



b) Konum Algılayıcı



c) Konum Algılayıcı ve mıknatısı



d) Statorlar

Şekil 6.1 Prototip İmalat

Şekil 6.1’de prototip üretim esnasında oluşan parçaların görüntüleri verilmiştir. Prototip üretimi için satıcı firma tarafından M290-50A kalite çelik olduğu belirtilen 0,5 mm.’lik silisyumlu sac kullanılmıştır. Kesim esnasında aşırı sıcaklıktan kaçınmak ve temiz kenar kesimi sağlamak için silisli saclar azot uygulamalı lazer makinasında kestirilerek Şekil 6.2’de görülen stator ve rotor parçaları elde edilmiştir.



Şekil 6.2 ÇSARM stator ve rotor parçaları

Rotor parçalarını sabitlemek için 20cmx20cmx10cm boyutlarında alüminyum blok temin edilmiştir. Alüminyum bloğun üst ve alt yüzeylerini paralel hale getirmek ve salınımı önlemek amacıyla dik işleme tezgahında talaş alma işlemi yapılmıştır. Bunun sonucunda alüminyum bloğun yüksekliği ve de dolayısıyla rotor uzunluğu 95 mm olarak gerçekleştirilebilmiştir. Rotor parçalarının sabitleneceği gövde, tel erozyon makinası ile çok hassas bir şekilde kesilmiştir. Şekil 6.3.a alüminyum bloktan rotor gövdesinin çıkarılmış halini ve Şekil 6.3.b rotor gövdesini (birer adet rotor parçası takılmış durumda) göstermektedir. Makinanın döner kısmını oluşturan bu yapının diğer bileşenlere sabitlenmesi amacıyla 8 adet 5 mm çapında saplamalar için delikler açılmıştır.



a)

b)

Şekil 6.3 ÇSARM rotor gövdesi kesimi

İç rotorlu ARM'ye ait stator için uygun çapta alüminyum silindir temin edilerek stator dış çapına göre talaş alınmıştır. Şekil 6.4.a'da gösterildiği gibi iç rotorlu ARM statoru bu alüminyum silindir içine paketlenmiştir. Dış rotorlu ARM'ye ait statoru sabitlemek için transmisyon mili talaş alma yöntemiyle işlenmiş ve stator bu mile paketlenerek yerleştirilmiştir. Elektriksel izolasyonu sağlanan statorlar uzun adım sarım yöntemine uygun olarak 10 adet olarak tasarlanmasına rağmen 7 adet 0,95 mm çapında emaye kaplı bakır tellerle oluk başına 24 tur sarılabilmektedir. İç rotorlu ARM stator sarım aşaması Şekil 6.4.b'de, statorun sarılmış hali Şekil 6.4.c'de gösterilmiştir. Şekil 6.4.ç'de gösterilen dış rotorlu ARM'nin stator boyunduruk genişliğinin az olmasından dolayı sargı sonu uzunluğu iç rotorlu ARM'ye göre daha uzun olmuştur. Bu da toplam motor boyunun uzamasına sebep olmuştur.

İç rotorlu ARM'nin stator faz sargı uçlarını dışarıya çıkarmak için sabitleme milinin merkezinden uçtan uca silindirik oyuk açılmıştır. Stator sargılarının bitişiğinden oluk açılarak milin bir ucundan faz sargıları çıkartılmıştır. Milin diğer ucuna poliamid malzemedan yapılmış yuva içine sabitlenmiş konum algılayıcı yerleştirilmiş ve mikro denetleyici bağlantısı için konum algılayıcı kablosu açılan oyuk boyunca milin diğer ucundan çıkarılmıştır.



a)



b)



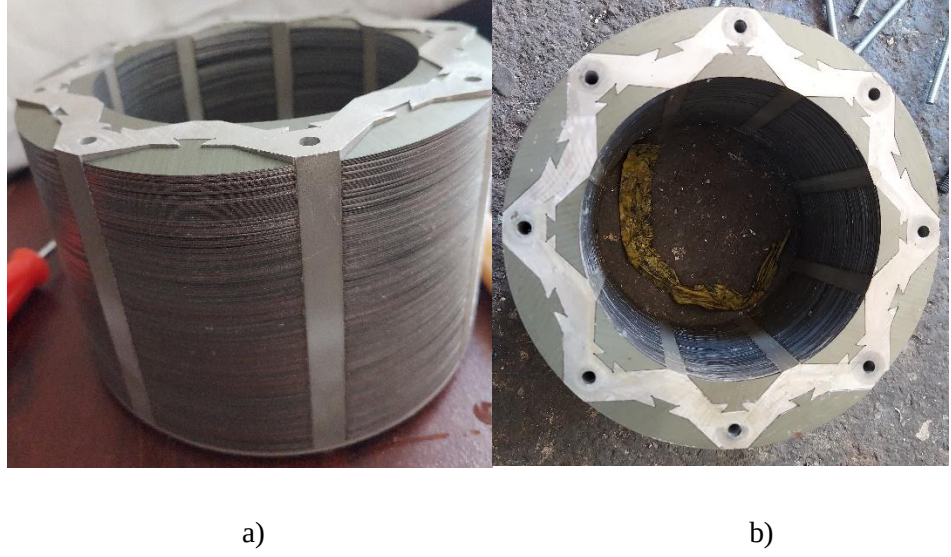
c)



ç)

Şekil 6.4 ÇSARM statorları üretimi

Şekil 6.5.a’da rotor parçalarının alüminyum bloğa dizilmiş hali verilmiştir. Şekil 6.3.b’de gösterilen tel erozyon kesiminde oluşan rotor yuvalarının karşılığı olan bloklar yardımıyla her bir rotor paketi aynı anda dengeli bir biçimde basınç altında paketlenebilmişlerdir (Şekil 6.5.b). Prototip üretimin stator ve rotor paketlerinin hiçbir parçasında kaynak işlemi veya saplama kullanılmamıştır. Rotor parçalarının sabitlendiği alüminyum gövde, bir taraftan dış rotorlu ARM statorunun sargılarının çıkarıldığı yuva sonuna kadar diğer taraftan da sargı sonuna kadar alüminyum silindirler vasıtasıyla uzatılmıştır. Yine alüminyum içine yerleştirilmiş rulmanlarla dış rotorlu ARM statoru 8 adet saplama ile rotor gövdesine merkezlenmiştir. Böylelikle dış rotorlu ARM yapısı elde edilmiştir.



Şekil 6.5 ÇSARM rotor gövdesi ve rotor parçaları

B132 gövde kapağına uygun olması için alüminyum gövde içinde bulunan iç rotorlu ARM tekrar bir alüminyum silindir içine yerleştirilmiş, faz sargıları bu silindir üzerinde açılan deliklerden çıkarılmıştır. Dıştaki alüminyum silindirin iç yüzeyi ile içteki silindirin dış yüzeyi merkezlenmediği durumda rotor statorlara sürtecek veya sıkışacaktır. Bunu engellemek için içteki silindirin uç kısımlarına yakın, iç gövdeye temas edecek şekilde dış gövde çevresinde 90 derecelik ara ile 3 sıra halinde yerleştirilen 12 adet alyan başlı setiskur vidalar ile hassas bir şekilde ayarlanarak iç rotorlu ARM gövdesi merkezlenmiştir. Aslında bu iç içe geçmiş silindirik yapı, içteki silindir gövdenin dış yüzeyine açılan kanallarda dolaştırılacak su ile iç rotorlu ARM'nin soğutma ihtiyacını giderebilir bir duruma dönüşmüştür. B132 ön kapağının rulman yuvasına uygun rulman montajı yapılmış ve rulmanın içinden rotora sabitlenmiş çıkış mili alınmıştır. Ön kapak dıştaki alüminyum silindir gövdeye sabitlenmiştir. Arka kapakta bulunan rulman yuvasına alüminyum parça işlenerek yerleştirilmiş ve dış rotorlu ARM statoru bu parçaya sabitlenmiş ve kapak gövdeye montajlanmıştır. İç ve dış rotorlu ARM'lerin stator kutupları tasarıma göre birbiri ile aynı hizaya olması gerekmektedir. Bu hazır B132 gövde arka kapak sistemiyle iki statoru hassas bir şekilde aynı hizaya getirmek çok zorlaşmıştır. Bu durumu aşmak için Şekil 6.6'da verilen alüminyumdan yeni bir kapak tasarlanıp imal edilmiştir. Dış rotorlu ARM statorunun bu kapağına sabitlenmesi için bir yuva yapılmıştır. Kapağın gövdeye sabitlenecek civata yerleri yaklaşık 15 derece açılı oluk olarak imal edilmiştir. Böylelikle kapağına sabitlenmiş içteki stator kolaylıkla ve hassas bir şekilde sağa sola döndürülüp sabitlenebilmektedir.

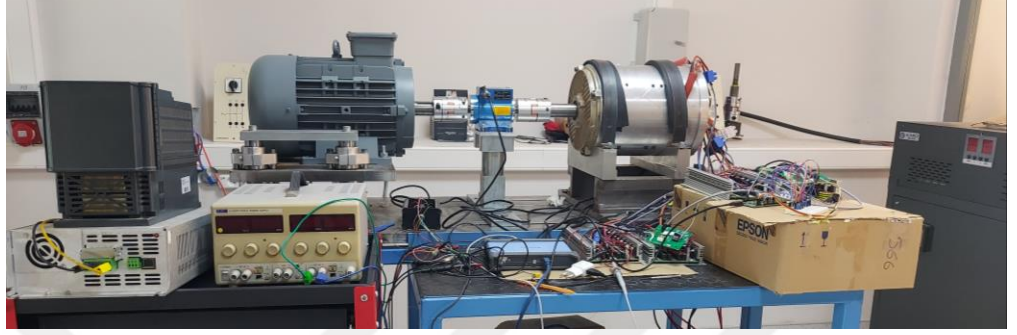


Şekil 6.6 ÇSARM arka kapak

Uzun adım sarımlı ÇSARM prototip üretimin tamamlanmasıyla performans testlerine hazır hale getirilmiştir.

7. TEST ORTAMI VE YÜK TESTLERİ

Uzun adım sarımlı ÇSARM prototip imalatının benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılabilmesi ve performans testlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla Şekil 7.1’de verilen test düzeneği hazırlanmıştır.



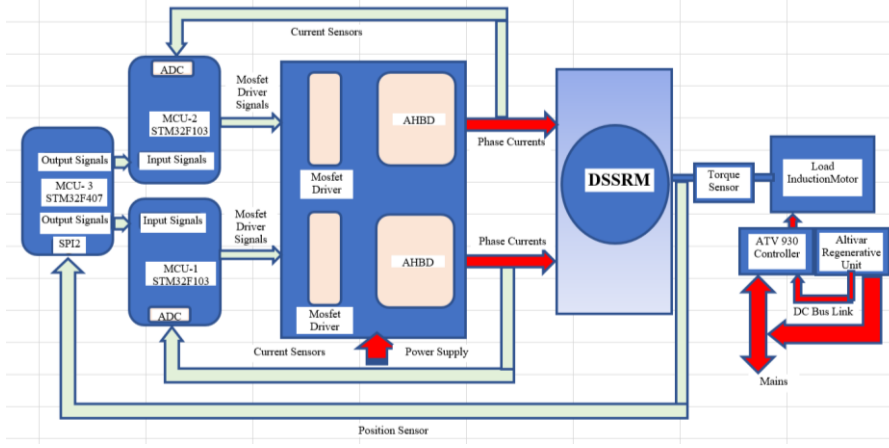
Şekil 7.1 Test ortamı ve test ekipmanları

Test düzeneğinde kullanılan ekipmanlar Tablo 7.1’de verilmiştir.

Tablo 7.1 Test ortamında kullanılan ekipmanlar

ÜNİTE ADI	MODEL	ÜNİTE ADI	MODEL
Mikrodenetleyici	STM32F103 & STM32F407	Akım Algılayıcı	ACS758
MOSFET	IRFP4568	Tork Hız Algılayıcı & Sinyal Dönüştürücü	ZJ-100A & ZJ-A-F/12-6000 TORQUE SPEED SIGNAL CONVERTER
Sürücü Devresi	IR2110	Yük	VOLT IM 4KW 965RPM
Konum Algılayıcı	AS5047P (14 BIT)	Hız Denetleyicisi & Rejeneratif Birim	SCHNEIDER ALTIVAR 930 & ALTIVAR REGEN 15KW
Güç Kaynağı	GÜNDÜZ TRAFO 500VDC - 200A	Güç Kaynağı	24VDC

ÇSARM test edilirken güç kaynağı, kontrol kartı, sürücü devre, konum ve akım algılayıcılar, ÇSARM ve yük arasındaki bağlantıları gösteren test blok diyagramı Şekil 7.2’de verilmiştir.



Şekil 7.2 Test Blok Diyagramı

7.1 Test Ortamının Hazırlanması

Prototip üretimi tamamlanan Çift Statorlu Parçalı Rotor Yapılı Anahtarlamalı Relüktans Motoru, Motor Kontrol Laboratuvarında bulunan test platformuna ayak ve aparatlar yaptırılarak sabitlenmiştir.

Tork ve hız ölçümünü sağlamak için ZJ-100A Tork ve Hız Sensörü kaplinler vasıtasıyla yük olarak kullanılacak asenkron jeneratör ile ÇSARM arasına bağlanmıştır. Tork sensöründen gelen frekans tabanlı bilgiyi 4-20mA akım sinyaline çeviren dönüştürücünün 24 VDC gerilim ihtiyacı ayarlanabilir güç kaynağı üzerinden sağlanmıştır.

Asenkron jeneratörün hızını kontrol etmek ve üretilen enerjiyi şebekeye aktarmak için Schneider Altivar 930 ve Altivar Regen ünitelerinin elektriksel bağlantıları yapılmıştır.

İç ve dış statorların kutuplarının aynı hizada olması ve tork dalgalanmasını azaltmak için gerektiğinde statorlar arası açığı ayarlayabilmek maksadıyla ÇSARM'nin arka kapağı yeniden tasarlanıp işlenerek içteki stator mili arka kapağa sabitlenmiştir.

500VDC/200A ayarlanabilir güç kaynağının çıkışları, ÇSARM sürücü devresinin girişine elektriksel bağlantısı yapılmış ve sürücü devreleri çıkış uçları motor fazlarına irtibatlandırılmıştır.

ÇSARM'nin rotor konumunu okumak için konum algılayıcı bağlantısı ilgili mikroişlemci kontrol kartına bağlanmıştır.

Kaynaktan çekilen akımı, 3 adet faz akımlarını, sürücü bara gerilimini, tork sensörünün tork ve hız çıkışları (frekans) ile frekans-akım dönüştürücünün ani tork çıkışını (1kohm direnç üzerinden gerilim ölçülerek) PICOSCOPE vasıtasıyla bilgisayara kaydetmek için akım ve gerilim problemlerinin bağlantısı yapılmıştır.

7.2 Sürücü Devrenin Özellikleri ve Çalışma Prensipleri

ÇSARM sürücü devresi var olan sürücülerden uyarlanarak yapılmıştır. IR2110 sürücü devresi ile sürülen 3'er adet paralellenmiş IRFP4568 mosfetlerden oluşan 2 adet 3 fazlı tam köprü devreleridir, fakat ÇSARM'yi sürerken asimetrik yarım köprü devresi gibi sürülmüş diğer çapraz 2 mosfet grubunun diyotlarından faydalanılmıştır.

Faz akımlarını okumak için mikrodenetleyici kartına kolayca bağlantısı yapılabilen her bir faz için toplamda 6 adet 150 A ACS758 akım sensörü kullanılmıştır. Bu sensör girişleri, 2 adet olan STM32F103 mikrodenetleyici kartlarının ADC girişlerine bağlanmıştır. Mosfet sürücüleri de bu kartlar üzerindedir. Kartlardan bir tanesi dış rotorlu ARM'yi diğeri iç rotorlu ARM'yi sürmektedir. Akım kontrolünü her bir motor için STM32F103 mikrodenetleyicileri sağlamaktadır.

Rotor konumunu belirlemek için 14 bit AS5047P konum algılayıcı kullanılmış ve STM32F407 geliştirme kartının spi2 üzerinden rotor konumu okunmuştur. Konum bilgisi, mosfetleri süren diğer mikrodenetleyici kartlara sayısal çıkış olarak gönderilmektedir. Konum kontrolünü STM32F407 geliştirme kartı sağlamaktadır.

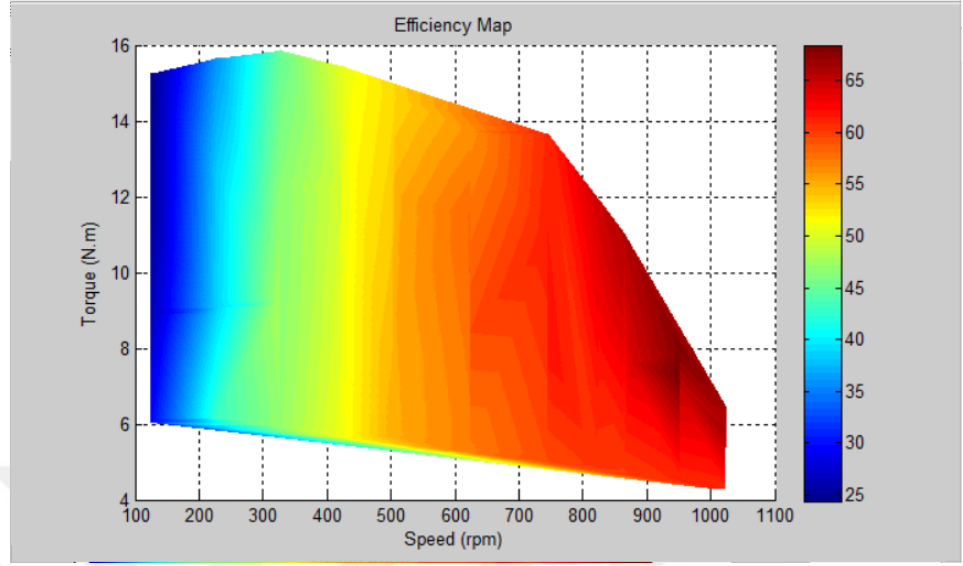
7.3 Dış Rotorlu ARM Yük Testleri

Test düzeneği hazırlandıktan ve statorların birbirine göre konumları ayarlandıktan sonra sadece dış rotorlu ARM çeşitli hızlarda ve yüklerde çalıştırılmış, bara gerilimi, giriş akımı, faz akımları, hız ve mekanik tork bilgileri kaydedilmiştir. Bu bilgilere göre dış rotorlu ARM'nin giriş, çıkış gücü ve sistem verimi hesaplanmıştır. Dış rotorlu ARM'nin yük testleri sonucunda elde edilen veriler Tablo 7.2'de verilmiştir. Faz akımları açma kapama açıları temel hıza kadar sabit tutulmuş, rotor hızı 750 d/d ve sonrasında açma kapama açıları 2-3 derece kaydırılarak testler gerçekleştirilmiştir.

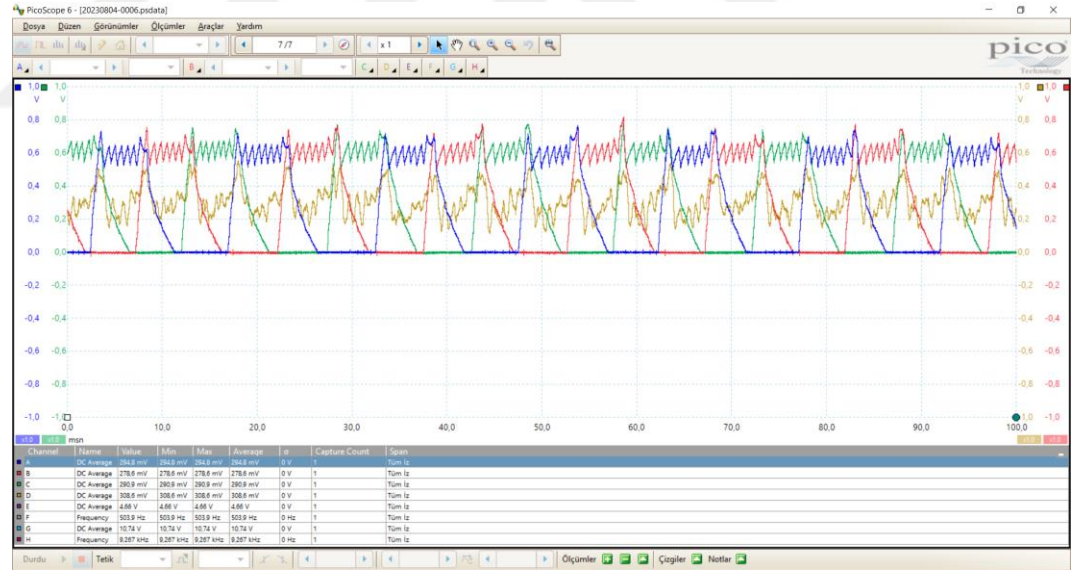
Tablo 7.2 Dış Rotorlu ARM Yük Testleri

Tepe Akım [Amper]	Rotor Hızı [d/d]	Tork [Nm]	Çıkış Gücü [Watt]	Giriş Akımı [Amper]	Bara Gerilimi (Volt)	Giriş Gücü [Watt]	Verim [%]
30	125	6,06	79,33	5,7	47	267,90	29,61
30	225	6,16	145,14	7,2	47	338,40	42,89
30	326	5,94	202,78	9,2	47	432,40	46,90
30	425	5,66	251,90	10,5	47	493,50	51,04
30	500	5,68	297,40	11,5	47	540,50	55,02
30	625	5,26	344,27	12,8	47	601,60	57,23
30	744	5,02	391,12	14	47	658,00	59,44
30	821	4,88	419,56	14,8	47	695,60	60,32
30	865	4,74	429,36	15,2	47	714,40	60,10
30	950	4,52	449,67	15,7	47	737,90	60,94
30	1022	4,26	455,92	15,9	47	747,30	61,01
40	125	8,88	116,24	9,4	47	441,80	26,31
40	225	9,08	213,94	11,8	47	554,60	38,58
40	325	9,24	314,47	14	47	658,00	47,79
40	425	8,88	395,21	16,2	47	761,40	51,91
40	508	8,9	473,46	18,2	47	855,40	55,35
40	625	8,46	553,71	19,8	47	930,60	59,50
40	745	8,12	633,49	21,7	47	1019,90	62,11
40	825	7,74	668,69	23	47	1081,00	61,86
40	875	7,66	701,88	23,3	47	1095,10	64,09
40	952	7,04	701,84	22,9	47	1076,30	65,21
40	1022	5,84	625,02	20	47	940,00	66,49
50	125	11,54	151,06	12,9	47	606,30	24,91
50	225	12,78	301,12	16,8	47	789,60	38,14
50	327	12,48	427,36	19,6	47	921,20	46,39
50	423	12,1	535,99	22,9	47	1076,30	49,80
50	507	12,04	639,24	24,7	47	1160,90	55,06
50	623	11,52	751,57	27,5	47	1292,50	58,15
50	743	10,86	844,98	29,3	47	1377,10	61,36
50	825	10,42	900,22	30	47	1410,00	63,85
50	862	9,86	890,05	29	47	1363,00	65,30
50	950	7,24	720,26	22,4	47	1052,80	68,41
50	1022	5,94	635,72	20,6	47	968,20	65,66
60	125	15,24	199,49	17,4	47	817,80	24,39
60	225	15,64	368,51	21,8	47	1024,60	35,97
60	327	15,88	543,78	25,7	47	1207,90	45,02
60	426	15,44	688,79	28,9	47	1358,30	50,71
60	505	14,64	774,21	31	47	1457,00	53,14
60	625	13,76	900,59	34	47	1598,00	56,36
60	745	13,64	1064,14	37,1	47	1743,70	61,03
60	825	11,92	1029,81	33,8	47	1588,60	64,83
60	863	11,02	995,91	32	47,3	1513,60	65,80
60	952	8,02	799,54	25	47	1175,00	68,05
60	1023	6,46	692,05	22,1	47	1038,70	66,63

Dış rotorlu ARM'nin yük testleri sonucunda oluşan ve Tablo 7.2'de verilen bilgilere göre oluşturulan verim haritası Şekil 7.3'de verilmiştir.



Şekil 7.3 Dış rotorlu ARM verim haritası



Şekil 7.4 Dış rotorlu ARM 48VDC 504 d/d ölçüm sonuçları

Dış rotorlu ARM 48VDC gerilim altında 504 d/d hızda çalışırken ölçülen büyüklükler Şekil 7.4'te verilmiştir.

Burada oluşan tork değeri $(10,000-9,267)20=14,66\text{Nm}$ olarak hesaplanmaktadır (Tork algılayıcı 10kHz değeri 0 Nm, ± 5 kHz değeri ± 100 Nm). Mavi (ortalama akım 29,4A), yeşil (ortalama akım 29,1A) ve kırmızı (ortalama

akım 27,8A) renk ile gösterilen dış rotorlu ARM faz akımlarının ortalama değerleridir. Kaynaktan çekilen ortalama akım 30,8 A'dır. Kaynak gerilimi ortalama 46,6 VDC'dir. Bu durumda sistem verimi % 53,9 olarak hesaplanır.

7.4 İç Rotorlu ARM Yük Testleri

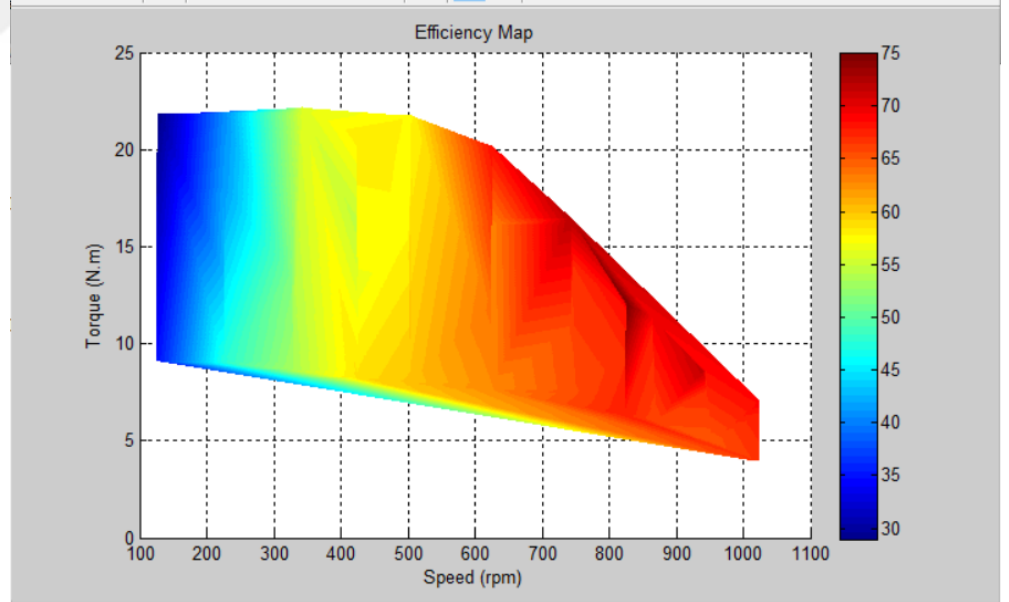
ÇSARM yapısında sadece iç rotorlu ARM çeşitli hızlarda ve yüklerde çalıştırılmış, bara gerilimi, giriş akımı, faz akımları, hız ve mekanik tork bilgileri kaydedilmiştir. Bu bilgilere göre iç rotorlu ARM'nin giriş, çıkış gücü ve sistem verimi hesaplanmıştır. İç rotorlu ARM'nin yük testleri sonucunda elde edilen veriler Tablo 7.3'te verilmiştir. Faz akımları açma kapama açıları temel hıza kadar sabit tutulmuş, rotor hızı 750 d/d ve sonrasında açma kapama açıları 2-3 derece kaydırılarak testler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 7.3 İç Rotorlu ARM Yük Testleri

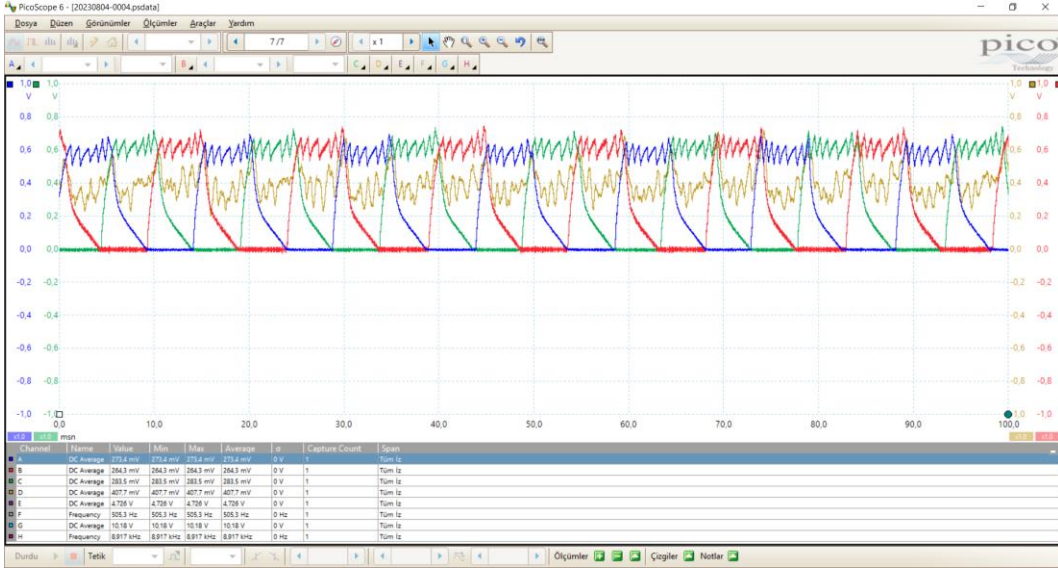
Tepe Akım [Amper]	Rotor Hızı [d/d]	Tork [Nm]	Çıkış Gücü [Watt]	Giriş Akımı [Amper]	Bara Gerilimi (Volt)	Giriş Gücü [Watt]	Verim [%]
30,00	125,00	9,12	119,38	7,30	47,00	343,10	34,79
30,00	225,00	9,08	213,94	9,60	47,00	451,20	47,42
30,00	327,00	8,66	296,55	11,80	47,00	554,60	53,47
30,00	425,00	8,24	366,73	13,30	47,00	625,10	58,67
30,00	505,00	8,02	424,13	15,00	47,00	705,00	60,16
30,00	625,00	7,66	501,35	17,00	47,00	799,00	62,75
30,00	750,00	7,46	585,91	19,00	47,00	893,00	65,61
30,00	823,00	6,36	548,13	17,20	47,00	808,40	67,80
30,00	871,00	6,04	550,91	17,80	47,00	836,60	65,85
30,00	952,00	4,98	496,47	16,20	47,00	761,40	65,21
30,00	1022,00	3,92	419,53	13,40	47,00	629,80	66,61
40,00	125,00	13,36	174,88	11,00	47,00	517,00	33,83
40,00	225,00	13,62	320,91	16,00	47,00	752,00	42,67
40,00	325,00	13,36	454,69	18,70	47,00	878,90	51,73
40,00	424,00	12,64	561,23	21,00	47,00	987,00	56,86
40,00	504,00	12,40	654,46	23,20	47,00	1090,40	60,02
40,00	622,00	11,96	779,02	26,00	47,00	1222,00	63,75
40,00	743,00	10,96	852,76	27,60	47,00	1297,20	65,74
40,00	823,00	9,46	815,30	25,90	47,00	1217,30	66,98
40,00	866,00	8,60	779,91	24,80	47,00	1165,60	66,91
40,00	944,00	7,56	747,35	23,70	47,00	1113,90	67,09
40,00	1022,00	6,44	689,23	21,60	47,00	1015,20	67,89
50,00	125,00	17,94	234,83	16,50	47,00	775,50	30,28
50,00	227,00	18,02	428,36	22,00	47,00	1034,00	41,43
50,00	329,00	17,44	600,86	24,00	47,00	1128,00	53,27
50,00	422,00	16,20	715,91	27,90	47,00	1311,30	54,60

Tepe Akım [Amper]	Rotor Hızı [d/d]	Tork [Nm]	Çıkış Gücü [Watt]	Giriş Akımı [Amper]	Bara Gerilimi (Volt)	Giriş Gücü [Watt]	Verim [%]
50,00	500,00	16,22	849,28	31,40	47,00	1475,80	57,55
50,00	625,00	16,12	1055,05	35,60	47,00	1673,20	63,06
50,00	747,00	14,00	1095,16	34,70	47,00	1630,90	67,15
50,00	825,00	11,96	1033,27	32,00	47,00	1504,00	68,70
50,00	863,00	10,58	956,15	30,10	47,00	1414,70	67,59
50,00	945,00	8,60	851,06	26,40	47,00	1240,80	68,59
50,00	1022,00	7,10	759,87	23,50	47,00	1104,50	68,80
60,00	127,00	21,80	289,93	21,30	47,00	1001,10	28,96
60,00	226,00	21,90	518,30	27,00	47,00	1269,00	40,84
60,00	342,00	22,18	794,36	30,20	47,00	1419,40	55,96
60,00	422,00	20,74	916,54	33,50	47,00	1574,50	58,21
60,00	505,00	21,74	1149,69	42,40	47,00	1992,80	57,69
60,00	625,00	20,16	1319,47	41,00	47,00	1927,00	68,47
60,00	742,00	16,52	1283,64	37,80	47,00	1776,60	72,25
60,00	827,00	12,06	1044,44	29,60	47,00	1391,20	75,07
60,00	863,00	11,38	1028,45	31,30	47,30	1480,49	69,47
60,00	941,00	8,56	843,51	25,00	47,00	1175,00	71,79
60,00	1022,00	6,88	736,32	22,70	47,00	1066,90	69,02

İç rotorlu ARM'nin yük testleri sonucunda oluşan ve Tablo 7.3'te verilen bilgilere göre oluşturulan verim haritası Şekil 7.5'te verilmiştir.



Şekil 7.5 İç rotorlu ARM verim haritası



Şekil 7.6 İç rotorlu ARM 48VDC 505 d/d ölçüm sonuçları

İç rotorlu ARM 48VDC gerilim altında 505 d/d hızda çalışırken ölçülen büyüklükler Şekil 7.6’da verilmiştir.

Burada oluşan tork değeri $(10,000-8,917)20=21,66\text{Nm}$ olarak hesaplanmaktadır (Tork algılayıcı 10kHz değeri 0 Nm, ± 5 kHz değeri ± 100 Nm). Mavi (ortalama akım 27,3A), yeşil (ortalama akım 28,3A) ve kırmızı (ortalama akım 26,4A) renk ile gösterilen iç rotorlu ARM faz akımlarının ortalama değerleridir. Kaynaktan çekilen ortalama akım 40,7 A’dır. Kaynak gerilimi ortalama 47,26 VDC’dir. Bu durumda sistem verimi % 59,6 olarak hesaplanır.

7.5 ÇSARM Yük Testleri

İç ve dış rotorlu ARM’ler birlikte çalıştırılarak ÇSARM yapısında 48 VDC, 66 VDC ve 72 VDC bara gerilimi uygulanarak çeşitli hız ve yüklerde performans testleri gerçekleştirilmiştir.

7.5.1 ÇSARM 48 VDC yük testleri

ÇSARM yapısında hem iç rotorlu ARM hem de dış rotorlu ARM aynı anda çeşitli hızlarda ve yüklerde çalıştırılmış, bara gerilimi, giriş akımı, faz akımları, hız ve mekanik tork bilgileri kaydedilmiştir. Bu bilgilere göre ÇSARM’nin giriş, çıkış gücü ve sistem verimi hesaplanmıştır. ÇSARM’nin yük testleri sonucunda elde edilen veriler Tablo 7.4’te verilmiştir. Faz akımları açma kapama açıları temel hızla

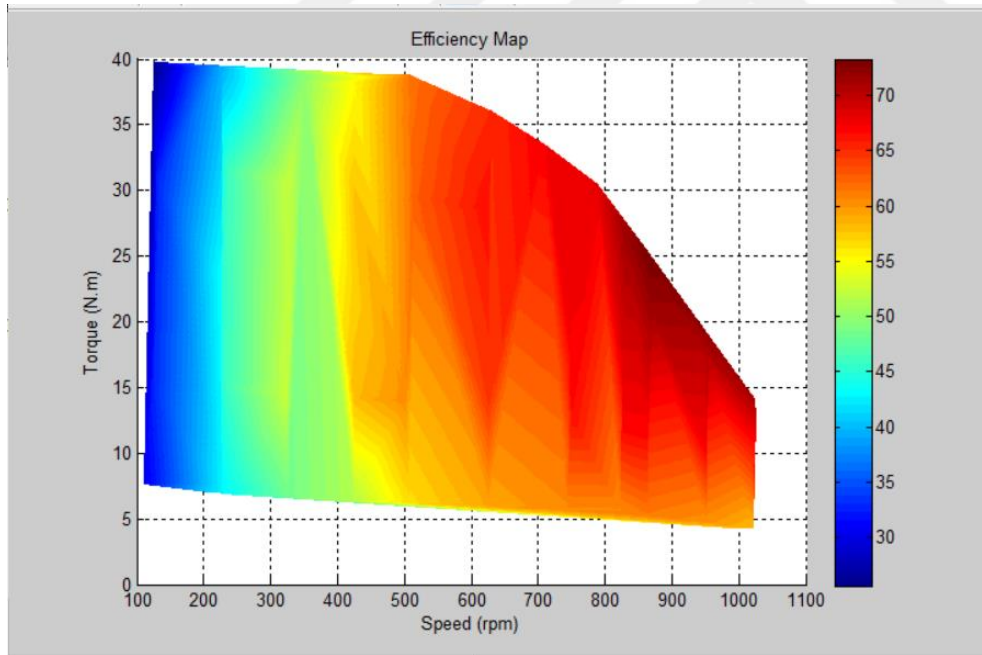
kadar sabit tutulmuş, rotor hızı 750 d/d ve sonrasında açma kapama açıları 2-3 derece kaydırılarak testler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 7.4 48VDC ÇSARM Yük Testleri

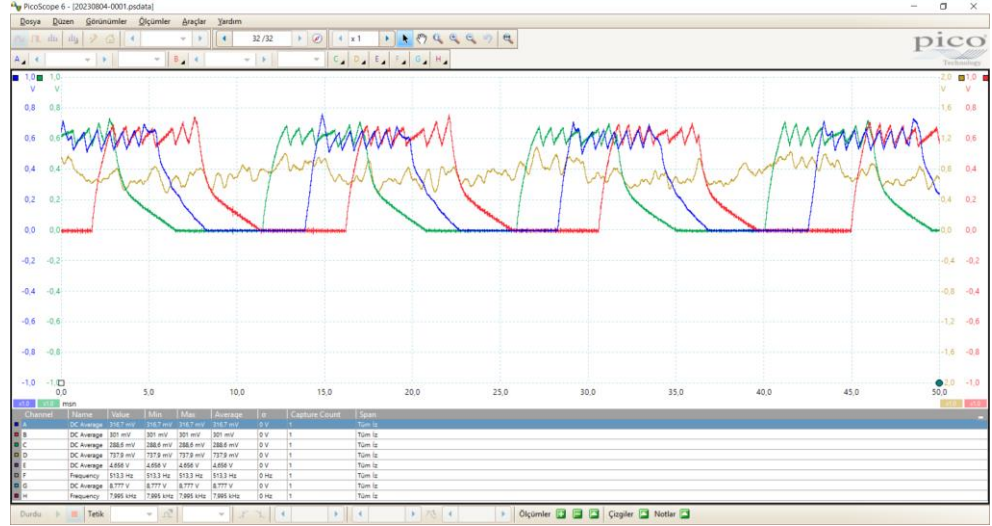
Tepe Akım [Amper]	Rotor Hızı [d/d]	Tork [Nm]	Çıkış Gücü [Watt]	Giriş Akımı [Amper]	Bara Gerilimi (Volt)	Giriş Gücü [Watt]	Verim [%]
20	112	7,68	90,08	6,3	47	296,10	30,42
20	225	6,96	163,99	8,2	47	385,40	42,55
20	326	6,66	227,36	10	47	470,00	48,38
20	425	6,38	283,95	11,7	47	549,90	51,64
20	507	6,26	332,36	12,5	47	587,50	56,57
20	625	6	392,70	14,1	47	662,70	59,26
20	743	5,7	443,50	15,6	47	733,20	60,49
20	823	5,68	489,53	17,2	47	808,40	60,56
20	863	5,36	484,40	16,8	47	789,60	61,35
20	951	4,8	478,02	16,9	47	794,30	60,18
20	1022	4,2	449,50	16,4	47	770,80	58,32
30	125	15,42	201,85	13	47	611,00	33,04
30	226	15,24	360,68	17	47	799,00	45,14
30	325	14,5	493,49	20	47	940,00	52,50
30	425	14,24	633,76	23,2	47	1090,40	58,12
30	500	13,96	730,94	25,8	47	1212,60	60,28
30	625	13,5	883,57	29,2	47	1372,40	64,38
30	750	12,78	1003,74	32,1	47	1508,70	66,53
30	825	11,98	1035,00	32,9	47	1546,30	66,93
30	864	11,36	1027,83	32,7	47	1536,90	66,88
30	951	10	995,88	31,7	47	1489,90	66,84
30	1023	9,18	983,44	31,2	47	1466,40	67,06
40	125	23,54	308,14	21,2	47	996,40	30,93
40	225	23,28	548,52	26,9	47	1264,30	43,39
40	326	22,82	779,04	31,8	47	1494,60	52,12
40	425	22,3	992,48	36,9	47	1734,30	57,23
40	508	21,8	1159,71	40	47	1880,00	61,69
40	625	20,98	1373,14	44,7	47	2100,90	65,36
40	746	19,36	1512,42	47,7	47	2241,90	67,46
40	825	17,68	1527,44	47,6	47	2237,20	68,27
40	866	16,48	1494,53	45,6	47	2143,20	69,73
40	952	15	1495,40	45,3	47	2129,10	70,24
40	1026	13,02	1398,90	42,7	47	2006,90	69,70
50	130	30,74	418,48	27,2	47	1278,40	32,73
50	230	31,7	763,51	35,8	47	1682,60	45,38
50	326	30,6	1044,64	42,4	47	1992,80	52,42
50	425	29,9	1330,73	49	47	2303,00	57,78
50	512	29,58	1585,98	53,9	47	2533,30	62,61
50	626	28,52	1869,62	59,8	47	2810,60	66,52
50	749	26	2039,31	63,8	47	2998,60	68,01
50	825	23,56	2035,44	61,9	47	2909,30	69,96
50	869	21,3	1938,33	57,5	47	2702,50	71,72
50	952	17	1694,78	51,5	47	2420,50	70,02

Tepe Akım [Amper]	Rotor Hızı [d/d]	Tork [Nm]	Çıkış Gücü [Watt]	Giriş Akımı [Amper]	Bara Gerilimi (Volt)	Giriş Gücü [Watt]	Verim [%]
50	1023	14,2	1521,22	45,6	47	2143,20	70,98
60	125	39,8	520,98	43,3	47	2035,10	25,60
60	225	39,46	929,75	50,4	47	2368,80	39,25
60	350	38,34	1405,23	60	47	2820,00	49,83
60	425	37,86	1684,99	64,9	47	3050,30	55,24
60	508	38,82	2065,13	71,3	47	3351,10	61,63
60	630	36,08	2380,32	77,7	47	3651,90	65,18
60	708	33,56	2488,19	78,7	47	3698,90	67,27
60	787	30,54	2516,94	78,6	47	3694,20	68,13
60	830	27,14	2358,94	70	47	3290,00	71,70
60	865	25,18	2280,87	66,2	47	3111,40	73,31
60	953	17,58	1754,45	52,8	47	2481,60	70,70
60	1024	13,92	1492,68	45,3	47	2129,10	70,11

ÇSARM'nin yük testleri sonucunda oluşan ve Tablo 7.4'te verilen bilgilere göre oluşturulan verim haritası Şekil 7.7'de verilmiştir.



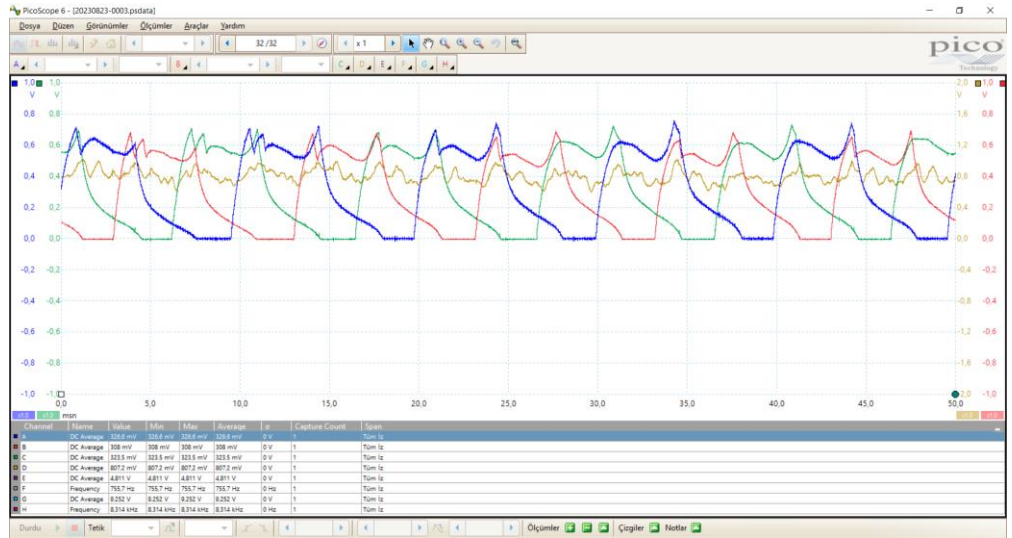
Şekil 7.7 ÇSARM verim haritası



Şekil 7.8 ÇSARM 48VDC 513 d/d ölçüm sonuçları

ÇSARM 48VDC gerilim altında 513 d/d hızda çalışırken ölçülen büyüklükler Şekil 7.8’de verilmiştir.

Burada oluşan tork değeri $(10,000-7,995)20=40,1\text{Nm}$ olarak hesaplanmaktadır (Tork algılayıcı 10kHz değeri 0 Nm, ± 5 kHz değeri ± 100 Nm). Mavi (ortalama akım 31,6A) renkli dış rotorlu ARM faz akımının, yeşil (ortalama akım 28,8A) ve kırmızı (ortalama akım 30,1A) renk ile gösterilen iç rotorlu ARM faz akımlarının ortalama değerleridir. Kaynaktan çekilen ortalama akım 73,7 A’dır. Kaynak gerilimi ortalama 46,56 VDC’dır. Bu durumda sistem verimi % 62,7 olarak hesaplanır.



Şekil 7.9 ÇSARM 48VDC 755 d/d ölçüm sonuçları

ÇSARM 48VDC gerilim altında 755 d/d hızda çalışırken ölçülen büyüklükler Şekil 7.9’da verilmiştir.

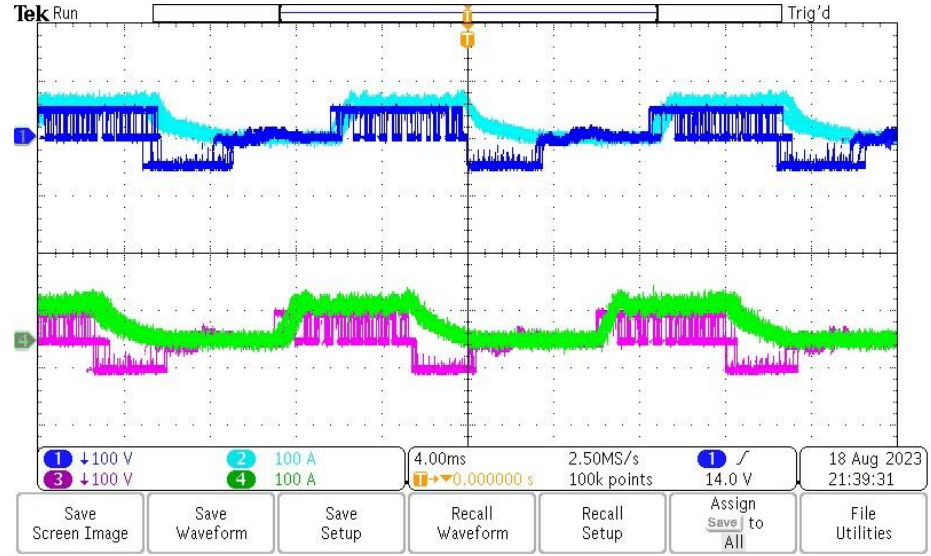
Burada oluşan tork değeri $(10,000-8,314)20=33,72$ Nm olarak hesaplanmaktadır (Tork algılayıcı 10kHz değeri 0 Nm, ± 5 kHz değeri ± 100 Nm). Mavi (ortalama akım 32,6A), yeşil (ortalama akım 32,3A) ve kırmızı (ortalama akım 30,8A) renk ile gösterilen dış rotorlu ARM faz akımlarının ortalama değerleridir. Kaynaktan çekilen ortalama akım 80,7 A’dır. Kaynak gerilimi ortalama 48,1 VDC’dir. Bu durumda sistem verimi %68,7 olarak hesaplanmaktadır.

ÇSARM 48VDC gerilim altında 500 d/d rotor hızı ile çalışırken iç rotorlu ARM ve dış rotorlu ARM’nin birer faz akım ve gerilimi Şekil 7.10’da gösterilmiştir.

ÇSARM yapısında 500 d/d rotor hızında 60 A tepe akımı ile dış rotorlu ARM çalıştırıldığında üretilen tork 14,7 Nm, iç rotorlu ARM çalıştırıldığında üretilen tork 21,92 Nm ve iç ve dış rotorlu ARM’lerin toplam torku 36,62 Nm olmaktadır. Her ikisi birlikte normal polarite ÇSARM olarak çalıştırıldığında 37,84 Nm tork oluşmaktadır. Ters polaritelenmiş ÇSARM olarak çalıştırıldığında 35,8Nm tork oluşmaktadır.

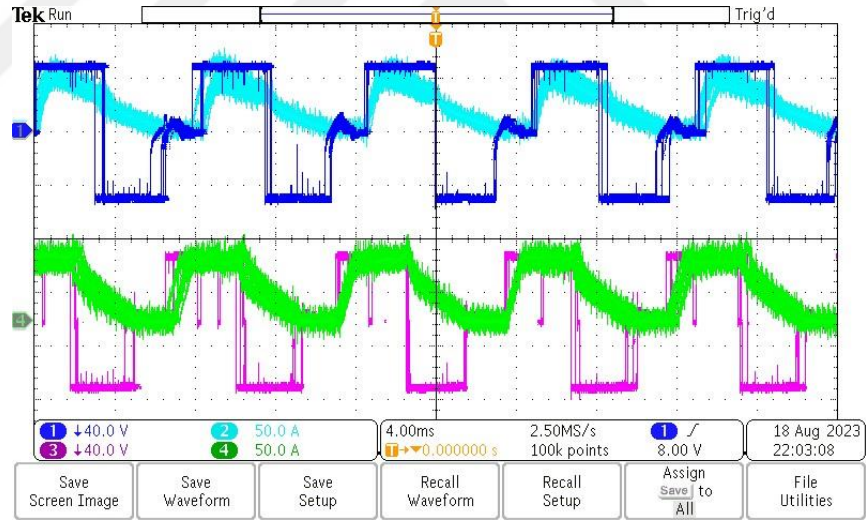
ÇSARM yapısında 870 d/d rotor hızında 60 A tepe akımı ile dış rotorlu ARM çalıştırıldığında üretilen tork 11,16 Nm, iç rotorlu ARM çalıştırıldığında üretilen tork 11,38 Nm ve iç ve dış rotorlu ARM’lerin toplam torku 22,54 Nm olmaktadır. Her ikisi birlikte normal polarite ÇSARM olarak çalıştırıldığında 25,62 Nm tork oluşmaktadır. Ters polaritelenmiş ÇSARM olarak çalıştırıldığında 20,58 Nm tork oluşmaktadır.

ÇSARM yapısıyla iç ve dış rotorlu ARM’lerin sadece birinin ayrı olarak çalıştırılması sonucunda motor veriminin düştüğü görülmektedir.



Şekil 7.10 ÇSARM 48VDC 500 d/d birer faz akım gerilim grafiği

ÇSARM 48VDC gerilim altında 900 d/d rotor hızı ile çalışırken iç rotorlu ARM ve dış rotorlu ARM'nin birer faz akım ve gerilimi Şekil 7.11'de gösterilmiştir.



Şekil 7.11 ÇSARM 48VDC 900 d/d birer faz akım gerilim grafiği

7.5.2 ÇSARM 66 VDC yük testleri

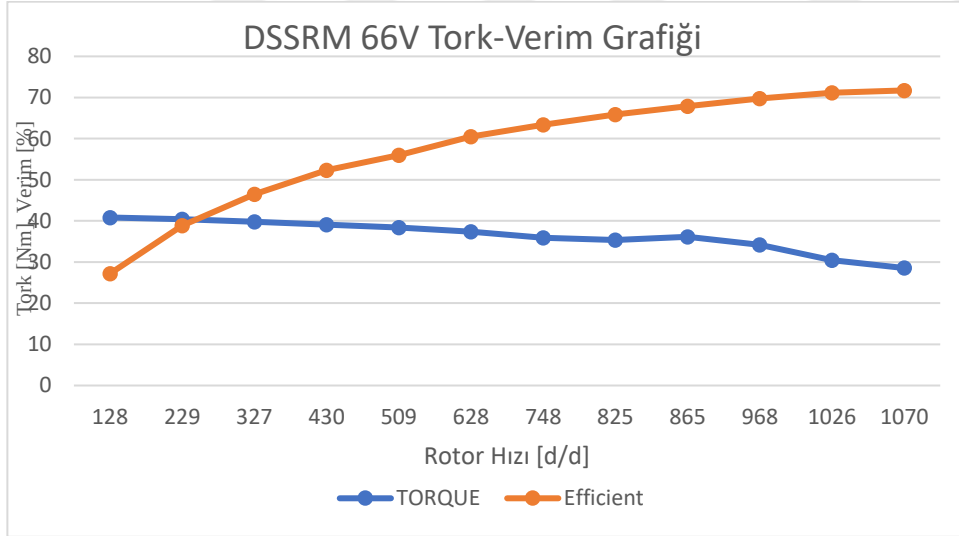
ÇSARM 66 VDC bara gerilimi altında çeşitli hızlarda ve yüklerde çalıştırılmış, bara gerilimi, giriş akımı, faz akımları, hız ve mekanik tork bilgileri kaydedilmiştir. Bu bilgilere göre ÇSARM'nin giriş, çıkış gücü ve sistem verimi hesaplanmıştır. ÇSARM'nin yük testleri sonucunda elde edilen veriler Tablo 7.5'de verilmiştir. Faz akımları açma kapama açıları temel hıza kadar sabit tutulmuş, rotor

hızı 750 d/d ve sonrasında açma kapama açıları 2-3 derece kaydırılarak testler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 7.5 ÇSARM 66 VDC Yük Testleri

Tepe Akım [Amper]	Rotor Hızı [d/d]	Tork [Nm]	Çıkış Gücü [Watt]	Giriş Akımı [Amper]	Bara Gerilimi (Volt)	Giriş Gücü [Watt]	Verim [%]
60	128	40,84	547,424614	30,5	66	2013,00	27,20
60	229	40,4	968,825286	37,8	66	2494,80	38,83
60	327	39,82	1363,57059	44,4	66	2930,40	46,53
60	430	39,1	1760,65324	51	66	3366,00	52,31
60	509	38,4	2046,81045	55,4	66	3656,40	55,98
60	628	37,38	2458,25855	61,6	66	4065,60	60,46
60	748	35,9	2812,06053	67,2	66	4435,20	63,40
60	825	35,34	3053,15682	70,2	66	4633,20	65,90
60	865	36,12	3271,84309	73	66	4818,00	67,91
60	968	34,2	3466,81033	75,3	66	4969,80	69,76
60	1026	30,44	3270,54875	69,6	66	4593,60	71,20
60	1070	28,56	3200,15194	67,6	66	4461,60	71,73

ÇSARM 66 VDC yük testleri sonucunda elde edilen verilere göre rotor hızına göre tork ve verim grafiği Şekil 7.12’de verilmiştir.



Şekil 7.12 ÇSARM 66VDC Tork Verim Grafiği

7.5.3 ÇSARM 72 VDC yük testleri

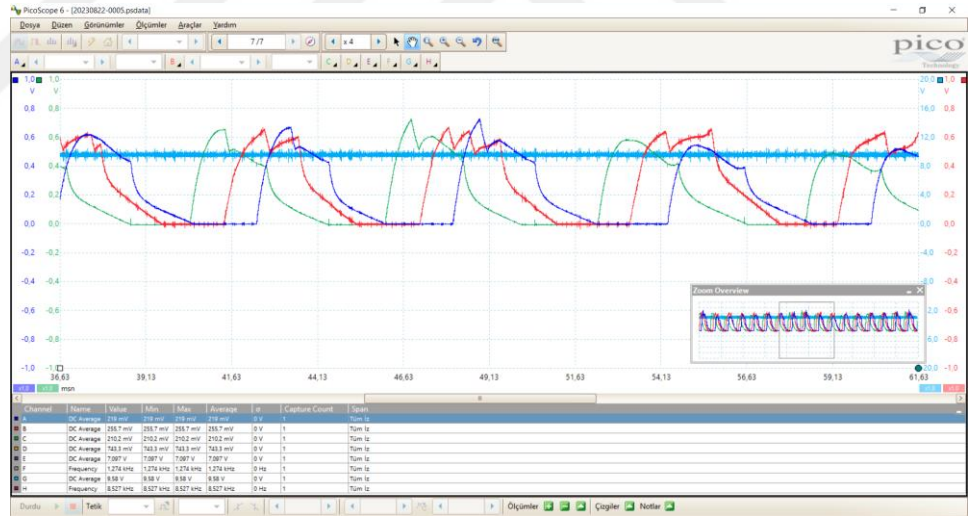
ÇSARM 66 VDC bara gerilimi altında çeşitli hızlarda ve yüklerde çalıştırılmış, bara gerilimi, giriş akımı, faz akımları, hız ve mekanik tork bilgileri kaydedilmiştir. Bu bilgilere göre ÇSARM’nin giriş, çıkış gücü ve sistem verimi

hesaplanmıştır. ÇSARM'nin yük testleri sonucunda elde edilen veriler Tablo 7.6'da verilmiştir. Faz akımları açma kapama açıları temel hıza kadar sabit tutulmuş, rotor hızı 750 d/d ve sonrasında açma kapama açıları 2-3 derece kaydırılarak testler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 7.6 ÇSARM 72 VDC Yük Testleri

Tepe Akımı [Amper]	Rotor Hızı [d/d]	Tork [Nm]	Çıkış Gücü [Watt]	Giriş Akımı [Amper]	Bara Gerilimi (VDC)	Giriş Gücü [Watt]	Sistem Verimi [%]
60	1277	29,36	3926,228	73,6	71	5225,6	75,13
60	1356	26,14	3711,88	69,1	71	4906,1	75,66
60	1486	20,5	3190,078	59,5	71	4224,5	75,51

ÇSARM 72VDC 1200-1500RPM arasında çeşitli hızlarda çalıştırılmış ve sistem verimi %75 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.13 ÇSARM 72VDC 1274 d/d ölçüm sonuçları

ÇSARM 72VDC gerilim altında 1274 d/d hızda çalışırken ölçülen büyüklükler Şekil 7.13'te verilmiştir.

Burada oluşan tork değeri $(10,000-8,527)20=29,46$ Nm olarak hesaplanmaktadır (Tork algılayıcı 10kHz değeri 0 Nm, ± 5 kHz değeri ± 100 Nm). Mavi (ortalama akım 21,9A) ve yeşil renk (ortalama akım 21A) ile gösterilen faz akımları iç rotorlu ARM, kırmızı renkli (ortalama akım 25,5A) faz akımı dış rotorlu

ARM fazının ortalama akımlarıdır. Kaynaktan çekilen akım 74,3 A'dır. Kaynak gerilimi ortalama 71 VDC'dir. Kaynak gerilimi sabit olmadığından faz akımları da anlık gerilime göre değişim göstermektedir ve sonuçta özellikle iç rotorlu ARM faz akımlarının 60 A tepe değerine ulaşamadığı durumlar oluşmaktadır.

7.6. Prototip Üretim Kalitesinin ÇSARM Performansı Üzerine Etkileri

Rotor boyutu 100 mm yerine 95 mm olarak imal edilebilmiştir, çıkış torku üzerinde %5 olumsuz etkisi vardır.

Hava aralıkları tam olarak 0,3 mm olarak ayarlanamamıştır, daha büyük hava aralığı daha az çıkış torku vereceğinden çıkış torkunun azalmasına neden olmaktadır.

Stator ve rotor silisli saclarını paketleme esnasında yeterince sıkıştırılmamış olması örneğin 100 mm paket boyutu için 0,50 mm silisli saclardan 190 adet kullanılması yerine daha az miktarda kullanılması çıkış torkunu azaltmaktadır.

Stator oluk boşluklarının %55-60 yerine el ile sarıldıklarından %30-40 aralığında kullanılması bakır kayıplarını artırmakta dolayısıyla motor verimini düşürmektedir. Aynı zamanda akım yoğunluğunu artırmaktadır.

Dış rotorlu ARM stator sargısının uzun adım sarımlı olması ve stator boyunduruk kalınlığının küçük olmasından kaynaklanan sargı sonu uzunluğunun çok fazla olması dış rotorlu ARM'nin verimini olumsuz etkilemiştir.

ÇSARM'nin yapısı gereği iki ayrı hava aralığı bulunduğundan makinanın çalışma esnasında daha az titreşimle çalışabilmesi için bütün talaş alma işlemlerinin çok hassas bir şekilde yapılması zorunluluğu bulunmaktadır. Rotora sabitlenmiş mil içinde bulunan enkoder mıknatısı, içteki stator miline sabitlenmiş konum algılayıcı devresinin sürtünmeden dolayı bozulmasına sebep olmuştur. Rotor bileşenlerinin imalatı daha hassas işlenerek yeniden yapılmıştır.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tork dalgalılığını en aza indirmek için tasarlanan 6 fazlı uzun ve kısa adım sarımlı farklı iki tip ÇSARM'lerin benzetim sonuçlarından tork dalgalılığı oranının %10'un altına düştüğü gösterilmiştir. ÇSARM fazları 48 VDC gerilim ile beslendiğinde temel hız 500 d/d iken 310 VDC gerilim ile beslendiğinde temel hızın 3000 d/d'ya yükseldiği ve ortalama tork ve tork dalgalanması oranının değişmediği benzetim sonuçlarıyla gösterilmiştir. ÇSARM'nin 500 d/d çalışma esnasında test sonucuna göre sistem verimi % 62 civarında iken 3000 d/d çalışma esnasında sistem veriminin %90 seviyesine çıkacağı değerlendirilmektedir.

Çift statorlu parçalı rotor yapıları ARM, yapısı gereği diğer ARM'lere göre daha fazla tork yoğunluğuna sahiptir. Benzetim sonucunda, iç ve dış rotorlu ARM'lerden oluşan ÇSARM, sargı polariteleri doğru yapılandırıldığında motorların ayrı ayrı çalıştırıldıklarında oluşturdukları toplam torktan daha fazla tork üretimi gerçekleştirmektedir. Bu yapı ile uzun adım sarımlı ÇSARM için %20, kısa adım sarımlı ÇSARM için %10 daha fazla tork elde edilmiştir. ÇSARM yapısındaki boyutlarıyla iç rotorlu ARM ve dış rotorlu ARM yapıları birbirinden bağımsız iki ayrı motor olarak tasarlandığı düşünülse bu iki ayrı motorun ürettiği torkların toplamı ÇSARM torkuna yaklaşık olarak eşit olmaktadır. Dolayısıyla ÇSARM yapısında yalnızca iç rotorlu ARM veya yalnızca dış Rotorlu ARM çalıştırılması verimi düşürmektedir.

Rotor ve statorların birbirine göre kaydırılmış veya kaydırılmamış durumları için 3 ve 6 fazlı ÇSARM yapıları oluşturulmuş, benzetim sonucu elde edilen ortalama tork ve tork dalgalanması oranları karşılaştırılmıştır. Bu tez çalışması ile önerilen ÇSARM yapısının aynı boyutlardaki diğer ÇSARM yapılandırmalarına göre yaklaşık aynı ortalama tork değerinde olmasına karşılık tork dalgalanmasını etkili bir şekilde düşürdüğü gösterilmiştir.

İç ve dış rotorlu ARM'lerin rotorları fiziksel olarak birbirinden ayrılarak bağımsız dönen Çift Rotorlu ARM yapısı oluşturulmuş ve bu yapının ÇSARM'nin optimizasyonu için de kullanılabileceği gösterilmiştir. Rotor parçaları ve stator kutup başı açıları değiştirilerek sadece 49 adet benzetim sonucunda aynı anda 49 adet iç rotorlu ARM ve 49 adet dış rotorlu ARM'lere ait tork dalga şekilleri elde edilmiştir. İç ve dış rotorlu ARM torklarının toplamı yaklaşık olarak ÇSARM torkunu oluşturduğundan $49 \times 49 = 2401$ adet tork dalga şekli elde edileceği ve dolayısıyla benzetim süresinin 49 kat kısılmasının sağlanabileceği gösterilmiştir.

Prototip imalatı yapılan uzun adım sarımlı ÇSARM'nin yük testleri yapılmış ve verim haritaları çıkarılmıştır. Benzetim sonucu oluşan elektromanyetik tork ile testler esnasında elde edilen mekanik tork arasında biraz fark olması normal kabul edilebilir. Prototip üretim esnasında rotor uzunluğunun 100 mm yerine 95 mm olarak imal edilebilmesi %5 tork düşümüne neden olmaktadır. Bunun dışında deneysel tork değerleri ile benzetim sonucunda elde edilen tork değerleri arasında yaklaşık %5 fark bulunmaktadır. Aradaki farkların muhtemel sebepleri arasında imalatla kullanılan silisli çeliğin B-H eğrisinin benzetim esnasında kullanılan malzemenin eğrisinden daha kötü bir eğriye sahip olması, dolayısıyla prototip ÇSARM'de kullanılan silisli çeliğin erken doyuma girmesi sonucu tork düşümü oluşması ve rotor parçalarının gömüldüğü alüminyum blok üzerinde oluşan Eddy akımları kayıpları gösterilebilir.

Uzun adım sarımlı ÇSARM üretimi esnasında kullanılan silisli çeliğin daha ince ve kaliteli seçilmesi, oluk doluluk oranının %55-60 seviyelerine çıkarılması, dış rotorlu ARM'ye ait stator boyunduruk kalınlığını artırarak sargı sonu uzunluğunun kısaltılması ve yüksek hızlarda çalıştırılması ÇSARM veriminin oldukça artmasını sağlayacaktır.

Uzun adım sarımlı ÇSARM, yapısı gereği kısa adım sarımlı ÇSARM'ye göre bakır kayıpları daha fazla çekirdek kayıpları daha azdır.

ÇSARM yapısı gereği 3'er fazlı birer iç ve dış rotorlu ARM'lerden oluştuğu için fazları bozulsa bile torku azalarak çalışmasına devam eder, hata toleransı yüksektir.

Klasik ARM rotor yapısından farklı olarak ÇSARM'de rotor içi boş bir silindirik yapıya sahip olduğundan yüksek hızlarda daha etkili olan rüzgar kayıplarını önleyici bir etkisi vardır.

Rotor parçalarını sabitlemek için kullanılan alüminyum blok yerine polieter eterketon (PEEK) gibi yüksek mukavemet ve yüksek çalışma sıcaklığına uygun malzemeler kullanılabilir, verim üzerine etkisi incelenebilir.

Çift stator yapısının titreşimi ve akustik gürültüyü azaltıcı yöndeki olumlu etkileri araştırılabilir.

ÇSARM bu tez çalışmasında 6 adet tam köprü devresi ile sürülmüştür, mosfet ve diyot sayısını yarıya indirecek standart 3 fazlı dönüştürücü devresi ile sürme çalışmaları yapılabilir.

ÇSARM jeneratör olarak çalıştırılıp performansı araştırılabilir.

Dönüştürücü gerilimi artırılarak ve konum algılayıcısız sürme teknikleri uygulanarak ÇSARM çok yüksek hızlardaki performansı araştırılabilir.



KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abbasian, M., Fahimi, B. and Moallem, M., 2010b, High torque double-stator switched reluctance machine for electric vehicle propulsion, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, vol. 2(1): 1–5 pp.
- Abbasian, M., Moallem, M. and Fahimi, B., 2010a, Double-Stator Switched Reluctance Machines (DSSRM): Fundamentals and Magnetic Force Analysis,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 25 (3): 589–597 pp.
- Ahn, J.W., 2012, Characteristic Analysis of Two-Phase 4/5-Pole Switched Reluctance Motor, Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems Vol. 1(3): 347-353 pp.
- Ahn, J.W., 2013, Characteristics Analysis of Short Flux-path 4/3 SRM, Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems Vol. 2(1): 40-44 pp.
- Aravind, C.V., Norhisam, M., Aris, I., Marhabhan, M.H. and Ahmad, D., 2011, Double Rotor Switched Reluctance Motors: Fundamentals and Magnetic Circuit Analysis, Proceedings of the IEEE Student Conference on Research and Development: 294-299 pp.
- Arumugam, R., Lindsay, J.F. and Krishnan R., 1988, Sensitivity of pole arc/pole pitch ratio on switched reluctance motor performance, Industry Applications Society Annual Meeting, Vol. 1, Oct., 50-54 pp.
- Bilgin, B., Emadi, A. and Krishnamurthy, M., 2012, Design considerations for switched reluctance machines with a higher number of rotor poles, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59(10): 3745-3756 pp.
- Bilgin, B., Jiang, J. W. and Emadi, A., 2019. Switched Reluctance Motor Drives: Fundamentals to Applications. Boca Raton: CRC Press.
- Boivie, J., 1993, Iron Loss Model and Measurements of the Losses in a Switched Reluctance Motor, IEEE Sixth International Conference on Electrical Machines and Drives, Publ. No. 376: 219-222 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Bostanci, E., Moallem, M., Parsapour, A. and Fahimi, B., 2017, Opportunities and Challenges of Switched Reluctance Motor Drives for Electric Propulsion: A Comparative Study, *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 3(1): 58-75 pp.
- Chiba, A., Takano, Y., Takeno, M., Imakawa, T., Hoshi, N., Takemoto, M., Ogasawara, S. et al., 2011. Torque Density and Efficiency Improvements of a Switched Reluctance Motor without Rare-Earth Material for Hybrid Vehicles, *IEEE Transactions on Industry Applications* 47(3):1240–1246 pp.
- Choi, Y.K., Yoon, H. S. and Koh, C. S., 2007, Pole-shape optimization of a switched-reluctance motor for torque ripple reduction, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43 (4): 1797-1800 pp.
- Cui, S., Yuan, Y. and Wang, T., 2008, Research on switched reluctance double-rotor motor used for hybrid electric vehicle, *International Conference on Electrical Machines and Systems*: 3393-3396 pp.
- Daldaban, F. and Ustkoyuncu, N., 2007, New disc type switched reluctance motor for high torque density, *Energy Conversion and Management*, vol. 48(8): 2424-2431 pp.
- Daldaban, F. and Ustkoyuncu, N., 2008, Multi-layer switched reluctance motor to reduce torque ripple, *Energy Convers. Manage.*, 2008, 49, (5): 974–979 pp.
- Desai, P. C., Krishnamurthy, M., Schofield, N. and Emadi, A., 2010, Novel switched reluctance machine configuration with higher number of rotor poles than stator poles: concept to implementation, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57(2): 649-659 pp.
- Eskandari, H. and Mirsalim, M., 2013, An improved 9/12 two-phase E-core switched reluctance machine,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 28(4): 951-958 pp.
- Faiz, J. And Finch, J.W., 1993, Aspects of design optimisation for switched reluctance motors, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 8(4): 704-713 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Fuengwarodsakul, N.H., Menne, M., Inderka, R.B. and De Doncker, R.W., 2004, High performance four-quadrant switched reluctance traction drive based on DITC, Industry Applications Conference, 39th IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2004 IEEE, Volume 3(3-7) :1602 – 1609 pp.
- Gallegos-Lopez, G., Kjaer, P.C. and Miller, T.J.E., 1999, High-grade Position Estimation for SRM drives using Flux linkage/Current Correction Model, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35: 859-869 pp.
- Golzarzadeh, M. and Ganji, B., 2019, Analytical modeling of the Linear Switched Reluctance Motor with segmental translator, IET Electric Power Applications. 13(4):527-537 pp.
- Guangjin, L., Ojeda, J., Hlioui, S., Hoang, E., Lecrivain, M. and Gabsi, M., 2012, Modification in rotor pole geometry of mutually coupled switched reluctance machine for torque ripple mitigating, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48: 2025-2034 pp.
- Hamouda M. and Szamel L., 2018, A new technique for optimum excitation of switched reluctance motor drives over a wide speed range, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 26(5), 2753 – 2767 pp.
- Harris, M.R., Andjargholi, V., Lawrenson P.J., Hughes, A. and Ertan, B., 1977, Unifying approach to the static torque of stepping-motor structures, Proc IEE; 124(12):1215–1224 pp.
- Harris, M.R., Hughes, A. and Lawrenson, P.J., 1975, Static torque production in saturated doubly-salient machines, Proc. IEE, 122(10):1121–1127 pp.
- Hasegawa, Y., Nakamura, K., and Ichinokura, O., 2010, Optimization of a Switched Reluctance Motor made of Permendur, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46, no. 6: 1311-1314 pp.
- Higuchi, T., Suenaga, K. and Abe, T., 2009, Torque ripple reduction of novel segment type Switched reluctance motor by increasing phase number, International Conference on Electrical Machines and Systems: 1–4 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Hoang, E., Multon, B., Fos, R.V and Geoffroy, M., 1994, Influence of stator yoke thickness and stator teeth shape upon ripple and average torque of Switched Reluctance Motors, SPEEDAM Conf Taormina: Italy; 8–10 June: 145–149 pp.
- Hong, J.P., Ha, K. H. and Lee, J., 2002, Stator pole and yoke design for vibration reduction of switched reluctance motor, IEEE Trans. Magn., vol. 38 (2): pp. 929–932 pp.
- Hur, J., Kang, G.H., Lee, J.Y., Hong, J.P., and Lee, B.K., 2004, Design and optimization of high torque, low ripple switched reluctance motor with flux barrier for direct drive, IEEE Industry Applications Conference, vol.1: 1-407 pp.
- Husain, I., Ehsani, M., 1996, Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives by PWM Current Control, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 11(1): 83-88 pp.
- Inderka, R.B.; De Doncker, R.W.A.A., 2003, High-dynamic direct average torque control for switched reluctance drives, IEEE Transactions on Industry Applications, Volume: 39 (4) : 1040–1045 pp.
- Kim, C. S., Lee, G., Lee, K., Lee, J., Cho, Y., Won, J. H., Shin, H., Choi, C. and H. K. Bae, K., 2012, Design of π -core and $\pi 2$ -core pm-aided switched reluctance motors, Electric Vehicle Conference (IEVC), IEEE International: 1-6 pp.
- Krishnan, R., 2001, Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications. CRC Press.
- Lawrenson, P.J., Stephenson, J.M., Blenkinsop, P.T., Corda, J., Fulton, N.N., 1980, Variable Speed Switched Reluctance Motors, IEE Proc B: 127(4): 253–265 pp.
- Lee, C. and Krishnan, R., 2009, New designs of a two-phase E-core switched reluctance machine by optimizing the magnetic structure for a specific application: Concept, design, and analysis, Industry Applications, IEEE Transactions, vol. 45: 1804-1814 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Lee, J.W., Kim, H.S., Kwon, B.II. and Kim, B.T., 2004, New rotor shape design for minimum torque ripple of srm using FEM, IEEE Trans. Magn., vol. 40: 1797-1800 pp.
- Li, Z., Wang, D., Huang, C., Xu, S. and Wang, X., 2023, Nonlinear analytical model of linear switched reluctance motor with segmented secondary considering iron saturation and end effect, IEEE Access, vol. 11: 132078-132087 pp.
- Lovatt H.C., Stephenson J.M., 1992, Influence of Number of Poles per Phase in Switched Reluctance Motors., IEE Proc B, 137(4):307–314 pp.
- Madhavan, R. and Fernandes, B., 2010, A novel axial flux segmented SRM for electric vehicle application, Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference: 1-6 pp.
- Mecrow, B.C, El-Kharashi, E., Finch, J. and Jack, A., 2004, Preliminary performance evaluation of Switched Reluctance Motors with segmental rotors, Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 19(4): 679 – 686 pp.
- Mecrow, B.C., 1996, New winding configurations for doubly salient reluctance machines, IEEE Trans.and Ind. Appl., 32, (6), pp. 1348-1356
- Mecrow, B.C., El-Kharashi, E.A., Finch, J.W. and Jack, A.G., 2003, Segmental rotor switched reluctance motors with single-tooth windings, IEE Proc. Electr. Power Appl., 150, 591–599.
- Mecrow, B.C., Finch, J.W., El-Kharashi, E.A. and Jack, A.G., 2002, Switched reluctance motors with segmental rotors, IEE Proc.- Electr. Power Appl., Vol. 149, (4): 245-254 pp.
- Mecrow, B.C., 1993, Fully pitched-winding switchcd reluctance and stepping-motor arrangements, IEE Proc, E., 140, (I): 61-70 pp.
- Miller, T. J. E., 1993, Switched Reluctance Motors and Their Control, Magna Physics, Oxford, UK

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Miller, T.J.E., 2001, Electronic Control of Switched Reluctance Machines, Newness Power Engineering Series, Oxford, UK
- Miller, T.J.E., 2002, Optimal design of switched reluctance motors, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 49 (1), February: 15–27 pp.
- Moallem, M., Ong, C. M., and Unnewehr, L.E., 1990, Effect of rotor profiles on the torque of a switched reluctance motor, IEEE Transactions On Industry Application, Vol.28 (2): 247-253 pp.
- Neagoe, C., Foggia, A. and Krishnan, R., 1997, Impact Of Pole Tapering On The Electromagnetic Torque Of The Switched Reluctance Motor, IEEE International Electric Machines And Drives Conference record WA1/2.1-3 May: 18–21 pp.
- Ojeda, X., Mininger, X., Gabsi, M., and Lecrivain, M., 2008, Sinusoidal feeding for Switched Reluctance Machine: Application to vibration damping, 18th International Conference on Electrical Machines: 1-4 pp.
- Oyama, J., Higuchi, T., Abe, T. and Kifuji, N., 2005, Novel Switched Reluctance Motor with Segment Core Embedded in Aluminum Rotor Block, IEEJ Trans. IA, Vol.126(4): 385-390 pp.
- Peng, W., Zhang, F. and Ahn, J., 2012, Design and control of a novel bearingless SRM with double stator, IEEE International Symposium on Industrial Electronics: 1928–1933 pp.
- Pillay P. and Cai W., 1999, An Investigation Into Vibration in Switched Reluctance Motors.” IEEE Trans, IA-35(3): 589–597 pp.
- Qu, B., Song, J. and Zheng, J., 2009, Torque ripple minimization in switched reluctance machine by pole arcs design, Proc. 4th IEEE Conf. on Ind. Electron. and Appl., vol. 1: 2308 – 2311 pp.
- Radun, A.V., 1999, Analytical calculation the switched reluctance motor's unaligned inductance, IEEE Trans. Magn., 35, (6): 4473–4481 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Radun, A.V., 2000, Analytically computing the flux linked by a switched reluctance motor phase when the stator and rotor Poles overlap, IEEE Trans.Magn., 36, (4), pp. 1996–2003 pp.
- Rasmussen, P.O., Blaabjerg, F., Pedersen, J.K., and Jensen, F., 2000, Switched reluctance-shark machines- more torque and less acoustic noise, IEEE Industry Applications Conference.: 93-98 pp.
- Rizk, J., Nagrial, M.H., Hellani, A., 2003, Design and performance of switched reluctance motors, IEEE Transactions on electrical machines and systems, Vol. 1: 211-216 pp.
- Sahin F, Ertan B, Leblebicioglu K., 1996, Optimum geometry for torque ripple minimisation of switched reluctance motors, International conference on electrical machines ICEM' 96, vol. 2: 110–115 pp.
- Sanada, M., Morimoto, S., Takeda, Y., Matsui, N., 2000, Novel rotor pole design of switched reluctance motors to reduce the acoustic noise, IEEE Conference on Industry Applications, vol.1, October: 107-113 pp.
- Sheth, N.K. and Rajagopal, K.R., 2003, Optimum pole arcs for a switched reluctance motor for higher torque with reduced ripple, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 39: 3214-3216 pp.
- Shun-Chung, W., Wen-Han L., 2004, Turn-on angle searching strategy for optimized efficiency drive of switched reluctance motors, 30th Annual Conference of Industrial Electronics Society; 2–6 IEEE :1873-1878 pp.
- Siadatan, A., and Afjei, E., 2012, An 8/6 two layers switched reluctance motor: modeling, simulation and experimental analysis, Majlesi Journal of Electrical Engineering Vol. 6, No. 1(20): 1-10pp.
- Soares, F., and P. J. Costa Branco. 2001, Simulation of a 6/4 and 8/6 Switched Reluctance Motor Based on Matlab/ Simulink Environment, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 37 (3): 989–1009 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Sozer Y, Torrey DA, Mese E. Automatic control of excitation parameters for switched-reluctance motor drives. IEEE T Power Electr 2003; 18: 594-603 pp.
- Sozer Y, Torrey DA, Mese E., 2003, Automatic control of excitation parameters for switched-reluctance motor drives, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 18 (2): 594-603 pp.
- Sun, X., Diao, K., Lei, G., Guo, Y. and Zhu, J., 2020, Real-Time HIL emulation for a segmented-rotor switched reluctance motor using a new magnetic equivalent circuit, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35 (4): 3841-3849 pp.
- Tanujaya, M., Dong-Hee Lee, D.H., An, Y.J. and Ahn, J.W., 2012, A novel 6/5 switched reluctance motor with short flux path: Concept, design and analysis, Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems, Vol.1(1): 47-53 pp.
- Torkaman, H., Afjei, E., and Toulabi, M.S., 2012, New double-layer-per-phase isolated switched reluctance motor: concept, numerical analysis, and experimental confirmation, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 2: 830-838 pp.
- Uddin, W., Sozer, Y., 2017, Analytical modeling of mutually coupled switched reluctance machines under saturation based on design geometry, IEEE Trans. Ind. Appl., 53, (5): 4431–4440 pp.
- Vandana, R., Vattikuti, N. and B. Fernandes, 2008, A novel high power density segmented switched reluctance machine, Industry Applications Society Annual Meeting, IAS '08. IEEE, pp. 1-7 pp.
- Viajente, G. P., Chaves, E. N., Queiroz, C. A., et al., 2013, A grid connection scheme of a Switched Reluctance Generator for active power injection, International Electric Machines & Drives Conference, Chicago, IL: 415–420 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Wallace, R.S., Taylor, D.G., 1990, Three phase Switched Reluctance Motor design to reduce torque ripple, International conference on electrical machines ICEM'90:782–787 pp.
- Widmer, J. D. and Mecrow, B. C., 2013, Optimized segmental rotor switched reluctance machines with a greater number of rotor segments than stator oluks, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 49(4): 1491-1498 pp.
- Widmer, J.D. and Mecrow, B.C., 2011, Optimised segmental rotor switched reluctance machines with a greater number of rotor segments than stator oluks, IEEE International Electric Machines&Drive Conference (IEMDC): 1183-1188 pp.
- Wu, C., Pollock, C., 1995, Analysis and reduction of vibration and acoustic noise in the switched reluctance drive, IEEE Trans IA-31(1):91–98 pp.
- Yan, W., Chen, H., Liao, S., Liu, Y. and Cheng, H., 2021, Design of a Low Ripple Double Modular-Stator Switched Reluctance Machine for Electric Vehicle Applications, IEEE Transactions on Transportation Electrification. Vol.7(3): 1349-1358 pp.
- Yang, Y., Schofield, N. and Emadi, A., 2015, Double-Rotor Switched Reluctance Machine design, simulations, and validations, IET Electrical Systems in Transportation, Vol. 6(2): 117-125 pp.
- Yong Kwon, C., Hee Sung, Y. and Chang Seop, K., 2007, Pole-Shape optimization of a Switched-Reluctance Motor for torque ripple reduction, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 43: 1797-1800 pp.
- Zhang, H., Lee, D.H. and Ahn, J.W., 2014, A Segmental Rotor Type 12/8 Switched Reluctance Motor: Concept, design and analysis, IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT): 847-852 pp.

TEŞEKKÜR

Doktora tezi boyunca çalışmalarına yön ve destek veren danışmanlarım Prof. Dr. İbrahim AVGIN ve Prof. Dr. İrfan ALAN'a gösterdikleri sabır, harcadıkları emekleri için çok teşekkür ederim. Tez İzleme Komitesinde bulunan ve çok değerli fikir ve görüşleriyle çalışmama katkıda bulunan Prof. Dr. Erkan MEŞE'ye ve Doç.Dr. Taner GÖKTAŞ'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında karşılaştığım sorunlara pratik çözümler üreten Dr.Öğretim Üyesi Burak TEKGÜN'e, Motor Kontrol Laboratuvarında test düzeneği kurulumu ve testler esnasında sorularımı yanıtsız bırakmayan Araştırma Görevlisi Mert ALTINTAŞ'a ve firmasına ait tork sensörünü kullanmama izin veren Dr.Öğretim Üyesi Özkan AKIN'a teşekkür ederim.

Sürücü donanımını ve konum sensörünü sağlayan Ermaş Elektronik Röle Mamülleri San. ve Tic.A.Ş.'ne ve yardımlarından dolayı çok değerli çalışanlarına teşekkür ederim.

Destek ve sabırlarından dolayı eşim Sibel, çocuklarım Ceylin ve Mehmet Selim'e çok teşekkür ederim.

29 / 03 / 2024

İmzası

Kadir DOĞAN

ÖZGEÇMİŞ

Kadir DOĞAN

Eğitim Bilgileri:

Y.Lisans Ege Üniversitesi FBE Elektrik - Elektronik Mühendisliği A.B.D

Lisans Dokuz Eylül Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

Lise Ödemiş Lisesi

