

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON
MOTORLARDA VURUNTU MOMENTİNİN HARMONİK AKIM
EKLEME YÖNTEMİ İLE AZALTILMASI**

MELTEM TETİK GİRGİN

KOCAELİ 2020

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON
MOTORLARDA VURUNTU MOMENTİNİN HARMONİK
AKIM EKLEME YÖNTEMİ İLE AZALTIMASI

MELTEM TETİK GİRGİN

Doç.Dr. Metin AYDIN
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

Prof.Dr. Zafer BİNGÜL
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Doç.Dr. Bünyamin TAMYÜREK
Jüri Üyesi, Gazi Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih: 28.12.2020

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, kullanım alanı gün geçtikçe artan eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron motorların moment kalitesini arttırmaya yönelik çalışma yapılmıştır. Tez kapsamında motorun montajı, kontrol yazılımı ve test düzeneğinin oluşturulması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Motorda var olan vuruş momentinin azaltılması ve moment kalitesinin artırılması için harmonik akım ekleme algoritması geliştirilmiştir. Gelişen teknoloji ile ülkemizde kurulan Akım Metal Ar-Ge Merkezi'nde tasarlanan ve tasarımcılarından biri olduğum endüstriyel tip servo motor sürücüsü donanımı kullanılarak, geliştirilen harmonik akım ekleme algoritması yazılıma aktarılmıştır ve deneysel çalışmalarda kullanılmıştır.

Tez çalışmam süresince tecrübesiyle beni her zaman yönlendiren, çalışmamın başından sonuna kadar beni titizlikle takip eden değerli hocam Doç. Dr. Metin Aydın'a, bilgi birikimi ve desteğini esirgemeyen hocam Dr. Mehmet Güleç'e, Dr. Ersin Yolaçan'a ve Prof. Dr. Hasan Ocak'a teşekkür ederim. Bu çalışmayı hazırlarken geçirdiğim süreçte benden yardımlarını esirgemeyen Akım Metal Anonim Şirketi'nden Ar-Ge Müdürümüz Sn. Fırat Parlak'a ve yöneticilerimize, Gömülü Sistemler Takım Liderimiz Sn. Gamze Demir'e, özellikle çalışma arkadaşlarımdan Çağla Uzun'a, Burak Özdiğer'e ve tüm takım arkadaşlarıma, Motor Üretim Atölyesinden Sn. Ramazan Akyüz'e teşekkür ederim.

Hayatım boyunca karşılaştığım tüm zorluklarda desteğini benden esirgemeyen, her daim yanımda olan, başarılarımın arkasındaki gizli kahramanlarım annem Hatice TETİK ve babam Fahrettin TETİK'e, beni her zaman güçlü kılan ablam Çiğdem TETİK DERVİŞOĞLU'na, son olarak bana her zaman güvenen, her konuda yardımını esirgemeyen hep destekçim olan hayat arkadaşım, eşim Ömer Birgit GİRGİN'e teşekkür ederim.

Aralık -2020

Meltem TETİK GİRGİN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	x
SİMGELEr VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT	xiv
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER.....	4
2. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTOR VE MODELLENMESİ.....	14
2.1. Radyal Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor	16
2.1.1. YüzeYden mıknatıslı RASM motorlar	17
2.1.2. YüzeYden gömülü mıknatıslı RASM motorlar	17
2.1.3. Dahili mıknatıslı RASM motorlar.....	18
2.2. Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor.....	18
2.3. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Modellenmesi	22
2.3.1. Stator referans düzleminde SMSM'un modellenmesi	22
2.3.2. Rotor referans düzleminde SMSM'un modellenmesi.....	24
3. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORLARIN KONTROLÜ	25
3.1. Eviriciler.....	25
3.2. Motor Kontrol Yöntemleri	27
3.2.1. Altı adım anahtarlamalı kontrol	27
3.2.2. PID kontrol.....	28
3.2.3. Vektör kontrol	29
4. EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORLARDA VURUNTU MOMENTİNİ AZALTMA YÖNTEMLERİ.....	35
4.1. Vuruntu Momenti	35
4.2. Vuruntu Momentini Azaltma Yöntemleri	37
4.2.1. Vuruntu momentinin tasarıma müdahale ile azaltılması.....	38
4.2.2. Vuruntu momentinin kontrol yöntemleri ile azaltılması.....	41
4.3. EASM Senkron Motorun Vuruntu Momentinin Hesaplanması.....	48
4.4. EASM Senkron Motorun Vuruntu Momentinin Harmonik Akım Ekleme ile Azaltılmasının MATLAB/Simulink Benzetimi	49
5. TEST SİSTEMİ VE DENEYSEL SONUÇLAR	61
5.1. Test Sistemi	61
5.2. Fourier Analizi ile Harmonik Akım Ekleme Yöntemi.....	65
5.2.1. EASM Motor – 1 için vuruntu momenti ve moment dalgalanmasının azaltılması	66
5.2.1.1. Motor – 1'e 5rpm hızda harmonik akım ekleme	66
5.2.1.2. Motor – 1'e 10rpm hızda harmonik akım ekleme	74
5.2.1.3. Motor – 1'e 100rpm hızda harmonik akım ekleme	78
5.2.2. EASM Motor – 2 için vuruntu momenti ve moment dalgalanmasının azaltılması	82

5.2.2.1. Motor – 2’ye 5rpm hızda harmonik akım ekleme	82
5.2.2.2. Motor – 2’ye 10rpm hızda harmonik akım ekleme	86
5.2.2.3. Motor – 2’ye 100rpm hızda harmonik akım ekleme	90
5.3. İki Aşamalı Fourier Analizi ile Harmonik Akım Ekleme Yöntemi	94
5.3.1. EASM Motor – 1 için vuruñtu momenti ve moment dalgalanmasının azaltılması	94
5.3.1.1. Motor – 1’e 5rpm hızda harmonik akım ekleme	94
5.3.1.2. Motor – 1’e 10rpm hızda harmonik akım ekleme	102
5.3.1.3. Motor – 1’e 100rpm hızda harmonik akım ekleme	106
5.3.2. EASM Motor – 2 için vuruñtu momenti ve moment dalgalanmasının azaltılması	110
5.3.2.1. Motor – 2’ye 5rpm hızda harmonik akım ekleme	110
5.3.2.2. Motor – 2’ye 10rpm hızda harmonik akım ekleme	114
5.3.2.3. Motor – 2’ye 100rpm hızda harmonik akım ekleme	118
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	123
KAYNAKLAR	124
EKLER	129
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	141
ÖZGEÇMİŞ	143

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Elektrik motorlarının sınıflandırılması.....	4
Şekil 1.2.	Sürekli mıknatıs malzemelerinin tarihsel gelişimi.....	6
Şekil 1.3.	Moment kalitesinin artırılması için 3-faz stator akımına harmonik akım ekleme blok şeması.....	8
Şekil 1.4.	Moment kalitesinin artırılması için q-eksen akımına harmonik akım ekleme blok şeması.....	9
Şekil 1.5.	Harmonik akım ekleme ile moment kalitesinin artırılması.....	9
Şekil 1.6.	Tork gözlemleyicisi ile vuru momentinin azaltılmasının blok şeması.....	10
Şekil 1.7.	Gözlemci ile vuru momentinin azaltılmasının blok şeması.....	10
Şekil 1.8.	Ölü zaman etkisinin anahtarlama elemanı üzerindeki etkisi.....	11
Şekil 1.9.	Akım ileri besleme yöntemi ile vuru momentinin telafisinin blok diyagramı.....	11
Şekil 1.10.	Uyarlanabilir akım kontrolü yöntemi ile vuru momentinin telafisinin blok diyagramı.....	12
Şekil 1.11.	Tekrarlanabilir akım kontrolörü ile moment dalgalanmasının azaltılması.....	12
Şekil 1.12.	Yüksek bant genişlikli akım kontrolörü ile moment dalgalanmasının azaltılması.....	13
Şekil 2.1.	Temel bir sürekli mıknatıslı senkron motor yapısı.....	14
Şekil 2.2.	Sinusoidal ve trapezoidal besleme dalga şekilleri.....	15
Şekil 2.3.	(a) Radyal akılı motor, (b) Eksenel akılı motor.....	16
Şekil 2.4.	(a) Radyal akılı motor akı yolu, (b) Eksenel akılı motor akı yolu.....	16
Şekil 2.5.	Mıknatısların rotora yerleştiriliş şekilleri (a)Yüzey mıknatıslı (b)Yüzeye gömülü mıknatıslı (c)Dahili(gömülü) mıknatıslı motorlar.....	16
Şekil 2.6.	Yüzey mıknatıslı RASM motor.....	17
Şekil 2.7.	Yüzeye gömülü mıknatıslı RASM motor.....	18
Şekil 2.8.	Dahili mıknatıslı RASM motor.....	18
Şekil 2.9.	Eksenel akılı sürekli mıknatıslı (EASM) motorun sınıflandırılması.....	19
Şekil 2.10.	Eksenel akılı motor tipleri: (a) Tek stator tek rotorlu, (b) tek stator iki rotorlu, (c) İki stator tek rotorlu, (d) çok stator çok rotorlu.....	19
Şekil 2.11.	Sürekli mıknatıslı eksenel akılı senkron motorun en sık kullanılan yapıları.....	20
Şekil 2.12.	Tek statorlu tek rotorlu yapı.....	20
Şekil 2.13.	İki stator tek rotorlu yapı.....	21
Şekil 2.14.	Tek stator iki rotorlu yapı.....	21
Şekil 2.15.	Üç fazlı yıldız bağlı SMSM.....	22
Şekil 2.16.	SMSM 'un rotor referans düzleminde eşdeğer devresi.....	24
Şekil 3.1.	Üç fazlı inverter yapısı.....	26

Şekil 3.2.	Akıllı güç modülü- nün (IPM) iç yapısı	26
Şekil 3.3.	Altı adım anahtarlamalı kontrol yapısı	27
Şekil 3.4.	PID kontrolcünün iç yapısı	28
Şekil 3.5.	Genel vektör kontrol blok diyagramı	30
Şekil 3.6.	Clarke dönüşümünün grafiksel gösterimi	31
Şekil 3.7.	Park dönüşümünün grafiksel gösterimi	32
Şekil 3.8.	3-faz stator akımının dönüşümünün grafiksel gösterimi	32
Şekil 3.9.	Ters park dönüşümünün grafiksel gösterimi	33
Şekil 3.10.	Sektör – 1 içerisindeki referans gerilim vektörü yerleşimi	33
Şekil 3.11.	Altı sektör için fazlara ait PWM durumları	34
Şekil 4.1.	EASM bir motorun vuruğu momenti dalga formu	36
Şekil 4.2.	Vuruğu moment oluşumu	37
Şekil 4.3.	Vuruğu momenti azaltma teknikleri	38
Şekil 4.4.	Stator olukların kaydırılması (a), oluk açıklığının kaydırılması (b)	39
Şekil 4.5.	Motor vuruğusu ile kaydırılmış oluklu yapıların karşılaştırılması	39
Şekil 4.6.	Mıknatıs kaykısı teknikleri: kaykısız mıknatıslar(a), klasik kaykılı mıknatıslar(b), üçgen şekilli kaykısı(c), paralel kenarlı mıknatıs(d), yamuk biçimli kaykısı(e), dairesel kaykılı mıknatıs(f), çift kaykılı mıknatıs(g)	40
Şekil 4.7.	Üçgen şekilli kaykılı mıknatıslar kullanıldığında artan kaykısı açısına göre vuruğu momentinin değışimi	40
Şekil 4.8.	PI-tip kapalı çevrim tork gözlemci yapısı	42
Şekil 4.9.	Akım kontrol blok şeması(a), tekrarlanabilir akım kontrolcüsünün iç yapısı(b)	43
Şekil 4.10.	Moment kalitesinin artırılması için 3-faz stator akımlarına harmonik akım ekleme blok şeması	44
Şekil 4.11.	Moment kalitesinin artırılması için q-eksen akımına harmonik akım ekleme blok şeması	44
Şekil 4.12.	Harmonik akım ekleme yöntemi ile vuruğu momentinin azaltılması algoritması	47
Şekil 4.13.	EASM senkron motorun 3D SEA vuruğu momenti	48
Şekil 4.14.	EASM senkron motorun 3D SEA vuruğu momentinin harmonik analizi	49
Şekil 4.15.	Harmonik akım ekleme için önerilen blok şemasının genel yapısı	49
Şekil 4.16.	EASM senkron motorun Simulink modeli	50
Şekil 4.17.	Üç fazlı evirici Simulink modeli	51
Şekil 4.18.	Akım kontrolörünün birim basamak cevabı (a), hız kontrolörünün birim basamak cevabı (b)	52
Şekil 4.19.	EASM senkron motorun hız kontrolünün Simulink modeli	53
Şekil 4.20.	Harmonik akım hesaplamasının Simulink modeli	54
Şekil 4.21.	EASM senkron motorun harmonik akım ekleme metodu ile vuruğu momentinin azaltılması çalışmasının Simulink modeli	55
Şekil 4.22.	5rpm hızda vuruğu momenti	56
Şekil 4.23.	5rpm hızda 2.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değışimi	56

Şekil 4.24.	5rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi.....	57
Şekil 4.25.	10rpm hızda vuruğu momenti	58
Şekil 4.26.	10rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi.....	58
Şekil 4.27.	100rpm hızda moment dalgalanması.....	59
Şekil 4.28.	100rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentini değişimi.....	59
Şekil 5.1.	Tezde deneysel çalışmalarda kullanılan EASM senkron motor.....	62
Şekil 5.2.	Referans EASM senkron motorun stator bağlantı şekli ve elektriksel verileri	62
Şekil 5.3.	Motor test düzeneği	63
Şekil 5.4.	SMB marka endüstriyel motor sürücü.....	64
Şekil 5.5.	FENAC FNC-40EB kodlu enkoder.....	64
Şekil 5.6.	5rpm hızda vuruğu momenti	66
Şekil 5.7.	5rpm hızda vuruğu momentinin harmonik bileşenleri	67
Şekil 5.8.	5rpm hızda Motor-1 için hesaplanan harmonik akımların dalga şekilleri	69
Şekil 5.9.	5rpm hızda 2.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımının değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)	70
Şekil 5.10.	5rpm hızda 2.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)	71
Şekil 5.11.	5rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımının değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)	72
Şekil 5.12.	5rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)	73
Şekil 5.13.	10rpm hızda vuruğu momenti	74
Şekil 5.14.	10rpm hızda vuruğu momentinin harmonik bileşenleri	74
Şekil 5.15.	10rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımının değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)	76
Şekil 5.16.	10rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)	77
Şekil 5.17.	100rpm hızda moment dalgalanması.....	78
Şekil 5.18.	100rpm hızda moment dalgalanmasının harmonik bileşenleri.....	78
Şekil 5.19.	100rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımının değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları).....	80
Şekil 5.20.	100rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motorun moment dalgalanmasının değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları).....	81
Şekil 5.21.	5rpm hızda vuruğu momenti	83
Şekil 5.22.	5rpm hızda vuruğu momentinin harmonik bileşenleri	83

Şekil 5.23.	5rpm hızda 3Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımının değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)	84
Şekil 5.24.	5rpm hızda 3Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)	85
Şekil 5.25.	10rpm hızda vuru mu momenti	86
Şekil 5.26.	10rpm hızda vuru mu momentinin harmonik bileşenleri	86
Şekil 5.27.	10rpm hızda 3Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımının değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)	88
Şekil 5.28.	10rpm hızda 3Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)	89
Şekil 5.29.	100rpm hızda moment dalgalanması	90
Şekil 5.30.	100rpm hızda moment dalgalanmasının harmonik bileşenleri	90
Şekil 5.31.	100rpm hızda 1.25Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımının değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)	92
Şekil 5.32.	100rpm hızda 1.25Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)	93
Şekil 5.33.	5rpm hızda 1.harmonik bileşen eklenen ve ortalaması çıkarılan moment sinyali	95
Şekil 5.34.	5rpm hızda 1.harmonik bileşen eklenen ve ortalaması çıkarılan momentin harmonik bileşenleri	95
Şekil 5.35.	5rpm hızda 2.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımı değişimi (İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)	98
Şekil 5.36.	5rpm hızda 2.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentini değişimi (İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)	99
Şekil 5.37.	5rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımı değişimi (İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)	100
Şekil 5.38.	5rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi (İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)	101
Şekil 5.39.	10rpm hızda 1.harmonik bileşen eklenen ve ortalaması çıkarılan moment sinyali	102
Şekil 5.40.	10rpm hızda 1.harmonik bileşen eklenen ve ortalaması çıkarılan momentin harmonik bileşenleri	102
Şekil 5.41.	10rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımı değişimi(İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)	104
Şekil 5.42.	10rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi(İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)	105

Şekil 5.43.	100rpm hızda 1.harmonik bileşen eklenen ve ortalaması çıkarılan moment sinyali	106
Şekil 5.44.	100rpm hızda 1.harmonik bileşen eklenen ve ortalaması çıkarılan momentin harmonik bileşenleri	106
Şekil 5.45.	100rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımı değişimi(İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)	108
Şekil 5.46.	100rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi(İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)	109
Şekil 5.47.	5rpm hızda 1.harmonik bileşen eklenen ve ortalaması çıkarılan moment sinyali	110
Şekil 5.48.	5rpm hızda 1.harmonik bileşen eklenen ve ortalaması çıkarılan momentin harmonik bileşenleri	110
Şekil 5.49.	5rpm hızda 3Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımı değişimi(İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)	112
Şekil 5.50.	5rpm hızda 3Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi(İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)	113
Şekil 5.51.	10rpm hızda 1.harmonik bileşen eklenen ve ortalaması çıkarılan moment sinyali	114
Şekil 5.52.	10rpm hızda 1.harmonik bileşen eklenen ve ortalaması çıkarılan momentin harmonik bileşenleri	114
Şekil 5.53.	10rpm hızda 3Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımı değişimi(İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)	116
Şekil 5.54.	10rpm hızda 3Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi(İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)	117
Şekil 5.55.	100rpm hızda 1.harmonik bileşen eklenen ve ortalaması çıkarılan moment sinyali	118
Şekil 5.56.	100rpm hızda 1.harmonik bileşen eklenen ve ortalaması çıkarılan momentin harmonik bileşenleri	118
Şekil 5.57.	100rpm hızda 1.25Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımı değişimi(İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)	120
Şekil 5.58.	100rpm hızda 1.25Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi(İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)	121
Şekil A.1.	SMB SD-LP-15-M servo sürücü teknik özellikleri - 1	130
Şekil A.2.	SMB SD-LP-15-M servo sürücü teknik özellikleri - 2	131
Şekil B.1.	FNC-40EB kodlu artımlı enkoderin teknik özellikleri	132
Şekil C.1.	EASM senkron motorun sisteme bağlanması için tasarlanan parçanın teknik çizimi	133
Şekil D.1.	ASD-B1521-A kodlu servo sürücü teknik özellikleri - 1	134
Şekil D.2.	ASD-B1521-A kodlu servo sürücü teknik özellikleri - 2	135
Şekil D.3.	ECMA-E31315GS kodlu senkron motor teknik özellikleri	136
Şekil D.4.	Dinamo motorunun flanşının teknik çizimi	136

Şekil D.5.	Dinamo motorunun bağlantı plakasının teknik çizimi	137
Şekil E.1.	Burster marka 8661-500-V0000 kodlu torkmetrenin teknik özellikleri - 1	138
Şekil E.2.	Burster marka 8661-500-V0000 kodlu torkmetrenin teknik özellikleri - 2	138
Şekil E.3.	Burster marka 8661-500-V0000 kodlu torkmetrenin teknik özellikleri - 3	139
Şekil E.4.	Torkmetrenin sisteme bağlanması için tasarlanan parçanın teknik çizimi	140



TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1.	Rotor pozisyonuna bağlı olarak evirici anahtar durumları.....	28
Tablo 3.2.	PID katsayılarının sistem cevabına etkileri	29
Tablo 4.1.	EASM Motor-1'in parametreleri.....	35
Tablo 4.2.	Simulink benzetim çalışmasında kullanılan EASM senkron motorun temel parametreleri	51
Tablo 4.3.	Kontrolör kazanç değerleri.....	52
Tablo 4.4.	EASM senkron motorun vuruğu momentinin harmonik bileşenleri	53
Tablo 4.5.	5rpm hızda 2.5Nm yükte sistem moment değeri.....	57
Tablo 4.6.	5rpm hızda 4.5Nm yükte sistem moment değeri.....	57
Tablo 4.7.	10rpm hızda 4.5Nm yükte sistem moment değeri.....	58
Tablo 4.8.	100rpm hızda 4.5Nm yükte sistem moment değeri.....	59
Tablo 5.1.	EASM senkron motorların özellikleri	63
Tablo 5.2.	5rpm hızda 2.5Nm yükte faz akımının, momentin ve bakır kaybının değeri	68
Tablo 5.3.	5rpm hızda 4.5Nm yükte faz akımının, momentin ve bakır kaybının değeri	69
Tablo 5.4.	10rpm hızda 4.5Nm yükte faz akımının, momentin ve bakır kaybının değeri	75
Tablo 5.5.	100rpm hızda 4.5Nm yükte faz akımının, momentin ve bakır kaybının değeri	79
Tablo 5.6.	5rpm hızda 3Nm yükte faz akımının, momentin ve bakır kaybının değeri	83
Tablo 5.7.	10rpm hızda 3Nm yükte faz akımının, momentin ve bakır kaybının değeri	87
Tablo 5.8.	100rpm hızda 1.25Nm yükte faz akımının, momentin ve bakır kaybının değeri	91
Tablo 5.9.	5rpm hızda 2.5Nm yükte faz akımının, momentin ve bakır kaybının değeri	96
Tablo 5.10.	5rpm hızda 4.5Nm yükte faz akımının, momentin ve bakır kaybının değeri	97
Tablo 5.11.	10rpm hızda 4.5Nm yükte faz akımının, momentin ve bakır kaybının değeri	103
Tablo 5.12.	100rpm hızda 4.5Nm yükte faz akımının, momentin ve bakır kaybının değeri	107
Tablo 5.13.	5rpm hızda 3Nm yükte akım, moment ve bakır kaybının değeri	111
Tablo 5.14.	10rpm hızda 3Nm yükte faz akımının, momentin ve bakır kaybının değeri	115
Tablo 5.15.	100rpm hızda 1.25Nm yükte faz akımının, momentin ve bakır kaybının değeri	119

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

B	: Viskoz Sürtünme
e_a	: Stator sargılarında oluşan Zıt-EMK
I	: Akım, (Amper)
J	: Atalet
K	: Sektör Numarası
K_d	: Derivative Gain(Türev Kazancı)
K_i	: Integral Gain(İntegral Kazancı)
K_p	: Proportional Gain(Oransal Kazanç)
K_t	: Tork Katsayısı
L	: Endüktans, (Henry)
N_c	: Rotor Kutup Sayısı ile Stator Oluk Sayısının En Küçük Ortak Katı
P_a	: Motor gücü, (Watt)
p	: Kutup çifti sayısı
P_r	: Rotor Oluk Sayısı
P_s	: Stator Oluk Sayısı
R	: Direnç, (Ohm)
R	: Hava Aralığındaki Relüktans
T_e	: Elektromanyetik moment, (Nm)
T_k, T_{k+1}	: Referans Gerilim Vektörünün Çalışma Periyodu, (saniye)
T_s	: Anahtarlama Periyodu, (saniye)
$T_{vuruntu}$: Vuruntu Momenti, (Nm)
V	: Gerilim, (Volt)
V_{dc}	: DC Bara Gerilimi, (Volt)
w_{bw_c}	: Akım Döngüsü Bant Genişliği
w_{bw_s}	: Hız Döngüsü Bant Genişliği
W_g	: Hava Aralığının Enerjisi
ω_m	: Mekaniksel açısal hız, (rad/s)
ω_r	: Elektriksel açısal hız, (rad/s)
Φ_g	: Hava Aralığındaki Manyetik Akı
ψ_m	: Eksenel akı, (Flux)
θ	: Motor Açısı, (radyan)
$\theta_{vuruntu}$: Vuruntu Momentinin Açısı, (radyan)

Kısaltmalar

AC	: Alternating Current (Alternatif Akım)
Al-Ni-Co	: Alüminyum - Nikel – Kobalt
BJT	: Bipolar Junction Transistor (Çift Birleşim Yüzeyleli Transistör)
BLDC	: Brushless Direct Current (Fırçasız Doğru Akım)
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
EASM	: Eksenel Akılı Sürekli Miknatıslı

EMK	: Elektro Motor Kuvveti
FFT	: Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü)
FOC	: Field Oriented Control (Alan Yönelimli Kontrol)
GTO	: Gate Turn Off Thyristor (Kapısından Kesmeli Tristör)
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor (Yalıtılmış Kapılı İki Kutuplu Transistör)
IPM	: Intelligent Power Module (Akıllı Güç Modülü)
MOSFET	: Metal Oxide Semi-conductor Field Effect Transistor (Metal Oksit Yarıiletkenli Alan Etkili Transistör)
NdFeB	: Neodymium Iron Boron (Neodyum Mıknatıs)
PID	: Proportional-Integral-Derivative (Oransal-İntegral-Türevsel kontrolör)
PWM	: Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
RASM	: Radyal Akılı Sürekli Mıknatıslı
RMS	: Root Mean Square (Karekök Ortalama)
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
Sm-Co	: Samarium – Cobalt (Samarium-Kobalt)
SMSM	: Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
SPWM	: Sinusoidal Pulse Width Modulation (Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu)
UVPWM	: Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu
Zıt-EMK	: Zıt Elektro Motor Kuvveti
2D	: 2 boyutlu
3D	: 3 boyutlu

EKSENEL AKILI SÜREKLİ MİKNATISLI SENKRON MOTORLARDA VURUNTU MOMENTİNİN HARMONİK AKIM EKLEME YÖNTEMİ İLE AZALTIKMASI

ÖZET

Eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron motorlar, geometrik avantajları, yüksek verimleri ve yüksek güç yoğunlukları nedeniyle bir çok uygulamada öne çıkmaktadır. Düşük hızlarda yüksek moment sağlamalarından dolayı kullanım alanları giderek artmaktadır. Eksenel akılı motorların bazı oluk-kutup kombinasyonlarında moment dalgalanması fazla olabilmektedir. Yüksek hızlarda sistem ataletinin de etkisiyle moment dalgalanması düşük olabilmekte, ancak bazı uygulamalarda düşük hızlarda vuruñtu momenti kaynaklı bileşenin azaltılması önem arz etmektedir. Moment dalgalanmasını azaltmaya yönelik tasarımsal optimizasyon yapılması pahalı ve zaman alıcı bir çözümdür. Günümüzde tasarımsal düzenleme yerine, motorun kontrol algoritmasında düzenleme yapılarak moment dalgalanmasının azaltılması üzerine çalışmalar artmaktadır. Bu tip motorlarda, güç elektroniğinde ve yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler sayesinde, geleneksel kontrol yöntemleri yerine vektör kontrolünün uygulamaları yaygınlaşmaktadır. Literatürde moment dalgalanmasını azaltmaya yönelik en yaygın kullanılan yöntem ise Harmonik Akım Ekleme yöntemidir.

Bu çalışmada, eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron motorunun tasarımından kaynaklanan vuruñtu momenti tespit edilerek, motor tasarımına müdahale edilmeden, kontrol algoritmasında yapılan harmonik akım ekleme metodu ile moment dalgalanmasının azaltılması incelenmiştir. Yapılan MATLAB/Simulink benzetim çalışmaları ve deneysel testler ile harmonik akım ekleme ile vuruñtu momentinin azaltılabildiği gözlenmiştir. Sonuçlar ayrıntılı bir şekilde sunulurak kontrol algoritması eksenel akılı motorlar için doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor, Harmonik Akım Ekleme, Matlab/Simulink, Vektör Kontrol, Vuruñtu Momenti.

REDUCING COGGING TORQUE IN AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS WITH HARMONIC CURRENT INJECTION

ABSTRACT

Axial flux permanent magnet synchronous motors move forward in many applications due to their geometric advantages, high efficiency and high power density. Due to their high torque capability at low speeds, the use of such motors are increasing gradually. Torque pulsations may be high in some slot-pole combinations of axial flux motors. At high speeds, torque pulsations may be low due to the system inertia, but in some applications it is quite critical to reduce the component caused by cogging torque at low speeds. Design optimization to reduce torque pulsations is an expensive and time consuming solution. Nowadays, studies on reducing torque pulsations by modifying the control algorithm of the motor instead of the design related solutions are increasing. Thanks to advances in this type of motors, power electronics and semiconductor technology, several studies do exist in some applications of vector control instead of traditional control methods. The most widely used method to reduce torque pulsations including cogging in the literature is the Harmonic Current Injection approach.

In this study, the reducing cogging torque by harmonic current injection is investigated by determining the cogging torque, caused by the design of the axial flux permanent magnet synchronous motor, without modifying the motor design. With the MATLAB/Simulink simulation work and experimental tests, it has been observed that adding harmonic current can help reduce the cogging torque. The results are presented in detail and the control algorithm has been verified in previously manufactured axial flux motors.

Keywords: Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Motor, Harmonic Injection, Matlab / Simulink, Vector Control, Cogging Torque.

GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesiyle elektrik motorlarının kullanım alanları giderek artmaktadır. Gelişim süreci düşünüldüğünde uzun yıllardır kullanılan elektrik motorlarının üretim teknolojisinde de değişikliklere gidilerek çok farklı tiplerde motor üretimleri yapılmaktadır. Günümüzde elektrik motorlarının yapısal çeşitlilikleri, boyutları, güç ve verim ilişkileri göz önüne alındığında çok farklı uygulamalara cevap verebilecek ürünler ortaya koyulmaktadır. Nitekim etrafımıza baktığımızda küçük ev aletlerinden, çamaşır makinesine, asansörlerden elektrikli araçlara kadar çok farklı uygulamalarda elektrik motorları kullanıldığı görülmektedir. Farklı tip uygulamalar için özelleştirilmiş motor tipleri olan senkron motorların kullanımı artmaktadır. Senkron motorların kompakt yapıda olmaları, az bakım gerektirmeleri, yüksek verimde çalışmaları ve hassas uygulamalarda kullanılabilir olmalarından dolayı klasik asenkron motor ve doğru akım motorlarına göre daha fazla tercih edilebilir hale getirmiştir. Bu avantajlarının yanında bu motorları kontrol edebilmek için özelleştirilmiş sürücülere ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, aksenal akıllı sürekli mıknatıslı senkron motorun vuruğu momentini algılamak ve vuruğunun momentte oluşturduğu dalgalanmayı harmonik akım ekleme yöntemi ile azaltarak motor moment kalitesinin artırılmasıdır.

Tez kapsamında, daha önceden tasarlanan ve parçaları üretilen EASM senkron motorun montajı yapılarak, prototipi oluşturulmuştur. Ayrıca bu tez kapsamında prototipi oluşturulan motorun yüklü ve yüksüz durum testlerinin yapılabilmesi için test sistemi tasarlanmış ve üretimi yapılmıştır. Akım Metal A.Ş. bünyesinde tasarlanan SMB SD-LP servo sürücünün donanımı kullanılarak yazılımlar geliştirilmiş ve EASM senkron motorun kontrolü sağlanmıştır. Motor kontrolü için vektör kontrol yönteminin yazılımı gerçekleştirilirken, vuruğu momentinden dolayı sistem momentinde oluşan dalgalanmanın azaltılması için harmonik akım ekleme yöntemi üzerine yazılımlar gerçekleştirilmiştir. Test düzeneğinde bulunan torkmetre sayesinde sistemdeki moment verisi alınmıştır. Moment verisinde vuruğu

momentinden oluşturan dalgalanmalar tespit edilerek, bu dalgalanmaların harmonik genlikleri ve frekansları algılanarak, moment kalitesini arttırmaya yönelik harmonik akım ekleme algoritması geliştirilerek uygulanmıştır. Harmonik akım ekleme yapılmadan önce alınan moment sonuçları ile harmonik akım ekleme yapıldıktan sonraki moment sonuçları karşılaştırılarak momentteki dalgalanmanın önemli ölçüde azaltılabildiği gözlenmiştir.

Bölüm 1’de elektrik motorları ve kontrol yöntemleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. Elektrik motorlarının kullanım alanları, sınıflandırılması, motor üretiminde kullanılan mıknatıs malzemeleri ve tarihsel gelişimi gibi konulara değinilmiştir. Sürekli mıknatıslı kontrol yöntemlerinden en yaygını olan ve bu tez kapsamında motor kontrolünde kullanılacak vektör kontrolünün tarihsel gelişimi ve kullanıldığı alanlar için literatür çalışması yapılarak aktarım sağlanmıştır. Tez konusu olan “Vuruntu Momenti”nin oluşma nedenleri ve vuruntu momentinin azaltılması üzerine yapılan çalışmalar incelenerek literatürde en sık gözlenen konular için blok şemaları ve uygulamaları hakkında bilgiler verilmiştir.

Bölüm 2’de sürekli mıknatıslı senkron motorların yapısal incelenmesi ve matematiksel modelleri hakkında genel bilgiler verilmiştir.

Bölüm 3’de motor sürücülerin eviricileri hakkında genel bilgi verilmiştir. Daha sonra sürekli mıknatıslı senkron motorların kontrolünde sıklıkla kullanılan kontrol yöntemleri aktarılmıştır. Yaygın olarak kullanılan yöntemler hakkında genel bilgi verilerek, vektör kontrol yöntemi hakkında detaylı bilgi aktarı sağlanmıştır.

Bölüm 4’de sürekli mıknatıslı senkron motorlardaki vuruntu momentinin algılanması üzerine incelemeler aktarılmıştır. Vuruntu momentinin, moment üzerindeki etkileri hakkında genel bilgi verilerek, motorlarda vuruntu momentinin azaltılmasına yönelik geliştirilen yöntem hakkında bilgi aktarılmıştır. Harmonik akım ekleme ile sistem momentinde vuruntu momentinden dolayı oluşan moment dalgalanmasının azaltılmasına yönelik MATLAB/Simulink benzetim çalışması yapılarak, sonuçlar bu bölümde verilmiştir.

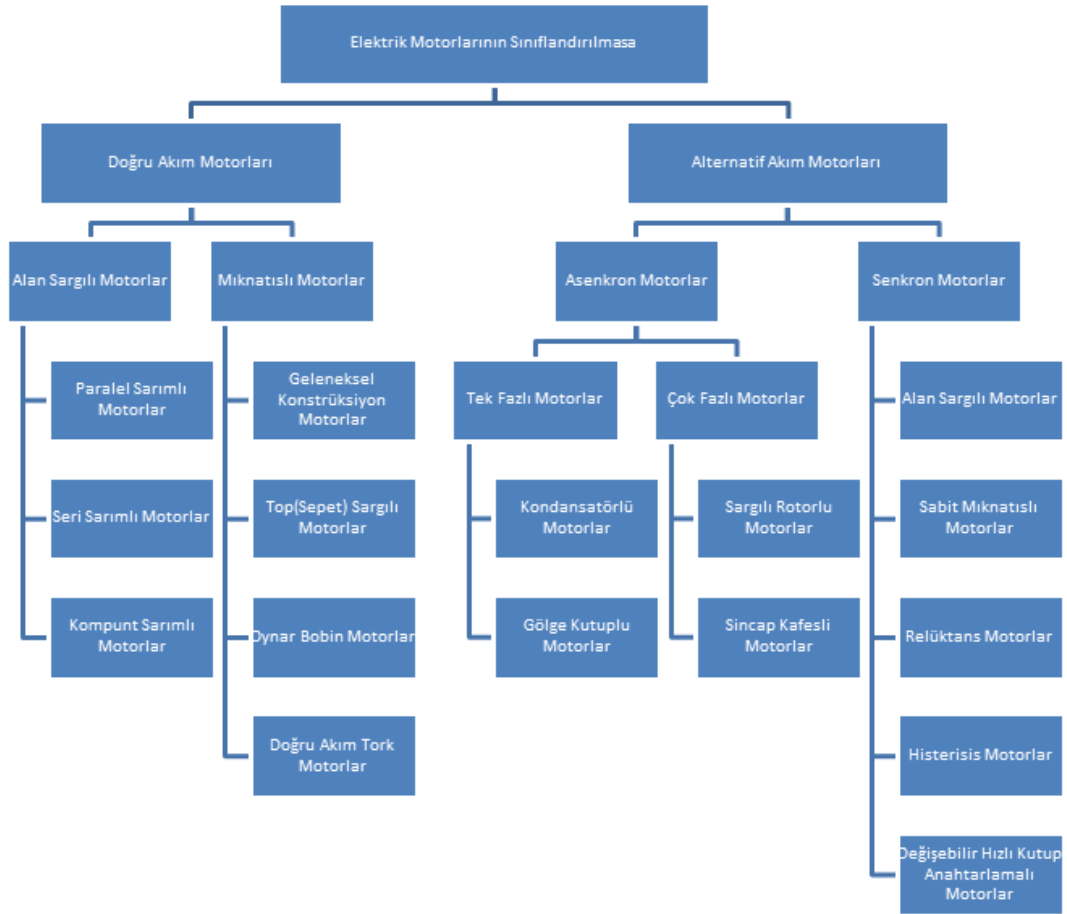
Bölüm 5’de oluşturulan motor prototipleri, tez düzeneği, tasarlanan ve kullanılan elektronik devreler hakkında bilgi verilmiştir. Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar ve elde edilen sonuçlar bu bölümde sunulmuştur.

Son olarak Bölüm 6’de ise yapılan çalışmalardan elde edilen çıktılar özet halinde sunularak, tez hakkında genel bilgiler ve değerlendirmeler yapılarak, algoritmanın geliştirilmesi hakkında son bilgilendirmeler ile tez sonlandırılmıştır.



1. GENEL BİLGİLER

Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak doğru akım motorları, asenkron ve senkron motorların kullanıldığı bilinmektedir. Uygulamalarda kullanılan elektrikli motorları çalışma prensipleri ve yapılarına göre sıklıkla kullanılan aşağıdaki sınıflara ayrılmıştır. Elektrik motorlarının sınıflandırılması hakkında genel bilgi Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1. Elektrik motorlarının sınıflandırılması

Geçmişte doğru akım (DC) motorları, endüvi ve alan sargıları akımlarının kolay kontrol edilebilmesi, böylece momentin ve manyetik akının birbirinden bağımsız olarak kontrol sağlanabilmesinden dolayı değişken hız gerektiren uygulamalarda çok geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Doğru akım motorları yapılarında

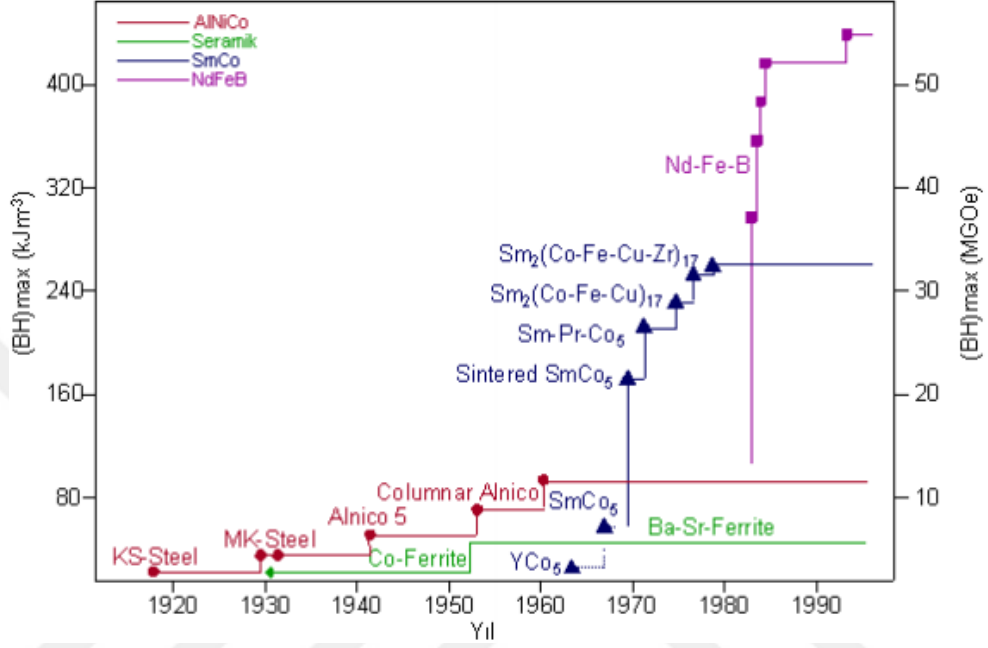
bulundurdıkları kollektör ve fırçalar yapılarından dolayı bazı olumsuz özelliklere sahiptirler. Bunlar; periyodik bakım gerektirmesi, yanıcı ve patlayıcı ortamlarda kullanılamaması, yüksek gerilim ve yüksek hız uygulamalarında fırça ve kollektör yüzünden kullanılamaması, fırça ve kollektörün motor boyutunu artırması olarak özetlenebilir.

Endüstride DC motorlarının bilinen bu olumsuz özelliklerini gidermek için asenkron motor kullanımları yaygınlaşmıştır. Asenkron motorların en büyük avantajları endüstri ortamında çok fazla bakım gerektirmeden kullanılabilir olmasıdır. Asenkron motorlarda rotor ile stator arasında kayma olmasından dolayı farklı hız ve moment değerlerinde çalışmalarında verim değerleri farklılık göstermekte olup, yüksek moment gerektiren uygulamalarda istenilen performansı gösterememesi en büyük dezavantajdır. Asenkron motorda gözlenen bu olumsuz özelliklerden dolayı, yüksek performans gerektiren robotik ve savunma sanayi uygulamaları için alternatif akım (AC) ile çalışan farklı çözümler geliştirilmiştir [1].

Senkron motorlar ise, asenkron motorun temel dezavantajları olan kayma, düşük güç faktörü, düşük verim, düşük güç yoğunluğu gibi nedenlerle kullanım alanı giderek genişlemektedir. Klasik senkron motorların, statorunda ve rotorunda elektrik kaynağına bağlanan sargılar bulduran motorlardır. Günümüzde ise sıklıkla kullanılan senkron motorlarda rotordaki uyarım sargısı sabit mıknatısla yer değiştirilerek, bu sargının uyarımı için elektrik kaynağına olan ihtiyaç ortadan kaldırılmıştır. Böylelikle rotorda daha önceden sargılar ile sağlanan akı kaynağı yapılan düzenleme ile manyetik alan sürekli mıknatıslarla sağlanmıştır.

Sürekli mıknatıslı motorların tarihsel gelişimine en büyük katkı mıknatıs alaşımlarının bulunması ile gerçekleşmiştir, Şekil 1.2'de mıknatıs malzemelerinin tarihsel gelişimi verilmiştir. 1930'lu yıllarda Al-Ni-Co alaşımlı sürekli mıknatısların bulunmasıyla, sürekli mıknatıslı senkron motorların üretilmesine ön ayak olmuştur. Ferrit mıknatısların 1950'li yıllarda bulunmasıyla senkron motorların üretimin ferrit mıknatıs kullanımına geçilmiştir [2]. 1960'lı yıllarda ticari amaçlı nadir toprak alaşımlı sürekli mıknatısları Sm-Co dan oluşturulmuştur. Bu alaşımın akı yoğunluğu, yüksek verim, düşük kayıp gibi avantajlarından dolayı sürekli mıknatıslı motor üretiminde kullanımı giderek yaygınlaşmıştır. Sürekli mıknatıslı motorların

avantajları sayesinde, tasarımlarına ağırlık verilmiş ve endüstride kullanım alanlarını arttırmıştır. Senkron motorların kullanımını artışı ve yarı iletken teknolojisinin gelişmesi sayesinde sürekli mıknatıslı motorların kontrolü üzerine yapılan çalışmaları da artmıştır.



Şekil 1.2. Sürekli mıknatıs malzemelerinin tarihsel gelişimi[3]

Yarı iletken teknolojisinin gelişmesiyle günümüzde senkron motorların kontrolünde farklı tipte kontrol algoritmaları geliştirilmiş ve bu algoritmaların uygulanabilir olması senkron motorların kullanım alanını arttıran en önemli faktörlerden biridir [4]. Günümüzde endüstriyel ortamda kullanılan motorlarının kontrolü için tasarlanmış sürücülerde, en yaygın kontrol yöntemi olan “Vektör Kontrol” yöntemi bulunmaktadır. 1968 yılında Teknik Üniversite Darmstadt’dan K.Hasse ve 1970’li yıllarda Siemens’den F. Blaschke AC motorlar için vektör kontrol yönteminin geliştirilmesine öncülük etmişlerdir. Dolaylı vektör kontrolü Hasse, doğrudan vektör kontrolünü ise Blaschke önermiştir [5, 6]. Braunschweig Teknik Üniversitesinden Werner Leonard, “Field Oriented Control (FOC)” tekniğini geliştirerek, AC sürücülerin DC sürücülere göre bir alternatif olmasının fırsatını sağlamıştır [7, 8]. Bu yöntem 1980’li yıllarda mikroişlemcilerin ticarileşmesi ile genel amaçlı AC sürücülerde kullanılmaya başlanmıştır [8]. FOC yöntemi mikroişlemciler ticarileşene kadar sensörler, amplifikatörler ve birçok elektronik bileşene ihtiyaç duyduğundan,

yüksek maliyet ve karmaşık yapısından dolayı o yıllarda AC sürücülere uygulanamamıştır [9].

Vektör kontrolün yönteminde, AC motoru DC motor kontrolüne benzetilmeye çalışılmıştır. Sebastian T., Slemon G. Ve Rahman M., sürekli mıknatıslı senkron motorun elektriksel eşdeğer devre modelleri üzerine çalışmalar yapmıştır [10]. Khurram A., sürekli mıknatıslı senkron motorun kapalı çevrim kontrolünde d-q modelini geliştirerek, konum ve hız kestirimi yapmıştır [11]. Vektör kontrol yöntemi ile anlık momentin kontrol edilebilirliği üzerine Ogasawara S., Akagi H. ve Nabae A. çalışmalar yapmışlar ve algoritmayı geliştirerek literatüre sunmuşlardır [12].

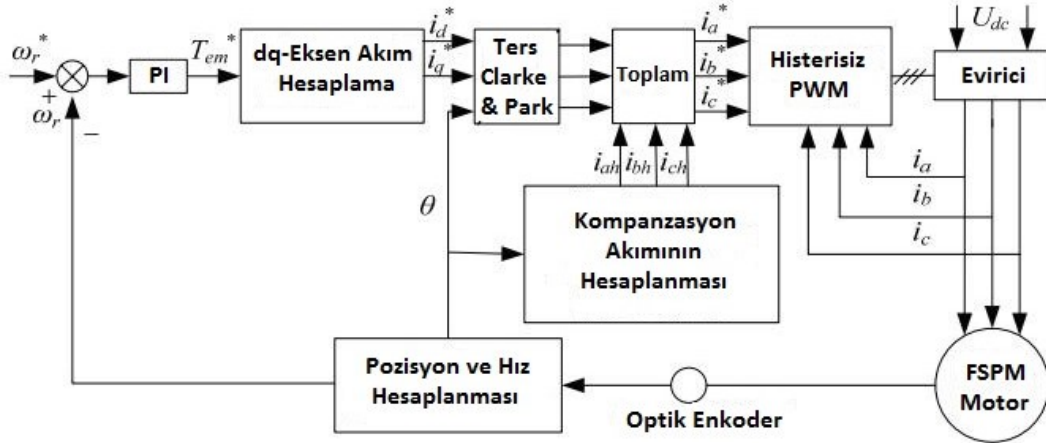
Michael Faraday'ın 1881 yılında ilk tasarımını yaptığı eksenel akılı motorlar mıknatıs teknolojisinin gelişmesiyle günümüzde bir çok özel uygulama için tercih edilebilir hale gelmiştir. Eksenel akılı nüveli senkron motorun hava aralığındaki relüktans değişiminden kaynaklı vuruuntu momenti oluşmaktadır. Vuruuntu momenti, stator olukları ile sürekli mıknatısların etkileşiminden doğan istenmeyen bir etkidir ve motorun moment kalitesini olumsuz etkilemektedir. Genellikle, senkron makinelerde vuruuntu momentini azaltmaya yönelik çalışmalar mevcut tekniklerle tasarımsal düzenlemeler ve motorun kontrolünde sağlayan algoritmanın düzenlenmesi olmak üzere iki ayrı kategori olarak ele alınmaktadır [13].

İlk olarak sürekli mıknatıslı motorda bulunan vuruuntu momenti, mıknatıslara veya stator oluklarına kayk (eğim) verilmesi, mıknatıs şekillerinin özelleştirilmesi, mıknatıs kutuplarının optimizasyonu, kesirli sargıların kullanılması, yardımcı olukların veya dişlerin kullanılması gibi tasarımsal yapının değiştirilmesiyle giderilebilir [14-21]. Bu yöntemin sonucunda vuruuntu momenti azaltılarak momentteki dalgalanma düşürülmesine rağmen tekniğin uygulanmasının pahalı olması ve motorun güç yoğunluğunda kayıplara neden olduğu bilinmektedir.

İkinci olarak sürekli mıknatıslı motorun kontrol stratejilerine dayanmaktadır. Vuruuntu momentini kontrol akımının formu açısından analizi yapılmalıdır. Böyle bir yaklaşımla, vuruuntu momenti Fourier serisi veya tork gözlemcileri kullanılarak elde edilen özel akım dalgaları eklenerek momentte oluşan dalgalanmanın telafi edilebildiği belirtilmiştir [22, 23].

Bir diğerk yaklaşımda evirici tarafından uygulanan stator akımını ayarlanması ile vurutu momentinin azaltılmasıdır. Akım ayarlanmasındaki kasıt, vurutu momentinin azaltılması için tahrik momentini üreten EMF harmoniklerinin kompanze edilmesi amacıyla motora giden uyardım akımlarına harmonik sinyallerinin eklenmesidir [24].

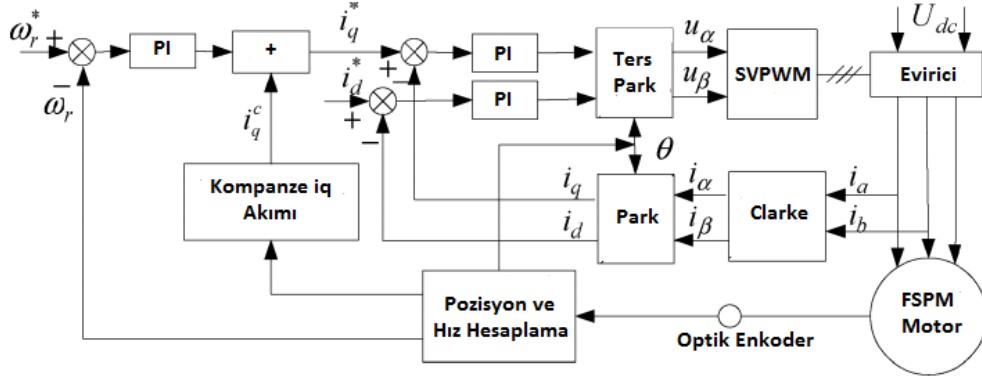
Vurutu momenti tespit edilerek Fourier serisi analizi ile vurutuyu momentini oluşturan frekanslar ve genlikleri tespit edilmektedir. Literatür incelemesinde bu yöntem hakkında farklı yaklaşımlar ile ilgili birçok yayın gözlenmiştir. Hongyun J., Ming C., Wei H., Zhengzhuany Y. Ve Yunian Z. vurutu momentinin Fourier analizi ile tespit edilerek ve harmonik ekleme ile momentte oluşan dalgalanmayı azaltmaya yönelik çalışmalar yapmışlardır [13]. Bu yöntem ile hesaplanan moment harmonikleri kullanılarak vurutu momentini azaltmak amacıyla motor fazlarına eklenecek harmonik akımların hesaplanması yapılmaktadır. Hesaplanan harmonik akımlar Şekil 1.3’de gösterildiği gibi kontrolör döngüsünde hesaplanan 3-faz stator akımlarına eklenerek motora gönderilecek olan gerilim hesaplanması yapılmaktadır.



Şekil 1.3. Moment kalitesinin artırılması için 3-faz stator akımına harmonik akım ekleme blok şeması [13]

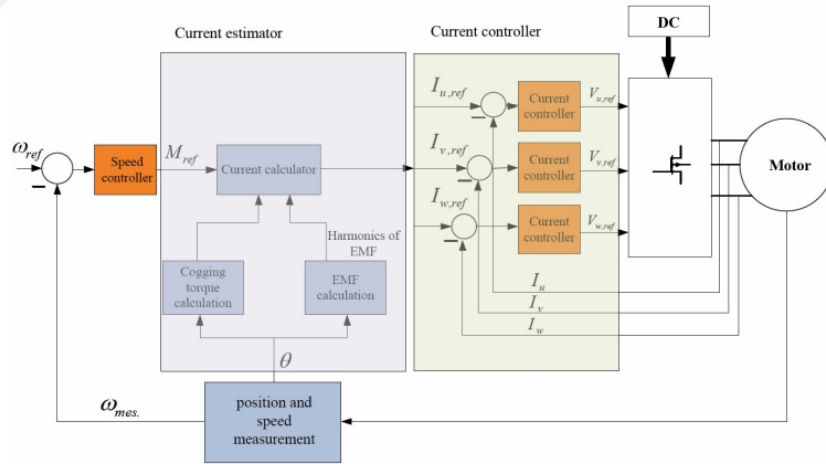
Hongyun J., Ming C., Wei H., Wenxiang Z. ve Wenlong L. momentteki dalgalanmayı azaltmak amacıyla harmonik akım ekleme metodunu uygulamışlardır [25]. Bu yöntem momentteki dalgalanma tespit edilerek Fourier analizi yapılmaktadır. Fourier analizinde elde edilen baskın bileşenlerin momentte oluşturduğu etkiyi azaltmak harmonik akım hesaplamaları yapılarak kontrol

döngüsünde hesaplanan referans q-eksen akımına harmonik akım eklemesi yapılmaktadır. Bahsedilen yöntemin blok şeması Şekil 1.4’de verilmiştir.



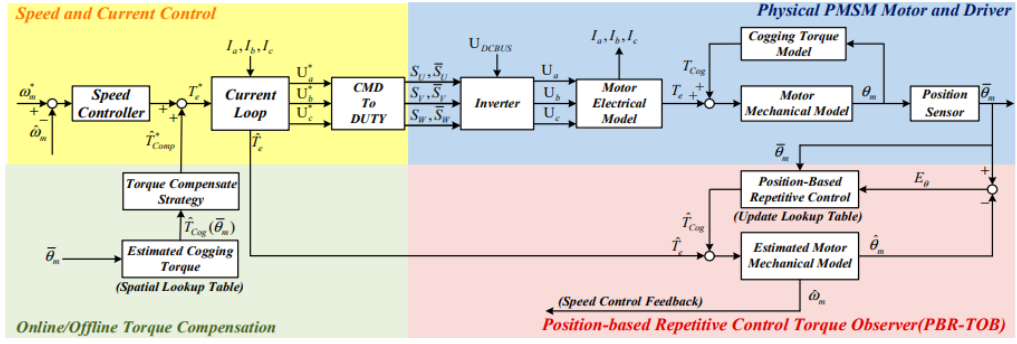
Şekil 1.4. Moment kalitesinin artırılması için q-eksen akımına harmonik akım ekleme blok şeması [25]

Ayrıca, Geun-Ho L., Sung-II K., Jung-Pyo H. ve Ji-Hyung B. q-eksen akımına harmonik akım ekleyerek momentteki dalgalanmayı azaltmaya yönelik bir çalışma yapmışlardır [24]. Amir E.’de harmonik akım ekleyerek momentteki dalgalanmayı azaltmaya yönelik Şekil 1.5’de blok şeması verilen çalışmayı gerçekleştirmiştir [26].



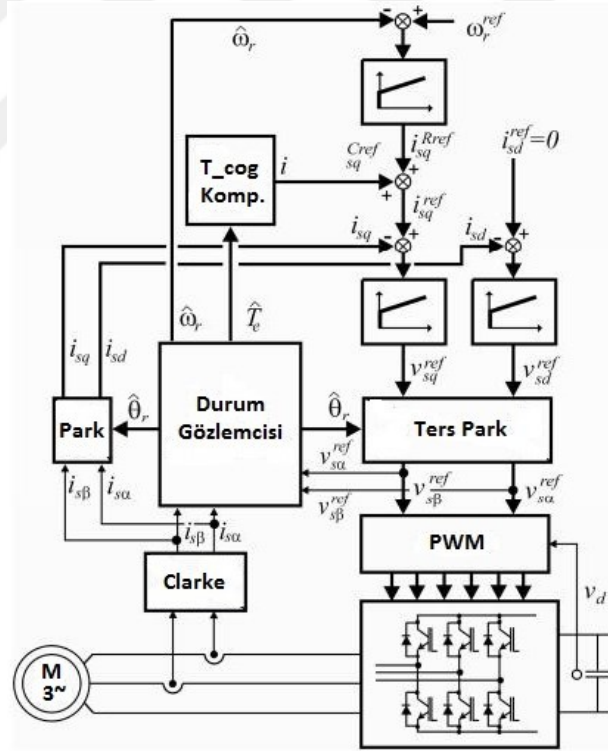
Şekil 1.5. Harmonik akım ekleme ile moment kalitesinin artırılması [26]

Momentteki dalgalanmayı azaltmak için kullanılan bir diğer yaygın metot ise tork gözlemcileridir. Vuruntu momentini azaltmaya yönelik Chung-Ju W., Mi-Ching T. ve Lon-Jay C. tork gözlemcileri ile ilgili yaptığı çalışmanın blok şeması Şekil 1.6’da verilmiştir [27].



Şekil 1.6. Tork gözlemleyicisi ile vuruğu momentinin azaltılmasının blok şeması [27]

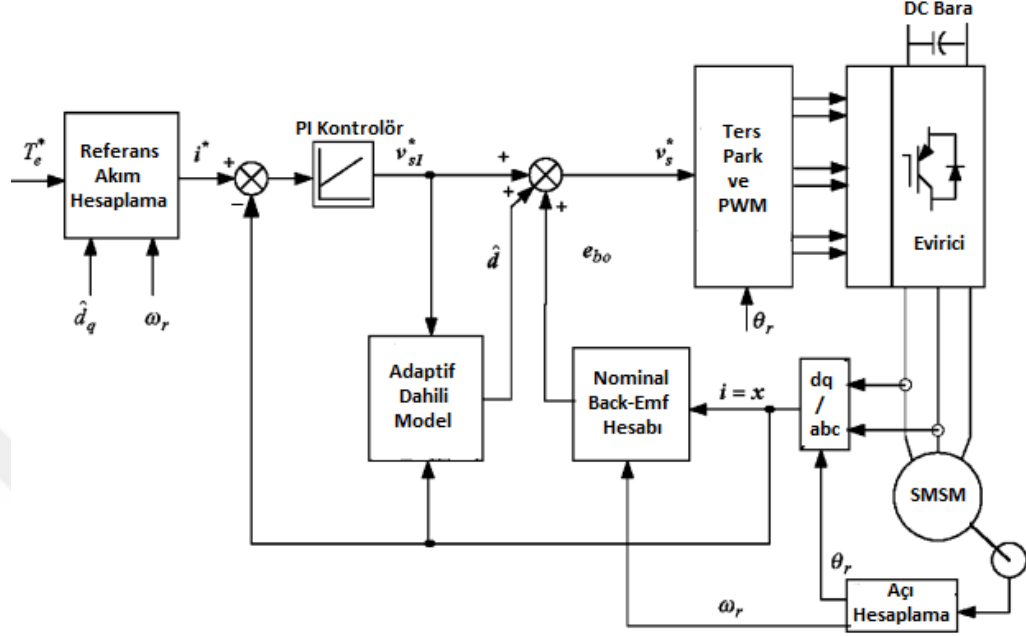
Vuruğu momentini azaltmaya yönelik gözlemci kullanarak başka bir çalışmayı da Jaroslaw G., Marcin M., Zbigniew K., Krzysztof L., Patryk S. ve Abdellah K. Yapmışlardır [28]. Bu çalışmada da gözlemci aracılığı ile vuruğu momentini tespit edilerek q-eksen akımına ek bir bileşen eklenerek momentte oluşan dalgalanmanın azaltılması üzerine çalışma yapmıştır.



Şekil 1.7. Gözlemci ile vuruğu momentinin azaltılmasının blok şeması [28]

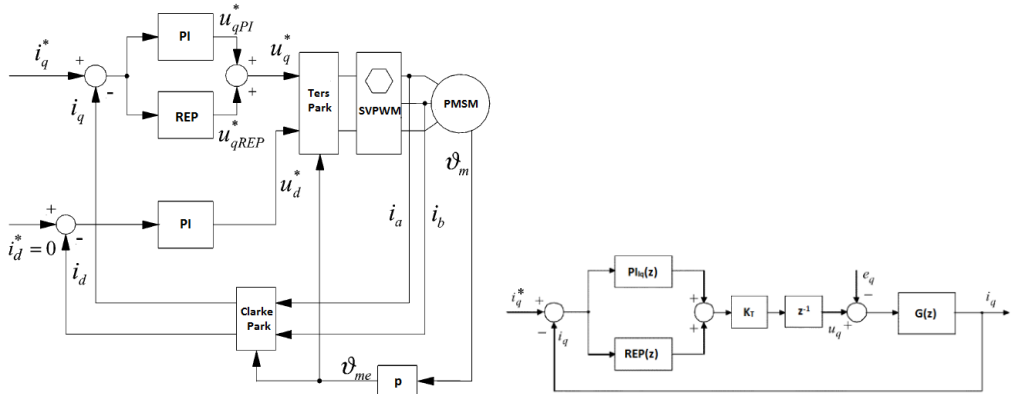
Ölü zaman akım kontrolü, yüksek bant genişlikli akım kontrol tekniği ve tekrarlanabilir akım kontrol tekniği gibi modifiye edilmiş akım kullanılan diğer

yapmışlardır [31]. Momentte oluşacak dalgalanmalar tespit edilerek, motora gönderilen gerilim sinyalleri duruma göre ayarlanmaktadır.



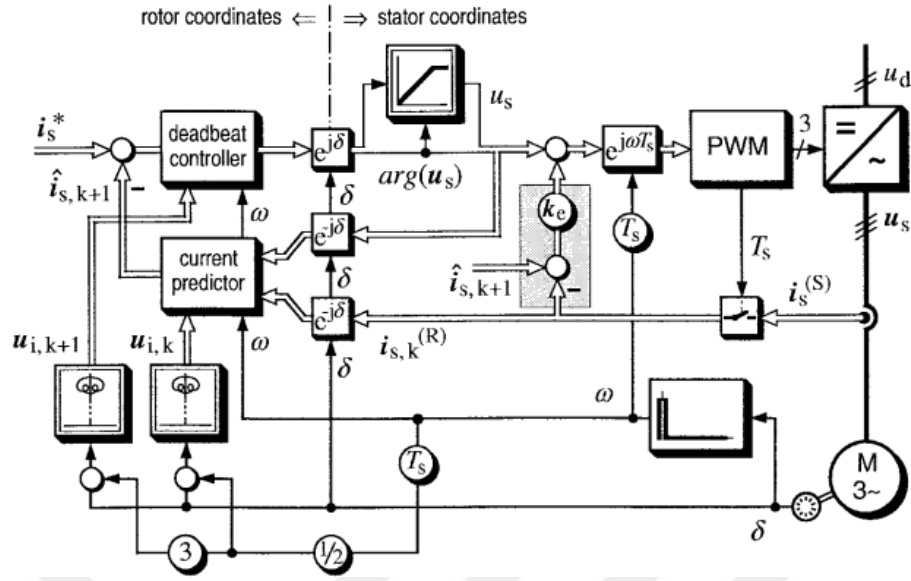
Şekil 1.10. Uyarlanabilir akım kontrolü yöntemi ile vuru momentinin telafisinin blok diyagramı [31]

Paolo M., Luca T. ve Mauro Z.'de moment dalgalanmasını azaltmaya yönelik tekrarlanabilir tork kontrolcüsü üzerine çalışmalar yapmışlardır [29]. Uyguladıkları metot için genel blok şeması Şekil 1.11'de verilmiştir.



Şekil 1.11. Tekrarlanabilir akım kontrolörü ile moment dalgalanmasının azaltılması [29]

Yüksek bant genişlikli akım kontrolcüsü ile Lothar S. ve Joachim H.'nin yapmış olduğu yayında ise moment dalgalanmasının azaltılacağı görülmüştür [30].

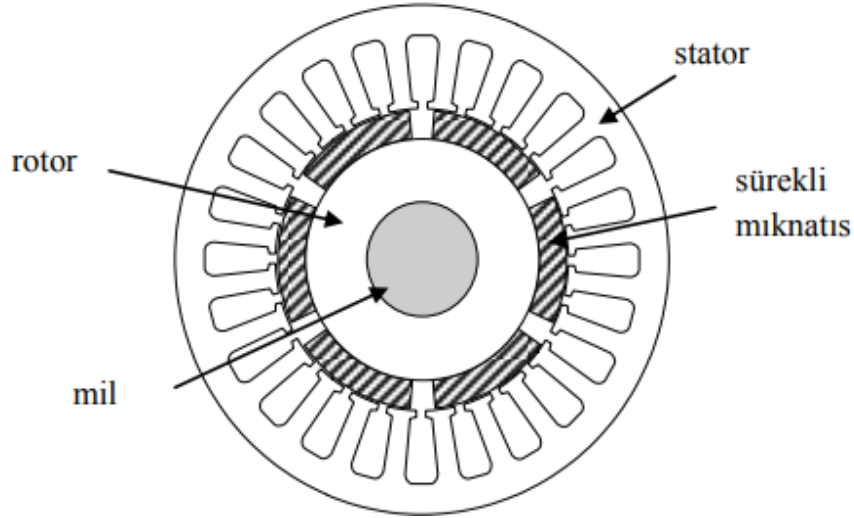


Şekil 1.12. Yüksek bant genişlikli akım kontrolörü ile moment dalgalanmasının azaltılması [30]

Bu tez kapsamında ise, vurutu momentinden dolayı sistem momentinde oluşan dalgalanmayı azaltmak için, incelenen literatürde Hongyun J., Ming C., Wei H., Zhengzhan Y., Yunian Z., Geun-Ho L., Sung-II K., Jung-Pyo H., Ji-Hyung B. ve diğerlerinin önerdiği harmonik akım ekleme metodu referans olarak, tez konusu olan çift rotorlu nüveli eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron motorun düşük hızlarda vurutu momentinin yüksek hızlarda ise moment dalgalanmasının azaltılması hedeflenerek, moment kalitesinin artırılmasına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında iki farklı eksenel akılı SM motor incelenmiş ve geliştirilen algoritma bu iki motorda doğrulanmıştır.

2. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTOR VE MODELLENMESİ

Senkron motorlarda, geleneksel AC motorlarda olduğu gibi stator ve rotor sargıları fırça ve kollektör yardımı ile beslenmemektedir. Senkron motorda, stator sargıları evirici veya ayarlı gerilim ve frekans kaynağı ile beslenirken rotor ise harici DC bir kaynak ile beslenmelidir. Senkron motorun klasik yapısında rotorda bulunan doğru akım uyarım sargıları, sürekli mıknatıslarla yer değiştirilerek sürekli mıknatıslı senkron motor elde edilir. Uyarım akısı rotorda bulunan mıknatıslar tarafından oluşturulan bu motorlara Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor (SMSM) olarak adlandırılmaktadır [34]. Şekil 2.1’de sürekli mıknatıslı senkron motorun genel iç yapısını gösterilmiştir.

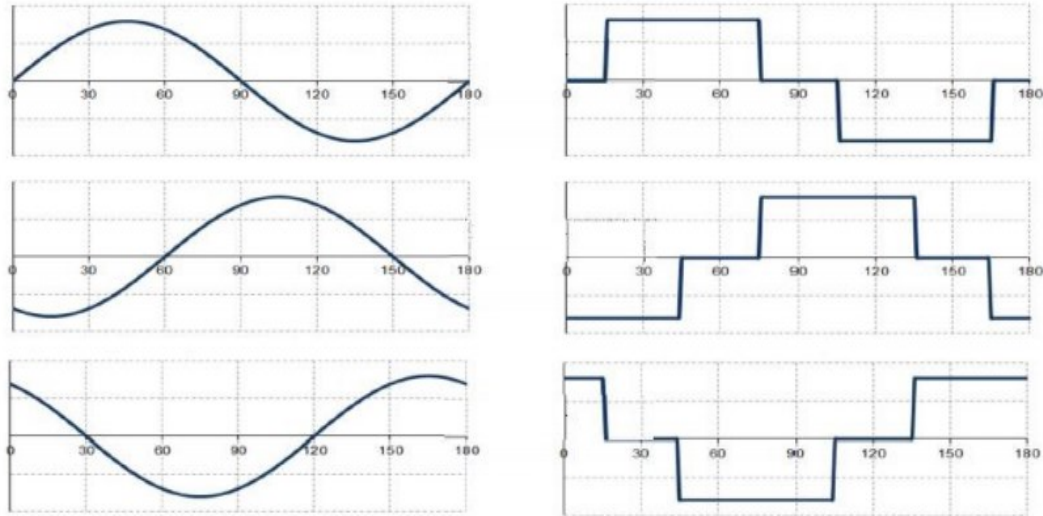


Şekil 2.1. Temel bir sürekli mıknatıslı senkron motor yapısı [35]

SMSM’un, rotorunda sargı bulunan senkron motorlara göre dinamik performansının daha yüksek olduğu bilinmektedir. SMSM’ların statorunda AC motorlarda olduğu gibi üç faz sargı bulunurken, rotorda sargı yerine kullanılan sürekli mıknatıslar sayesinde fırça ve kollektörden kaynaklanan problemler ortadan kaldırılmıştır. Rotorda kullanılan sürekli mıknatıslar sayesinde, rotorda meydana gelen bakır kayıplarını azaltarak aynı güçteki diğer motorlara göre verimlerinin ve moment yoğunluklarının daha yüksek olması sağlanmıştır. SMSM’ların tasarım yapıları

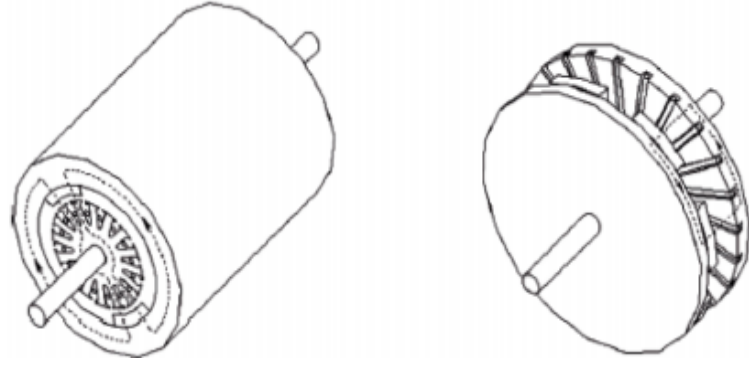
(kollektör ve fırça yok, rotorda sargı yerine mıknatıs kullanılması, vb.) sayesinde aynı güçteki diğer motorlara göre boyutları daha küçüktür. Tüm bu avantajlarının rağmen bu motorların kontrolünü sağlamak için algılayıcılara, sensörlere, eviricilere vb. ek yapılara sahip bir sürücü sistemine ihtiyaç duyulmaktadır [36]. Bahsedilen kontroldeki tüm bu zorluklara rağmen yüksek güç yoğunluğu, moment kalitesi ve aynı güçteki motorlara göre yüksek verimlerinden dolayı endüstride SMSM'lara olan talep artmıştır [37].

Elektrik motorlarının literatürde farklı sınıflandırma biçimleri vardır. Bazı kaynaklar motorların sınıflandırmasını yapısal özelliklerine göre yapılandırırken, bazı kaynaklar ise stator sargılarına uygulanan gerilim sinyalinin şekline göre sınıflandırmaktadır. Fırçasız DC motorların (BLDC) çalıştırılması için trapezoidal dalga şekline ihtiyaç duyulurken, sinusoidal SMSM'ların çalışması için ise sinüs dalga şekline ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 2.2'de bahsedilen motor besleme dalga şekilleri verilmiştir.



Şekil 2.2. Sinusoidal ve trapezoidal besleme dalga şekilleri[38]

Sürekli mıknatıslı motorlar yapısal olarak ele alındığında radyal akılı ve eksenel akılı olmak üzere iki ayrı grupta incelenmektedir. Radyal akılı makinelerde manyetik akı yarıçap yönünde geçirilirken, eksenel akılı makinelerde ise yarıçap yönüne dik bulunan eksen boyunca akı geçişi sağlanmaktadır [39].



Şekil 2.3. (a) Radyal akılı motor, (b) Eksenel akılı motor [40]

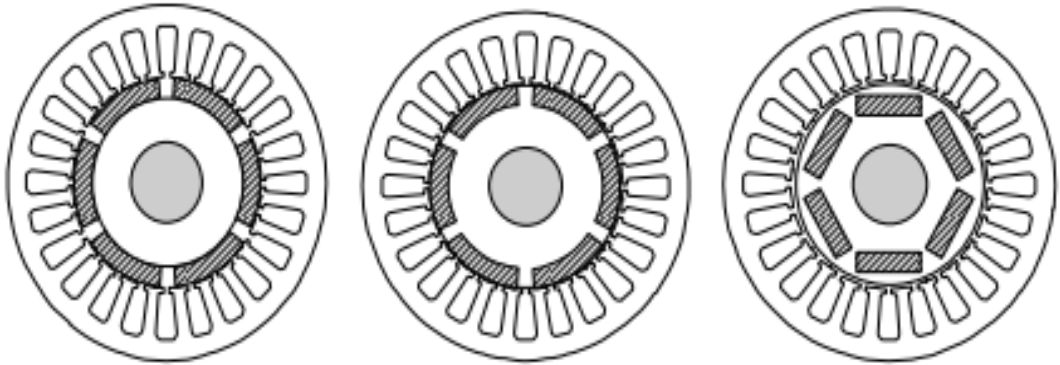


Şekil 2.4. (a) Radyal akılı motor akı yolu, (b) Eksenel akılı motor akı yolu [41]

2.1. Radyal Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor

Günümüzde sürekli senkron motorların en çok tercih edilen tiplerinden biri Radyal Akılı Sürekli Mıknatıslı (RASM) motorlardır. Bu tip motorlar genellikle mıknatısların rotora yerleştirilmesine göre sınıflandırılmakta ve isimlendirilmektedir.

Şekil 2.5’de, mıknatısların rotora yerleştirilme biçimleri görsel olarak açıklanmıştır.

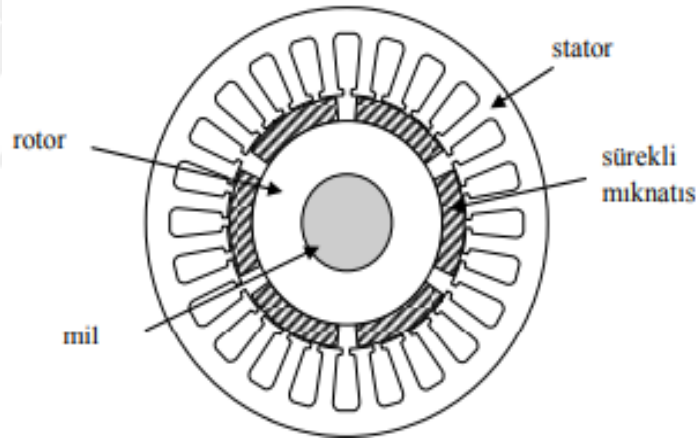


Şekil 2.5. Mıknatısların rotora yerleştiriliş şekilleri (a)Yüzey mıknatıslı (b)Yüzeye gömülü mıknatıslı (c)Dahili(gömülü) mıknatıslı motorlar [42]

Dahili tip mıknatıslı rotora sahip motorların, mekanik dayanımının yüksek olması, vuru moment bileşenin düşük olması, yüksek hızlara çıkılabilmesi ve vb. özelliklerden dolayı son zamanlarda tercih sebebi olmaktadır. Tüm bu avantajlarının yanında ise rotor üretimin karmaşık ve maliyetli olması, kontrol sistemlerinde daha kompleks yapıların bulunması dezavantajdır. Kontrol alanındaki ve güç elektroniği alanındaki gelişmeler sayesinde bu tip motorların özel uygulamalarda ve endüstriyel uygulamalarda kullanımı gün geçtikçe artmaktadır.

2.1.1. Yüzeyden mıknatıslı RASM motorlar

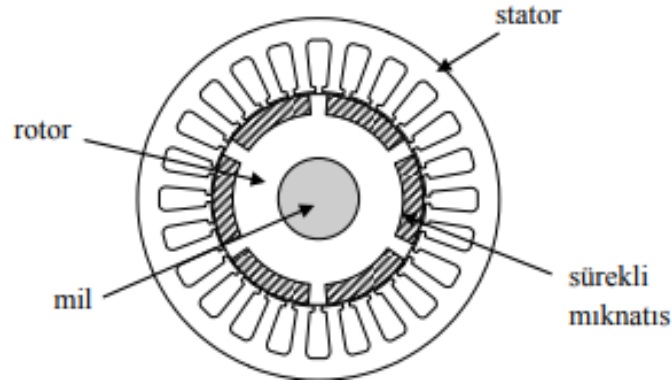
Günümüzde yüzey mıknatıslı senkron motorlar en çok tercih edilen senkron motorlardandır. Şekil 2.6'de gösterildiği gibi bu tip motorlarda mıknatıslar rotora yüzeyden yapıştırılmaktadır. q-eksen ve d-eksen endüktansları birbirine eşit olduğundan dolayı bu tip motorlarda relüktans momenti oluşmamaktadır.



Şekil 2.6. Yüzeyden mıknatıslı RASM motor [35]

2.1.2. Yüzeyden gömülü mıknatıslı RASM motorlar

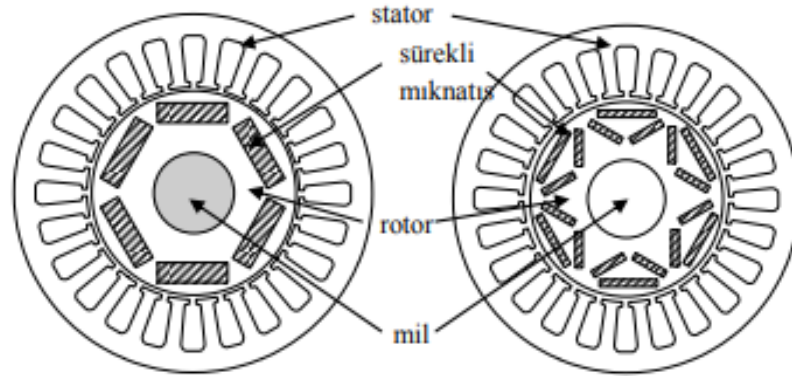
Bu tip motorlarda Şekil 2.7'de gösterildiği gibi mıknatıslar rotor yüzeyindeki oluklara gömülü şekildedir. Bu motorda, yüzeyden mıknatıslı senkron motorlara göre mıknatısların hava ile teması daha az olduğundan kayıplar biraz daha azalmaktadır. Ayrıca bu motorda, q-eksen ve d-eksen endüktansları arasındaki küçük farktan dolayı daha yüksek hızlarda çalışmaya imkan sağlamaktadır.



Şekil 2.7. Yüzeğe gömülü mıknatıslı RASM motor [35]

2.1.3. Dahili mıknatıslı RASM motorlar

Bu tip motorlarda Şekil 2.8’de gösterildiği gibi mıknatıslar rotor içerisine yerleştirilmesiyle elde edilir. Mekanik sağlamlığı diğer motorlara göre yüksektir. Mıknatısların rotorda gömülü olması sayesinde bu tip motorlar genellikle yüksek hızlı uygulamalarında tercih edilmektedir [43].

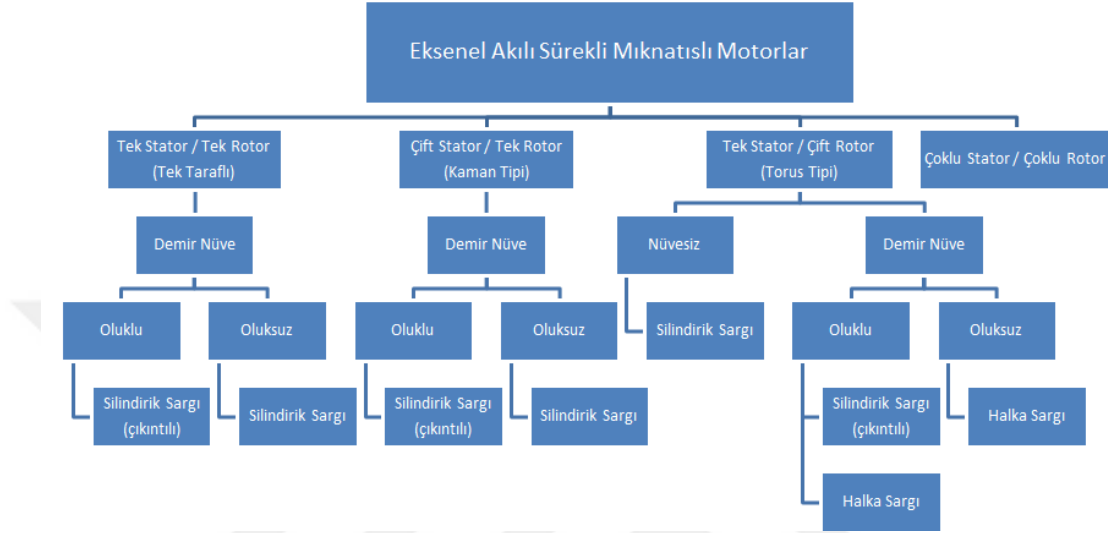


Şekil 2.8. Dahili mıknatıslı RASM motor [35]

2.2. Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor

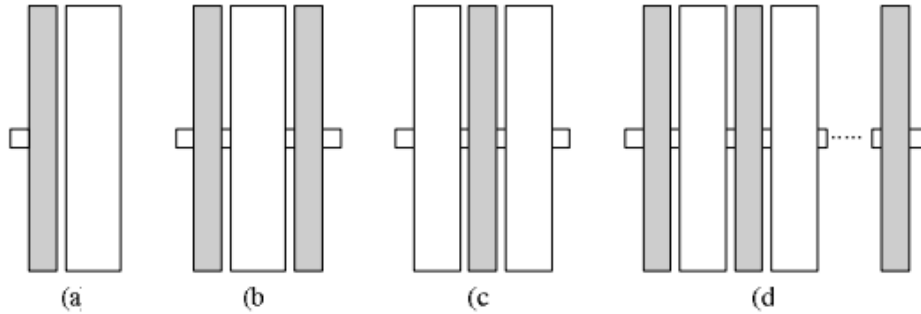
Sürekli mıknatıslı eksenel akılı motorlar radyal akılı senkron motorlara göre daha yüksek verim, yüksek moment yoğunluğu, düşük ses ve titreşim gibi birçok avantaj sağlamaktadır. Bu tip disk motorların en önemli özelliği geometrik yapısı ve radyal akılı motora göre enerji dönüşümünde kullanılan hava aralığının fazla olmasıdır. Radyal uzaklık değiştirilmeden, eksenel akılı motorda kutup sayısının artırılabilir. Böylelikle eksenel uzaklık azalır, güç yoğunluğu artar ve düşük hızlarda eksenel akılı motorlar yüksek moment sağlanabilir. Bu tip motorlarda mıknatıslar monte edildiği

rotor diskler fanlar gibi hareket ederler ve stator sargılarının daha iyi soğumasını sağlarlar. Bu sayede aksel motorun, yüksek elektriksel yüklenme değerleri ile tasarlanmasına imkan kılar. Şekil 2.9'da EASM sürekli mıknatıslı senkron motorlarının sınıflandırılması verilmiştir.

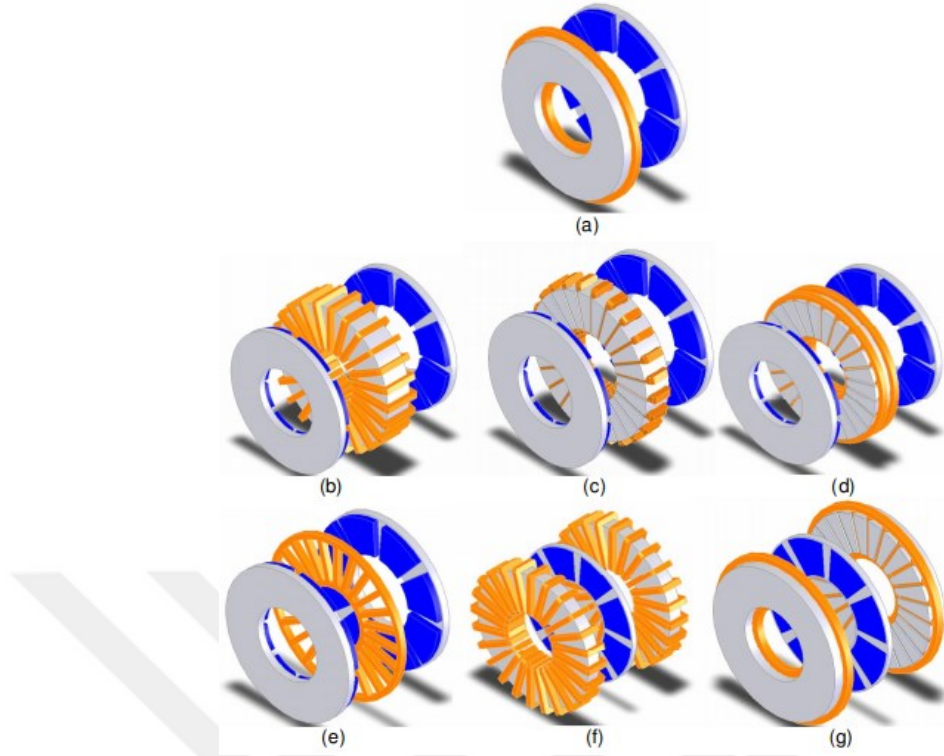


Şekil 2.9. Eksenel akılı sürekli mıknatıslı (EASM) motorun sınıflandırılması

Eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron motorlar, sargılarının bulunduğu bir stator ve mıknatısların konumlandırıldığı rotor diskinden oluşmaktadır. Şekil 2.10'da eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron motor tipleri verilmiştir. Tek stator tek rotorlu, tek stator iki rotorlu, iki stator tek rotorlu, çok stator çok rotorlu olmak üzere dört farklı şekilde sürekli mıknatıslı senkron motor tasarımı ve üretimi yapılabilmektedir. Şekil 2.11'de sıklıkla kullanılan sürekli mıknatıslı eksenel akılı motor yapıları verilmiştir.



Şekil 2.10. Eksenel akılı motor tipleri: (a) Tek stator tek rotorlu, (b) tek stator iki rotorlu, (c) İki stator tek rotorlu, (d) çok stator çok rotorlu [44]



Şekil 2.11. Sürekli mıknatıslı aksenal akılı senkron motorun en sık kullanılan yapıları [44]

EASM senkron motorların bir türü olan Şekil 2.12’de gösterilen tek stator tek rotorlu motor yapısı çift taraflı makinelere göre daha basit bir yapıdadır. Bu tip motorların en büyük dezavantajı ise rotor ve stator arasında dengesiz kuvvet oluşması ve moment, güç yoğunluğunun düşük olmasıdır. Bilinen dezavantajlarından dolayı tasarlanan diğer aksenal akılı makinelere göre daha dayanıklı ve karmaşık rulman yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır [45].



Şekil 2.12. Tek statorlu tek rotorlu yapı [44]

Şekil 2.13’de gösterilen çift taraflı EASM motor yapıları, tek taraflı motor yapılarına göre daha fazla moment ve güç yoğunluğu sağlamaktadırlar [42]. Bu tip motorlarda, tek taraflı motorlara göre stator ve rotor arasındaki çekme kuvveti daha dengelidir. Literatürde AFIR olarak adlandırılan makine iki stator tek rotordan oluşmaktadır. Bu tip motorda dışta iki adet stator arasında çift taraflı tek bir rotor ile oluşturulmaktadır. Mıknatıslar, rotora gömülü olarak veya yüzeyden montajlı olarak tasarlanabilir.



Şekil 2.13. İki stator tek rotorlu yapı [44]

Çift rotorlu aksenal akılı motorlarda Şekil 2.14’de gösterildiği gibi dışta iki rotor arasında çift taraflı bir stator kullanılarak oluşturulmaktadır. Bu tip motorlar literatürde TORUS olarak adlandırılmaktadır. Mıknatıslar, rotora gömülü olarak veya yüzeyden montajlı olarak tasarlanabilir. Bu tip motorlar tasarlanırken hava aralığı 1mm’nin altında olacak şekilde yapılabilir olduğundan, hava aralığındaki manyetik akı diğer tipteki EASM senkron motorlara göre daha fazladır.



Şekil 2.14. Tek stator iki rotorlu yapı [44]

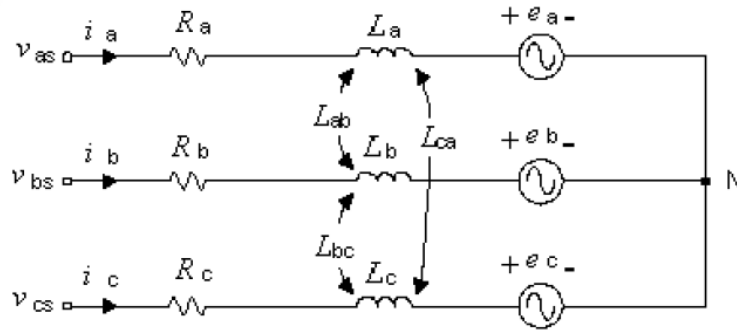
Çok stator çok rotorlu motorlarda, yüksek moment ve güç değerlerini elde edebilmek için stator ve rotor sayıları arttırılabilmektedir. Bu yapısal düzenleme ile motor yapısı karmaşıklaştığından dolayı tasarımsal ve mekaniksel problemlere ortaya çıkabilmektedir. Motor tasarım aşamasında iken problem oluşmaması için rotorda bulunan mıknatısların çekim kuvvetleri düşünülerek çalışma yapılmalıdır [39].

2.3. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Modellenmesi

SMSM'un matematiksel modeli stator referans düzlemi ve rotor referans düzlemi olmak üzere iki düzlemde ifade edilir. SMSM'un matematiksel modeli oluşturulabilmesi için her iki referans düzleminin ayrı ayrı incelenerek modellenmesi yapılmalıdır.

2.3.1. Stator referans düzleminde SMSM'un modellenmesi

Şekil 2.15'de gösterildiği gibi SMSM'un üç fazlı ve yıldız bağlı olduğu kabul edilerek stator referans düzlemindeki matematiksel modeli çıkarılmıştır [46].



Şekil 2.15. Üç fazlı yıldız bağlı SMSM [46]

Motorun faz sargılarına V_{as} , V_{bs} ve V_{cs} gerilimleri uygulanmakta faz sargılarından i_a , i_b ve i_c akımları geçmektedir. R_a, R_b, R_c , satator faz sargısı dirençlerini, L_a, L_b, L_c , stator faz sargıları endüktanslarını, $L_{ab}, L_{ba}, L_{bc}, L_{cb}, L_{ac}, L_{ca}$, stator fazları arasındaki ortak endüktanslar ve e_a, e_b, e_c stator sargılarında meydana gelen Zıt-EMK'yı göstermektedir. Şekil 2.15'den stator gerilimleri Denklem (2.1)'deki gibi elde edilmektedir.

$$V_{as} = i_a R_a + L_a \frac{d i_a}{dt} + L_{ab} \frac{d i_b}{dt} + L_{ac} \frac{d i_c}{dt} + e_a$$

$$V_{bs} = i_b R_b + L_{ba} \frac{d i_a}{dt} + L_b \frac{d i_b}{dt} + L_{bc} \frac{d i_c}{dt} + e_b$$

$$V_{cs} = i_c R_c + L_{ca} \frac{d i_a}{dt} + L_{cb} \frac{d i_b}{dt} + L_c \frac{d i_c}{dt} + e_c \quad (2.1)$$

Denklem (2.2)'de Zıt-EMK'nın, rotor mıknatısının manyetik akısı ile rotorun mekaniksel hızına bağlı olduğu verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = -\omega_r \psi_m \begin{bmatrix} \sin \theta_r \\ \sin(\theta_r - 2\pi/3) \\ \sin(\theta_r - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Motor yıldız bağlı, sargılar kendi aralarında birbirine eşit ve dengeli olarak düşünülürse, stator faz sargı dirençleri $R_a=R_b=R_c=R$, stator faz sargılarının endüktansları $L_a=L_b=L_c=L$ ve stator fazları arasındaki ortak endüktanslar $L_{ab}=L_{ac}=L_{bc}=L_{ba}=L_{ca}=L_{cb}=M$ yazılarak Denklem (2.1) ve Denklem (2.2) düzenlenerek Denklem (2.3) elde edilir.

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L - M & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & L - M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \dots$$

$$\dots - \omega_r \psi_m \begin{bmatrix} \sin \theta_r \\ \sin(\theta_r - 2\pi/3) \\ \sin(\theta_r - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Denklem (2.4)'de gösterildiği gibi, motorun güç değeri Zıt-EMK değeri kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$P_a = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (2.4)$$

Elektromanyetik moment motordan alınan gücün açısal hıza oranı ile bulunarak Denklem (2.5)'de hesaplaması verilmiştir.

$$T_e = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c / \omega_m = P_a / \omega_m \quad (2.5)$$

Mekaniksel açı ile elektriksel açı arasındaki bağlantı Denklem (2.6)'da verilmiştir. Motor dinamikleri cinsinden elektromanyetik moment ise Denklem (2.7)'de

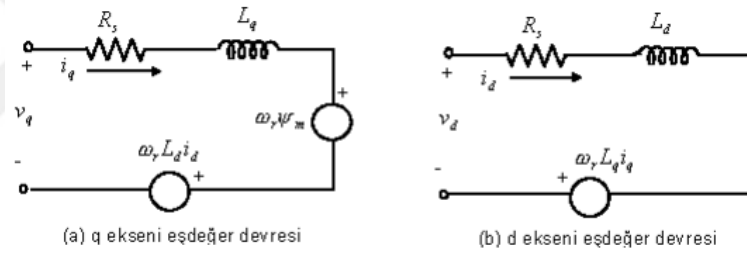
verilmiştir.

$$w_m = W_r/p \quad (2.6)$$

$$T_e = J_m/p \frac{dw_r}{dt} + B_m/p w_r + T_y \quad (2.7)$$

2.3.2. Rotor referans düzleminde SMSM'un modellenmesi

Üç fazlı SMSM'ların rotorlarında bulunan mıknatıslardan sayesinde kullanılan özel dönüşüm metotları (Clarke ve Park Dönüşümleri) yardımıyla Şekil 2.16'da gösterildiği gibi doğru akım motorlarına benzetimi yapılabilmektedir. Bu dönüşüm ile motorun dinamik denklemlerinde basitlik sağlandığı gibi denklemlerin çözümü için harcanan zamanın azalmasına olanak sağlamaktadır. SMSM'un modellenmesinde bahsedilen avantajlardan dolayı genellikle rotor referans düzlemi tercih edilir.



Şekil 2.16. SMSM'un rotor referans düzleminde eşdeğer devresi [46]

Şekil 2.16'de gösterilen rotor referans düzlemine göre motorun gerilim eşitlikleri matris formunda yazılarak Denklem (2.8)'de verilmiştir. d-q eksen manyetik akıları hesaplanarak matris formunda Denklem (2.9)'da verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} -\psi_q \\ \psi_d \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Elektromanyetik moment ise Denklem (2.10)'da verilmiştir.

$$T_e = \frac{3}{2} P [\psi_m i_q + (L_d - L_q) i_q i_d] \quad (2.10)$$

3. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORLARIN KONTROLÜ

Bu bölümde motor kontrol sisteminde bulunan ve motoru kontrol etmek için üretilen sinyalleri gerilime dönüştürerek motora aktaran eviriciler hakkında genel bilgi verilerek, senkron motor kontrolünde sıkça kullanılan kontrol yöntemleri hakkında kısa bir bilgi aktarılacaktır.

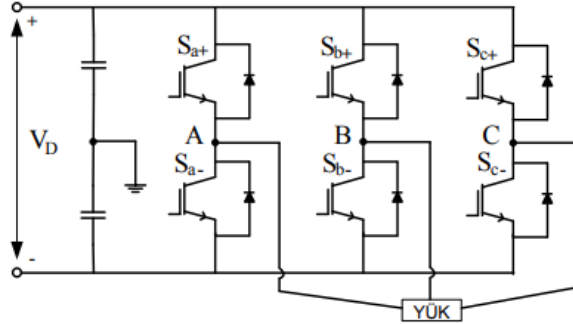
Motor kontrolünde, kontrol algoritması kadar sürücü sistemlerinin de ayrı bir önemi vardır. Sürücü sistemleri kontrol kartları, eviriciler, konum sensörleri, akım ölçme devreleri vb. yapılardan oluşmaktadır. Kontrol kartlarında bulunan işlemciler sayesinde sensörlerden alınan elektriksel veriler kontrol algoritmalarında değerlendirilerek motoru kontrol edecek sinyaller oluşturulur. Bu sinyaller eviriciler aracılığı ile motor beslemelerine aktarımı sağlanır.

Gelişen teknoloji ile mikroişlemci, DSP, FPGA vb. yapılar kullanılarak kontrol kartlarının geliştirilmesi, güç elektroniği ve yarı iletken teknolojisinin gelişmesiyle motor kontrolünde farklı kontrol yöntemlerin gelişmesine ve literatürde olan kontrol yöntemlerinin ise geliştirilmesine ön ayak olmuştur. Sürekli mıknatıslı senkron motorlarda günümüzde akademik çalışmalarda ve endüstride en yaygın kullanılan motor kontrol yöntemlerine örnek olarak klasik kontrol teorisini temel alan PID kontrol, altı adım anahtarlama kontrol, bulanık mantık ile kontrol, doğrudan kontrol ve vektör kontrol verilebilir.

3.1. Eviriciler

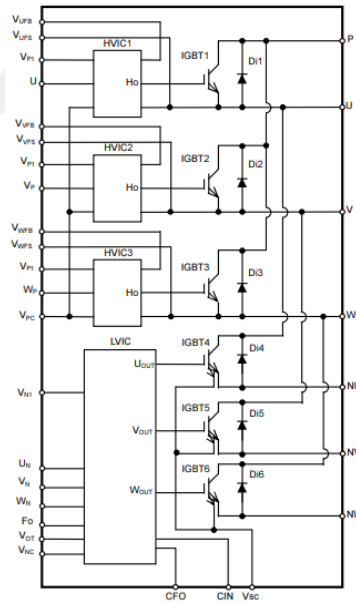
DC sinyali farklı frekans ve genlikte bir AC sinyale çeviren güç elektroniği sistemleri eviriciler olarak adlandırılmaktadır. Eviriciler günümüzde birçok endüstriyel uygulamada vazgeçilmeyen bir parça olmuştur. Eviriciler bağlandıkları sistemlere göre tek fazlı veya çok fazlı olarak tasarlanabilmektedir. Eviricilerde DC sinyali AC sinyale çevirmek için anahtarlar kullanılmaktadır. Kullanılan anahtarlama elemanları IGBT, BJT, MOSFET, GTO gibi yarı iletkenlerden seçilebilmektedir [47,

48]. Genellikle motor kontrol uygulamalarında IGBT yarı iletkenlerden oluşan evirici yapısı kullanılmaktadır.



Şekil 3.1. Üç fazlı inverter yapısı [49]

Günümüz teknolojinin gelişmesiyle motor kontrol uygulamalarında kullanılan evirici yapıları akıllı güç modülü(IPM) halini almıştır. Akıllı güç modülleri, IGBT veya MOSFET yarı iletken teknolojisini ve anahtarlama entegrelerini bünyesinde toplayan gelişmiş bir eviricidir.



Şekil 3.2. Akıllı güç modülü- nün (IPM) iç yapısı [50]

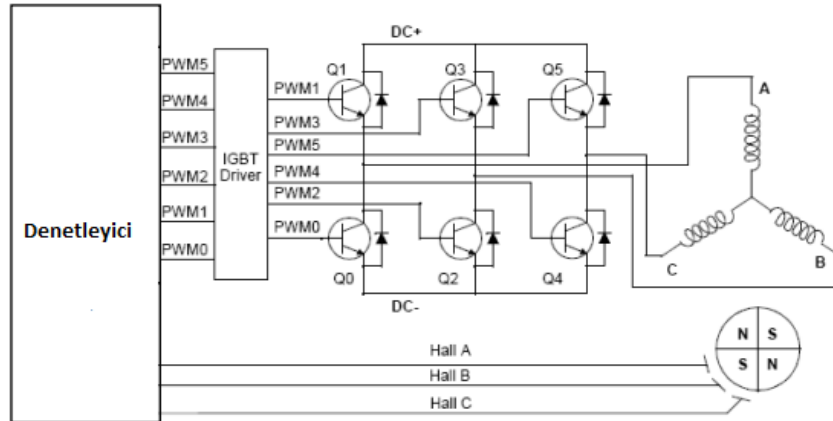
Genellikle eviricilerde, darbe genişlik modülasyon (PMW) tekniği kullanılmaktadır. Motor kontrolünde en yaygın kullanılan modülasyon teknikleri ise Sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu (SPWM), 3. Harmonik eklenmiş PWM, Uzak vektör PWM (UVPWM) ve akım kontrollü PWM'dir.

3.2. Motor Kontrol Yöntemleri

Bu bölümde günümüzde sürekli mıknatıslı senkron motor kontrolünde hem akademik çalışmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda sıkça kullanılan kontrol yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir.

3.2.1. Altı adım anahtarlama kontrol

Altı adım anahtarlama kontrol, sürekli mıknatıslı motorların kontrolünde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntem ile, stator sargılarından geçen akımların yön değişimini ve rotorun konum bilgisini kullanarak anahtarlama elemanlarına gidecek sinyaller belirlenmektedir. Bu yöntemde, pozisyon sensörlerinden alınan konum bilgisi kullanılarak eviricideki altı adet yarı iletken anahtarın iletme geçmesi veya iletimi durdurması için gerekli kontrol sinyalleri gönderilerek motor kontrolü sağlanmaktadır [51]. Yarı iletken anahtarlara iletilen kontrol sinyalleri rotor konumuna bağlı bir sıraya göre oluşturulmaktadır. Bu yöntemde rotor konum bilgisine göre statordaki bir faza pozitif gerilim, diğer faza negatif gerilim uygularken üçüncü faza gerilim uygulamamaktadır. Bu şekilde sürekli mıknatıslı senkron motorun stator sargılarında manyetik kutup oluşmaktadır. Stator ve rotorda oluşan manyetik alan kutuplarının birbirini itmesine veya çekmesine bağlı olarak bir dönme momenti oluşur ve böylelikle hareket sağlanır. Altı adım anahtarlama kontrol yöntemi için klasik devre şeması Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Rotor konuma bağlı motordan alınan verilere göre eviricide bulunan yarı iletken anahtarlara gönderilecek anahtarlama sinyalleri Tablo 3.1’de verilmiştir.



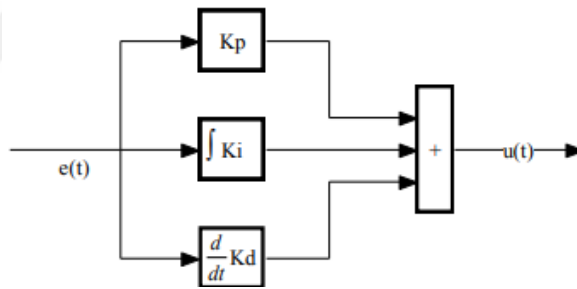
Şekil 3.3. Altı adım anahtarlama kontrol yapısı [51]

Tablo 3.1. Rotor pozisyonuna bağlı olarak evirici anahtar durumları

Konum	Konum açısı Φ	Hall Sensörleri			Anahtar Konumları					
		H1	H2	H3	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
1	$0 \leq \Phi < 60$	1	0	0	1	0	0	1	0	0
2	$60 \leq \Phi < 120$	1	1	0	1	0	0	0	1	0
3	$120 \leq \Phi < 180$	0	1	0	0	0	1	0	0	1
4	$180 \leq \Phi < 240$	0	1	1	0	1	1	0	0	0
5	$240 \leq \Phi < 300$	0	0	1	0	1	0	0	0	1
6	$300 \leq \Phi < 360$	1	0	1	0	0	0	1	1	0

3.2.2. PID kontrol

PID kontrolörün, basit yapıda olması, uygulanmasının kolay olması ve kararlı bir şekilde çalışmasından dolayı günümüz endüstrisinde en yaygın olarak kullanılan kontrol yöntemlerindedir [52]. Geleneksel olarak bilinen PID kontrolör iç yapısı Şekil 3.4’de verilmiştir. Günümüzde bu yapının dışında çok farklı PID kontrolör yapılarına literatürde rastlanmaktadır. Bu yapılara örnek olarak; seri PI yapısı, ileri beslemeli PID, geri beslemeli PID vb. gösterilebilir.



Şekil 3.4. PID kontrolcünün iç yapısı [52]

Bu kontrol yapısında referans sinyal ile geri besleme alınarak bu iki sinyal arasındaki farka bağlı olarak kontrol sinyali üretilmektedir. Şekil 3.4’de gösterilen PID bloğunun matematiksel ifadesi Denklem (3.1) ve Denklem (3.2)’de verilmiştir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.1)$$

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (3.2)$$

Burada, K_p oransal kazanç katsayısını, $e(t)$ hata sinyalini, K_i integral kazanç katsayısını, K_d türevsel kazanç katsayısını ifade etmektedir. PID kontrolde amaç diğer kontrol yapılarında olduğu gibi hatayı sıfırlayarak sistemin istenilen referans

değerine ulaşmasını sağlamaktır. PID kontrolöründe bulunan kontrolör kazanç katsayıları, K_p , K_i ve K_d katsayılarının değerleri sistem cevabı için çok önemlidir. Bu kontrolör kazanç katsayıları ayarlanarak, sistemin yükselme zamanı, oturma zamanı, kalıcı durum hatası, yüzde aşım gibi sistem performansını gösteren kriterleri istenildiği gibi ayarlanabilmektedir. Kontrolördeki kontrolör kazanç katsayılarının sistem cevabına etkileri Tablo 3.2’de verilmiştir. Literatürde PID kontrol katsayılarının hesaplanmasında, deneme yanılma, paket programlar ile katsayı ayarlanması, Cohen-Coon ve Ziegler-Nichols olmak üzere dört farklı yöntem olduğu bilinmektedir.

Tablo 3.2. PID katsayılarının sistem cevabına etkileri

	Yükselme Zamanı	Aşım	Oturma Zamanı	Kalıcı Durum Hatası
K_p	Azalır	Artar	Az Değişim	Azalır
K_d	Az Değişim	Azalır	Azalır	Az Değişim
K_i	Azalır	Artar	Artar	Yok eder

3.2.3. Vektör kontrol

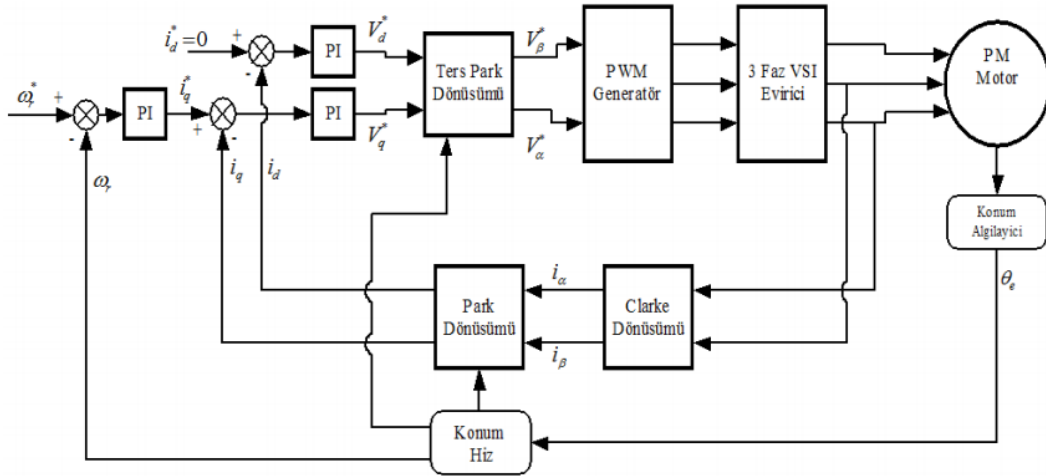
Geleneksel AC motorlar ve sürekli mıknatıslı motorların kontrolünde, motor stator akımları genlik, faz ve frekans bilgisini barındıran bir vektör ile ifade edilebilir olmasıyla akım vektörünün kontrolüne literatürde “Vektör Kontrol” olarak adlandırılmaktadır [53].

Vektör kontrolün temelinde, geleneksel AC veya senkron motorun üç faz stator akımları döner referans düzlemine (d-q eksen) indirgenmesi yapılabilmektedir. Bu kontrol yöntemi ile sürekli mıknatıslı senkron motorların karmaşık olan kontrol yapısı d-q eksene indirgenmesi ile, bu tip motorların kontrolünün ayırık uyartımlı DC motor kontrolü gibi olmasına olanak sağlamaktadır [42].

Sürekli mıknatıslı senkron motorların rotor yapılarına ve mıknatıs yerleşimlerine göre vektör kontrolünde farklılıklar gözlenmektedir. Kontrol yöntemindeki bu farklılık d-q eksen akımlarının kontrolü ile oluşturulmaktadır. Stator akımları rotor referans düzlemine dönüştürüldüğünde d-eksen akım bileşeni ile akının kontrolü, q-eksen akım bileşeni ile ise momentin kontrolü sağlanmaktadır. Bu yöntem ile hem

akımın hem de momentin ayrı bir şekilde kontrol edilmesine olanak sağlamaktadır. Yüzeysel mıknatıslı senkron motorlarda d-eksen ve q-eksen endüktansları birbirine eşit olduğundan dolayı doğrudan moment kontrolü yani q-eksen akım kontrolü gerçekleştirilmektedir.

Vektör kontrolüne ait genel blok diyagramı Şekil 3.5’de verilmiştir. Motor statorundan alınan akım bilgisi Clarke ve Park dönüşümleri ile döner düzleme vektörel olarak aktarılmıştır. Referans hız ve akım bilgileri motordan alınan geri beslemeler ile karşılaştırılarak PI kontrolör ile motora verilmesi gereken gerilim hesaplanmaktadır. Gerilim bilgileri ile vektör kontrolünde değerlendirilerek eviriciye gidecek PWM sinyalleri belirlenmektedir. Böylelikle referans ve geri besleme arasındaki farka bağlı olarak kontrol sağlanarak istenilen sürede istenilen referansa ulaşılmaktadır.



Şekil 3.5. Genel vektör kontrol blok diyagramı [54]

Bu proje kapsamında kullanılan aksenal akıllı sürekli mıknatıslı senkron motorun kontrolünde vektör kontrol yöntemi uygulanmaktadır. Vektör kontrol yönteminde motora ait 3-faz stator akımı okunarak Clarke dönüşümü ile motor akımları α - β eksen akımlarına dönüştürülür. Bu dönüşüm gerçekleştirmek için Denklem (3.3), (3.4) ve (3.5) kullanılmıştır [55].

$$I_{\alpha} = \frac{2}{3}I_a - \frac{1}{3}(I_b - I_c) \quad (3.3)$$

$$I_{\beta} = \frac{2}{3}(I_b - I_c) \quad (3.4)$$

$$I_0 = \frac{2}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (3.5)$$

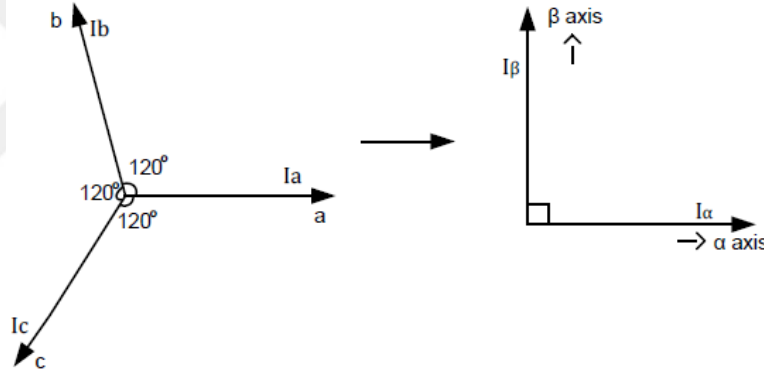
Motor fazları dengeli olduğunu ve stator üç faz akımlarının anlık değerlerinin toplamının sıfır olduğu bilinmektedir, bu durumda Clarke dönüşümü için kullanılacak dönüşümler Denklem (3.6), (3.7) ve (3.8)'de verilmiştir.

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (3.6)$$

$$I_\alpha = I_a \quad (3.7)$$

$$I_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(I_a + 2 I_b) \quad (3.8)$$

Yapılan Clarke dönüşümü ile zaman ve hıza bağımlı α - β eksen akımları elde edilmektedir.

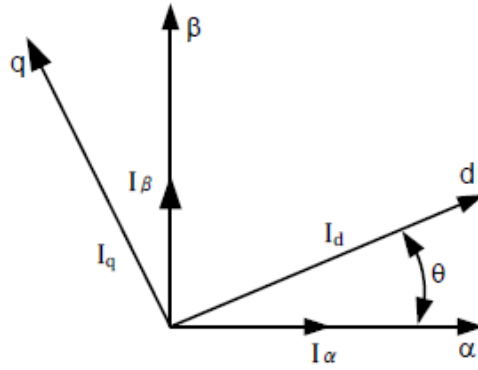


Şekil 3.6. Clarke dönüşümünün grafiksel gösterimi [55]

Park dönüşümü ile zaman ve hıza bağımlı α - β eksen akımları zamandan bağımsız d-q eksen akımlarına dönüştürülmektedir. Bu dönüşümü gerçekleştirmek için kullanılan matematiksel eşitlik Denklem (3.9) ve (3.10)'da verilmiştir. Denklemde kullanılan θ ise rotor pozisyonunu ifade etmektedir. Elde edilen d-q eksen akımları I_d akı bileşenini, I_q ise moment bileşenini ifade etmektedir.

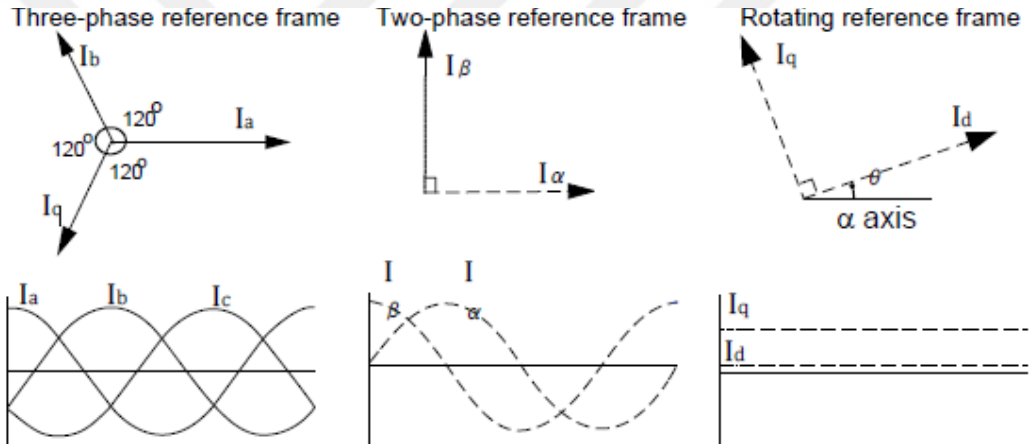
$$I_d = I_\alpha \cos \theta + I_\beta \sin \theta \quad (3.9)$$

$$I_q = -I_\alpha \sin \theta + I_\beta \cos \theta \quad (3.10)$$



Şekil 3.7. Park dönüşümünün grafiksel gösterimi [55]

Motor statorundan okunan 3-faz akımın dönüşümler sonucunda elde edilen genlik ve faz açıları Şekil 3.8’de grafiksel olarak gösterilmiştir.

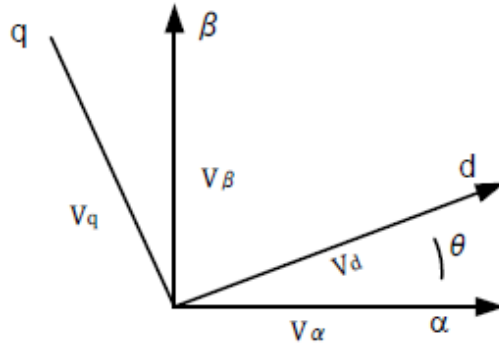


Şekil 3.8. 3-faz stator akımının dönüşümünün grafiksel gösterimi [55]

Referans akım ile geri besleme arasındaki hataya bağlı olarak PI kontrolör yapısı çalışarak aradaki farkı kapatmak için gerekli gerilimi oluşturmaktadır. Bu gerilime Ters Park dönüşümü uygulanarak motor terminallerine uygulanması gereken referans gerilim elde edilmektedir.

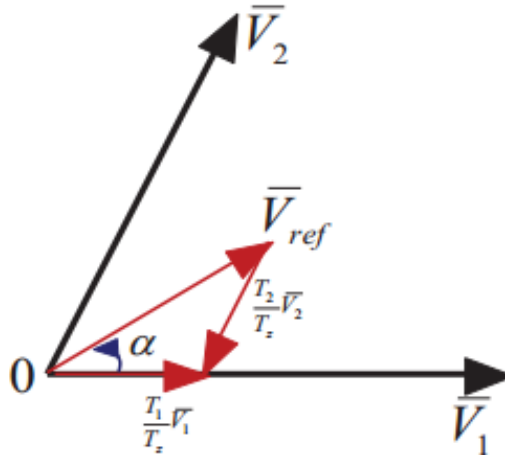
$$V_{\alpha} = V_d \cos \theta - V_q \sin \theta \quad (3.11)$$

$$V_{\beta} = V_q \cos \theta + V_d \sin \theta \quad (3.12)$$



Şekil 3.9. Ters park dönüşümünün grafiksel gösterimi[55]

Dönüşümler sonucunda elde edilen α - β eksen gerilimleri kullanılarak uzay vektör darbe genişlik modülasyonu(UVDGM) çalıştırılarak ilk olarak sektör hesaplaması yapılmaktadır. Sektör hesabına göre referans gerilim hesaplanarak, anahtarlara gidecek sinyaller belirlenmektedir.



Şekil 3.10. Sektör - 1 içerisindeki referans gerilim vektörü yerleşimi [56]

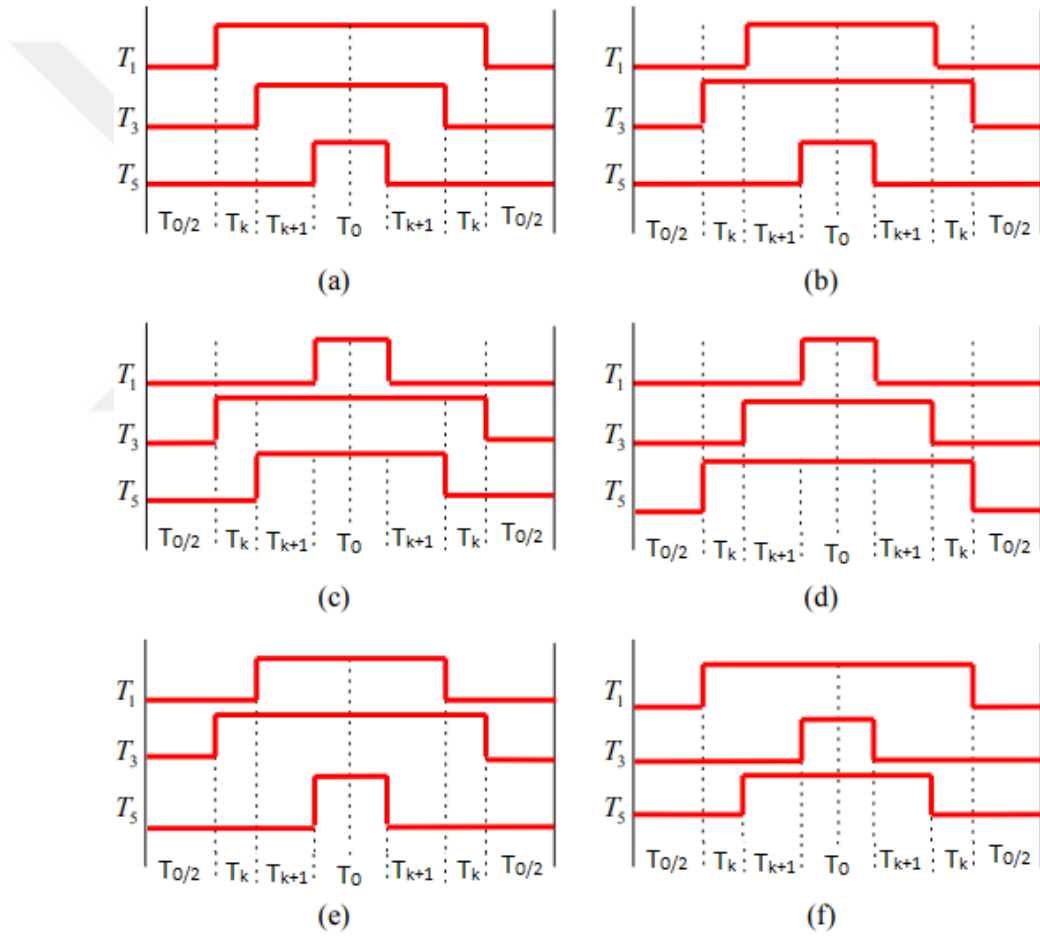
$$V_{ref} = V_{\alpha} + V_{\beta} = \frac{2}{3} \left(V_a + V_b e^{j2\pi/3} + V_c e^{-j4\pi/3} \right) \quad (3.13)$$

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} \frac{T_s}{2} = \frac{2}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} \cos(k-1)\pi/3 & \cos k\pi/3 \\ \sin(k-1)\pi/3 & \sin k\pi/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_k \\ T_{k+1} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$\begin{bmatrix} T_k \\ T_{k+1} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{T_s}{V_{dc}} \begin{bmatrix} \cos(k-1)\pi/3 & \cos k\pi/3 \\ \sin(k-1)\pi/3 & \sin k\pi/3 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Denklemlerde kullanılan, k sektör numarası, T_s anahtarlama periyodunu, T_k ve T_{k+1} referans gerilim vektörünün çalışma sürelerini, V_{dc} DC bara gerilimini ifade etmektedir.

Hesaplamalar sonucunda altı sektöre ait PWM durumları Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Altı sektör için fazlara ait PWM durumları [56]

Bu tez kapsamında aksel akı sürekli mıknatıslı sekron motor kontrolünde PI kontrolör ve vektör kontrol metotları kullanılmıştır. Simülasyon için MATLAB/Simulink ortamında blok diyagramları oluşturulmuş, deneysel çalışma için ise C dilinde yazılım yapılarak motor kontrolü gerçekleştirilmiştir.

4. EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORLARDA VURUNTU MOMENTİNİ AZALTMA YÖNTEMLERİ

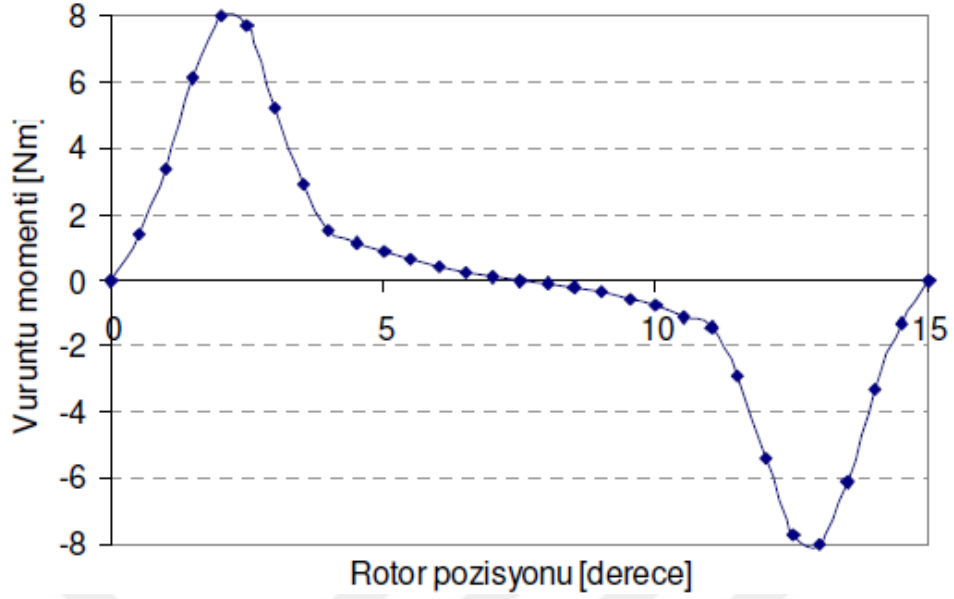
Bu bölümde, eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron motorda oluşan vuruğu momentinin nedenlerini ve bu vuruğu momentini azaltmak hatta yok etmek için kullanılan yöntemlerin incelemesi yer verilmiştir. Bu bölümde EASM Motor – 1'in Tablo 4.1'de verilen parametreler kullanılarak vuruğu momentinin tespiti, analizi gerçekleştirilmiş ve vuruğu momentinin etkisinin azaltılabilmesi için MATLAB/Simulink programında benzetim çalışması yapılmıştır.

Tablo 4.1. EASM Motor-1'in parametreleri

EASM Motor - 1	
Hava Aralığı	0.8 mm
Kutup Sayısı(P_r)	8
Oluk Sayısı(P_s)	24
Oluk/Kutup/Faz	1
Mıknatıs Tipi ve Şekli	Üçgen NdFeB
Stator Direnci(R_{f-f})	188 mΩ
Endüktans(L_{f-f})	522.6 uH
Zıt-EMK Katsayısı(K_e)	0.0758 V/krpm
Tork Katsayısı(K_t)	0.8 Nm/Arms
Vuruğu Momentinin Tepe Değeri	1.25 Nm

4.1. Vuruğu Momenti

Vuruğu momenti, sürekli mıknatıslı motorlarda rotor yüzeyine monte edilmiş veya rotora gömülü olarak bulunan mıknatısların stator oluklarıyla etkileşimi ile oluşan ve ortalama moment üstünde zıt yönde zorluk oluşturan kuvvete denilmektedir. Şekil 4.1'de, Tablo 4.1'de belirtilen 24 oluk 8 kutuplu bir EASM Motor – 1'e ait vuruğu momentinin dalga formu verilmiştir.



Şekil 4.1. EASM bir motorun vuruntu momenti dalga formu

Vuruntu momenti, hava aralığında manyetik akının büyüklüğü ile değişirken, motorun stator sargılarındaki akım ve gerilim değerlerine göre değişmemektedir [57, 58]. Vuruntu momentinin genel ifadesi Denklem (4.1) ve Denklem (4.2)'de, vuruntu momentinin hangi mekaniksel açıda tekrar edeceğinin yani periyodunun hesaplanması için ise Denklem (4.3)'de matematiksel ifade verilmiştir.

$$T_{\text{vuruntu}}(\theta_m) = -\frac{\partial W_g(\theta_m)}{\partial \theta_m} \quad (4.1)$$

$$T_{\text{vuruntu}} = -\frac{1}{2} \Phi_g^2 \frac{dR}{d\theta_m} \quad (4.2)$$

$$\theta_{\text{vuruntu}} = \frac{360}{\text{EKOK}(P_s, P_r)} \quad (4.3)$$

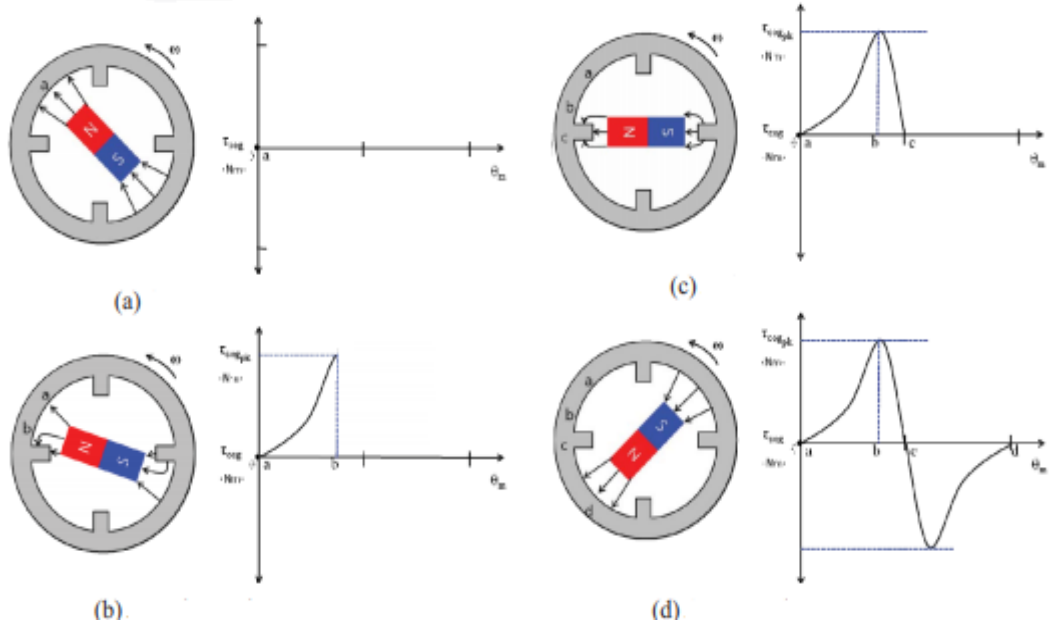
Denklem (4.1) ve Denklem (4.2)'de, θ_m rotorun konumu, Φ_g hava aralığındaki manyetik akıyı, R hava aralığının relüktansı ve W_g ise hava aralığının enerjisini ifade etmektedir. Denklem (4.3)'de ise, P_s stator oluk sayısı, P_r rotor oluk sayısını ve θ_{vuruntu} ise vuruntunun hangi mekaniksel açıda tekrar edeceğini ifade etmektedir.

Vuruntu momenti, ister sonlu elemanlar yöntemleri veya ister analitik yöntemlerle belirlensin bir Fourier serisi olarak ifade edilebilmektedir[59].

$$T_{\text{vuruntu}}(\theta_m) = \sum_{k=1}^{\infty} T_k \times \sin(kN_c \theta_m + \varphi_k) \quad (4.4)$$

Denklem (4.4)'de, θ_m rotorun konumu, T_k k.nıncı harmoniğin genliği, φ_k k'nıncı harmoniğin faz açısı, N_c ise rotor kutup sayısı ile stator oluk sayısının en küçük ortak katını ifade etmektedir.

Şekil 4.2'de rotor ve statorun pozisyonuna göre vuruğu momentinin oluşumu gösterilmiştir. Rotor ile stator arasında hava aralığının en yüksek olduğu bölgede vuruğu momenti oluşmamaktadır, bu durum Şekil 4.2.a'da gösterilmiştir. Rotor ile stator arasındaki etkileşim çok yüksek olduğu bölgede vuruğu momenti en büyük değerine ulaşmaktadır, bu durum ise Şekil 4.2.b'de gösterilmiştir. Şekil 4.2.c'de gözlenen durum Şekil 4.2.b'deki durumun tam tersi olduğu için vuruğu momenti negatif olarak en büyük değerine ulaşmıştır. Şekil 4.2.d'de gözlenen durum ise Şekil 4.2.a'daki durumun tam tersi olduğu için vuruğu momentinin değeri tekrar sıfıra gelmektedir. Motorun dönüşüne bağlı olarak bu durumun periyodik olarak tekrarlanmaktadır. Vuruğu momentinin şekli, genliği ve periyodu, rotorların şekillerine ve birbirine göre konumlarına, mıknatısların şekillerine ve tiplerine, hava aralığının miktarına bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 4.2. Vuruğu moment oluşumu [60]

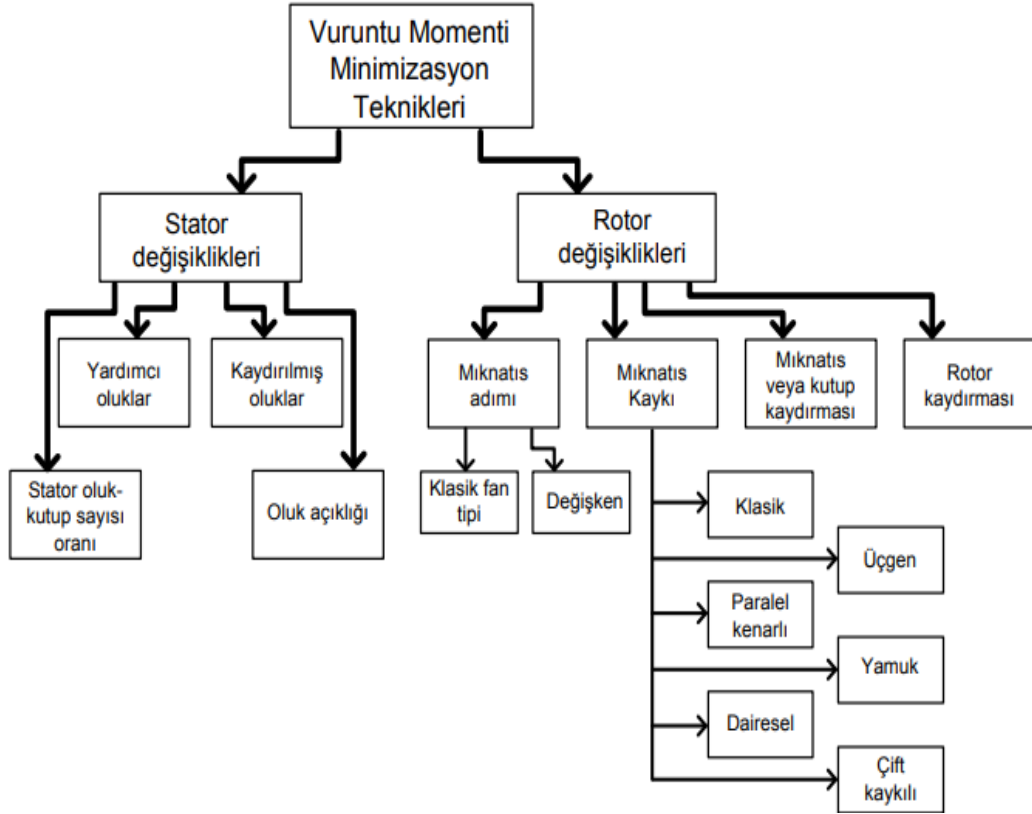
4.2. Vuruğu Momentini Azaltma Yöntemleri

Vuruğu momenti, makinelerde titreşime, akustik gürültüye, ısınmaya ve vuruğu momentinden dolayı sistem momentinde oluşan etkiden dolayı verimin düşmesine

sebepler olduğundan, etkisinin azaltılması için önlemler alınması gerekmektedir [40]. Sürekli mıknatıslı motorlarda vuruş momentini azaltmak için farklı yöntemler olduğu bilinmektedir. Genellikle, senkron makinelerde vuruş momentini azaltmaya yönelik çalışmalar mevcut teknikler ile iki kategoriye ayrılmaktadır. Bu yöntemler tasarımsal düzenleme ve kontrol yöntemleri ile düzenleme olarak iki ana başlık altında toplanabilir.

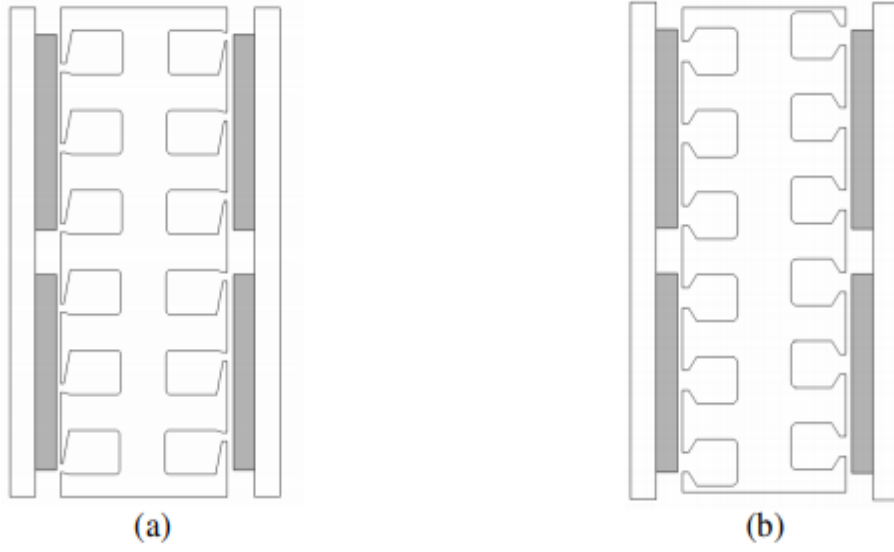
4.2.1. Vuruş momentinin tasarıma müdahale ile azaltılması

Tasarımsal düzenleme ile vuruş momentini azaltma teknikleri statorda yapılan düzenlemeler ve rotorda yapılan düzenlemeler olmak üzere gruplanarak, Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



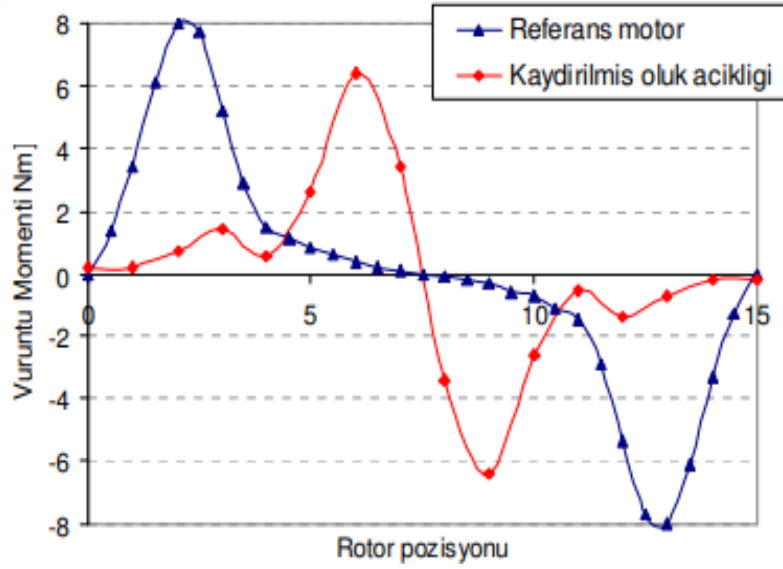
Şekil 4.3. Vuruş momentini azaltma teknikleri [61]

Vuruş momentini azaltmak için stator tarafında uygulanabilecek tekniklerden olan stator oluklarının kaydırılması veya oluk açıklığının kaydırılması için yapılan çalışma Şekil 4.4’de görselleştirilmiştir.



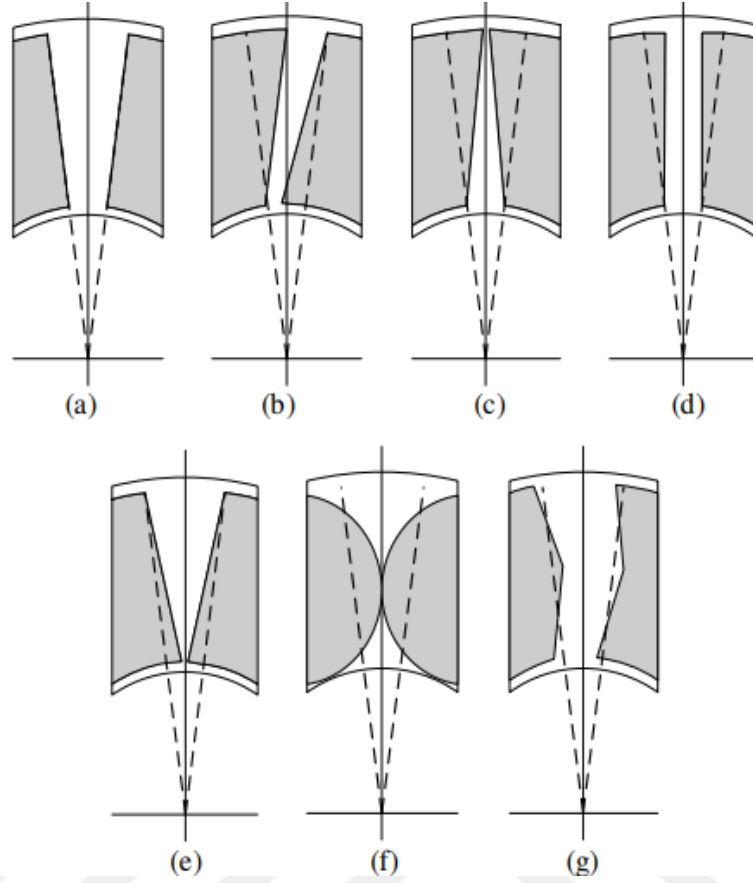
Şekil 4.4. Stator olukların kaydırılması (a), oluk açıklığının kaydırılması (b) [44]

Referans olarak alınan motorda kaydırılmış oluklu yapıya göre elde edilen vuruntu momentini Şekil 4.5’de verilmiştir. Bu yöntem ile vurununun tepeden tepeye değerinin azaltılabildiği görülmüştür.

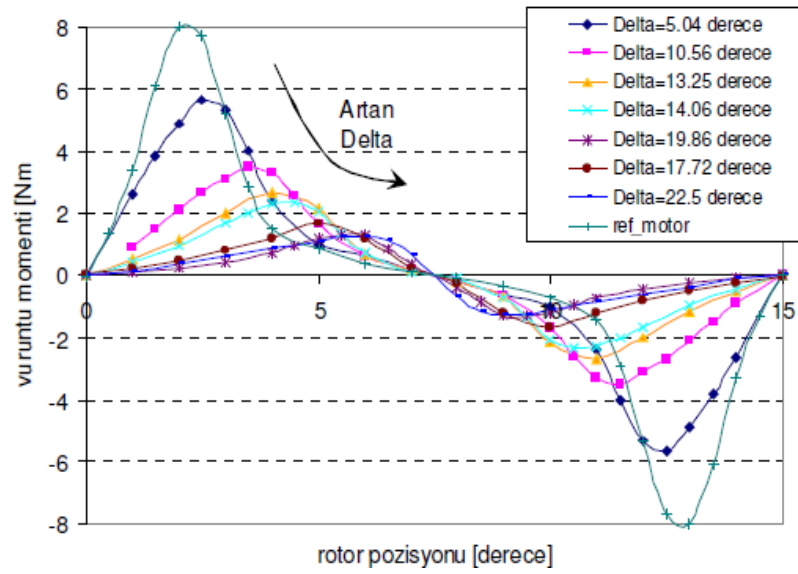


Şekil 4.5. Motor vurunusu ile kaydırılmış oluklu yapıların karşılaştırılması [44]

Vuruntu momentini azaltmak için rotor tarafında uygulanabilecek tekniklerden olan mıknatıs kaykısı teknikleri Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Üçgen şekilli mıknatıs kaykısı uygulandığında kaykısı açısına bağlı olarak motorda oluşan vuruntu momentinin değişimi Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Mıknatıs kaykısı teknikleri: kaykısız mıknatıslar(a), klasik kaykılı mıknatıslar(b), üçgen şekilli kaykısı(c), paralel kenarlı mıknatıs(d), yamuk biçimli kaykısı(e), dairesel kaykılı mıknatıs(f), çift kaykılı mıknatıs(g) [44]



Şekil 4.7. Üçgen şekilli kaykılı mıknatıslar kullanıldığında artan kaykısı açısına göre vuruntu momentinin değişimi [44]

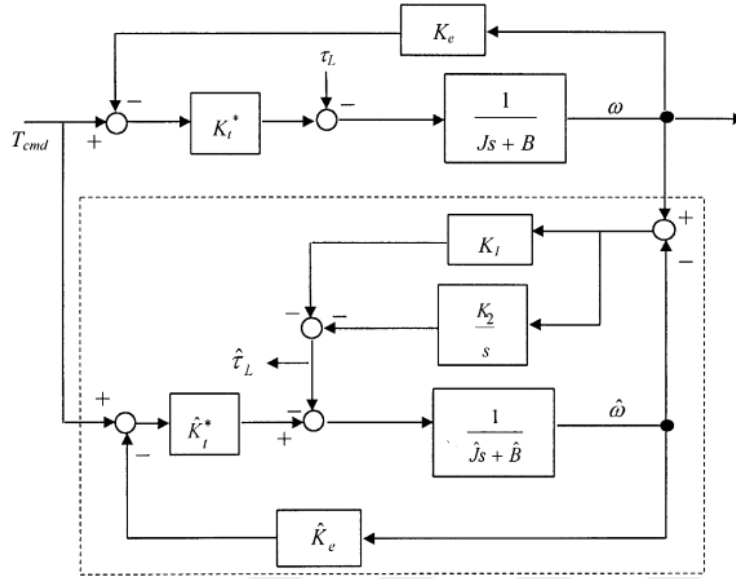
Motorların tasarım aşamasında vuruñtu momentini incelemesi yapılmadığında ve üretildikten sonra vuruñtu momentini olduğu görüldüğünde vuruñtu momentinin tasarimsal düzenleme ile giderilmesi ekstra maliyet ve zaman kaybı olacağı için pek tercih edilmemektedir. Bu durumlardan dolayı literatür incelemesinde kontrol algoritmaları ile vuruñtu momentinin azaltılması üzerine çalışmalar gözlenmiştir.

4.2.2. Vuruñtu momentinin kontrol yöntemleri ile azaltılması

Tasarimsal düzenlemeler ile vuruñtu momentinin azaltılmasında motor güç yoğunluğunun istenilen düzeyde tutulamaması ve maliyetinin yüksek olmasında dolayı farklı arayışların ortaya çıkmıştır. Literatür incelemelerinde, üretimi tamamlanmış motorların tekrar tasarimsal düzenlemesi yapılmadan kontrol döngüsünde hesaplanan eviriciye uygulanan kontrol sinyallerinin düzenlenmesiyle vuruñtu momentinin azaltılması üzerine çalışmalar olduğu gözlenmiştir.

Bu bölümde literatürde sıkça gözlenen kontrol yöntemleri ile vuruñtu momentinin azaltılması için yapılan çalışmalar derlenerek kısa bir bilgi aktarımı yapılmıştır. Bu teze konu olan harmonik akım ekleme yöntemi ile vuruñtu momentinin azaltılması ise denklemler ve blok şemaları verilerek detaylı bir şekilde aktarım yapılmıştır.

Vuruñtu momentini azaltmaya yönelik literatürde tork gözlemcileri kullanıldığı görülmüştür. Tork gözlemcileri, sistemde momentte oluşacak bozucu etkenlere karşı sinyal üreterek momentin kalitesini arttırılmaya yönelik çalışmaktadır. Moment dalgalanmasını azaltmak için kullanılan PI-tip kapalı çevrim tork gözlemcisinin genel blok şeması Şekil 4.8’de verilmiştir. Tork gözlemcileri ile vuruñtu momentinden dolayı momentte oluşan dalgalanmalarının telafisinin yanında sistemde oluşacak bozucu etkenlere karşıda momentte oluşacak dalgalanmalarda da başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Tork gözlemcisinin sistem çalışmalarında gösterdiği moment doğruluğunun yanında tasarımının zorluğu en büyük dezavantajıdır. Tork gözlemcisi tasarlanırken bant genişlikleri ve kazanç değerleri sisteme göre doğru ayarlanması gerekmektedir. Aksi takdirde moment kalitesini arttırmak yerine sistemde üretilen momentte dalgalanmalara neden olmaktadır.

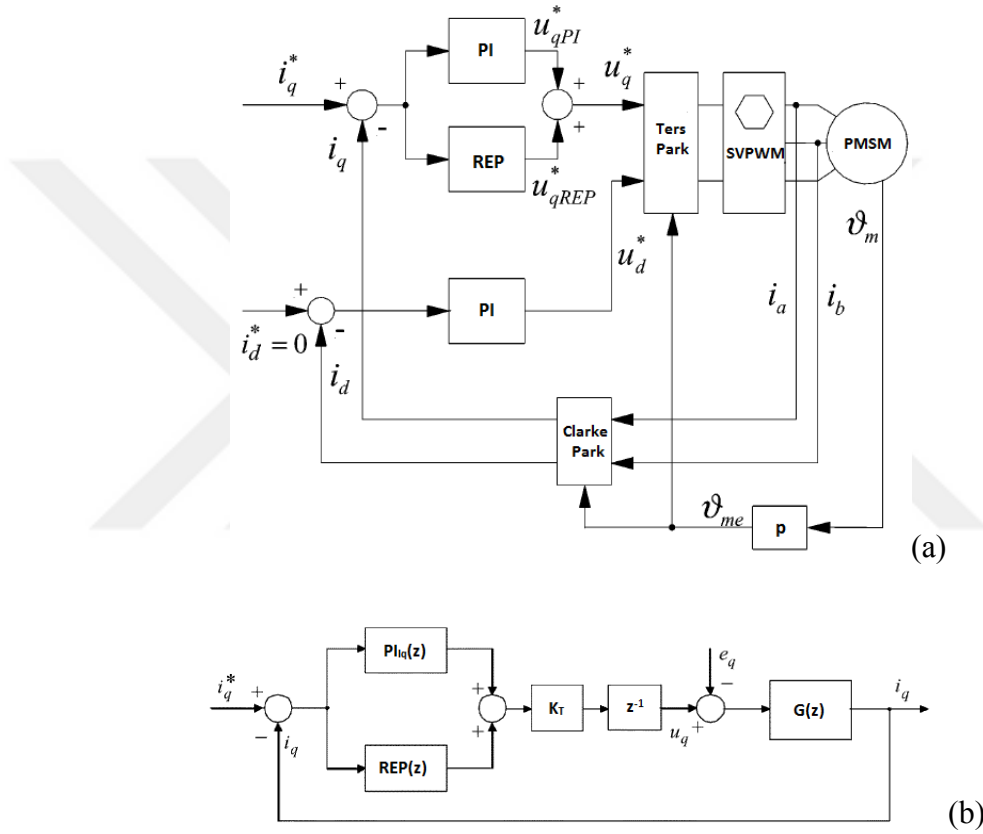


Şekil 4.8. PI-tip kapalı çevrim tork gözlemci yapısı [62]

Vuruntu momentini azaltmak için incelenen yayınlarda bant genişliğinin arttırılmasının momentte oluşacak dalgalanmaların önemli ölçüde giderilebileceği görülmüştür. Hız döngüsünün bant genişliğinin arttırılması için sistemdeki tork döngüsünün bant genişliğinin arttırılması gerekmektedir. Daha yüksek bant genişliğinde kontrolcü gürültülerden çok fazla etkilenmektedir. Bu gürültü etkilerini yok etmek için geri besleme alınırken gözlemciler kullanılarak daha uygun sistem cevabı elde edilebilir. Bu sayede kontrolcü katsayıları daha yüksek bant genişliği elde edebilecek şekilde düzenlenebilmektedir. Bunun için ise sistem kutup-kök yerleşimi, motorun elektriksel zaman sabiti, sistemin mekaniksel zaman sabiti ve evirici anahtarlama frekansı dikkate alınarak kontrol katsayıları hesaplanmalıdır. Bant genişliğinin arttırılması endüstriyel uygulamalarda moment kalitesinin arttırılması için sıklıkla uygulanmaktadır. Bu metot ile yükten bağımsız bir şekilde kontrol bant genişlikleri ayarlanarak yüke bağlı olarak kontrolör kazançlarının ayarlanması ile sistemde momentte oluşacak dalgalanmaların büyük ölçüde önüne geçtiği bilinmektedir.

Vuruntu momentini azaltmak için sıklıkla kullanılan bir diğer metot ise tekrarlanabilir akım kontrolüdür. Bu kontrol yapısı ile akım kontrolcüsü q-eksen akımındaki dalgalanmayı izleyerek hız kontrol çıkışı olan q-eksen referans akımında düzenleme yapmaktadır. Böylelikle q-eksen akımındaki dalgalanma azaltılarak

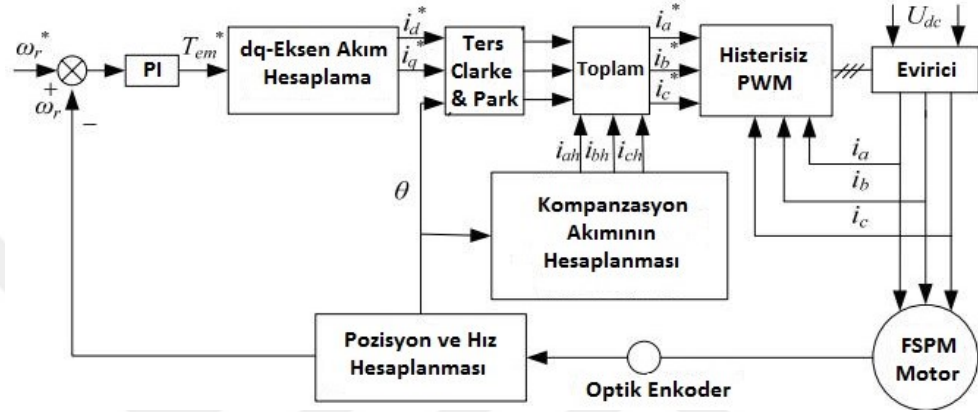
dolaylı olarak sistem momentinde oluşacak dalgalanmanın azaltılması sağlanmaktadır. Tekrarlanabilir akım kontrolcüsü için referans alınan yayınlarda kullanılan blok şeması Şekil 4.9’de verilmiştir. Bu yapının çalışma mantığı da tork gözlemcisine benzemektedir. Tork gözlemcisinde olduğu gibi tekrarlanabilir akım kontrolcüsünün ayarlanması da uzmanlık gerektirecek bir konudur. Doğru şekilde kontrolcü ayarlanmadığında sistemdeki momentte daha fazla dalgalanmaya neden olduğu araştırmalarda gözlenmiştir.



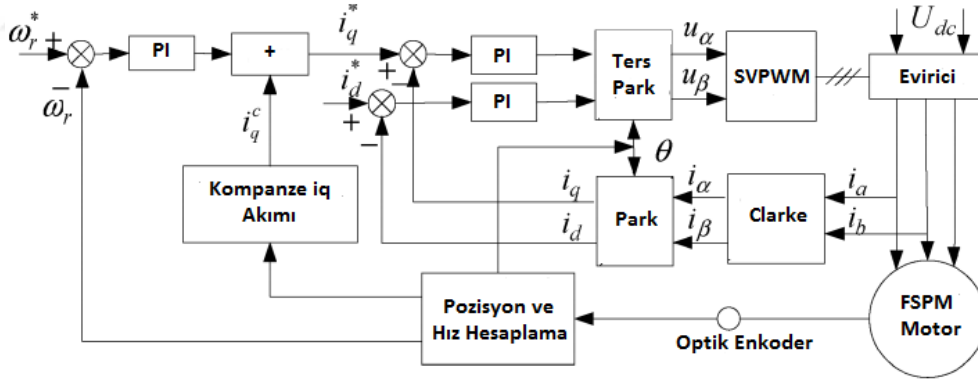
Şekil 4.9. Akım kontrol blok şeması(a), tekrarlanabilir akım kontrolcüsünün iç yapısı(b) [29]

Vuruntu momentini azaltmak için incelenen yayınlarda en çok harmonik akım ekleme üzerine çalışma yapıldığı görülmüştür. Literatürde incelenen kaynaklarda moment dalgalanmasını azaltmaya yönelik yapılan harmonik akım ekleme çalışmaları genellikle stator beslemesine verilecek 3-faz akım veya senkron motorda momenti oluşturan q-eksen akımı üzerinden yapıldığı görülmüştür. İncelenen yayınlarda sıklıkla rastlanan harmonik akım ekleme ile moment dalgalanmasının azaltılmasına yönelik kullanılan blok şemaları Şekil 4.10’da ve Şekil 4.11da verilmiştir. 3-faz stator akımına harmonik akım ekleme yönteminin genelde vektör

kontrol kullanılmayan, histerisiz PWM ile motor kontrolün sağlandığı uygulamalarda kullanıldığı gözlenmiştir. Bu tez kapsamında vektör kontrol yöntemi kullanılacağından ve literatürde incelenen yüksek hızlarda benzer çalışmalar referans alınarak düşük hızlarda momentte vuruğu momentinden dolayı oluşan moment dalgalanmasının azaltılması için q-eksen referans akımına harmonik akım ekleme metodu üzerinde çalışma yapılmaya karar verilmiştir.



Şekil 4.10. Moment kalitesinin artırılması için 3-faz stator akımlarına harmonik akım ekleme blok şeması [13]



Şekil 4.11. Moment kalitesinin artırılması için q-eksen akımına harmonik akım ekleme blok şeması [25]

Motorda oluşan vuruğu momentinin 2D, 3D SEA veya deneysel çalışmalar ile vuruğu momentinin değişimi ve şeklinin tespit edilmesi gerekiyor. Harmonik akım ekleme metodunda ilk önce tespit edilen bu vuruğu momentini oluşturan harmonik bileşenlerin tespiti Denklem (4.5)'de belirtilen Fourier seri açılarak hesaplanmaktadır. Tespit edilen vuruğu momentinin periyodu yani mekanik açıya bağlı değişimi ise Denklem (4.5)'e göre hesaplanmaktadır.

$$T_{\text{vuruntu}}(\theta_m) = \sum_{k=1}^{\infty} T_k \times \sin(kN_c\theta_m + \varphi_k) \quad (4.5)$$

Denklem (4.5)'de, θ_m rotorun konumu, T_k k.nıncı harmoniğin genliği, φ_k k'nıncı harmoniğin faz açısı, N_c ise rotor kutup sayısı ile stator oluk sayısının en küçük ortak katını ifade etmektedir.

$$T_{\text{vuruntu}_1} = T_1 \times \sin(N_c \times \theta_m) \quad (4.6)$$

$$T_{\text{vuruntu}_2} = T_2 \times \sin(2 \times N_c \times \theta_m) \quad (4.7)$$

$$T_{\text{vuruntu}_k} = T_k \times \sin(k \times N_c \times \theta_m) \quad (4.8)$$

$$T_{\text{vuruntu}} = T_{\text{vuruntu}_1} + T_{\text{vuruntu}_2} + \dots + T_{\text{vuruntu}_k} \quad (4.9)$$

Denklem (4.9)'da, T_{vuruntu_1} vuruuntu momentinin birinci harmoniğin genliği, T_{vuruntu_2} vuruuntu momentinin ikinci harmoniğin genliğini, T_{vuruntu_k} vuruuntu momentinin k'nıncı harmoniğin genliğini ifade etmektedir.

Vuruuntu momentinin harmonik bileşenleri tespit edildikten sonra, bu harmonik bileşenlere karşılık gelen ve vuruuntu momentinden dolayı sistem momentinde oluşan dalgalanmayı azaltacak q-eksen referans akımına eklenecek olan harmonik akımlarının hesabı Denklem (4.10)'da, Denklem (4.11)'de ve Denklem (4.12)'de ifade edildiği gibi yapılmaktadır.

$$\frac{3}{2} \frac{P_r}{2} \Psi_m i_q^{\text{harmonik}_1} = -T_{\text{vuruntu}_1} \quad (4.10)$$

$$\frac{3}{2} \frac{P_r}{2} \Psi_m i_q^{\text{harmonik}_2} = -T_{\text{vuruntu}_2} \quad (4.11)$$

$$\frac{3}{2} \frac{P_r}{2} \Psi_m i_q^{\text{harmonik}_k} = -T_{\text{vuruntu}_k} \quad (4.12)$$

Denklem (4.10)'da, Denklem (4.11)'de ve Denklem (4.12)'de, Ψ_m mıknatıs akısı, $i_q^{\text{harmonik}_1}$ vuruuntu momentinin 1. harmonik bileşenini yok etmek için hesaplanan harmonik akım, $i_q^{\text{harmonik}_2}$ vuruuntu momentinin 2. harmonik bileşenini yok etmek için hesaplanan harmonik akımı, $i_q^{\text{harmonik}_k}$ vuruuntu momentinin k. harmonik bileşenini yok etmek için hesaplanan harmonik akımı ifade etmektedir.

Sırasıyla Denklem (4.10)'da Denklem (4.6), Denklem (4.11)'de Denklem (4.7) ve Denklem (4.12)'de Denklem (4.8) yerine yazılarak q-eksen referans akıma eklenecek harmonik akımlar Denklem (4.13), Denklem (4.14) ve Denklem (4.15)'de ifade edildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$i_q^{\text{harmonik}_1} = \frac{-4 \times T_1 \times \sin(N_c \times \theta_m)}{3 \times \Psi_m \times P_r} \quad (4.13)$$

$$i_q^{\text{harmonik}_2} = \frac{-4 \times T_2 \times \sin(2 \times N_c \times \theta_m)}{3 \times \Psi_m \times P_r} \quad (4.14)$$

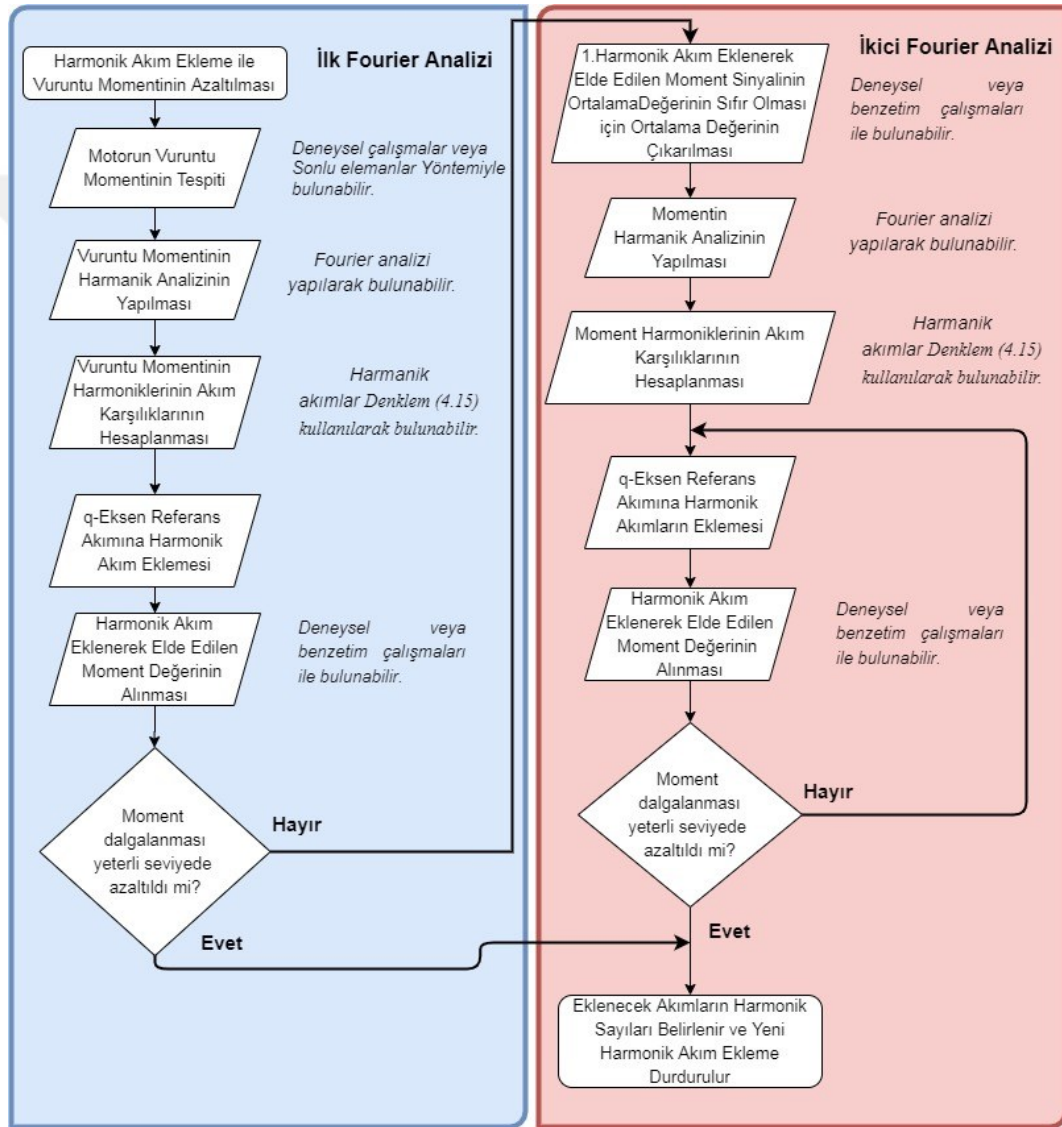
$$i_q^{\text{harmonik}_k} = \frac{-4 \times T_k \times \sin(k \times N_c \times \theta_m)}{3 \times \Psi_m \times P_r} \quad (4.15)$$

$$T = T_{\text{ortalama}} + T_{\text{vuruntu}} + T_{\text{stator_mmf}} \quad (4.16)$$

Hesaplanan harmonik akımlar, Şekil 4.11'de verilen blok şemasında gösterildiği gibi q-eksen referans akımına eklenmektedir. Bu yöntem ile motorun tasarıma bağlı sabit olan vuruntu momenti, Denklem (4.16)'da verilen $T_{\text{stator_mmf}}$ tork bileşeninin değeri harmonik akım eklemesi ile ayarlanarak, T_{vuruntu} bileşenini etkisini azaltacak şekilde tork değerinde düzenleme yapılmaktadır. Harmonik akım ekleme ile vuruntu momentinden dolayı sistem momentindeki dalgalanmayı azaltmaya yönelik çalışma için gerekli olan tüm denklemler ve matematiksel hesaplamalar bu kısımda anlatılmıştır.

Bu tez kapsamında, q-eksen referans akımına harmonik akım ekleme yöntemi ile vuruntu momentinin azaltılması referans alınarak bir algoritma üzerine çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu algorithmada ilk olarak motorun vuruntu momenti bulunarak, bu vuruntu momentinin harmonik analizi gerçekleştirilmektedir. Gerçekleştirilen bu harmonik analiz sonucunda yazılımda, hıza bağlı olarak hesaplanan vuruntu momentinin harmoniklerinden oluşan bir tablo oluşturulmuştur. Deneysel çalışmalar gerçekleştirilirken bu tablodaki değerler kullanılarak, q-eksen referans akımına eklenecek harmonik akımların hesaplanması yapılmaktadır. Bu akımlardan genliği büyük olan 1. harmonik akım bileşeni q-eksen referans akımına eklenerek, moment değeri alınmaktadır. Bu moment değerinin ortalaması çıkarıldıktan sonra aynı vuruntu momentinde yapıldığı gibi Fourier analizi yapılarak momentin harmonik bileşenleri elde edilmektedir. Bu harmonik bileşenlerden ilk Fourier analizinde yapıldığı gibi bir tablo oluşturulmuştur. Tabloda belirtilen momentin harmonik bileşenlerine karşılık

gelen harmonik akımlar hesaplanmaktadır. İkinci aşamada hesaplanan harmonik akımlar ile ilk Fourier analizinde hesaplanan 1. harmonik akım bileşeni q-eksen referans akımına eklenerek vuruğu momentinden kaynaklanan dalgalanmanın azaltılması gerçekleştirilmektedir. İki aşamalı Fourier analizi ile ilk Fourier analizindeki sonuçlara göre daha iyi sonuçlar elde edileceği düşünülmektedir. Algoritmanın akışının anlaşılması için hazırlanan akış şeması Şekil 4.12’de verilmiştir.

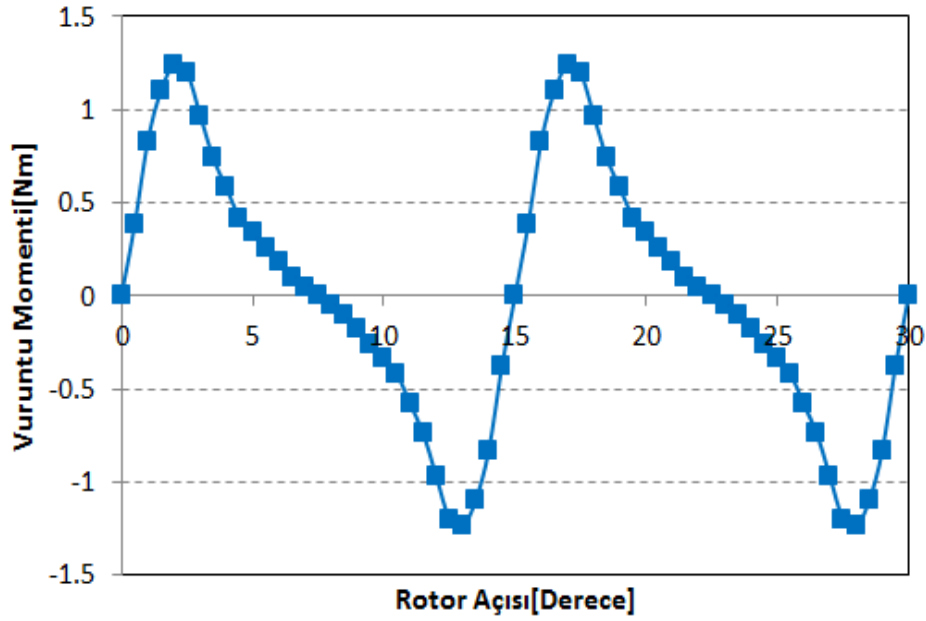


Şekil 4.12. Harmonik akım ekleme yöntemi ile vuruğu momentinin azaltılması algoritması

Bu tez kapsamında Şekil 4.12’de verilen algoritma kullanılarak, EASM senkron motorun düşük hızlarda vuruğu momentinin, yüksek hızda ise moment dalgalanmasının azaltılması hedeflenmiştir.

4.3. EASM Senkron Motorun Vuruntu Momentinin Hesaplanması

Motordaki vuruntu momenti analiz programları veya deneysel olarak elde edilebilmektedir. Vuruntu momentinin sonlu elemanlar yöntemi ile hesabı Maxwell Gerilme Tensörü veya Sanal İş Tekniği metotları kullanılarak yapılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan yazılımda sanal iş tekniği metodu kullanılmıştır. Tez kapsamında kullanılacak motorun 3-boyutlu sonlu elemanlar analizi (3D SEA) ile yüksüz durumda 1rpm hızda elde edilen vuruntu momenti Şekil 4.13’de verilmiştir.

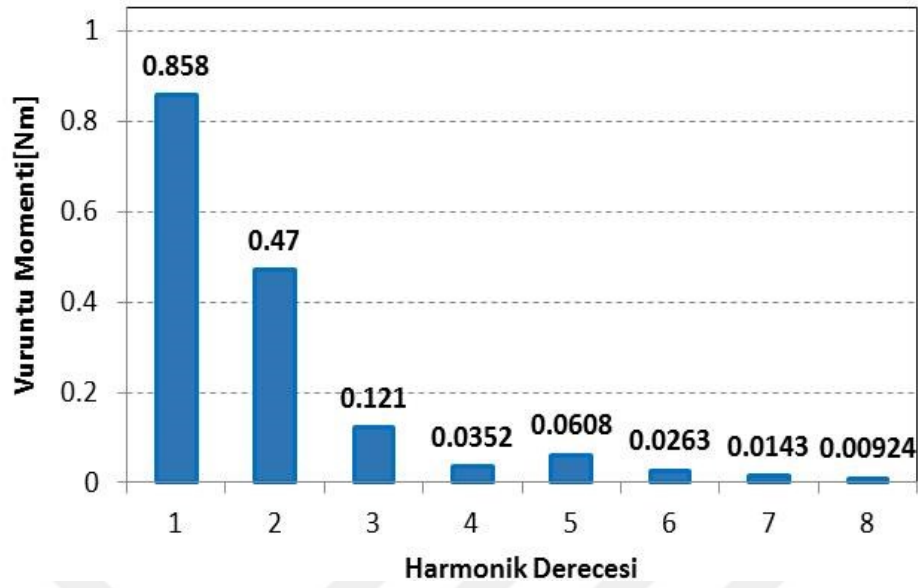


Şekil 4.13. EASM senkron motorun 3D SEA vuruntu momenti

Vuruntu momentinin periyodu stator yuva sayısı ve rotor kutup sayısına bağlı olarak değişmektedir. Bu tez kapsamında kullanılacak motorun stator yuva sayısı 24, rotor kutup sayısı ise 8’dir. Denklem (4.17)’ye göre hesaplanan vuruntu momenti periyodu mekanik açı olarak 15° ’ye eşittir.

$$\theta_{\text{vuruntu}} = \frac{360}{\text{EKOK}(P_s, P_r)} = \frac{360}{\text{EKOK}(24, 8)} = 15^\circ \quad (4.17)$$

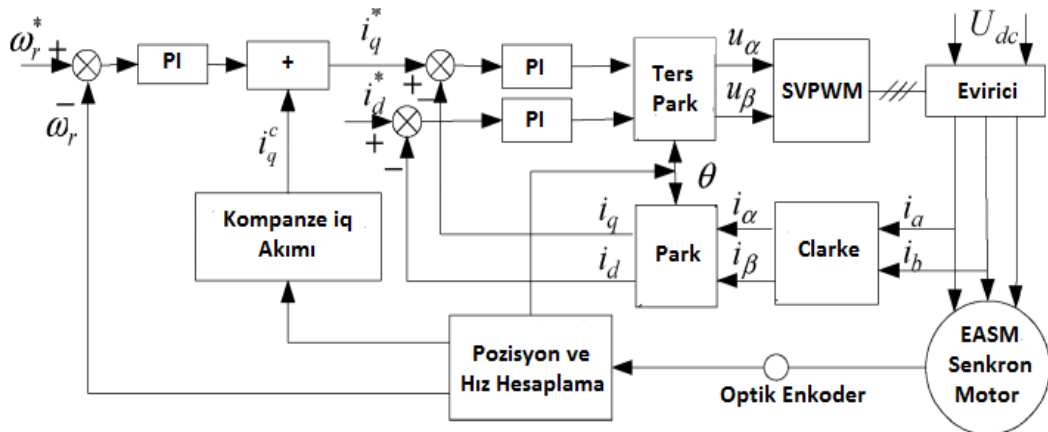
3D SEA ile hesaplanan vuruntu momentinin, Denklem (4.5)’deki gibi Fourier serisi açılımı ile harmonik bileşenleri hesaplanabileceği gibi MATLAB programında yazılan kod ile Fourier analizi de yapılabilir. Bu çalışmada Fourier analizi için MATLAB’de kod yazılarak hesaplanan harmonik bileşenler Şekil 4.14’de verilmiştir.



Şekil 4.14. EASM senkron motorun 3D SEA vuruğu momentinin harmonik analizi

4.4. EASM Senkron Motorun Vuruğu Momentinin Harmonik Akım Ekleme ile Azaltılmasının MATLAB/Simulink Benzetimi

Bu bölümde, EASM senkron motorun vuruğu momentinin harmonik akım ekleme metodu kullanılarak azaltılması için MATLAB/Simulink programında gerçekleştirilen benzetim çalışması hakkında bilgi verilerek, Simulink benzetim sonuçlarına değinilmiştir. Literatür incelemesinde gözlenen ve MATLAB//Simulink benzetiminde kullanılacak genel blok şeması Şekil 4.15’de verilmiştir.

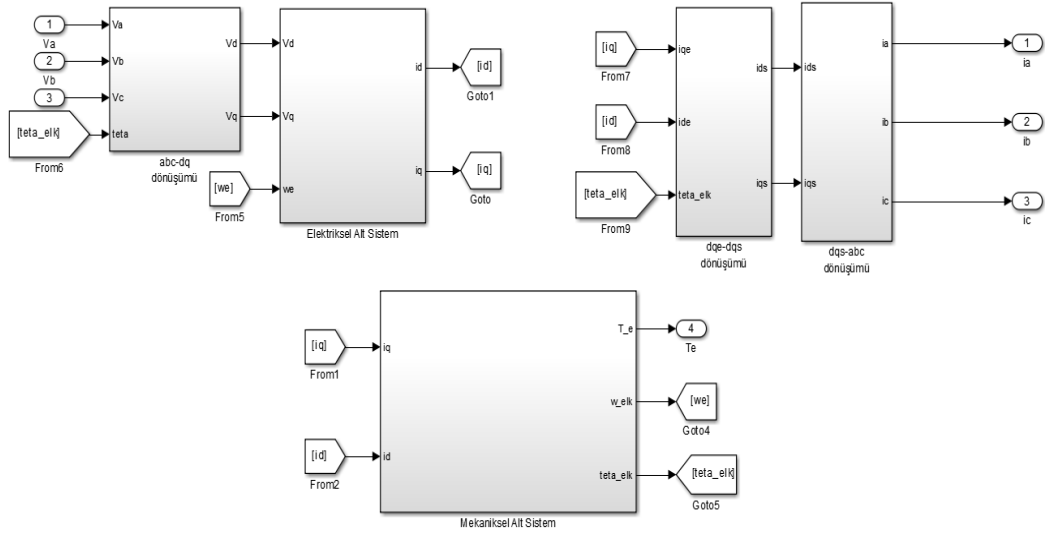


Şekil 4.15. Harmonik akım ekleme için önerilen blok şemasının genel yapısı

Şekil 4.15’de önerilen blok şemasında harmonik akım ekleme metodunun modellenmesine geçmeden önce, motor kontrolü için oluşturulan hız kontrol

döngüsü hakkında genel bilgi aktarımı, blok şemasının matematiksel modellenmesi ve MATLAB/Simulink programında yapılan benzetim çalışması verilmiştir. Servo sürücüler genellikle iki dahili akım kontrol döngüsü (q ve d eksenleri), bir hız kontrol döngüsü ve bir harici pozisyon kontrol döngüsü içerir. Bu benzetim çalışmasında EASM senkron motorun hız kontrolü üzerine çalışmalar yapılmıştır. EASM senkron motor kontrol sisteminde, akıyı ve momentü kontrol eden iki akım döngüsü vardır. Akı, d-eksen akımı ile orantılı bir PI denetleyici tarafından kontrol edilirken, moment ise q-eksen akımı ile orantılı bir PI denetleyici tarafından kontrol edilmektedir. EASM senkron motor kontrolü için Şekil 4.15’de önerilen blok şemasında, d-eksen referans akımı sıfır olarak ($i_d^* = 0$) düşünülmüştür. Sürücü sistemlerinde bulunan inverterin doygunluğu göz ardı edilirse, q-eksen akımı ile üretilen moment arasında doğrusal bir ilişkiye sahip olduğu bilinmektedir.

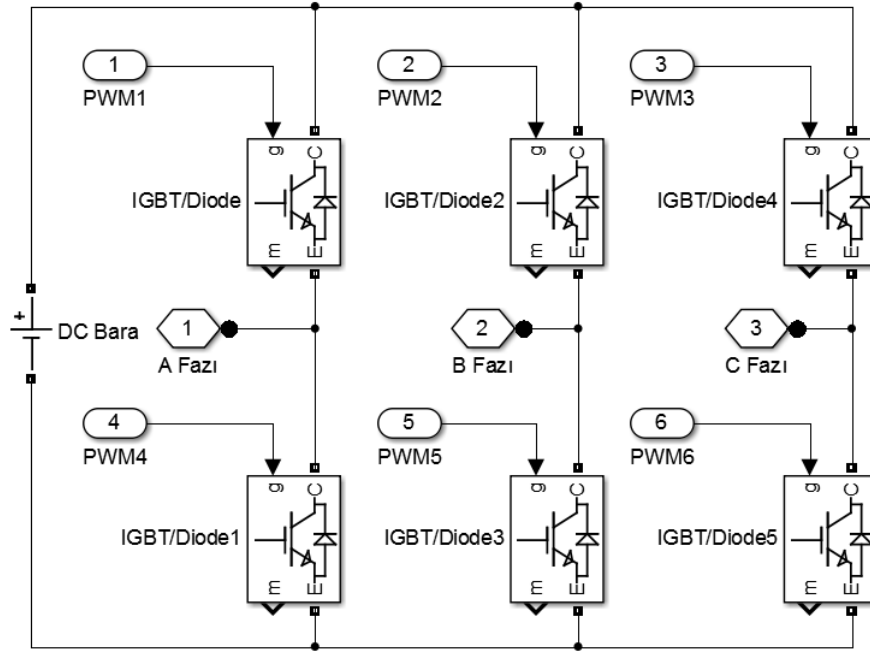
Motor kontrol benzetim çalışmasına, ilk olarak sistemde kullanılacak ve tez konusu olan senkron motorun matematiksel modelinin oluşturulmasıyla başlanmıştır. Simulink benzetimi Bölüm 2.3’de anlatıldığı gibi oluşturularak elde edilen benzetim modeli Şekil 4.16’de gösterilmiştir. Motor kontrolü için oluşturulan inverter yapısının blok şeması Şekil 4.17’deki gibi Simulink’de oluşturulmuştur.



Şekil 4.16. EASM senkron motorun Simulink modeli

Tablo 4.2. Simulink benzetim çalışmasında kullanılan EASM senkron motorun temel parametreleri

Kutup Sayısı(P_r)	8
Oluk Sayısı(P_s)	24
Stator Direnci(R_{f-f})	188 m Ω
Endüktans(L_{f-f})	522.6 μ H
Zıt-EMK Katsayısı(K_e)	0.0758 V/krpm
Tork Katsayısı(K_t)	0.8 Nm/Arms



Şekil 4.17. Üç fazlı evirici Simulink modeli

Kontrolör katsayı hesaplamalarında Denklem (4.18) ile Denklem (4.21) arasında belirtildiği gibi motorun elektriksel ve mekaniksel verileri kullanılarak yapılmaktadır. Akım ve hız döngülerinde kullanılacak PI kontrolörün katsayıları hesaplamaları MATLAB’de yapılmıştır. Hesaplanan katsayılarla ilgili olarak kök-yer eğri grafikleri ve birim basamak sinyaline verilen cevapları inceleyerek katsayıların değerleri belirlenmiştir. Akım ve hız döngüsü için kontrolörlerin birim basamak sinyaline cevapları Şekil 4.18’deki gibi verilmiştir.

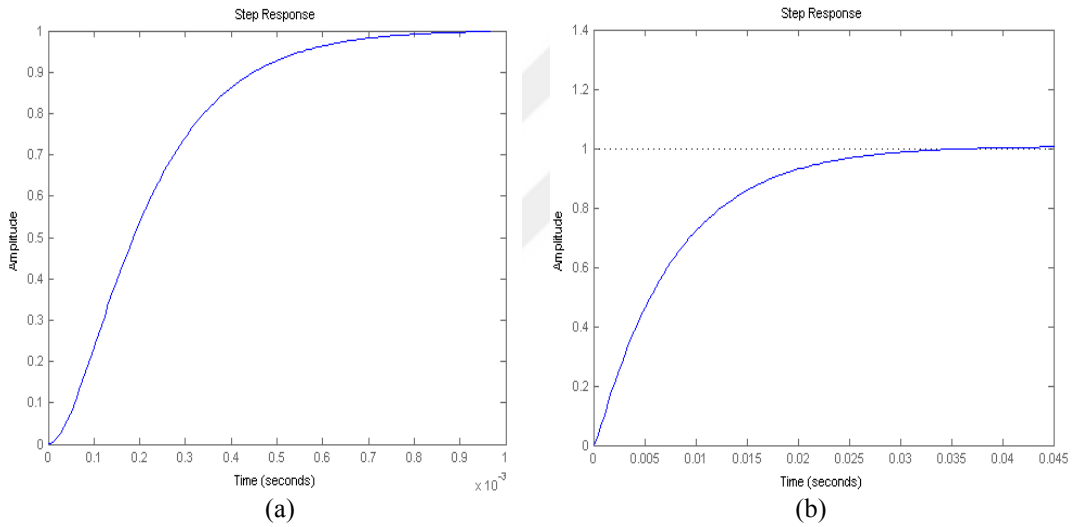
$$K_{p_c} = w_{bw_c} \times L \quad (4.18)$$

$$K_{i_c} = w_{bw_c} \times R \quad (4.19)$$

$$K_{p_s} = w_{bw_s} \times J / K_t \quad (4.20)$$

$$K_{i_s} = w_{bw_s} \times B / K_t \quad (4.21)$$

Denklem (4.18) ile Denklem (4.21) arasında, w_{bw_c} akım döngüsünün bant genişliğini, L motor endüktansını, R motor direncini, w_{bw_s} hız döngüsünün bant genişliğini, J motorun ataletini, K_t motorun tork katsayısını ve B motorun viskoz sürtünmesini ifade etmektedir.

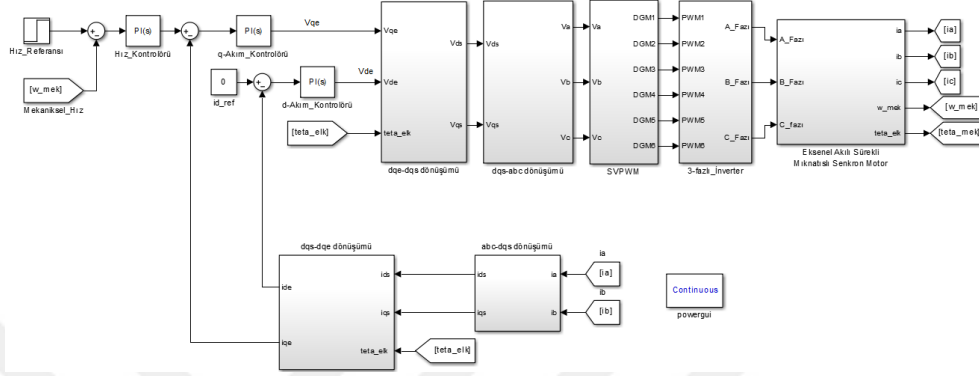


Şekil 4.18. Akım kontrolörünün birim basamak cevabı (a), hız kontrolörünün birim basamak cevabı (b)

Tablo 4.3. Kontrolör kazanç değerleri

Kontrolör	Kp	Ki	Kd
Akım	5.54	826.87	0
Hız	0.1688	2.5626	0

EASM senkron motorun hız kontrolü yapılırken vektör kontrol metodu kullanılmıştır. Matematiksel modeli Bölüm 3.2.3’de anlatıldığı gibi oluşturulmuştur. Sistemde oluşturulan tüm matematiksel modeller birleştirilerek EASM senkron motorun hız kontrolünün Simulink benzetim modeli Şekil 4.19’deki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 4.19. EASM senkron motorun hız kontrolünün Simulink modeli

Q-eksen akımı ile üretilen sistem momentini arasındaki doğrusal ilişki dikkate alınarak, vuruğu momentinin sistem momentinde oluşturduğu dalgalanmayı yok etmek için q-eksen referans akımına harmonik akımlar eklenerek bu dalgalanmayı yok edecek elektromanyetik moment bileşenleri sisteme dahil edilmektedir. Bahsedilen moment bileşenlerinin hesaplanması için öncelikle motorda oluşan vuruğu momentinin tespitinin yapılması gerekmektedir. Tespit edilen vuruğu momentinin Fourier analizi yapılarak harmonik bileşenleri elde edilmelidir. Vuruğu momentinin tespiti, harmonik analizi ve q-eksen referans akıma eklenecek harmonik akımların hesabı Bölüm 4.1 ve Bölüm 4.2’de detaylı bir şekilde anlatılmıştır. MATLAB/Simulink benzetim çalışmasında EASM senkron motorun 3D SEA’da tespit edilen vuruğu momentinin azaltılması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bölüm 4.3’de, Şekil 4.14’de gösterilen harmonik bileşenleri düzenlenerek Tablo 4.4’de verilmiştir.

Tablo 4.4. EASM senkron motorun vuruğu momentinin harmonik bileşenleri

Harmonik Derecesi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vur. Momenti [Nm]	0.858	0.47	0.121	0.0352	0.0608	0.0263	0.0143	0.0092	0	0

Tablo 4.4’de görüldüğü gibi vuruğu momentinin harmonik bileşen genlikleri büyük olan temel, ikinci, üçüncü ve beşinci bileşenleri oluşturan harmonik akımların hesabı

Denklem (4.15) kullanılarak yapılmıştır. Vuruntu momentini oluşturan harmonik akım bileşenlerinin matematiksel modeli çıkarılarak Denklem (4.22) ile Denklem (4.25) arasında verilmiştir. Harmonik akımların hesaplamasında kullanılan motor parametreleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

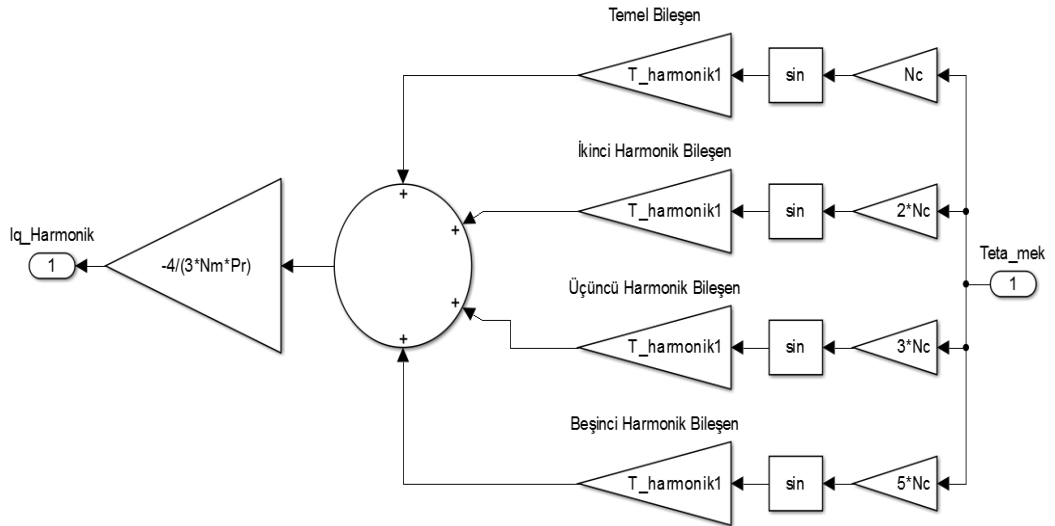
$$i_{q}^{\text{harmonik}_1} = \frac{-4 \times 0.858 \times \sin(24 \times \theta_m)}{3 \times 0.1895 \times 8} = -0.7546 \times \sin(24 \times \theta_m) \quad (4.22)$$

$$i_{q}^{\text{harmonik}_2} = \frac{-4 \times 0.47 \times \sin(2 \times 24 \times \theta_m)}{3 \times 0.1895 \times 8} = -0.4134 \times \sin(48 \times \theta_m) \quad (4.23)$$

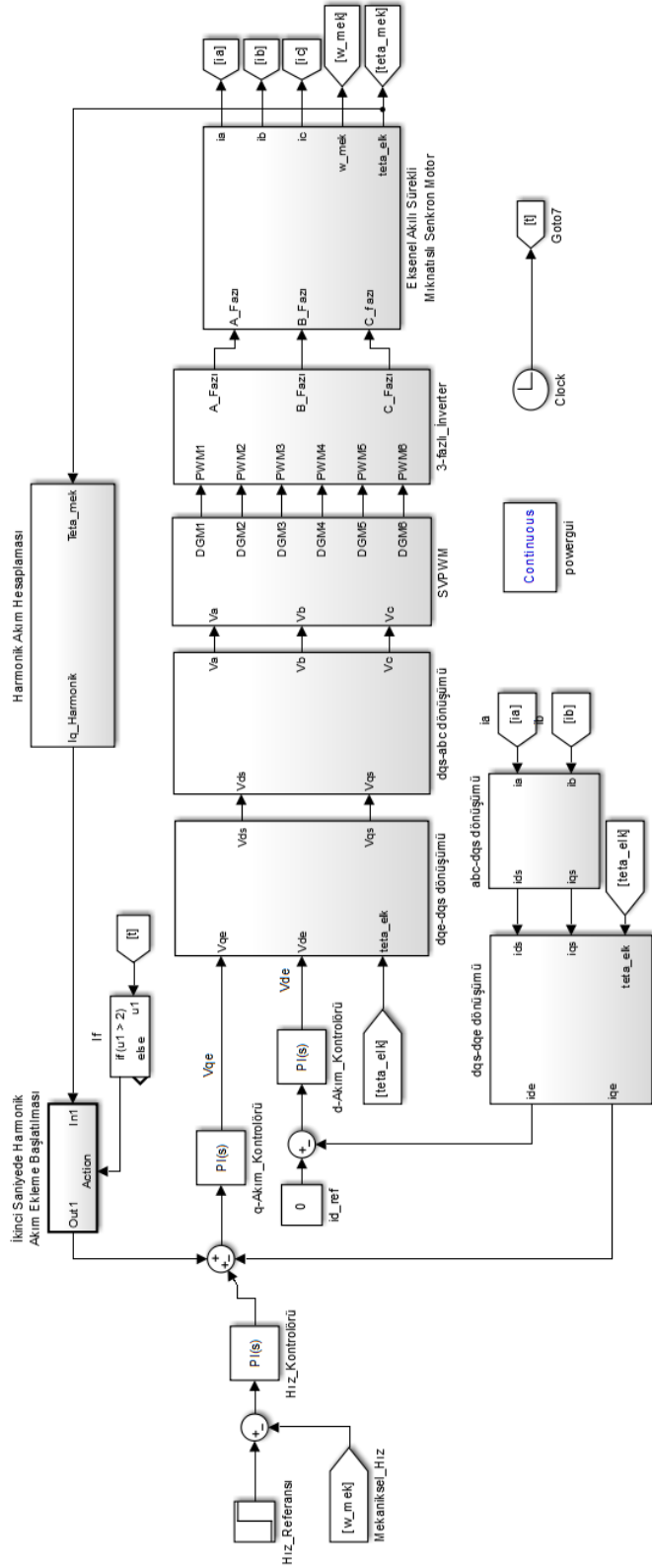
$$i_{q}^{\text{harmonik}_3} = \frac{-4 \times 0.121 \times \sin(3 \times 24 \times \theta_m)}{3 \times 0.1895 \times 8} = -0.1064 \times \sin(72 \times \theta_m) \quad (4.24)$$

$$i_{q}^{\text{harmonik}_5} = \frac{-4 \times 0.0608 \times \sin(5 \times 24 \times \theta_m)}{3 \times 0.1895 \times 8} = -0.0535 \times \sin(120 \times \theta_m) \quad (4.25)$$

Denklem (4.22) ile Denklem (4.25) arasında hesaplanan harmonik akımların MATLAB/Simulink programında oluşturulan blok şeması Şekil 4.20’de verilmiştir. Oluşturulan harmonik akım bloğu Şekil 4.15’de önerilen blok şeması referans alınarak Şekil 4.19’de gösterilen MATLAB/Simulink’de oluşturulan EASM senkron motorun hız kontrol modeline eklenerek harmonik akım ekleme metoduyla azaltılması üzerine simülasyon çalışmalar yapılmıştır.



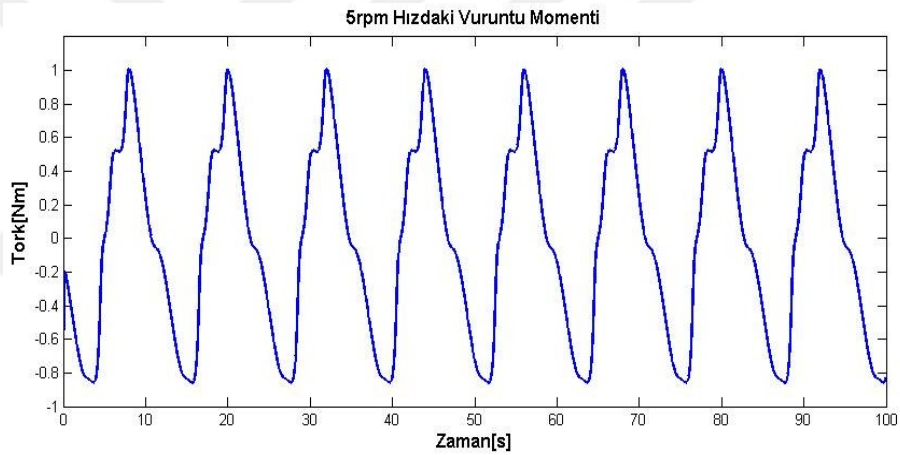
Şekil 4.20. Harmonik akım hesaplamasının Simulink modeli



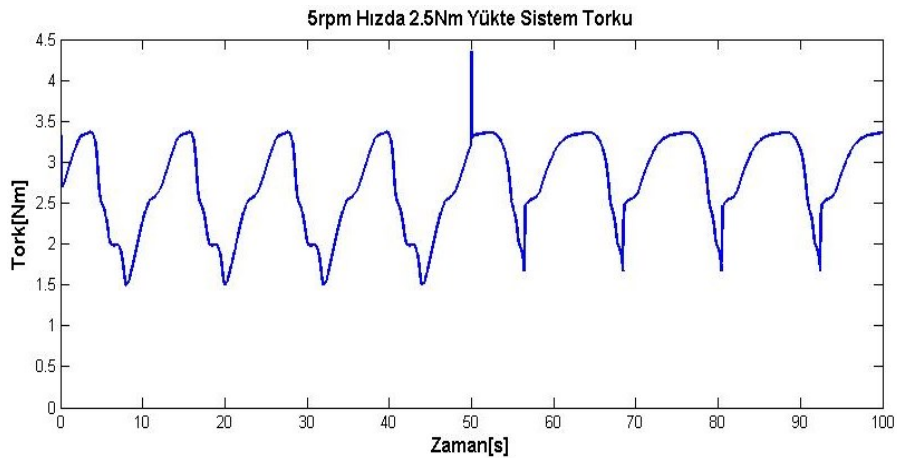
Şekil 4.21. EASM senkron motorun harmonik akım ekleme metodu ile vurutu momentinin azaltılması çalışmasının Simulink modeli

Şekil 4.21’de gösterilen MATLAB/Simulink benzetim çalışmasında, tespit edilen vuruğu momenti üzerinden farklı hızlarda ve farklı yüklerde vuruğu momentinin harmonik akım ekleme metoduyla azaltılması üzerine simülasyon çalışmaları yapılmıştır.

5rpm hızda çalışırken sistemde oluşan vuruğu momenti Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Aynı hızda simülasyon 2.5Nm ve 4.5Nm yükte gerçekleştirilmiş olup 50. Saniye q-eksen referans akımına harmonik akım ekleme ile vuruğu momenti azaltmaya yönelik çalışma gerçekleştirilmiş olup, elde edilen sistem momenti sırasıyla Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’de gösterilmiştir. Sistem 5rpm hızda çalışırken harmonik akım ekleme metodu uygulandığında sistemde momentte oluşan dalgalanmanın değişim miktarı Tablo 4.5 ve Tablo 4.6’de verilmiştir.



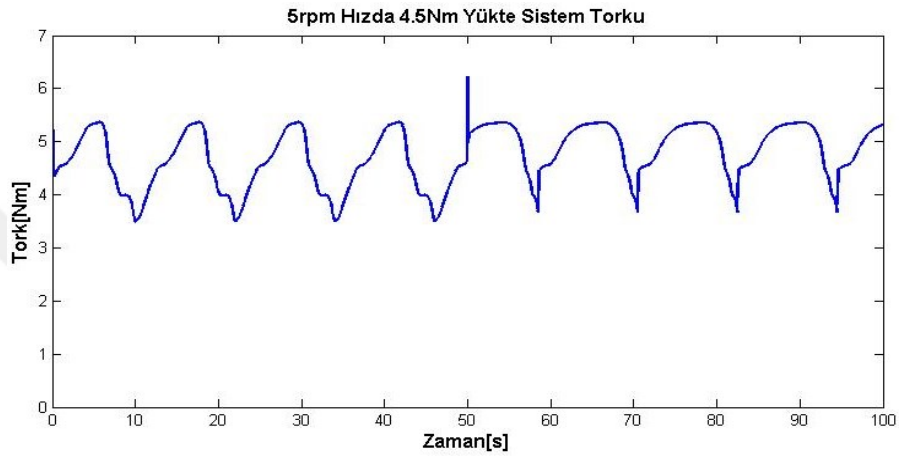
Şekil 4.22. 5rpm hızda vuruğu momenti



Şekil 4.23. 5rpm hızda 2.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi

Tablo 4.5. 5rpm hızda 2.5Nm yükte sistem moment değeri

	T_{mak}	T_{min}	T_{ort}	T_{ripp}
	[Nm]	[Nm]	[Nm]	[%]
Harmonik Eklenmemiş	3.365	1.498	2.432	76.784%
Tüm Harmonikler Eklenmiş	3.360	1.670	2.515	67.197%



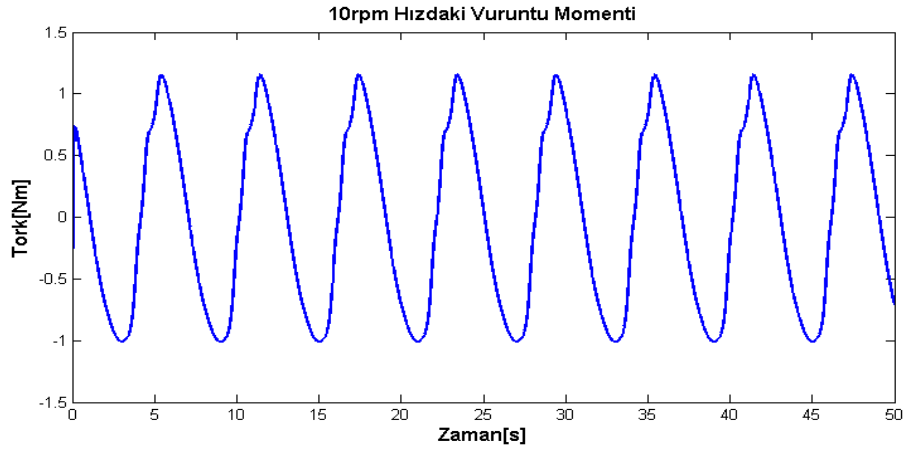
Şekil 4.24. 5rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi

Tablo 4.6. 5rpm hızda 4.5Nm yükte sistem moment değeri

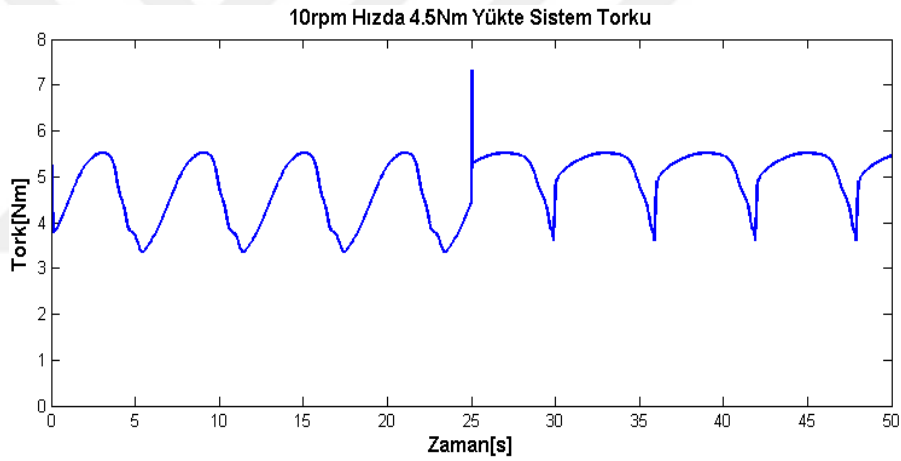
	T_{mak}	T_{min}	T_{ort}	T_{ripp}
	[Nm]	[Nm]	[Nm]	[%]
Harmonik Eklenmemiş	5.366	3.498	4.432	42.161%
Tüm Harmonikler Eklenmiş	5.362	3.669	4.515	37.206%

10rpm hızda çalışırken sistemde oluşan vuruğu momenti Şekil 4.25’de gösterilmiştir. Sistem atalaeti nedeniyle vuruğu dalga şekli daha düzgün görülmekte, vuruğu momentinin hatları net görülememektedir. 10rpm hızda simülasyon 4.5Nm yükte gerçekleştirilmiş olup 25. saniyede q-eksen referans akımına harmonik akım ekleme ile vuruğu momenti azaltmaya yönelik çalışma gerçekleştirilmiş olup, elde edilen sistem momenti Şekil 4.26’de gösterilmiştir. Sistem 10rpm hızda çalışırken

harmonik akım ekleme metodu uygulandığında sistemde momentte oluşan dalgalanmanın değişim miktarı Tablo 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.25. 10rpm hızda vuruntu momentini



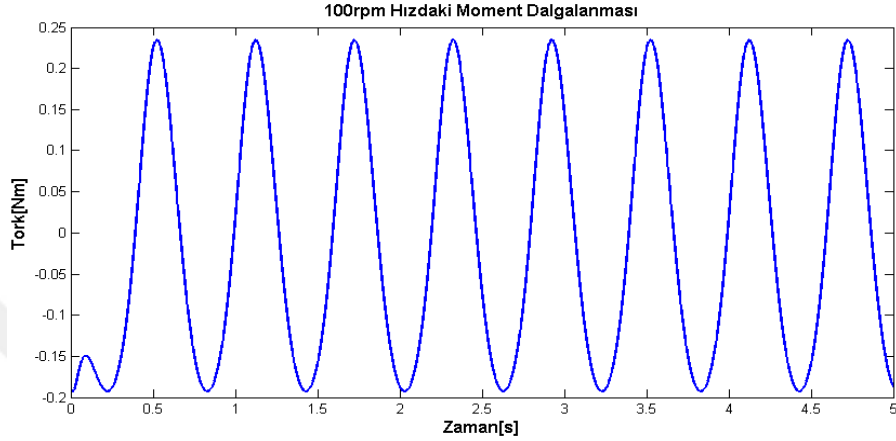
Şekil 4.26. 10rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi

Tablo 4.7. 10rpm hızda 4.5Nm yükte sistem moment değeri

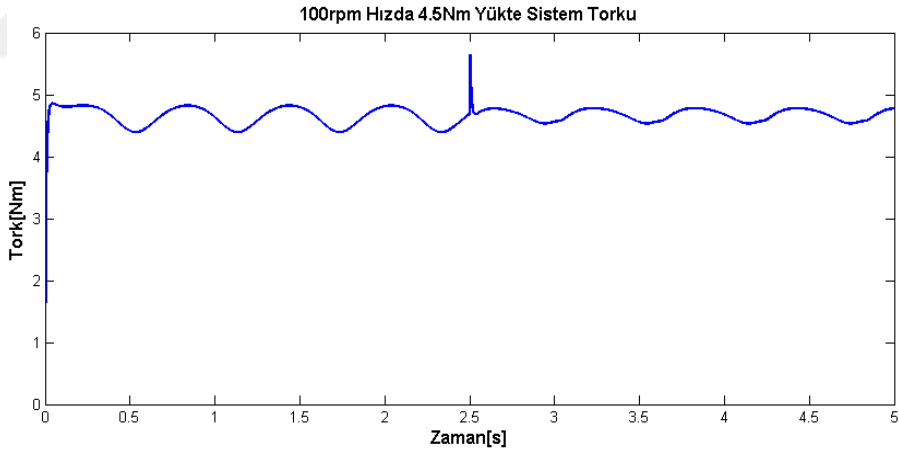
	T_{mak}	T_{min}	T_{ort}	T_{ripp}
	[Nm]	[Nm]	[Nm]	[%]
Harmonik Eklenmemiş	5.523	3.358	4.441	48.765%
Tüm Harmonikler Eklenmiş	5.515	3.620	4.568	41.494%

100rpm hızda çalışırken sistemde oluşan moment dalgalanması Şekil 4.27’da gösterilmiştir. 100rpm hızda simülasyon 4.5Nm yükte gerçekleştirilmiş olup 2.5.

saniyede q-ksen referans akımına harmonik akım ekleme ile vurutu momenti azaltmaya yönelik çalışma gerçekleştirilmiş olup, elde edilen sistem momenti Şekil 4.28’de gösterilmiştir. Sistem 100rpm hızda çalışırken harmonik akım ekleme metodu uygulandığında sistemde momentte oluşan dalgalanmanın değişim miktarı Tablo 4.8’de verilmiştir. Bu hızda vurutu değişiminin alınamayacağı da özellikle vurgulanmalıdır.



Şekil 4.27. 100rpm hızda moment dalgalanması



Şekil 4.28. 100rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentini değişimi

Tablo 4.8. 100rpm hızda 4.5Nm yükte sistem moment değeri

	T_mak	T_min	T_ort	T_ripp
	[Nm]	[Nm]	[Nm]	[%]
Harmonik Eklenmemiş	4.823	4.394	4.609	9.309%
Tüm Harmonikler Eklenmiş	4.780	4.534	4.657	5.293%

EASM Motor-1'in elektriksel ve mekaniksel verileri kullanılarak MATLAB/Simulink ortamında benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Harmonik akım ekleme yöntemi ile vuruuntu momentinden dolayı oluşan moment dalgalanmasının azaltılması farklı hızlarda ve yüklerde yapılarak sonuçlar tablo halinde verilmiştir. Böylelikle yapılan çalışmanın doğruluğu benzetim çalışmasının sonuçları ile gösterilmiştir.



5. TEST SİSTEMİ VE DENEYSEL SONUÇLAR

Bu çalışmada önerilen harmonik akım ekleme metodu uygulanırken motor kontrolü için vektör kontrol yöntemini kullanılmıştır. Bu tez kapsamında, daha önceden stator ve rotoru tasarlanıp üretilen EASM motorun montajı yapılarak prototipi oluşturulmuştur. Prototipin boşta ve yükte testlerinin yapılabilmesi için test düzeneği tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan test düzeneğinde prototipi oluşturulan EASM senkron motorun farklı yükte ve farklı hızlarda çalıştırılarak harmonik akım ekleme metodu ile vuru momentinin azaltılması için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 5.1’de, tez kapsamında kullanılacak motorun montajının yapılması, stator sargılarının bağlantısı, elektriksel(direnç ve endüktans) verilerin RLC metre ile ölçülmesi, tez sistemi tasarımı için yapılan mekanik çizimler, tez sisteminde dinamo olarak kullanılan sürücü ve motor özellikleri ve tez kapsamında kullanılan kontrol kartı ile inverter yapısı kullanılan SMB SD-LP-15-M sürücünün özellikleri verilmiştir.

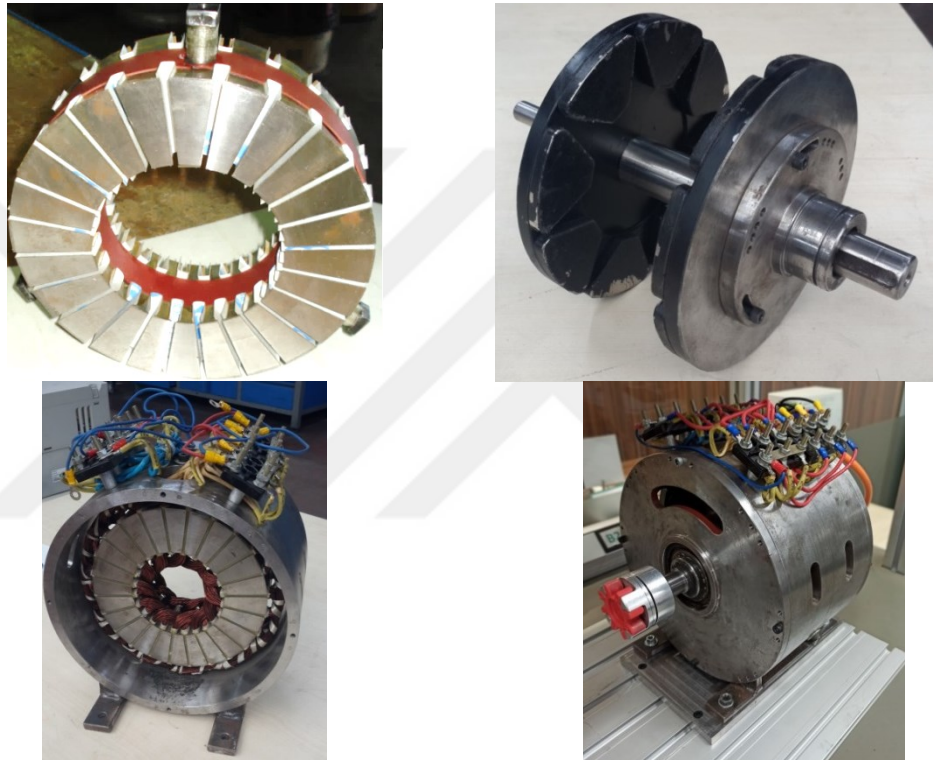
Bu bölümde ise tez konusu olan harmonik akım ekleme ile vuru momentinin azaltılmasına yönelik yapılan deneysel testler ile alınan sonuçlar verilerek, sonuçların yorumlamaları yapılmıştır.

5.1. Test Sistemi

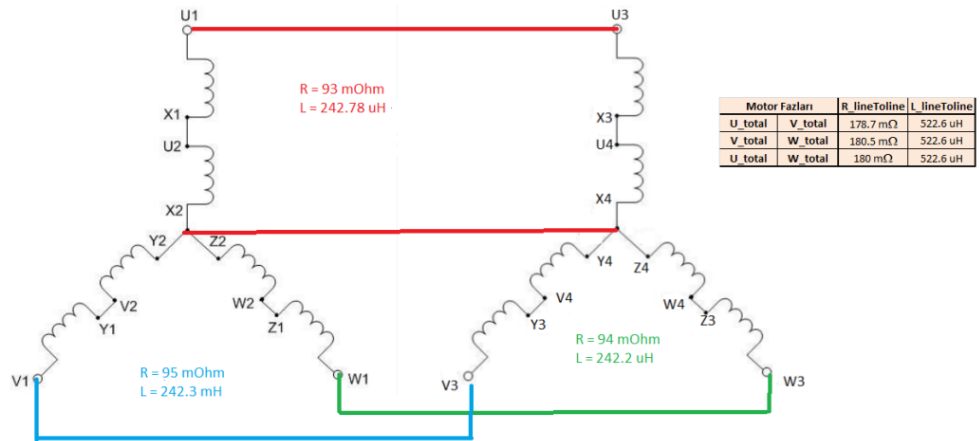
Bu tez kapsamında özel olarak tasarlanan EASM senkron motor kullanılmıştır. Tez kapsamında kullanılan EASM senkron motorun statoru, rotoru ve motorun montaj yapılmış son hali Şekil 5.1’de verilmiştir.

Motorun statorunda 3-faz (U, V, W) 4 farklı sargı bulunmaktadır. Motorun stator bağlantısı ilk olarak 1. sargı grubu ile 2. sargı grubu kendi arasında yıldız bağlı, 3. sargı grubu ile 4. sargı grubu kendi arasında yıldız bağlı olacak şekilde bağlantı yapılmıştır. İkinci olarak yıldız bağlantılı şekilde oluşturulan iki grup sargı paralel olarak bağlanarak motorun stator bağlantısı tamamlanmıştır. Motor bağlantısı

yapıldıktan sonra RLC metre ile motorun faz-faz endüktans ve direnç değerlerinin ölçümü yapılmıştır. Şekil 5.2’de motor bağlantısı gösterilerek, elektriksel veriler faz-faz ve faz-nötr olacak şekilde değerleri verilmiştir. Tez kapsamında EASM senkron motor statoru iki farklı rotor yapısı ile montajı yapılarak, iki farklı motor elde edilmiştir. Bu motorlar EASM Motor-1 ve EASM Motor-2 olarak adlandırılmıştır. Deneysel çalışmalar her iki motor için için tekrarlanmıştır. Her iki EASM senkron motorun parametreleri ise Tablo 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Tezde deneysel çalışmalarda kullanılan EASM senkron motor

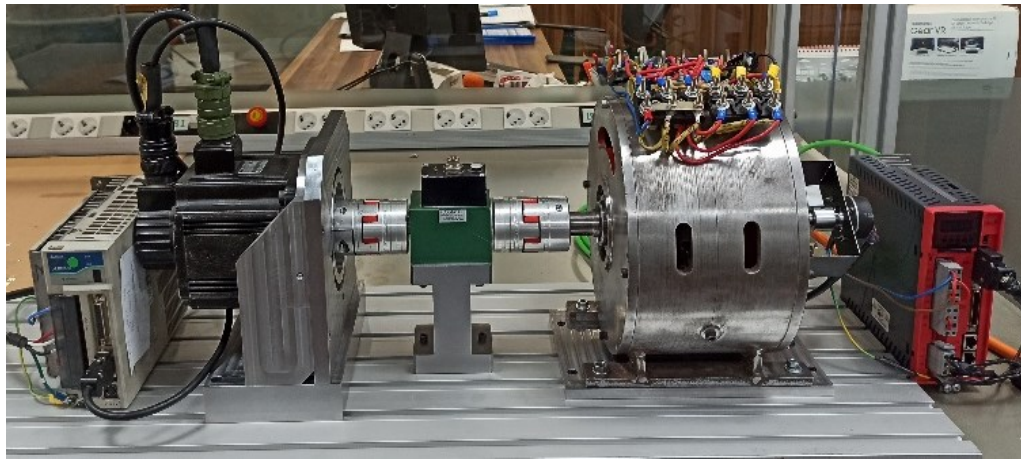


Şekil 5.2. Referans EASM senkron motorun stator bağlantı şekli ve elektriksel verileri

Tablo 5.1. EASM senkron motorların özellikleri

	EASM Motor - 1	EASM Motor - 2
Hava Aralığı	0.8 mm	2 mm
Stator Dış Çapı	178 mm	178 mm
Stator İç Çapı	100 mm	100 mm
Kutup Sayısı(P_r)	8	8
Oluk Sayısı(P_s)	24	24
Oluk/Kutup/Faz	1	1
Mıknatıs Tipi ve Şekli	Üçgen NdFeB	Üçgen NdFeB
Stator Direnci(R_{f-f})	188 m Ω	188 m Ω
Endüktans(L_{f-f})	522.6 uH	522.6 uH
Zıt-EMK Katsayısı(K_e)	0.0758 V/krpm	0.043 V/krpm
Tork Katsayısı(K_t)	0.8 Nm/Arms	0.52 Nm/Arms
Vuruntu Momentinin Tepe Değeri	1.25 Nm	0.55 Nm

Tez konusu olan EASM senkron motorun harmonik akım ekleme metoduyla vuruntu momentinin azaltılması için boşa ve yükte testlerinin yapılması gerekmektedir. Bu tez kapsamında bu testlerin yapılarak deneysel verilerin alınabilmesi için Şekil 5.3'deki motor test düzeneği oluşturulmuştur.



Şekil 5.3. Motor test düzeneği

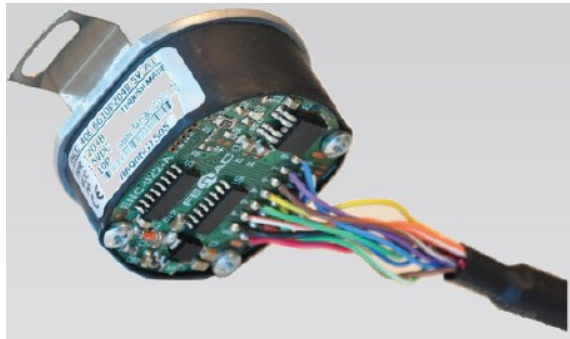
Bu test düzeneğinde, Akım Metal Ar-Ge Merkezinde tasarlanan ve üretilen SMB SD-LP-15-M kodlu endüstriyel servo sürücü kontrol kartı kullanılarak tez

kapsamında önerilen harmonik akım ekleme algoritmasının yazılımı yapılmıştır. Harmonik akım ekleme algoritmasının dışında sürücünün donanımı kullanılarak, EASM senkron motorun kontrolü için vektör kontrol algoritması, dönüşüm blokları, konum ve hız hesaplamalarının yazılımları da yapılmıştır. Şekil 5.4’de gösterilen SMB SD-LP-15-M kodlu endüstriyel servo sürücünün teknik özellikleri EK-A’da belirtilmiştir.



Şekil 5.4. SMB marka endüstriyel motor sürücü

EASM senkron motorun konum bilgisini almak için FENAC firmasının Şekil 5.5’de gösterilen FNC-40EB kodlu artımlı enkoderi kullanılmış olup teknik özellikleri EK-B’de verilmiştir.



Şekil 5.5. FENAC FNC-40EB kodlu enkoder

Motor test düzeneğini oluşturmak için çizimler SOLIDWORKS programı kullanılarak yapılmıştır. EASM senkron motorun test sistemine montajının yapılabilmesi için tasarlanan parçanın teknik çizimi EK-C’de verilmiştir. Bu test düzeneğinde dinamo olarak Delta firmasının ASD-B1521-A kodlu servo sürücüsü ile sürekli mıknatıslı ECMA-E31315GS kodlu senkron motor kullanılmıştır. Sürücünün ve motorun teknik özellikleri EK-D’de belirtilmiştir. Test sisteminde dinamo motorunun montajının yapılabilmesi için tasarlanan parçaların teknik çizimi EK-D’de sunulmuştur.

Sistemde oluşan torku ölçmek için Burster marka bir torkmetre kullanılmış olup teknik özellikleri EK-E’de verilmiştir. Test sisteminde torkmetrenin montajının yapılabilmesi için tasarlanan parçanın teknik çizimi ise EK-E’de verilmiştir.

5.2. Fourier Analizi ile Harmonik Akım Ekleme Yöntemi

Bu bölümde EASM senkron motorun vuruğu momentinin harmonik akım ekleme metoduyla azaltılması üzerine deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalar yapılırken iki farklı rotor ile farklı hızlarda ve farklı yüklenme durumların sistem momentinde oluşan dalgalanmanın azaltılması üzerine çalışmalar yapılarak, elde edilen sonuçlar bu bölümde verilmiştir. Her iki rotor yapısı ile çalışırken akım sabit tutularak hem motorun tork katsayısının değişimine bağlı olarak alınan sistem momenti incelenerek hem de harmonik akım ekleme metodu ile vuruğu momentinden dolayı oluşan moment dalgalanmasının azaltılması üzerine çalışmalar yapılmıştır.

EASM senkron motorun vuruğu momentinin azaltılması için, ilk önce motorun çalışması planlanan hızlarda vuruğu momenti tespit edilerek Fourier analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonucunda elde edilen harmonik bileşenler hıza bağlı olarak yazılımda oluşturulan bir tabloya aktarılmıştır. Deneysel çalışmada ise, hıza bağlı olarak ilgili parametreler bu tablodan çekilmiş ve 50us’lik(20kHz’lik) tork döngüsünde harmonik akım ekleme yöntemi uygulanarak vuruğu momentinin etkisinin azaltılması üzerine çalışma yapılmıştır.

İlk olarak EASM senkron motorun düşük hızlarda vuruğu momentinden kaynaklanan moment dalgalanmasının azaltılması için harmonik akım ekleme

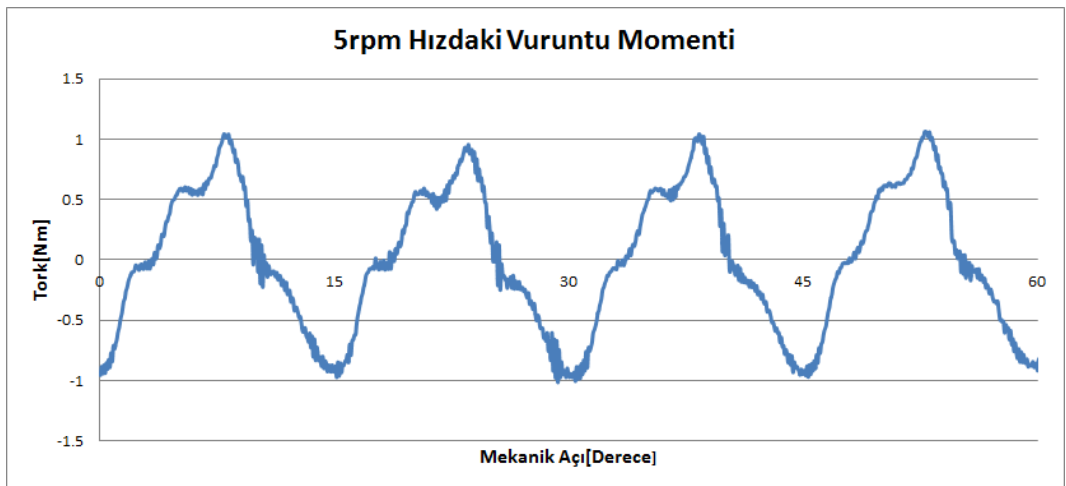
metodunun deneysel çalışması yapılmıştır. Bölüm-4.4’de anlatıldığı gibi çalışma yapılarak, sonuçlar EASM Motor-1 ve Motor-2 olmak üzere iki farklı motor için alınmıştır.

5.2.1. EASM Motor – 1 için vurutu momenti ve moment dalgalanmasının azaltılması

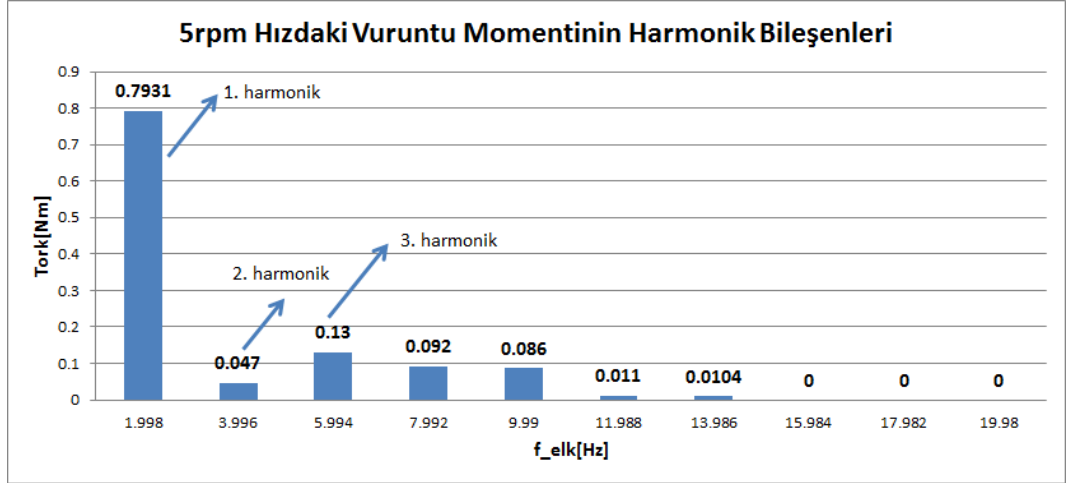
EASM Motor-1 için harmonik akım ekleme yöntemi ile vurutu momentinin azaltılması için yapılan deneysel çalışmalar düşük hızda 5rpm ve 10rpm’de, yüksek hızda ise 100rpm’de gerçekleştirilmiştir. Detaylı çalışma 5rpm hızda iki farklı akım bölgesinde çalışma yapılarak sonuçlar alınmıştır. 5rpm hızda yapılan testlerde elde edilen sonuçlar doğrultusunda 10rpm ve 100rpm hızda yapılacak deneysel çalışmalarda sadece ilk iki harmonik akımın eklenmesinin yeterli olduğu görülerek ve tek bir akım değerinde deneysel testler gerçekleştirildi..

5.2.1.1. Motor – 1’e 5rpm hızda harmonik akım ekleme

Sistemde dinamo olarak kullanılan Delta Asda-B sürücü ile sistem 5rpm hızda tahrik edilerek EASM senkron motorun vurutu momenti, mekanik açıya bağlı olarak Şekil 5.6’deki gibi elde edilmiştir. Vurutu momentinin MATLAB’de Fourier analizi yapılarak harmonik bileşenleri elde edilmiş olup bu bileşenler Şekil 5.7’de gösterilmiştir.



Şekil 5.6. 5rpm hızda vurutu momenti



Şekil 5.7. 5rpm hızda vuruntu momentinin harmonik bileşenleri

Vuruntu momentinin harmonikleri tespit edildikten sistemde vuruntu momentinden dolayı oluşan momentteki dalgalanmayı azaltmaya yönelik harmonik ekleme metodu için çalışma yapılmıştır. Şekil 5.7’de hesaplanan vuruntu bileşenini oluşturan harmoniklerin moment değerlerinden akım değerleri, Denklem (5.15) kullanılarak hesaplanarak, farklı harmonik akımların birlikte sisteme eklenme durumlarına göre hesaplanan akımların RMS değerleri bu bölümdeki tablolarda verilmiştir. Eklene harmonik akımların frekansı ise Denklem (5.8)’de belirtildiği gibi harmoniğin derecesine, rotor kutup sayısı ile stator oluk sayısının en küçük ortak katına göre bulunmaktadır. Bu değer, motor için hesaplandığında 24 olarak bulunmaktadır. Dinamo 5rpm hızda çalıştırılarak SMB SD-LP sürücü tork modunda çalıştırılmış ve q-eksen referans akımına harmonik akım ekleme metodu uygulanmıştır. Bu çalışma 5rpm hızda 3Arms ve 6Arms akım değerinde, sırasıyla ortalama 2.5Nm yükte ve 4.5Nm yükte tekrarlanmıştır.

EASM sekron Motor-1 5rpm hızda 2.5 Nm yükte çalışırken q-eksen akımına uygulanan harmonik akım ekleme yöntemiyle momentte, vuruntu momentinden dolayı oluşan dalgalanmanın azaltılması incelenmiştir. q-eksen akımına farklı harmonik bileşenler eklenerek faz akımının dalga şekli ve RMS değeri, momentte oluşan dalgalanmanın değişim miktarı incelenmiştir. Momentin değeri, bakır kayıpları ve faz akımının RMS değerindeki değişim Tablo 5.2’de, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da verilmiştir. Tablo 5.2’de, vuruntu momentinin etkisini yok etmek için Denklem (5.15)’e göre hesaplanarak eklenen altı farklı harmonik akım bileşenlerinin ve sürücünden motora temel olarak uygulanan akımın RMS değerleri verilmiştir.

Harmonik akımlarının frekansı, temel akımın mekanik frekansının “24 x k” katı veya elektriksel frekansın “6 x k” katı kadar olduğu Denklem (5.8)’e göre bilinmektedir. Burada “k” harmonik akımın derecesini ifade etmektedir. Şekil 5.8’de hesaplanan harmonik akımların dalga şekilleri gösterilmiştir. Şekil 5.9’de ise motora uygulanan harmonik akım eklemelerine göre akımın dalga şeklinin değişimi sırası ile verilmiş olup, Tablo 5.2’de motordan akımlara bağlı olarak bakır kayıplarının 2.42W’dan 2.63W’a arttığı gösterilmiştir. Şekil 5.10’da ise harmonik akım ekleme yöntemiyle vuru momentinin etkisinden kaynaklanan dalgalanmanın %83.44’dan %66.57’ye azaltılabildiği gösterilmiş, tork dalgalanmasındaki değişim ise yaklaşık %17 olduğu görülmektedir.

Tablo 5.2. 5rpm hızda 2.5Nm yükte faz akımının, momentin ve bakır kaybının değeri

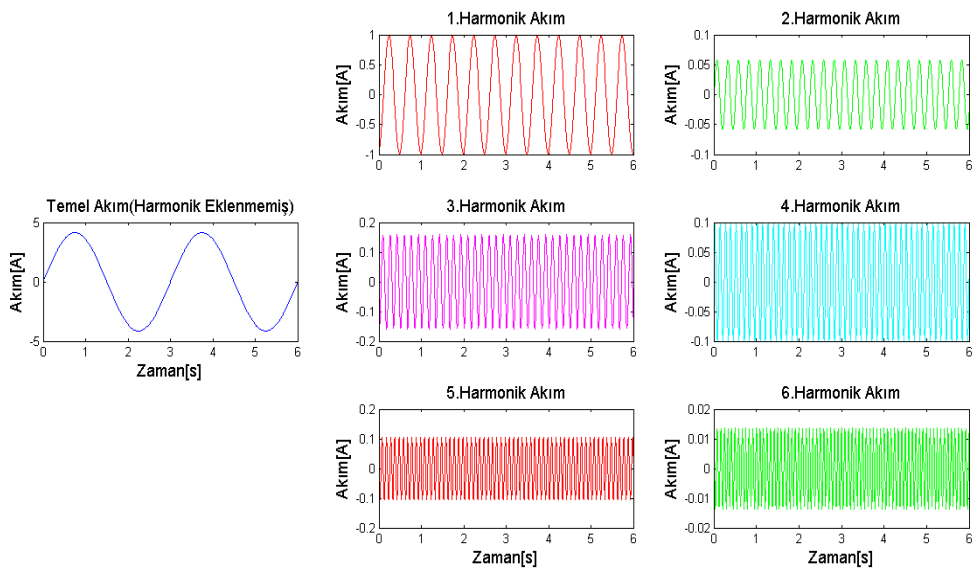
	I_fund [Arms]	I_har [Arms]	T_ort [Nm]	T_ripp [%]	P_cu [W]
Harmonik Eklenmemiş	2.930	0	2.542	83.440%	2.421
1. Harmonik Eklenmiş	2.930	0.698	2.596	66.569%	2.558
1. ve 2.Harmonik Eklenmiş	2.930	0.673	2.572	72.924%	2.549
1., 2. ve 3.Harmonik Eklenmiş	2.930	0.773	2.634	73.876%	2.589
1., 2., 3. ve 4.Harmonik Eklenmiş	2.930	0.781	2.661	76.902%	2.593
1., 2., 3., 4., 5. ve 6.Harmonik Eklenmiş	2.930	0.852	2.613	72.627%	2.626

EASM senkron motor bu kez 5rpm hızda 4.5 Nm yükte çalışırken uygulanan harmonik akım ekleme yöntemiyle, momentte vuru momentinden dolayı oluşan dalgalanmanın azaltılması incelenmiştir. Momentin değeri, bakır kayıpları ve faz akımının RMS değerindeki değişim Tablo 5.3’de, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de verilmiştir. Tablo 5.3’de, vuru momentinin etkisini azaltmak için Denklem (5.15)’e göre hesaplanarak q-eksen referans akımına eklenen altı farklı harmonik

akım bileşenin değeri ve motordan akan akımların oluşturduğu bakır kayıplarının 9.667W'dan 9.872W'a arttığı görülmektedir. Şekil 5.12'de ise harmonik akım ekleme yöntemiyle vuruğu momentinin etkisinin %51.33'den %39.22'ye azaltılabildiği gösterilmiş, tork dalgalanmasındaki değışim ise yaklaşık %12 olduğu görülmektedir.

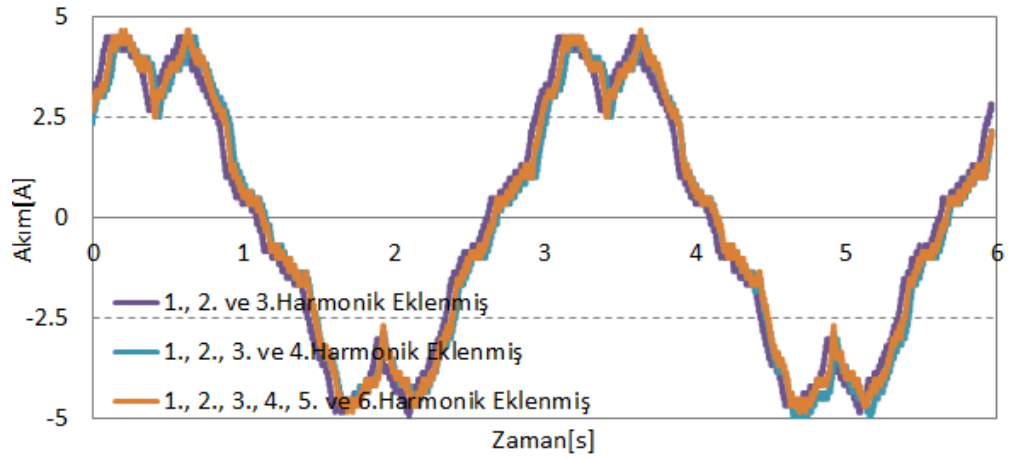
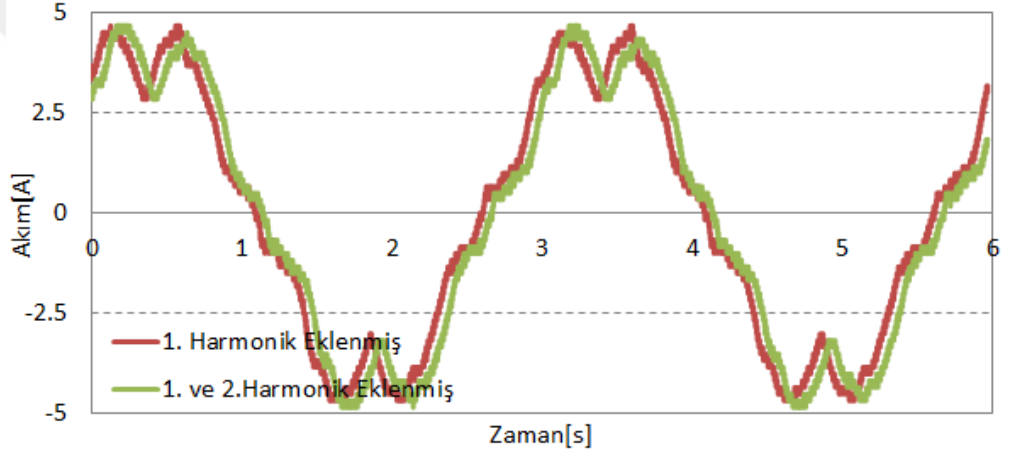
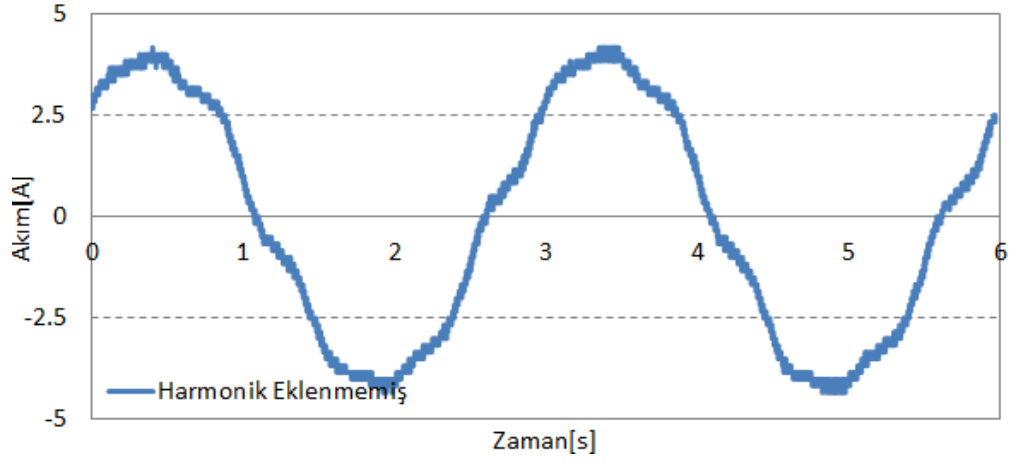
Tablo 5.3. 5rpm hızda 4.5Nm yükte faz akımının, momentin ve bakır kaybının değeri

	I_fund [Arms]	I_har [Arms]	T_ort [Nm]	T_ripp [%]	P_cu [W]
Harmonik Eklenmemiş	5.855	0	4.640	51.328%	9.667
1. Harmonik Eklenmiş	5.855	0.698	4.580	39.218%	9.804
1. ve 2.Harmonik Eklenmiş	5.855	0.673	4.620	41.647%	9.795
1., 2. ve 3.Harmonik Eklenmiş	5.855	0.773	4.561	45.680%	9.836
1., 2., 3., 4., 5. ve 6.Harmonik Eklenmiş	5.855	0.852	4.629	43.282%	9.872



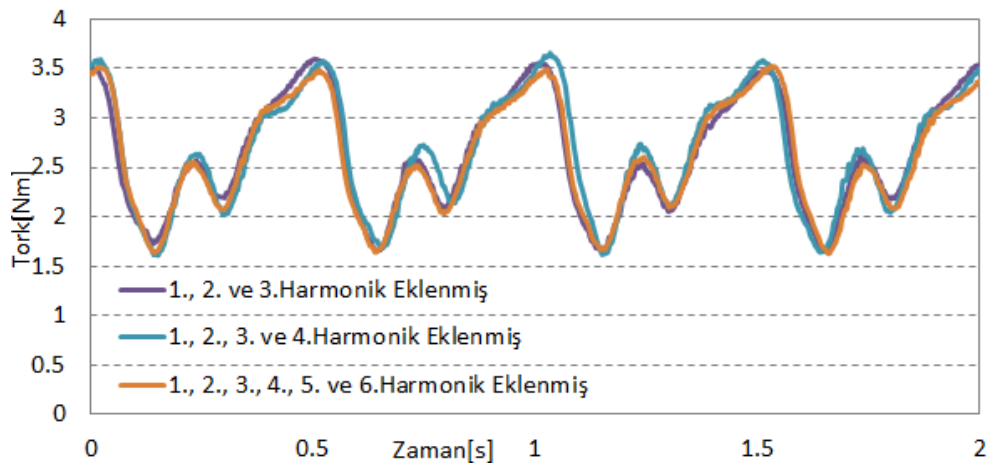
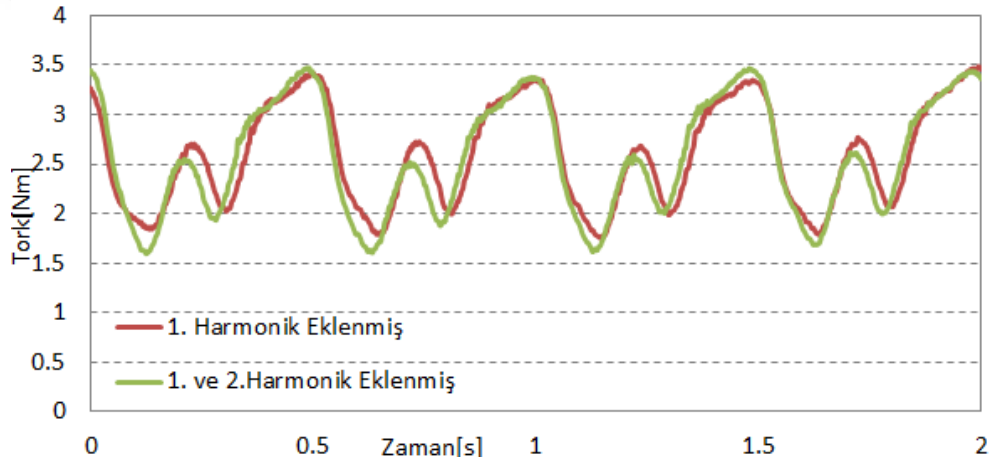
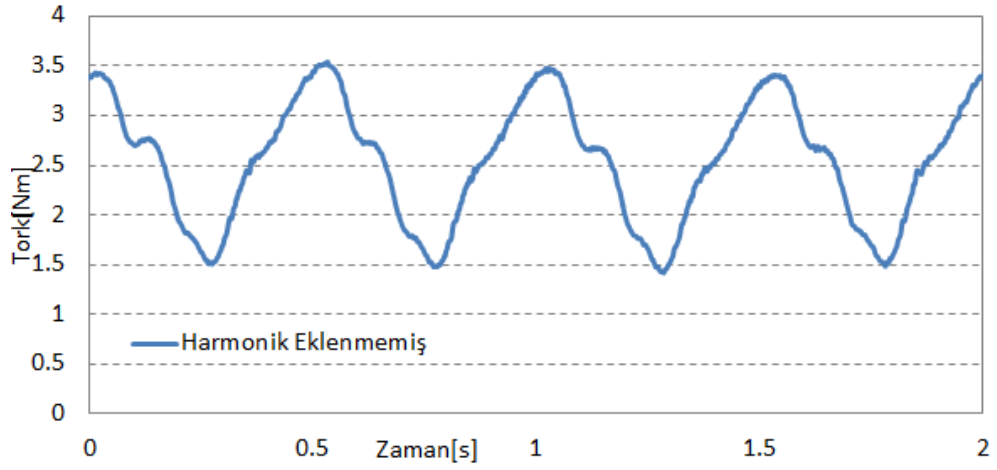
Şekil 5.8. 5rpm hızda Motor-1 için hesaplanan harmonik akımların dalga şekilleri

5rpm Hızda 2.5Nm Yükte Motor Faz Akımı



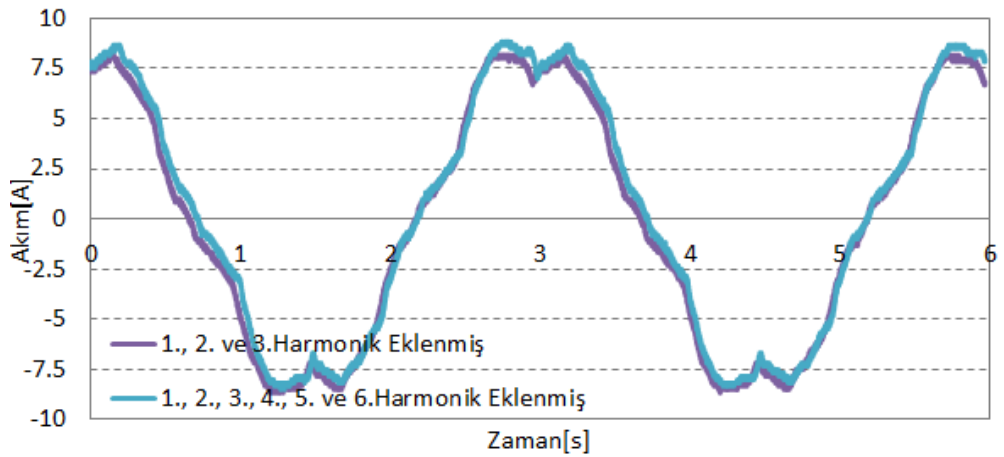
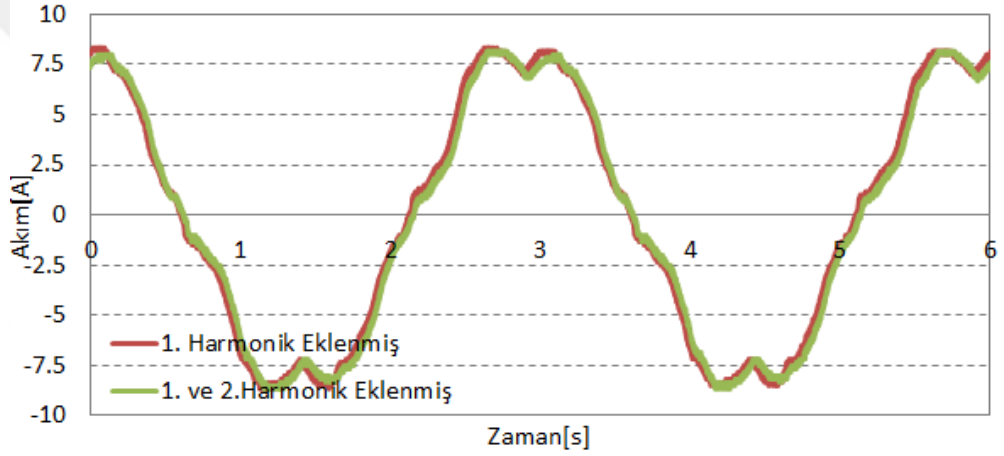
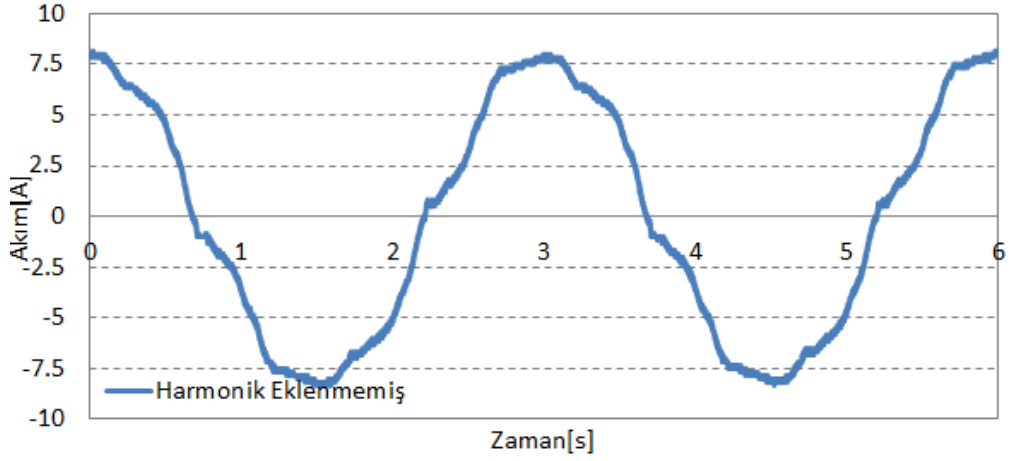
Şekil 5.9. 5rpm hızda 2.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımının değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)

5rpm Hızda 2.5Nm Yükte Sistem Momenti

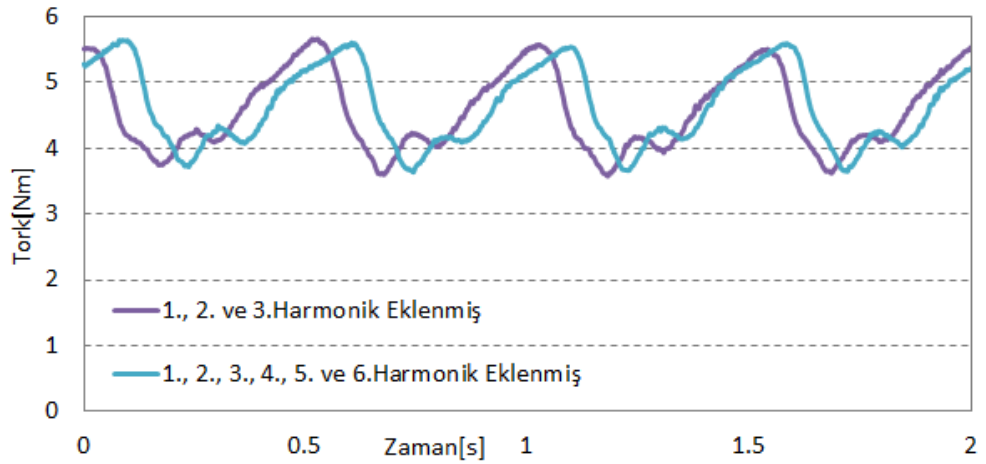
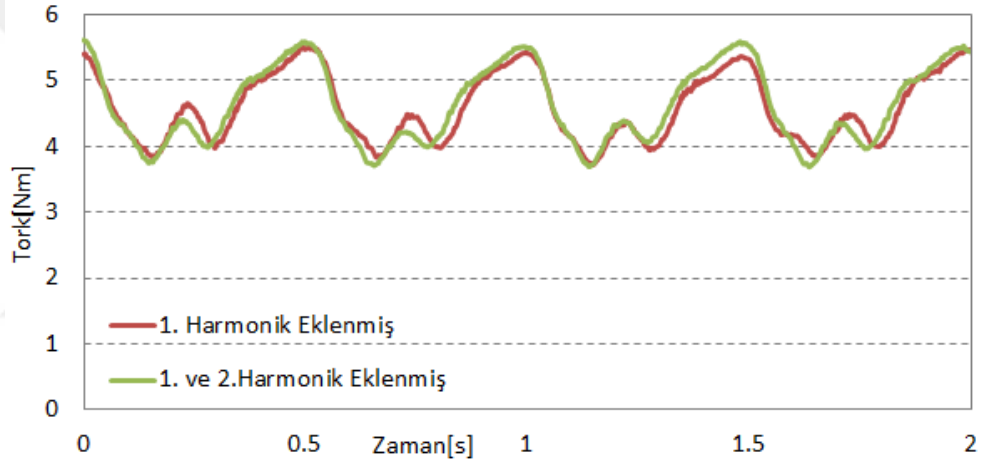
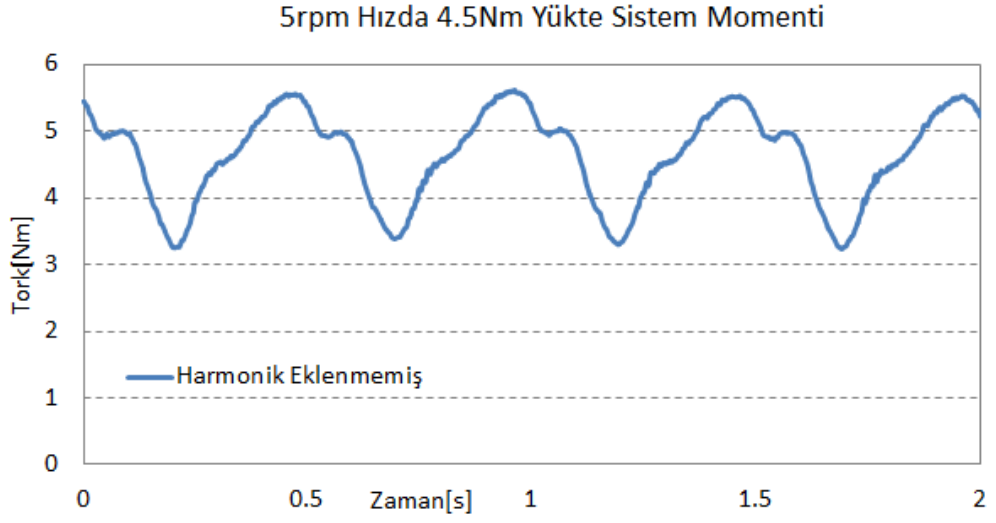


Şekil 5.10. 5rpm hızda 2.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)

5rpm Hızda 4.5Nm Yükte Motor Faz Akımı



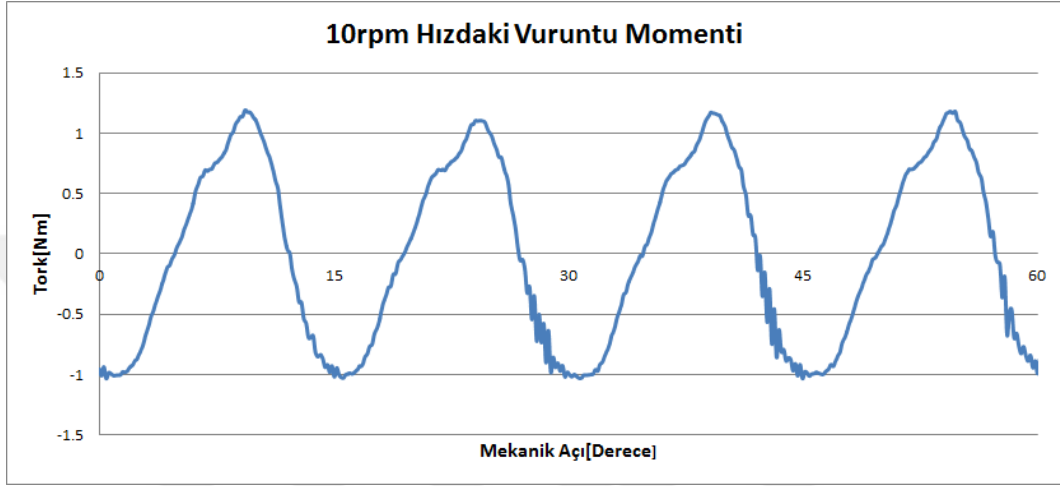
Şekil 5.11. 5rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımının değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)



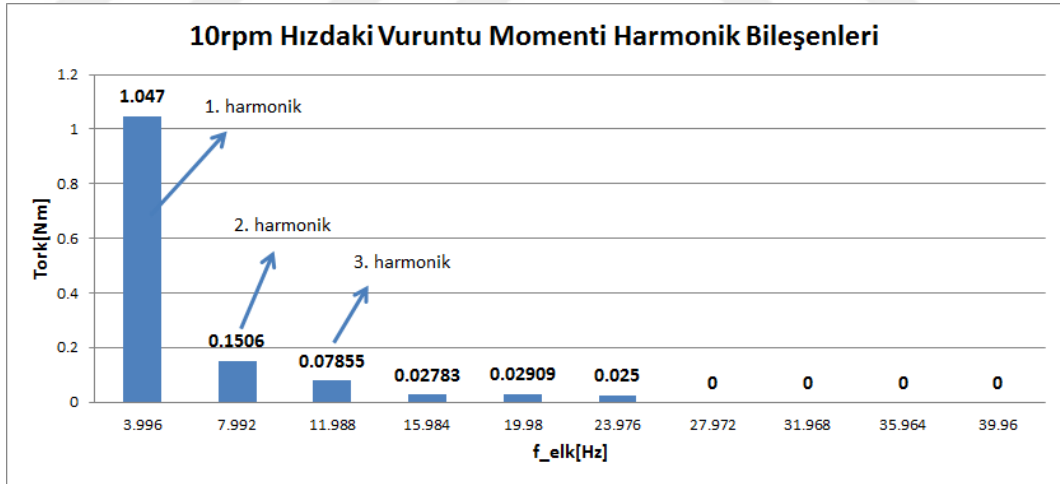
Şekil 5.12. 5rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)

5.2.1.2. Motor – 1'e 10rpm hızda harmonik akım ekleme

Dinamo sistemi 10rpm hızda tahrik ederek EASM senkron motorun vuruğu momenti mekanik açığa bağılı olarak Şekil 5.13'deki gibi elde edilmiştir. Vuruğu momentinin MATLAB'de Fourier analizi yapılarak harmonik bileşenleri hesaplanmış ve Şekil 5.14'de verilmiştir.



Şekil 5.13. 10rpm hızda vuruğu momenti



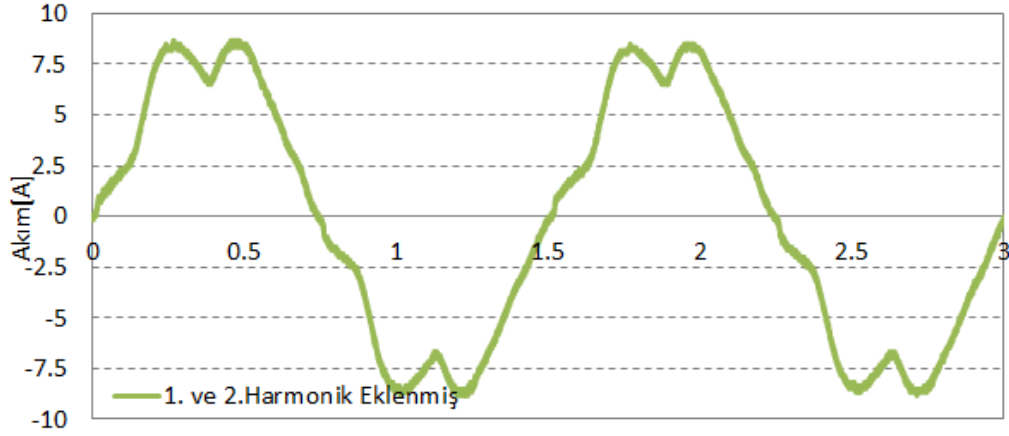
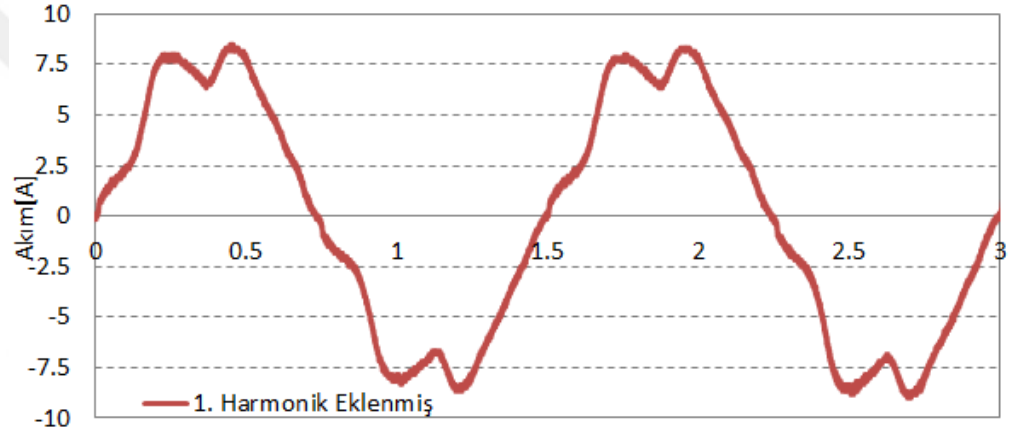
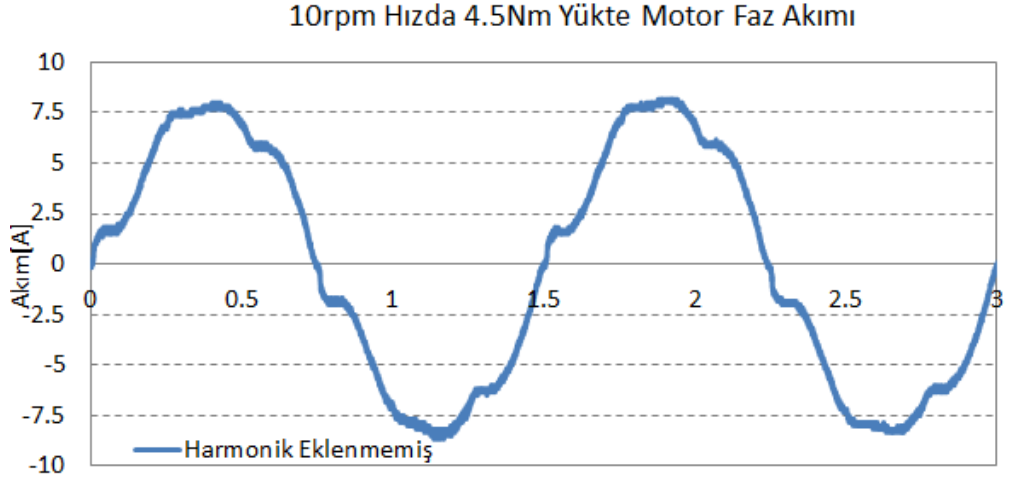
Şekil 5.14. 10rpm hızda vuruğu momentinin harmonik bileşenleri

Vuruğu momentinin harmonikleri tespit edildikten sistemde vuruğu momentinden dolayı oluşan momentteki dalgalanmayı azaltmaya yönelik harmonik ekleme metodu için çalışma yapılmıştır. Dinamo hız modunda 10rpm hızda çalıştırılmış SMB SD-LP sürücü tork modunda çalıştırılmış ve q-eksene harmonik akım ekleme metodu uygulanmıştır. Bu deneysel çalışma, 10rpm hızda 6Arms akım değerinde ortalama 4.5Nm yükte gerçekleştirilmiştir.

EASM senkron motor 10rpm hızda 4.5 Nm yükte çalışırken q-eksen akımına uygulanan harmonik akım ekleme yöntemiyle, vuruğu momentinin etkisinin azaltılması incelenmiştir. Momentin değeri, bakır kayıpları ve faz akımının RMS değeriindeki değışim Tablo 5.4’de, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’de verilmiştir. Tablo 5.4’de, vuruğu momentinin etkisini yok etmek için Denklem (5.15)’e göre hesaplanarak eklenen harmonik akım bileşenin değeri verilirken, bu akımlar eklendiğinde motorda oluşan bakır kaybının değeri 9.667W’dan 9.928W’a arttırdığı da verilmiştir. Şekil 5.16’de ise harmonik akım ekleme yöntemiyle vuruğu momentinin etkisinin %55.91’den %36.2’ye azaltılabildiği gösterilmiş, tork dalgalanmasındaki değışim ise yaklaşık %20 olduğu görülmektedir.

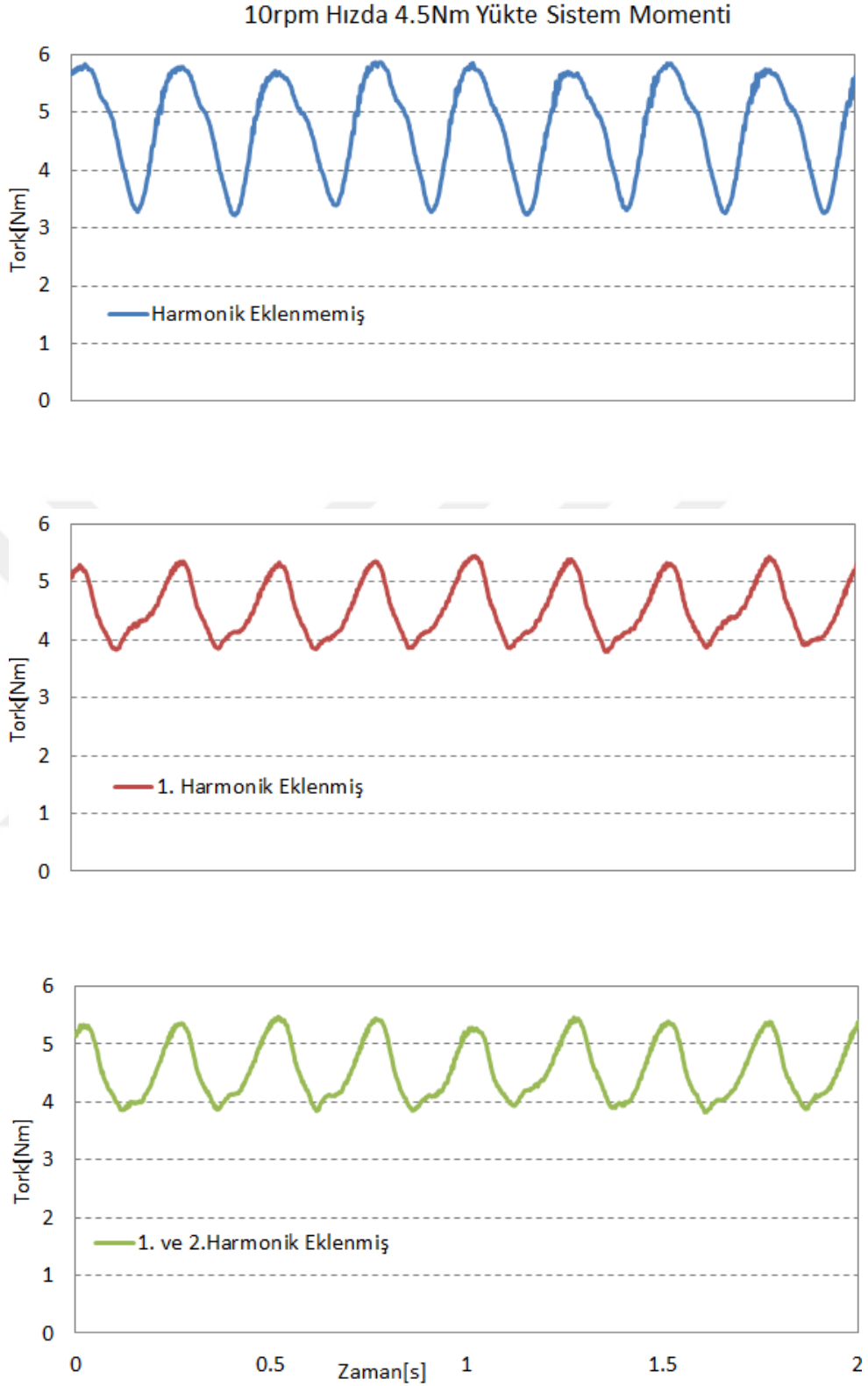
Tablo 5.4. 10rpm hızda 4.5Nm yükte faz akımının, momentin ve bakır kaybının değeri

	I_fund [Arms]	I_har [Arms]	T_ort [Nm]	T_ripp [%]	P_cu [W]
Harmonik Eklenmemiş	5.855	0	4.733	55.913%	9.667
1. Harmonik Eklenmiş	5.855	0.921	4.542	36.411%	9.906
1. ve 2. Harmonik Eklenmiş	5.855	0.961	4.554	36.240%	9.928



Zaman[s]

Şekil 5.15. 10rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımının değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)

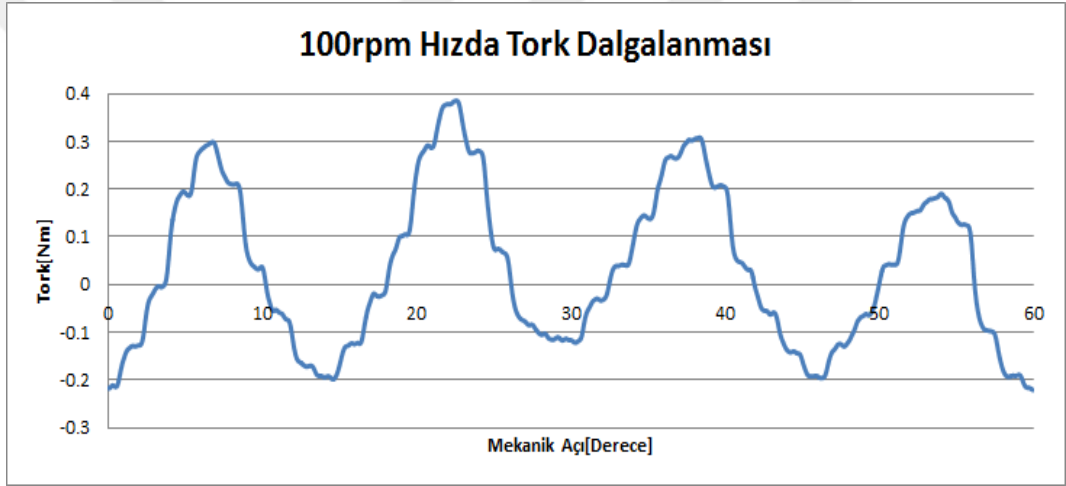


Şekil 5.16. 10rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)

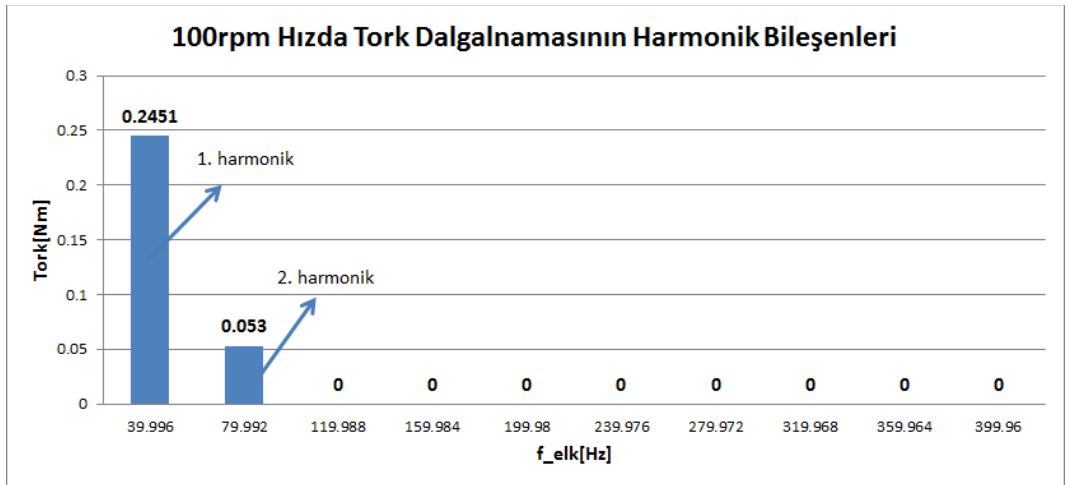
5.2.1.3. Motor – 1'e 100rpm hızda harmonik akım ekleme

Dinamo hız moduna alınarak 100rpm hızda EASM senkron motor tahrik edilerek vuruuntu momenti mekanik açıya bağlı olarak Şekil 5.17'deki gibi elde edilmiştir. Vuruuntu momentinin MATLAB'de Fourier analizi yapılarak harmonik bileşenleri elde edilmiş olup Şekil 5.18'de verilmiştir.

Dinamo hız modunda 100rpm hızda çalıştırılmış ve SMB SD-LP sürücü tork modunda çalıştırılarak q-eksen referans akımına harmonik akım ekleme metodu uygulanmıştır. Bu deneysel çalışma, 100rpm hızda 6Arms akımda ortalama 4.5Nm yükte gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.17. 100rpm hızda moment dalgalanması



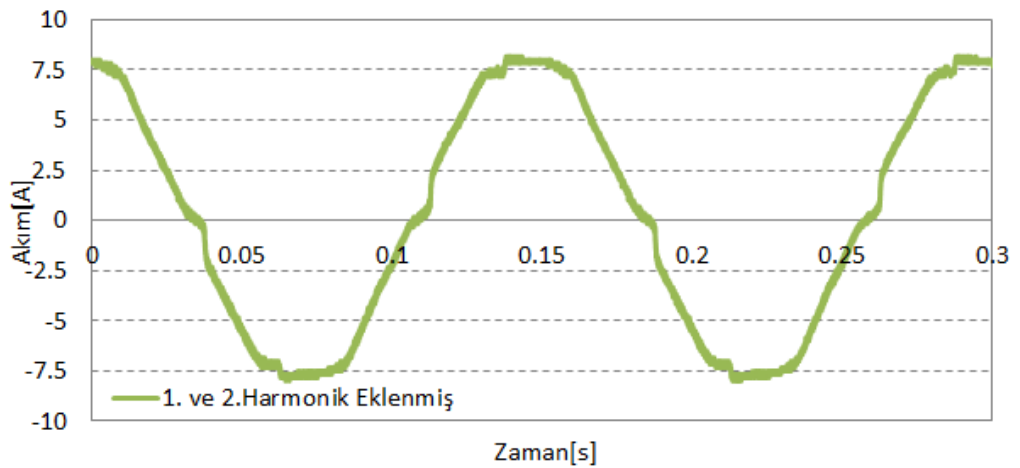
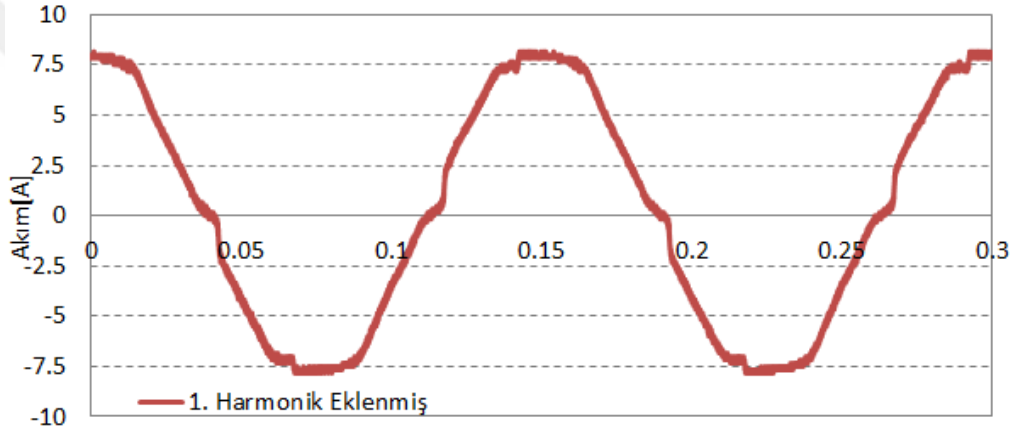
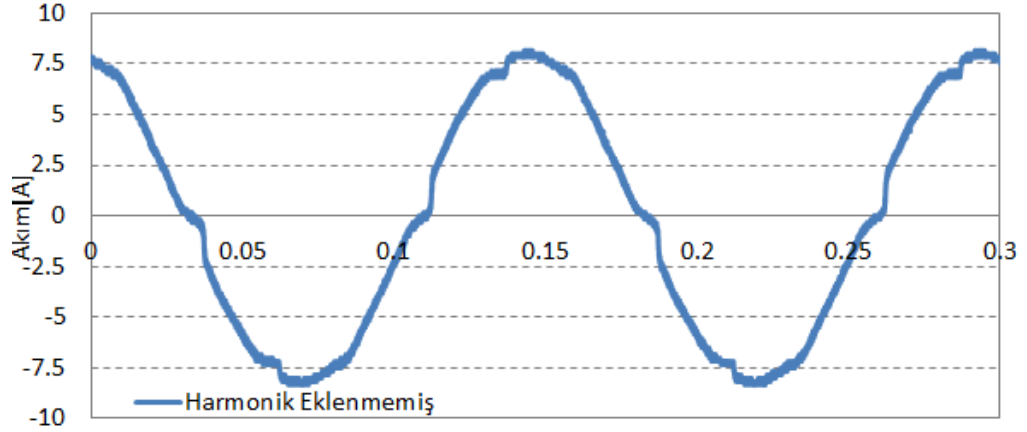
Şekil 5.18. 100rpm hızda moment dalgalanmasının harmonik bileşenleri

EASM senkron motor 100rpm hızda 4.5 Nm yükte çalışırken q-eksen akımına uygulanan harmonik akım ekleme yöntemiyle, momentte vuru momentinden dolayı oluşan dalgalanmanın azaltılması incelenmiştir. Momentin değeri, bakır kayıpları ve faz akımının RMS değerindeki değişim Tablo 5.5’de, Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’de verilmiştir. Tablo 5.5’de, vuru momentinin etkisini yok etmek için Denklem (5.15)’e göre hesaplanarak eklenen ilk iki harmonik akım bileşenleri ve sürücüden motora temel olarak uygulanan akımın RMS değerleri verilmiştir. Şekil 5.19’de ise motora uygulanan harmonik akım eklemelerine göre akımın dalga şeklinin değişimi gösterilmiş olup, bu akımların neden olduğu bakır kayıplarının değerinin 9.67W’dan 9.683W’a arttığı görülmüştür. Şekil 5.20’de ise harmonik akım ekleme yöntemiyle vuru momentinin etkisinin %22.39’dan %15.18’e düşürebildiği gösterilmiş, tork dalgalanmasındaki değişim ise yaklaşık %7 olduğu görülmektedir.

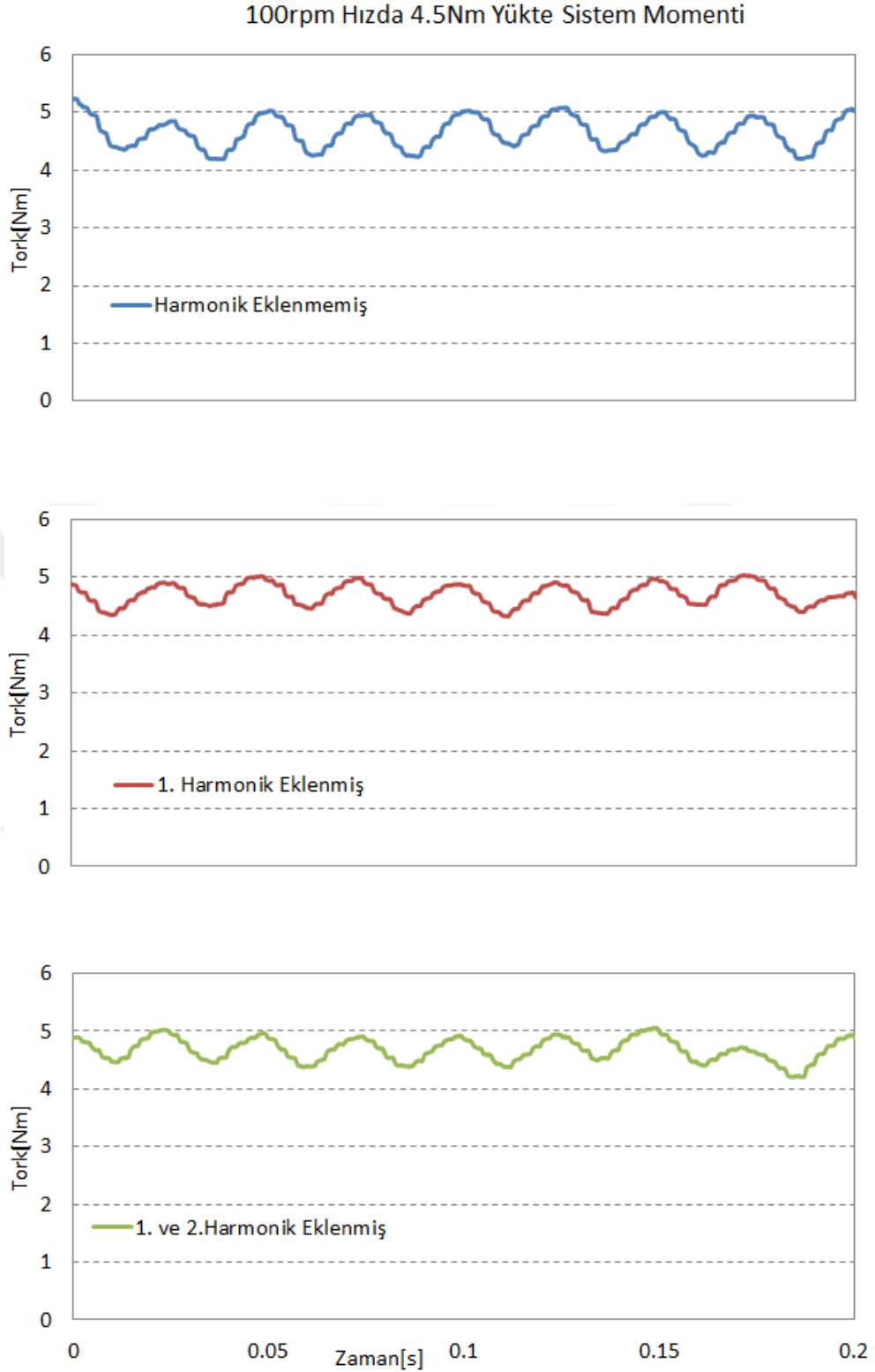
Tablo 5.5. 100rpm hızda 4.5Nm yükte faz akımının, momentin ve bakır kaybının değeri

	I_fund [Arms]	I_har [Arms]	T_ort [Nm]	T_ripp [%]	P_cu [W]
Harmonik Eklenmemiş	5.855	0	4.654	22.398%	9.667
1. Harmonik Eklenmiş	5.855	0.216	4.693	15.182%	9.680
1. ve 2. Harmonik Eklenmiş	5.855	0.234	4.672	18.192%	9.683

100rpm Hızda 4.5Nm Yükte Motor Faz Akımı



Şekil 5.19. 100rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımının değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)



Şekil 5.20. 100rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motorun moment dalgalanmasının değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)

5.2.2. EASM Motor – 2 için vurutu momenti ve moment dalgalanmasının azaltılması

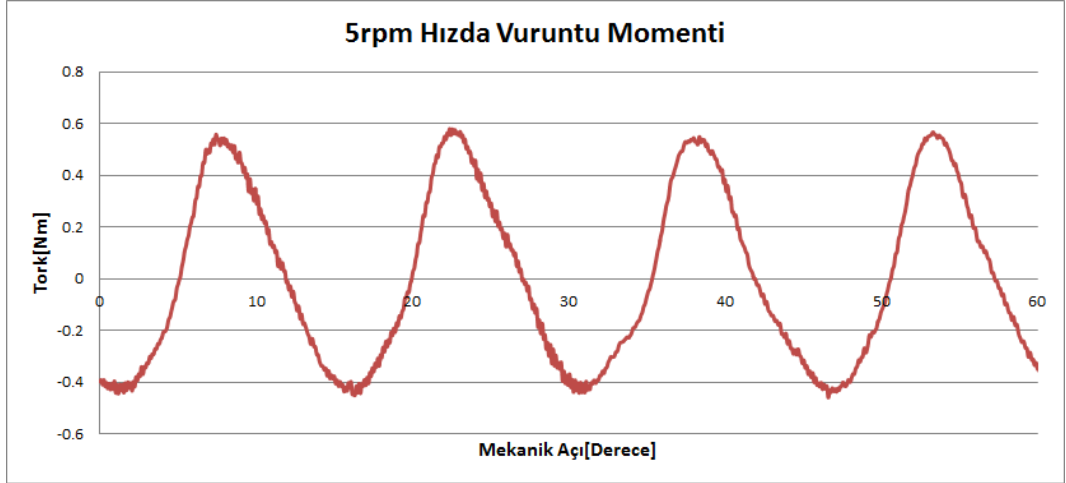
EASM senkron Motor-1’de gerçekleştirilen deneysel çalışmanın bir benzeri Motor-2 içinde gerçekleştirilmiştir. Harmonik akım ekleme yöntemi ile vurutu momentinin azaltılması için 5rpm, 10rpm ve 100rpm hızda tek bir akım değerinde tutularak deneysel testler yapılmıştır.

5.2.2.1.Motor – 2’ye 5rpm hızda harmonik akım ekleme

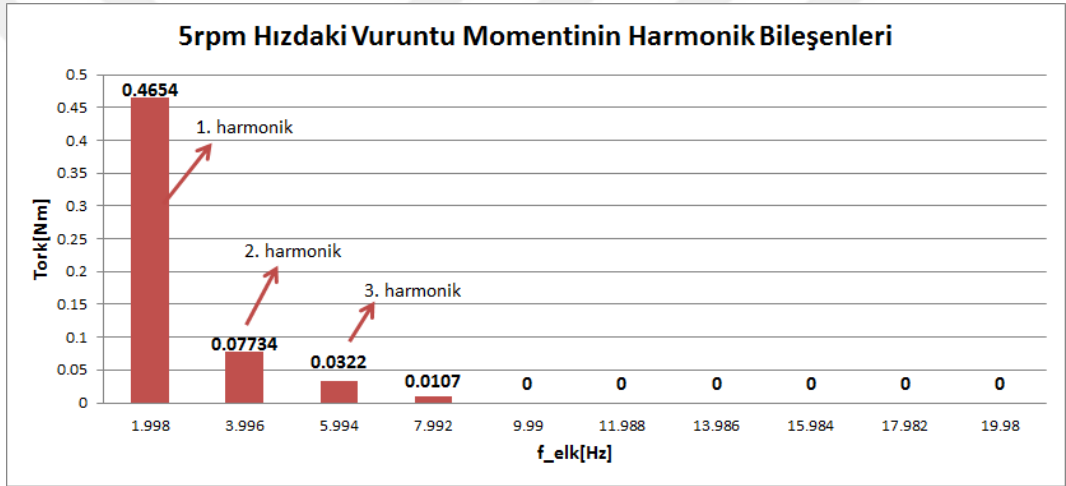
Dinamo için kullanılan Delta Asda-B sürücü ile sistem 5rpm hızda tahrik edilerek EASM senkron motorun vurutu momenti, mekanik açıya bağlı olarak Şekil 5.21’deki gibi elde edilmiştir. Vurutu momentinin MATLAB’de Fourier analizi yapılarak harmonik bileşenleri elde edilmiş olup Şekil 5.22’de verilmiştir.

Sistemde dinamo tarafı 5rpm hızda çalıştırılarak SMB SD-LP sürücü tork modunda çalıştırılmış ve q-eksene harmonik akım ekleme metodu uygulanmıştır. Harmonik akımlar vurutu momentinin harmonik bileşenlerinden elde edilmiştir. Bu deneysel çalışma, 5rpm hızda 6Arms akım değerinde ortalama 3Nm yükte gerçekleştirilmiştir.

EASM senkron motor 5rpm hızda 3 Nm yükte çalışırken q-eksen referans akımına uygulanan harmonik akım ekleme yöntemiyle, momentte vurutu momentinden dolayı oluşan dalgalanmanın azaltılması incelenmiştir. Momentin değeri, bakır kayıpları ve faz akımının RMS değerindeki değişim Tablo 5.6’da, Şekil 5.23 ve Şekil 5.24’de verilmiştir. Vurutu momentinin etkisini azaltmak için Denklem (5.15)’e göre hesaplanarak q-eksen referans akımına eklenen ilk iki harmonik akım bileşenin ve sürücüden motora temel olarak uygulanan akımın RMS değerleri Tablo 5.6’da verilmiştir. Şekil 5.23’de ise motora uygulanan harmonik akım eklemelerine göre akımın dalga şeklinin değişimi verilmiş olup, bu değişimin bakır kayıpları üzerindeki etkisi Tablo 5.6’da gösterildiği gibi 9.48W’dan 9.62W’a artmaktadır. Şekil 5.24’de ise harmonik akım ekleme vurutu momentinin değerinin %35.97’den %30.74’e azaltılabildiği gösterilmiş, tork dalgalanmasındaki değişim ise yaklaşık %6 olduğu görülmektedir.



Şekil 5.21. 5rpm hızda vuruntu momenti

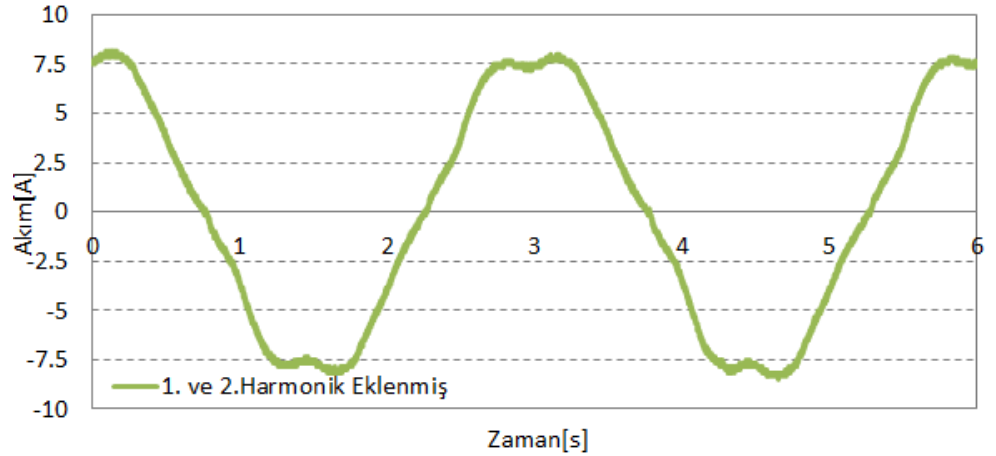
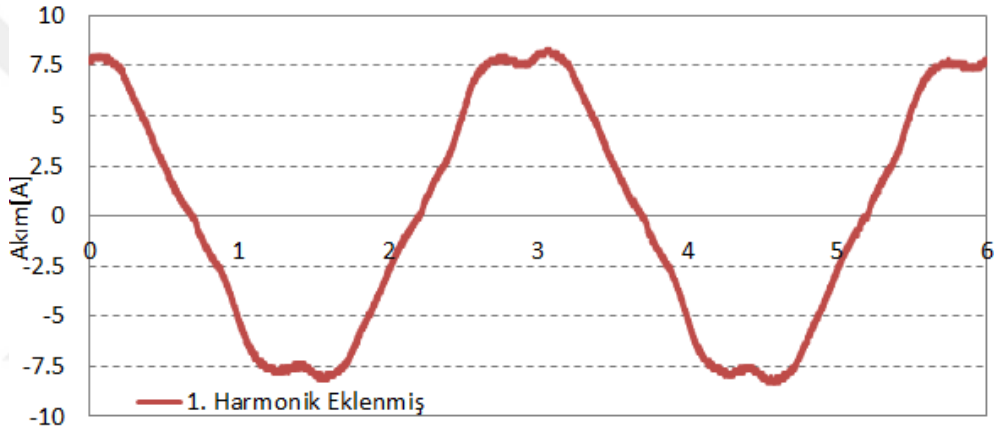
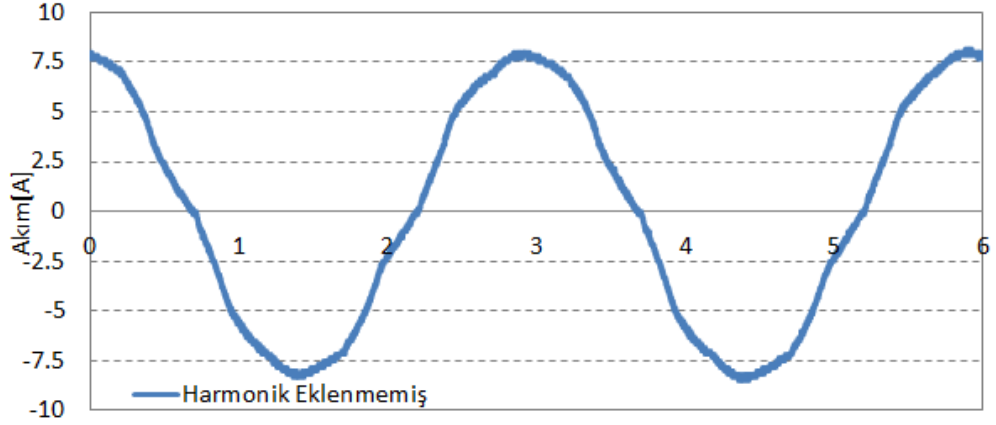


Şekil 5.22. 5rpm hızda vuruntu momentinin harmonik bileşenleri

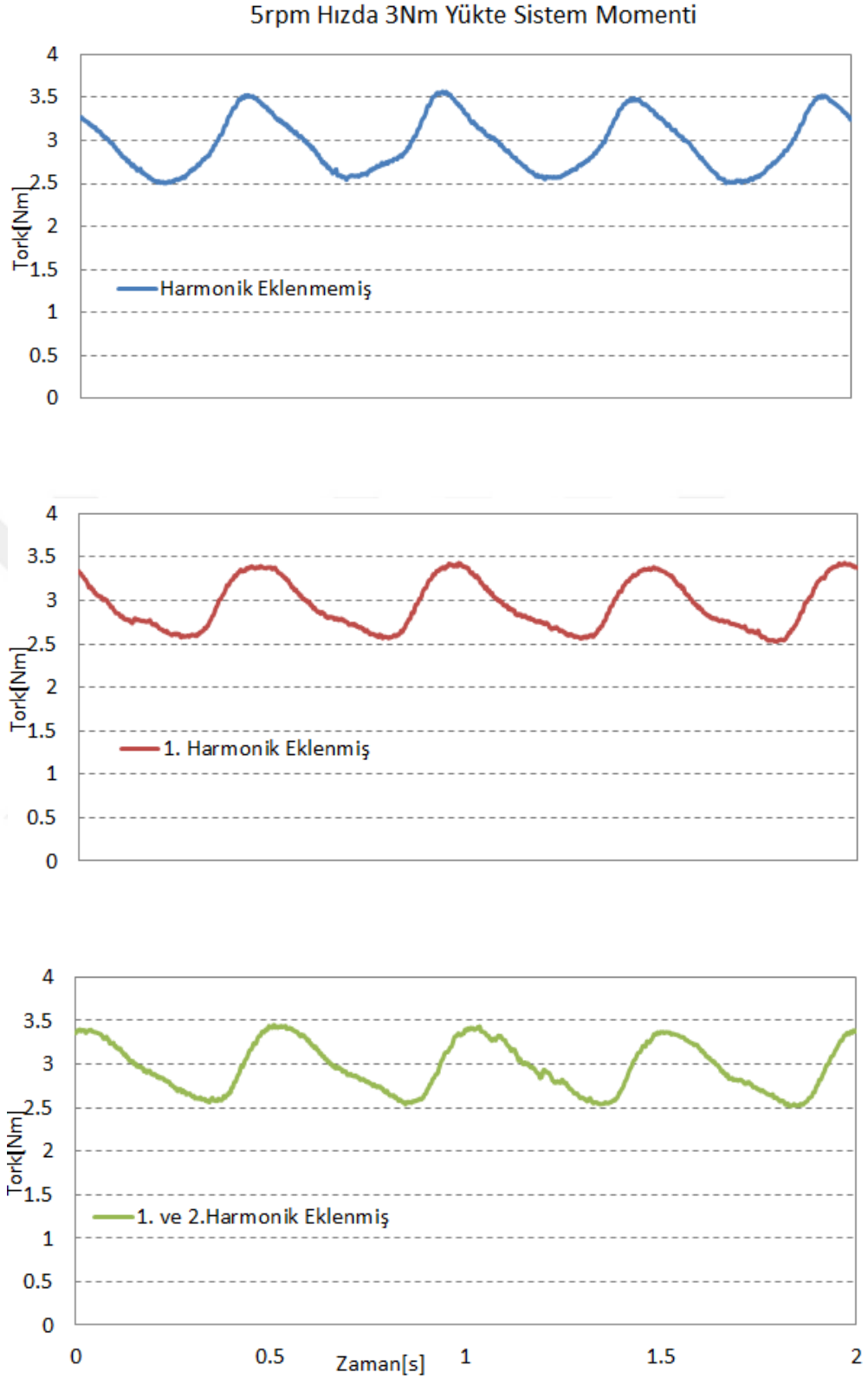
Tablo 5.6. 5rpm hızda 3Nm yükte faz akımının, momentin ve bakır kaybının değeri

	I_fund [Arms]	I_har [Arms]	T_ort [Nm]	T_ripp [%]	P_cu [W]
Harmonik Eklenmemiş	5.800	0	2.961	35.970%	9.486
1. Harmonik Eklenmiş	5.800	0.596	2.947	30.735%	9.587
1. ve 2.Harmonik Eklenmiş	5.800	0.681	2.966	31.463%	9.617

5rpm Hızda 3Nm Yükte Motor Faz Akımı



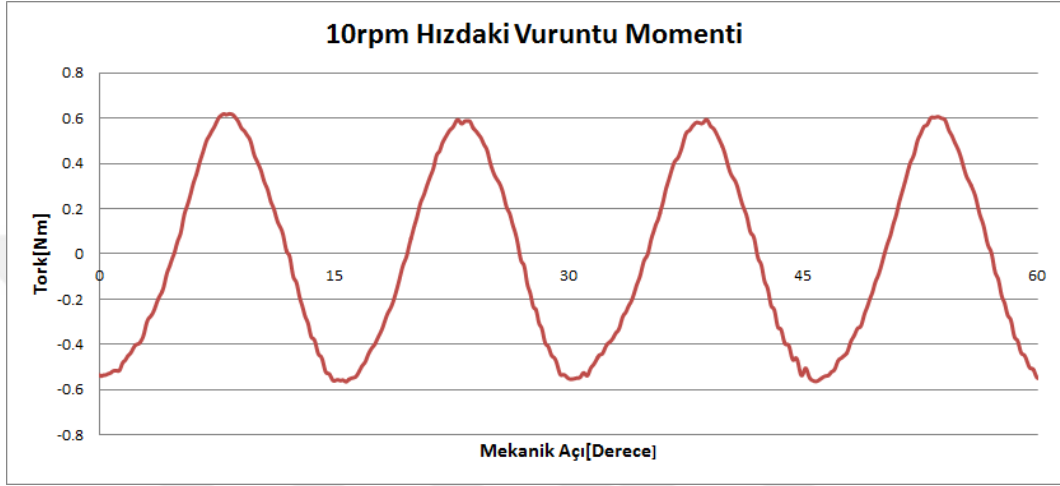
Şekil 5.23. 5rpm hızda 3Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımının değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)



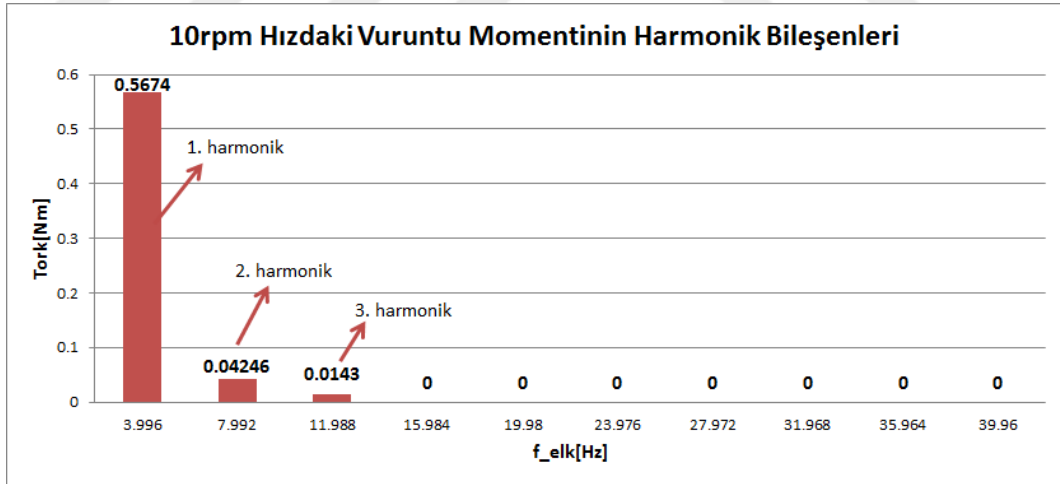
Şekil 5.24. 5rpm hızda 3Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)

5.2.2.2. Motor – 2'ye 10rpm hızda harmonik akım ekleme

Dinamo ile sistem 10rpm hızda tahrik edilerek EASM senkron motorun vuruğu momenti mekanik açıya göre Şekil 5.25'deki gibi elde edilmiştir. Vuruğu momentinin MATLAB'de Fourier analizine bağılı olarak elde edilen harmonik bileşenleri Şekil 5.26'de verilmiştir.



Şekil 5.25. 10rpm hızda vuruğu momentini



Şekil 5.26. 10rpm hızda vuruğu momentinin harmonik bileşenleri

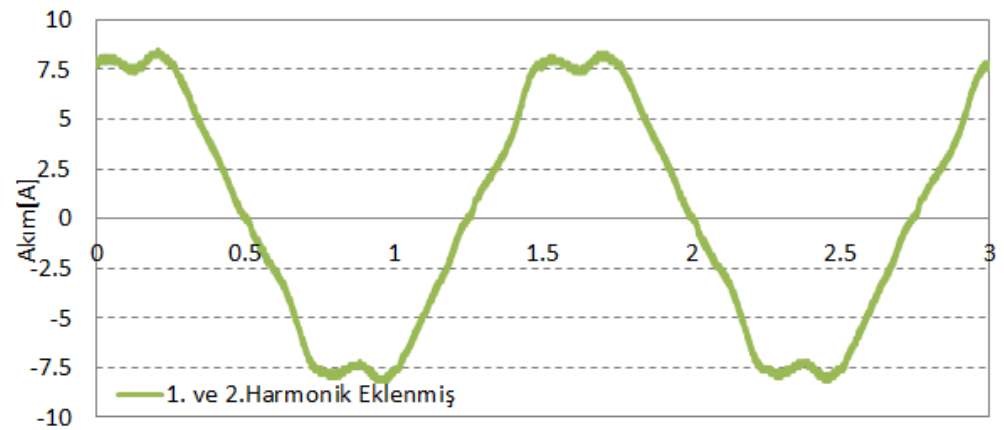
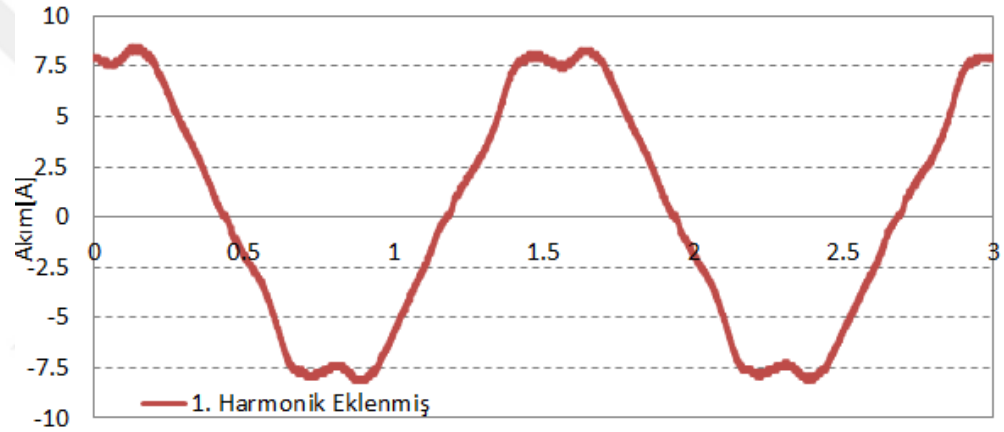
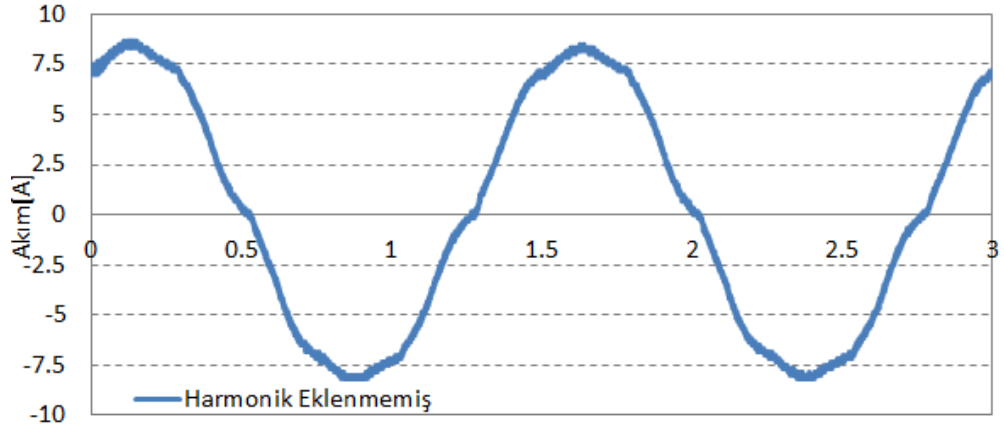
EASM senkron motor 10rpm hızda 3Nm yükte çalışırken q-eksen akımına uygulanan harmonik akım ekleme yöntemiyle, momentte vuruğu momentinden dolayı oluşan dalgalanmanın azaltılması incelenmiştir. Momentin değeri, bakır kayıpları ve faz akımının RMS değerindeki değişim Tablo 5.7'de, Şekil 5.27 ve Şekil 5.28'de verilmiştir. Tablo 5.7'de, vuruğu momentinin etkisini yok etmek için Denklem (5.15)'e göre hesaplanarak eklenen ilk iki harmonik akım bileşenin ve motora temel

olarak uygulanan faz akımın RMS değerleri verilmiştir. Harmonik akımın frekansı temek akımın mekanik frekansının “24 x k” katı veya elektriksel frekansın “6 x k” katı kadardır. Şekil 5.27’de ise motora uygulanan harmonik akım eklemelerine göre akımın dalga şeklinin değişimi ve bu değişime bağlı olarak 9.48W’dan 9.649W’a artan bakır kayıpları Tablo 5.7’de gösterilmiştir. Şekil 5.28’de ise harmonik akım ekleme yöntemiyle vuruğu momentinin etkisinin %43.81’den %32.04’e azaltılabildiği gösterilmiş, tork dalgalanmasındaki değişim ise yaklaşık %12 olduğu görülmektedir.

Tablo 5.7. 10rpm hızda 3Nm yükte faz akımının, momentin ve bakır kaybının değeri

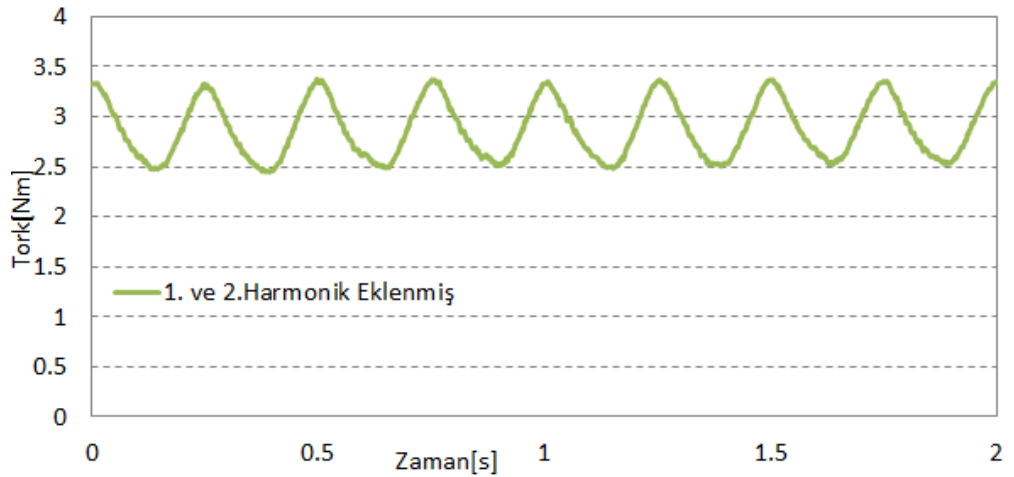
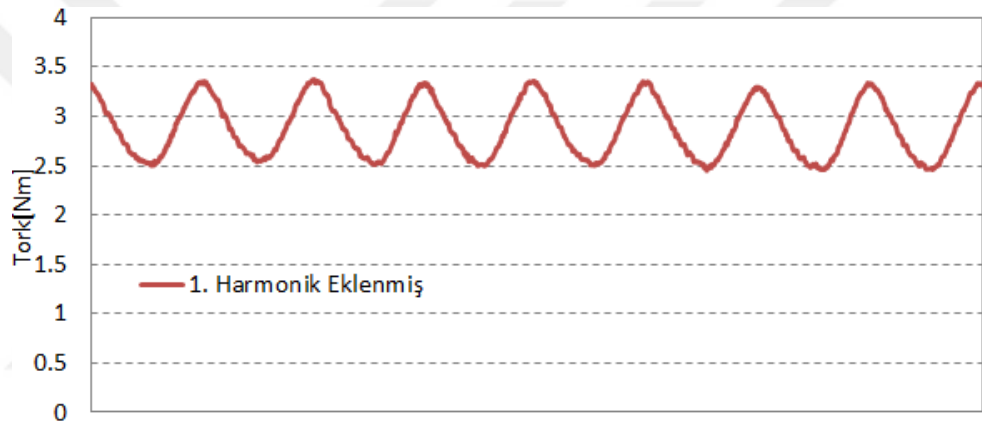
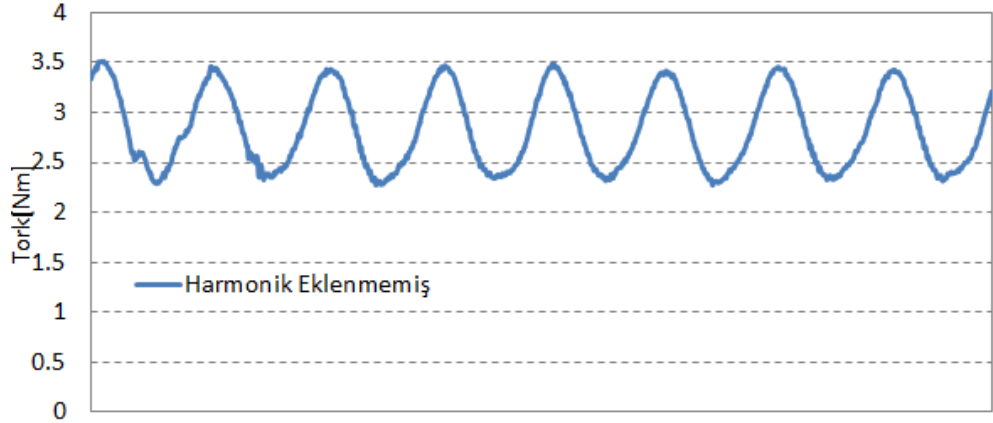
	I_fund [Arms]	I_har [Arms]	T_ort [Nm]	T_ripp [%]	P_cu [W]
Harmonik Eklenmemiş	5.800	0	2.829	43.814%	9.486
1. Harmonik Eklenmiş	5.800	0.727	2.878	32.039%	9.636
1. ve 2. Harmonik Eklenmiş	5.800	0.759	2.876	32.112%	9.649

10rpm Hızda 3Nm Yükte Motor Faz Akımı



Şekil 5.27. 10rpm hızda 3Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımının değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)

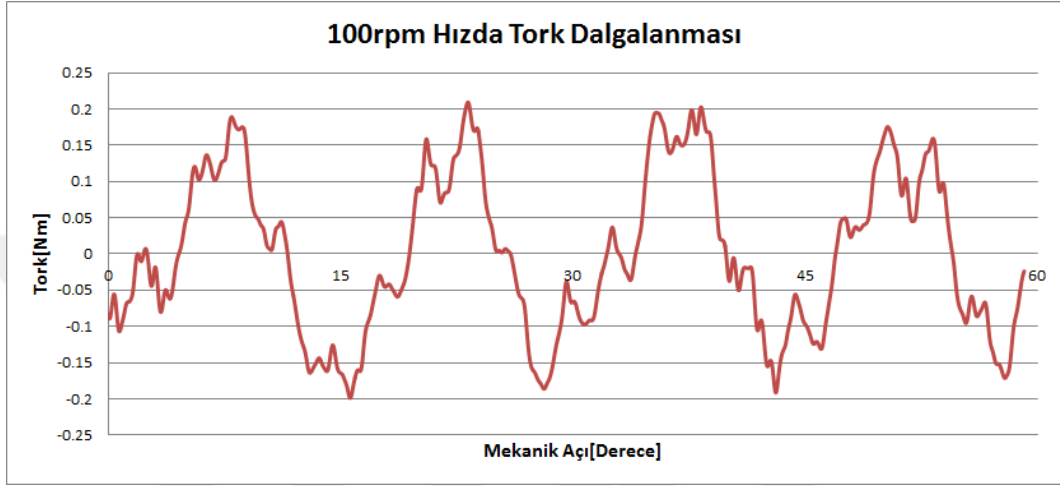
10rpm Hızda 3Nm Yükte Sistem Momenti



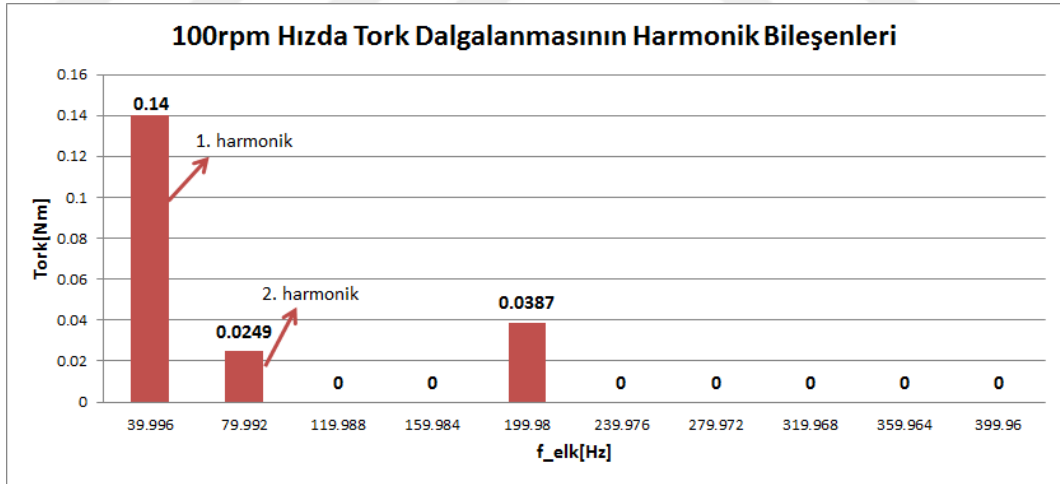
Şekil 5.28. 10rpm hızda 3Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)

5.2.2.3.Motor – 2'ye 100rpm hızda harmonik akım ekleme

Dinamo ile sistem 100rpm hızda tahrik edilerek EASM senkron motorun vuruğu momenti mekanik açıya göre Şekil 5.29'deki gibi elde edilmiş olup, bu sinyalin MATLAB'de Fourier analizi yapılarak harmonik bileşenleri elde edilmiş olup Şekil 5.30'da verilmiştir.



Şekil 5.29. 100rpm hızda moment dalgalanması



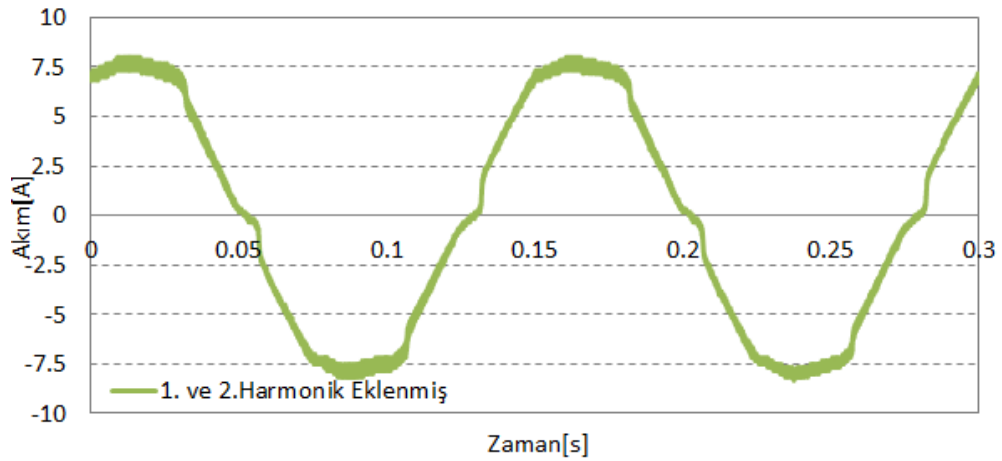
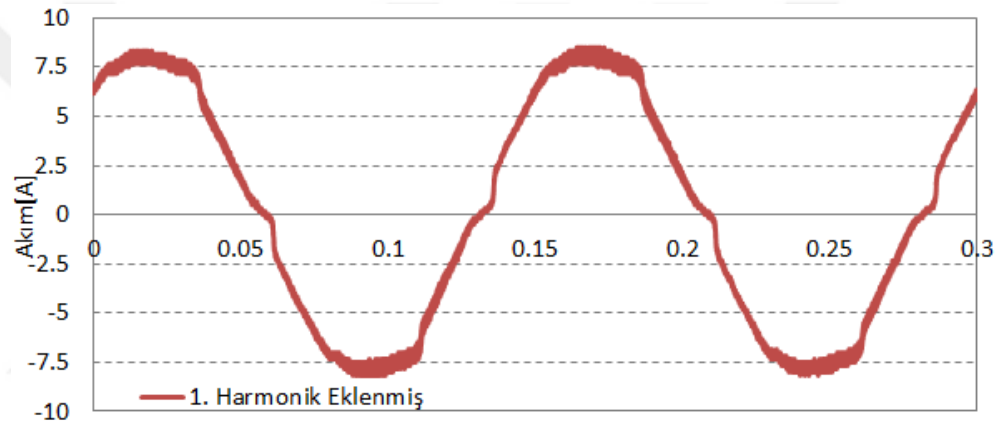
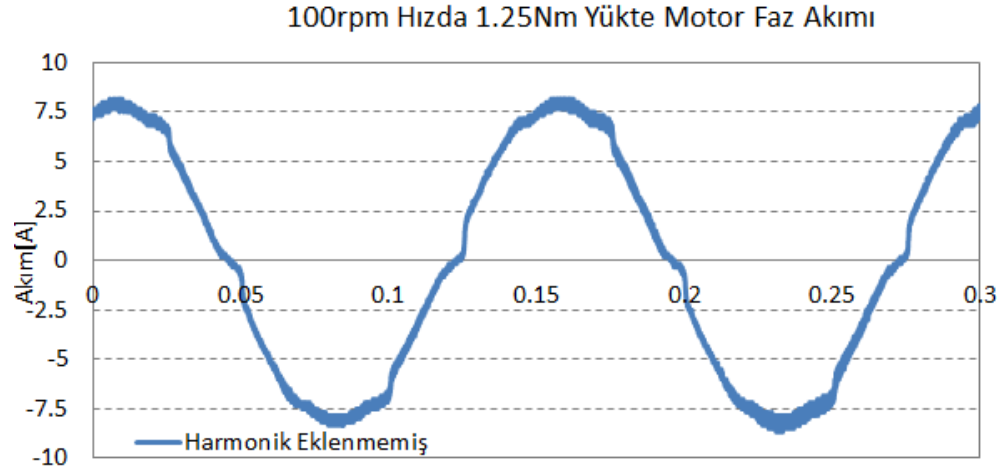
Şekil 5.30. 100rpm hızda moment dalgalanmasının harmonik bileşenleri

Dinamo tarafı 100rpm hızda hız modunda çalışırken SMB SD-LP sürücü tork modunda çalıştırılmış ve q-eksen referans akımına harmonik akım ekleme yöntemi uygulanmıştır. Harmonik akımlar vuruğu momentinin harmonik bileşenlerinden elde edilmiştir. Bu deneysel çalışma, 100rpm hızda 6Arms akım değerinde ortalama 1.25Nm yükte gerçekleştirilmiştir.

Sistem 100rpm hızda 1.25Nm yükte çalışırken q-eksen akımına uygulanan harmonik akım ekleme yöntemiyle, momentte vuruğu momentinden dolayı oluşan dalgalanmanın azaltılması incelenmiştir. Momentin değeri, bakır kayıpları ve faz akımının RMS değerindeki değışim Tablo 5.8’de, Şekil 5.31 ve Şekil 5.32’de verilmiştir. Tablo 5.8’de, vuruğu momentinin etkisini yok etmek için Denklem (5.15)’e göre hesaplanarak eklenen ilk iki harmonik akım bileşenleri ve sürücüden motora temel olarak uygulanan faz akımın RMS değerleri verilmiştir. Şekil 5.31’da motora uygulanan harmonik akım eklemelerine göre akımın dalga şeklinin değışimi gösterilmiş olup, bu değışime bağılı bakır kaybının 9.48W’dan 9.49W’a arttığı görülmüştür. Şekil 5.32’de ise harmonik akım ekleme yöntemiyle vuruğu momentinin etkisinin %45.32’den %38.54’e düşürülebildiğı gösterilmiş, tork dalgalanmasındaki değışim ise yaklaşık %7 olduğu görülmektedir.

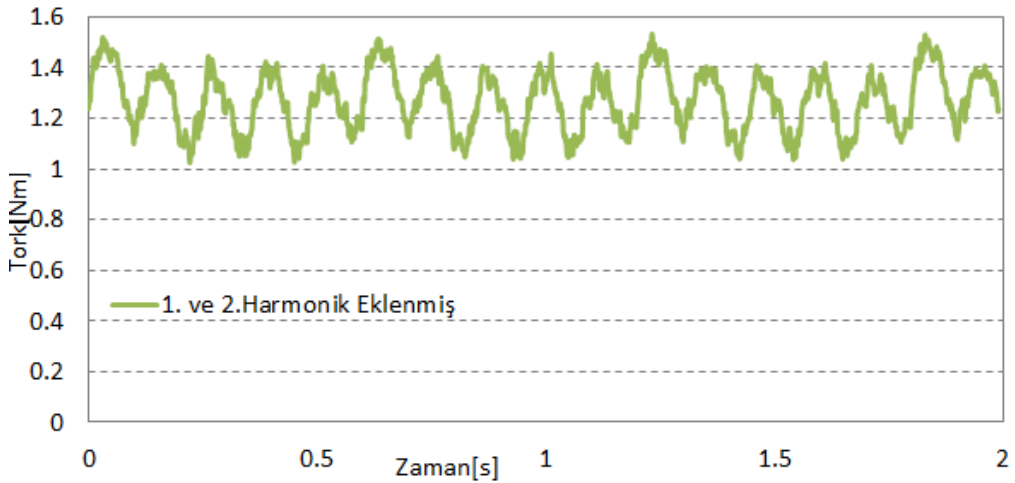
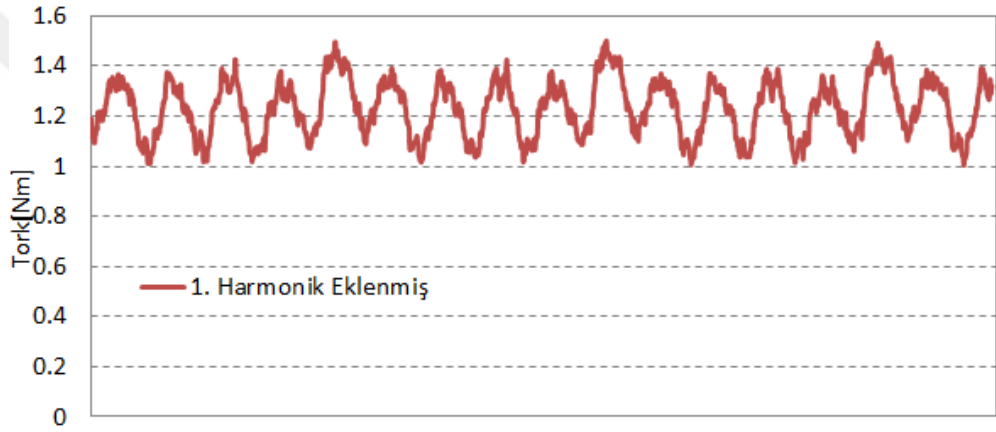
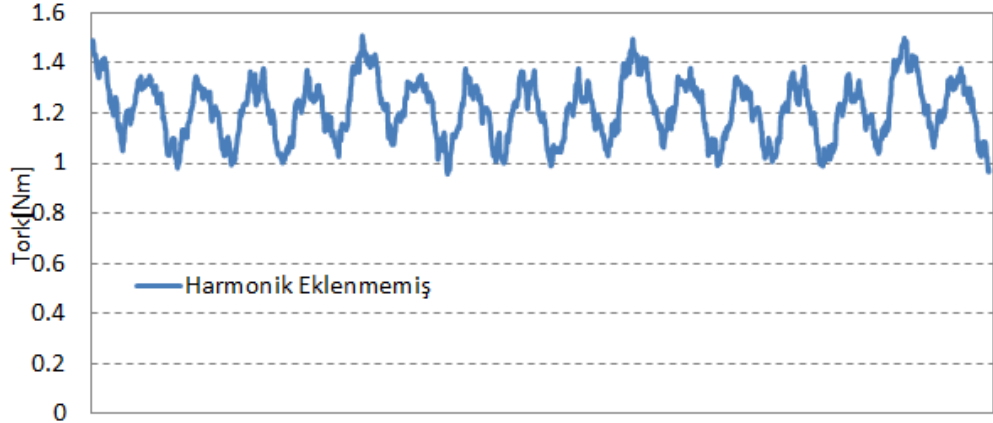
Tablo 5.8. 100rpm hızda 1.25Nm yükte faz akımının, momentin ve bakır kaybının değeri

	I_fund [Arms]	I_har [Arms]	T_ort [Nm]	T_ripp [%]	P_cu [W]
Harmonik Eklenmemiş	5.800	0	1.218	45.317%	9.486
1. Harmonik Eklenmiş	5.800	0.179	1.227	40.413%	9.496
1. ve 2. Harmonik Eklenmiş	5.800	0.201	1.284	38.543%	9.498



Şekil 5.31. 100rpm hızda 1.25Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımının değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)

100rpm Hızda 1.25Nm Yükte Sistem Momenti



Şekil 5.32. 100rpm hızda 1.25Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi(Tek aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)

5.3. İki Aşamalı Fourier Analizi ile Harmonik Akım Ekleme Yöntemi

Önceki bölümde motorun vuruğu momentinin Fourier analizi yapılarak bu momenti oluşturan harmonik bileşenlerin tespiti gerçekleştirilmiştir. Bu hesaplanan moment bileşenlerini oluşturan harmonik akım bileşenleri tespit edilerek q-eksen referans akımına vuruğu momenti azaltmak için eklendi. Bu yöntem ile vuruğu momentinden dolayı sistem momentinde oluşan vuruğunun azaltılabildiği görüldü. Vuruğu momentinin, moment üzerindeki etkisini daha da azaltmak için sistem momentine ilk Fourier analizinde hesaplanan 1. Harmonik akım eklemesi yapılmış haldeki sistem momentini alınarak ortalama değeri çıkarıldı ve önceki bölümde yapılan çalışmalar tekrarlandı iki aşamalı FFT analizi gerçekleştirilerek harmonik akımlar tespit edildi. Motor-1 ve Motor-2 için deneysel testler gerçekleştirilerek sonuçlar elde edilmiştir.

5.3.1. EASM Motor – 1 için vuruğu momentini ve moment dalgalanmasının azaltılması

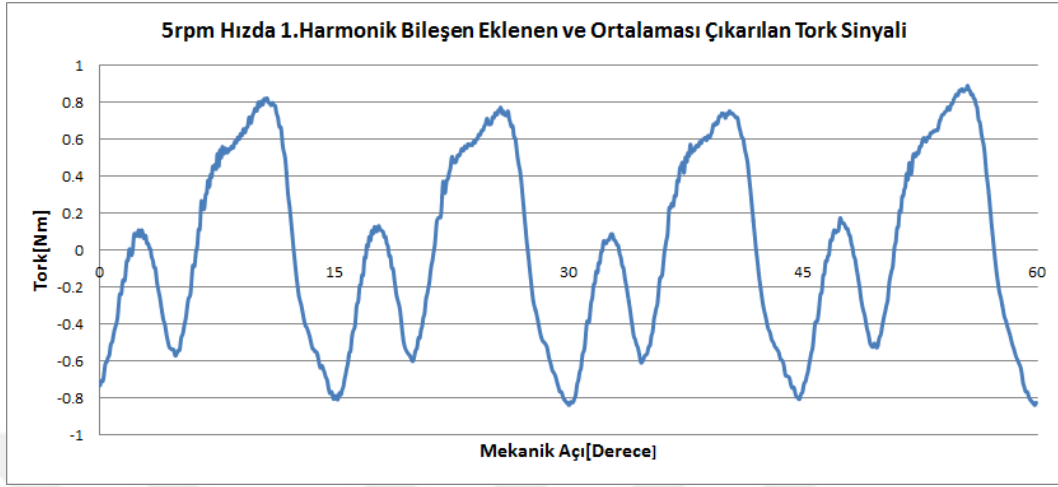
Motor-1 için deneysel çalışmalar 5rpm hız için iki farklı akım değerinde gerçekleştirilerek detaylı bir çalışma yapılmıştır. 10rpm ve 100rpm hızlardaki testler tek akım değeri için gerçekleştirilmiştir.

5.3.1.1. Motor – 1'e 5rpm hızda harmonik akım ekleme

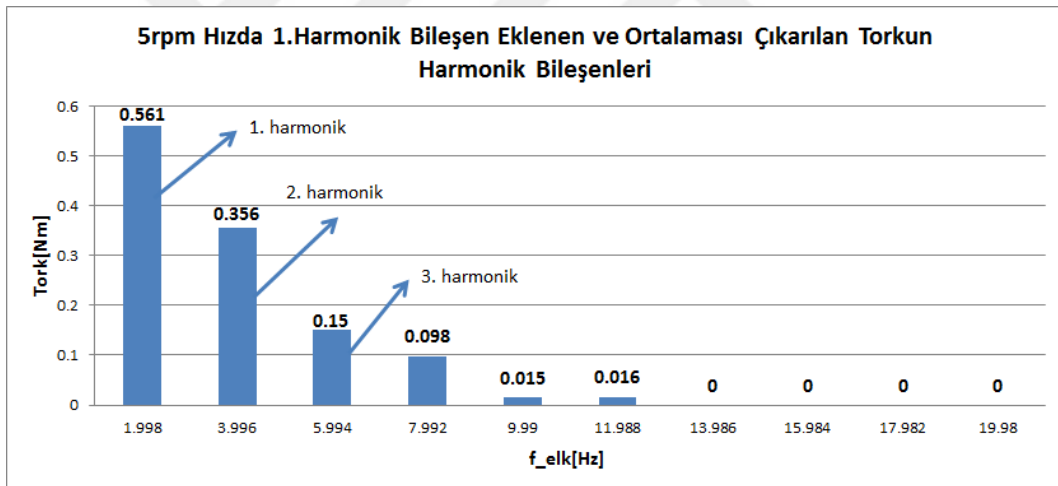
Vuruğu momentinin, moment üzerindeki etkisini daha da azaltmak için ilk Fourier analizinde hesaplanan 1. Harmonik akım eklemesi yapılmış haldeki moment değeri alınarak ortalama değeri çıkartılmış ve Şekil 5.33'deki sinyal elde edilmiştir. Elde edilen moment sinyalinin MATLAB'de Fourier analizi yapılarak harmonik bileşenleri elde edilmiş olup Şekil 5.34'de gösterilmiştir.

Sistemde vuruğu momentinin ilk Fourier analizinden elde edilen harmonik bileşenlerin en büyük genliğe sahip olan 1. Harmonik bileşen q-eksen referans akımına eklenmiş, ikinci Fourier analizinden elde edilen harmonik bileşenlerde sırasıyla q-eksen referans akımına eklenerek vuruğu momentinden dolayı sistem momentinde oluşan dalgalanmanın değişimi incelenmiştir. Bu çalışma 5rpm hızda

3Arms ve 6Arms akım değerinde, sırasıyla ortalama 2.5Nm yükte ve 4.5Nm yükte tekrarlanmıştır.



Şekil 5.33. 5rpm hızda 1.harmonik bileşen eklenen ve ortalaması çıkarılan moment sinyali



Şekil 5.34. 5rpm hızda 1.harmonik bileşen eklenen ve ortalaması çıkarılan momentin harmonik bileşenleri

EASM senkron motor 5rpm hızda 2.5 Nm yükte çalışırken q-eksen akımına iki aşamalı harmonik akım ekleme yöntemi uygulanarak, momentte vuru momentinden dolayı oluşan dalgalanmanın azaltılması incelenmiştir. Momentin değeri, bakır kayıpları ve faz akımının RMS değerindeki değişim Tablo 5.9’da, Şekil 5.35 ve Şekil 5.36’de verilmiştir. Tablo 5.9’da EASM senkron motora uygulanan ve Denklem (5.15)’e göre hesaplanan harmonik akımların RMS değeri verilirken, EASM senkron motora uygulanan akımlardan dolayı oluşan bakır kayıplarının 2.42W’dan 2.59W’a kadar arttığı gösterilmiştir. Harmonik akım ekleme sonucunda

değişen dalga şekilleri Şekil 5.35’de detaylı olarak verilmiştir. Bu yöntem ile vuruğu momentinin değerinin %80.3’den %45.55’e kadar azaltılabildiği gösterilmiş, tork dalgalanmasındaki değişim ise yaklaşık %35 olduğu görülmektedir. İki aşamalı Fourier analizinin tek aşamalı Fourier analizine göre daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir.

Tablo 5.9. 5rpm hızda 2.5Nm yükte faz akımının, momentin ve bakır kaybının değeri

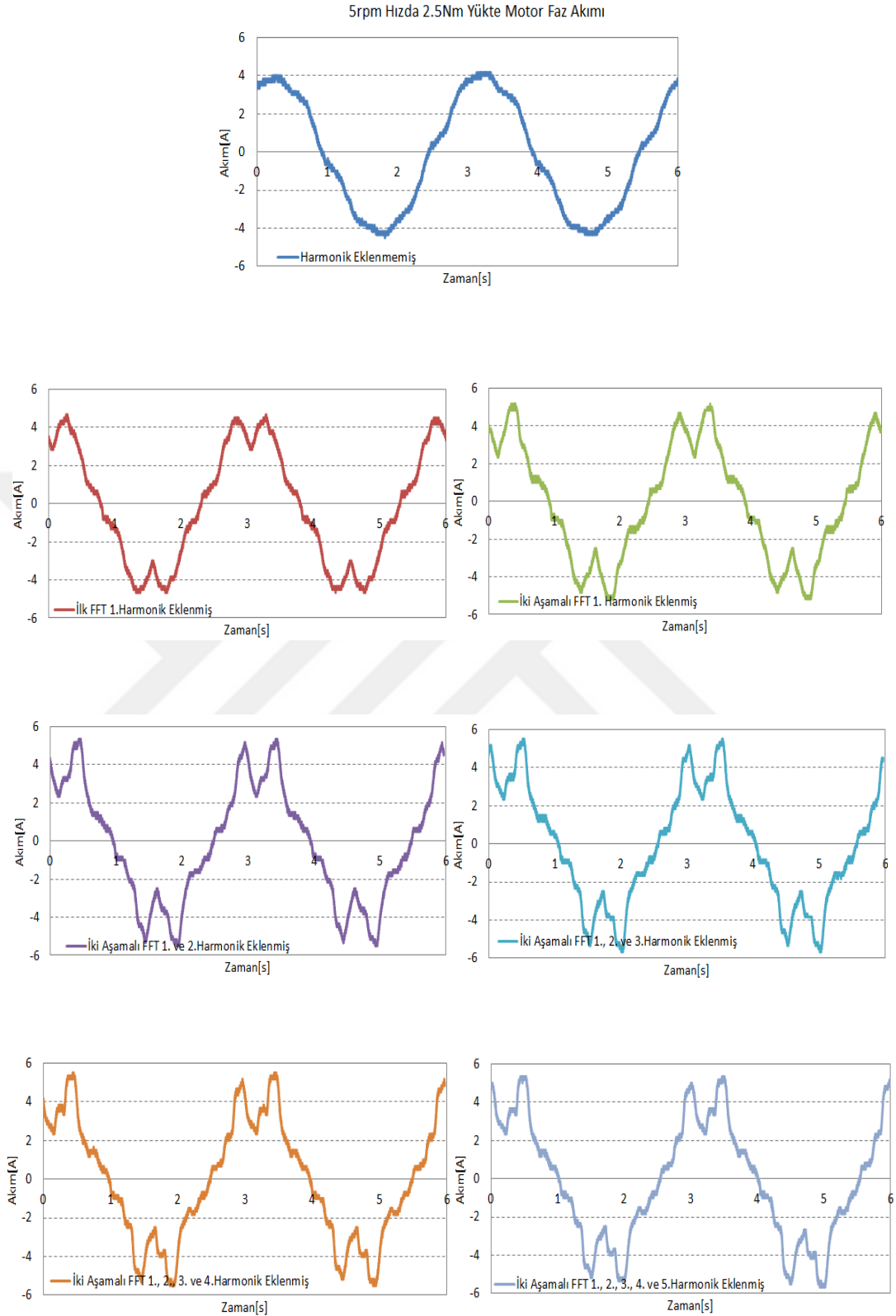
	I_fund [Arms]	I_har [Arms]	T_ort [Nm]	T_ripp [%]	P_cu [W]
Harmonik Eklenmemiş	2.930	0	2.607	80.310%	2.421
İlk FFT 1.Harmonik Eklenmiş	2.930	0.698	2.588	67.772%	2.558
İki Aşamalı FFT 1. Harmonik Eklenmiş	2.930	0.493	2.629	49.567%	2.489
İki Aşamalı FFT 1. ve 2.Harmonik Eklenmiş	2.930	0.774	2.594	45.555%	2.590
İki Aşamalı FFT 1., 2. ve 3.Harmonik Eklenmiş	2.930	0.643	2.603	47.069%	2.538
İki Aşamalı FFT 1., 2., 3. ve 4.Harmonik Eklenmiş	2.930	0.692	2.592	47.819%	2.556
İki Aşamalı FFT 1., 2., 3., 4. ve 5.Harmonik Eklenmiş	2.930	0.685	2.636	47.066%	2.553

EASM senkron motorun 5rpm hızda 2.5 Nm yükte yapılan çalışmanın aynısı 4.5Nm yük için gerçekleştirilmiştir. Momentin değeri, bakır kayıpları ve faz akımının RMS

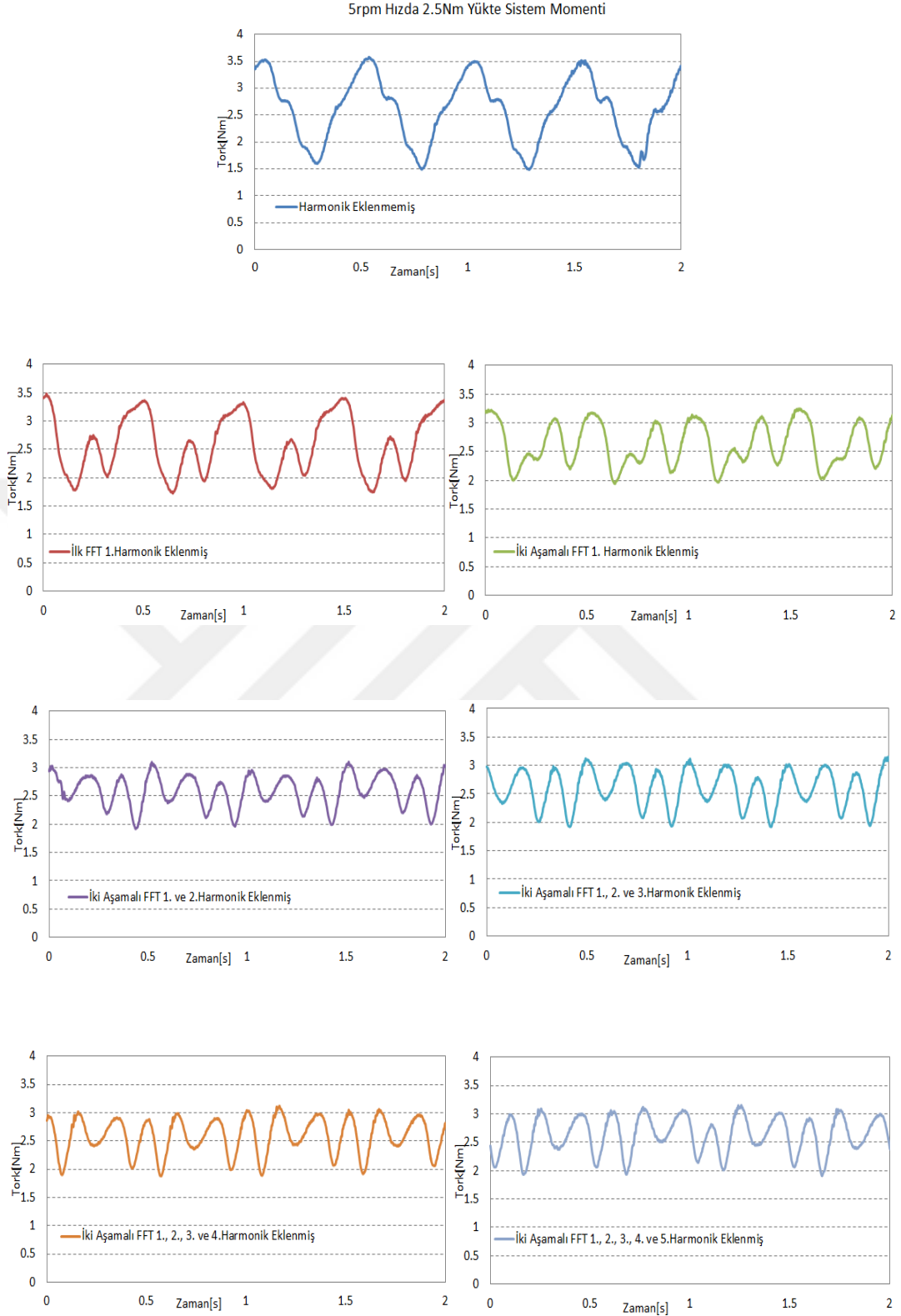
değerindeki değişim Tablo 5.10'da, Şekil 5.37 ve Şekil 5.38'de verilmiştir. Denklem (5.15)'e göre hesaplanan harmonik akımların RMS değeri Tablo 5.10'da verilirken, bu akımların sebep olduğu bakır kayıplarında 9.67W'dan 9.84W'a artış olduğu görülmektedir. Bu yöntem kullanılarak değişen akımların dalga şekilleri Şekil 5.37da verilirken, vuru mu momentinin etkisinin %51.76'dan %24.16'a azaltılabildiği gösterilmiş, tork dalgalanmasındaki değişim ise yaklaşık %28 olduğu görülmektedir.

Tablo 5.10. 5rpm hızda 4.5Nm yükte faz akımının, momentin ve bakır kaybının değeri

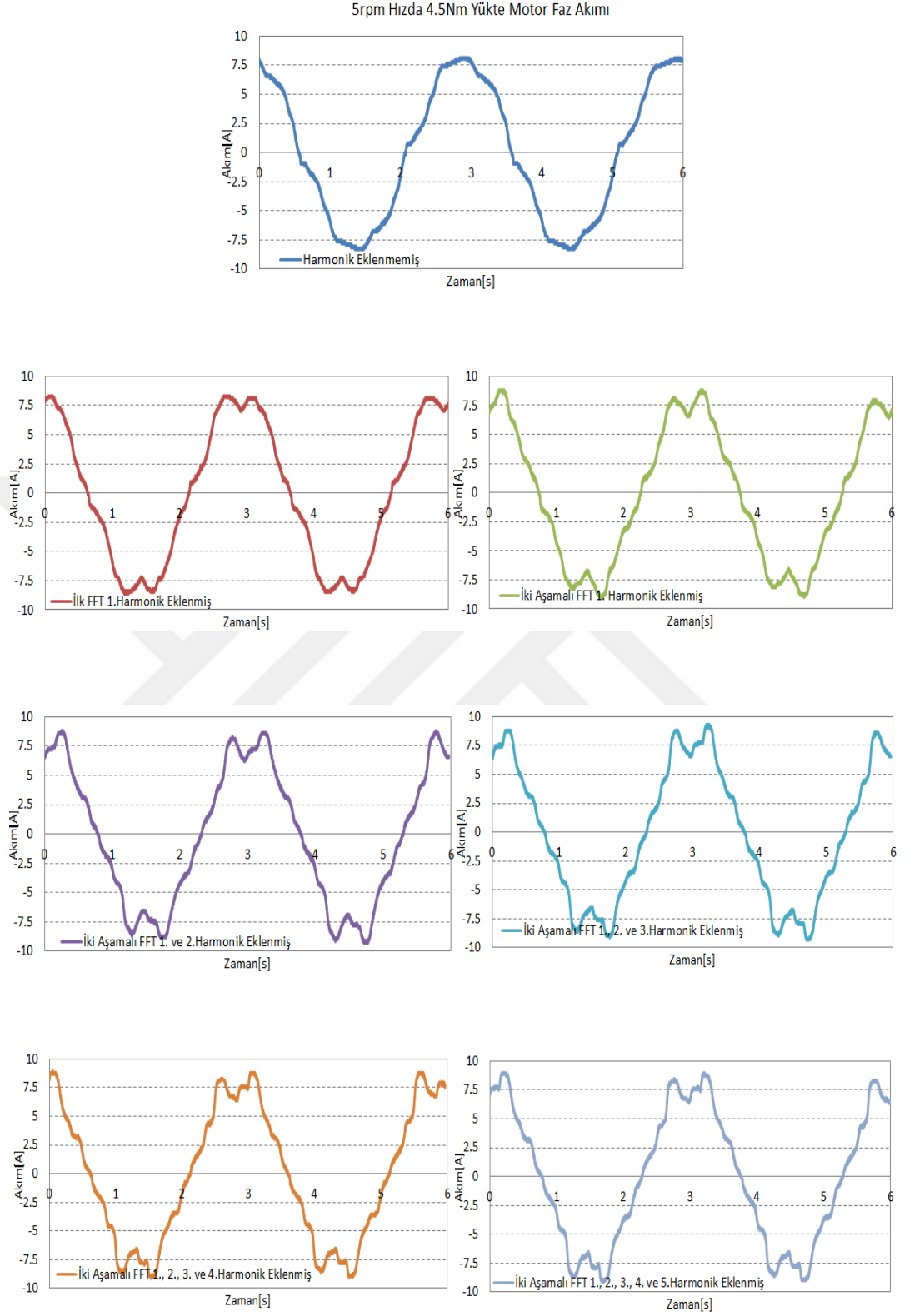
	I_fund [Arms]	I_har [Arms]	T_ort [Nm]	T_ripp [%]	P_cu [W]
Harmonik Eklenmemiş	5.855	0	4.588	51.766%	9.667
İlk FFT 1.Harmonik Eklenmiş	5.855	0.698	4.580	39.218%	9.804
İki Aşamalı FFT 1. Harmonik Eklenmiş	5.855	0.493	4.603	24.159%	9.736
İki Aşamalı FFT 1. ve 2.Harmonik Eklenmiş	5.855	0.774	4.582	28.056%	9.836
İki Aşamalı FFT 1., 2. ve 3.Harmonik Eklenmiş	5.855	0.643	4.602	29.435%	9.784
İki Aşamalı FFT 1., 2., 3. ve 4.Harmonik Eklenmiş	5.855	0.692	4.550	30.858%	9.802
İki Aşamalı FFT 1., 2., 3., 4. ve 5.Harmonik Eklenmiş	5.855	0.685	4.573	30.451%	9.799



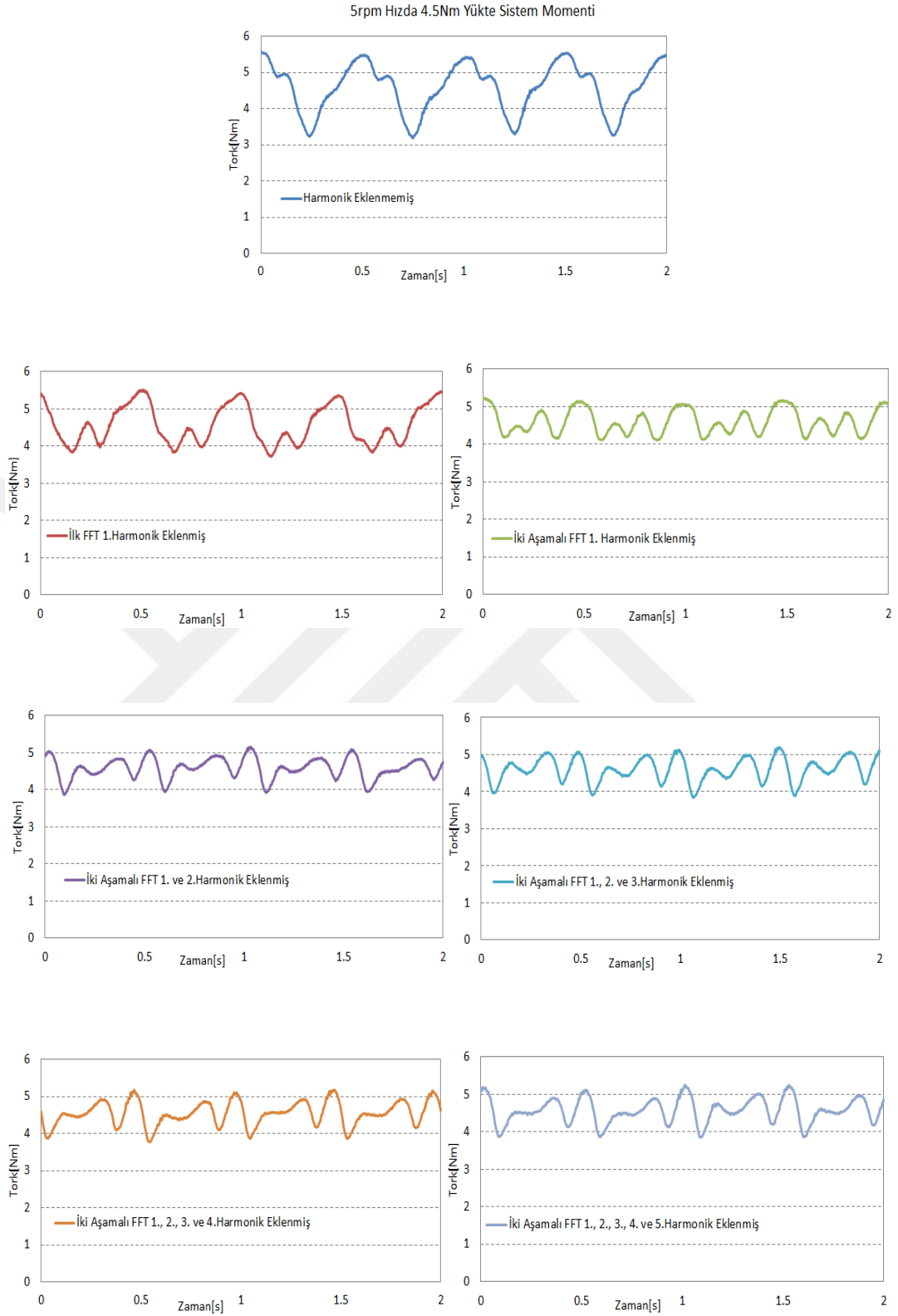
Şekil 5.35. 5rpm hızda 2.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımı değişimi (İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)



Şekil 5.36. 5rpm hızda 2.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentini değişimi (İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)



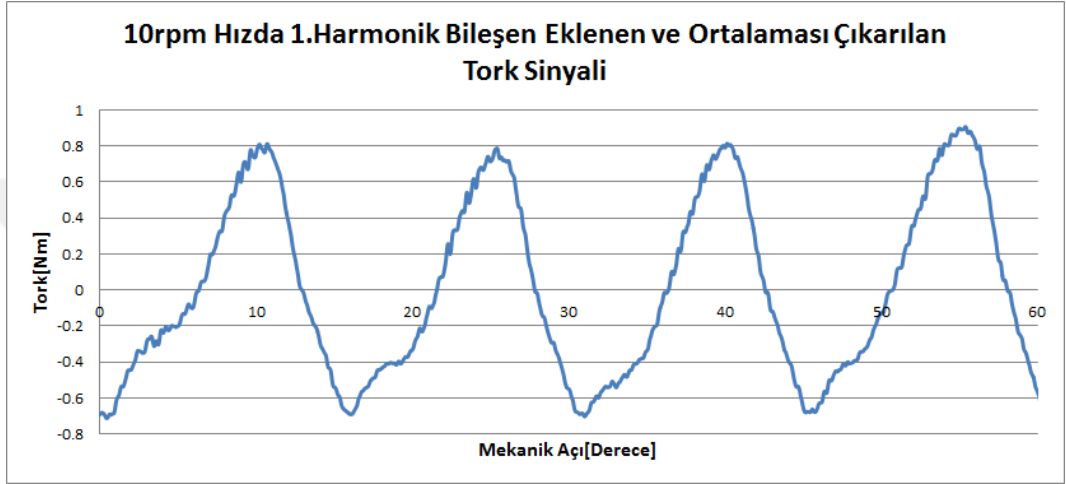
Şekil 5.37. 5rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımı değişimi (İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)



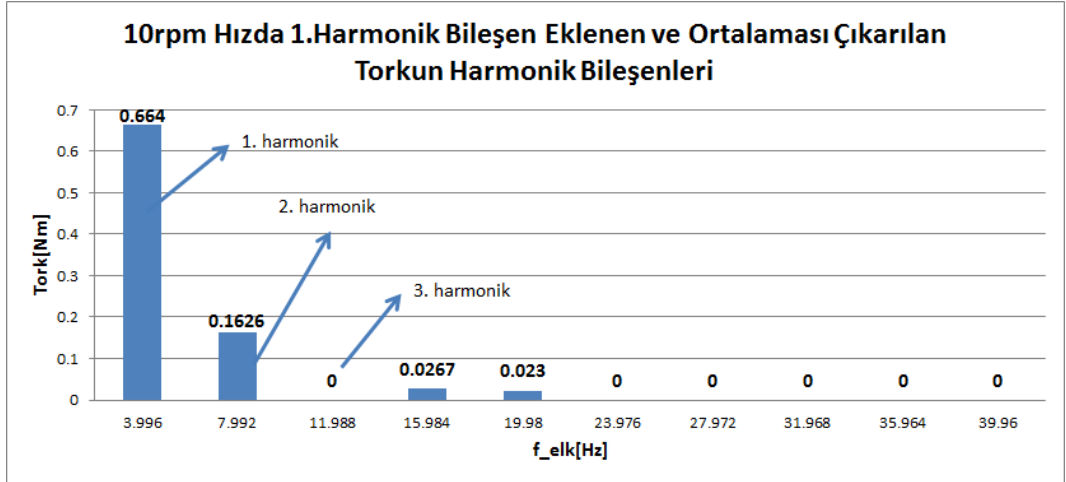
Şekil 5.38. 5rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi (İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)

5.3.1.2.Motor – 1'e 10rpm hızda harmonik akım ekleme

Vuruntu momentinin etkisini daha da azaltabilmek için, 10rpm hızda ilk Fourier analizinde hesaplanan 1. Harmonik akım eklemesi yapılmış haldeki moment sinyalinin ortalama değeri çıkarılarak ve Şekil 5.39'deki sinyal elde edilmiştir. Elde edilen moment sinyalinin MATLAB'de Fourier analizi yapılarak harmonik bileşenleri hesaplanmış ve Şekil 5.40'da verilmiştir.



Şekil 5.39. 10rpm hızda 1.harmonik bileşen eklenen ve ortalaması çıkarılan moment sinyali



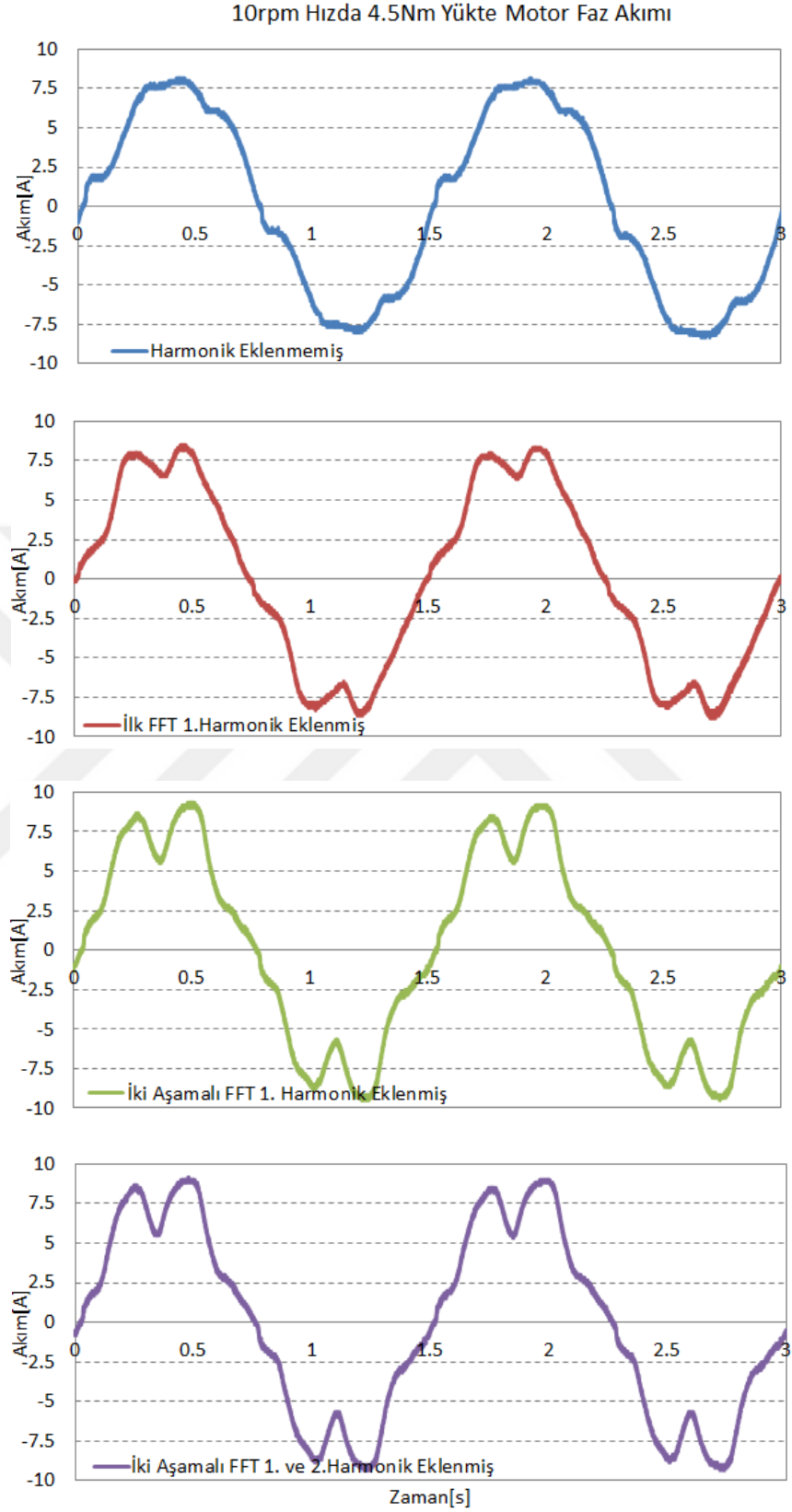
Şekil 5.40. 10rpm hızda 1.harmonik bileşen eklenen ve ortalaması çıkarılan momentin harmonik bileşenleri

EASM senkron Motor-1'in 10rpm hızdaki vuruntu momentinin ilk Fourier analizinden elde edilen harmonik bileşenlerin en büyük genliğe sahip olan 1. Harmonik bileşen q-eksen referans akımına eklenmiş, ikinci Fourier analizinden elde

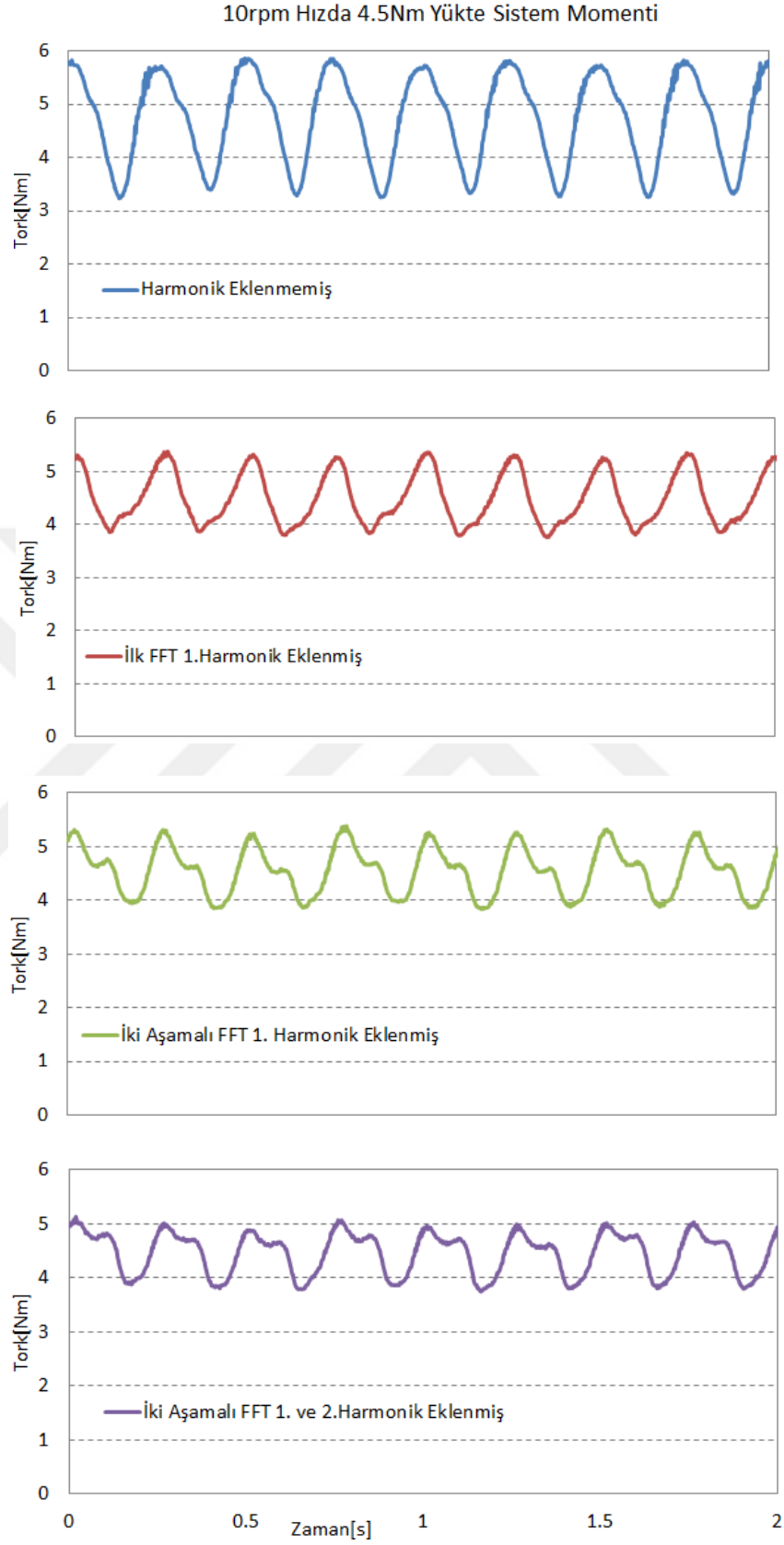
edilen harmonik bileşenlerde sırasıyla q-eksen referans akımına eklenerek vuruğu momentinden dolayı sistem momentinde oluşan dalgalanmanın değışimi incelenmiştir. Bu çalışma 10rpm hızda 6Arms akım değeriinde ortalama 4.5Nm yükte gerçekleştirilmiştir. Momentin değeri, bakır kayıpları ve faz akımının RMS değeriindeki değışim Tablo 5.11’de, Şekil 5.41 ve Şekil 5.42’de verilmiştir. Bu harmonik akımların RMS değeri ve motordan akan akımlara göre oluşan bakır kayıplarının 9.67W’dan 9.8W’a artışı ve vuruğu momentinin %55.49’dan %30.96’a azaltılabildiğı hazırlanan tabloda detaylı olarak verilmiştir. Tork dalgalanmasındaki değışim ise yaklaşık %25 olduğu görülmektedir.

Tablo 5.11. 10rpm hızda 4.5Nm yükte faz akımının, momentin ve bakır kaybının değeri

	I_fund [Arms]	I_har [Arms]	T_ort [Nm]	T_ripp [%]	P_cu [W]
Harmonik Eklenmemiş	5.855	0	4.739	55.491%	9.667
İlk FFT 1.Harmonik Eklenmiş	5.855	0.921	4.500	35.943%	9.906
İki Aşamalı FFT 1. Harmonik Eklenmiş	5.855	0.584	4.548	33.999%	9.763
İki Aşamalı FFT 1. ve 2.Harmonik Eklenmiş	5.855	0.701	4.458	30.964%	9.806



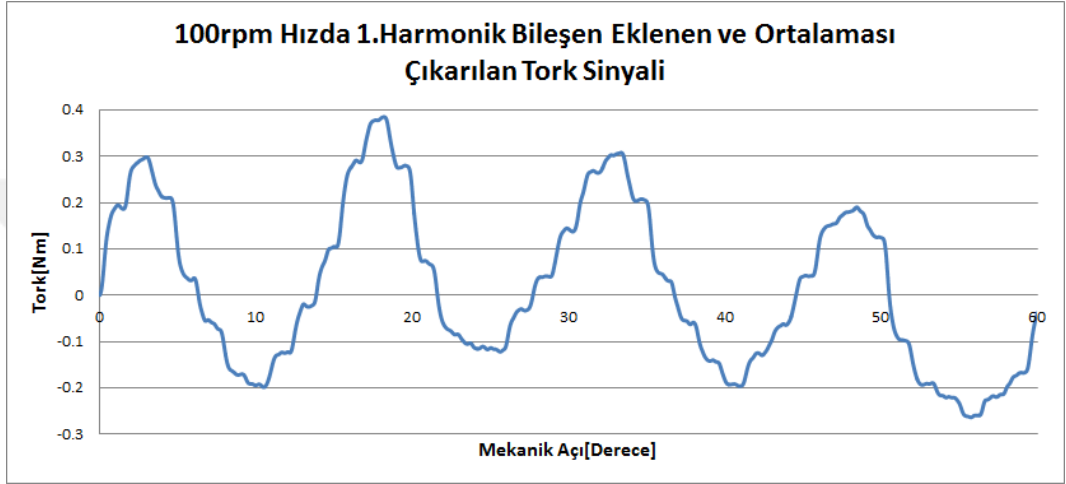
Şekil 5.41. 10rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımı değişimi(İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)



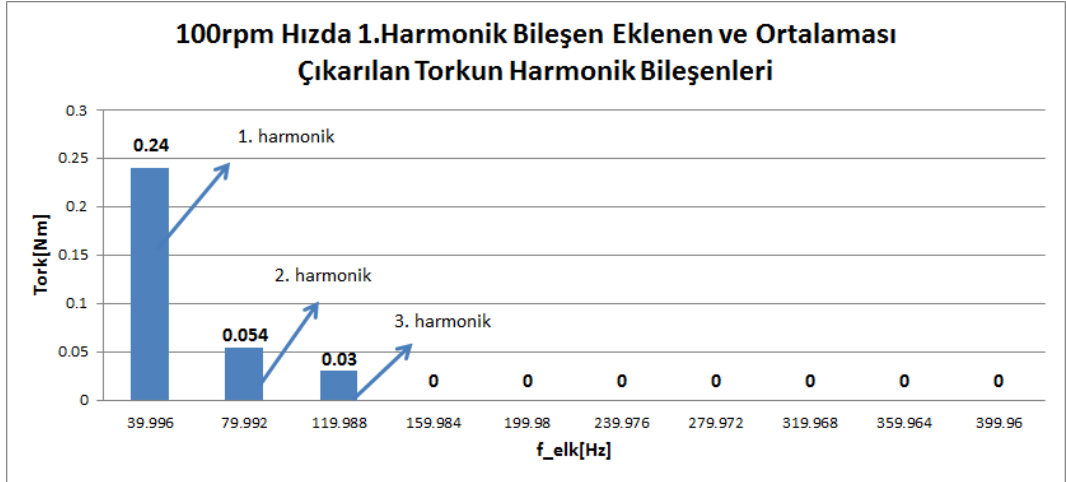
Şekil 5.42. 10rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi (İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)

5.3.1.3.Motor – 1'e 100rpm hızda harmonik akım ekleme

EASM senkron motorun 100rpm hızda vuru momentinin etkisini daha da azaltmak için gerçekleştirilen ilk Fourier analizinde hesaplanan 1. Harmonik akım eklemesi yapılmış moment sinyalinin ortalama değeri çıkarılarak ve Şekil 5.43'deki sinyal elde edilmiştir. Elde edilen moment sinyalinin MATLAB'de Fourier analizi yapılarak harmonik bileşenleri hesaplanarak Şekil 5.44'de gösterilmiştir.



Şekil 5.43. 100rpm hızda 1.harmonik bileşen eklenen ve ortalaması çıkarılan moment sinyali



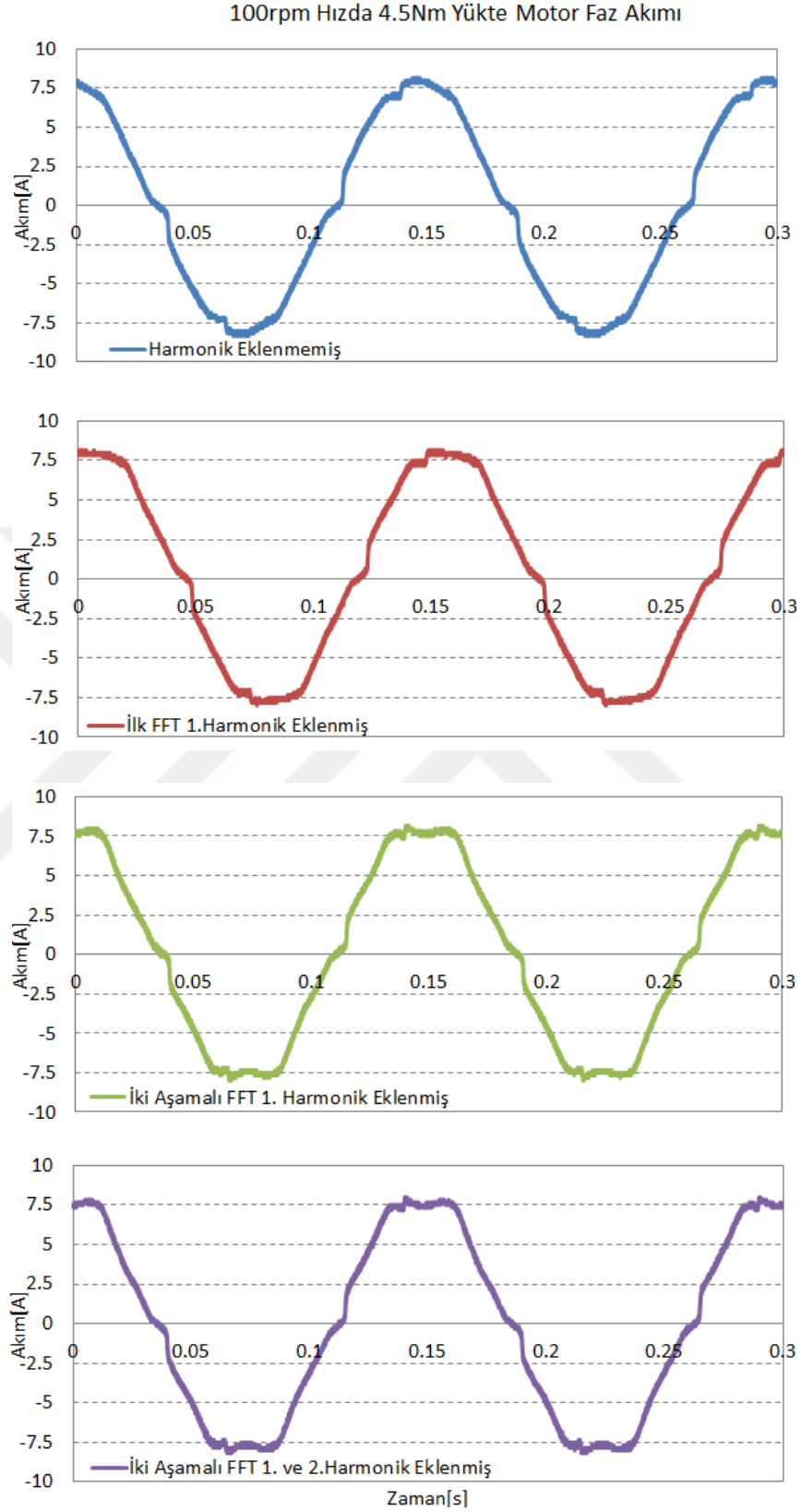
Şekil 5.44. 100rpm hızda 1.harmonik bileşen eklenen ve ortalaması çıkarılan momentin harmonik bileşenleri

EASM senkron motorun 100rpm hızda vuru momentinin ilk Fourier analizinden elde edilen harmonik bileşenlerin en büyük genliğe sahip olan 1. Harmonik bileşen q-eksen referans akımına eklenmiş, ikinci Fourier analizinden elde edilen harmonik

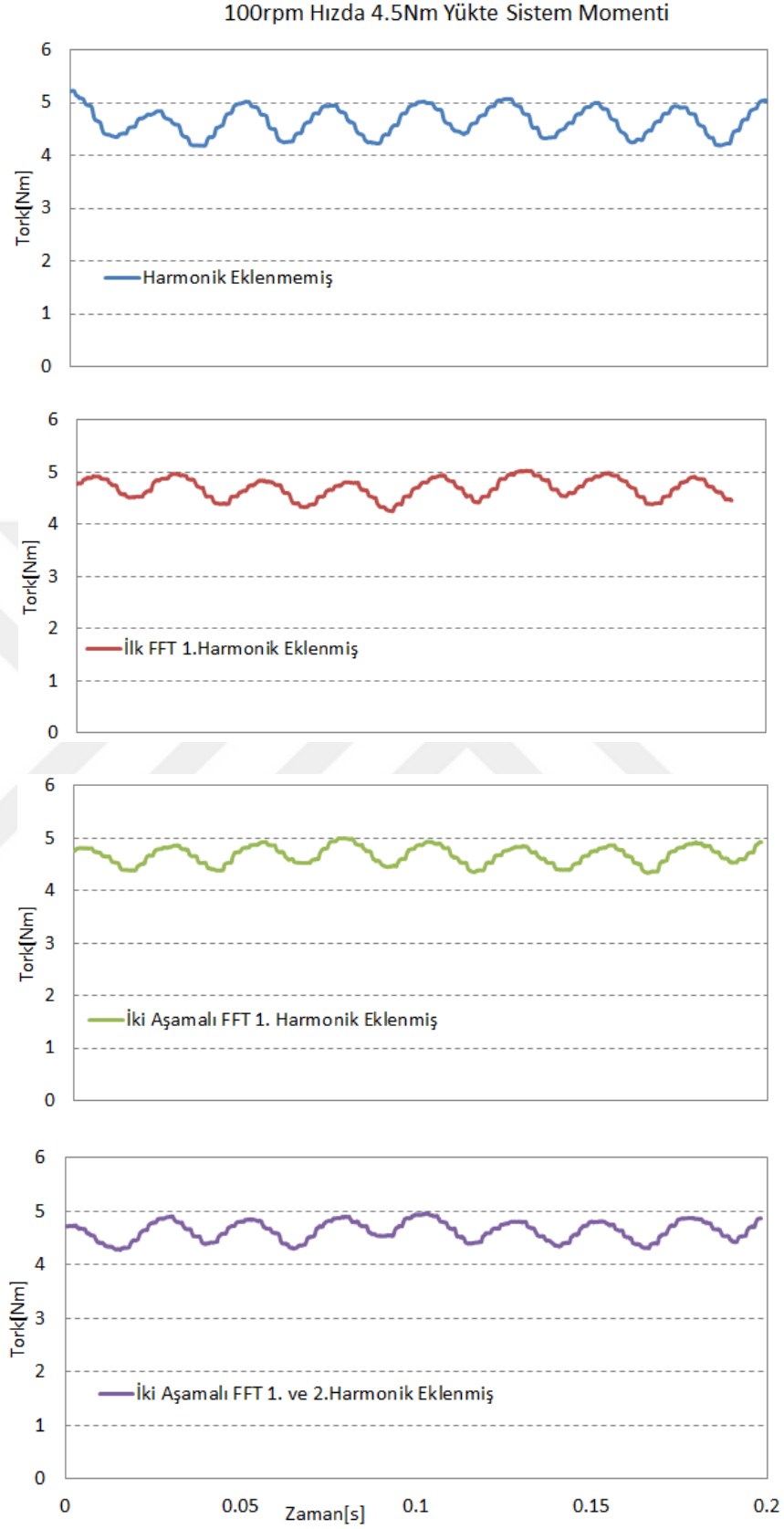
bileşenlerde sırasıyla q-eksen referans akımına eklenerek vuruuntu momentinden dolayı sistem momentinde oluşan dalgalanmanın değişimi incelenmiştir. Bu çalışma 100rpm hızda 6Arms akım değerinde ortalama 4.5Nm yükte gerçekleştirilmiştir. Momentin değeri, bakır kayıpları ve faz akımının RMS değerindeki değişim Tablo 5.12’de, Şekil 5.45 ve Şekil 5.46’de verilmiştir. Uygulanan iki aşamalı Fourier analizi için hesaplanan harmonik akımlar q-eksen referans akımına eklenerek akımın şeklinde oluşturduğu değişiklik ile vuruuntu momentinin %23.18’den %14.33’e düşürülebildiği, bu sırada bakır kayıplarının ise 9.67W’dan 9.684W’a yükseldiği görülmektedir. Tork dalgalanmasındaki değişim ise yaklaşık %9 olduğu görülmektedir.

Tablo 5.12. 100rpm hızda 4.5Nm yükte faz akımının, momentin ve bakır kaybının değeri

	I_fund [Arms]	I_har [Arms]	T_ort [Nm]	T_ripp [%]	P_cu [W]
Harmonik Eklenmemiş	5.855	0	4.700	23.182%	9.667
İlk FFT					
1.Harmonik Eklenmiş	5.855	0.216	4.693	16.718%	9.680
İki Aşamalı FFT					
1. Harmonik Eklenmiş	5.855	0.211	4.678	14.334%	9.680
İki Aşamalı FFT					
1. ve 2.Harmonik Eklenmiş	5.855	0.243	4.638	14.760%	9.684



Şekil 5.45. 100rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımı değişimi(İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)



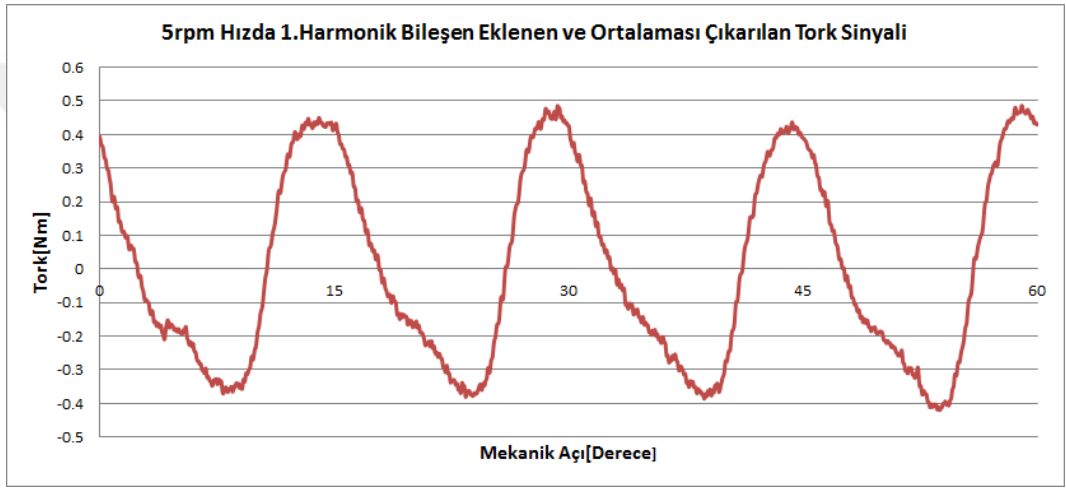
Şekil 5.46. 100rpm hızda 4.5Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi(İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)

5.3.2. EASM Motor – 2 için vurutu momenti ve moment dalgalanmasının azaltılması

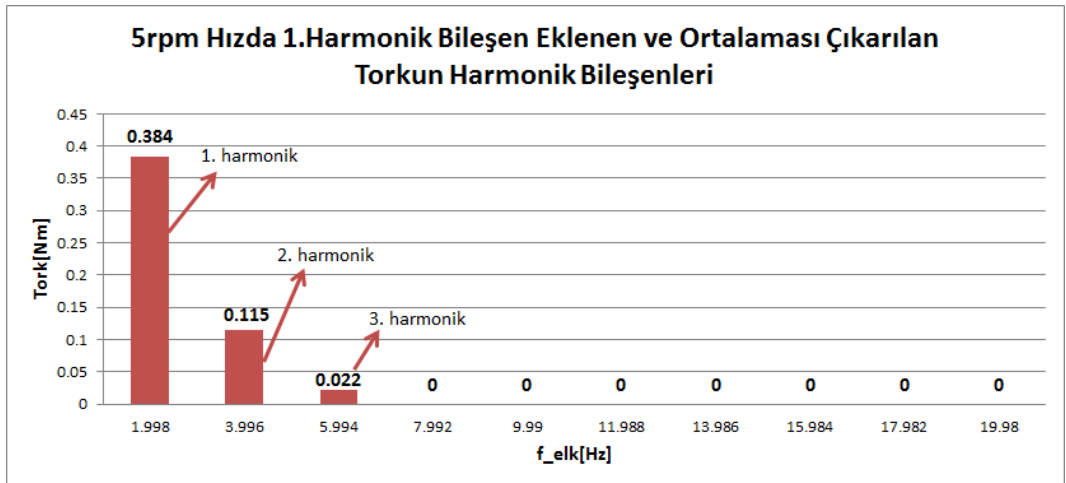
Motor-2 için deneysel çalışmalar 5rpm, 10rpm ve 100rpm hızlarda testler tek bir akım değerinde gerçekleştirilerek, sonuçlar alınmıştır.

5.3.2.1.Motor – 2'ye 5rpm hızda harmonik akım ekleme

EASM senkron Motor-2'un vurutu momentinin etkisinin daha da azaltmak için iki aşamalı Fourier analizi uygulanmıştır.



Şekil 5.47. 5rpm hızda 1.harmonik bileşen eklenen ve ortalaması çıkarılan moment sinyali



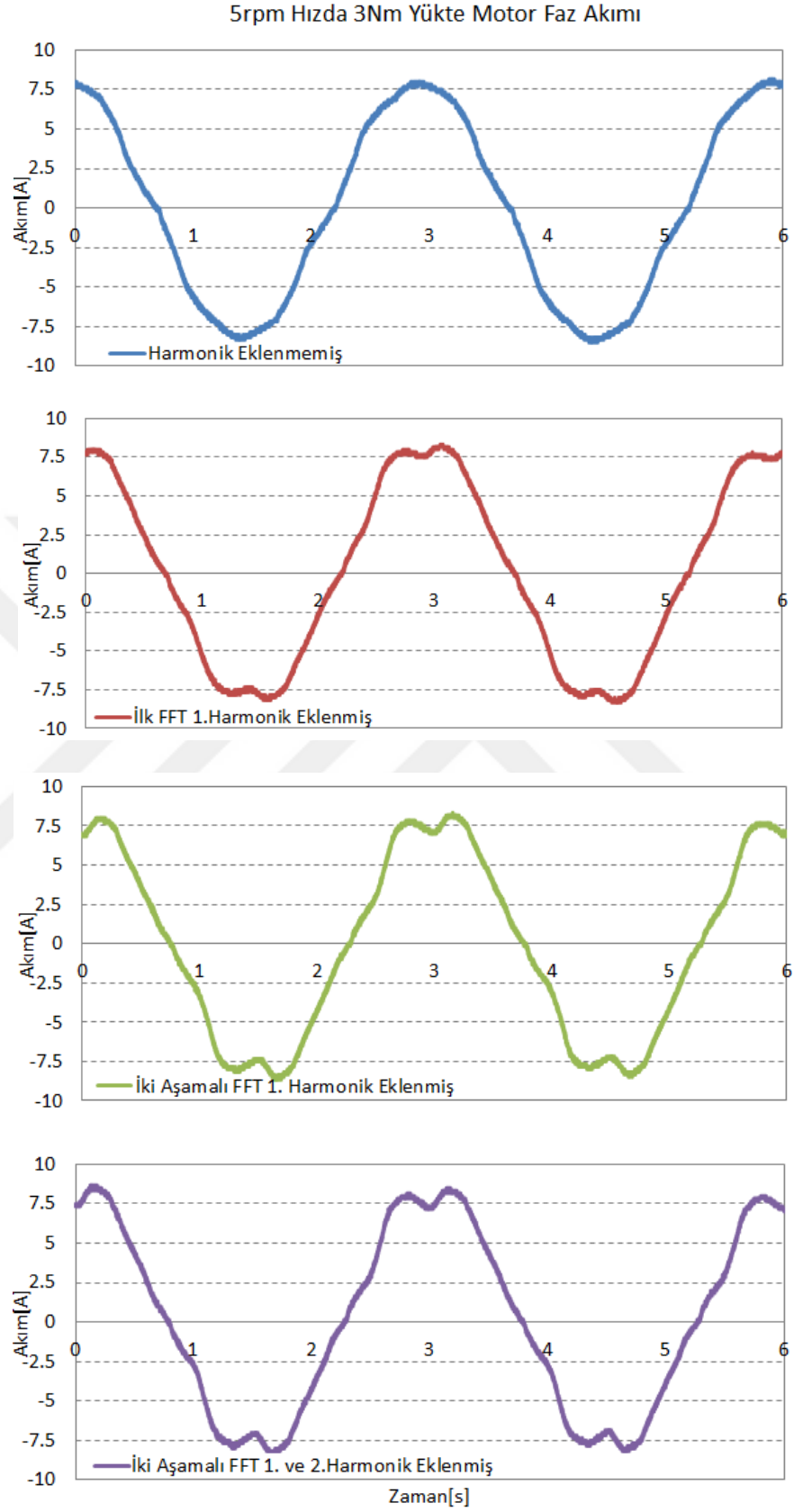
Şekil 5.48. 5rpm hızda 1.harmonik bileşen eklenen ve ortalaması çıkarılan momentin harmonik bileşenleri

Momente ilk Fourier analizinde hesaplanan 1. Harmonik akım eklemesi yapılmış haldeki moment sinyalinin ortalama değeri çıkartılarak ve Şekil 5.47'daki sinyal elde edilmiştir. Bu sinyalinin MATLAB'de Fourier analizi yapılarak harmonik bileşenleri elde edilerek Şekil 5.48'de gösterilmiştir.

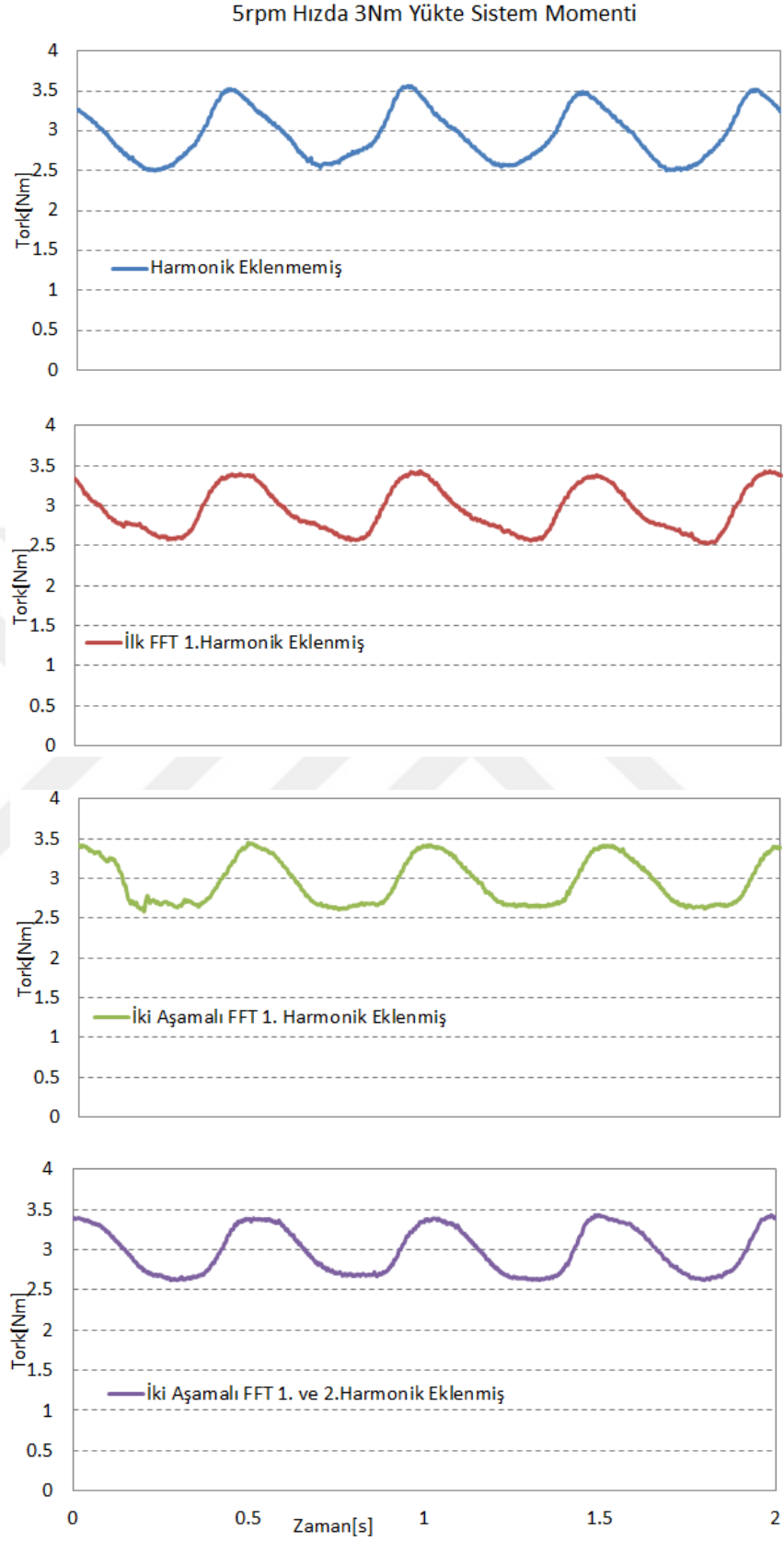
EASM senkron Motor-2 için iki aşamalı Fourier analizi ile harmonik akım ekleme yöntemi, 5rpm hızda 6Arms akım değerinde ortalama 3Nm yükte gerçekleştirilmiştir. Momentin değeri, bakır kayıpları ve faz akımının RMS değerindeki değişim Tablo 5.13'de, Şekil 5.49 ve Şekil 5.50'da verilmiştir. Tablo 5.13'de, bu yöntem için Denklem (5.15)'e göre hesaplanan harmonik akımların RMS değerini ve bu yöntem uygulanırken motordan geçen akımlardan dolayı oluşan bakır kayıplarının 9.49W'dan 9.592W'a arttığı gösterilmiştir. Bu yöntem sayesinde vuruğu momentinin etkisi %35.97'den %27.2'e düşürülebildiği gösterilmiş, tork dalgalanmasındaki değişim ise yaklaşık %9 olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar ile iki aşamalı Fourier analizinin tek aşamalı Fourier analizine göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Tablo 5.13. 5rpm hızda 3Nm yükte akım, moment ve bakır kaybının değeri

	I_fund [Arms]	I_har [Arms]	T_ort [Nm]	T_ripp [%]	P_cu [W]
Harmonik Eklenmemiş	5.800	0	2.961	35.970%	9.486
İlk FFT 1.Harmonik Eklenmiş	5.800	0.596	2.947	30.735%	9.587
İki Aşamalı FFT 1. Harmonik Eklenmiş	5.800	0.492	2.957	29.321%	9.555
İki Aşamalı FFT 1. ve 2.Harmonik Eklenmiş	5.800	0.613	2.988	27.198%	9.592



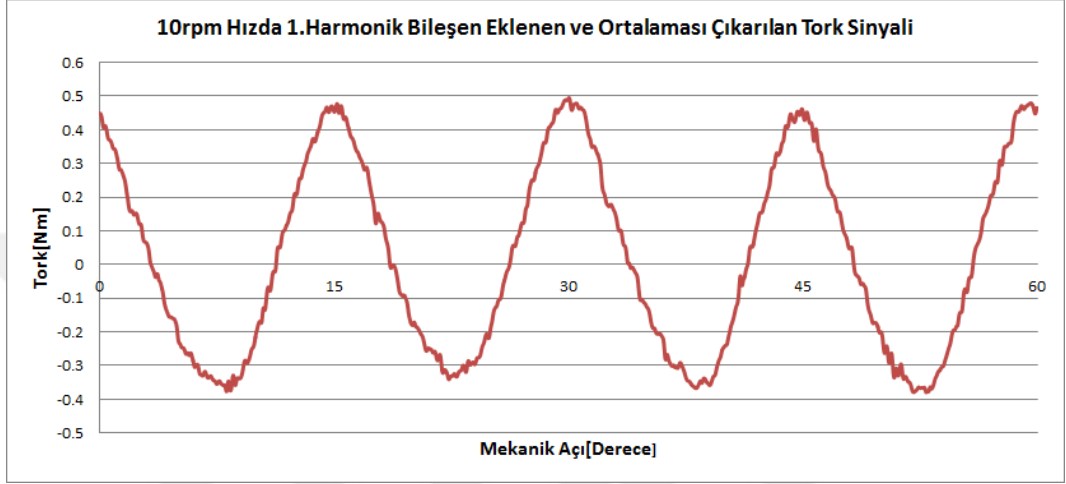
Şekil 5.49. 5rpm hızda 3Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımı değişimi(İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)



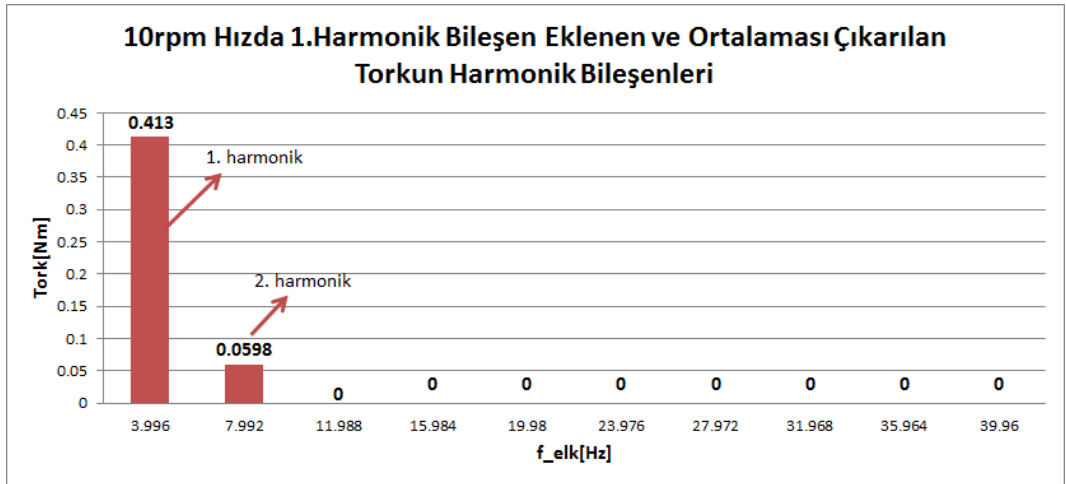
Şekil 5.50. 5rpm hızda 3Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi(İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)

5.3.2.2.Motor – 2'ye 10rpm hızda harmonik akım ekleme

10rpm hızda, ilk Fourier analizinde hesaplanan 1. Harmonik akım eklemesi yapılmış haldeki moment değerinin ortalama değeri çıkarılarak, Şekil 5.51'deki sinyal elde edilmiştir. Elde edilen bu sinyalinin MATLAB'de Fourier analizi yapılarak harmonik bileşenleri hesaplanmıştır ve Şekil 5.52'de verilmiştir.



Şekil 5.51. 10rpm hızda 1.harmonik bileşen eklenen ve ortalaması çıkarılan moment sinyali



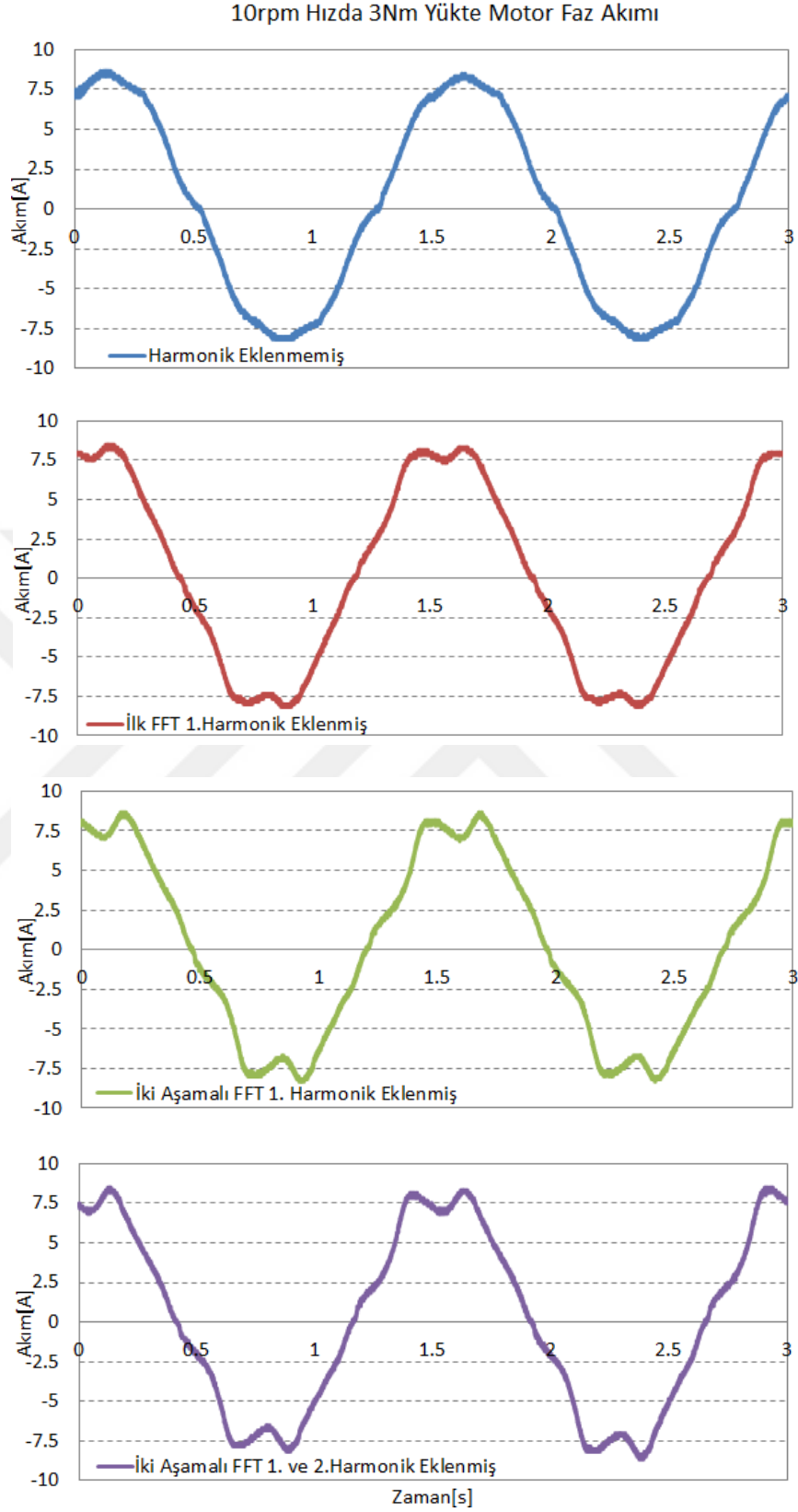
Şekil 5.52. 10rpm hızda 1.harmonik bileşen eklenen ve ortalaması çıkarılan momentin harmonik bileşenleri

10rpm hızda deneysel çalışmada gerçekleştirilen ilk Fourier analizinden elde edilen harmonik bileşenlerin en büyük genliğe sahip olan 1. Harmonik bileşen q-eksen referans akımına eklenmiş, ikinci Fourier analizinden elde edilen harmonik bileşenlerde sırasıyla q-eksen referans akımına eklenerek vurutu momentinden

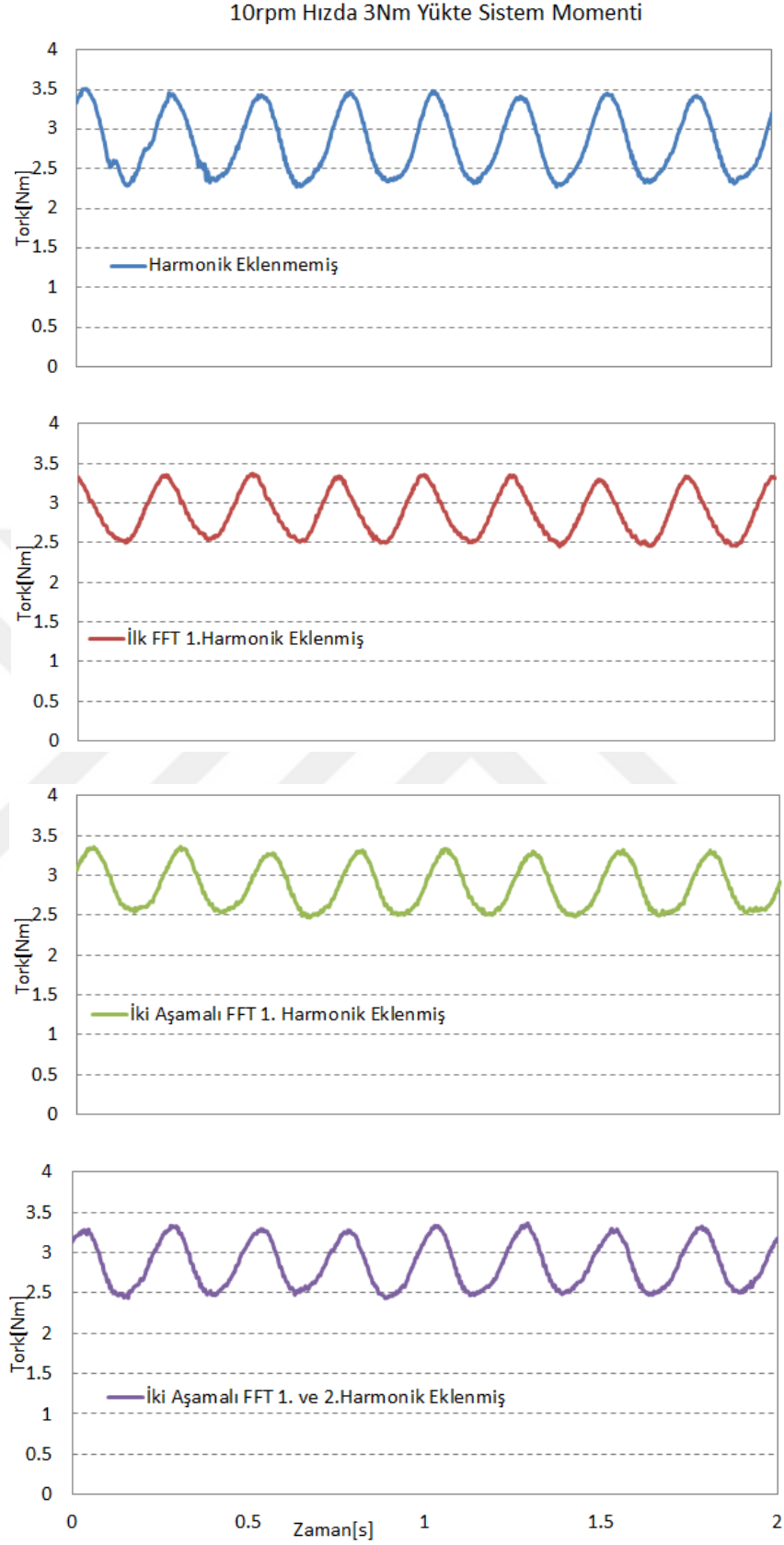
dolayı sistem momentinde oluşan dalgalanmanın değişimi incelenmiştir. Bu çalışma 10rpm hızda 6Arms akım değerinde ortalama 3Nm yükte gerçekleştirilmiştir. Momentin değeri, bakır kayıpları ve faz akımının RMS değerindeki değişim Tablo 5.14’de, Şekil 5.53 ve Şekil 5.54’de verilmiştir. Tablo 5.14’de, sisteme uygulanan ve Denklem (5.15)’e göre hesaplanan harmonik akımların RMS değeri verilirken, EASM senkron motora uygulanan akımlardan dolayı oluşan bakır kayıplarının 9.486W’dan 9.58W’a kadar arttığı gösterilmiştir. Bu yöntem ile vuru momentinin değerinin %43.82’den %31.13’e kadar azaltılabildiği gösterilmiş, tork dalgalanmasındaki değişim ise yaklaşık %13 olduğu görülmektedir. İki aşamalı Fourier analizinin tek aşamalı Fourier analizine göre daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir.

Tablo 5.14. 10rpm hızda 3Nm yükte faz akımının, momentin ve bakır kaybının değeri

	I_fund [Arms]	I_har [Arms]	T_ort [Nm]	T_ripp [%]	P_cu [W]
Harmonik Eklenmemiş	5.800	0	2.829	43.814%	9.486
İlk FFT 1.Harmonik Eklenmiş	5.800	0.727	2.878	32.039%	9.636
İki Aşamalı FFT 1. Harmonik Eklenmiş	5.800	0.530	2.862	31.133%	9.566
İki Aşamalı FFT 1. ve 2.Harmonik Eklenmiş	5.800	0.577	2.860	32.570%	9.580



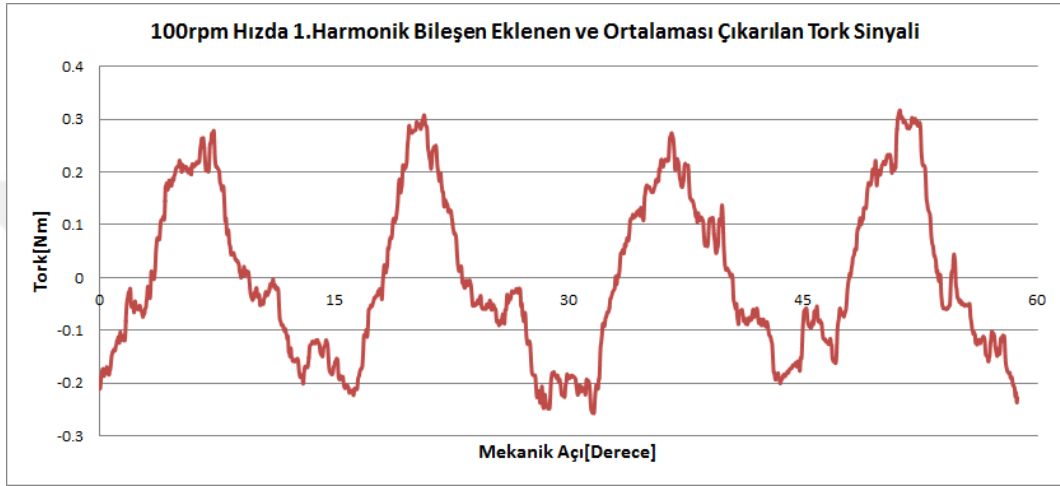
Şekil 5.53. 10rpm hızda 3Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımı değişimi(İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)



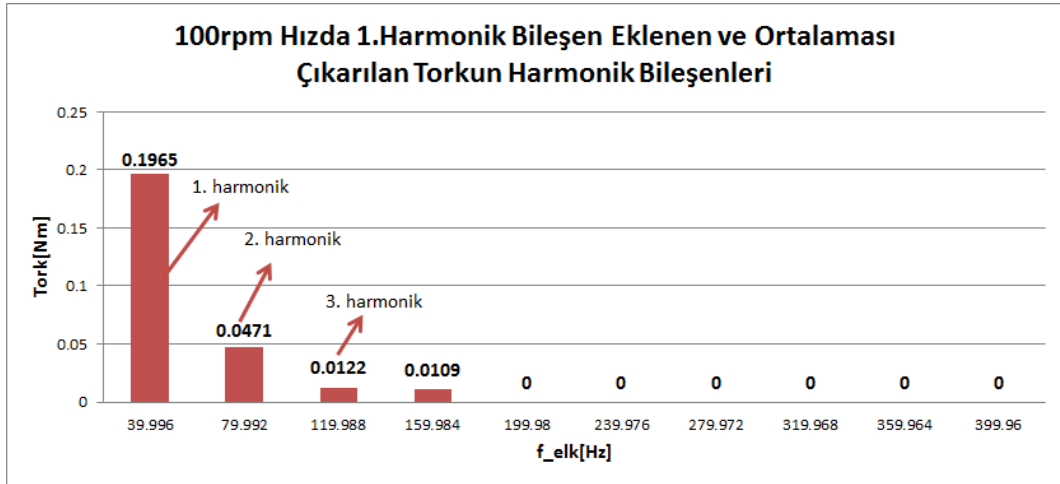
Şekil 5.54. 10rpm hızda 3Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi (İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)

5.3.2.3.Motor – 2’ye 100rpm hızda harmonik akım ekleme

EASM senkron Motor-2’nin 100rpm hızda deneysel çalışmasında ilk Fourier analizinde hesaplanan 1. Harmonik akım eklemesi yapılmış haldeki sistem momentinin ortalama değeri çıkarılarak Şekil 5.55’deki sinyal elde edilmiştir. Bu sinyalinin MATLAB’de Fourier analizi yapılarak harmonik bileşenleri elde edilmiştir ve Şekil 5.56’de gösterilmiştir.



Şekil 5.55. 100rpm hızda 1.harmonik bileşen eklenen ve ortalaması çıkarılan moment sinyali



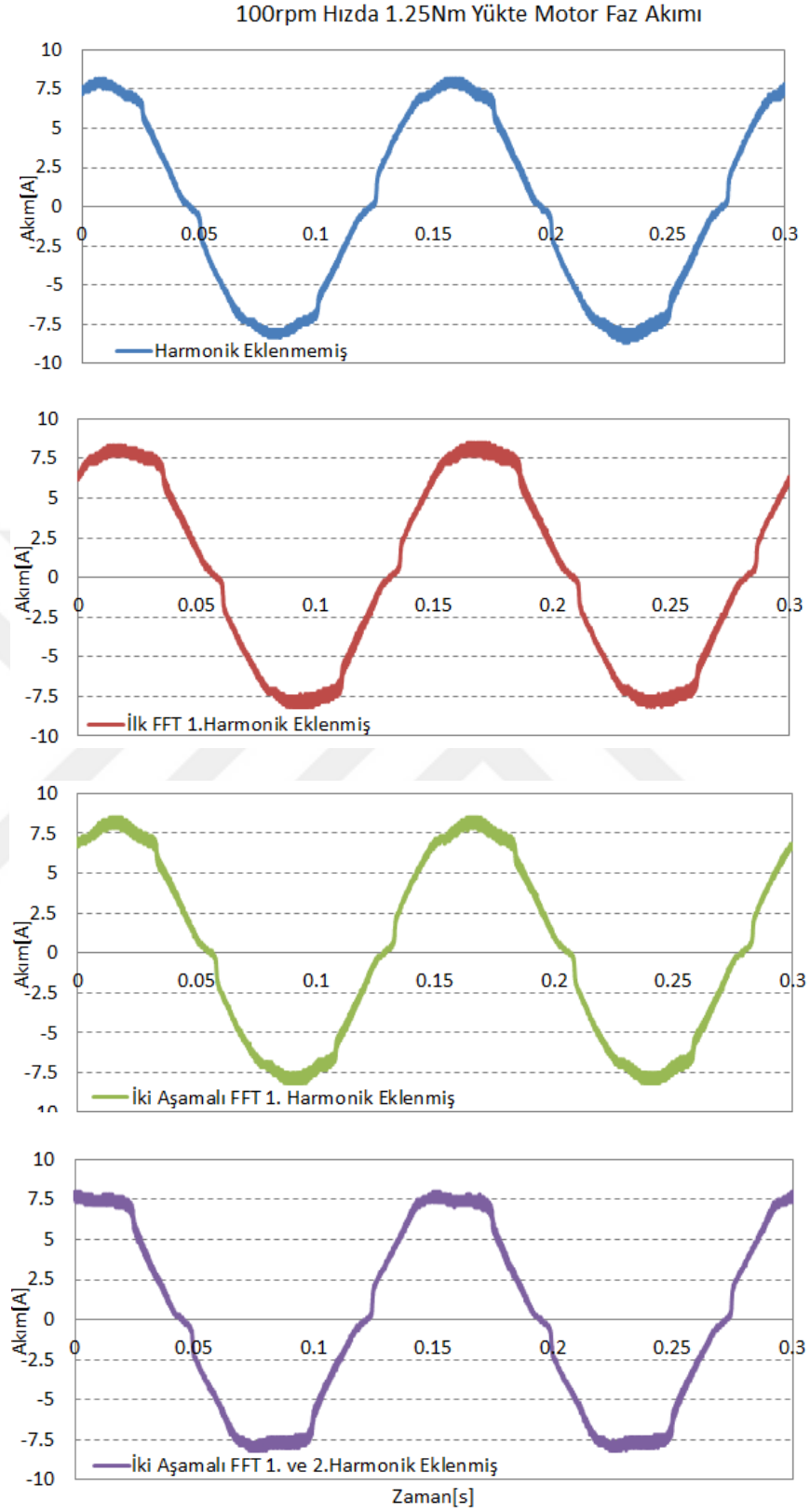
Şekil 5.56. 100rpm hızda 1.harmonik bileşen eklenen ve ortalaması çıkarılan momentin harmonik bileşenleri

EASM senkron Motor-2’nin 100rpm hızda deneysel çalışmasında ilk Fourier analizinden elde edilen harmonik bileşenlerin en büyük genliğe sahip olan 1. Harmonik bileşen q-eksen referans akımına eklenmiş, ikinci Fourier analizinden elde

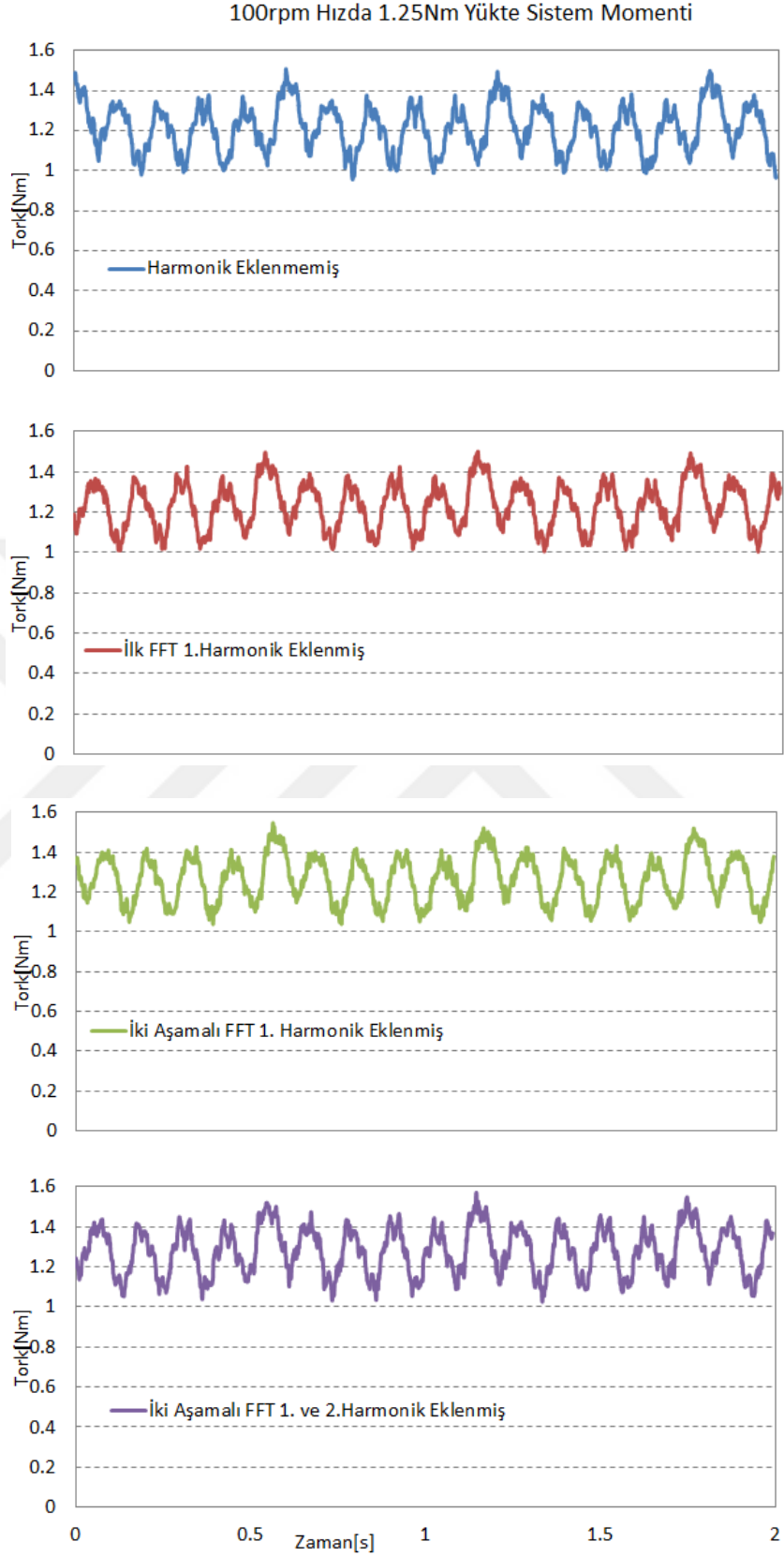
edilen harmonik bileşenlerde sırasıyla q-eksen referans akımına eklenerek vuruğu momentinden dolayı sistem momentinde oluşan dalgalanmanın değişimi incelenmiştir. Bu çalışma 100rpm hızda 6Arms akım değerinde ortalama 1.25Nm yükte gerçekleştirilmiştir. Momentin değeri, bakır kayıpları ve faz akımının RMS değerindeki değişim Tablo 5.15’de, Şekil 5.57 ve Şekil 5.58’de verilmiştir. Tablo 5.15’de, bu yöntem için Denklem (5.15)’e göre hesaplanan harmonik akımların RMS değeri ve bu yöntem uygulanırken motordan geçen akımlardan dolayı oluşan bakır kayıplarının 9.49W’dan 9.51W’a arttığı gösterilmiştir. Bu yöntem sayesinde vuruğu momentinin etkisi %45.317’den %40.21’e düşürülebildiği gösterilmiş, tork dalgalanmasındaki değişim ise yaklaşık %5 olduğu görülmektedir.

Tablo 5.15. 100rpm hızda 1.25Nm yükte faz akımının, momentin ve bakır kaybının değeri

	I_fund [Arms]	I_har [Arms]	T_ort [Nm]	T_ripp [%]	P_cu [W]
Harmonik Eklenmemiş	5.800	0	1.218	45.317%	9.486
İlk FFT					
1.Harmonik Eklenmiş	5.800	0.179	1.227	40.413%	9.496
İki Aşamalı FFT					
1. Harmonik Eklenmiş	5.800	0.252	1.266	40.210%	9.504
İki Aşamalı FFT					
1. ve 2.Harmonik Eklenmiş	5.800	0.302	1.280	42.619%	9.512



Şekil 5.57. 100rpm hızda 1.25Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre motor faz akımı değişimi(İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)



Şekil 5.58. 100rpm hızda 1.25Nm yükte q-eksene eklenen harmonik akımlara göre sistem momentinin değişimi(İki aşamalı FFT uygulanmış test sonuçları)

EASM senkron motorun her iki rotor montajı ile yapılan deneysel çalışmalarda harmonik akım ekleme metodu ile vurutu momentinden kaynaklanan dalgalanmanın azaltılabildiği alınan deneysel sonuçlar ile gözlenmiştir. Motor-1 ve Motor-2 tork sabitlerinin farklılıklarından dolayı aynı akım bölgesinde tork sabiti katsayıları ile doğru orantılı bir sistem momenti verdiği deneysel sonuçlar ile gösterilmiştir. Harmonik akım ekleme metodu ile özellikle düşük hızlarda bilinen vurutu momentinde başarılı sonuçlar verdiği hem benzetim hem de deneysel sonuçlar ile bariz görölmektedir.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, EASM senkron motorun manyetik tasarımından kaynaklanan vuruñtu momentinin tasarımda değişiklik yapılmadan motor kontrolünde yapılan düzenleme ile vuruñtu momentinden dolayı motor milinde oluşan dalgalanmanın azaltılması çalışmasına odaklanılmıştır. EASM senkron motorun kontrolünde harmonik akım ekleme yöntemi ile vuruñtu momentinden kaynaklanan moment dalgalanmasının azaltılması üzerine yapılan bu çalışmada iki farklı eksenel akılı SM motor üzerinden benzetim çalışmaları yapılarak, geliştirilen bir algoritma ile deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bahsedilen bu iki EASM motor yapısının vuruñtu momentinin tepe değerleri ve tork sabitleri birbirlerinden farklı olduğu deneysel çalışmalar ile gösterilmiştir. Geliştirilen algoritma her iki motorun yapısında da harmonik akım ekleme metodu ile düşük hızlarda vuruñtu momentinden dolayı oluşan moment dalgalanmasının azaltılmasındaki başarısının yanı sıra yüksek hızlarda da moment dalgalanmasının azaltılmasında etkili olduğu deneysel olarak gösterilmiştir. Harmonik akım ekleme metodu ile bilinen bir vuruñtu momentinin sistem momenti üzerinde oluşturduğu etkinin önemli ölçüde azaltılabildiği ve geliştirilen metodun başarılı olduğu kanıtlanmıştır. Ayrıca bu yöntem, endüstriyel uygulamalarda değişen yüklerde veya vuruñtu momenti bilinmeyen bir motorda bu kadar başarılı sonuçlar vermeyeceği ve işlem yükünden dolayı tercih edilmeyeceği öngörülmektedir. Endüstriyel çalışmalarda harmonik akım ekleme metoduna benzer bir metot olan yük torku gözlemcileri kullanılması önerilebilir. Yüksek hızlarda bant genişliklerinin arttırılması ve kontrolör kazançlarının hassas bir şekilde ayarlanması ile moment dalgalanmasının azaltılabildiği bilinmektedir. Düşük hızlarda vuruñtu momentinin azaltılması, yüksek hızlarda ise moment dalgalanmasının azaltılması için bahsedilen diğer metotlar da gelecek çalışmalar için düşünülebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Pillay P., Krishnan R., Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives, II. The Brushless DC Motor Drive, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1989, **25**(2), 274-279.
- [2] Cascella G. L., Cupertino F., PMSM Rotor Double-Alignment by PI and Sliding-Mode Controllers, *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, 2003, **3**, 1741-1747.
- [3] Bochenkov B., Lutz S., A Review of Modern Materials of Permanent Magnets, *The 8th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology*, 2004, **1**, 201-203.
- [4] Bose B., Evaluation of Modern Power Semiconductor Devices and Future Trends of Converters, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1992, **28**, 403-413.
- [5] Yano M., Abe S., Ohno E., History of Power Electronics for Motor Drives in Japan, <https://ethw.org/w/images/4/49/Yano2.pdf> (Ziyaret tarihi: 1 Eylül 2020).
- [6] Rafiq A., Sarwer M.G., Datta M. and Chosh B.C., Fast Speed Response Field-Orientation Control of Induction Motor Drive with Adaptive Neural Integrator, *2005 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2005, 610-614.
- [7] Drury B., The Control Techniques Drives and Controls Handbook, Second edition, *The Institution of Engineering and Technology*, 50-100, 2009.
- [8] Bose B., Power Electronics and Motor Drives Advances and Trends, First edition, *Academic Press*, 22, 2006.
- [9] Gabriel R., Leonhard W., Nordby C.J., Field Oriented Control of Standard AC Motors Using Microprocessors, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1980, **IA-16**, 186-192.
- [10] Sebastian T., Slemon G., Rahman M., Modelling of Permanent Magnet Synchronous Motors, *IEEE Transactions on Magnetics*, 1986, **2**, 1069-1071.
- [11] Khurram A., Position and Speed Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motors, Doktora Tezi, Michigan State University, East Lansing, MI, 2001.
- [12] Ogasawara S., Akagi H., Nabae A., The Generalized Theory of Indirect Vector Control for AC Machines, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1988, **24**, 470-478.

- [13] Jia H., Cheng M., Hua W., Yang Z., Zhang Y., Compensation of Cogging Torque for Flux-Switching Permanent Magnet Motor Based on Current Harmonics Injection, *2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, 2009, 286-291.
- [14] Koh C. S., Yoon H. S., Nam K. W., Choi H. S., Magnetic Pole Shape Optimization of Permanent Magnet Motor for Reduction of Cogging Torque, *IEEE Transactions on Magnetics*, 1997, **33**(2), 1822-1827.
- [15] Bianchi N., Bolognani S., Design Techniques for Reducing the Cogging Torque in Surface-Mounted PM Motors, *IEEE Transactions on Industry Application*, 2002, **38**(5), 1259-1265.
- [16] Islam R., Husain I., Fardoun A., McLaughlin K., Permanent-Magnet Synchronous Motor Magnet Designs with Skewing for Torque Ripple and Cogging Torque Reduction, *IEEE Transactions on Industry Application*, 2009, **45**(1), 152- 160.
- [17] Zhu L., Jiang S .Z., Zhu Z. Q., Chan C. C., Analytical Methods for Minimizing Cogging Torque in Permanent-Magnet Machines, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, **45**(4), 2023 – 2031.
- [18] Zhu Z. Q., Howe D., Influence of Design Parameters on Cogging Torque in Permanent Magnet Machines, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2000, **15**(4), 407–412.
- [19] Lukaniszyn M., Jagiela M., Wrobel R., Optimization of Permanent Magnet Shape for Minimum Cogging Torque Using a Genetic Algorithm, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2004, **40**(2), 1228–1231.
- [20] Yang Y., Wang X., Zhang R., Zhu C., and Ding T., Research of Cogging Torque Reduction by Different Slot Width Pairing in Permanent Magnet Motors, *2005 International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2005, **1**, 367–370.
- [21] Lateb R., Takorabet N., Meibody-Tabar F., Effect of Magnet Segmentation on the Cogging Torque in Surface-Mounted Permanent Magnet Motors, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, **42**(3), 442–445.
- [22] Marchand C., Razek A., Optimal Torque Operation of Digitally Controlled Permanent Magnet Synchronous Motor Drives, *IEE Proceedings B (Electric Power Applications)*, 1993, **140**, 232–240.
- [23] Huy H. Le, Perret R., Feuillet R., Minimization of Torque Tipple in Brushless DC Motor Drives, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1986, IA-**22**(4), 748–755.
- [24] Lee G., Kim S., Hong J., Bahn J., Torque Ripple Reduction of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Using Harmonic Injected Current, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008, **44**(6), 1582-1585.

- [25] Jia H., Cheng M., Hua W., Zhao W., Li W., Torque Ripple Suppression in Flux-Switching PM Motor by Harmonic Current Injection Based on Voltage Space-Vector Modulation, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, **46**(6), 1527-1530.
- [26] Ebrahimi A., A Novel Harmonic Current Control Algorithm for Torque Ripple Reduction of Permanent Magnet Synchronous Motors for Traction Application, *2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, 2018, 1-5.
- [27] Wu C-J., Tsai M-C, Cheng L-J., Design and Implementation of Position-Based Repetitive Control Torque Observer for Cogging Torque Compensation in PMSM, *Applied Sciences*, 2020, **10**(1), 96.
- [28] Guziński J., Morawiec M., Krzemiński Z., Łuksza K., Strankowski P., Kouzou A., Sensorless Low Speed PMSM Motor Control with Cogging Torque Compensation, *2019 2nd International Conference on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE)*, 2019, 1-6.
- [29] Mattavelli P., Tubiana L., Zigliotto M., Torque-Ripple Reduction in PM Synchronous Motor Drives Using Repetitive Current Control, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2005, **20**(6), 1423-1431.
- [30] Springob L., Holtz J., High-bandwidth Current Control for Torque Ripple Compensation in PM Synchronous Machines, *IEEE Transactions Industrial Electronics*, 1998, **45**(5), 713-721.
- [31] Mohamed Y. A. I., El-Saadany E. F., A Current Control Scheme with an Adaptive Internal Model for Torque Ripple Minimization and Robust Current Regulation in PMSM Drive Systems, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008, **23**(1), 92-100.
- [32] Lee G., Choi W., Kim S., Kwon S., Hong J.P., Torque Ripple Minimization Control of Permanent Magnet Synchronous Motors for EPS Applications, *International Journal of Automotive Technology*, 2011, **12**, 291-297.
- [33] Xin L., Dong Z., Pei Z., Rui W., The Current Feedforward Compensation Method for the Cogging Torque of Permanent Magnet Synchronous Motors, *2019 IEEE 9th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, 2019, 1091-1095.
- [34] TI, Digital Signal Processing Solution for Permanent Magnet Synchronous Motor Application Note, *Texas Instruments*, BPRA044, 1997.
- [35] Aydın M., Axial Flux Surface Mounted Permanent Magnet Disc Motors For Smooth Torque Traction Drive Applications, Doktora Tezi, University of Wisconsin-Madison, Madison, 2004.
- [36] Nasar S.A., Boldea. I., Unnewehr L.E., *Permanent Magnet, Reluctance and Self-Synchronous Motors*, CRC Press, USA, 107-215, 1993.

- [37] Bizot C., Brottes J., Lungeanu M., Poulsen B., Sera D., and Sorensen M. B., Sensorless Control for PMSM, *Power Electronics and Drives*, Institute of Energy Technology, 2003, Aalborg University.
- [38] Aydın M., Brushless Permanent Magnet Servomotors, Editör: Küçük S., Serial and Parallel Robot Manipulators: *Kinematic Dynamics Control and Optimization*, First Edition, InTech, Rijeka, 275-294, 2012.
- [39] Gör H., Eksenel Akıllı Jeneratörlerin Tasarımı ve Uygulaması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2014.
- [40] Mour, S., Design on Low Speed Axial Flux Permanent Magnet Generators for Marine Current Application, Doktora Tezi, Memorial University of Newfoundland, Newfoundland, 2009.
- [41] Hewitt A.J., The Effects of Curvature on Axial Flux Machine Cores, Doktora Tezi, University of Southern Queensland, Queensland, 2005.
- [42] Sung S., Jeong J., Park Y., Choi J., Jang S., Improved Analytical Modeling of Axial Flux Machine with a Double-Sided Permanent Magnet Rotor and slotless Stator Based on an Analytical Method, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, **48**(11), 2945-2948.
- [43] Vas P., *Sensorless Vector and Direct Torque Control*, Oxford University Press, New York, 1998.
- [44] Aydın M., Eksenel Akıllı Sürekli Mıknatıslı Elektrik Motorlarında Vuruntu Moment Minimizasyonu, *TUBITAK*, Proje No: 108E051, Rapor 1, 2008.
- [45] Ferreira A. P., Costa A. F., "Direct Driven Axial Flux Permanent Magnet Generator for Small-Scale Wind Power Applications", *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPO'11)*, 2011.
- [46] Özgenel M. C., Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun Vektör Kontrol Tekniği ile Denetimi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2003.
- [47] Bose B. K., Energy, Environment and Advances in Power Electronics, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2000, **15**(4), 688-701.
- [48] Van Wyk J. D., Power Electronic Converter for Motion Control, *Proceedings of the IEEE*, 1994, **82**(8), 1164-1193.
- [49] Kocalmış B. A., Sünter S., 3 Fazlı Evirici Devresi için SDGM, SHEDGM, HIDGM ve UVDGM Tekniklerinin Karşılaştırılması, *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2018, **7**, 100-110.
- [50] <https://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/products/powermod/intelligentpmod/index.html> (Ziyaret tarihi: 5 Eylül 2020).
- [51] Atan Ö., Fırçasız DA Motorunun Modellenmesi ve PWM Yöntemiyle Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van, 2007.

- [52] Kuo B. J., *Otomatik kontrol sistemleri*, 5. Basım, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2005.
- [53] Sarioğlu M. K., Gökaşan M., Boğosyan S., *Asenkron Makinalar ve Kontrolü*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2003.
- [54] Yolaçan E., Küçük Güçlü Yüzey Mıknatıslı ve Dahili Mıknatıslı Senkron Motorlara Vektör Kontrol Yönteminin Deneysel Olarak Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2012.
- [55] Microsemi, Park, Inverse Park and Clarke, Inverse Clarke Transformations MSS Software Implementation, *Microsemi Corporate Headquarters*, User Guide, 2013.
- [56] TI, Implementation of a Speed Field Oriented Control of 3-phase PMSM Motor using TMS320F240, *Texas Instruments*, SPRA588, 1999.
- [57] Qingling H., Qunjing W., Design Techniques for Reducing Cogging Torque in Low-speed Permanent Magnet Wind Power Generator, *2011 International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2011, 1-3.
- [58] Hsieh M., Dorrell D.G., Yeh Y., Ekram S., Cogging Torque Reduction in Axial Fluxmachines for Small Wind Turbines, *2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, 2009, 4435-4439.
- [59] Aydın M., Sabit Mıknatıslı Disk Motorlarda Mıknatıs Kaykısı Etkisi, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ve Fuarı(ELECO'2018)*, Bursa, Türkiye, 26-30 Kasım 2008.
- [60] Lee G., Jung T., Design of Dual Structural Axial Flux Permanent Magnet Generator for Small Wind Turbine, *IEEE 2013 Tencn - Spring*, 2013, 90-94.
- [61] Aydın M., Magnet Skew in Cogging Torque Minimization of Axial Gap Permanent Magnet Motors, *2008 18th International Conference on Electrical Machines*, 2008, 1-6.
- [62] Tsai M.-C., Tseng E.-C., Cheng M.-Y., Design of a Torque Observer for Detecting Abnormal Load, *Control Engineering Practice*, 2000, **8**(3), 259-269.



EKLER



1.1 Ürün Özellikleri

SD-LP Servo Sürücü Özellikleri

GÜÇ	GÜÇ (W)	400	750	1000	1500
	Faz/Voltaj	Tek/Üç 200 ~ 230 Vac, -15% ~ 10%			
	Giriş Akımı (Arms)	Üç Faz --> 2.2 Tek Faz -->4.4	Üç Faz --> 3.8 Tek Faz -->7.0	Üç Faz --> 4.9 Tek Faz-->9.7	Üç Faz --> 6.9 Tek Faz -->13.5
	Kontrol Giriş Gerilimi (Vac)	200 ~ 230	200 ~ 230	200 ~ 230	200 ~ 230
	Sürekli Çıkış Akımı (Arms)	2.6	5.1	7.3	8.3
	Çıkış Gerilimi (VRms)	0 - 110	0 - 110	0 - 110	0 - 110
	Maksimum Çıkış Akımı(Arms)	7.8	15.3	21.9	24.9
	Aşın Yükleme (%)	300% (5s)			
	Harici 24V Giriş	Harici			
FREN	Fren/Dahili (W)	40 (60W)	40 (100W)	40 (100W)	40 (100W)
Pozisyon Kontrol Modu	Pozisyon Komut Tipi	Pulse + Direction, A phase + B phase			
	Maksimum Giriş Frekansı	4 Mbps (Line Driver), 250 Kbps (Open Collector)			
	Elektronik Dişli Oranı	Elektronik dişli ile sağlanır			
	İleri Besleme Kompanzasyonu	0-100%			
	Filtre	Alçak Geçiren Filtre			
Hız Kontrol Modu	Hız Komut Tipi	Analog Hız Komutu ($\pm 10V$), Dahili Hız Komutu			
	Hız Kontrol Menzili	1:5000 rpm			
	Filtre	Alçak Geçiren Filtre ve S-Eğri Filtre			
	Hız Doğruluğu	0 ila 100% yük dalgalanmalarında 0.3%'den az ± 10 güç dalgalanmasında% 0.3 veya daha az 0 ° C ila 50 ° C ortam sıcaklığında dalgalanma % 0.3 veya daha az			
Tork Kontrol Modu	Tork Komut Tipi	Analog Tork Komutu($\pm 10V$), Dahili Tork Komutu			
	Filtre	Alçak Geçiren Filtre			
Kontrol ve Haberleşme	Kontrol Metodu	SVPWM			
	Elektriksel Frekans	0 - 250 Hz			0 - 166.7 Hz
	Enkoder Çözünürlüğü	12bits Incremental/17-22bits Absolute Encoder, BiSS-c, SSI			
	Haberleşme	RS-232, RS-485, USB, MODBUS, CANopen			
I/O	DI/DO	8/5			
	AI/AO	2/1			

Şekil A.1. SMB SD-LP-15-M servo sürücü teknik özellikleri - 1

Koruma ve Güvenlik	Koruma	Aşırı Akım, Aşırı Gerilim, Ortam Sıcaklığı, Düşük Gerilim, Aşırı Yük, Aşırı Hız, İPM Sıcaklığı, Güç Hatası, Enkoder Hatası, Fan Hatası, Fren Direnci Hatası, Faz Eksikliği Hatası, Motor Hatası, Eeprom Hatası, Acil Stop Hatası	
	Çalışma Sıcaklığı (°C)	0 to 55	
Boyut ve Çalışma Sıcaklığı	Soğutma	DC-FAN	
	Boyutları (HxWxL) (mm)	175x65x170	
	Ağırlık (kg)	1.5	1.6
Otomatik Ayar	Offline Autotuning		
Ürün Devreye Alma	PC Arayüz, ekran ve tuş takımı ile kolay devreye alma		

Şekil A.2. SMB SD-LP-15-M servo sürücü teknik özellikleri - 2

FNCC 40E Series



Features

- Industry 40 mm, end or through hollow shaft
- Robust Mechanical and Electrical Construction
- Protection up to IP67
- Up to 5000 PPR max.
- 2P, 3P, 4P, 5P Pole pairs options

PPR Options :

1000 - 1024 - 1250 - 2000 - 2048 - 2500 - 5000

Technical data - mechanical design

Dimensions (flange)	ø40 mm
Shaft loading	≤80 N axial ≤100 N radial
Protection DIN EN 60529	IP 67
Operating speed	≤10000 rpm
Starting torque	≤0.025 Nm (IP 67)
Materials	Housing: Aluminium Flange: Aluminium Shaft : Stainless steel
Shaft diameter:	4, 5, 6, 7, 8 mm (other diameters on request)
Bearings lifetime:	2x10 ⁹ rev. at 100% of full rated shaft load (minimum)
Operating temperature	-20...+85 °C
Storage temperature	-30 °C up to +90 °C
Weight approx.	250 g

Technical data - electrical ratings

Voltage supply	4.75VDC to 30VDC 4.75VDC to 5.5VDC
Protection:	Output short circuit protection. Reverse polarity protection (except 5V version)
Consumption w/o load	≤80 mA (24 VDC)
Resolution (steps/turn)	1...5000
Reference signal	Zero pulse, width 90° 180°, 360° optional
Optoelectronic life time	100.000 (min)
Output frequency	>200 kHz
Output signals	90° shifted A and B, Z + inverted
Output circuit	Linedriver/RS422 Push-pull short-circuit proof
Interference immunity	DIN EN 61000-6-2
Emitted interference	DIN EN 61000-6-4
Approval	CE

Accessories

Connectors and cables
CRM1212 M12 12 poles female connector or see page 64

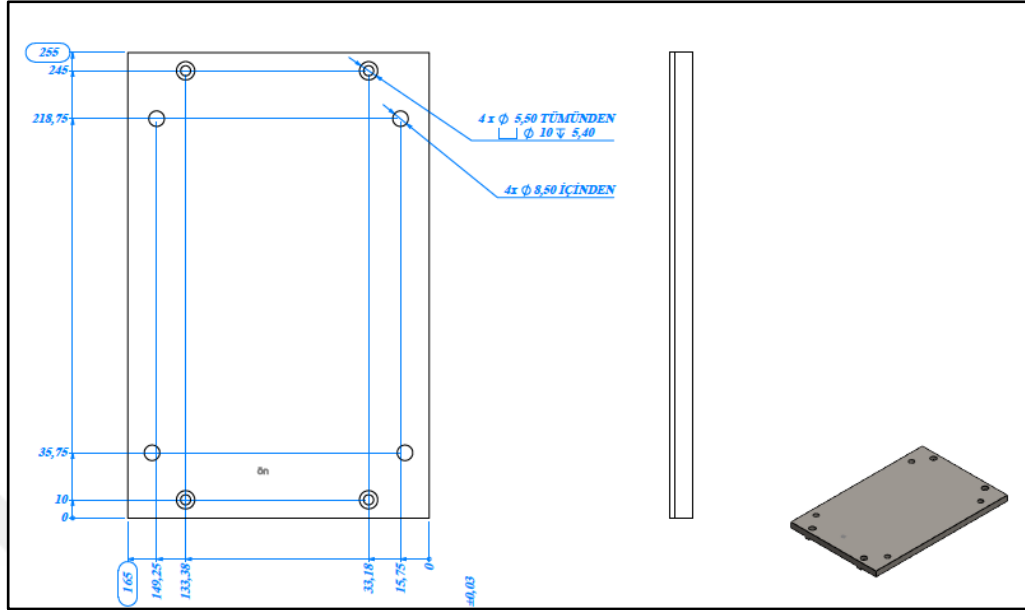
Mounting coupling
See page 62

Mounting accessories
AKR Spring or see page 60-61

www.fenac.com.tr

Şekil B.1. FNC-40EB kodlu artımlı enkoderin teknik özellikleri

EK-C



Şekil C.1. EASM senkron motorun sisteme bağlanması için tasarlanan parçanın teknik çizimi


Chapter 11 Specifications

11.1 Specifications of Servo Drive (ASDA-B Series)

Model: ASDA-B Series		100W	200W	400W	750W	1kW	1.5kW	2kW
		01	02	04	07	10	15	20
Power Supply	Voltage / Frequency	Three-phase or Single-phase 220VAC						Three-phase 220VAC
	Permissible Voltage Range	Three-phase or Single-phase 200 ~ 230VAC, -15% ~ 10%						Three-phase 200 ~ 230VAC, -15% ~ 10%
	Permissible Frequency Range	50/60Hz ±5%						
Cooling System		Natural Air Circulation			Fan Cooling			
Encoder Resolution / Feedback Resolution		2500ppr/10000ppr						
Control of Main Circuit		SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) Control						
Tuning Modes		Auto / Manual						
Regenerative Resistor		None			Built-in			
Position Control Mode	Max. Input Pulse Frequency	Max. 500KPPS (Line driver) / Max. 200KPPS (Open collector)						
	Pulse Type	Pulse + Direction, A phase + B phase, CCW pulse + CW pulse						
	Command Source	External pulse train						
	Smoothing Strategy	Low-pass smoothing filter						
	Electronic Gear	Electronic gear N/M multiple N: 1~32767, M: 1:32767(1/50<N/M<200)						
	Torque Limit Operation	Set by parameters						
Feed Forward Compensation		Set by parameters						
Speed Control Mode	Analog Input Command	Voltage Range	0 ~ ±10 VDC					
		Input Resistance	10KΩ					
		Time Constant	2.2 μs					
	Speed Control Range ^(Note 1)		1:5000					
	Command Source		External analog signal / Internal parameters					
	Smoothing Strategy		Low-pass and S-curve filter					
	Torque Limit Operation		Set by parameters					
	Frequency Response Characteristic		Maximum 250Hz					
	Speed Accuracy ^(Note 2) (at rated rotation speed)		0.01% or less at 0 to 100% load fluctuation 0.01% or less at ±10% power fluctuation 0.01% or less at 0°C to 50°C ambient temperature fluctuation					

Şekil D.1. ASD-B1521-A kodlu servo sürücü teknik özellikleri - 1

Chapter 11 Specifications | ASDA-B Series

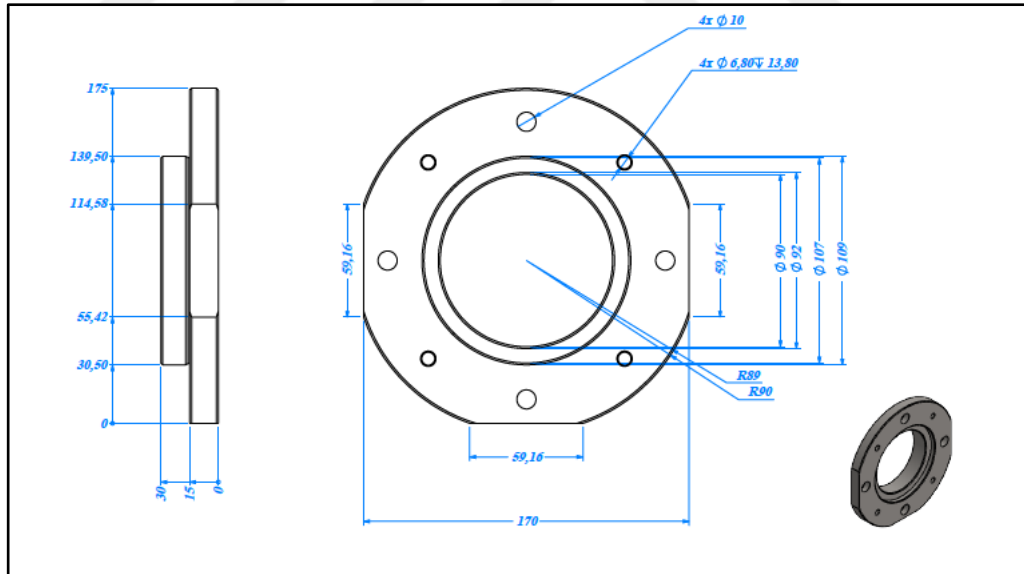
Model: ASDA-B Series			100W	200W	400W	750W	1kW	1.5kW	2kW
			01	02	04	07	10	15	20
Torque Control Mode	Analog Input Command	Voltage Range	0 ~ ±10 VDC						
		Input Resistance	10KΩ						
		Time Constant	2.2 us						
	Command Source		External analog signal / Internal parameters						
	Smoothing Strategy		Low-pass smoothing filter						
	Speed Limit Operation		Set by parameters						
Digital Input/Output	Input	Servo On, Reset, Gain switching, Pulse clear, Emergency stop, Forward / Reverse inhibit limit							
		Torque limit activation, Speed limit activation, Internal parameter selection, Torque limit activation, Speed limit activation, Control mode selection (Position / Speed mode selection, Speed / Torque mode selection, Position / Torque mode selection)							
	Output	Encoder signal output (A, B, Z Line Driver / Z Open collector)							
		Servo ready, Servo On, Zero speed, Speed reached, Positioning completed, At torque limit, Servo alarm output (Servo fault), Electromagnetic brake, Home completed							
Protective Functions		Overcurrent, Overvoltage, Undervoltage, Z Pulse shift, Regeneration error, Overload, Overspeed, Excessive deviation, Encoder error, Emergency stop activated, Memory error, Serial communication error							
Communication Interface		RS-232 / RS-485							
Environment	Installation Site		Indoor location (free from direct sunlight), no corrosive liquid and gas (far away from oil mist, flammable gas, dust)						
	Altitude		Altitude 1000m or lower above sea level						
	Atmospheric pressure		86kPa to 106kPa						
	Operating Temperature		0°C to 45°C (If operating temperature is above specified range, forced cooling will be required)						
	Storage Temperature		-20°C to 65°C (-4°F to 149°F)						
	Humidity		0 to 90% (non-condensing)						
	Vibration		10Hz ≤ F ≤ 57Hz 0.075mm 57Hz < F ≤ 150Hz 1G						
	IP rating		IP20						
	Power System		TN / TT System ^(Note 3)						
	Approvals								

Şekil D.2. ASD-B1521-A kodlu servo sürücü teknik özellikleri - 2

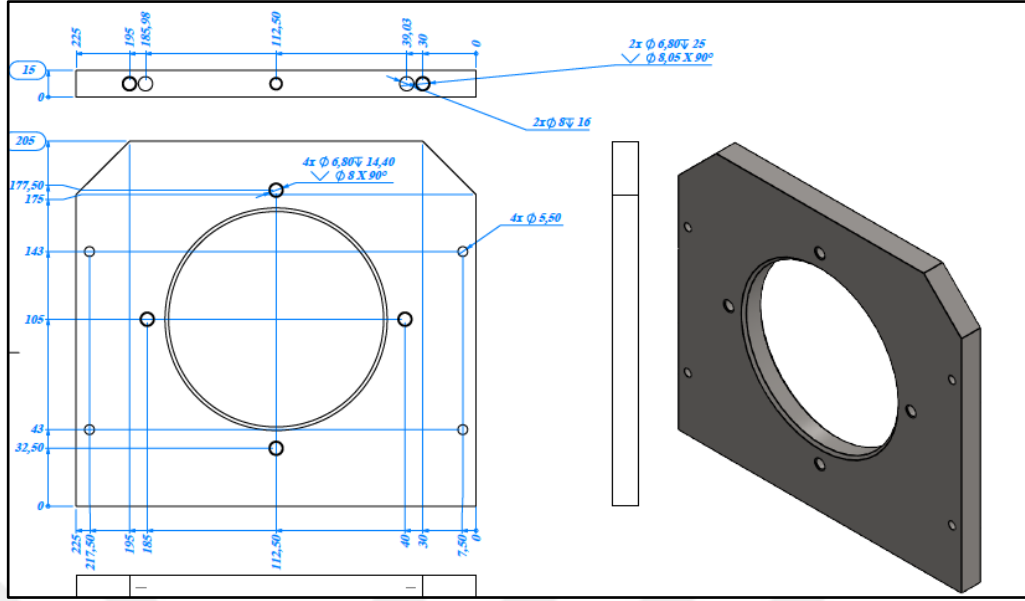
Medium / High Inertia Servo Motor

Model: ECMA Series	E313				E318	G313		
	500W	1kW	1.5kW	2kW	2kW	300W	600W	900W
	05	10	15	20	20	03	06	09
Rated output power (kW)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.0	0.3	0.6	0.9
Rated torque (N-m) ^(Note 1)	2.39	4.77	7.16	9.55	9.55	2.86	5.73	8.59
Maximum torque (N-m)	7.16	14.3	21.48	28.65	28.65	8.59	17.19	21.48
Rated speed (rpm)	2000				1000			
Maximum speed (rpm)	3000				2000			
Rated current (A)	2.9	5.6	8.3	11.01	11.22	2.5	4.8	7.5
Maximum current (A)	8.7	16.8	24.9	33.03	33.66	7.5	14.4	22.5
Power rating (kW/s) (without brake)	7	27.1	45.9	62.5	26.3	10.0	39.0	66.0
Rotor moment of inertia (Kg.m ²) (without brake)	8.17E-4	8.41E-4	11.18E-4	14.59E-4	34.68E-4	8.17E-4	8.41E-4	11.18E-4
Mechanical time constant (ms) (without brake)	1.91	1.51	1.10	0.96	1.62	1.84	1.40	1.06
Torque constant-KT (N-m/A)	0.83	0.85	0.87	0.87	0.85	1.15	1.19	1.15
Voltage constant-KE (mV/rpm)	30.9	31.9	31.8	31.8	31.4	42.5	43.8	41.6
Armature resistance (Ohm)	0.57	0.47	0.26	0.174	0.119	1.06	0.82	0.43
Armature inductance (mH)	7.39	5.99	4.01	2.76	2.84	14.29	11.12	6.97

Şekil D.3. ECMA-E31315GS kodlu senkron motor teknik özellikleri



Şekil D.4. Dinamo motorunun flanşının teknik çizimi



Şekil D.5. Dinamo motorunun bağlantı plakasının teknik çizimi

EK-E

Specifications, based on measurement range Table 2

Order Code	Measurement Range [N-m]	Spring Constant [N-m/rad]	Mass Moment of Inertia Drive Side [10 ⁻⁶ kg*m ²]	Mass Moment of Inertia Measuring Side [10 ⁻⁶ kg*m ²]	Maximum Permissible Axial Load* [N]	Maximum Permissible Radial Load [N]	Weight [g]	Max. Rotary Speed** [min ⁻¹]
8661-4020-V0XXX	0 ... ± 0.02	10	2.2	0.048	50	3	300	25 000
8661-4050-V0XXX	0 ... ± 0.05	10	2.2	0.048	50	3	300	25 000
8661-4100-V0XXX	0 ... ± 0.1	20	2.2	0.048	50	3	300	25 000
8661-4200-V0XXX	0 ... ± 0.2	50	2.2	0.05	50	3	300	25 000
8661-4500-V0XXX	0 ... ± 0.5	100	2.2	0.06	50	4	300	25 000
8661-5001-V0XXX	0 ... ± 1	100	2.2	0.062	50	7	300	25 000
8661-5002-V0XXX	0 ... ± 2	180	2.2	0.077	50	13	300	25 000
8661-5005-V0XXX	0 ... ± 5	800	14.3	2.2	200	15	900	15 000
8661-5010-V0XXX	0 ... ± 10	1700	14.3	2.35	200	30	900	15 000
8661-5020-V0XXX	0 ... ± 20	3000	14.6	2.6	200	60	900	15 000
8661-5050-V0XXX	0 ... ± 50	14000	85.7	33.30	300	125	1500	15 000
8661-5100-V0XXX	0 ... ± 100	25000	85.9	33.70	300	215	1500	15 000
8661-5200-V0XXX	0 ... ± 200	40000	87.5	35.00	300	215	1500	15 000
8661-5500-V0XXX	0 ... ± 500	150000	1200	600.00	500	250	6000	7000
8661-6001-V0XXX	0 ... ± 1000	220000	1200	600.00	500	500	6000	7000

Şekil E.1. Burster marka 8661-500-V0000 kodlu torkmetrenin teknik özellikleri - 1

Order Code

Torque sensor

8661-XXXX-V

Standard sensor	0	<input type="checkbox"/>
Sensor with dual range 1:10	1	<input type="checkbox"/>
Sensor with dual range 1:5	2	<input type="checkbox"/>
Sensor with dual range 1:4	3	<input type="checkbox"/>
Without angle/speed measurement	0	<input type="checkbox"/>
Angle measurement 400 increments / Speed measurement	1	<input type="checkbox"/>
Angle measurement 1024 increments / Speed measurement	2	<input type="checkbox"/>
Angle measurement 240 increments / Speed measurement	3	<input type="checkbox"/>
Angle measurement 2000 increments / Speed measurement	4	<input type="checkbox"/>
Output voltage 0 ... ± 10 V	0	<input type="checkbox"/>
USB interface	1	<input type="checkbox"/>
Output voltage 0 ... ± 5 V	2	<input type="checkbox"/>
Round shaft ends	0	<input type="checkbox"/>
Shaft ends with keyway (Keyway to DIN 6885, Bl. 1)	2	<input type="checkbox"/>

Şekil E.2. Burster marka 8661-500-V0000 kodlu torkmetrenin teknik özellikleri - 2

Technical data

Electrical values

Rated supply voltage range U_i : 10 ... 30 V DC
 DC power consumption (without option): approx. 2 W
 Output voltage at \pm rated torque (sensitivity): \pm 10 V
 Output impedance: 1 k Ω
 Insulation resistance: > 5 M Ω
 Refresh rate: 400 measurements/sec.
 optional: 1000 measurements/sec.
 Ripple: < 50 mV
 Calibration signal: 10.00 V DC
 Drive signal (pin K): 10 ... 30 V DC

Electrical connection

Standard sensor: 12 pins connector art. 9940
 USB sensor (option): Mini USB with screwing
 Power pack: Plug diameter 5.7 mm, center pin 2.0 mm
 (Supply and measuring channel are galvanically isolated)

Speed/angular displacement measurement (option)*

Output without external circuit: TTL level
 Output with external circuit: Open Collector
 Internal pull-up resistor: 2 k Ω (5 V level)
 External circuit (Open Collector): $U_{max} = 30 \text{ V} / I_{max} = 30 \text{ mA}$
 Speed/angular displacement measurement:
 Encoder disk 2000 increments
 Encoder disk 1024 increments
 Encoder disk 400 increments
 Encoder disk 240 increments

*Please note: Not all angular displacement / speed options are available for every measurement range. For more information, see page 5.

Environmental conditions

Nominal and operating temperature range: 0 °C ... 60 °C

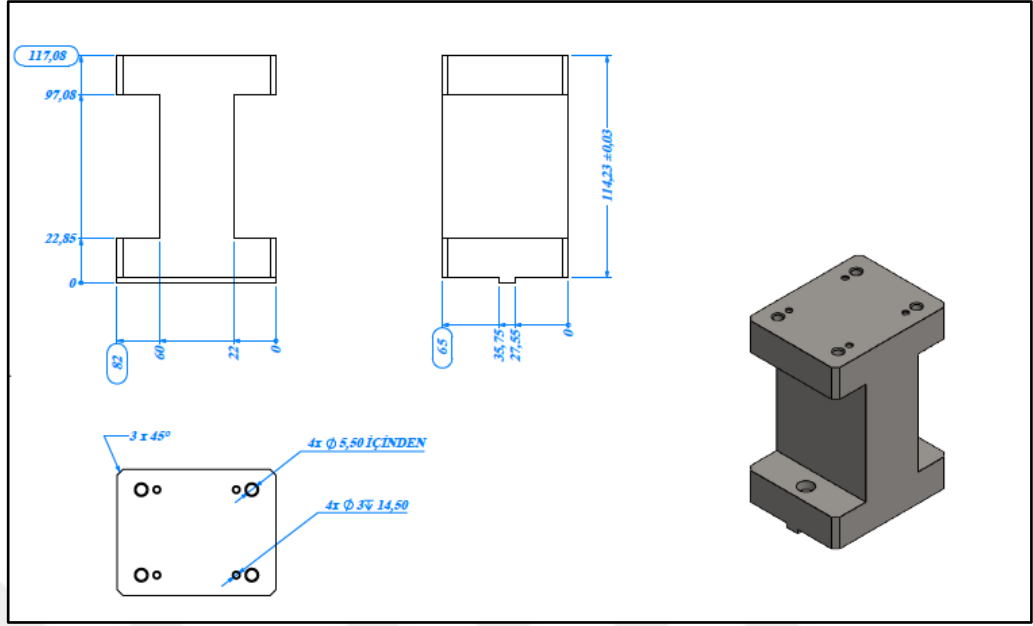
	Standard sensor	2nd meas. range dual range sensor
Effect of temperature on the zero signal	$\pm 0.015 \%$ F.S./K	$\pm 0.03 \%$ F.S./K
Effect of temperature on the sensitivity	$\pm 0.01 \%$ F.S./K	$\pm 0.02 \%$ F.S./K

Mechanical values

	Standard sensor	dual range sensor
Relative linearity deviation:		
Measuring range 0.02 to 0.05 N-m	< $\pm 0.1 \%$ F.S.	< $\pm 0.1 \%$ F.S.
Measuring range 0.1 to 1000 N-m	< $\pm 0.05 \%$ F.S.	< $\pm 0.1 \%$ F.S.
Relative reversal error:	< 0.1 % F.S.	< 0.2 % F.S.
Relative tolerance of the sensitivity	$\pm 0.1 \%$ F.S.	$\pm 0.2 \%$ F.S.
Max. operating torque	200 % of rated torque	150 % of rated torque

Failure torque: 300 % of rated torque
 Alternating load: up to 70 % of rated torque
 Material:
 Housing: anodized aluminium
 shaft $\leq 0.2 \text{ N-m}$, aluminium measuring shaft, shaft ends made of stainless steel 1.4542
 shaft $\geq 0.5 \text{ N-m}$ measuring shaft made of stainless steel 1.4542
 Degree of protection to EN 60529: IP40
 Weight: see table 2/3
 Fixing method: see dimensional drawing page 2

Şekil E.3. Burster marka 8661-500-V0000 kodlu torkmetrenin teknik özellikleri - 3



Şekil E.4. Torkmetrenin sisteme bağlanması için tasarlanan parçanın teknik çizimi

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Tetik Girgin M.**, Aydın M., Elimination of Cogging Torque for Axial Flux Permanent Magnet Motor Based on Current Harmonic Injection, *24th International Conference on Electrical Machines (ICEM 2020)*, Göteborg, İsveç, 23-26 Ağustos 2020.
- [2] Çakar Z., Uzun Ç., **Tetik Girgin M.**, Parlak F., Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Tork Kontrolünde Smith Kestirim Kontrolü ile Gecikme Kompanzasyonu, *EEMKON 2019 Elektrik Elektronik Mühendisliği Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 14-16 Kasım 2019.
- [3] **M. Tetik**, Harmonik Ekleme Yöntemi ile Fırçasız DC Motorun (BLDC) Hız Denetimi, *Technological Applied Sciences*, 2019, **14**(1), 27-36.
- [4] **Tetik M.**, Ulu Y., Gurleyen O., Off-Line Auto-Tuning of a Microcontroller-Based PMSM Servo Drive, *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, DOI: 10.1109/ICELMACH.2018.8507122.
- [5] **Tetik M.**, Ulu Y., Gürleyen Onur, Parlak F., Analysis and Compensation of Dead Time Effect in Voltage Source Inverters, *3rd International Science Symposium (ISS2018)*, Priştine, Kosova, 5-8 Eylül 2018.
- [6] **Tetik M.**, Harmonik Ekleme Yöntemi ile Fırçasız DC Motorun (BLDC) Hız Denetimi, *3rd International Science Symposium (ISS2018)*, Priştine, Kosova, 5-8 Eylül 2018.
- [7] **Tetik M.**, Uzun Ç., Sarmusak B., Samast M., Tork Motoru Hız Kontrolünde Altı Adım Anahtarkama ve Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu Yöntemlerinin Karşılaştırılması, *3rd International Science Symposium (ISS2018)*, Priştine, Kosova, 5-8 Eylül 2018.
- [8] **Tetik M.**, Parlak F., Velocity Vector Controlled S-Curve Motion Profile in Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM), *Technological Applied Sciences*, 2017, **12**(4), 203-217.
- [9] **Tetik M.**, Parlak F., Velocity Vector Controlled S-Curve Motion Profile in Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM), *2nd International Science Symposium (ISS2017)*, Tiflis, Gürcistan, 5-8 Eylül 2017.
- [10] **Tetik M.**, Parlak F., Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu(UVDGM) ile Hız Denetiminde Hareket Profillerinin Karşılaştırılması (SVPWM), *1. Ulusal Elektrik Enerjisi Dönüşümü Kongresi (EL-EN)*, Elazığ, Türkiye, 21-22 Eylül 2017.
- [11] **Tetik M.**, Saraçbaşı N., Top ve Kiriş Sisteminin Modellenmesi, Bulanık Mantık ve PID Kontrolünün Gerçekleştirilmesi ve Karşılaştırılması, *1.*

Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı TOK'2016, Eskişehir, Türkiye, 29 Eylül – 1 Ekim 2016.

- [12] **Tetik M.**, Köseni H., Yıldız A.B., State-Space Modelling and Realization of Flyback Converter Circui', *3rd International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'16)*, Konya, Türkiye, 1-3 Eylül 2016.



ÖZGEÇMİŞ

Liseyi İzmit Atılım Anadolu Lisesinde okudu. 2011-2015 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Mekatronik Mühendisliğinde ve 2013-2016 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliğinde okudu. Mezun olduktan sonra 2015 yılında Akım Metal San. ve Tic. A.Ş. Ar-Ge Merkezinde işe başladı. Sürekli mıknatıslı servo motorların kontrolü üzerine çalışmaktadır. 2016 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında Doç. Dr. Metin Aydın danışmanlığında elektrik motorlarının kontrolü üzerine yüksek lisans yapmaktadır.

