

T.C.
ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN TORK RİPİL
MİNİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MİTHAT ÖNDER

BOLU, TEMMUZ- 2016

T.C.
ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİMDALI



ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN TORK RİPİL
MİNİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MİTHAT ÖNDER

BOLU, TEMMUZ-2016

KABUL VE ONAY SAYFASI

Mithat ÖNDER tarafından hazırlanan “Anahtarlama Relüktans Motorun Tork Rıplı Minimizasyonu ” adlı tez çalışması 15.07.2016 tarihinde Abant İzzet Baysal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Danışman
Prof. Dr. Oğuz ÜSTÜN

Üye
Prof. Dr. Erdal BEKİROĞLU

Üye
Doç. Dr. Uğur GÜVENÇ

İmza



Prof. Dr. Duran KARAKAŞ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Eşime,



ETİK BEYAN

Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mithat ÖNDER

ÖZET

**ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN TORK RİPİL
MİNİMİZASYONU
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MİTHAT ÖNDER
ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. OĞUZ ÜSTÜN)
BOLU, TEMMUZ - 2016**

Bu tezde anahtarlama relüktans motorun (ARM) tork rıplarının azaltılması konusunda komutasyon açılarının optimizasyonu ve motor/generatör bölgesi çalışması gibi temel etkenlerin ayrıntılı incelemesi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla doğrusal ve doğrusal olmayan tork paylaşım fonksiyonu (TPF) ile tork rıpıl minimizasyonu irdelenmiştir. TPF'lerin geleneksel optimizasyonu iletime geçme açısı, kesim açısı ve kesişim açısına göre yapılmaktadır. Bu durumda TPF'nin yükselme düşme açıları eşit kabul edilmektedir. Fakat faz akımlarının yükselme düşme zamanları üstel etkiden dolayı aynı değildir. Bu nedenle yükselme ve düşme zamanları farklı olmaktadır. Bu sorunu gidermek için bu çalışmada iletime geçme açısı, yükselme açısı, düşme açısı ve kesim açısı uyarlanarak optimizasyon amaçlanmıştır. Böylece faz akımlarının referans akımı takibi daha rahat gerçekleştirilmiştir ve performans artırılmıştır. Bu açıların belirlenmesinde online genetik arama algoritması kullanılmıştır. Farklı hız ve tork koşullarında testler gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntem ile klasik yöntem karşılaştırılmıştır. Önerilen optimizasyon tekniği geniş hız aralıklarında geleneksel optimizasyon yöntemlerine göre tork rıplarının azaltılmasında daha etkin olduğu gösterilmiştir. Ortaya konulan yaklaşımın etkinliği ve gerçek sistemlerde kullanılabilirliği, benzetim çalışmalarıyla ve gerçek zamanlı olarak TMS320F2812 sayısal işaret işlemci (Sİİ) ile deneysel çalışmalarla gerçekleştirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Anahtarlama Relüktans Motor, Yapay Sinir Ağları, Genetik Algoritma, Sayısal İşaret İşlemci, Tork Rıpıl Minimizasyonu

ABSTRACT

TORQUE RIPPLE MINIMIZATION OF A SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

MSC THESIS

MİTHAT ÖNDER

**ABANT İZZET BAYSAL UNIVERSITY GRADUATE SCHOOL OF
NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**DEPARTMENT OF ELEKTRICAL- ELECTRONICS ENGINEERING
(SUPERVISOR: PROF. DR. OĞUZ ÜSTÜN)**

BOLU, JULY-2016

In this thesis, optimization of the commutation angle and motoring / generating mode has been implemented to reduce torque ripple minimisation of the switched reluctance motor (SRM). For this purpose torque ripple minimisation with linear and nonlinear torque sharing function (TSF) have been carried out. Conventional optimization of TSF are performed according to turn on angle, turn off angle and overlap angle. In this case, the rising angle and falling angle of TSF are accepted equal. However, rising time and falling time of phase current is not the equal because of exponential effect. Therefore, rising and falling times are different. In this study, turn on angle, rising angle, falling angle and turn off angle are optimized to resolve this problem. Thus, tracking the reference current of the phase currents is performed more easily and performance is increased. Online genetic search algorithm is used to determine these angles. Experiment studies have been carried out at different speed and torque conditions. Furthermore, the proposed method is compared with conventional methods. Consequently, proposed optimization method has been shown to be more effective according to conventional optimization method for torque ripple minimisation in a wide speed range. The effectiveness of the proposed method and real time implementation are performed by experiment studies with as a real time TMS320F2812 digital signal processing (DSP) and simulation studies.

KEYWORDS: Switched Reluctance Motor, Artificial Neural Networks, Genetic Algorithm, Digital Signal Processors, Torque Ripple Minimization

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	xiv
TEŞEKKÜR	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTOR.....	7
2.1 Giriş	7
2.2 ARM'nin Temel Yapısı	7
2.3 ARM'nin Çalışması	8
2.4 ARM'nin Eşdeğer Devre Modeli	10
2.5 ARM'de Torkun ve Akı Profillerinin Elde Edilmesi	11
2.5.1 Statik Ölçme Yöntemi	12
2.5.1.1 AC Test Yöntemi	12
2.5.1.2 DC Test Yöntemi	13
2.5.2 Dinamik Ölçme Yöntemi	15
2.6 ARM için Konverter Devreleri.....	16
2.6.1 Konverter Tipleri	16
2.6.1.1 Asimetrik Köprü Konverter	17
3. YAPAY ZEKA TEKNİKLERİ.....	19
3.1 Yapay Sinir Ağları.....	20
3.1.1 YSA'nın Tarihçesi.....	20
3.1.2 YSA'ların Üstünlükleri	22
3.1.3 YSA'ların Sakıncaları	23
3.1.4 YSA'ların Uygulama Alanları.....	23
3.1.5 YSA Öğrenme Yöntemleri	24
3.1.5.1 Danışmanlı Öğrenme	24
3.1.5.2 Danışmansız Öğrenme	25
3.1.6 YSA'da Öğrenme Kuralları.....	25
3.1.6.1 Hebb Kuralı.....	25
3.1.6.2 Geriye Yayılım Öğrenme Kuralı.....	26
3.2 Genetik Algoritma	26

3.2.1	GA'ların Uygulama Alanları	28
3.2.2	GA'ların Güçlü ve Zayıf Yönleri	28
3.2.3	Temel Kavramlar	29
3.2.3.1	Kromozom	29
3.2.3.2	Gen	29
3.2.3.3	Popülasyon	30
3.2.4	Yeniden Üreme İşlemi	30
3.2.5	Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması	31
3.2.6	Uygunluk Değeri	31
3.2.7	Dizi Gösterimi (Kodlama)	32
3.2.8	Seçim Mekanizması	32
3.2.9	Genetik Operatörler	32
3.2.9.1	Çaprazlama Operatörü	33
3.2.9.2	Mutasyon Operatörü	33
3.2.9.3	Elitizm Yöntemi	33
3.2.10	GA'nın Çalışma İlkesi	34
4.	ARM TORK RIPİL MİNİMİZASYONU İÇİN SÜRME SİSTEMİ	
TASARIMI	36	
4.1	ARM Tork Karakteristiği	37
4.1.1	YSA ile ARM'nin Modellenmesi	38
4.1.1.1	İleri Besleme Algoritması	39
4.1.1.2	Geri Yayılmalı Öğrenme Algoritması	41
4.2	Faz Pozisyon Üretici ve Sıralayıcı	44
4.3	Hysteresis Band PWM	45
4.4	Tork Paylaşım Fonksiyonu	46
5.	ARM'DE GENERATÖR BÖLGESİ ÇALIŞMA DURUMUNUN	
İNCELENMESİ VE TORK RIPILA ETKİSİ	51	
5.1	ARM'de Generatör Bölgesi Çalışma Durumunun ve Tork Rıpıla	
	Etkisinin Benzetim Sonuçları	53
6.	OPTİMİZASYON YAPISI	57
6.1	Optimizasyon Tipleri	57
6.2	Optimizasyon Algoritması	58
6.3	Optimizasyon Tipleri İçin Benzetim Sonuçları	59
7.	BENZETİM VE DENEYSEL SONUÇLAR	67
8.	SONUÇ VE ÖNERİLER	97
9.	KAYNAKLAR	98
10.	ÖZGEÇMİŞ	108

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. 8/6 ARM motor.....	9
Şekil 2.2. Anahtarlama relüktans makinanın eşdeğer devresi	11
Şekil 2.3. Statik AC test devresi	12
Şekil 2.4. Statik DC test devresi	13
Şekil 2.5. Rotor pozisyonu 0°'de sabit ve 0-10A akım değişimi için akım ve gerilim değişim grafiği.....	14
Şekil 2.6. ARM için asimetrik konverter	17
Şekil 2.7. Asimetrik konverter anahtarlama durumları a) Birinci durum (T_1 ve T_2 iletimde, D_1 ve D_2 kesimde) b) İkinci durum (T_1 ve D_1 iletimde, T_2 ve D_2 kesimde) c) Üçüncü durum (T_1 ve T_2 kesimde, D_1 ve D_2 iletimde).....	18
Şekil 3.1. Genetik algoritma akış diyagramı.....	34
Şekil 4.1. ARM sürme sistemi	36
Şekil 4.2. Akı tahminci için sinir ağı mimarisi	39
Şekil 4.3. 8/6 ARM $T-i-\theta$ karakteristiği.....	44
Şekil 4.4. ARM faz pozisyon değişimleri.....	45
Şekil 4.5. Geleneksel TPF profilleri a) Doğrusal b) Doğrusal olmayan.....	46
Şekil 4.6. Önerilen TPF profilleri a) Doğrusal b) Doğrusal olmayan.....	48
Şekil 4.7. Tork paylaşım fonksiyonları.....	48
Şekil 4.8. Bir faza ait TPF'nin grafiksel gösterimi	49
Şekil 5.1. Bir faza ait gerçek tork ve referans tork	52
Şekil 5.2. Doğrusal TPF ve doğrusal olmayan TPF'ler için hız değişiminin generatör bölgesi tork yüzdesine etkisi (2Nm, açılar sabit).....	54
Şekil 5.3. Doğrusal TPF ve doğrusal olmayan TPF'ler için hız değişiminin ortalama torka etkisi (2Nm, açılar sabit).....	54
Şekil 5.4. Doğrusal TPF ve doğrusal olmayan TPF'ler için hız değişiminin RMS akım/ ortalama torka etkisi (2Nm, açılar sabit)	55
Şekil 5.5. Farklı yükler için hız değişiminin generatör bölgesi tork yüzdesine etkisi (2Nm, açılar sabit,doğrusal TPF)	55
Şekil 5.6. Farklı yükler için hız değişiminin generatör bölgesi tork yüzdesine etkisi (2Nm, açılar sabit,doğrusal olmayan TPF).....	56
Şekil 6.1. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin tork rıplı etkisi (2Nm, $m=0$, doğrusal TPF).....	60
Şekil 6.2. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin ortalama torka etkisi (2Nm, $m=0$, doğrusal TPF)	60
Şekil 6.3. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin RMS akım/ortalama torka etkisi (2Nm, $m=0$, doğrusal TPF)	61
Şekil 6.4. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin tork rıplı etkisi (2Nm, $m=0$, doğrusal olmayan TPF)	61

Şekil 6.5. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin ortalama torka etkisi (2Nm, m=0, doğrusal olmayan TPF).....	62
Şekil 6.6. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin RMS akım/ortalama torka etkisi (2Nm, m=0, doğrusal olmayan TPF).....	62
Şekil 6.7. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin generatör bölgesi tork yüzdesine etkisi (2Nm, m=10, doğrusal TPF)	63
Şekil 6.8. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin tork rıplına etkisi (2Nm, m=10, doğrusal TPF)	63
Şekil 6.9. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin ortalama torka etkisi (2Nm, m=10, doğrusal TPF)	64
Şekil 6.10. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin RMS akım/ortalama torka etkisi (2Nm, m=10, doğrusal TPF)	64
Şekil 6.11. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin generatör bölgesi tork yüzdesine etkisi (2Nm, m=10, doğrusal olmayan TPF).....	65
Şekil 6.12. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin tork rıplına etkisi (2Nm, m=10, doğrusal olmayan TPF).....	65
Şekil 6.13. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin ortalama torka etkisi (2Nm, m=10, doğrusal olmayan TPF).....	66
Şekil 6.14. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin RMS akım/ortalama torka etkisi (2Nm, m=10, doğrusal olmayan TPF).....	66
Şekil 7.1. Deney düzeneği	68
Şekil 7.2. Deney düzeneğinin görünümü	68
Şekil 7.3. Tip III' den elde edilen benzetim sonuçları (2Nm,2000 d/d, m=0, Doğrusal TPF) a) Hız,faz pozisyonu,referans faz torku, referans faz akımı b) Referans faz torkları c) Referans faz akımları d) Faz akımları e) Faz torkları f) Toplam tork ve faz torku.....	70
Şekil 7.4. Tip III' den elde edilen deneysel sonuçları (2Nm,2000 d/d, m=0, Doğrusal TPF) a) Hız,faz pozisyonu,referans faz torku, referans faz akımı b) Referans faz torkları c) Referans faz akımları d) Faz akımları e) Faz torkları f) Toplam tork ve faz torku.....	71
Şekil 7.5. Tip III' den elde edilen benzetim sonuçları (2Nm,2000 d/d, m=0, Doğrusal olmayan TPF) a) Hız,faz pozisyonu,referans faz torku, referans faz akımı b) Referans faz torkları c) Referans faz akımları d) Faz akımları e) Faz torkları f) Toplam tork ve faz torku.....	73
Şekil 7.6. Tip III' den elde edilen deneysel sonuçları (2Nm,2000 d/d, m=0, Doğrusal olmayanTPF) a) Hız,faz pozisyonu,referans faz torku, referans faz akımı b) Referans faz torkları c) Referans faz akımları d) Faz akımları e) Faz torkları f) Toplam tork ve faz torku.....	74
Şekil 7.7. Tip IV' den elde edilen benzetim sonuçları (2Nm,2000 d/d, m=0, Doğrusal TPF) a) Hız,faz pozisyonu,referans faz torku, referans faz akımı b) Referans faz torkları c) Referans faz akımları d) Faz akımları e) Faz torkları f) Toplam tork ve faz torku.....	76
Şekil 7.8. Tip IV' den elde edilen deneysel sonuçları (2Nm,2000 d/d, m=0, Doğrusal TPF) a) Hız,faz pozisyonu,referans faz torku, referans faz akımı b) Referans faz torkları c) Referans faz akımları d) Faz akımları e) Faz torkları f) Toplam tork ve faz torku.....	77
Şekil 7.9. Tip IV' den elde edilen benzetim sonuçları (2Nm,2000 d/d, m=0, Doğrusal olmayan TPF) a) Hız,faz pozisyonu,referans faz torku,	

	referans faz akımı b) Referans faz torkları c) Referans faz akımları d) Faz akımları e) Faz torkları f) Toplam tork ve faz torku.....	79
Şekil 7.10.	Tip IV' den elde edilen deneysel sonuçları (2Nm,2000 d/d, m=0, Doğrusal olmayan TPF) a) Hız,faz pozisyonu,referans faz torku, referans faz akımı b) Referans faz torkları c) Referans faz akımları d) Faz akımları e) Faz torkları f) Toplam tork ve faz torku.....	80
Şekil 7.11.	Tip III' den elde edilen benzetim sonuçları (2Nm,2000 d/d, m=10, Doğrusal TPF) a) Hız,faz pozisyonu,referans faz torku, referans faz akımı b) Referans faz torkları c) Referans faz akımları d) Faz akımları e) Faz torkları f) Toplam tork ve faz torku.....	82
Şekil 7.12.	Tip III' den elde edilen deneysel sonuçları (2Nm,2000 d/d, m=10, Doğrusal TPF) a) Hız,faz pozisyonu,referans faz torku, referans faz akımı b) Referans faz torkları c) Referans faz akımları d) Faz akımları e) Faz torkları f) Toplam tork ve faz torku.....	83
Şekil 7.13.	Tip III' den elde edilen benzetim sonuçları (2Nm,2000 d/d, m=10, Doğrusal olmayan TPF) a) Hız,faz pozisyonu,referans faz torku, referans faz akımı b) Referans faz torkları c) Referans faz akımları d) Faz akımları e) Faz torkları f) Toplam tork ve faz torku.....	85
Şekil 7.14.	Tip III' den elde edilen deneysel sonuçları (2Nm,2000 d/d, m=10, Doğrusal olmayan TPF) a) Hız,faz pozisyonu,referans faz torku, referans faz akımı b) Referans faz torkları c) Referans faz akımları d) Faz akımları e) Faz torkları f) Toplam tork ve faz torku.....	86
Şekil 7.15.	Tip IV' den elde edilen benzetim sonuçları (2Nm,2000 d/d, m=10, Doğrusal TPF) a) Hız,faz pozisyonu,referans faz torku, referans faz akımı b) Referans faz torkları c) Referans faz akımları d) Faz akımları e) Faz torkları f) Toplam tork ve faz torku.....	88
Şekil 7.16.	Tip IV' den elde edilen deneysel sonuçları (2Nm,2000 d/d, m=10, Doğrusal TPF) a) Hız,faz pozisyonu,referans faz torku, referans faz akımı b) Referans faz torkları c) Referans faz akımları d) Faz akımları e) Faz torkları f) Toplam tork ve faz torku.....	89
Şekil 7.17.	Tip IV' den elde edilen benzetim sonuçları (2Nm,2000 d/d, m=10, Doğrusal olmayan TPF) a) Hız,faz pozisyonu,referans faz torku, referans faz akımı b) Referans faz torkları c) Referans faz akımları d) Faz akımları e) Faz torkları f) Toplam tork ve faz torku.....	91
Şekil 7.18.	Tip IV' den elde edilen deneysel sonuçları (2Nm,2000 d/d, m=10, Doğrusal olmayan TPF) a) Hız,faz pozisyonu,referans faz torku, referans faz akımı b) Referans faz torkları c) Referans faz akımları d) Faz akımları e) Faz torkları f) Toplam tork ve faz torku.....	92
Şekil 7.19.	2 Nm ve 2000 d/d da Tip III ve Tip IV'den Elde Edilen Toplam Tork ve Faz Torku Benzetim Sonuçları a) Tip III- m=0- Doğrusal TPF b) Tip III- m=10- Doğrusal TPF c) Tip IV- m=10- Doğrusal TPF d) Tip IV- m=0- Doğrusal TPF e) Tip III- m=0- Doğrusal Olmayan TPF f) Tip III- m=10- Doğrusal Olmayan TPF g) Tip	

IV- m=10- Doğrusal Olmayan TPF h) Tip IV- m=0- Doğrusal Olmayan TPF	95
Şekil 7.20. 2 Nm ve 2000 d/d da Tip III ve Tip IV'den Elde Edilen Toplam Tork ve Faz Torku Deneysel Sonuçları a) Tip III- m=0- Doğrusal TPF b) Tip III- m=10- Doğrusal TPF c) Tip IV- m=10- Doğrusal TPF d) Tip IV- m=0- Doğrusal TPF e) Tip III- m=0- Doğrusal Olmayan TPF f) Tip III- m=10- Doğrusal Olmayan TPF g) Tip IV- m=10- Doğrusal Olmayan TPF h) Tip IV- m=0- Doğrusal Olmayan TP.....	96



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 6.1 Optimizasyon tipleri.....	58
Çizelge 7.1 TipIII ve Tip IV için benzetim ve deneysel sonuçlar.....	94



KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

AC	: Alternatif Akım
ARM	: Anahtarlama Relüktans Motor
DC	: Doğru Akım
EMK	: Elektromotor Kuvvet
FEM	: Sonlu elemanlar Yöntemi
GA	: Genetik Algoritma
GTP	: Generatör Tork Yüzdesi
PWM	: Darbe Genlik Modülasyonu
Sİİ	: Sayısal İşaret İşlemci
TPF	: Tork Paylaşım Fonksiyonu
YSA	: Yapay Sinir Ağları
ω^*	: Referans Hız
ω	: Mekanik Hız
e_ω	: Hız Hatası
T^*	: Referans Tork
θ_j	: Faz Pozisyonları
i_j^*	: Referans Faz Akımları
i_j	: Faz Akımları
P^ψ	: Ağ Girişi
R^ψ	: Gizli Katman
S^ψ	: Gizli Katman
T^ψ	: Çıkış Katmanı
θ_j	: Herbir Fazın Pozisyon Değişimi
N_r	: Rotor Kutup Sayısı

N_s	: Stator Kutup Sayısı
ω_e	: Motorun Elektriksel Hızı
θ_{on}	: İletime Geçme Açısı
θ_{rise}	: Yükselme Açısı
θ_{flat}	: Düz Bölge
θ_{fall}	: Düşme Açısı
θ_{off}	: Kesim Açısı
θ_p	: Komutasyon Açılarının Toplamı
R_s	: Stator Faz Direnci
λ	: Bir Fazın Akı Bağıntısı
θ_s	: Stator Kutup Açısı
θ_r	: Rotor Kutup Açısı
θ_{step}	: Rotor Adım Açısı
R_m	: Ölçüm Direnci
T^*	: Referans Tork
e_ω	: Hız Hatası

TEŞEKKÜR

Bana bu tez çalışmasını yapma fikrini veren, ilgi ve desteğini esirgemeyen danışman Hocam Sayın **Prof. Dr. Oğuz ÜSTÜN 'e**, desteğiyle her zaman yanımda olduğu için en derin saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasında sürücü sistemine yaptığı katkılardan dolayı Sayın **Doç. Dr. İbrahim SEFA 'ya** teşekkürlerimi sunarım.

Desteklerinden dolayı Sayın **Prof. Dr. Erdal BEKİROĞLU 'na** Sayın **Öğr. Gör. Uğur Muhsin DOĞAN'a** ve Sayın **Arş. Gör. Ahmet DALKIN'a** teşekkürlerimi sunarım.

Her durumda benden desteğini esirgemeyen, sabırla çalışmalarımı destekleyen eşim **Şeyma ÖNDER'e**, annem **Mürüvet ÖNDER 'e**, babam **Kadir ÖNDER 'e** ve kardeşlerim **Kübra ÖNDER** ve **Eda ÖNDER 'e** teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Değişken relüktanslı motorlar rotor konumuna göre hava aralığının değişmesi bağlı olarak relüktansın değişmesinden dolayı bu ismi almaktadırlar. Doğrudan bir kaynağa bağlanarak çalışamazlar dolayısıyla bu motorlarda bir anahtarlama yani sürme devresinin kullanılması gerekmektedir. Anahtarlama relüktans motor adı hem değişken relüktanslı motoru hem de sürme devresini birlikte ifade etmek için kullanılmaktadır (Bal,2004).

ARM'ler elektrikli süpürgeler başta olmak üzere, çamaşır makinalarında, mutfak robotlarında ve soğutucularda kullanılır. Çekici ve vinç gibi taşıtlarda ve otomotiv endüstrisinde otomobil sileceklerinde, kamyon ve kamyonetlerde, motosikletlerde kullanılmaktadır. Hafif yapısından dolayı havacılık sektöründe kullanılır. Endüstriyel madencilik, tekstil sektörü ve enerji üretimi sektörlerinde dönme ve öteleme hareketi gerektiren uygulamalarda sıkça kullanılmaktadırlar (Özoğlu,1999).

ARM diğer motorlar ile karşılaştırıldığında önemli üstünlükleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Rotorlarında herhangi bir sargı yada mıknatıs yoktur sadece statorda sargı bulunmaktadır dolayısıyla üretim ve bakım maliyetleri düşüktür ve sargı kayıpları yoktur. Buda verimi arttırır.
- Statorlarında yer alan sargıların basit yapıdadır. Karşılıklı kutuplara sarılmış ve birbirlerine seri bağlanmıştır.
- ARM'nin yapısı DC seri motora benzer dolayısıyla tork üretimi faz akımlarının karesi ile değişir.

- Rotorun sargısız ve fırçasız yapıya sahip olması sebebiyle motor geniş hız aralığında çalışabilmektedir.

- Motora ait stator fazlarının birbirinden bağımsız çalışır. Böylece sürme sistemlerinde kısa devre oluşmaz.

ARM diğer motorlar ile karşılaştırıldığında bazı kısıtlamaları mevcuttur. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- ARM'de rotor konumunun yani pozisyonun bilinmesi gereklidir. Dolayısıyla pozisyon sensörüne ihtiyaç duyulur. İndüksiyon ve DC motorlara göre maliyet artar.

- Tork rıpilları fazladır. Özellikle düşük devirde büyük genlikli salınımlar oluşur. Dolayısıyla motorda gürültü ve vuruntu oluşturur. Buda motorun sürüldüğü mekanik sistemlerde yıpranmalara neden olur.

- Doğrudan bir kaynağa bağlanarak çalışamazlar ve sürme devresine ihtiyaç duyarlar.

- Doğrusal olmayan yapıya sahiptir.

ARM'ler dayanıklı ve basit yapılarının olması, imalat ve bakım maliyetlerinin ucuz olması ve yüksek performans kapasitesine sahip olması nedeniyle endüstriyel uygulamalarında önemli konuma gelmiştir (Lawrenson vd.,1980).

ARM'ler ilk olarak 1838 yılında Davidson tarafından Glasgow ile Edinburgh arasındaki tren yolundaki lokomotif hareket ettirmek için kullanılmıştır (Miller,1993). 1840 yılında W.H. Toylar tarafından relüktans motorun patenti alınmıştır (Polloc ve Williams,1990).

1960'lı yılların sonuna kadar çok fazla üzerinde durulmamış ve yüksek

güçte üretilmemiştir. Fakat yarı iletken teknolojisinin gelişmesiyle motor tekrar gündeme gelmiştir. Üretilen elektronik güç anahtarları sayesinde motor üzerine yapılan çalışmalar artmıştır. Nasar ve Ofsenani (1969), ilk olarak motor ile ilgili önemli çalışmalara adım atmışlardır. Sonralarında Miller (1993), Polloc ve Williams (1990), Krishnan (2001) motor ile ilgili önemli çalışmalar yapmışlardır. Bugünlerde kullandığımız anahtarlama relüktans motorun patenti 1972 yılında Bedford ve Hoft tarafından ABD de alınmıştır (Bedford,1972). Unnewehr ve Koch (1974), Ford motor şirketinde çalışan ilk ARM'leri üretmişleridir. Bausch ve Reike (1978) daha sonralarında ARM üretilmiştir.

Lawrenson vd. (1980), ARM'lerin değişken hızlı uygulamalarda kullanılabileceğini göstermiştir. Bose vd. (1985), ARM'nin kapalı döngü hız denetimini gerçekleştirmiştir. Arumugam vd. (1988), kutup adım oranının etkisi üzerine etkili bir çalışma yapmışlardır. Elmas ve De La Parra (1992) Sİİ uygulamaları ile motorun çok geniş hız aralığında etkin şekilde çalışabildiği gösterilmiştir.

ARM'lerin modellenmeleri konusunda literatürde çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bunların içinde en çok dikkat çeken çalışmalar Spong vd. (1987) ve Torrey ve Lang (1990) tarafından ortaya konulan doğrusal olmayan ARM modelleridir. Ustun (2009a) ARM'nin doğrusal olmayan modeli, akıya bağlı olarak çıkarılmıştır.

Ülkemizde ARM ile ilgili yapılan birçok tez çalışması mevcuttur. Hız kontrolü ile ilgili yapılan çalışmalar (Sefa,1997; İnanc,1996; Yiğit,2005; Sezen,2006; Güvenç,2005; Akçayol,2001), zeki denetim yöntemleri kullanılarak motorun denetlenmesi ile ilgili yapılan çalışmalar (Yiğit, 2005; Sezen,2006; Güvenç,2005; Akçayol,2001; Duran,2005), ARM tasarımı ile ilgili yapılan çalışmalar (Karagöz,2009; Durmuş,1994; Omaç,2006; Fenercioğlu,2006; Çınar,2008), ARM'nin pozisyon sensörsüz denetimi ile ilgili yapılan çalışmalar (Çetin,2001), konum denetimi ile ilgili yapılan çalışmalar (Yıldız,2013), ARM'nin modellenmesi ile ilgili yapılan çalışmalar (Bay,1996) ve ARM sürücü devre tasarımı ile ilgili yapılan çalışmalar (Mutlu,2006) olarak özetlenebilir.

ARM'nin yapısından kaynaklı olarak doğrusal olmayan motordur. Bu doğrusal olmamanın temel sebebi, konum ve akıma bağlı olan faz endüktansının doğrusal olarak değişmemesidir. Faz endüktansındaki bu doğrusal olmaması doğrudan motor akı ve torkunun doğrusal olmamasına sebep olmaktadır (Ustun,2009a). ARM'nin doğrusal olmayan yapısından dolayı çıkan problemleri çözebilmek için zeki denetim yöntemleri kullanılmaktadır.

Yapay sinir ağları (YSA), insan beyni taklit edilerek oluşturulan, ağ yapıları ile birbirine bağlanan, yeni bilgiler oluşturabilme ve keşfedebilme gibi yetenekleri olan bilgi işleme yapılarıdır. 1940'lı yılların başında yapay sinir ağları ile ilgili çalışmalar ilk kez Walter Pitts, Donald Hebb ve Frank Rosenblatt tarafından yapılmıştır. McCullough ve Pitts ilk hücresel ağ modelini ortaya koymuşlardır. Hebb (1949) öğrenme ile ilgili temel teoriyi geliştirilmiştir. Minsky ve Papert (1969) XOR problemini çözümünün olmadığını Perceptron'un yetersizliğini ortaya koymuştur. Daha sonra geri yayılım algoritması ile bu sorun çözülmüştür. Günümüzde YSA kullanılarak ARM ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Lu vd. (2003) yapay sinir ağlarını kullanarak motoru modellemiş ve parametrelerini belirlemişlerdir. Lin vd. (2007) B-Spline sinir ağları kullanarak motoru online olarak modellemişlerdir. Üstün (2009a) YSA'yı kullanarak anahtarlamalı relüktans motorun doğrusal olmayan modelini ortaya koymuştur.

Genetik algoritmalar (GA), Darwin'in evrim presinbinden esinlenilen ihtimal tabanlı bir optimizasyon yaklaşımıdır. Bu yöntem 1970'li yıllarda John Holland tarafından ilk olarak geliştirilmiş ve daha sonra gaz hattı iletiminin kontrolünü problemini içeren sorunu çözen öğrencisi David Goldberg sayesinde popülerlik kazanmıştır (Haupt ve Haupt,2004). GA'lar doğrusal olmayan çok değişkenli problemlerin çözümünde kullanılmıştır ve bu sayede önemli bir algoritma haline gelmiştir. Diğer optimizasyon tekniklerinin zorlandığı karmaşık problemleri, bir amaç fonksiyonu ile tanımlanan çok boyutlu bir uzayda arama yapılabilmektedir. Günümüzde genetik algoritma kullanılarak ARM ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Xu vd. (2002) motor çıkışında maksimum tork elde edebilmek için, en iyi akım eğrilerini bulunmasında GA temelli yapay sinir ağları kullanmışlardır. Xilian vd. (2005) YSA ve GA' yı birleştirerek ARM' yi

modellemişlerdir.

ARM'lerdeki çıkıntılı kutuplu yapıdan dolayı tork da rıpilları meydana gelmektedir. Tork rıpilları, titreşim ve akustik gürültü ARM'nin yüksek performansa ulaşmaktaki sorunlardır (Rodrigues vd.,2001). Pullock ve Williams (1989) motor faz sayısının azalmasına motor torkundaki rıpilları artırdığını göstermişlerdir.

Ülkemizde tork rıpilllarının azaltılmasına yönelik çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalardan bazıları şunlardır. Özoğlu (1999) kutup başlarına şekil vererek tork rıpilllarının azaldığını göstermiştir. Özbek (1996) ve Diril (1999) ARM de tork rıpilllarının azaltılmasına yönelik çalışmalar yapmışlardır. Derdiyok (1997) bulanık ve kayan kipli denetleyicilerle tork rıpilllarının en aza indirmiştir.

Tork rıpilllarının azaltılmasına yönelik birçok çalışma mevcuttur. Motor faz akım profilleri düzeltilerek motordaki tork rıpilları azaltılabilir. Shaked ve Rabinovici (2005) optimizasyon metotları kullanarak faz akım profillerini düzeltmiş ve tork rıpilları en aza indirmişlerdir. Husain ve Ehsani (1996) yeni bir darbe genlik modülasyonu (PWM) akım kontrol stratejisi ile motor torkundaki rıpilları azaltmışlardır. Bununla ilgili başka çalışmalarda mevcuttur (Sahoo vd.,2001; Stankovic vd.,1999). Wong vd. (2009) ko-enerjiyi kontrol ederek online olarak motor torkundaki rıpilları azaltmışlardır. Mir vd. (1999) adaptif bulanık mantık kullanarak tork rıpilllarını en aza indirmişlerdir. Rodrigues vd. (2001) bulanık mantık tabanlı kesme kompensatörü tasarlayarak tork rıpilllarını azaltmayı başarmışlardır. Shang vd. (1999) yeni bir algoritma kullanarak tork rıpilllarını azaltmışlardır. Lee vd (2007) tasarlanan yeni bir konverter ile güç faktörünü düzelterek tork rıpilllarını azaltmayı başarmışlardır. Tork rıpilllarının azaltılması için etkili yöntemlerden bir tanesi de motor tasarımı gerçekleştirmektir. Lee vd. (2013) motorun kutup yapısını değiştirerek tork rıpilllarını azaltmışlardır. Lee vd (2004) sonlu elemanlar yöntemi (FEM) analizini kullanarak rotor yapısını değiştirmiş ve tork rıpilllarını azaltmışlardır. Choi vd. (2007) motorun kutup yapısını değiştirerek tork rıpilllarını azaltmışlardır. Islam vd. (2000) kayma modlu tahminci ile pozisyon ve hız kontrolünü tahmin etmişler ve tork rıpilllarının

azaldığını görmüşlerdir. Tork rıplarının azaltılmasındaki bir diğer etkili yöntem yapay sinir ağlarıdır. Lin vd. (2006) B-Spline sinir ağı yapısını kullanarak tork rıplarını azaltmışlardır. Son zamanlarda en çok kullanılan ve etkili yöntemlerden birisi tork paylaşım fonksiyonları ile tork rıplarının azaltılmasıdır. Xue vd. (2009) tork paylaşım fonksiyonlarını kullanarak gerekli açıları ayarlamışlar ve tork rıplarını azaltmışlardır. Ye vd. (2015a) yeni bir tork paylaşım fonksiyonu metodu ortaya koyarak tork rıplarını azaltmışlardır. Tork rıplarının azaltılmasına yönelik başka çalışmalarda bulunmaktadır (Ye vd.,2015b; Husain,2002; Choi vd.,2002).

Bu çalışmada tork rıplı minimizeasyonu için doğrusal ve doğrusal olmayan TPF'lerin iletime geçme, yükselme, düşme ve kesim açılarının GA'larla uyarlanması gerçekleştirilmiş ve tork rıplı minimizeasyonuna etkileri incelenmiştir. Ayrıca motorun genaratör bölgesinde çalışmasının tork rıplı etkisi incelenmiştir. Son olarak da komutasyon açılarının optimizeasyon seçeneklerinin etkileri ortaya konulmuştur. Geleneksel optimizeasyon şemasında iletime geçme, kesim ve kesişim açılarının optimizeasyonu gerçekleştirilerek tork rıplı minimizeasyonu yapılmıştır. Biz bu çalışmada iletime geçme, yükselme, düşme ve kesim açılarının optimizeasyonunu gerçekleştirerek incelemelerimizi tamamladık. Komutasyon açılarının belirlenmesinde online genetik arama algoritması kullanılmıştır.

Bölüm 2'de ARM'nin genel yapısı ve çalışması anlatılmıştır. Bölüm 3'de yapay zeka teknikleri hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 4'de ARM tork rıplı minimizeasyonu için sürme sistemi tasarımı anlatılmış, Bölüm 5'de ARM genaratör bölgesi çalışma durumunun incelenmesi ve tork rıplı etkisi irdelenmiş, Bölüm 6'da optimizeasyon yapısı incelenmiş ve Bölüm 7'de ise deneysel sonuçlar verilmiş son olarak da Bölüm 8'de sonuç ve öneriler verilerek genel bir değerlendirme yapılmıştır.

2. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTOR

2.1 Giriş

Bu bölümde sırasıyla ARM'nin temel yapısı, çalışma prensibi, eşdeğer devre modeli, torkun ve akı profilinin elde edilmesi ve çevirici devrelerinden bahsedilecektir.

2.2 ARM'nin Temel Yapısı

ARM klasik elektrik motorları gibi stator ve rotordan oluşur. Stator ve rotorunda çıkıntılara sahip olması diğer motorlardan ayıran temel ayrımdır. Stator ve rotordaki bu çıkıntılı yapılardan dolayı kutuplar oluşur. Kalitesi yüksek manyetik çelik levhalar yerleştirilerek rotor çekirdeği meydana getirilir. Stator ise her biri çıkıntı üzerine yerleştirilmiş sargılardan oluşmaktadır. Bu yapı ARM'yi diğer motorlardan farklı kılmaktadır. Diğer motorlara göre bakır kayıpları oldukça azdır çünkü; rotorunda sargı bulunmamaktadır. Fazların enerjilenme sırasına bağlı olarak motorun dönüş yönü belirlenir. Faz sargısından geçen akımın yönü, motorun dönüş yönünden bağımsızdır (Fenercioğlu,2006).

Motorun tork üretebilme yeteneği ve dört bölgeli çalışma gibi bazı kıstaslara göre kutup sayısı belirlenmektedir. Stator kutup sayısı (N_s) ve rotor kutup sayısı (N_r) ile gösterilir. Kutup sayıları motorun kullanım amacına göre belirlenir. Motorda yüksek hıza çıkılacaksa stator kutup sayısının (N_s) rotor kutup sayısına (N_r) oranı (N_s/N_r) bire yakın seçilmelidir. Stator kutup sayısının rotor kutup sayısına oranı daha büyük olan motorlar yüksek moment istenen ARM uygulamalarında seçilmektedir. Bu oran tork rıpıllarını doğrudan etkilemektedir. Genel olarak stator kutup sayısı rotor kutup sayısından büyük ve stator kutup sayısı rotor kutup sayısına yakın seçilmelidir. Bunun nedeni, herhangi bir faz enerjilendiğinde oluşan manyetik alandan daha fazla yararlanmaktır. ARM'de en çok kullanılan stator/rotor kutup sayısı oranları 6/4 ve 8/6 oranlarıdır (

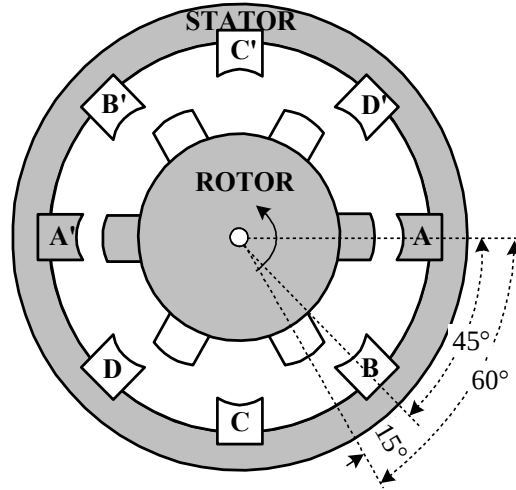
Mutlu,2006).

Ticari amaçlı olarak ARM'ler farklı faz sayısında üretilirler. Genellikle 3 ve 4 fazlı ARM'ler üretilmektedir. Üç fazlı ARM'ler yaygın olarak 6/4 veya 12/8 kutupludur. Kalkış anında torkları oldukça yüksektir. Tork rıpilları az olmasına rağmen yinede mevcuttur. Dört fazlı ARM'ler 8/6 kutuplu olarak ve beş fazlı ARM'ler ise 10/8 kutuplu olarak üretilirler. Tork rıpilllarının azaltılması için ideal motorlar bunlardır. Fakat kutup sayısı arttığından dolayı konverter devresi karmaşılaşmakta dolayısıyla maliyet artmaktadır (Krishnan vd.,1988).

ARM'lerin çalışabilmesi için konum bilgisi şarttır. Bundan dolayı motorun rotor miline konum algılayıcısı bağlanarak motorun konum bilgisi tespit edilir. Motor üzerine son zamanlarda yapılan çalışmalar ile konum algılayıcısız denetimi gerçekleştirilmiştir.(Yıldız,2013).

2.3 ARM'nin Çalışması

ARM'ler çıkıntılı kutuplarından dolayı kaynaklanan relüktans etkiye bağlı olarak çalışan motorlardır. Rotorlarında sargı olmadığından dolayı stator sargıları ile besleme ve denetim gerçekleştirilir. Rotorlarının çıkıntılı kutuplu olmalarından dolayı manyetik devreleri pozisyona bağlı olarak değişmektedir. Bundan dolayı akı ve endüktans profilleri de pozisyona bağlı olarak değişir. Bu relüktans motorların tork üretebilmeleri için gerekli olan doğal karakteristiğidir. Yüksek akım değerlerinde doyma etkisiyle değişim görülür. Akı pozisyona bağlı olarak bu motorlarda değişir. Fakat doymadan dolayı meydana gelen değişim bu motorlarda hem modelleme hem de kontrol açısından önemli sorunlara yol açar. Sonuç olarak bu tip motorlar da akım ve rotor pozisyonuna bağlı olan akı ve endüktans profili doğrusal olmayan bir değişim gösterir (Ustun,2009b).



Şekil 2.1. 8/6 ARM motor (Ustun,2009b)

Şekil 2.1’de görülen 8/6 4 fazlı ARM’nin rotor kutup aralığı 60° , stator kutup aralığı 45° ve adım açısının 15° olduğu görülmektedir. Buna göre 60° ’lik açılarla akı ve endüktansın değişimi periyodik olarak gerçekleşmektedir ve 15° ’lik açılarla her bir fazın anahtarlama yapılmaktadır. Dolayısıyla 4 faz iletim kesim durumu 60° ’lik bir periyotta meydana gelmektedir (Ustun,2009b).

Şekil 2.1’deki A sargısı enerjilendirildiğinde oluşan manyetik alan etkisiyle en yakın olan rotor kutbunu kendisine doğru çeker. Bundan dolayı, hava aralığından relüktans sıfıra doğru azalır. Bu durum reaktansın minimum, endüktansının maksimum olduğu durumdur (Miller,1993).

Relüktansın en küçük olmasından dolayı rotor kutbu ayrı pozisyondan hizalı pozisyona gelir. A fazı enerjilendirilip, rotor hizalı konuma geldikten sonra enerjilendirilmeye devam edilirse frenleme etkisi meydana gelir ve herhangi bir tork üretilmez. Bu nedenle rotor hizalı pozisyona geldiği zaman o kutbun enerjisi kesilmeli ve sıradaki faz enerjilendirilmelidir. Böylece rotorda hareket devamlılığı sağlanır. Bu durumda A fazına enerji verilip rotor hizalı pozisyona geldiği anda bu fazın enerjisi kesilerek sırasıyla B,C ve D fazları da aynı şekilde enerjilendirilerek motorun hareket devamlılığı sağlanmış olur. Bu çalışma prensibi ile motor güç anahtarları sırasıyla enerjilendirilerek motora hareket sağlanmış olur. Böylece

rotor pozisyonuna bağı olarak tork elde edilir. Tork akımın yönünden bağımsızdır. Bu nedenle motor tek yönlü olarak anahtarlanmalıdır (Miller,1993).

2.4 ARM'nin Eşdeğer Devre Modeli

Şekil 2.4'de ARM'nin genel eşdeğer devresi verilmiştir. Buna göre fazlar arasındaki karşılıklı endüktans ihmal edilerek temel bir eşdeğer devre aşağıdaki denklemlerde olduğu gibi çıkartılabilir. Bir faza uygulanan gerilim direnç üzerine düşen gerilime ve akı bağıntısının değişim oranının toplamına eşittir. Bu ifade aşağıdaki gibi verilebilir (Krishnan,2001).

$$v = R_s i + \frac{d\psi(\theta, i)}{dt} \quad (2.1)$$

Burada R_s stator faz direncidir ve ψ bir fazın akı bağıntısıdır,

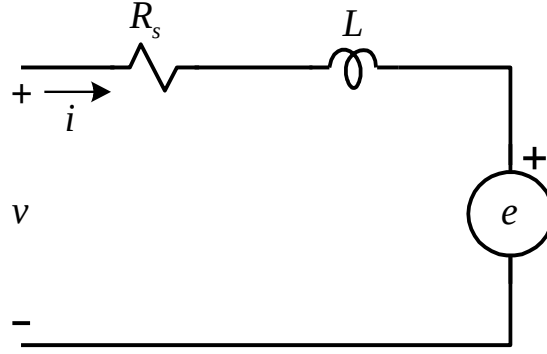
$$\psi = L(\theta, i)i \quad (2.2)$$

Burada L endüktansı rotor pozisyonu ve faz akımına bağlıdır. Buna göre faz gerilim denklemi,

$$\begin{aligned} v &= R_s i + \frac{d\{L(\theta, i)i\}}{dt} = R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{d\theta}{dt} \cdot \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \\ &= R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_m i \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$e = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_m i \quad (2.4)$$

Bu denklem omik gerilim düşümü, endüktif gerilim düşümü ve indüklenen elektromotor kuvveti (EMK) gösterir. Sonuç olarak elde edilen denklem DC seri motor ile bezemektedir (Krishnan,2001).



Şekil 2.2. ARM'nin eşdeğer devresi (Ustun,2009b)

ARM'nin dinamik davranışını tanımlayan tork denklemleri verilmiştir,

$$T = J \frac{d\theta^2}{dt} + B \frac{d\theta}{dt} + T_L \quad (2.5)$$

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (2.6)$$

Burada; T motor torku, J toplam atalet momenti, B sönüm katsayısı ve T_L ise yük torkunu göstermektedir.

Tanımlanan bu modelde histerezis ve Eddy akımlarından dolayı oluşan kayıplar dikkate alınmamıştır. Bu modelin hassasiyetindeki en önemli nokta motor endüktansının modellenme hassasiyetidir (Ustun,2009b).

2.5 ARM'de Torkun ve Akı Profillerinin Elde Edilmesi

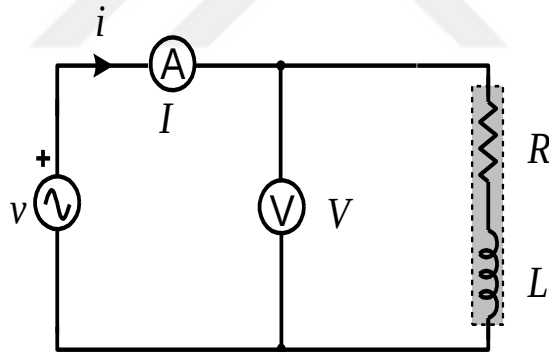
ARM'nin akı ve endüktans ölçüm metotları genel olarak kullanılan üç ölçme metodu Statik doğru akım (DC), Statik alternatif akım (AC) ve dinamik ölçme metotları ile belirlenir. Belirlenen akı ve endüktans dan yararlanarak tork elde edilir.

2.5.1 Statik Ölçme Yöntemi

Statik ölçme temelinde AC ve DC test olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilmektedir. Bu ölçme tekniğinde rotor belirli bir pozisyonda kilitlenerek motorun faz sargısına AC ya da DC gerilim uygulanarak o anki pozisyonda akım ve gerilim bilgileri alınarak endüktans ve akı değerleri hesaplanır ve bu nedenle Statik Ölçme olarak adlandırılır. Daha sonra ise pozisyon belli aralıklarla değiştirilerek bir rotor kutup aralığı tamamlanıncaya kadar bu işlemler tekrarlanır (Ustun,2009b).

2.5.1.1 AC Test Yöntemi

Şekil 2.3’de Statik AC test yöntemi için kullanılan deney düzeneği bulunmaktadır. Buna test düzeneğine göre; test düzeneğinde ayarlı AC gerilim kaynağı, ampermetre ve voltmetre bulunmaktadır (Ustun,2009b).



Şekil 2.3. Statik AC test devresi (Ustun,2009b).

Bu test çalışmasında motor fazına AC gerilim uygulanarak istenen etkin akım değeri geçmesi sağlanır ve etkin akım (I) ve gerilim (V) değerleri ölçülür. Bu değerlere göre klasik elektrik devrelerinin kararlı durum analizi ile endüktans hesabı aşağıdaki gibi gerçekleştirilir (Ustun,2009b),

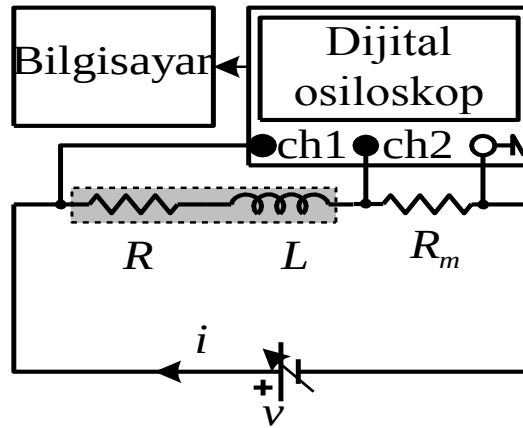
$$L = \left((V/I)^2 - R^2 \right)^{1/2} / \omega \quad (2.7)$$

burada, $\omega = 2\pi f$ elektriksel açısal hızı ifade etmektedir.

Buna göre AC test yönteminde yaklaşık olarak %10'luk bir hatanın olduğu göstermektedir. AC akımın sinüzoidal değişiminden dolayı akımın üst değerlerine çıkıldıkça doymaya bağlı olarak endüktans değerinin düşer. Endüktanstaki bu değişim akımın sinüzoidal formunun bozulmasına sebep olur. Bunun sonucu olarak, akımda istenmeyen harmoniklerin oluşmasına neden olmaktadır (Ustun,2009b).

2.5.1.2 DC Test Yöntemi

Şekil 2.4'de Statik DC test yöntemi için kullanılan deney düzeneği gösterilmiştir. Bu deney düzeneği ayarlı bir DC gerilim kaynağı, dijital osiloskop ve bilgisayardan oluşmaktadır (Ustun,2009b).



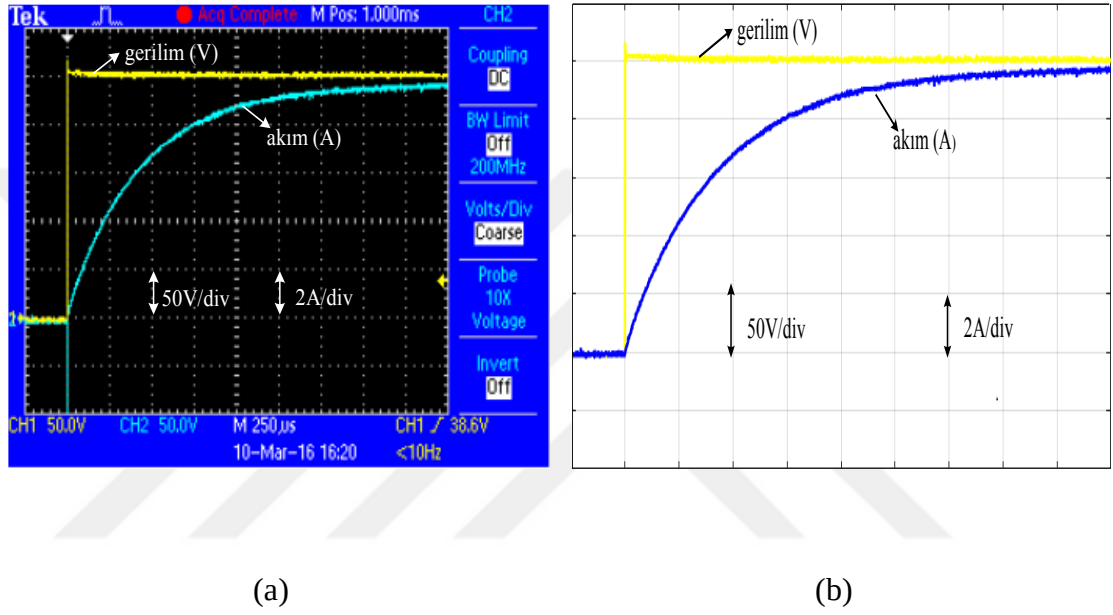
Şekil 2.4. Statik DC test devresi (Ustun,2009b)

Bu çalışmada makina fazına DC gerilim uygulanarak istenen akım değerine ulaşıncaya kadar olan i ve v verileri dijital osiloskop ile ede edilir. Bu verilerden yararlanarak bilinen elektrik devrelerinin geçici durum analizi ile endüktans hesabı aşağıdaki gibi gerçekleştirilir,

$$\psi = \int [v - (R + R_m) i_m] dt \quad (2.8)$$

$$L = \psi / i \quad (2.9)$$

Burada ψ akı bağıntısı ve R_m osiloskop ile akımın ölçülmesinde kullanılan ölçüm direncini göstermektedir (Ustun,2009b).



Şekil 2.5. Rotor pozisyonu 0°'de sabit ve 0-10A akım değişimi için akım ve gerilim değişim grafiği a) Osiloskop çıktısı b) Bilgisayara aktarılmış verilerin görüntüsü

Deneyisel olarak 0°'de sabit rotor pozisyonunda 0-10A ve 250V uygulanarak gerçekleştirilen DC test deneyi Şekil 2.5'de gösterilmiş ve akı değeri 8A'de 0.092 Wb, 7A'de 0.805Wb, 6A'de 0.071 Wb, 5A'de 0.057 Wb, 4A'de 0.046 Wb, 3A'de 0.035 Wb, 2A'de 0.024 Wb ve 1A'de 0.011 Wb olarak elde edilmiştir.

Buna göre hesaplama hatası bu yöntemde yaklaşık olarak %0.3 dür. Gerilim kaynağının iç direncinden dolayı gerilim düşümü oluşmaktadır. Dolayısıyla hesaplama yaparken dijital osiloskopla elde edilen veriler kullanılmalıdır. Sabit bir gerilim değeri kullanmak hatalı sonuç oluşturmaktadır. Bu tip testlerde örnekleme sayısının artırılması için osiloskop örneklemesinin

yüksek olması ve gerilim değerinin mümkün olduğunca da düşük tutulması oldukça önemlidir (Ustun,2009b).

Ölçme hatası olarak Statik AC test ile Statik DC test arasında oldukça önemli bir fark vardır. Açıkça görülmektedir ki DC test yönteminin daha elverişli bir ölçme yöntemidir. Yukarıda da belirtildiği gibi harmonik bileşenleri hesaplamaya dahil edilmeden AC test yöntemi kullanılmamalıdır (Ustun,2009b).

2.5.2 Dinamik Ölçme Yöntemi

Dinamik ölçme elektrik devresi çözümleme mantığı açısından Statik DC ölçme mantığı ile aynıdır Bu yöntemin farkı motor hareketli iken ve normal bir hızda dönerken akım, gerilim ve pozisyon bilgisine bağlı olarak ani değerlerin elde edilmesinde yatmaktadır. Dinamik ölçme için veri transfer kartı veya dijital osiloskop kullanılabilir. Fakat, işlem yoğunluğunun fazlalığı, sınırlı sayıda verinin alınarak işlenmesi ve en önemlisi online uygulamalarda kullanılamaması gibi dezavantajları bulunmaktadır (Ustun,2009a). Bu nedenle bu dinamik ölçme ve modelleme işlemini için çalışmalarda genel olarak gerçek zamanlı ve online çalışmalarında gerçekleştirilebileceği herhangi bir arayüz elemanı gerektirmeyen yüksek hız ve hafıza kapasitesine sahip aynı zamanda motor kontrollerinde etkin kullanılabilecek işlemciler kullanılması gereklidir. Motorun referans olarak seçilen fazı hariç diğer bütün fazlara uygulanan referans akım sinyalleri sabit tutularak, düşük bir devirde yüklü olarak ve açık döngü çalıştırılır. Her tam turda örneklemenin yapılacağı bir fazın referans akım sinyali belli aralıklarla arttırılır. Dolayısıyla akım, gerilim ve pozisyon bilgileri elde edilir. Gerçek akı bağıntısı akım ve gerilim sensöründen elde edilen akım ve gerilim bilgilerine göre Denklem (2.9) kullanılarak hesaplanır. Böylece elde edilen akı değeri ile ölçülen akım değeri kullanılarak endüktans değeri de bulunabilir (Ustun,2009b).

ARM'lerin kontrolünde ya da gerçek zamanlı modelleme çalışmalarında Dinamik test yöntemi kullanılarak elde edilen veriler kullanılır. Bu ölçme yönteminde akım ve gerilim sensörlerinin de oluşan gürültünün en aza indirilmesi ve bunun yanında sensörlerin dönüşüm oranlarının uygun seçilmesi dikkat

edilmesi gereken çok önemli noktalardır. (Ustun,2009b).

2.6 ARM için Konverter Devreleri

ARM sürücülerinde üretilen tork sargıdan geçen akımın yönüne bağlı olmadığından, ARM sürücüleri her faz sargısı için sadece tek anahtarlarda sürülebilir. Akım denetiminde her faz sargısı için en az iki anahtar gerektiren AC makinalarla terstir. Dahası, AC motor sürücülerinde sargılar anahtarlarla seri değildir, hatalı anahtarlardan dolayı kaynağın doğrudan kısa devre olması problemleri ortaya çıkar. ARM sürücülerinde daima bir faz sargısına seri bir anahtar vardır. Yanlış anahtarlama durumunda, hatanın giderilmesi için zaman kazandırır. ARM fazları bağımsızdır ve bir sargıda oluşabilecek bir hata motorun durmasına neden olmaz (Krishnan,2001).

2.6.1 Konverter Tipleri

ARM'lerde fazlar arasındaki karşılıklı kuplaj ihmal edilebilir. Herbir faz birbirinden bağımsızdır. Bu özellik avantajlı olmasına karşılık, karşılıklı kuplajın eksikliği manyetik alanda depolanan enerjinin daha dikkatli bir şekilde ele alınmasını gerektirir. Manyetik alan enerjisi bir fazın enerjilendirilmesi süresince bir yol oluşturması gerekir, aksi takdirde bu enerji sargılar arasında aşırı bir gerilim oluşmasına neden olur ve bu nedenle yarı iletken anahtarlar zarar görebilir. Bu sadece bir durumdur fakat ARM sürücülerindeki konverterler bunun gibi çok fazla durumu barındıran bir topolojiye sahiptir. Bu enerji ters diyotlarla geri aktarılabilir ve bu enerjinin bir kısmı mekanik yada elektrik enerjisine dönüştürülür, bir kısmı da makine sargılarında kaybolur. Diğer bir yöntem de elektronik veya elektromanyetik araçlar vasıtasıyla kaynağa aktarmaktır. Bütün bu yöntemler q , $(q+1)$, $1.5q$ ve $2q$ anahtar topolojileri olan güç konverter topolojilerinde bulunmaktadır, burada q makine faz sayısını gösterir (Krishnan,2001).

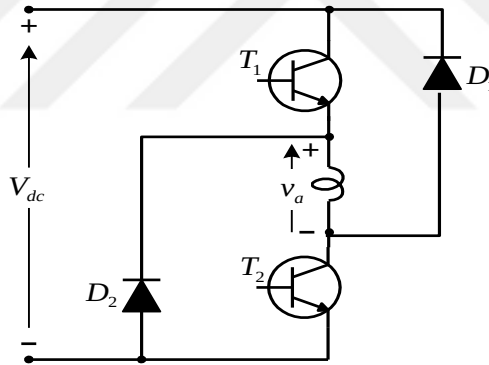
İki kademeli konverterlerin dışındaki tüm konverter yapıları girişlerinde

uygun bir DC kaynağın olduğunu kabul eder. Bu DC kaynak batarya olabilir yada AC beslemeden doğrultulup filtre edilen bir DC kaynak olabilir (Krishnan,2001).

Temel C-dump dönüştürücü devresi, düzenlenmiş C-dump dönüştürücü devresi, bifilar sargılı dönüştürücü devresi, split DC link dönüştürücü devresi ve söndürme dirençli dönüştürücü devresi gibi temel dönüştürücü devreleri bulunmaktadır.

2.6.1.1 Asimetrik Köprü Konverter

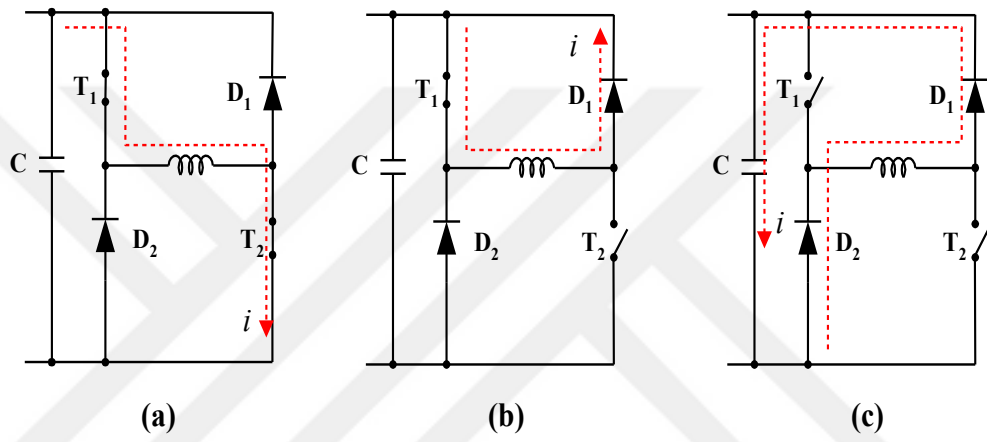
ARM sürücüsü olarak en sık kullanılan konverter tipi asimetrik köprü konverterlerdir. Şekil 2.6'da ARM 'nin sadece bir fazını ele alan asimetrik köprü konverteri göstermektedir. Geride bırakılan fazlar aynı şekilde bağlanırlar. (Krishnan,2001).



Şekil 2.6. ARM için asimetrik konverter (Krishnan,2001)

Asimetrik köprü konverter için 3 durum söz konusudur. Birinci durumda T_1 ve T_2 anahtarları iletimde ve D_1 ,ve D_2 diyotları kesimdedir. İkinci durumda T_1 anahtarı ve D_1 diyotu iletimde, T_2 anahtarı D_2 diyotu kesimdedir. Üçüncü durumda ise T_1 ve T_2 anahtarları kesimde, D_1 ,ve D_2 diyotları iletimdedir. Birinci durum enerjilenme periyotudur. T_1 ve T_2 anahtarları iletimdedir ve akım faz sargısı üzerinden akmaktadır. D_1 ,ve D_2 diyotları ise kesimdedir. İkinci durum serbest döngü periyotudur. Akım T_1 anahtarı, A sargısı ve D_1 diyotu üzerinden akmaya devam eder ve sonra T_2 anahtarı kesime götürülür. Diyot ve anahtar

üzerine düşen gerilimler ihmal edilirse sargı üzerindeki gerilim sıfır olur. T_1 anahtarı iletimde ve T_2 anahtarı kesimde iken T_2 anahtarı uçlarındaki gerilim V_{dc} kaynak gerilimine eşittir. Bu nedenle, güç anahtarları ve diyotları kaynak geriliminin değeri ile orantılı olmak zorundadır. Üçüncü durum enerjinin kaynağa dönmesi periyotudur. Akım sıfıra çekildiğinde, her iki anahtar da kesime götürülür. Bu aralık boyunca, D_1 ve D_2 diyotları iletimdedir ve sargı uçlarındaki gerilim $-V_{dc}$ dir ve enerji boşaldıktan diyotlar ve anahtarlar kesime gidecek sonra sargı üzerindeki gerilim ve akım sıfır olacaktır.



Şekil 2.7. Asimetrik konverter anahtarlama durumları a) Birinci durum (T_1 ve T_2 iletimde, D_1 ve D_2 kesimde) b) İkinci durum (T_1 ve D_1 iletimde, T_2 ve D_2 kesimde) c) Üçüncü durum (T_1 ve T_2 kesimde, D_1 ve D_2 iletimde)

3. YAPAY ZEKA TEKNİKLERİ

Teknolojinin gelişmesine bakıldığında bilgisayarlar önceleri sadece elektronik veri transferi yapmak ve karmaşık hesaplamaları gerçekleştirirken zaman içerisinde büyük miktarlardaki verileri filtreleyerek özetleyebilen ve mevcut bilgileri kullanarak olaylar hakkında yorumlar yapabilen kabiliyetler kazanmıştır. Günümüzde ise bilgisayarlar hem olaylar arasındaki ilişkileri öğrenebilmekte hem de olaylar hakkında karar verebilmektedir. Bilgisayarlar çözülmesi mümkün olmayan problemleri ve matematiksel olarak formülasyonu kurulamayan problemleri sezgisel yöntemler yoluyla çözülebilmektedir. Bilgisayarları bu özelliklerle donatan ve bu yeteneklerin gelişmesini sağlayan çalışmalar "yapay zekâ" çalışmaları olarak ifade edilmektedir. İlk defa 1950'li yıllarda ortaya atılan yapay zekâ terimi zaman içinde yoğun ilgi görmüş ve 40-50 yıllık bir zaman diliminde hayatın vazgeçilmez parçası olan sistemleri oluşturmuştur (Öztemel,2006).

1956 yılında C.Shannon, M.Minsky ve J.McCarthy' nin çabaları ve katkıları ile Türkçe kaynaklarda Yapay Us veya Suni Zekâ olarak bilinen Yapay Zekânın çağdaş bir bilim dalı olarak gelişmeye başlamıştır. 1956 yılında yapay zekâ adı ilk defa ABD'de Makine Zekâsı konferansında ortaya çıkmıştır (Allahverdi, 2002).

1930'lu yıllarda ilk elektronik bilgisayarının yapımında bulunmuş olan temel matematik alanında çığır açan araştırmalar yapan ve çok basit bir evrensel hesaplama otomati aracılığıyla hesaplanabilirliğin biçimsel olarak kavramlaştırılabilir olduğu düşüncesini ortaya atan İngiliz matematikçi Alan Turing'dir. Alan Turing 1950'de "Computing Machinery and Intelligence" başlıklı, bir bakıma manifesto da sayılabilecek bir makale ile "yapay zeka" denilen disiplinin babası olarak görülmektedir. Bu makalede "Turing-Testi" adıyla tanınan bir diyalog oyunu ile "makinelere düşünüp düşünemeyeceği" sorusunu

cevaplamıştır (Görz ve Nebel,2005).

Bazı araştırmacılar son zamanlarda ise hem teknolojik hem de teorik gelişmeler ışığında yeniden genel amaçlı zeki sistemlerin geliştirilmesini sağlamak hedefi ile çalışmalar başlatmışlardır. Günümüzde gelişen bilgisayar teknolojisinden, yapay zeka tekniklerinden istifade ederek daha genel amaçlı zeki sistemlerin oluşturulması imkanı araştırılmaktadır. Bu çalışmaların çoğu özel amaçlı sistemlerden genel amaçlı sistemlere geçiş noktasında her iki türünde özelliklerini göstermekte olup günümüzde laboratuvar çalışmaları halindedir (Doğan,2002).

Yapay zeka çok geniş alana yayılmış durumdadır ve çok fazla alt başlığa ayrılmıştır. Temel olarak yapay zeka kavramı uzman sistemler, yapay sinir ağları, bulanık mantık ve genetik algortimalar olmak üzere dört başlık altında toplanabilir.

Bu tez kapsamında YSA ve GA ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

3.1 Yapay Sinir Ağları

YSA, insan beyninden esinlenerek geliştirilmiş, ağırlıklı bağlantılar aracılığıyla birbirine bağlanan ve her biri kendi belleğine sahip işlem elemanlarından (nöron) oluşan paralel ve dağıtılmış bilgi işleme yapılarıdır (Elmas 2003).

3.1.1 YSA'nın Tarihçesi

Yapay sinir ağları ile ilgili ilk çalışma nörofizikçi McCulloch ve matematikçi Pitts tarafından 1943 yılında yapılmıştır. Bu çalışmada yapay sinir tanımı yapılarak bir hücre modeli geliştirilmiştir (McCulloch ve Pitts, 1943). McCulloch ve Pitts, aynı zamanda uygun tanımlanmış ağların öğrenmeyi de başarabileceğini ileri sürmüştür (Russell ve Norvig, 2003).

Donald Hebb 1949 yılında “Davranış Organizasyonu” (The Organization of Behaviour) başlıklı kitabında ilk defa deneye dayalı, klasik-fizyolojik şartları kullanarak, sinir sinapslarını (bir hücrenin girişi ile diğer bir hücrenin çıkışı birleştiren noktaları) ayarlama yoluyla öğrenme kuralını açıklamıştır (Onduk,2002).

(Farley ve Clark, 1954) ilk defa uyarılara tepki veren ve adapte olabilen bir model oluşturulmuştur.

Rosenblatt tarafından 1958’de Hebbian Kuralı’ndan sonraki en önemli adım olan algılayıcı (perceptron) geliştirilmiştir. Bu gelişme günümüzdeki makinelerin öğrenme algoritmalarının da temeli yapısını oluşturmaktadır (Şen, 2004).

ADALINE (Adaptive Linear Combiner) öğrenme kuralını 1960’da geliştirildi. Bu öğrenme kuralı Widrow-Hoff öğrenme kuralı olarak literatürde yerini almıştır. Modelin eğitimi boyunca oluşan hatayı en aza indirmeyi hedeflemesi bu modelin en önemli özelliğidir (Widrow ve Hoff, 1960).

1968 yılına kadar geline süreçte geliştirilmiş en temel model olan Perceptron’un, özellikle sınıflandırma sorunları olmak üzere neredeyse her sorunun çözümünde kullanılabileceği varsayılmaktaydı (Akin,1997). Fakat 1969 yılında yapay zekanın temelleri atan Marvin Minsky ve Seymour Papert tarafından yazılan “Perceptrons” başlıklı kitapta Perceptron’un XOR problemini çözemediğini kanıtlamalarıyla YSA alanında yapılan tüm araştırmalar duraklama dönemine girdi. Aynı yıl, Amerika Birleşik Devletlerinde araştırma geliştirme çalışmalarını yürüten bir organizasyon olan DARPA yapay sinir ağları ile ilgili çalışmalardan desteğini çekti (Öztemel,2006).

(Kohonen,1972) çalışmasında çağrışimli belleğin özel bir şekli olan doğrusal eşleştirme modelini tanıttı.

YSA ile ilgili kayda değer çalışmalar 1980’li yıllarda bilgisayarların daha etkin kullanılmaya başlanmasından sonra ortaya çıkmıştır. 1982 yılında yapılan “Sinir Ağları ve Fiziksel Özellikler” çalışması ile YSA’da modern devrin başladığı söylenebilir. Bu çalışmada doğrusal olmayan ağlar geliştirilmiştir (Hopfield, 1982). YSA hakkındaki çalışmalar 1980’lerde (Kohonen,1982) ve (Anderson, 1983)

tarafından yapılan çalışmalarda eğiticişiz öğrenen sistemlerinin geliştirilmesiyle iymelenmiştir.

Çok tabakalı algılayıcılar için geri yayılım algoritması 1986 yılında geliştirilmiştir. Geliştirilen bu algoritma güçlü bir yapıya sahip olduğundan dolayı daha önce karşılaşılan sorunlara çözüm getirmiştir (Rumelhart vd.,1986). Geri yayılım algoritması günümüzde de en çok kullanılan algoritmalarından biridir.

Günümüzde bilgisayar sistemlerinin gelişmesiyle birlikte YSA'nın kullanımı yaygınlaşmıştır. Her geçen gün yeni öğrenme algoritmaları geliştirilmekte ve ağ mimarileri hakkında yeni çalışmalar yapılmaktadır.

3.1.2 YSA'ların Üstünlükleri

YSA'ların doğrusal olmama, öğrenme, genelleme, uyarlanabilirlik ve hatayı tolere edebilme gibi temel üstünlükleri bulunmaktadır.

YSA'nın temel işlem elemanı olan hücre doğrusal değildir. Dolayısıyla hücrelerin birleşmesinden meydana gelen YSA'da doğrusal olmayacaktır ve bu özellik bütün ağa yayılacaktır. Doğrusal olmama özelliğinden dolayı YSA, doğrusal olmayan karmaşık problemlerin çözümünde çok önemli konumdadır (Kayıkçı, 2014).

YSA klasik algoritmaların tersine kendi kurallarını eğitim kümesinden öğrenerek elde etmektedir. Bundan dolayı ağın öğrenmesi örnek ile olduğundan dolayı, bir kural belirtmeye ihtiyaç yoktur (Dikmen,2002). Ağ öğrenme işlemi gerçekleştirirken, öğretmen veya danışman yoluyla ya da kendi kendini organize ederek sistemin davranışını öğrenmektedir. Örneğin, danışmanlı öğrenmede ağa rasgele seçilmiş bir örnek sunulur ve ağın sinaptik ağırlıkları, girdi değerlerinin işlenmesi sonucu ağın üreteceği çıktı ile önceden bilinen (istenen) çıktı arasındaki fark en aza inene kadar güncellenmektedir. Fakat eğer istenen çıktı gerçek çıktıdan farklı ise, bazı ağırlıklarda (bağlantılarda) değişiklik yapılması zorunludur. Buradaki sorun, ağın genelinde hangi ağırlıkların hataya neden olduğunun tespit edilmesidir (Rumelhart,1990) YSA'ların, verilen örneklerle kendisine gösterilen yeni durumlara adapte olması ve sürekli yeni olayları öğrenebilmesi mümkündür (Öztemel, 2006)

3.1.3 YSA'ların Sakıncaları

YSA'ların eğitim süresinin belirlenememesi, aşırı hassasiyet, ağın davranışının açıklanamaması ve ağ yapısının belirlenmesi gibi temel sakıncaları bulunmaktadır.

Ağın modelleme yeteneği, nöron sayısı ile arttığından, karmaşık bir ağ yanlışlıkla verideki gürültüyü (eksiklik veya bozukluğu) doğrusal olmayan ilişkilerin bir parçası olarak modelleyebilir ve farkında olmadan modeli yanlış biçimde öğrenebilir. Sinir ağları, gürültü verileri için değişkenler arasındaki ilişkiler hakkında varsayımlar yapmadan modelleme için ideal bir araç olmakla birlikte, bu esnekliğin bedeli, eğitim verilerine aşırı uyum, gürültülü veriyi modelleme potansiyeli ve bunun sonucunda kötü tahmin performansına sebep olmaktadır (Cui ve Wong,2004).

Ağın davranışlarının açıklanamaması şu şekilde ifade edilebilir; çok değişkenli regresyon modellerinde bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin fonksiyonu yazılabilir fakat yapay sinir ağlarında tahmin fonksiyonlarının karmaşık olmasından dolayı tahmin hedef, değişkenler arasındaki ilişkiyi gösterememektedir. Bu özelliği ile yapay sinir ağları kara kutu olarak ifade edilmektedir (Shapiro,2003).

3.1.4 YSA'ların Uygulama Alanları

YSA'lar ile ilgili birçok alanda birçok başarılı çalışma gerçekleştirilmiştir. YSA'ların uygulama alanları temel olarak aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır (Öztemel, 2006) :

- Endüstriyel uygulamalar,
- Finans ve ekonomi uygulamaları,
- Askeri ve savunma uygulamaları,
- Sağlık uygulamaları,
- Diğer uygulamalar.

YSA'ların bu uygulama alanlarında tahmin, sınıflandırma, veri ilişkilendirme, veri filtreleme, tanıma ve eşleştirme, teşhis ve yorumlama fonksiyonları yerine getirebilmektedir (Öztemel, 2006).

3.1.5 YSA Öğrenme Yöntemleri

YSA'ların gibi öğrenme yöntemleri örneklerden öğrenme kaynaklıdır. Örneklerden öğrenmenin temel felsefesi bir olay hakkındaki gerçekleşmiş örnekleri kullanarak olayın girdi ve çıktıları arasındaki ilişkileri öğrenmek ve bu ilişkilere göre daha sonra oluşacak olan yeni örneklerin çıktılarını oluşturmaktır. Burada bir olay ile ilgili örneklerin girdi ve çıktıları arasındaki ilişkinin olayın genelini temsil edecek bilgiler içerdiği varsayılmaktadır. Değişik örneklerin olayı değişik açılardan temsil ettiği kabul edilmektedir. Farklı örnekler kullanarak böylece olay değişik açılardan öğrenilmektedir. Burada bilgisayara sadece örnekler gösterilmektedir. Bunlardan başka herhangi bir ön bilgi verilmemektedir. Öğrenmeyi gerçekleştirecek sistem aradaki ilişkiyi kendi algoritmasını kullanarak bulmaktadır (Fausett,1994).

3.1.5.1 Danışmanlı Öğrenme

Danışmanlı öğrenmede danışman kişi örneğin, bir öğretmen veya bir matematiksel fonksiyondur (Altrock,1997). Her iki öğrenme yaklaşımı arasındaki temel farklılık istenen çıkış değerlerinin mevcut olup olmamasıdır. Danışmanlı öğrenme bir eğiticinin sistem çıkışlarında istenen değerlerini temin etmesidir (Önder,2004). Gerçek ile istenilen değerler arasındaki hatanın en aza indirilmesi yada denetimli öğrenmeyi sağlayan danışmanlı öğrenme ile ilgili sorun, yakınsama problemi. Çünkü amaç, hatayı en aza indiren ağırlık grubunu belirlemektir. Bu özelliği ile yöntem istatistikteki regresyon ve ayırma analizine benzemektedir (Akın,1997).

3.1.5.2 Danışmansız Öğrenme

Danışmansız öğrenme metodu, probleme ait veri girişlerine karşılık giriş bilgilerine bağlı olarak öğrenmeyi kendisi gerçekleştirir. Giriş bilgilerine göre ağ öğrenme kurallarını kendi kendine oluşturur. Bu yüzden bu tür bir eğitime, girişleri gruplandırarak eğittikten sonra verilen bir girişin hangi sınıfa ait olduğunu belirler. (Carpenter ve Grossberg,1988) tarafından geliştirilen adaptif rezonans teorisi (ART) yapısında veya (Kohonen,1982) tarafından geliştirilen SOM yapısında bu danışmansız öğrenme metotları bulunmaktadır. Bu öğrenme metodu sınıflandırma ve şekil tanıma problemlerine başarıyla uygulanabilir.

3.1.6 YSA'da Öğrenme Kuralları

Yapay sinir ağlarında kullanılan öğrenme kuralları çok parametrelidir, karmaşık ve matematiksel olarak ifade edilmesi neredeyse imkansızdır. Kullanılan yöntemler, bu işlemin basitleştirilmiş veya farklı formatta ifade edilmiş halleridir. Diğer öğrenme kurallarına temelde oluşturan Hebb Öğrenme Kuralı ilk ve en bilinen öğrenme kuralıdır.

Yaygın olarak kullanılan öğrenme kuralları Hebb Öğrenme Kuralı, Delta Öğrenme Kuralı, Hopfield Öğrenme Kuralı, Kohonen Öğrenme Kuralı, Geri Yayılma Öğrenme Kuralı, Levenberg-Marquardt Öğrenme Kuralı' dır.

3.1.6.1 Hebb Kuralı

Donald Hebb tarafından 1949 yılında geliştirilen Hebb Kuralı, “The Organization of Behaviour” adlı kitabında “eğer sinyal ile gönderen nöronlar arasındaki sinaptik ağırlıkların ikisi de matematiksel olarak aynı işarete sahipse, bu iki nöron arasındaki ağ güçlendirmektedir. Aksi halde bağın kuvveti azaltılmalıdır. Bilinen en eski öğrenme kuralı olan Hebb Öğrenme Kuralı, diğer öğrenme kurallarının temelidir. Hebb Öğrenme Kuralına göre öğrenme sinyali hücre çıkışına eşittir. Yani bir hücre aktif ise bağlı olduğu hücreyi aktif, pasif ise hücreyi pasif yapmaya yönelmektedir (Haykin, 2005: 77).

3.1.6.2 Geriye Yayılım Öğrenme Kuralı

Geriye Yayılma Öğrenme Kuralı, Geoffrey Hinton James McClelland tarafından geliştirmiş ve hataları çıkıştan girişe geriye doğru azaltmaya çalışmasından dolayı bu ismi vermiştir. Öngörü için kullanılan yapay sinir ağlarında sıkça kullanılan algoritmadır. Geri yayılım algoritması verilen bir x giriş vektörü için beklenen çıkışın bilindiği ağlar için uygundur ve çok katmanlı bir ağ mimarisi içermektedir. Çok katmanlı ağlar giriş, çıkış ve en az bir gizli katman olmak üzere üç katmandan oluşurlar.

Gizli katman sayısı ve bu katmandaki nöron sayısı değiştirilebilir. Nöron sayısı arttıkça, öğrenme işleminin süresi de artar (Elmas,2007). Eğer az sayıda gizli katman kullanılırsa ağ öğrenmesi başarısız olur. Gereğinden fazla gizli katman bulunması halinde ise ağ ezberler ve istenilen sonuçlar elde edilemez. Öğrenme algoritması olarak geri yayılım algoritması seçildiğinde iki parametre önemli olmaktadır. Bunlardan birisi; öğrenme katsayısı diğeri ise momentum katsayısıdır. Öğrenme katsayısı, ağırlıkların bir sonraki düzeltmede hangi oranda değiştirileceğini ifade etmektedir. Öğrenme katsayısı için tipik değerler, 0,01 ve 0,9 arasında değişir.

Momentum terimi ağıdaki salınımları engellemeye ve ağı hata yüzeyindeki bölgesel minimum noktalardan kaçarak daha dip noktalara ulaşmasına yardımcı olmaktadır (Demirkoparan, 2010).

3.2 Genetik Algoritma

Doğal seçim ve doğal genetik kurallarına dayalı sezgisel bir yöntem olan genetik algoritma, geniş uygulama alanına vardır. Çok da karmaşık bir yapıya sahip olmayan GA sıklıkla başvurulmuş bir optimizasyon tekniğidir. GA geleneksel yöntemlerle çözümü zor veya imkansız olan problemlerin çözümünde iyi bir yöntem olmaktadır. Çözüm uzayı hakkında başlangıç bilgisi ya da herhangi bir türev bilgisi gerektirmeyen bir yöntem oluşu genetik algoritmanın yaygın olarak kullanılabilmesine olanak tanımıştır (Mitchell,1996).

Canlılar genlerini, başka genlerle eşleştirerek yeni genler ortaya çıkmasıyla nesilden nesile, aktarmaktadır. GA tabiattaki bu doğal işleyişi kullanarak en iyiyi bulmaya hedefler. GA'da bir nesilden diğer nesile geçerken çözüme bir adım daha yaklaşılr ve optimum çözüm bu şekilde tespit edilmiş olur.

Evrin teorisi Charles Darwinian' ın 1859 yılında ortaya attığı “Survival of the fittest – Uygun Olanın Hayatta Kalması” yöntemi, arama ve optimizasyon algoritmalarının temelini oluşturmıştır. Bu teorinin temeli doğal seçilimdir. Doğal evrimin çalışmasının temelinde doğadaki canlıların sürekli olarak değişen çevreye uyum sağlamasının olduğu saptanmıştır. Doğada varolmak için gerekli temel kaynakların kullanımı hedeflenir ve rekabet sürdürülür. Bu rekabette diğer canlılardan daha uygun özelliklere sahip olan bireyler hayatını devam ettirebilmektedir. Güçlü olmayan bireyler ise gelecekte temsil edilmemektedir (Darwin, 1859).

J.D Bagley ait olan doktora tezinde ilk defa GA tanımı konu olmuştur. Bagley adaptif (uyarlamalı) sistemler üzerine çalışmış ve GA üzerine odaklanmıştır (Bagley, 1967). Evrim kuramını esas alan GA'ların temel prensipleri ise ilk defa makine öğrenmesi konusunda çalışmalar yapan J. Holland tarafından ortaya atılmıştır. Michigan Üniversitesin'de psikoloji ve bilgisayar bilimi uzmanı olan John Holland; yapmış olduğu çalışmalarda; canlıların evriminden, değişiminden etkilenecek, bu genetik evrim sürecini bilgisayar ortamına aktarmak sureti ile mekanik yapının öğrenme yeteneğini geliştirmektense bir çok yapının bütününden çiftleşme, çoğalma, değişim olarak adlandırılan genetik süreçler sonunda üstün yeni bireylerin elde edilebileceğini kanıtlanmıştır. John Holland'ın asıl hedefi, özel problemlerin çözümü için algoritma üretmek değil doğal adaptasyon sürecini bilgisayar sistemlerine uyarlamaktır Doğal ve yapay sistemlerde adaptasyon “Adaptation in Natural and Artifical Systems” isimli kitabında genetik algoritmayı biyolojik evrimin girişi olarak göstermiştir (Holland, 1975).

John Holland'ın öğrencisi olan David Goldberg' in "Gaz Borularının GA ile Optimizasyonu" konulu doktora tezi, kendisine "National Science Foundation" Genç Araştırmacı ödülünü kazandırmış olmasının yanında genetik algoritmaların yalnızca teorik olmadığını ayrıca farklı alanlardaki çeşitli problemlerin çözümünde yaygın bir şekilde uygulanabileceğini ortaya çıkardı (Goldberg, 1989).

3.2.1 GA'ların Uygulama Alanları

GA yaklaşımının avantajı, zorluklarla ve hedeflerle basa çıkmadaki olabilirliğidir. GA'ların genel uygulama alanları ve işletmedeki uygulama alanları finans, pazarlama, üretim-montaj, sistem güvenilirliği problemi, tesis yerleşim problemi, optimizasyon, mekanik öğrenme, otomatik programlama ve bilgi sistemleri ve ekonomik ve sosyal sistem modelleridir (Emel ve Taşkın, 2002).

3.2.2 GA'ların Güçlü ve Zayıf Yönleri

GA'nın optimizasyon problemlerinde güçlü yönleri şunlardır (Şeker,2008);

- Kesikli veya sürekli değişkenlerle gerçekleştirilebilir
- Türev alma işlemine ihtiyaç yoktur
- Çözüm uzayında aynı anda geniş bir alanda çok sayıda noktadan araştırma yapılabilir
- Çok fazla sayıda değişkenle optimizasyon gerçekleştirilebilir
- Paralel hesaplamalar için çok geçerlidir
- Çok fazla ekstrem değeri olan hedef fonksiyonları durumunda bile optimizasyon yapılabilir
- Yerel en küçüklemeleri sıçrayarak geçebilir
- Sadece mutlak en iyi çözümü değil, en iyi çözümlerin listesini bile oluşturabilir
- Karar değişkenlerini kodlayarak optimizasyonu kodlama dünyasında gerçekleştirir
- Genetik sayı sistemine göre üretilen sayılarla işlem yapar. Bunlar deney verileri veya analitik fonksiyonlardır

Genetik algoritmanın bazı sakıncaları şunlardır (Şeker,2008);

- GA'larda belirsizlik yöntemleri kullanılır ve algoritmanın işleyişinde belirgin değildir. Bunun sonucunda genetik algoritma modeli değişik defalarca kullanılıncaya birbirinden biraz farklı olan sonuçlar üretebilir. Halbuki; doğrusal, dinamik veya

eğrisel örgün optimizasyon yöntemlerinin hepsi belirgin yöntemlerdir. İşleyişlerinde belirsizlik yoktur ve ulaştıkları sonuçlar aynı sorun ve şartlar altında hep aynıdır.

- Bilinen çözümler arasında en iyi çözüm görecelidir. Ulaşılan çözümün en iyi olup olmadığının kontrol edilmesine olanak tanımaz. Bu nedenle, GA'lar çözümün kesinlikle ne olabileceğinin bilinmemesi durumunda gerçekleştirilebilir. Doğal olarak, evrim algoritmaları en iyi çözüm için ne zaman duracaklarını kestiremezler. Bir durma kistası olmalıdır.

- Klasik optimizasyon yöntemlerinde bir yön veya sistematik izin takip edilmesi gerekmesine karşı, genetik algoritma karar uzayını tamamen rastgele olarak tarar.

3.2.3 Temel Kavramlar

3.2.3.1 Kromozom

Problemin çözümlenebilmesi için gerekli olan problemin tanımlandığı birey dizisidir. GA'ya, optimize edilecek parametre dizileri ve kromozomlar (bireyler) tanımlanarak başlanır. (Emel ve Taşkın,2002).

Kromozom üzerinde yer alacak parametreler; GA'nın, çözüm uzayında en iyi çözümü araması için gerekli olan bilgilerin tümünü içerecek şekilde dizayn edilmelidir (Ikeuchi,1998).

Kromozomların kodlanması tamsayı ve reel sayıların dışında , genellikle ikili sayı sistemi temel alınarak gerçekleştirilir (Mitchell ve Taylor,1998). Özellikle, karar değişkeni sayısı fazla ve değişkenin ikili sistemdeki karşılığı uzun olan problemlerde onlu sistemde yapılan kodlama seçilmektedir (Paksoy,2007).

3.2.3.2 Gen

Kromozom içerisinde yer alan anlamlı en küçük bilgidir. Kromozomdaki her bir parametre bir geni oluşturmaktadır. Optimizasyon döngüsü başlamadan önce,

optimize edilmesi gereken parametreler istenilen şekle dönüştürülmelidir. Buna kodlama denir. Kodlama GA için önemli bir konudur. Çünkü sistemden gözlemlenen bilgiye bakış açısı büyük ölçüde sınırlandırılabilir. Gen stringi probleme özel bilgiyi depolar. Gen olarak adlandırılan her bir öge, genellikle değişkenler stringi olarak belirtilir. Değişkenler ikili veya reel sayı şeklinde gösterilebilir ve aralığı probleme özel olarak belirtilir (Yapıcı,2012).

3.2.3.3 Popülasyon

GA da işleme koyulacak tüm kromozomlar (bireyler) birleşerek popülasyonu (toplumu) meydana getirir. Yani kromozomların (bireylerin) tamamı popülasyon (toplum) ile ifade edilir. Toplum büyüklüğünün ne olacağını belirlemek, tüm GA kullanıcıları açısından oldukça önemlidir. Toplum büyüklüğü, başka bir deyişle kromozom ya da birey sayısı, GA'nın başarısını ya da optimum sonuca erişim süresini etkileyen önemli unsurlardandır (Yapıcı,2012).

Popülasyonun belirlenmesinde önemli olan popülasyonun kaç bireyden oluşturulacağı ve başlangıç değerlerinin nasıl belirleneceğidir. GA'lar tasarlanırken popülasyon büyük seçilirse, genetik algoritmanın istenen çözüme ulaşması uzar. Tersine popülasyon çok küçük seçilirse bu durumda popülasyon içerisindeki bireylerin çeşitliliği düşeceği için lokal minimumda kalmasına sebep olur. Bu nedenle algoritma çevrim süresi dikkate alınarak mümkün olduğunca popülasyonun büyük seçilmesi tavsiye edilir (Ustun,2009c).

3.2.4 Yeniden Üreme İşlemi

Mevcut yığından gelecek yığına aktarılacak olan dizilerin seçilmesi aşamasıdır. Taşınan diziler genetik olarak mevcut yığından en uygun yapıya sahip olan dizilerdir. Bu işlem belirlenen uygunluk değerine sahip iyi bireylerin bir sonraki nesle iletilmesini sağlar (Elmas,2007).

3.2.5 Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması

GA'ları diğer sezisel arama yöntemlerinden ayıran bir özellik; çözümü noktadan noktaya değil noktaların oluşturduğu yığın içinde bulmaya çalışmasıdır. Bu nedenle GA'nın ilk adımı başlangıç yığınının belirlenmesidir. Genelde başlangıç yığını rastgele belirlenir. Ancak bu olay kısıtlı optimizasyon problemlerinde yığının uygun olmayan çözümlere doğru yönelmesine sebep olabilir. Bu durumu ortadan kaldırmak için probleme özgün çeşitli sezgisel yöntemler oluşturulabilir (Elmas,2007).

3.2.6 Uygunluk Değeri

GA'nın başlangıç popülasyonunu oluşturulan her bir kromozomun belirlenen amaç fonksiyonuna göre uygunluk değeri olan $f(x)$ değeri belirlenir. Başlangıç popülasyonundaki kromozomlar için uygunluk fonksiyonu, bir kromozomun temsil ettiği çözümün kullanımıyla veya yeteneğiyle orantılı olan sayısal bir uygunluk değeri oluşturur. Bu bilgi, her kuşakta daha uygun çözümlerin seçiminde yol göstermektedir. Bir çözümün uygunluk değeri ne kadar yüksekse, yaşama ve çoğalma şansı o kadar fazladır ve bir sonraki kuşakta temsil edilme oranı da o kadar fazladır (Emel ve Taşkın,2002).

Fonksiyonların sınıflandırılmalarında tam bir birlik yoktur. Etkinlik fonksiyonları yapısal olarak doğrusal, doğrusal olmayan, doyumlu, doyumsuz, monotonik, non-monotonik, sürekli, süreksiz, türevlenebilen, türevlenemeyen olmak üzere birçok grupta ifade edilebilir. Bu kadar farklı sayıda isimlendirmenin sebebi yapay sinir ağlarının örnek tanıma, görüntü işleme, regresyon gibi çok farklı problemlerin çözümlerinde geçerli olabilmeleri ve de çok farklı sayıda sinir ağı tipinin olmasından dolayıdır. Pozitif doğrusal fonksiyon, doğrusal, doyumlu doğrusal, işaret, kare, kübik, lojistik sigmoid, hiperbolik tanjant, radial tabanlı ve sinüs fonksiyon etkinlik fonksiyonlarından bazılarıdır (Ustun,2009c).

Tanımlamalarda x değeri ağırlandırılmış düğüm girişlerini ifade etmektedir. $f(x)$ ise etkinlik fonksiyonu çıkışı göstermektedir. Seçilen etkinlik fonksiyonlarının herhangi bir parametreye bağlı olmadıkları bellidir. Çünkü fonksiyonlar üzerinde bir

değişiklik yapılmadan en uygun kombinasyonlarını belirleyerek en optimum ağ yapısının elde edilmesi hedeflenmektedir (Ustun,2009c).

3.2.7 Dizi Gösterimi (Kodlama)

Basit bir parametre değerinin ikilik düzende gösterimi çok uzun ve karmaşık yapıdadır. Gezgin satıcı, çizelgeleme, karesel atama gibi optimizasyon problemlerinde ikili düzende kodlama arama uzayını tam olarak ifade etmemektedir. Bu nedenle alfa sayısal veya gerçel sayısal gösterimlerle kodlama işlemi gerçekleştirilmektedir. Ancak kodlamanın ne şekilde yapılacağı GA kullanılarak çözümü istenen problemin özelliğine göre farklılık göstermektedir. Dolayısıyla programın yazılması esnasında dizi gösteriminin ne şekilde olacağı açıkça ifade edilmelidir. Böylelikle çözüm uzayını temsil edecek olan dizilerin en iyi şekilde oluşturulmuş olur (Elmas, 2010: 391).

GA uygulamasında ilk adımdır ve farklı problemler için farklı kodlama tiplerinin ifade edilmesi gerekmektedir.

3.2.8 Seçim Mekanizması

Popülasyon için yeni nesli oluşturulacak uygun bireylerin uygunluk fonksiyonunun değerlerine göre seçilmesi işlemine GA optimizasyonunun seçim operatörü denilmektedir. Seçimdeki amaç en iyi uygunluk değerine sahip bireylerin yaşamlarını sürdürebilmelerini sağlarken başarısız bireylerin ise ortadan kalkmasını sağlar. Seçim operatörü olarak çeşitli metotlar ortaya çıkartılmıştır. Bunlardan en çok kullanılan seçim operatörleri rulet tekerleği, turnuva ve sıralı seçim mekanizması olarak gösterilebilir (Öztürk, 2007).

3.2.9 Genetik Operatörler

GA'larda çözüm yığını incelenirken belirli noktalardan sonra nesil çeşitliliği olmadığı için çözüme ulaşamamaktadır. Nesil çeşitliliğini sağlayarak çözüm

uzayında algoritma istenen kısıtları sağlayacak olan çözüm yığını elde edilebilir. Bunun için dizilerde çaprazlama ve mutasyon operatörleri belirli yüzdelik oranlarıyla uygulanarak nesil çeşitliliği oluşturulur (Elmas,2007).

3.2.9.1 Çaprazlama Operatörü

Çaprazlama işlemi bir sonraki neslin üretilmesi için kullanılan bir genetik işlemdir. Aile seçiminden elde edilen aileler kullanılarak yeni dölleri oluştururlar. Burada dikkat edilmesi gereken husus popülasyon içerisindeki çeşitliliğin kaybolmaması ve bunun tersine uygun bireylerin çaprazlamada tamamen yok olmamasıdır. Çaprazlama noktaları yine rastgele seçim ile bulunur (Ustun ve Yıldız, 2009d).

3.2.9.2 Mutasyon Operatörü

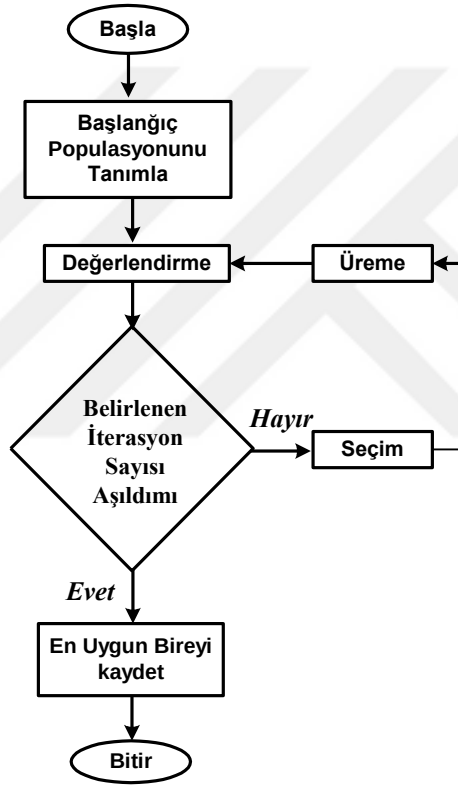
Çaprazlama sonucu elde edilen bireylere popülasyondaki çeşitliliği artırmak için mutasyon uygulanarak yeni popülasyonun oluşumu gerçekleştirir. Mutasyon oranı büyük seçilirse popülasyondaki bireylerin çeşitliliği artarken uygun bireylerin tamamen kaybedilmesine de sebep olabilir. (Ustun ve Yıldız, 2009d).

3.2.9.3 Elitizm Yöntemi

GA'larda elitizm uygulanmasında, her jenerasyonda en iyi birey belirlenir ve bir sonraki jenerasyona aktarılır. Örneğin 20 jenerasyonlu bir genetik işlem uygulandığını varsayalım. 1. jenerasyonun en iyi bireyi 2. jenerasyonun popülasyonunda bir birey olarak yerini alır. Burada yapılan genetik işlemlerle en iyi birey hesaplanır ve 3. jenerasyonun en iyi bireyi, 4. jenerasyonun ilk bireyi olarak popülasyona dahil olur ve son jenerasyona kadar bu işlem aynı adımlarla devam eder (Turan,2007).

3.2.10 GA'nın Çalışma İlkesi

Genetik tabanlı sinir ağı algoritmasına ait akış diyagramı Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Burada işlemler temel olarak başlangıç popülasyonunun tanımlanması, değerlendirme işlemi, seçim işlemi ve üreme işlemi olarak sıralanabilir. Akıştan da görüleceği gibi amaç problemin çözümüne yönelik en uygun kromozomun elde edilmesidir. Gösterilen akışa ait algoritma işlemleri aşağıda ayrıntılı olarak sıralanmıştır (Ustun ve Yıldız, 2009d).



Şekil 3.1. GA akış diyagramı

1. Başlat

2. Başlangıç popülasyonunu üret.

3. Her bir birey için sinir ağı algoritmasını tüm örnekler için eğitimini gerçekleştirerek uygunluk değerlerini hesapla. Uygunluk değerlerini sıralayarak en uygun olan bireyi belirle.

4.İstenen uygunluk değerinin yakalanıp yakalanmamasına bak. Eğer yakalanmışsa en uygun bireyi saklayarak algoritmayı sonlandır. Değilse bir sonraki adımdan devam et.

5.Üreme için ailelerin seçimini gerçekleştir.

6.Çaprazlama ve mutasyon işlemleri ile yeni bireyleri üret.

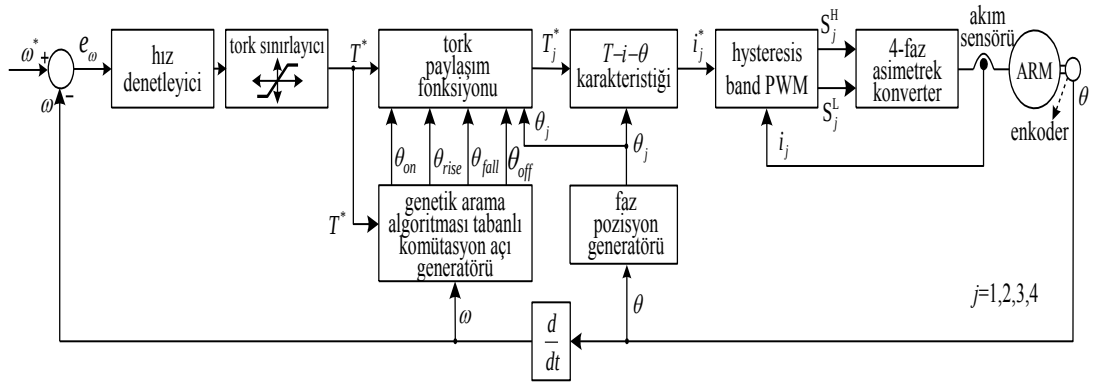
7.Yeni jenerasyonla eskileri yer değiştir. Üçüncü adımdan devam et.

8. Dur



4. ARM TORK RIPİL MİNİMİZASYONU İÇİN SÜRME SİSTEMİ TASARIMI

ARM sürme sisteminin konfigürasyonu Şekil 4.1’de verilmiştir. Sürme sisteminin güç tarafı 4-fazlı, 8/6 kutuplu, 2HP, AR motor ve 4 fazlı asimetrik konverter ve ayarlı DC güç kaynağından oluşturulmuştur. Pozisyon ve akım bilgileri sensörlerden elde edilmiştir. Kontrol tarafında ise hız denetleyici, tork sınırlayıcı, herbir fazın pozisyonlarının üretildiği komutasyon üretici, referans faz torklarının elde edildiği $T-i-\theta$ karakteristiklerinin bulunduğu look-up table, tork paylaşım fonksiyonu, histeresiz band akım denetleyici PWM ve komutasyon açılarının belirlendiği genetik arama algoritması generatörü olarak özetlenebilir. Şekil 4.1’de e_θ pozisyon hatası, ω^* referans hız, ω mekanik hız, e_ω hız hatası, T^* referans tork, θ_j faz pozisyonları, i_j^* referans faz akımları, i_j faz akımları, S_j^H ve S_j^L anahtarlama sinyalleridir.



Şekil 4.1. ARM sürme sistemi

4.1 ARM Tork Karakteristiği

ARM akı karakteristiği rotor pozisyonu ve akımına bağlı olarak doğrusal olmayan bir değişim gösterir. Genel elektrik makinaları teorisine göre faz gerilimi aşıağıda olduğu gibi ifade edilir,

$$v_j = R_j i_j + \frac{d\lambda_j(i, \theta)}{dt} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4.1)$$

Burada m motorun toplam faz sayısını gösterir. Her bir fazda üretilen elektromanyetik tork ko-enerjinin kısmi türevine bağlı olarak aşıağıda olduğu gibi verilebilir (Ustun,2014),

$$T_j(i, \theta) = \left. \frac{\partial W_j^c(i, \theta)}{\partial \theta} \right|_{i=sabit} \quad (4.2)$$

Ko-enerji $W_j^c(i, \theta)$ aşıağıda olduğu gibi ifade edilir,

$$W_j^c(i, \theta) = \left. \int_0^{i_j} \lambda_j(i, \theta) di_j \right|_{\theta=sabit} \quad (4.3)$$

Toplam elektromanyetik tork aktif olan fazların üretmiş olduğu torkların toplamıdır ve aşıağıda olduğu gibi elde edilir,

$$T_e(i, \theta) = \sum_{j=1}^m T_j(i, \theta) \quad (4.4)$$

Ortalama tork ifadesi aşıağıda olduğu gibi elde edilir,

$$T_{ortalama} = \frac{1}{\theta_r} \int_0^{\theta_r} T_e d\theta \quad (4.5)$$

Burada I_j bir faz akımı etkin değeri ve θ_r rotor kutup aralığıdır ve değeri 60° dir.

$$I_j = \sqrt{\frac{1}{\theta_r} \int_0^{\theta_r} i_j^2 d\theta} \quad (4.6)$$

ARM $T-i-\theta$ karakteristiğinin ifade edilmesi bu motorlarla ilgili çalışmada temel noktadır. Bunun nedeni hem üretilen tork bilgisinin bilinmesi gereken çalışmalar hem de referans akım bilgisinin doğru elde edilebilmesi için bu bilgilere ihtiyaç duyulur.

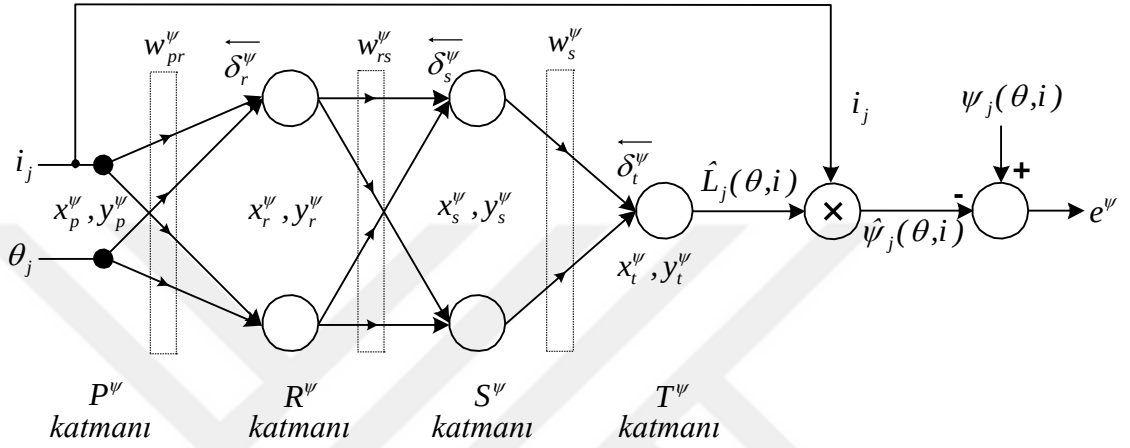
Bazı çalışmalarda doğrusal olmayan etkilerin olmadığı varsayımı yapılarak doğrusal modeller kullanılmaktadır. Bu tip çalışmalarda endüktansın pozisyon değişim bilgisi yeterli olmaktadır. Dahası ideal endüktans profilleri kabul edilerek tam doğrusal yapıların kullanıldığı da görülmektedir. Bu doğrusal yaklaşımlarda hem tork bilgisinin hem de referans akım bilgisinin elde edilmesinde eksiklikler oluşması kaçınılmazdır. Tam doğrusal olmayan etkinin yansıtıldığı analitik yöntemlerde görülmektedir. Analitik modeller oldukça karmaşık ve modellerin geri dönüşleri de oldukça zor olmaktadır. Aynı zamanda özellikle gerçek uygulamalarda işlem yükünün artmasına ve örnekleme zamanının uzamasına neden olmaktadır. Hem doğrusal olmayan etkilerin dikkate alındığı hem de işlem yükünün az olduğu en göze çarpan yaklaşım look-up tablo uygulamasıdır (Husain,2002). Bu yöntemde belirli akım ve pozisyon aralıklarında veriler bir tablo halinde hafızada saklanır. Hem tork bilgisi hem de referans akım bilgisi buradan elde edilir. İşlem yükünü önemli ölçüde azaltır. Statik karakteristikler statik testlerden veya sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilmektedir. Bu çalışmada $\lambda(i,\theta)$ bilgisi static DC test ile elde edilmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak $W_j^c(i,\theta)$ ve buradan da $T_j(i,\theta)$ karakteristik değişimi çıkartılmıştır.

4.1.1 YSA ile ARM'nin Modellenmesi

YSA'lar kullanılarak akı tahmincisinin gerçekleştirilmesinde Şekil 4.2'de gösterilen ağ yapısı kullanılmıştır. Ağın girişi algılayıcılardan alınan i_j ve θ_j sırasıyla akım ve pozisyon bilgisinin normalize edilmiş değerleridir. Ağın çıkışı ise girişlere bağlı olarak tahmin edilen $\hat{\psi}_j$ akı büyüklüğüdür. Ağ giriş (P''), iki gizli katman (R'' , S'') ve bir çıkış katmanı (T'') olmak üzere toplam 4 katmandan oluşturulmuştur. Ağın ileri yönlü akış ve geriyayılma algoritması aşağıda ayrıntılı

olarak verilmiştir. Bu ağda kullanılan ψ üst indisi ağ değişkenlerinin akı tahmincisine ait olduğunu, j alt indisi motor fazlarını göstermektedir (Ustun,2009a).

Bu tez çalışmasında (Ustun,2009a) tarafından gerçekleştirilen ve ARM'nin doğrusal olmayan modelini akıya bağlı olarak belirleyen ARM modeli kullanılmıştır.



Şekil 4.2. Akı tahminci için sinir ağı mimarisi

4.1.1.1 İleri Besleme Algoritması

İleri besleme algoritmasında akış girişten çıkışa doğru gerçekleşir. Her bir katmandaki düğümlerin girişleri (x), bir önceki katmandaki çıkışlar ile katmanları birbirine bağlayan ağırlık değerlerinin çarpımlarının toplamıdır ve elde edilen bu giriş değeri Denklem(4.7)'de gösterilen $y(x)$ etkinlik fonksiyonu yardımıyla çıkışı oluşturur. Katmanların sırasıyla ileri besleme modeli aşağıda olduğu gibi gösterilebilir,

$$y(x) = \exp\left(-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2\right) \text{ ve } y'(x) = -2\left(\frac{x-c}{\sigma^2}\right)\exp\left(-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2\right) \quad (4.7)$$

Burada x düğüm girişleri toplamını, y x 'e bağlı düğüm çıkışını, c fonksiyonunun merkezini ve σ genişliğini göstermektedir.

P'' **katmanı:** Giriş katmanıdır ve bu katmanın girişi gerçek sistemden elde edilen i_j ve θ_j sırasıyla akım ve pozisyon bilgisinin normalize edilmiş değerleridir. Tek girişli bir sistem olduğundan girişler aynen çıkışa aktarılır.

$$x_p'' = \{i_j, \theta_j\}, y_p'' = x_p'' \quad (4.8)$$

Burada $p = 0 \dots P''$ dir.

R'' **katmanı:** Birinci gizli katmandır. Bu katmanın giriş ve çıkışları aşağıda olduğu gibi elde edilir,

$$x_r'' = \sum_{p=0}^{P''} y_p'' \cdot w_{pr}'' \text{ ve } y_r'' = y(x_r'') \quad (4.9)$$

Burada $r = 0 \dots R''$ arasında değer alır.

S'' **katmanı:** İkinci gizli katmandır. Bu katmanın giriş ve çıkışları aşağıda olduğu gibi elde edilir,

$$x_s'' = \sum_{r=0}^{R''} y_r'' \cdot w_{rs}'' \text{ ve } y_s'' = y(x_s'') \quad (4.10)$$

Burada $s = 0 \dots S''$ arasında değer alır.

T'' **katmanı:** Çıkış katmandır ve bu katmanın giriş ve çıkışları aşağıda olduğu gibi elde edilir,

$$x_t'' = \sum_{s=0}^{S''} y_s'' \cdot w_{ts}'' \text{ ve } y_t'' = y(x_t'') = \hat{L}_j(\theta, i) \quad (4.11)$$

Burada $t = 0$ olarak tek bir değer alır. Ağ çıkışı $\hat{\psi}_j(\theta, i)$ aşağıda olduğu gibi elde edilir,

$$\hat{\psi}_j(\theta, i) = \hat{L}_j(\theta, i) \cdot i_j \quad (4.12)$$

Denklem (4.8) ile Denklem (4.12) arasındaki ifadeler birleştirilirse tahminci modeli aşağıdaki gibi ifade edilebilir,

$$\hat{\psi}_j(\theta, i) = y \left(\sum_s^{S''} y \left(\sum_{r=0}^{R''} y \left(\sum_{p=0}^{P''} y_p'' \cdot w_{pr}'' \right) \cdot w_{rs}'' \right) \cdot w_{st}'' \right) \cdot i_j \quad (4.13)$$

Eğitim süresince bu eşitlikle akı tahmini yapılır. Tahmin edilen akı bilgisi gerçek akı bilgisiyle karşılaştırılarak ağ eğitimi gerçekleştirilir. Daha önemli olanı eğitim tamamlandığında geliştirilen tahmincinin Denklem (4.13) ile verilen bu ileri besleme modeli kullanılır.

4.1.1.2 Geri Yayılmalı Öğrenme Algoritması

Bir sinir ağının öğrenme algoritmasının temel parçası öğrenme algoritmasındaki her bir elemanın eğitim vektörünün tekrarlamalı bir biçimde nasıl elde edilebileceğinin ağ parametrelerine bağlı enerji fonksiyonunun türevinin zincir kuralı kullanılarak tanımlanır. Eğitim vektörü ağ akışının tersi yönünde hesaplandığından bu metot genellikle geriyayılmalı öğrenme kuralı olarak ifade edilir. Danışmanlı eğitilmiş öğrenme kuralı kullanılarak sinir ağının online öğrenme algoritmasını tanımlamak için öncelikle enerji fonksiyonu aşağıdaki biçimde seçilir,

$$E(k) = \frac{1}{2} e^2(k) \quad (4.14)$$

Burada $k = 1, \dots, K$ arasında değer alır ve K toplam örnek sayısını göstermektedir. Her bir örnek için elde edilen hata değeri,

$$e(k) = \psi(k) - \hat{\psi}(k) \quad (4.15)$$

Burada $\psi(k)$ istenen çıkış değeri ve $\hat{\psi}(k)$ gerçek ağ çıkış değerini göstermektedir. Buna göre tüm ağdaki ağırlıklar hata değeri sıfıra götürülecek biçimde aşağıdaki gibi düzenlenir,

T'' katmanı: Bu katman üzerinde herhangi bir ağırlık ayarlanmadığı için ağ çıkışındaki hata değeri zincir kuralı kullanılarak geriye yansıtılarak T'' katmanı girişindeki hata değeri δ_t'' aşağıda olduğu gibi hesaplanır,

$$\overleftarrow{\delta}_t'' = - \frac{\partial E}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial \hat{\psi}_j} \frac{\partial \hat{\psi}_j}{\partial y_t''} \frac{\partial y_t''}{\partial x_t''} = e_i y'(x_t'') \quad (4.16)$$

S'' **katmanı:** Bu katmandaki ağırlık değişimleri $\Delta w_s''$ aşağıda olduğu gibi hesaplanır,

$$\begin{aligned}\Delta w_s'' &= \eta_s'' \left(-\frac{\partial E}{\partial w_s''} \right) = \eta_s'' \left(-\frac{\partial E}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial \hat{\psi}_j} \frac{\partial \hat{\psi}_j}{\partial y_t''} \frac{\partial y_t''}{\partial x_t''} \frac{\partial x_t''}{\partial w_s''} \right) \\ \Delta w_s'' &= \eta_s'' \left(-\frac{\partial E}{\partial w_s''} \right) = \eta_s'' \overleftarrow{\delta}_t'' \frac{\partial x_t''}{\partial w_s''} \\ &= \eta_s'' \overleftarrow{\delta}_t'' y_s''\end{aligned}\quad (4.17)$$

ve S'' katman girişindeki hata değeri de aşağıda olduğu gibi hesaplanır,

$$\overleftarrow{\delta}_s'' = -\frac{\partial E}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial \hat{\psi}_j} \frac{\partial \hat{\psi}_j}{\partial y_t''} \frac{\partial y_t''}{\partial x_t''} \frac{\partial x_t''}{\partial y_s''} \frac{\partial y_s''}{\partial x_s''} = \delta_t'' w_s'' y'(x_s'') \quad (4.18)$$

R'' **katmanı:** Bu katmandaki ağırlık değişimleri $\Delta w_{rs}''$ aşağıda olduğu gibi hesaplanır,

$$\begin{aligned}\Delta w_{rs}'' &= \eta_{rs}'' \left(-\frac{\partial E}{\partial w_{rs}''} \right) = \eta_{rs}'' \left(-\frac{\partial E}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial \hat{\psi}_j} \frac{\partial \hat{\psi}_j}{\partial y_t''} \frac{\partial y_t''}{\partial x_t''} \frac{\partial x_t''}{\partial y_s''} \frac{\partial y_s''}{\partial x_s''} \frac{\partial x_s''}{\partial w_{rs}''} \right) \\ \Delta w_{rs}'' &= \eta_{rs}'' \left(-\frac{\partial E}{\partial w_{rs}''} \right) = \eta_{rs}'' \overleftarrow{\delta}_s'' \frac{\partial x_s''}{\partial w_{rs}''} \\ &= \eta_{rs}'' \overleftarrow{\delta}_s'' y_r''\end{aligned}\quad (4.19)$$

ve R'' katman girişindeki hata değeri de aşağıda olduğu gibi hesaplanır,

$$\overleftarrow{\delta}_r'' = -\frac{\partial E}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial \hat{\psi}_j} \frac{\partial \hat{\psi}_j}{\partial y_t''} \frac{\partial y_t''}{\partial x_t''} \frac{\partial x_t''}{\partial y_s''} \frac{\partial y_s''}{\partial x_s''} \frac{\partial x_s''}{\partial y_r''} \frac{\partial y_r''}{\partial x_r''} = y'(x_r'') \sum_{s=0}^{S''} \delta_s'' w_{rs}'' \quad (4.20)$$

P'' **katmanı:** Bu katmandaki ağırlık değişimleri $\Delta w_{pr}''$ aşağıda olduğu gibi hesaplanır,

$$\begin{aligned}\Delta w_{pr}'' &= \eta_{pr}'' \left(-\frac{\partial E}{\partial w_{pr}''} \right) = \eta_{pr}'' \left(-\frac{\partial E}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial \hat{\psi}_j} \frac{\partial \hat{\psi}_j}{\partial y_t''} \frac{\partial y_t''}{\partial x_t''} \frac{\partial x_t''}{\partial y_s''} \frac{\partial y_s''}{\partial x_s''} \frac{\partial x_s''}{\partial y_r''} \frac{\partial y_r''}{\partial x_r''} \frac{\partial x_r''}{\partial w_{pr}''} \right) \\ \Delta w_{pr}'' &= \eta_{pr}'' \left(-\frac{\partial E}{\partial w_{pr}''} \right) = \eta_{pr}'' \overleftarrow{\delta}_r'' \frac{\partial x_r''}{\partial w_{pr}''} \\ &= \eta_{pr}'' \overleftarrow{\delta}_r'' y_p''\end{aligned}\quad (4.21)$$

Denklem (4.17), Denklem (4.19) ve Denklem (4.21)'de sırasıyla η_s'' , η_{rs}'' ve η_{pr}'' ifadeleri öğrenme katsayılarıdır. Bu eşitliklerde elde edilen ağırlık değişimleri $\Delta w_s''$, $\Delta w_{rs}''$ ve $\Delta w_{pr}''$ bir önceki ağırlık değerleri ile toplanarak şu anki ağırlık değerleri aşağıdaki gibi elde edilir,

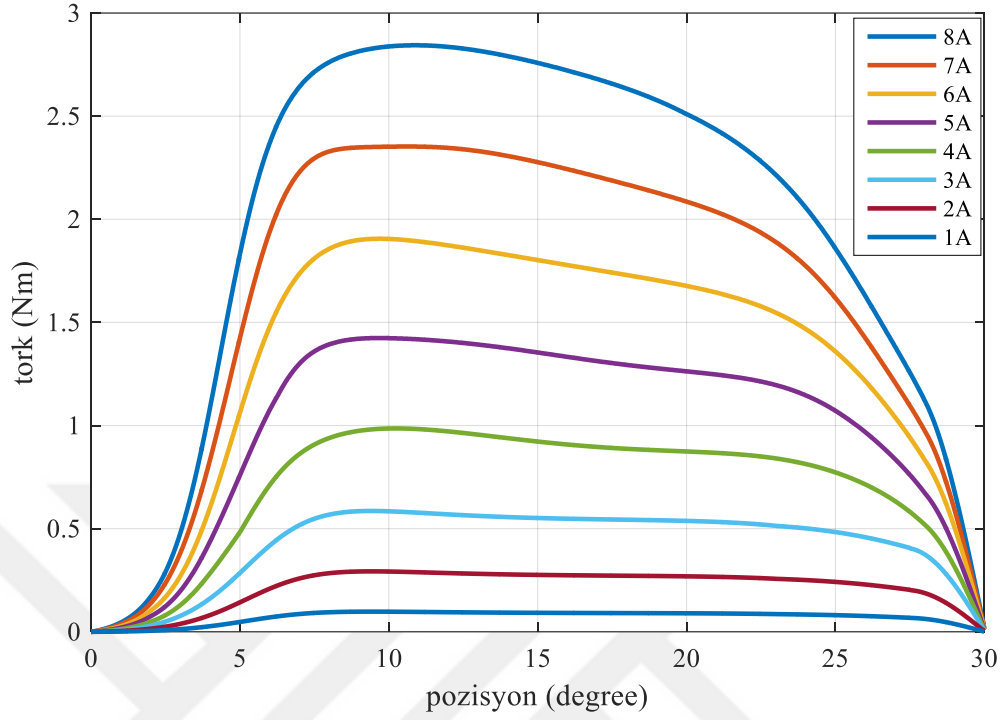
$$w_s''(k+1) = w_s''(k) + \Delta w_s'' \quad (4.22)$$

$$w_{rs}''(k+1) = w_{rs}''(k) + \Delta w_{rs}'' \quad (4.23)$$

$$w_{pr}''(k+1) = w_{pr}''(k) + \Delta w_{pr}'' \quad (4.24)$$

Ağ eğitiminin başlangıcında ağırlık değerleri daha önceki bilgilere bağlı olarak seçilebileceği gibi rasgele olarak da atanabilir. Bu çalışmada ağırlıkların başlangıç değerleri [0,1] aralığında rasgele verilmiştir aynı zamanda bu ağırlık değerleri eğitim sırasında bu sınırlarda tutulmuştur. Öğrenme katsayıları da [0,1] aralığında seçilmiştir.

ARM'nin doğrusal olmayan modelinin çıkartılabilmesi için ilk olarak DC Test deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deney ile akımlar 1A'den 8A'e kadar 1A arttırılarak herbir akım değerinde 0°'den 30°'ye kadar 1° derece aralıklarla herbir akım değeri için 30 değer elde edilmiştir. Yukarıda anlatılan akıya bağlı olan ARM'nin doğrusal olmayan modeli kullanılarak herbir akım değeri için elde edilen 30 değer çoğaltılarak 1200 değer elde edilmiş ve tork profili çıkartılmıştır. Bu modelde akım girişi sabit tutulmuş ve pozisyon değiştirilerek değerler üretilmiştir. Bu değerler gerçek uygulamada kullanılmak üzere look up table haline getirilmiştir. Şekil 4.3'de DC Test deneyinden elde edilen ve YSA kullanılarak oluşturulan ARM modeli ile çoğaltılan değerlerle oluşturulan ARM $T-i-\theta$ karakteristiği görülmektedir. Gerçek uygulamalarda doğrusal interpolasyon yöntemi ile akım ara değerleri ve referans akım üretilmiştir.



Şekil 4.3. 8/6 ARM $T-i-\theta$ karakteristiği

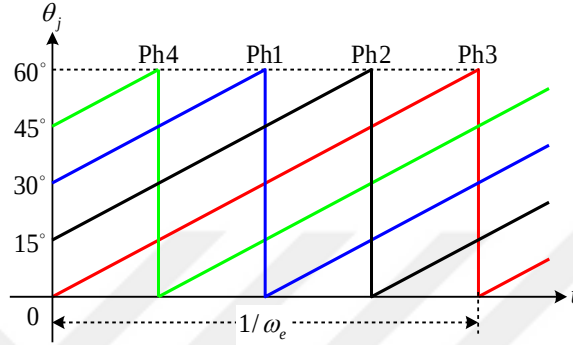
4.2 Faz Pozisyon Üretici ve Sıralayıcı

Pozisyona bağlı çalışan elektrik makinalarında olduğu gibi ARM'ler de uygun faz sırasının belirlenmesi çalışma sisteminin temelidir. Rotor pozisyon değişimine bağlı olarak her bir fazın pozisyon değişimi θ_j kompakt olarak aşağıda olduğu gibi ifade edilir.

$$\theta_j = \text{mod}((\theta + \theta_s + (j-4) \times \theta_{step}), \theta_r) \quad j = 1, \dots, 4 \quad (4.25)$$

Burada $\theta_s = 360^\circ / N_s$, $\theta_r = 360^\circ / N_r$ ve $\theta_{step} = |\theta_r - \theta_s|$ olarak hesaplanır. N_r rotor kutup sayısı ve N_s stator kutup sayısını göstermektedir. Eşitlikten görüldüğü gibi, faz pozisyonları stator kutup sayısı, rotor kutup sayısı ve motor faz sayısına bağlı olarak θ_s , θ_{step} , θ_r ve θ göre belirlenir. Faz sırasının belirlenmesi ARM kontrollerinde oldukça önemli bir ünedir. 8/6 bir ARM'de 360° lik yani bir devrilik

bir mekanik hareket sonucunda oluşan rotor pozisyon değişimi ve üretilen faz pozisyon değişimleri gösterilmiştir. 8/6 motor için her bir 60° de anahtarlamalar tekrarlanır, yani elektriksel olarak bir periyot $1/\omega_e$ tamamlanır. Burada ω_e motorun elektriksel hızını gösterir. Faz pozisyon sıraları ve değişimleri TPF, ve referans akım üreticinde kullanılır. Bir faz için yapılan işlemler diğer fazlara da uygulanır, böylece işlemler daha sade olur (Ustun,2015).



Şekil 4.4.ARM faz pozisyon değişimleri

4.3 Hysteresis Band PWM

Çalışmada $2n$ topolojiye sahip dört-fazlı bir asimetrik klasik konverter kullanılmıştır. Bu tip konverterler hem bipolar hem de unipolar PWM uygulamalarına imkan sağladığı için tercih edilmiştir. Her bir faz için S_j^H üst ve S_j^L alt 2 anahtar kullanılmıştır. Bununla birlikte hysteresis band pwm fonksiyonu ile anahtarların iletim ve kesim durumları belirlenir.

Bipolar durumda,

$$S_j^H, S_j^L = \begin{cases} 1, & i_j^* - i_j \geq h_b \\ 0, & i_j^* - i_j \leq -h_b \end{cases} \quad \theta_{on} < \theta_j < \theta_r / 2 - \theta_{off}, \quad j = 1, \dots, 4 \quad (4.26)$$

Unipolar durumda,

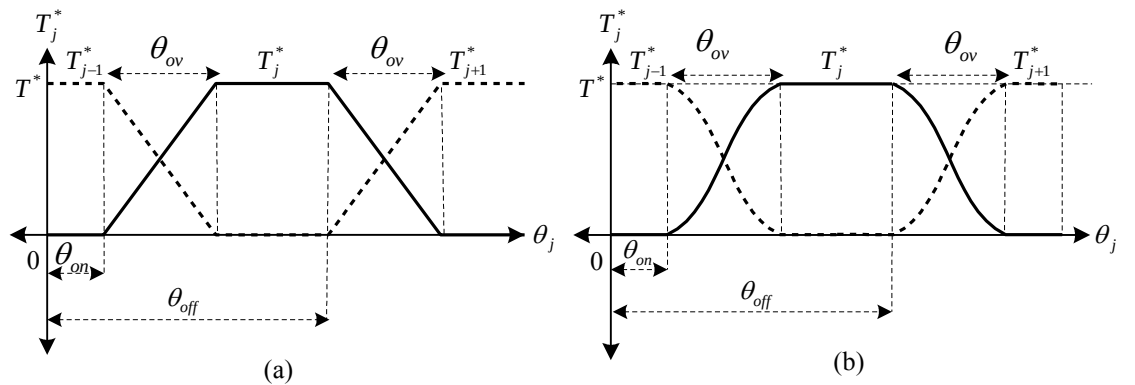
$$S_j^H = \begin{cases} 1, & i_j^* - i_j \geq h_b \\ 0, & i_j^* - i_j \leq -h_b \end{cases} \quad \theta_{on} < \theta_j < \theta_r / 2 - \theta_{off}, \quad j = 1, \dots, 4 \quad (4.27)$$

$$S_j^L = \begin{cases} 1, & \theta_{on} < \theta_j < \theta_r / 2 - \theta_{off} \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad j = 1, \dots, 4 \quad (4.28)$$

Böylece pozisyon ve akım geri beslemesi kullanılarak istenen referans akıma bağlı olarak konverter anahtarları iletime ve kesime götürülür. Bunun sonucu olarak da motor fazlarında istenen akım değerleri elde edilir.

4.4 Tork Paylaşım Fonksiyonu

Tork rıplının azaltılmasına yönelik uygun bir elektronik yaklaşım ayrı ayrı fazlardan üretilen torkların, toplam torkun pozisyon ve hız kontrol döngüsünden elde edilen referans tork değerini izlemesini sağlayacak şekilde koordine etmektir (Husain,2002). Bu amaçla literatürde doğrusal ve doğrusal olmayan TPF'ler önerilmiştir. Geleneksel TPF yapıları iletime geçme, kesişim ve kesim bölümleri olmak üzere üç aralıktan oluşturulmuştur. Geleneksel TPF uygulamalarında yükselme ve düşme zamanları eşit kabul edilerek fonksiyonlar tanımlanmıştır. Bu fonksiyonların tipik görünüşleri Şekil 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.5. Geleneksel TPF profilleri a) Doğrusal b) Doğrusal olmayan

Buna göre bir faz için tork paylaşım fonksiyonları yukarıda sıralanan 3 pozisyon için aşağıda olduğu gibi verilebilir.

$$T_j^* = \begin{cases} T^* \cdot f_{rise}^{TPF} & , (\theta_{on}) \leq \theta_j < (\theta_{on} + \theta_{ov}) \\ T^* & , (\theta_{on} + \theta_{ov}) \leq \theta_j < (\theta_{off}) \\ T^* \cdot f_{fall}^{TPF} & , (\theta_{off}) \leq \theta_j < (\theta_{off} + \theta_{ov}) \\ 0 & , \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (4.29)$$

Burada $TPF = \{\text{doğrusal ve doğrusal olmayan}\}$ olarak temsil etmektedir. Aşağıdaki eşitliklerde tork paylaşım fonksiyonlarının yükselme ve düşme eşitlikleri verilmiştir;

$$f_{rise}^{dogrusal} = \frac{1}{\theta_{ov}} (\theta_j - \theta_{on}) \quad (4.30)$$

$$f_{fall}^{dogrusal} = 1 - \frac{1}{\theta_{ov}} (\theta_j - \theta_{off}) \quad (4.31)$$

$$f_{rise}^{dogrusalolmayan} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\pi}{\theta_{ov}} (\theta_j - \theta_{on})\right) \quad (4.32)$$

$$f_{fall}^{dogrusalolmayan} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\pi}{\theta_{ov}} (\theta_j - \theta_{off})\right) \quad (4.33)$$

Geleneksel yöntemde yükselme açısı ve düşme açısı birbirine eşit olduğundan dolayı ;

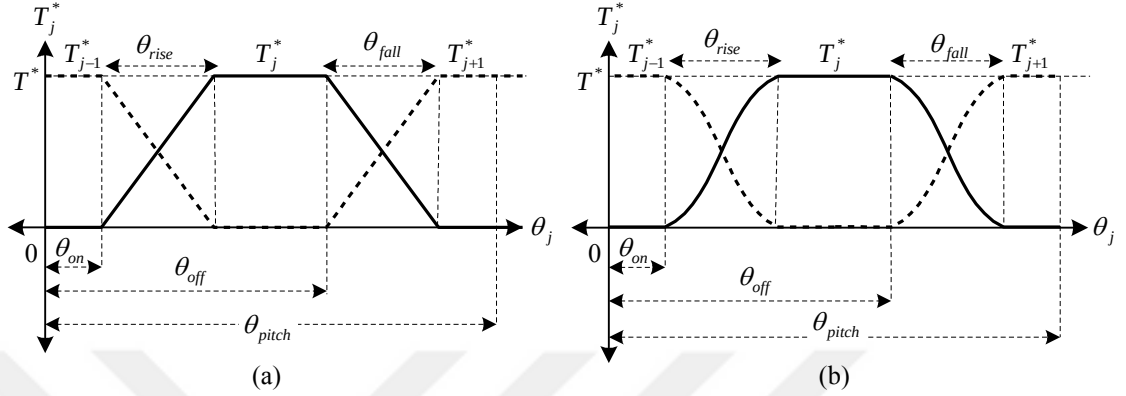
$$f_{rise}^{dogrusal} = f_{fall}^{dogrusal} = f_{ov}^{dogrusal} \quad \text{ve}$$

$$f_{rise}^{dogrusalolmayan} = f_{fall}^{dogrusalolmayan} = f_{ov}^{dogrusalolmayan} \quad (4.34)$$

olmaktadır.

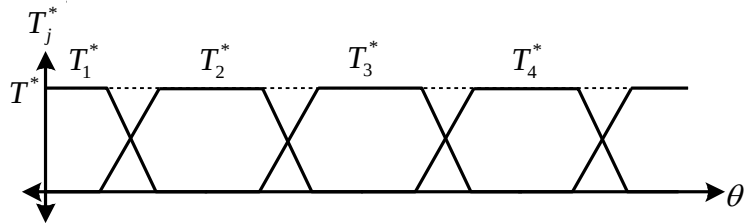
Gerçek sistemlerde faz akımların yükselme ve düşme zamanları eşit olmamaktadır. Bunun sonucu olarak üretilen faz torkunun yükselme düşme zamanları da farklı olmaktadır ve kesişim bölgesinde tork rıplı oluşumuna neden olmaktadır. Bu durum dikkate alınarak bu çalışmada iletme geçme, yükselme, düşme ve kesim açıları olmak üzere olmak 4 açının ayarlanması yapılmaktadır. Bu fonksiyonların tipik görünüşleri Şekil 4.6'de verilmiştir. Doğrusal ve doğrusal

olmayan gösterimler görülmektedir. Doğrusal olmayan fonksiyon olarak literatüre uygun sinüsoidal fonksiyon kullanılmıştır çünkü; yapılan testler sonunda sinüsoidal fonksiyon performans olarak daha verimli olduğu görülmüş ve çalışmada kullanılmıştır.

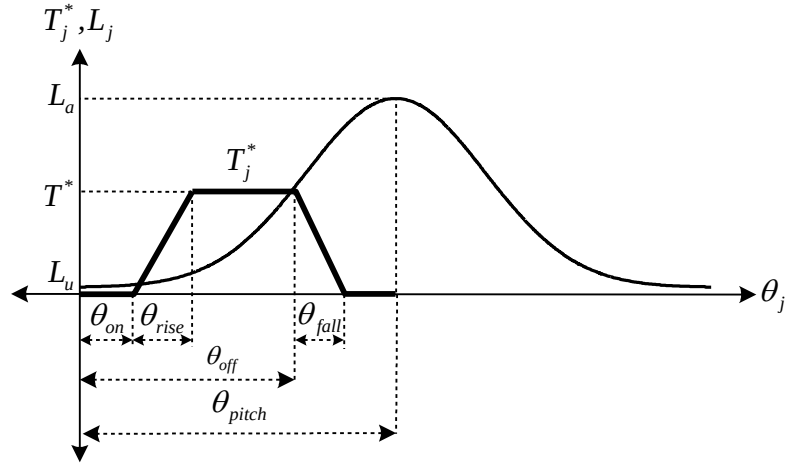


Şekil 4.6. Önerilen TPF Profilleri a) Doğrusal b) Doğrusal olmayan

Genel olarak kullanılan tork paylaşım fonksiyonları Şekil 4.6’da verilmiştir. Burada amaç ardışık iki fazın bağımsız olarak ürettikleri torkların üretilen referans torku takip edebilmesini sağlamaktır. Fakat Şekil 4.7’de gösterilen sabit yapılı tork paylaşım fonksiyonları zaman sabiti etkisiyle akımın ani olarak değiştirilememesi nedeniyle motorun tüm hız ve yük koşullarında etkinlik sağlamasını engellemektedir. Bu şekilde T_1^* , T_2^* , T_3^* ve T_4^* sırasıyla faz torklarını ve T^* toplam torku göstermektedir. Dolayısıyla tork rıplarının oluşması da kaçınılmaz olacaktır. Bu sebepten bu çalışmada tork paylaşım fonksiyonlarının hız ve yük koşullarına uyum sağlayabilecek esneklikte olması düşünülmüştür. Bir faz için uyarlamalı tork paylaşım fonksiyonunu Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Tork paylaşım fonksiyonları



Şekil 4.8. Bir faza ait TPF'nin grafiksel gösterimi

Burada her bir TPF iletme geçme açısı θ_{on} , yükselme açısı θ_{rise} , düşme açısı θ_{fall} ve kesim açısı θ_{off} olmak üzere toplam dört açının ayarlanması gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde L_u minimum endüktansı, L_a maksimum endüktansı ve T^* toplam torku göstermektedir. Burada verilen pozisyon değerleri θ_{on} , θ_{rise} , θ_{fall} ve θ_{off} hız ve referans tork büyüklüğüne göre tasarlanan genetik arama algoritması kullanılarak ayarlanmaktadır.

Bir faz için tork paylaşım fonksiyonları yukarıda sıralanan 4 pozisyon için aşağıda olduğu gibi verilebilir.

$$T_j^* = \begin{cases} T^* \cdot f_{rise}^{TPF} & , \quad (\theta_{on}) \leq \theta_j < (\theta_{on} + \theta_{rise}) \\ T^* & , \quad (\theta_{on} + \theta_{rise}) \leq \theta_j < (\theta_{off}) \\ T^* \cdot f_{fall}^{TPF} & , \quad (\theta_{off}) \leq \theta_j < (\theta_{off} + \theta_{fall}) \\ 0 & , \quad \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (4.35)$$

Burada $TPF = \{\text{doğrusal ve doğrusal olmayan}\}$ olarak temsil etmektedir. Aşağıdaki eşitliklerde tork paylaşım fonksiyonlarının yükselme ve düşme eşitlikleri verilmiştir;

$$f_{rise}^{doğrusal} = \frac{1}{\theta_{rise}} (\theta_j - \theta_{on}) \quad (4.36)$$

$$f_{\text{fall}}^{\text{dogrusal}} = 1 - \frac{1}{\theta_{\text{fall}}} (\theta_j - \theta_{\text{off}}) \quad (4.37)$$

$$f_{\text{rise}}^{\text{dogrusalolmayan}} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \left(\frac{\pi}{\theta_{\text{rise}}} (\theta_j - \theta_{\text{on}}) \right) \quad (4.38)$$

$$f_{\text{fall}}^{\text{dogrusalolmayan}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left(\frac{\pi}{\theta_{\text{fall}}} (\theta_j - \theta_{\text{off}}) \right) \quad (4.39)$$



5. ARM'DE GENERATÖR BÖLGESİ ÇALIŞMA DURUMUNUN İNCELENMESİ VE TORK RİPİLA ETKİSİ

Tork rıplı minimizeasyonunda performansı belirleyen bir diğerk etken ARM' nin geniş hız aralıklı çalışmada motorun generatör bölgesi çalışmasını engellemek yada başka bir ifadeyle motor bölgesi çalışmasını sağlamaktır. Elektrik makinalarının pozisyon kontrollerinde 4 bölgeli çalışmanın üzerinde ayrıntılı olarak durmak gerekir. Bunun sebebi 4 bölgeli çalışmada makinanın motor generatör bölgelerinin bulunmasıdır. Anahtarlamaalı relüktans makinalarda Denklem 5.1 motorun bir faz eşdeğerini ifade eder (Ustun,2014);

$$v_j = R_j i_j + \frac{d\lambda_j(\theta, i)}{dt} \quad (5.1)$$

Burada $R_j i_j$ bileşeni tüm çalışma bölgelerinde benzer davranış gösterir. İki bölge ayrımı (motor bölgesi, generatör bölgesi) akı bileşeninden ortaya çıkar. Akı bileşenini Denklem 5.2' deki gibi ifade edilir.

$$\frac{d\lambda_j(\theta, i)}{dt} = \frac{d\lambda_j(\theta, i)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (5.2)$$

Denklem düzenlenirse

$$\frac{d\lambda_j(\theta, i)}{dt} = \frac{d\lambda_j(\theta, i)}{d\theta} \omega \quad (5.3)$$

olduğı görülür. Buradan 4 bölge karşımıza çıkar. Motor bölgesi,

$$\frac{d\lambda_j(\theta, i)}{d\theta} \omega > 0 \quad (5.4).$$

generatör bölgesi,

$$\frac{d\lambda_j(\theta, i)}{d\theta} \omega < 0 \quad (5.5)$$

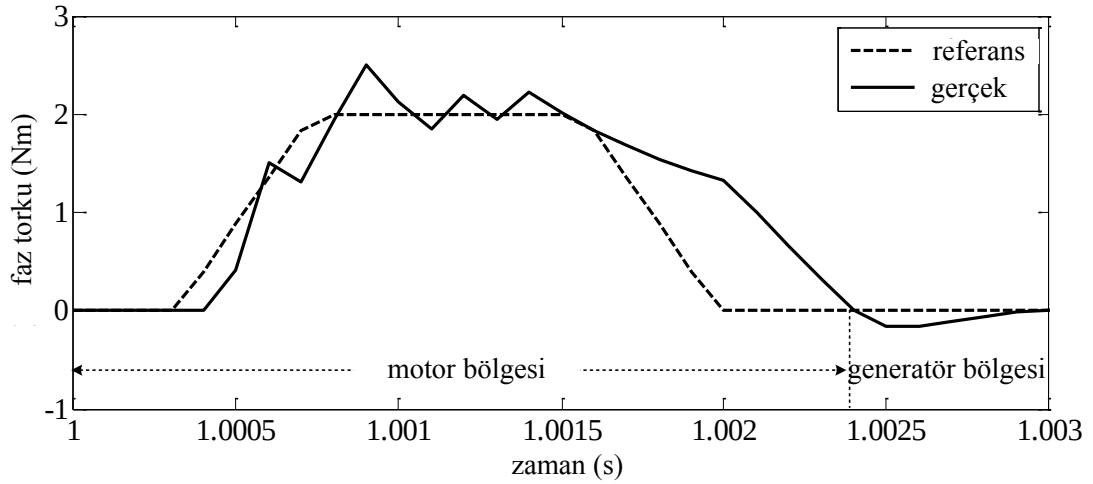
çalışma durumlarını gösterir.

Şekilde gösterilen motor bölgesi ve generatör bölgesi çalışma bölgelerindeki ani faz torkları aşağıda olduğu gibi ifade edilebilir. Dolayısıyla bir faz torku motor bölgesi ve generatör bölgesi tork bileşeninden oluşur.

$$T_j = T_j^M + T_j^G \quad (5.6)$$

Burada T_j^M motor bölgesi faz torkunu ve T_j^G generatör bölgesi faz torkunu göstermektedir. Generatör bölgesi torkun ortalama torka göre oranı (GTP) aşağıda verilen denklem kullanılarak ifade edilmiştir.

$$GTP = \left| \frac{\int_{\theta_p}^{\theta_R} T_j^G d\theta}{\int_0^{\theta_R} T_j d\theta} \right| \times 100\% \quad (5.7)$$



Şekil 5.1. Bir faza ait gerçek tork ve referans tork

Şekil 5.1'de motorun generatör bölgesi ve motor bölgesi çalışma bölgeleri gösterilmiştir. Çalışma 2Nm yük altında 2000 d/d ve komutasyon açıları sabit

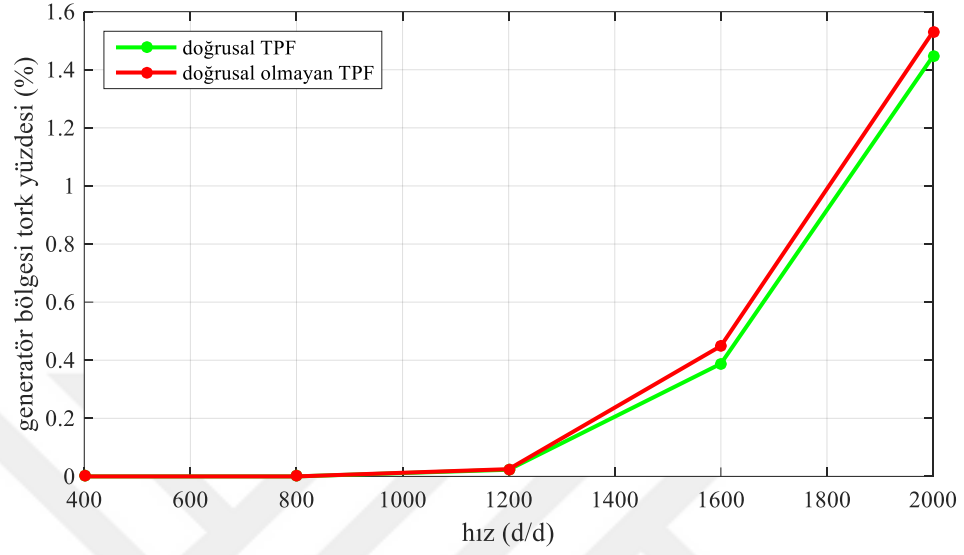
durumda iken elde edilmiştir. Motorun faz akımının θ_{pitch} açısı içerisinde sıfırlanması generatör bölgesi etkinin sıfır olmasını sağlar. Özellikle yüksek hızlarda ve yüksek tork çalışmalarda bu durumun oluşumu artar. Bunun nedeni motor faz akımının anahtarlamalar sıfır olmasına rağmen sıfıra inmesindeki gecikmeden kaynaklanır. Generatör bölgesi etkisinin oluşması frenleme etkisinden dolayı aynı kaynak gücünde motordan daha az ortalama tork elde edilmesine neden olur ki bu verim açısından istenmeyen bir durumdur. Bunun yanında generatör bölgesi etkisinin sınırlandırılması tork rıplarının artmasına neden olur.

Literatürde bazı çalışmalarda bu kısıtlama yapılırken bazı çalışmalarda ya kısmen yada tamamen dikkate alınmıştır. Berker ve arkadaşları bu sınır hiç kullanmamışlar, Husain ve arkadaşları küçük bir generatör bölgesi çalışmasını önemsiz görmüşler ve Xue ve arkadaşları tamamen bu etkiye göre sınırlama yaparak çalışmaları gerçekleştirmişlerdir.

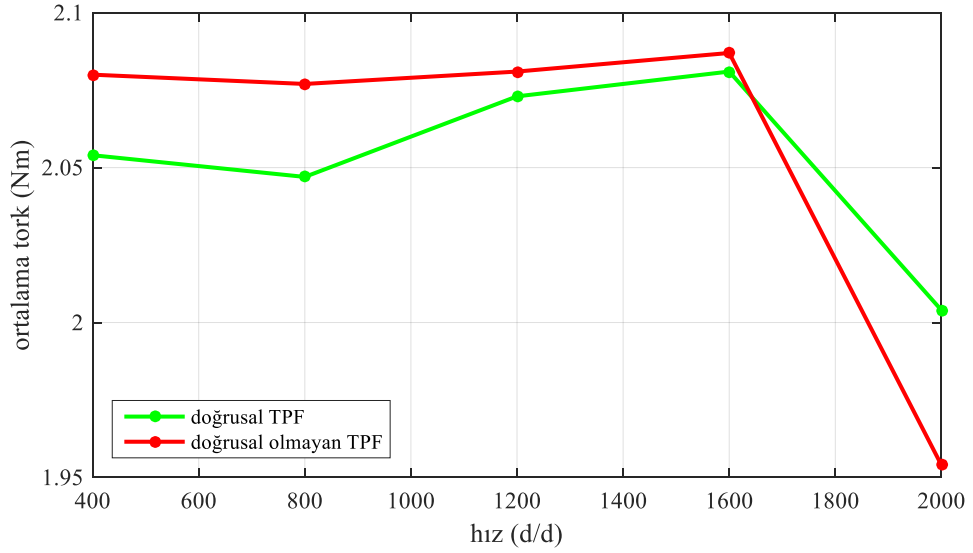
5.1 ARM'de Generatör Bölgesi Çalışma Durumunun ve Tork Rıplı Etkisinin Benzetim Sonuçları

Bu çalışmada görüldüğü gibi generatör bölgesi çalışması etkisi dikkate alınmadığında yada kısmen alındığında tork rıplı oranı düşmektedir. Aşağıdaki şekilde geniş hız aralıklarında komutasyon açıları sabit durumda iken elde edilen değişim sonuçları verilmiştir. Farklı TPF'ler için 400-2000 rpm aralığında hız değişimleri ve 2 Nm tork büyüklüğünde farklı tipteki TPF'ler kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir. Generatör bölgesi tork oranı, tork rıplı değişimi, ortalama tork değişimi ve bakır kayıplarının gösterilmesi amacıyla RMS akım/ortalama tork oranı grafiklerde verilmiştir. Düşük hızlarda generatör bölgesi tork oranı sıfır iken hız arttıkça bu oran 10% seviyelerine kadar çıkmaktadır. Hemen hemen tüm TPF'lerde durum yakındır. Hız arttıkça üstel TPF daha iyi performans vermiştir. Ortalama tork grafiği incelendiğinde tüm TPF'ler için generatör bölgesinde tork artarken ortalama torkun düştüğü görülmektedir. Aynı durum RMS/ortalama tork grafiklerinde de görülmektedir. Generatör bölgesinde tork arttıkça bu oranda artmaktadır. Bu sonuçlardan da görüldüğü gibi generatör bölgesi tork oranının tork rıplı minimizasyonun da mutlaka dikkate alınması gerekir. Özellikle yüksek hız

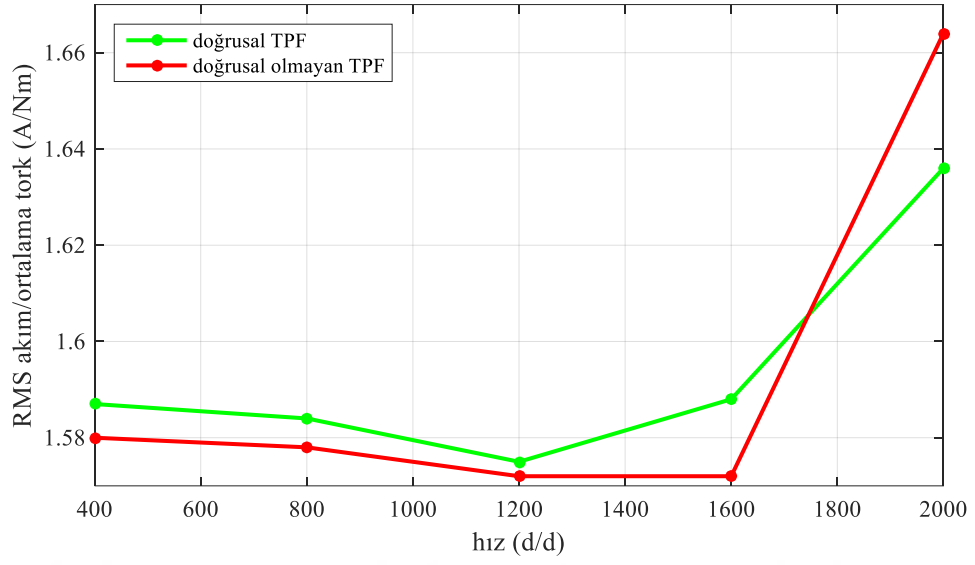
uygulamalarında hem verim hem de ortalama torkun seviyesini etkileyen önemli bir faktördür.



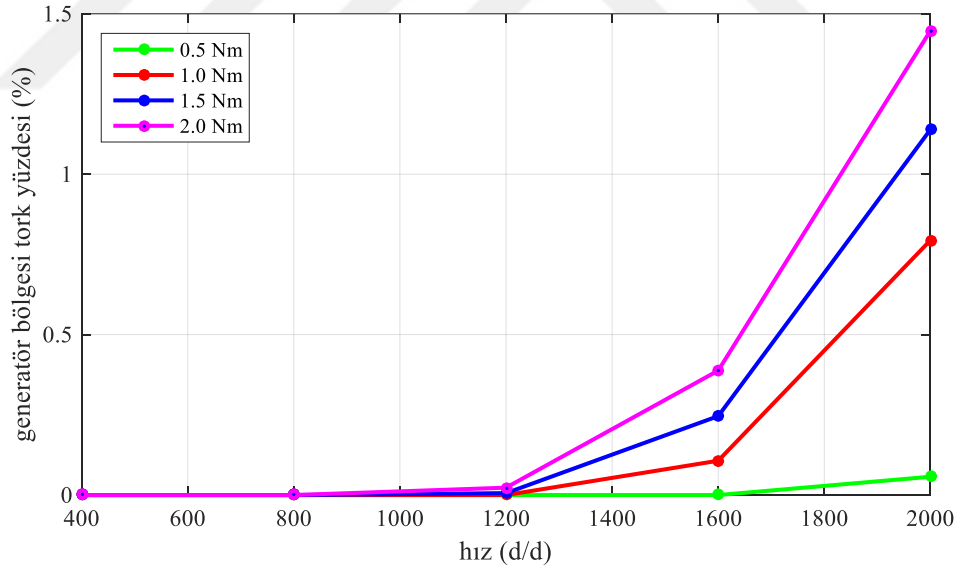
Şekil 5.2. Doğrusal TPF ve doğrusal olmayan TPF'ler için hız değişiminin generatör bölgesi tork yüzdesine etkisi (2Nm, açılar sabit)



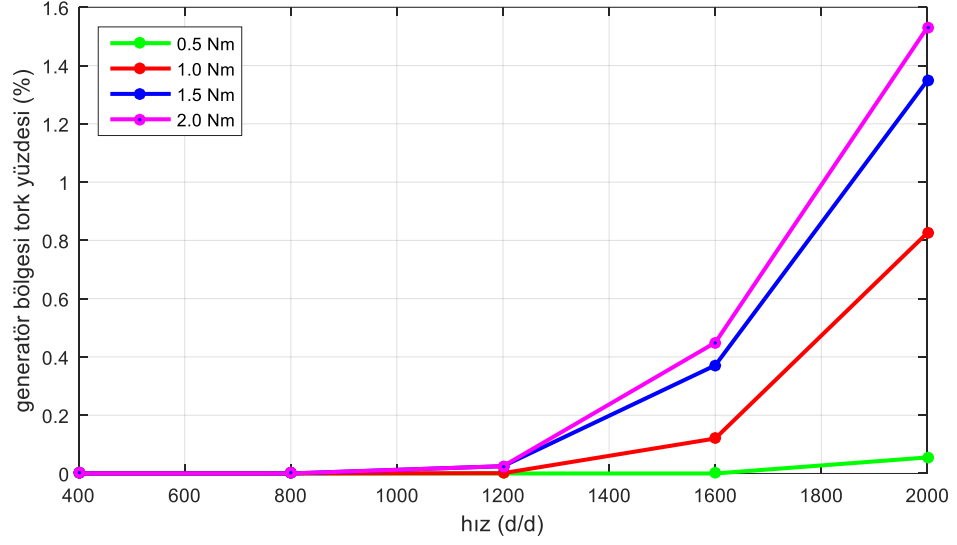
Şekil 5.3. Doğrusal TPF ve doğrusal olmayan TPF'ler için hız değişiminin ortalama torka etkisi (2Nm, açılar sabit)



Şekil 5.4. Doğrusal TPF ve doğrusal olmayan TPF'ler için hız değişiminin RMS akım/ ortalama torka etkisi (2Nm, açılar sabit)



Şekil 5.5. Farklı yükler için hız değişiminin generatör bölgesi tork yüzdesine etkisi (2Nm, açılar sabit,doğrusal TPF)



Şekil 5.6. Farklı yükler için hız değişiminin generatör bölgesi tork yüzdesine etkisi (2Nm, açılar sabit,doğrusal olmayan TPF)

Şekilde görüldüğü gibi düşük hızlarda ve düşük yüklerde çok fazla generatör bölgesi etkisi görülmemektedir. Dolayısıyla bu aşamadan sonra yapılan bütün çalışmalar 2 Nm ve 2000 d/d 'da yapılmıştır.

6. OPTİMİZASYON YAPISI

6.1 Optimizasyon Tipleri

Bu çalışmada klasik TPF lerin yerine 4 farklı komutasyon açısının uyarlanması sonucu tork rıpıl minimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Klasik TPF optimizasyonunda genel olarak iki tip iletme geçme ve kesim açıları uyarlanarak (Husain,2002) veya iletme geçme ve kesişim açıları uyarlanarak optimizasyon gerçekleştirilmektedir. İletme geçme ve kesim açılarına göre yapılan uyarlamada yükselme ve düşme açıları birbirine eşit ve sabit kabul edilerek gerçekleştirilir. Yükselme ve düşme açılarının eşit olan bu durumu klasik TPF'de kesişim açısı olarak isimlendirilmektedir. Akımın yükselme ve düşme tepkilerinde $di/d\theta$ değişimi farklılık göstermektedir. Bunun sonucu olarak yükselme sırasında tork takip edilebilirken düşme sırasında takip edilememektedir. Bu durumda yükselme ve düşme fonksiyonlarının eşit kabul edilmesi uygun kritik noktanın yakalanmasına engel olmaktadır. İletme geçme ve kesişim açılarının ayarlandığı yapıda da kesim açısının sabit bırakılması söz konusudur. Bu durumda da bir önceki bölümde anlatılan generatör bölgesi etkisi karşımıza çıkar. Sebebi ise akımın tepkisinin sıfıra düşmesi için yeterli pozisyon aralığının kalmamasıdır. Kesim açısının sabit bırakılması özellikle yüksek hızlarda generatör bölgesi etkisinin çok büyük değerlere çıkmasına neden olur. Bu nedenle bu çalışmada doğrusal ve doğrusal olmayan TPF modellerinde gösterilen iletme geçme, yükselme, düşme ve kesim açılarıdır. Böylece klasik optimizasyon yaklaşımında karşılaşılan sorunlar ortadan kaldırılması hedeflenmektedir. Optimizasyon tipleri çizelgesi aşağıda verilmiştir. Bu çizelgede geleneksel ve önerilen optimizasyon tipleri ve hangi açıların uyarlandığı verilmiştir.

OPTİMİZASYON TİPLERİ	θ_{rise}	θ_{fall}	θ_{off}	θ_{on}
TİP I	Uyarlanmaktadır ve $\theta_{rise} = \theta_{fall}$		Sabit	Uyarlanmaktadır
TİP II	Sabit ve $\theta_{rise} = \theta_{fall}$		Uyarlanmaktadır	Uyarlanmaktadır
TİP III	Uyarlanmaktadır ve $\theta_{rise} = \theta_{fall}$		Uyarlanmaktadır	Uyarlanmaktadır
TİP IV	Uyarlanmaktadır	Uyarlanmaktadır	Uyarlanmaktadır	Uyarlanmaktadır

Çizelge 6.1 Optimizasyon Tipleri

6.2 Optimizasyon Algoritması

Uyarlama işlemi genetik arama algoritmaları ile online olarak gerçekleştirilmiştir. GA'lar diğer arama tekniklerine göre lokal minimuma takılmamaları ve sezgisel arama özelliklerinden dolayı tercih edilmiştir. Klasik genetik yapıda mevcut olan başlangıç popülasyonunun belirlenmesi, değerlendirme, aile seçimi, çaprazlama mutasyon ve yeni popülasyonun üretilmesi kullanılmıştır. Başlangıç popülasyonu rastgele olarak belirlenmiştir. Kromozom gen sayısı optimizasyon tiplerine göre belirlenmiştir. Popülasyon sayısı 10 olarak deneme yanılma ile bulunmuştur. Geleneksel optimizasyon tipleri için her bir kromozom iki genden oluşturulmuştur. Çözünürlük oranı 0.01 dir. 0 ile 20 arasında değer alacak biçimde kromozom yapısı belirlenmiştir. Önerilen optimizasyon yapısında ise 4 farklı açı olması nedeniyle 4 genden oluşturulmuştur. Yine benzer biçimde çözünürlük 0.01 olarak belirlenmiştir. Gen değerleri 0 ile 20 arasında değer alabilirler. Aile seçimi popülasyondaki en iyi bireyler en iyiden en kötüye göre sıralanarak belirlenmiştir. Yeni bireylerin üretilmesi en iyi bireyin diğer bireylerle çaprazlanması sonucu elde edilmiş ve mutasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemin avantajı en iyi bireyin her zaman popülasyon içerisinde tutulmasıdır. Böylece sürekli olarak uygunluk değeri artış yönünde olacaktır ve genetik arama algoritmasındaki sezgisel yapı kararlı hale getirilmiş ve anlamlı sonuçlar elde edilmiştir. Değerlendirme kısmında ise sistem her bir kromozom için çalıştırılır ve her bir kromozoma ait uygunluk değeri belirlenir. Genetik arama algoritmasının performansını ve bizim istediğimiz sonucu tayin ettiğimiz kısım burasıdır. Bu

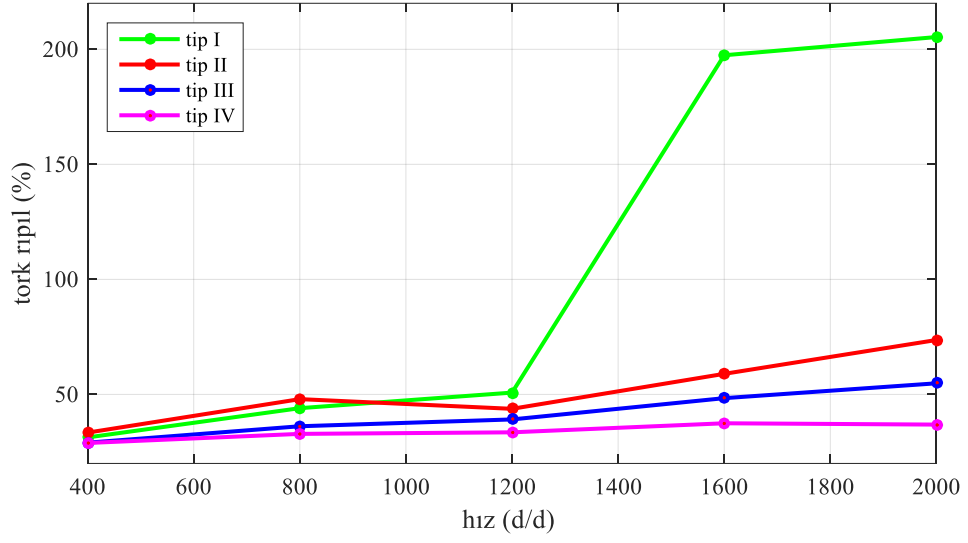
çalışmada uygunluk fonksiyonu için üç kriter ele alınmış ve buna göre oluşturulmuştur. Uygunluk fonksiyon yapısı aşağıda verilmiştir.

$$Uygunluk\ Fonksiyonu = \begin{cases} 0, & (\theta_{on} + \theta_{rise}) > \theta_{off} \\ 0, & (\theta_{off} + \theta_{fall}) > \theta_p \\ 0, & GTP > m \\ \frac{1}{1 + T_{ripil}}, & \text{diger durumlar} \end{cases} \quad (6.1)$$

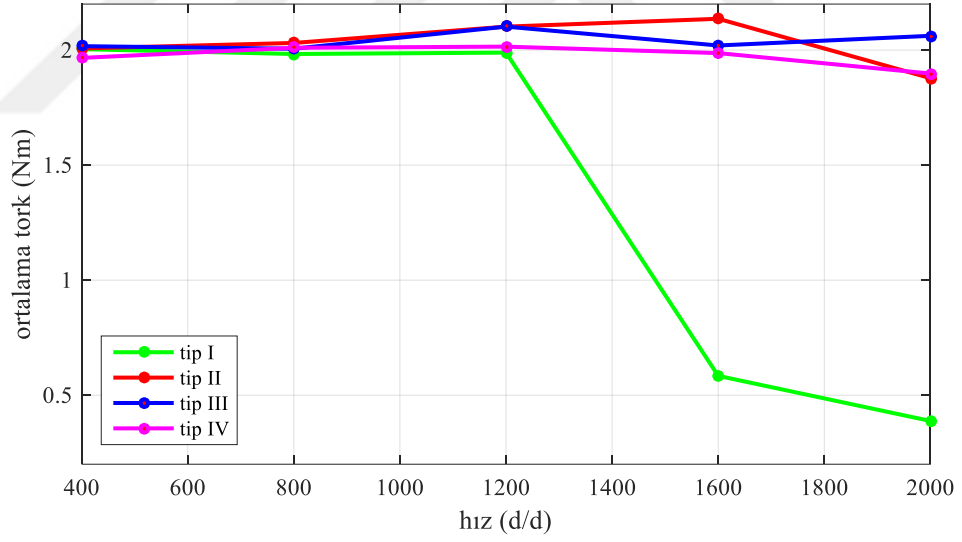
Uygunluk fonksiyonu istenen büyüklükler için üç kısıt kullanılmıştır. $(\theta_{on} + \theta_{rise}) \geq \theta_{off}$ şartını sağlamak zorundadır. Aksi taktirde referans torkun $\theta_{off} - (\theta_{on} + \theta_{rise})$ açısı bölgesi değeri oluşmaz ve referans tork değerine ulaşamaz. $(\theta_{off} + \theta_{fall}) \geq \theta_p$ kısıtlaması elde edilen komutasyon açılarının toplamının θ_p değerini aşmamasıdır. Aşılması durumunda motor doğrudan generatör bölgesi çalıştırılmış olacaktır. Generatör bölgesi çalışma özellikle unipolar PWM yapısında aşırı faz akımlarının geçmesine neden olup konverter devresinde hasarlar oluşturabilir. Bu durumu engellemek için bu kısıtlama yapılmıştır. $GTR < m$ tork rıplı minimizasyonun da generatör bölgesi tork etkisini göstermek için kullanılmıştır. $m = 0$ ve $m = 10$ değerleri verilerek testler gerçekleştirilmiştir.

6.3 Optimizasyon Tipleri İçin Benzetim Sonuçları

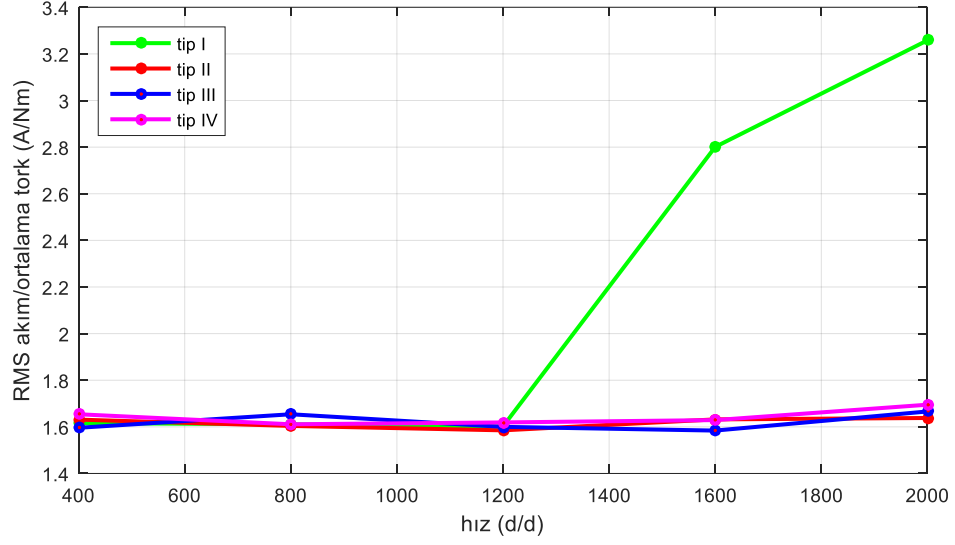
Doğrusal TPF için 400-2000 rpm aralığında hız değişimleri ve 2 Nm tork büyüklüğünde farklı tipteki TPF'ler kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir. Generatör bölgesi çalışması dikkate alınmamıştır ($m=0$). Tip I' in çok kötü sonuç verildiği tespit edilmiş ve önerilen tip IV değerleri ideal çıkmıştır.



Şekil 6.1. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin tork rıplı etkisi (2Nm, $m=0$, doğrusal TPF)

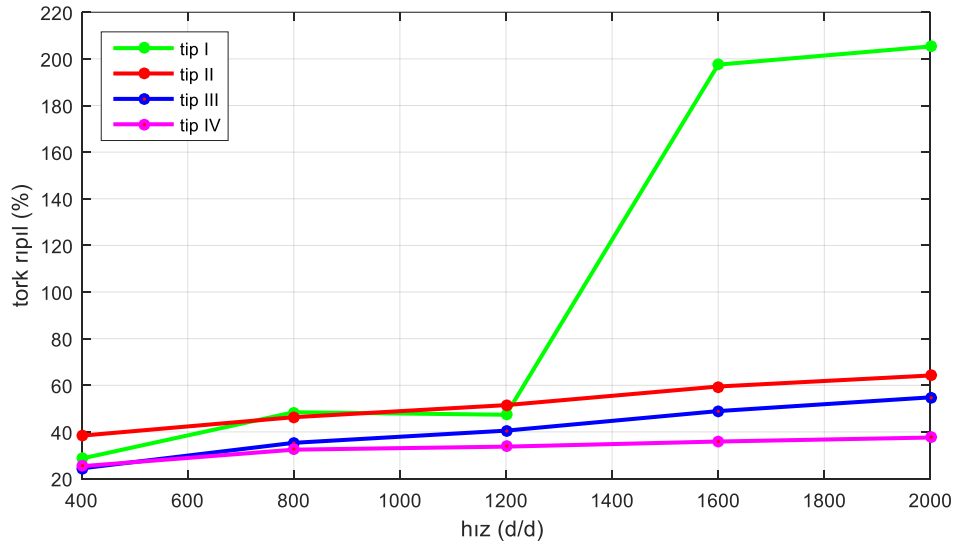


Şekil 6.2. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin ortalama torka etkisi (2Nm, $m=0$, doğrusal TPF)

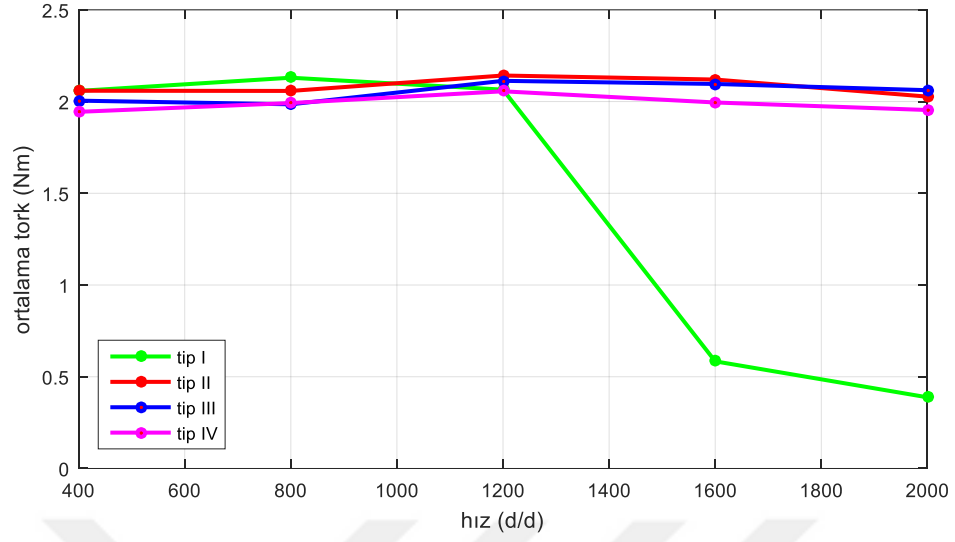


Şekil 6.3. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin RMS akım/ortalama torka etkisi (2Nm, $m=0$, doğrusal TPF)

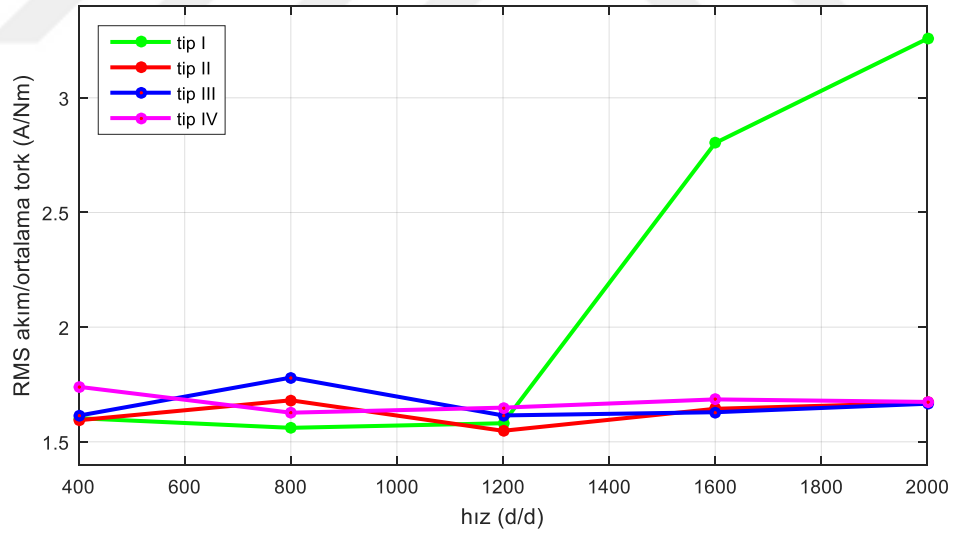
Doğrusal olmayan TPF için 400-2000 rpm aralığında hız değişimleri ve 2 Nm tork büyüklüğünde farklı tipteki TPF'ler kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir. Generatör bölgesi çalışması dikkate alınmamıştır ($m=0$). Tip I' in çok kötü sonuç verildiği tespit edilmiş ve önerilen tip IV değerleri ideal çıkmıştır.



Şekil 6.4. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin tork rıplı etkisi (2Nm, $m=0$, doğrusal olmayan TPF)



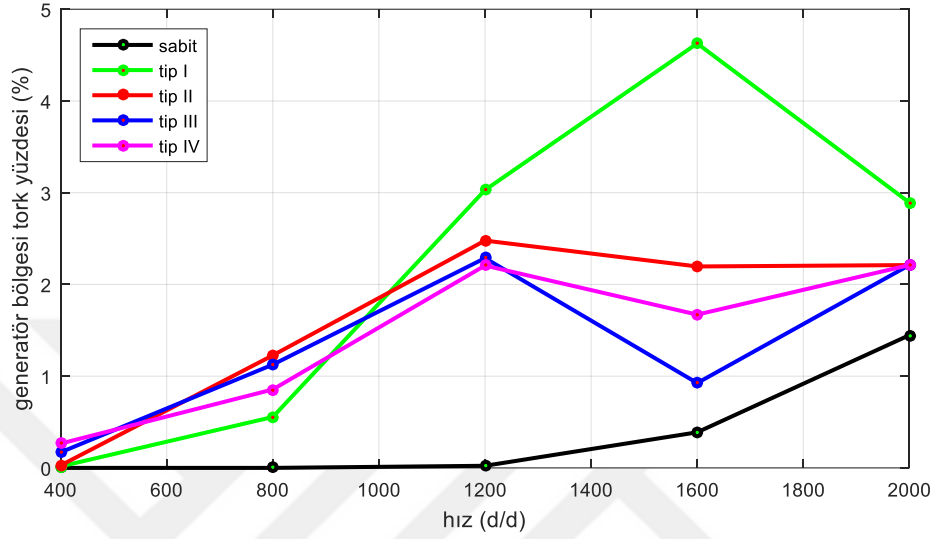
Şekil 6.5. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin ortalama torka etkisi (2Nm, $m=0$, doğrusal olmayan TPF)



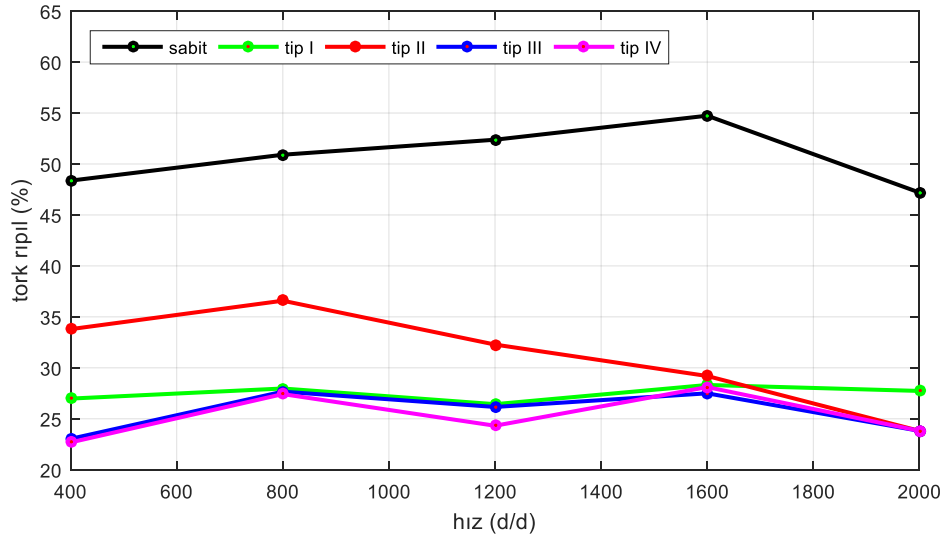
Şekil 6.6. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin RMS akım/ortalama torka etkisi (2Nm, $m=0$, doğrusal olmayan TPF)

Doğrusal TPF için 400-2000 rpm aralığında hız değişimleri ve 2 Nm tork büyüklüğünde farklı tipteki TPF'ler ve sabit açılı TPF kullanılarak testler

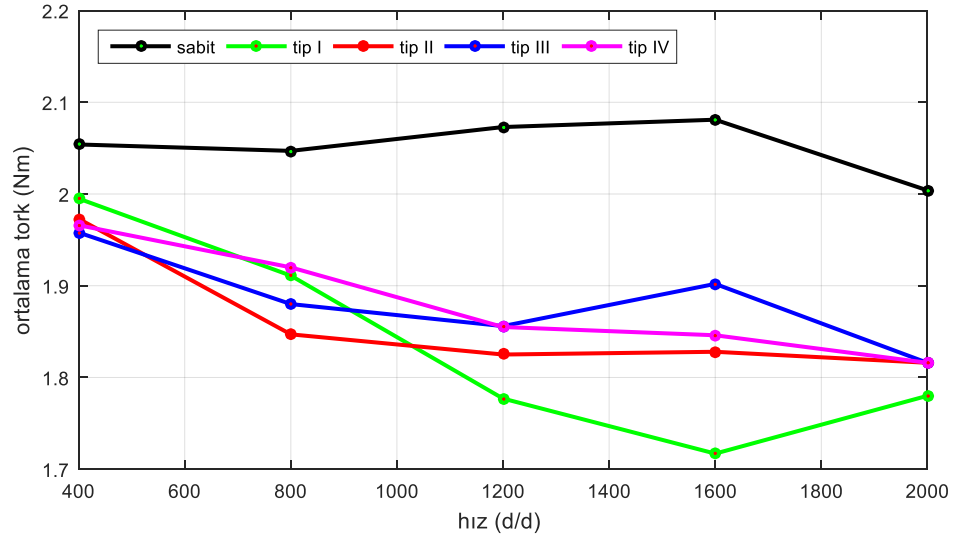
gerçekleştirilmiştir. Sabit açılı TPF'de iletme geçme açısı 5° , yükselme açısı 5° , kesim açısı 20° ve düşme açısı 5° alınmaktadır. Generatör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır ($m=10$). Sabit açılı TPF en kötü sonucu vermiştir ve önerilen tip IV değerleri ideal çıkmıştır.



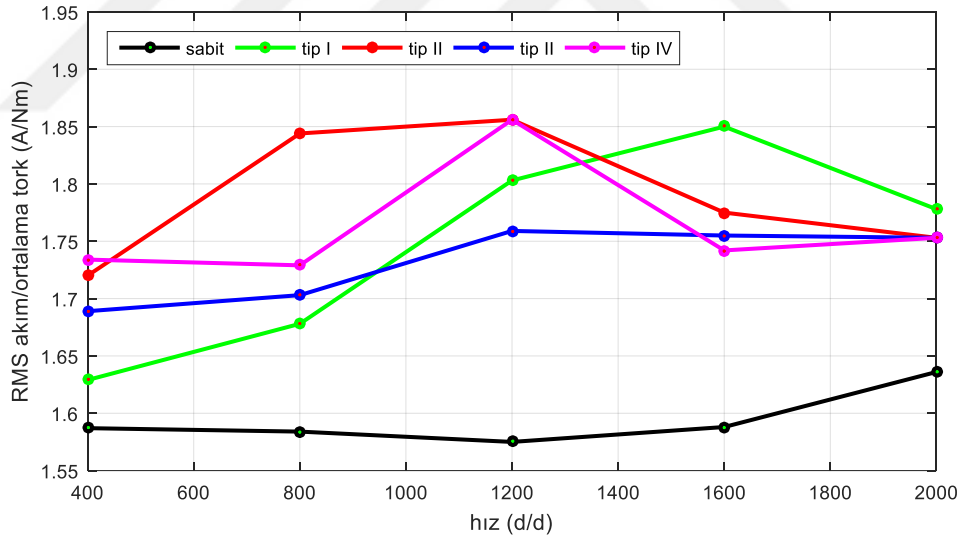
Şekil 6.7. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin generatör bölgesi tork yüzdesine etkisi (2Nm, $m=10$, doğrusal TPF)



Şekil 6.8. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin tork rıplına etkisi (2Nm, $m=10$, doğrusal TPF)



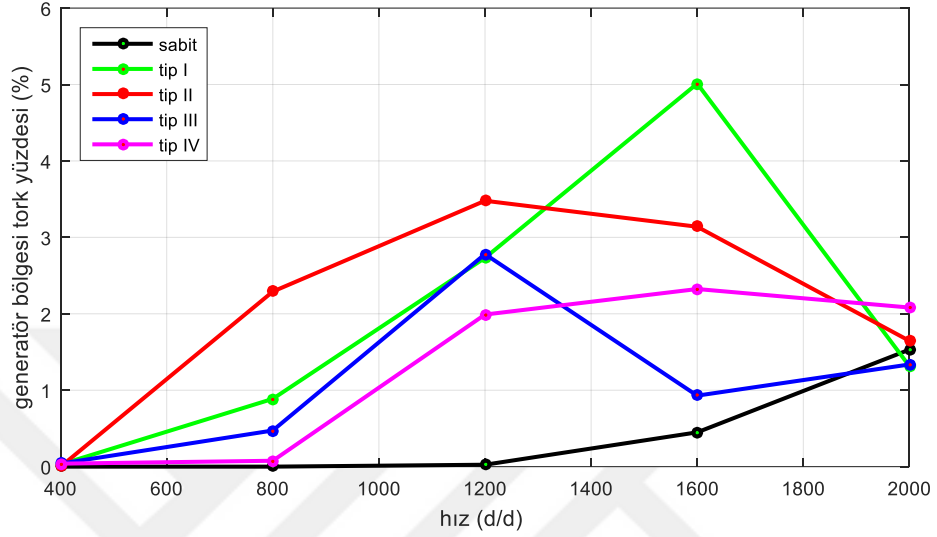
Şekil 6.9. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin ortalama torka etkisi (2Nm, m=10, doğrusal TPF)



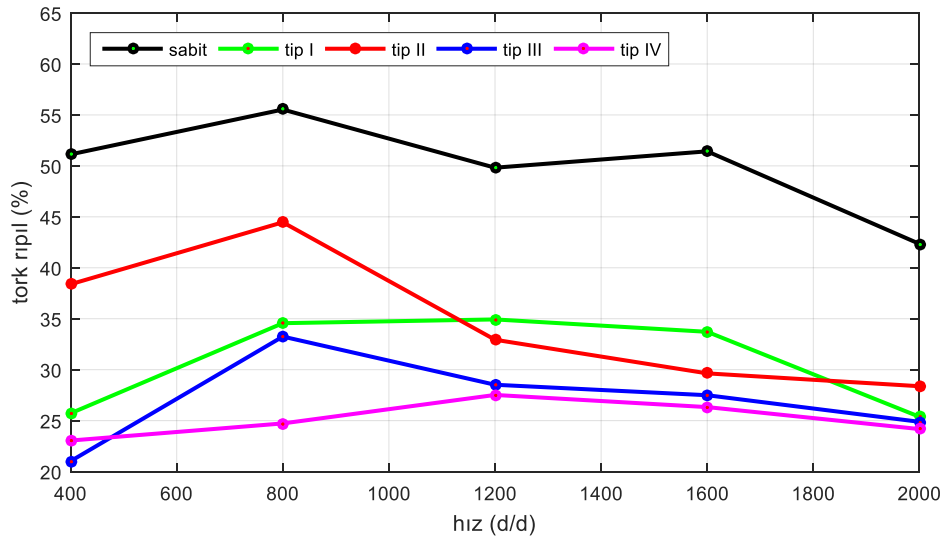
Şekil 6.10. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin RMS akım/ortalama torka etkisi (2Nm, m=10, doğrusal TPF)

Doğrusal olmayan TPF için 400-2000 rpm aralığında hız değişimleri ve 2 Nm tork büyüklüğünde farklı tipteki TPF'ler ve sabit açılı TPF kullanılarak testler

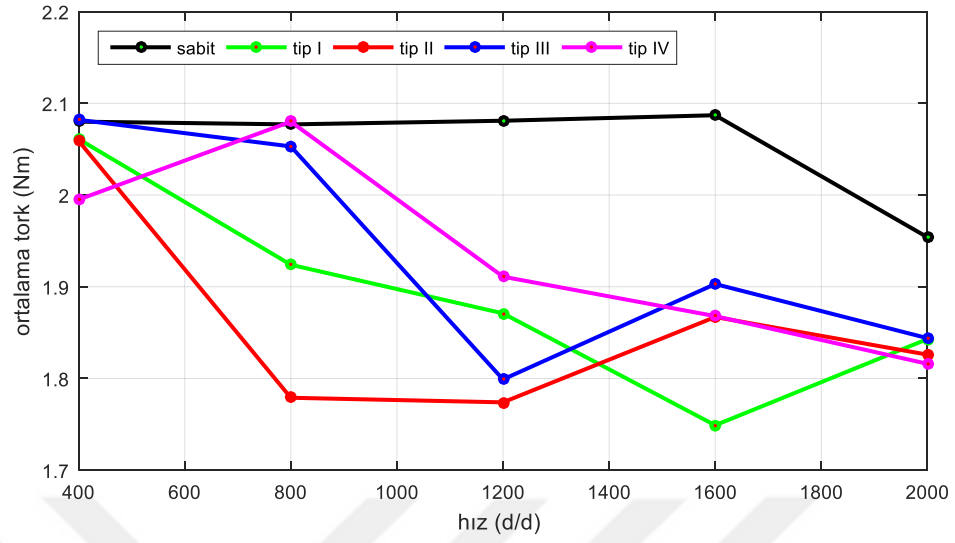
gerçekleştirilmiştir. Sabit açılı TPF'de iletme geçme açısı 5° , yükselme açısı 5° , kesim açısı 20° ve düşme açısı 5° alınmaktadır. Generatör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır ($m=10$). Sabit açılı TPF en kötü sonucu vermiştir ve önerilen tip IV değerleri ideal çıkmıştır.



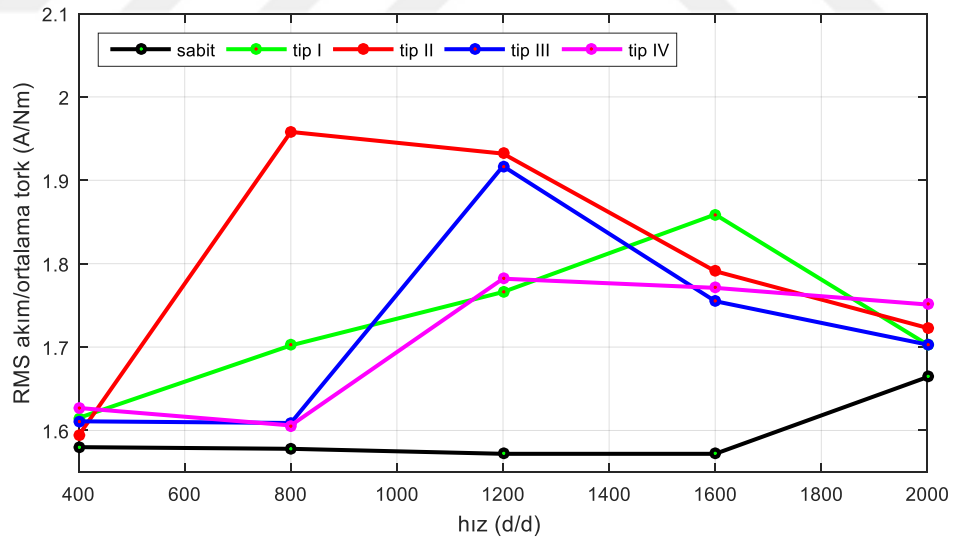
Şekil 6.11. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin generatör bölgesi tork yüzdesine etkisi (2Nm, $m=10$, doğrusal olmayan TPF)



Şekil 6.12. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin tork rıplına etkisi (2Nm, $m=10$, doğrusal olmayan TPF)



Şekil 6.13. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin ortalama torka etkisi (2Nm, m=10, doğrusal olmayan TPF)



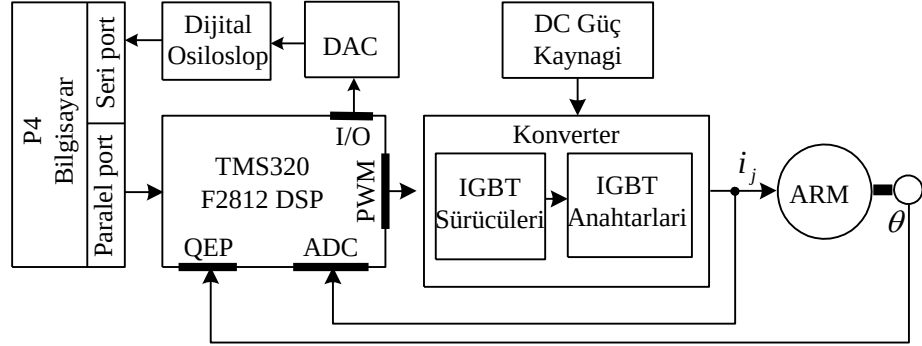
Şekil 6.14. Farklı TPF Tipleri için hız değişiminin RMS akım/ortalama torka etkisi (2Nm, m=10, doğrusal olmayan TPF)

7. BENZETİM VE DENEYSEL SONUÇLAR

Ortaya konulan denetleyicinin ve önerilen TPF'nin performanslarının test edilmesi için hem benzetim hem de uygulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Hem benzetim hem de uygulama yazılımları C/C++ kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunun nedeni işlemcilerde bu programlama dilinin rahatlıkla kullanılabilmesidir. Benzetim çalışması generatör bölgesi çalışma durumunu açık şekilde gösterilebilmeyi amaçlar. Bu doğrultuda referans faz torkları, referans faz akımları, gerçek faz torkları, gerçek faz akımları ve toplam tork, hız ve pozisyon grafiklerinin görünümüleri verilmiştir.

Tork rıplarının azaltılması için kullanılan deney düzeneği Şekil 7.1'de verilmiştir. P4 işlemcili 2.4GHz bilgisayar, TMS320F2812 Sİİ, konverter, güç kaynağı, ARM, akım gerilim ve pozisyon algılayıcılarından oluşmaktadır. C/C++ program kullanılarak yazılım gerçekleştirilmiş ve derlenerek object kodlar elde edilmiş elde edilen kodlar TMS320F2812 Sİİ'ye paralel porttan aktarılmaktadır. TMS320F2812 Sİİ 150MHz, yüksek hızlı 12 bitlik ADC yapabilen, 15 PWM çıkışı bulunan, quadrature encoder pulse (QEP) bulunan bir işlemcidir ve motor denetimleri için oldukça elverişlidir. Akım ve gerilim dönüştürücülerinden elde edilen faz akımları ve gerilim bilgileri ADC kullanılarak, ve artımlı enkoderden alınan pozisyon bilgisi QEP kullanılarak Sİİ'ye aktarılmaktadır. Dışarıdan alınan bu bilgiler Bölüm 4,5 ve 6'da verilen eşitliklerle kullanılarak Sİİ çıkışı konverter devresindeki IGBT sürücü sinyalleri oluşturulur. Konverter 8 IGBT sürücü ve anahtardan 2n topolojisi kullanılarak oluşturulmuştur. 300V DC güç kaynağı kullanılmıştır. Deney düzeneğinin görünümü Şekil 7.2'de verilmiştir.

Deneysel çalışmalarda generatör bölgesinde verilen durumların açık şekilde gösterilebilmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda referans faz torkları, referans faz akımları, gerçek faz torkları, gerçek faz akımları ve toplam tork, hız ve pozisyon grafiklerinin görünümüleri verilmiştir.



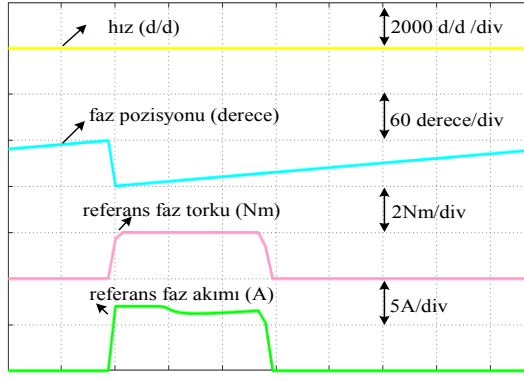
Şekil 7.1. Deney düzeneği



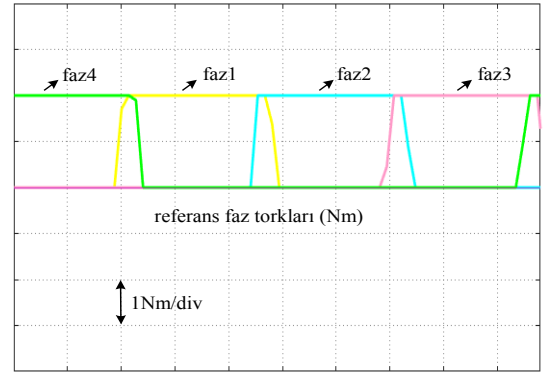
Şekil 7.2. Deney düzeneğinin görünümü

Şekil 7.3'de Tip III' ün performansı test edilmiş ve elde edilen benzetim sonuçları verilmiştir. Şekil 7.3(a)'da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 7.3(b)'de referans faz torkları, Şekil 7.3(c)'de referans faz akımları, Şekil 7.3(d)'de faz akımları, Şekil 7.3(e)'de faz torkları ve Şekil 7.3(f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak doğrusal TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmamıştır. Referans hız 2000 d/d ve referans faz torku 2Nm'dir. Motor 300V sabit faz gerilimi altında çalıştırılmıştır. Genetik arama algoritması tabanlı komütasyon açısı generatörü tarafından iletim açısı 0.12° , yükselme açısı 0.7° , kesim açısı 17.28° ve düşme açısı 0.7° olarak belirlenmiştir. Referans faz akımları maksimum 7A ve minimum ise 6.2A dir. Motor çalışma durumunda faz akımları maksimum 7.5A ve minimum ise 5.3A dir. Generatör bölgesi çalışması dikkate alınmadığından ortalama tork ve tork rıpılları fazladır. Motor çalışma durumunda tork rıpıllarının 1.6Nm ile 2.8Nm arasında salınımlı olduğu görülmektedir.

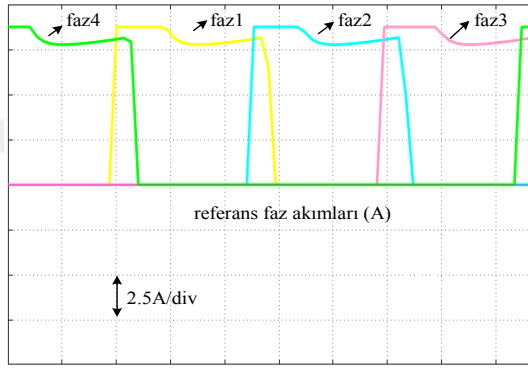
Şekil 7.4'de Tip III' ün performansı test edilmiş ve elde edilen deneysel sonuçları verilmiştir. Şekil 7.4(a)'da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 7.4(b)'de referans faz torkları, Şekil 7.4(c)'de referans faz akımları, Şekil 7.4(d)'de faz akımları, Şekil 7.4(e)'de faz torkları ve Şekil 7.4(f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak doğrusal TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmamıştır. Referans hız 2000 d/d ve referans faz torku 2Nm'dir. Motor 300V sabit faz gerilimi altında çalıştırılmıştır. Genetik arama algoritması tabanlı komütasyon açısı generatörü tarafından iletim açısı 0.12° , yükselme açısı 0.7° , kesim açısı 17.28° ve düşme açısı 0.7° olarak belirlenmiştir. Referans faz akımları maksimum 7A ve minimum ise 6.2A dir. Motor çalışma durumunda faz akımları maksimum 9.0A ve minimum ise 5.2A dir. Generatör bölgesi çalışması dikkate alınmadığından ortalama tork ve tork rıpılları fazladır. Motor çalışma durumunda tork rıpıllarının 1.6Nm ile 3.1Nm arasında salınımlı olduğu görülmektedir.



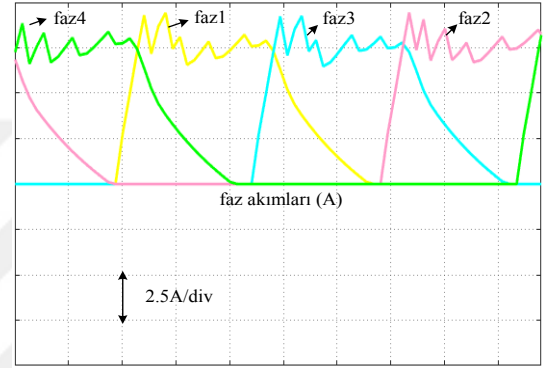
(a)



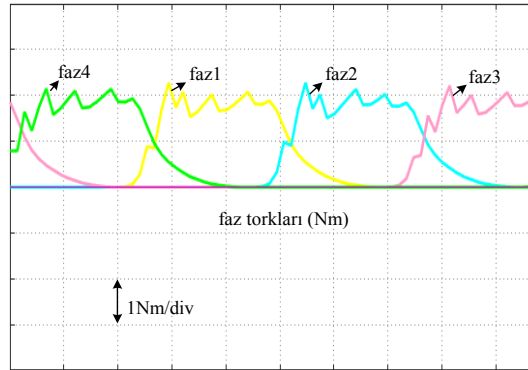
(b)



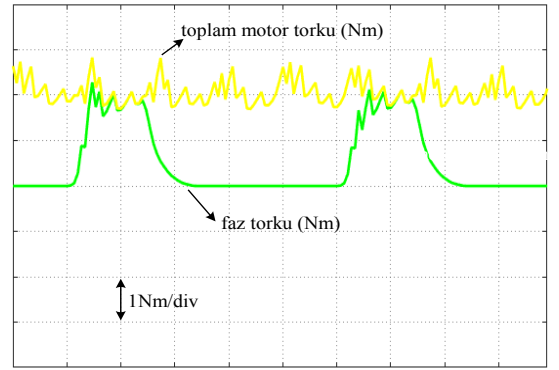
(c)



(d)

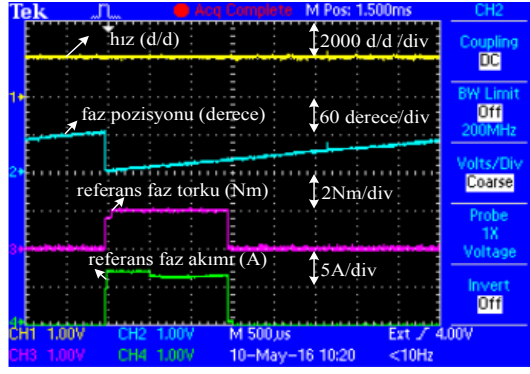


(e)

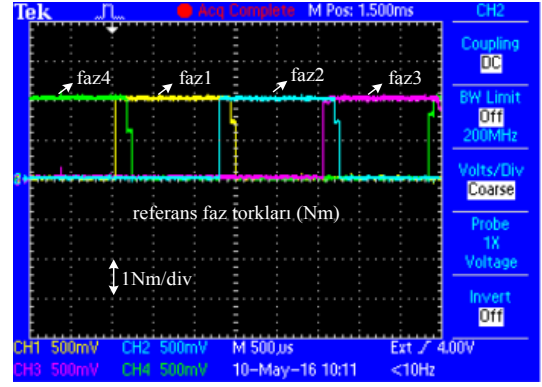


(f)

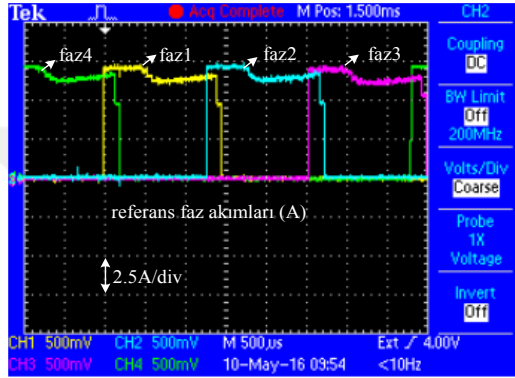
Şekil 7.3. Tip III' den Elde Edilen Benzetim Sonuçları (2Nm,2000 d/d, $m=0$, Doğrusal TPF) a) Hız, Faz pozisyonu,Referans Faz Torku, Referans Faz Akımı b) Referans Faz Torkları c) Referans Faz Akımları d) Faz akımları e) Faz Torkları f) Toplam Tork ve Faz Torku



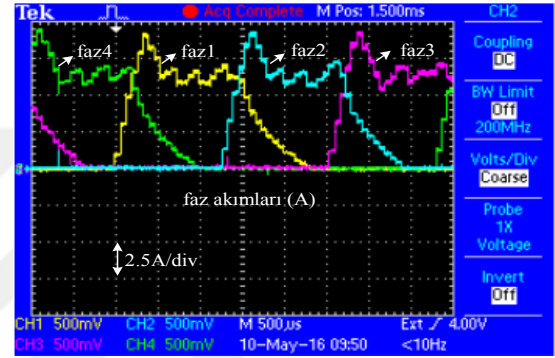
(a)



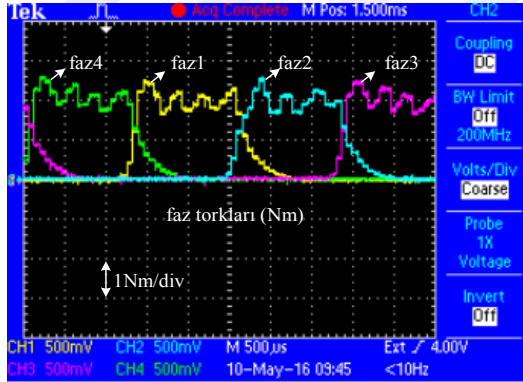
(b)



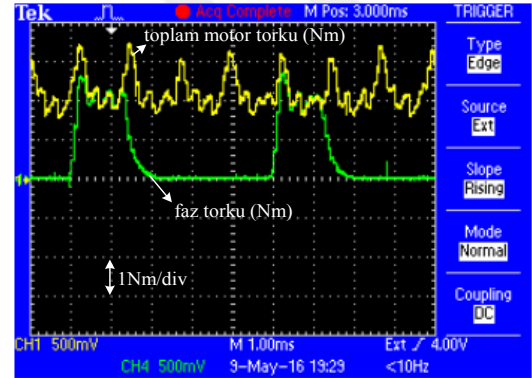
(c)



(d)



(e)

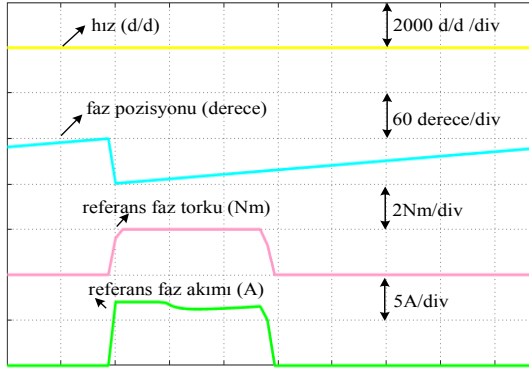


(f)

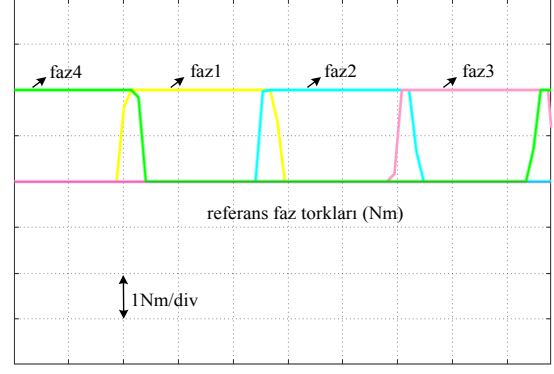
Şekil 7.4. Tip III' den Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (2Nm,2000 d/d, m=0, Doğrusal TPF) a) Hız, Faz pozisyonu,Referans Faz Torku, Referans Faz Akımı b) Referans Faz Torkları c) Referans Faz Akımları d) Faz akımları e) Faz Torkları f) Toplam Tork ve Faz Torku

Şekil 7.5'de Tip III' ün performansı test edilmiş ve elde edilen benzetim sonuçları verilmiştir. Şekil 7.5(a)'da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 7.5(b)'de referans faz torkları, Şekil 7.5(c)'de referans faz akımları, Şekil 7.5(d)'de faz akımları, Şekil 7.5(e)'de faz torkları ve Şekil 7.5(f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak doğrusal olmayan TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmamıştır. Referans hız 2000 d/d ve referans faz torku 2Nm'dir. Motor 300V sabit faz gerilimi altında çalıştırılmıştır. Genetik arama algoritması tabanlı komütasyon açısı generatörü tarafından iletim açısı 0.12° , yükselme açısı 0.84° , kesim açısı 17.16° ve düşme açısı 0.84° olarak belirlenmiştir. Referans faz akımları maksimum 7A ve minimum ise 6.2A dir. Motor çalışma durumunda faz akımları maksimum 7.5A ve minimum ise 5.3A dir. Generatör bölgesi çalışması dikkate alınmadığından ortalama tork ve tork rıpılları fazladır. Motor çalışma durumunda tork rıpıllarının 1.65Nm ile 2.8Nm arasında salınımlı olduğu görülmektedir.

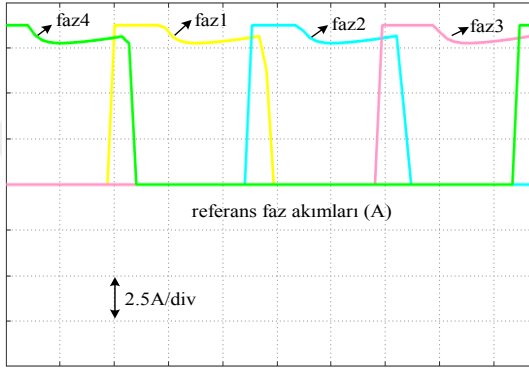
Şekil 7.6'de Tip III' ün performansı test edilmiş ve elde edilen deneysel sonuçları verilmiştir. Şekil 7.6(a)'da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 7.6(b)'de referans faz torkları, Şekil 7.6(c)'de referans faz akımları, Şekil 7.6(d)'de faz akımları, Şekil 7.6(e)'de faz torkları ve Şekil 7.6(f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak doğrusal olmayan TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmamıştır. Referans hız 2000 d/d ve referans faz torku 2Nm'dir. Motor 300V sabit faz gerilimi altında çalıştırılmıştır. Genetik arama algoritması tabanlı komütasyon açısı generatörü tarafından iletim açısı 0.12° , yükselme açısı 0.84° , kesim açısı 17.16° ve düşme açısı 0.84° olarak belirlenmiştir. Referans faz akımları maksimum 7A ve minimum ise 6.2A dir. Motor çalışma durumunda faz akımları maksimum 9.0A ve minimum ise 5.4A dir. Generatör bölgesi çalışması dikkate alınmadığından ortalama tork ve tork rıpılları fazladır. Motor çalışma durumunda tork rıpıllarının 1.4Nm ile 3.2Nm arasında salınımlı olduğu görülmektedir.



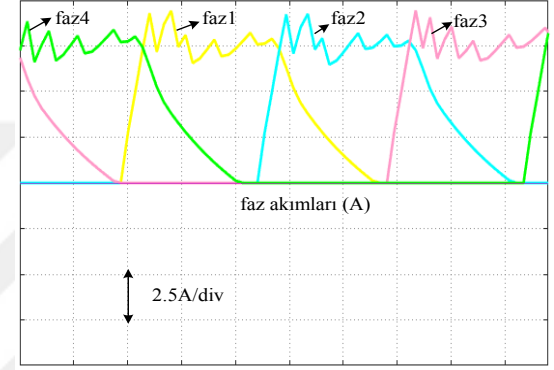
(a)



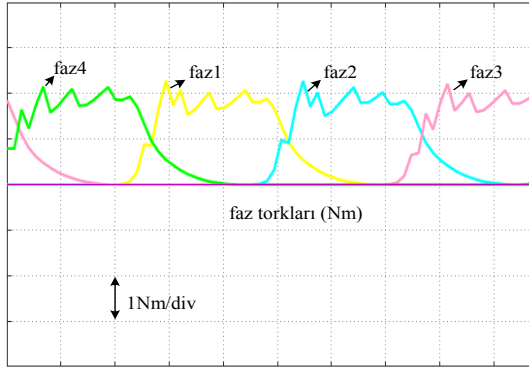
(b)



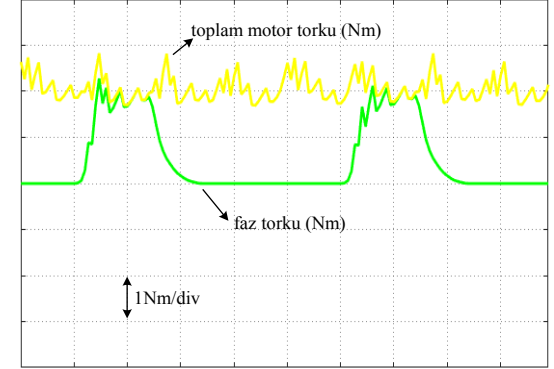
(c)



(d)

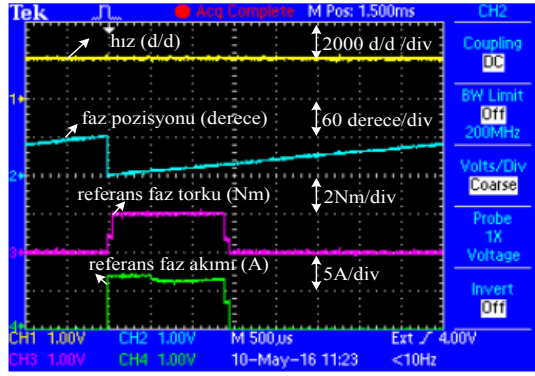


(e)

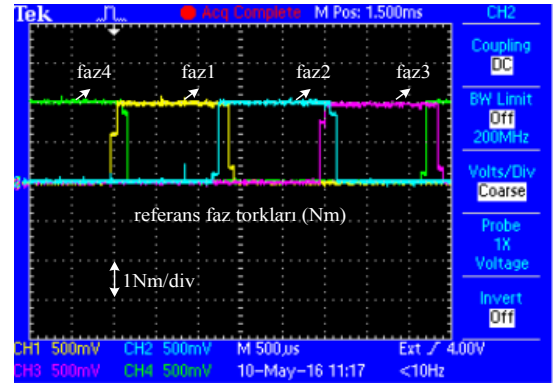


(f)

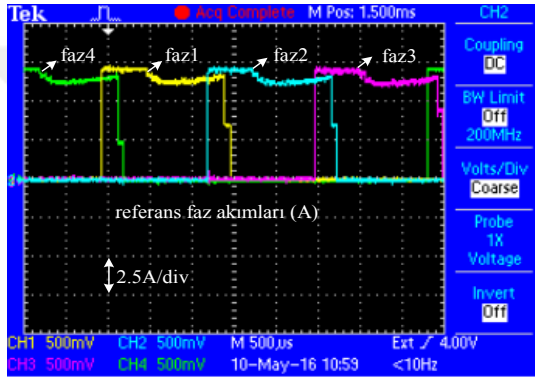
Şekil 7.5. Tip III' den Elde Edilen Benzetim Sonuçları (2Nm,2000 d/d, $m=0$, Doğrusal olmayan TPF) a) Hız, Faz pozisyonu,Referans Faz Torku, Referans Faz Akımı b) Referans Faz Torkları c) Referans Faz Akımları d) Faz akımları e) Faz Torkları f) Toplam Tork ve Faz Torku



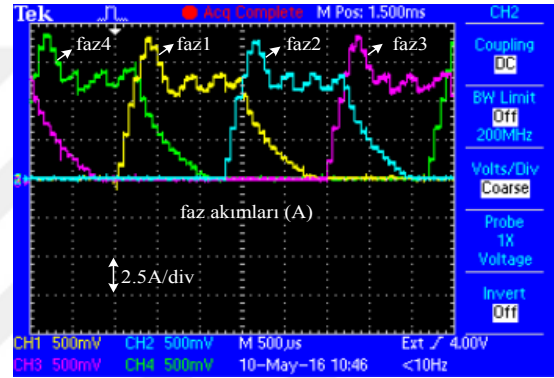
(a)



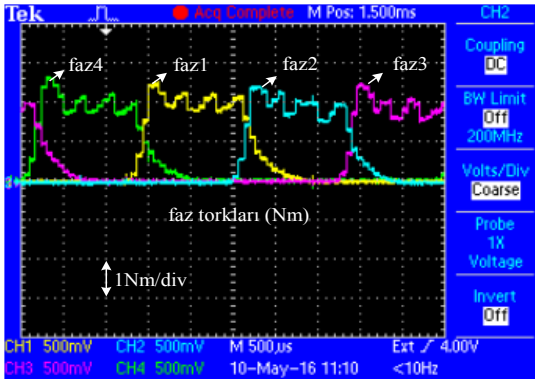
(b)



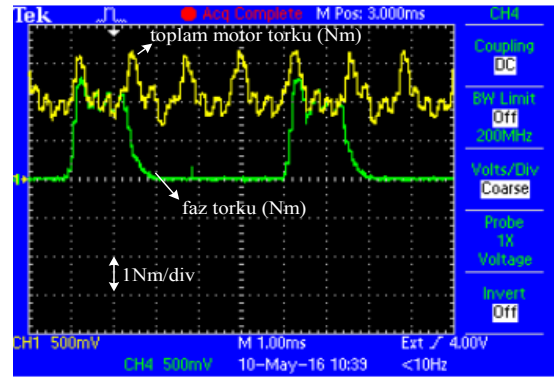
(c)



(d)



(e)

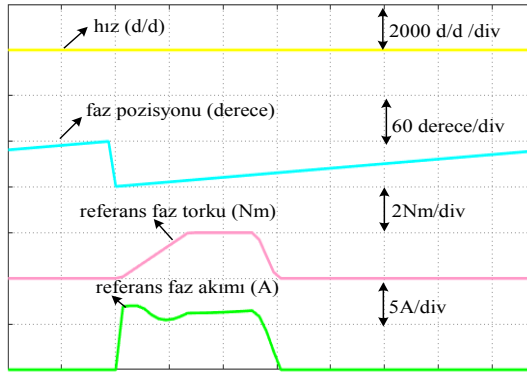


(f)

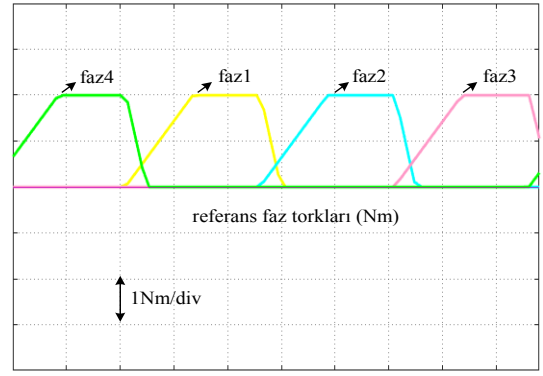
Şekil 7.6. Tip III' den Elde Edilen Deneyisel Sonuçlar (2Nm,2000 d/d, m=0, Doğrusal olmayan TPF) a) Hız, Faz pozisyonu,Referans Faz Torku, Referans Faz Akımı b) Referans Faz Torkları c) Referans Faz Akımları d) Faz akımları e) Faz Torkları f) Toplam Tork ve Faz Torku

Şekil 7.7'de Tip IV' ün performansı test edilmiş ve elde edilen benzetim sonuçları verilmiştir. Şekil 7.7(a)'da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 7.7(b)'de referans faz torkları, Şekil 7.7(c)'de referans faz akımları, Şekil 7.7(d)'de faz akımları, Şekil 7.7(e)'de faz torkları ve Şekil 7.7(f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak doğrusal TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmamıştır. Referans hız 2000 d/d ve referans faz torku 2Nm'dir. Motor 300V sabit faz gerilimi altında çalıştırılmıştır. Genetik arama algoritması tabanlı komütasyon açılı generatörü tarafından iletim açısı 1.24° , yükselme açısı 7.54° , kesim açısı 13.34° ve düşme açısı 2.26° olarak belirlenmiştir. Referans faz akımları maksimum 7A ve minimum ise 5.5A dir. Motor çalışma durumunda faz akımları maksimum 7.1A ve minimum ise 4.9A dir. Generatör bölgesi çalışması dikkate alınmadığından ortalama tork ve tork rıpilları fazladır. Motor çalışma durumunda tork rıpilllarının 1.7Nm ile 2.2Nm arasında salınımlı olduğu görülmektedir.

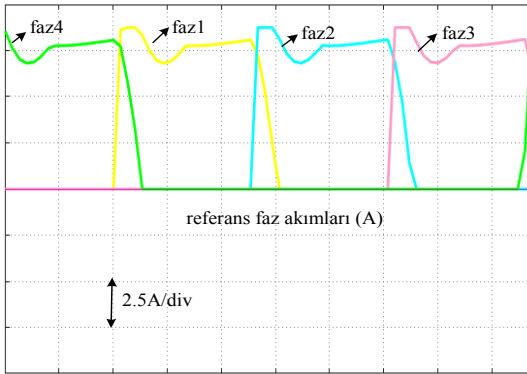
Şekil 7.8'de Tip IV' ün performansı test edilmiş ve elde edilen deneysel sonuçları verilmiştir. Şekil 7.8(a)'da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 7.8(b)'de referans faz torkları, Şekil 7.8(c)'de referans faz akımları, Şekil 7.8(d)'de faz akımları, Şekil 7.8(e)'de faz torkları ve Şekil 7.8(f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak doğrusal TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmamıştır. Referans hız 2000 d/d ve referans faz torku 2Nm'dir. Motor 300V sabit faz gerilimi altında çalıştırılmıştır. Genetik arama algoritması tabanlı komütasyon açılı generatörü tarafından iletim açısı 1.24° , yükselme açısı 7.54° , kesim açısı 16.34° ve düşme açısı 2.26° olarak belirlenmiştir. Referans faz akımları maksimum 7A ve minimum ise 5.5A dir. Motor çalışma durumunda faz akımları maksimum 8.0A ve minimum ise 5.6A dir. Generatör bölgesi çalışması dikkate alınmadığından ortalama tork ve tork rıpilları fazladır. Motor çalışma durumunda tork rıpilllarının 1.7Nm ile 2.5Nm arasında salınımlı olduğu görülmektedir.



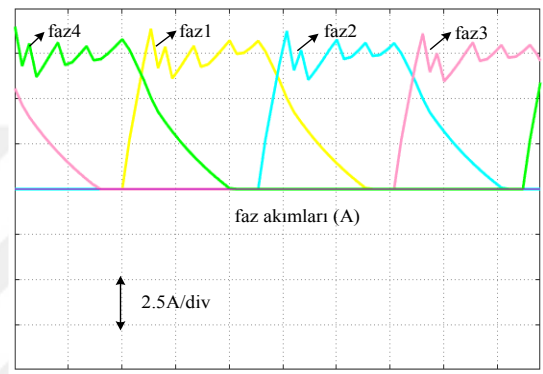
(a)



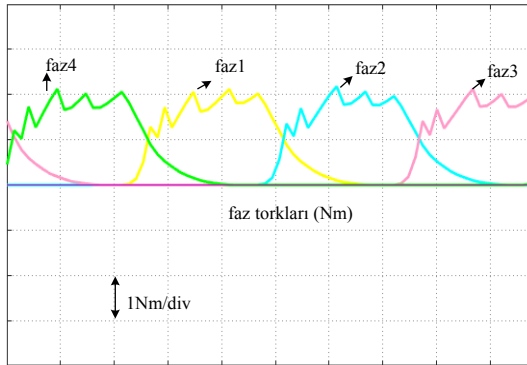
(b)



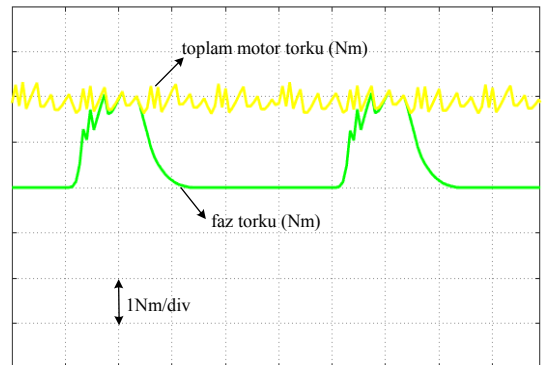
(c)



(d)

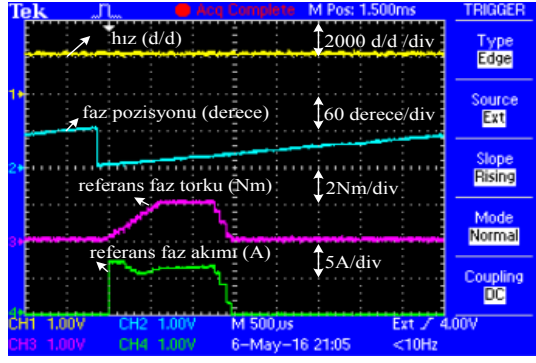


(e)

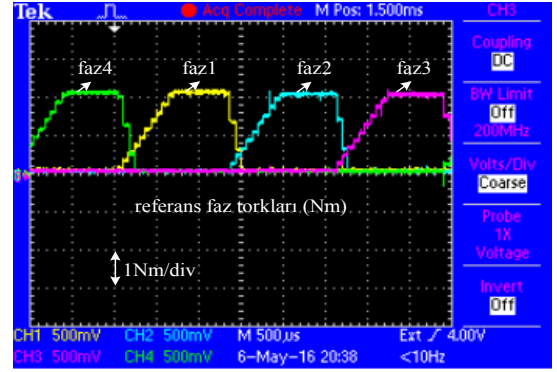


(f)

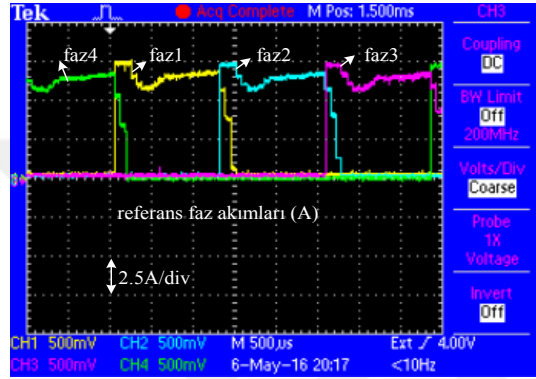
Şekil 7.7. Tip IV' den Elde Edilen Benzetim Sonuçları (2Nm,2000 d/d, $m=0$, Doğrusal TPF) a) Hız, Faz pozisyonu,Referans Faz Torku, Referans Faz Akımı b) Referans Faz Torkları c) Referans Faz Akımları d) Faz akımları e) Faz Torkları f) Toplam Tork ve Faz Torku



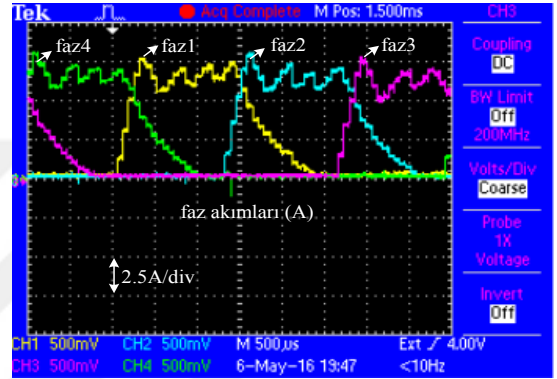
(a)



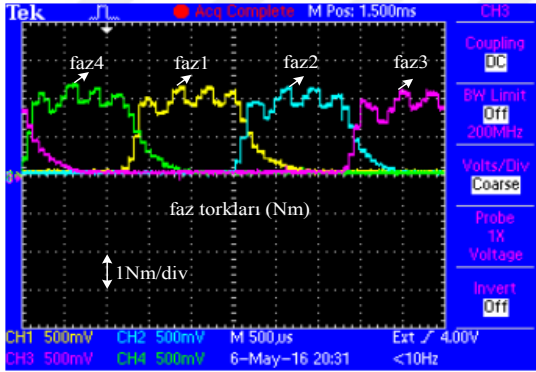
(b)



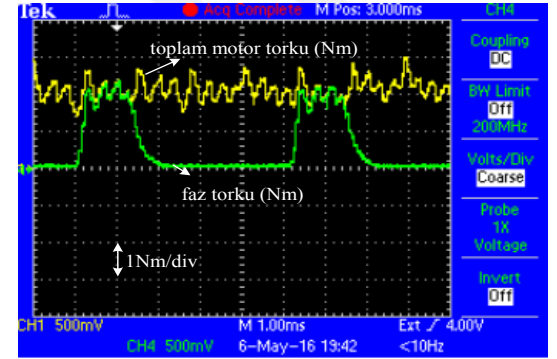
(c)



(d)



(e)

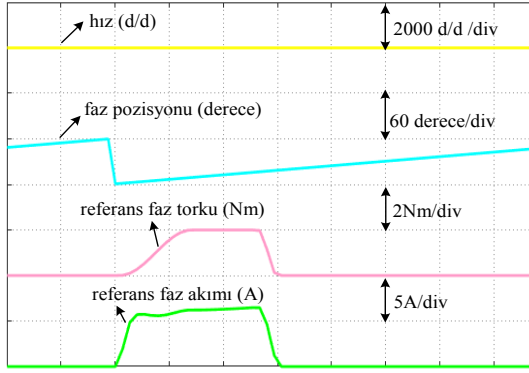


(f)

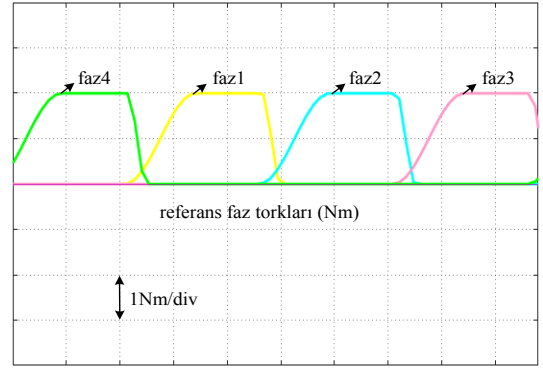
Şekil 7.8. Tip IV' den Elde Edilen Deneyisel Sonuçlar (2Nm,2000 d/d, m=0, Doğrusal TPF) a) Hız, Faz pozisyonu,Referans Faz Torku, Referans Faz Akımı b) Referans Faz Torkları c) Referans Faz Akımları d) Faz akımları e) Faz Torkları f) Toplam Tork ve Faz Torku

Şekil 7.9'de Tip IV' ün performansı test edilmiş ve elde edilen benzetim sonuçları verilmiştir. Şekil 7.9(a)'da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 7.9(b)'de referans faz torkları, Şekil 7.9(c)'de referans faz akımları, Şekil 7.9(d)'de faz akımları, Şekil 7.9(e)'de faz torkları ve Şekil 7.9(f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak doğrusal olmayan TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmamıştır. Referans hız 2000 d/d ve referans faz torku 2Nm'dir. Motor 300V sabit faz gerilimi altında çalıştırılmıştır. Genetik arama algoritması tabanlı komütasyon açısı generatörü tarafından iletim açısı 1.2° , yükselme açısı 7.94° , kesim açısı 16.54° ve düşme açısı 2.1° olarak belirlenmiştir. Referans faz akımları maksimum 6.5A ve minimum ise 5.6A dir. Motor çalışma durumunda faz akımları maksimum 7.1A ve minimum ise 4.9A dir. Generatör bölgesi çalışması dikkate alınmadığından ortalama tork ve tork rıpılları fazladır. Motor çalışma durumunda tork rıpıllarının 1.7Nm ile 2.2Nm arasında salınımlı olduğu görülmektedir.

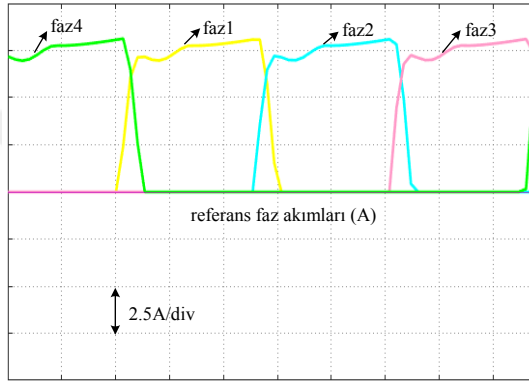
Şekil 7.10'de Tip IV' ün performansı test edilmiş ve elde edilen deneysel sonuçları verilmiştir. Şekil 7.10(a)'da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 7.10(b)'de referans faz torkları, Şekil 7.10(c)'de referans faz akımları, Şekil 7.10(d)'de faz akımları, Şekil 7.10(e)'de faz torkları ve Şekil 7.10(f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak doğrusal olmayan TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmamıştır. Referans hız 2000 d/d ve referans faz torku 2Nm'dir. Motor 300V sabit faz gerilimi altında çalıştırılmıştır. Genetik arama algoritması tabanlı komütasyon açısı generatörü tarafından iletim açısı 1.2° , yükselme açısı 7.94° , kesim açısı 16.54° ve düşme açısı 2.1° olarak belirlenmiştir. Referans faz akımları maksimum 6.5A ve minimum ise 5.6A dir. Motor çalışma durumunda faz akımları maksimum 8.0A ve minimum ise 5.3A dir. Generatör bölgesi çalışması dikkate alınmadığından ortalama tork ve tork rıpılları fazladır. Motor çalışma durumunda tork rıpıllarının 1.7Nm ile 2.5Nm arasında salınımlı olduğu görülmektedir.



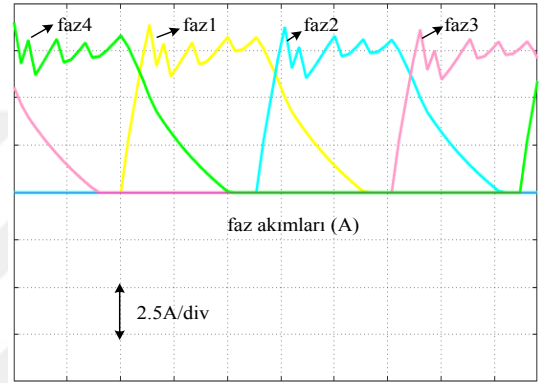
(a)



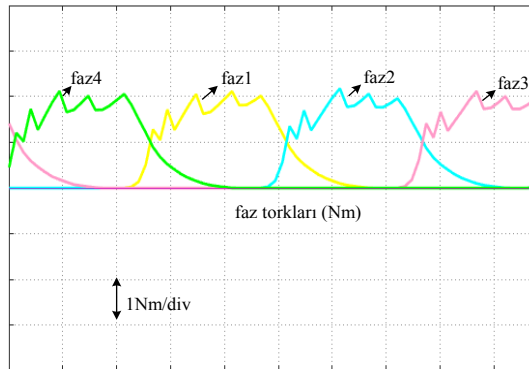
(b)



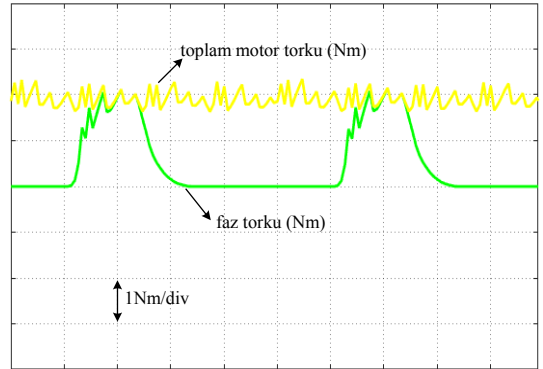
(c)



(d)

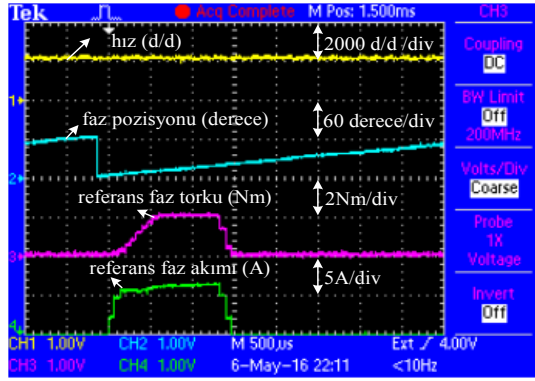


(e)

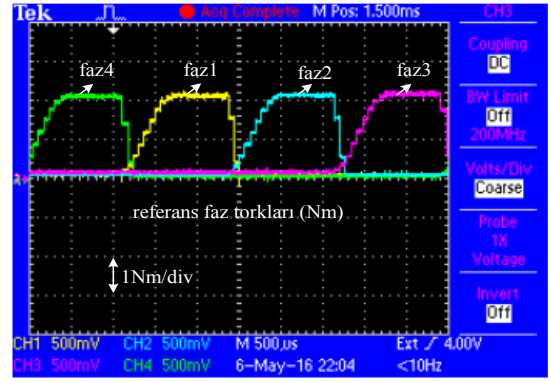


(f)

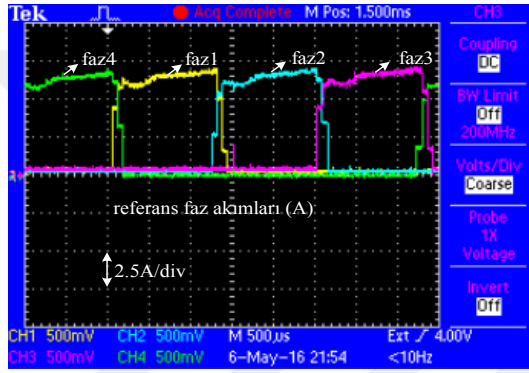
Şekil 7.9. Tip IV' den Elde Edilen Benzetim Sonuçları (2Nm,2000 d/d, $m=0$, Doğrusal olmayan TPF) a) Hız, Faz pozisyonu,Referans Faz Torku, Referans Faz Akımı b) Referans Faz Torkları c) Referans Faz Akımları d) Faz akımları e) Faz Torkları f) Toplam Tork ve Faz Torku



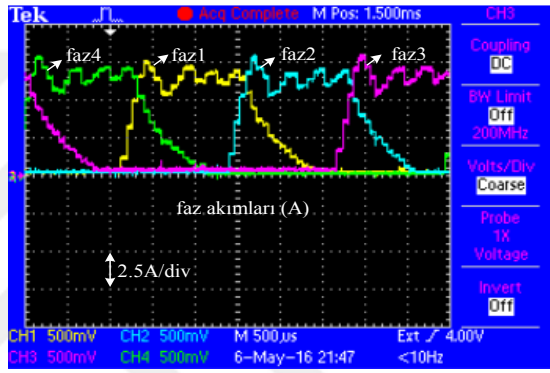
(a)



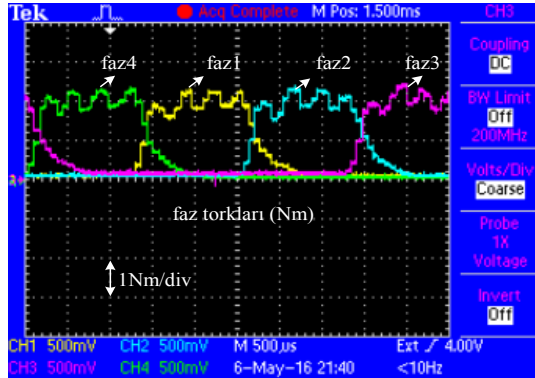
(b)



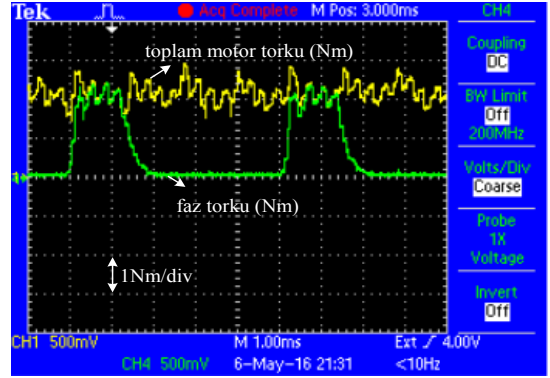
(c)



(d)



(e)

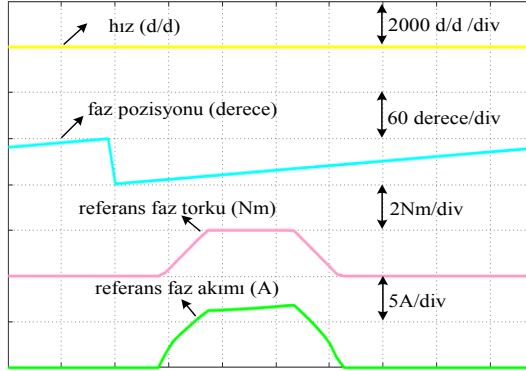


(f)

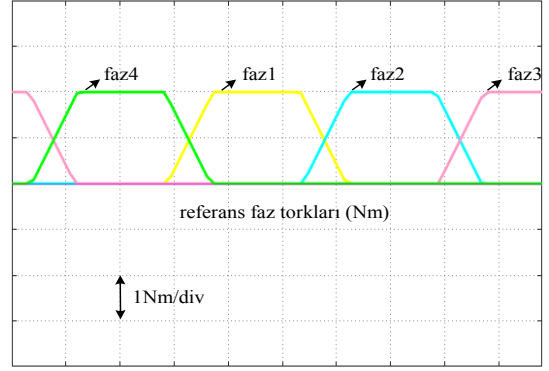
Şekil 7.10. Tip IV' den Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (2Nm,2000 d/d, m=0, Doğrusal olmayan TPF) a) Hız, Faz pozisyonu,Referans Faz Torku, Referans Faz Akımı b) Referans Faz Torkları c) Referans Faz Akımları d) Faz akımları e) Faz Torkları f) Toplam Tork ve Faz Torku

Şekil 7.11'de Tip III' ün performansı test edilmiş ve elde edilen benzetim sonuçları verilmiştir. Şekil 7.11(a)'da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 7.11(b)'de referans faz torkları, Şekil 7.11(c)'de referans faz akımları, Şekil 7.11(d)'de faz akımları, Şekil 7.11(e)'de faz torkları ve Şekil 7.11(f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak doğrusal TPF seçilmiştir ve genaratör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır. Referans hız 2000 d/d ve referans faz torku 2Nm'dir. Motor 300V sabit faz gerilimi altında çalıştırılmıştır. Genetik arama algoritması tabanlı komütasyon açısı genaratörü tarafından iletim açısı 5.92° , yükselme açısı 5.06° , kesim açısı 20.64° ve düşme açısı 5.06° olarak belirlenmiştir. Referans faz akımları maksimum 6.8A ve minimum ise 6.25A dir. Motor çalışma durumunda faz akımları maksimum 7.1A ve minimum ise 6.1A dir. Genaratör bölgesi çalışması dikkate alındığında ortalama tork ve tork rıpilları azalmaktadır. Motor çalışma durumunda tork rıpilllarının 1.6Nm ile 1.95Nm arasında salınımlı olduğu görülmektedir. Tork genaratör bölgesine maksimum 0.15 Nm değerine inmektedir.

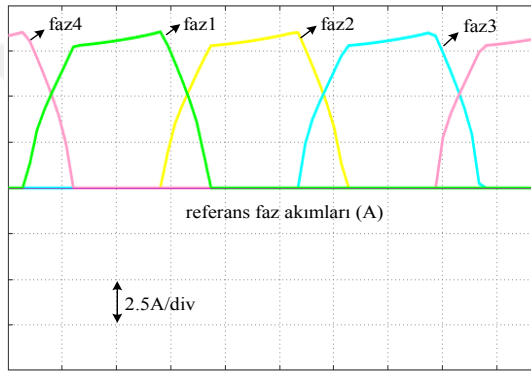
Şekil 7.12'de Tip III' ün performansı test edilmiş ve elde edilen deneysel sonuçları verilmiştir. Şekil 7.12(a)'da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 7.12(b)'de referans faz torkları, Şekil 7.12(c)'de referans faz akımları, Şekil 7.12(d)'de faz akımları, Şekil 7.12(e)'de faz torkları ve Şekil 7.12(f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak doğrusal TPF seçilmiştir ve genaratör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır. Referans hız 2000 d/d ve referans faz torku 2Nm'dir. Motor 300V sabit faz gerilimi altında çalıştırılmıştır. Genetik arama algoritması tabanlı komütasyon açısı genaratörü tarafından iletim açısı 5.92° , yükselme açısı 5.06° , kesim açısı 20.64° ve düşme açısı 5.06° olarak belirlenmiştir. Referans faz akımları maksimum 6.8A ve minimum ise 6.25A dir. Motor çalışma durumunda faz akımları maksimum 7.0A ve minimum ise 6.3A dir. Genaratör bölgesi çalışması dikkate alındığından ortalama tork ve tork rıpilları azalmaktadır. Motor çalışma durumunda tork rıpilllarının 1.5Nm ile 2.1Nm arasında salınımlı olduğu görülmektedir. Tork genaratör bölgesine maksimum 0.2 Nm değerine inmektedir.



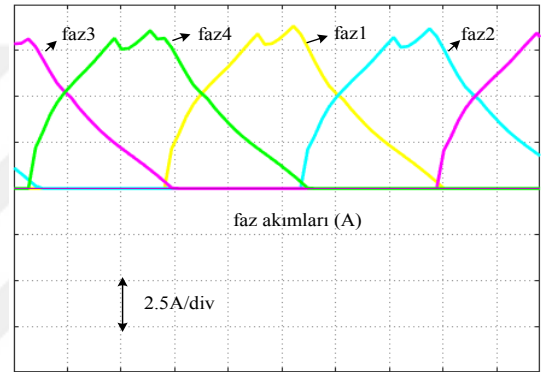
(a)



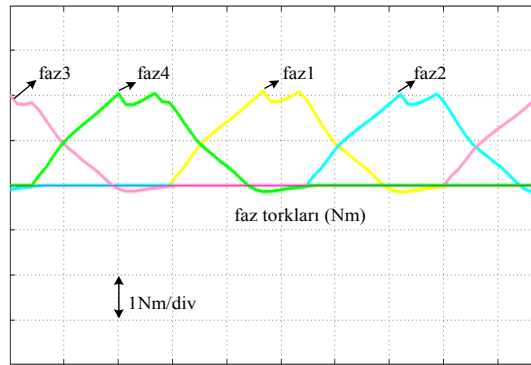
(b)



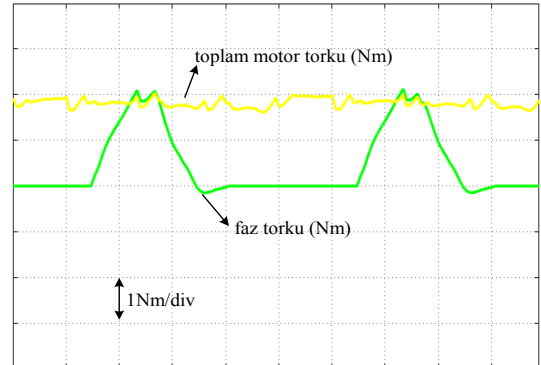
(c)



(d)

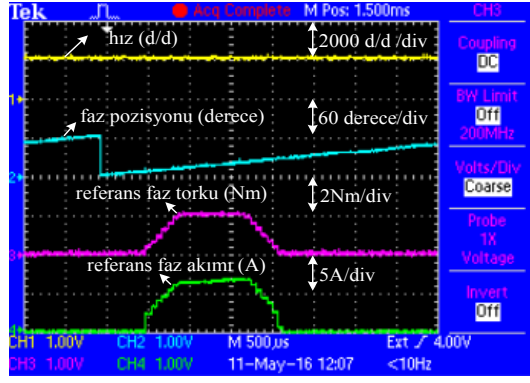


(e)

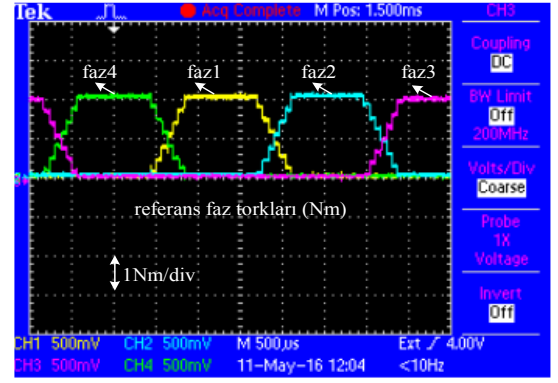


(f)

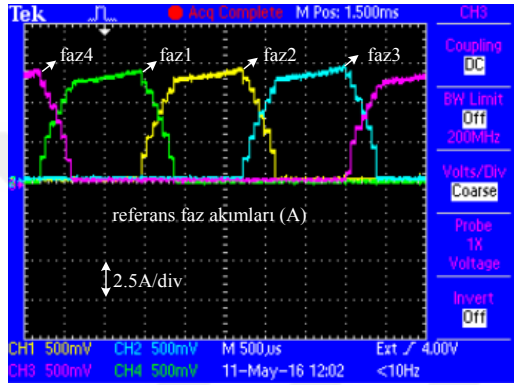
Şekil 7.11. Tip III' den Elde Edilen Benzetim Sonuçları (2Nm,2000 d/d, m=10, Doğrusal TPF) a) Hız, Faz pozisyonu,Referans Faz Torku, Referans Faz Akımı b) Referans Faz Torkları c) Referans Faz Akımları d) Faz akımları e) Faz Torkları f) Toplam Tork ve Faz Torku



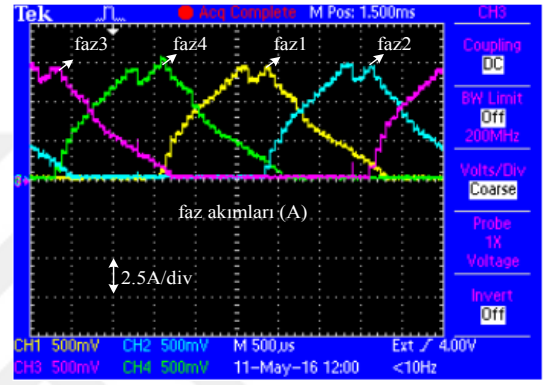
(a)



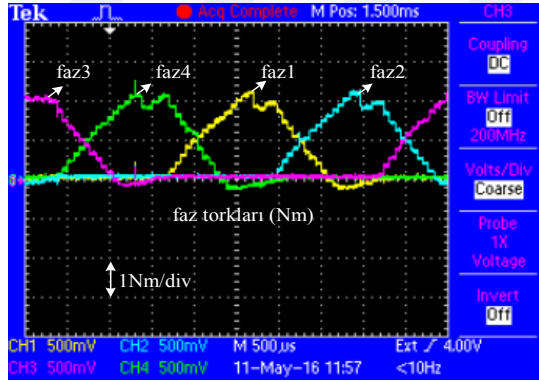
(b)



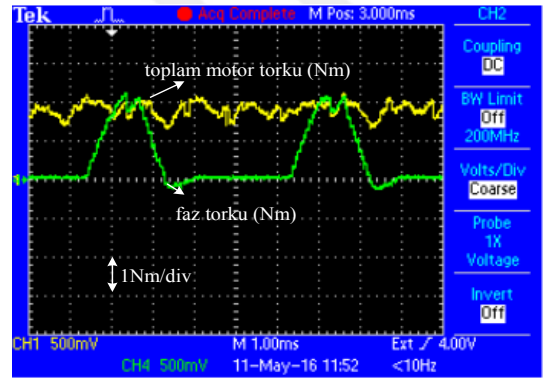
(c)



(d)



(e)

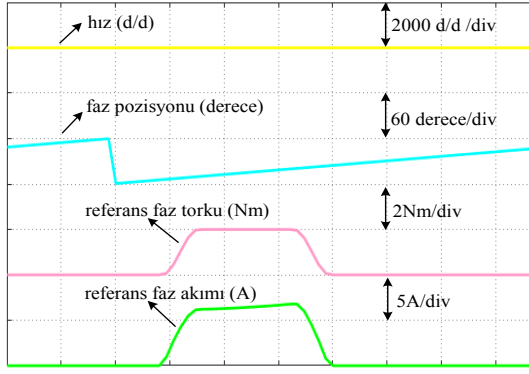


(f)

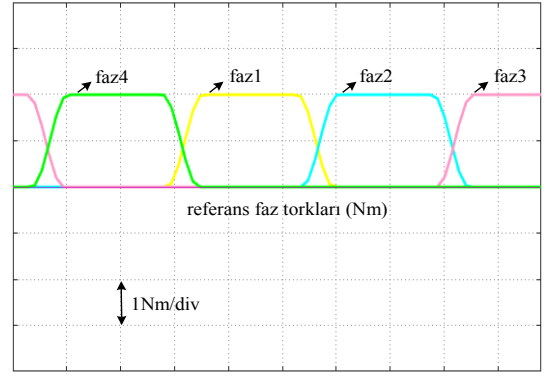
Şekil 7.12. Tip III' den Elde Edilen Deneyisel Sonuçlar (2Nm,2000 d/d, m=10, Doğrusal TPF) a) Hız, Faz pozisyonu,Referans Faz Torku, Referans Faz Akımı b) Referans Faz Torkları c) Referans Faz Akımları d) Faz akımları e) Faz Torkları f) Toplam Tork ve Faz Torku

Şekil 7.13'de Tip III' ün performansı test edilmiş ve elde edilen benzetim sonuçları verilmiştir. Şekil 7.13(a)'da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 7.13(b)'de referans faz torkları, Şekil 7.13(c)'de referans faz akımları, Şekil 7.13(d)'de faz akımları, Şekil 7.13(e)'de faz torkları ve Şekil 7.13(f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak doğrusal olmayan TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır. Referans hız 2000 d/d ve referans faz torku 2Nm'dir. Motor 300V sabit faz gerilimi altında çalıştırılmıştır. Genetik arama algoritması tabanlı komütasyon açısı generatörü tarafından iletim açısı 5.82° , yükselme açısı 3.98° , kesim açısı 20.36° ve düşme açısı 3.98° olarak belirlenmiştir. Referans faz akımları maksimum 6.8A ve minimum ise 6.25A dir. Motor çalışma durumunda faz akımları maksimum 7.1A ve minimum ise 6.1A dir. Generatör bölgesi çalışması dikkate alındığında ortalama tork ve tork rıpılları azalmaktadır. Motor çalışma durumunda tork rıpıllarının 1.7Nm ile 2.1Nm arasında salınımlı olduğu görülmektedir. Tork generatör bölgesine maksimum 0.12 Nm değerine inmektedir.

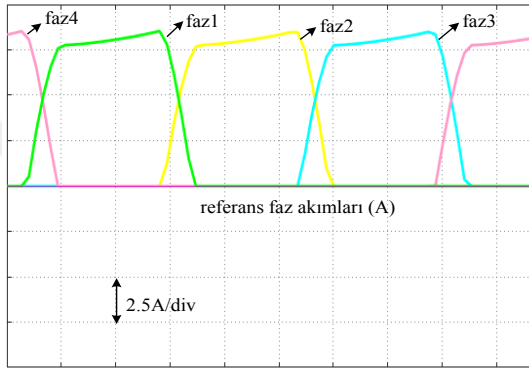
Şekil 7.14'de Tip III' ün performansı test edilmiş ve elde edilen deneysel sonuçları verilmiştir. Şekil 7.14(a)'da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 7.14(b)'de referans faz torkları, Şekil 7.14(c)'de referans faz akımları, Şekil 7.14(d)'de faz akımları, Şekil 7.14(e)'de faz torkları ve Şekil 7.14(f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak doğrusal olmayan TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır. Referans hız 2000 d/d ve referans faz torku 2Nm'dir. Motor 300V sabit faz gerilimi altında çalıştırılmıştır. Genetik arama algoritması tabanlı komütasyon açısı generatörü tarafından iletim açısı 5.82° , yükselme açısı 3.98° , kesim açısı 20.36° ve düşme açısı 3.98° olarak belirlenmiştir. Referans faz akımları maksimum 6.8A ve minimum ise 6.25A dir. Motor çalışma durumunda faz akımları maksimum 7.5A ve minimum ise 6.1A dir. Generatör bölgesi çalışması dikkate alındığından ortalama tork ve tork rıpılları azalmaktadır. Motor çalışma durumunda tork rıpıllarının 1.5Nm ile 2.1Nm arasında salınımlı olduğu görülmektedir. Tork generatör bölgesine maksimum 0.11 Nm değerine inmektedir.



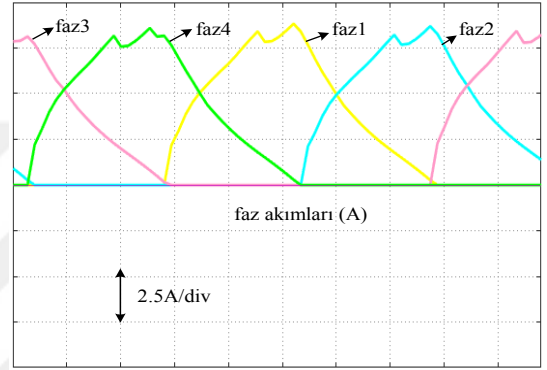
(a)



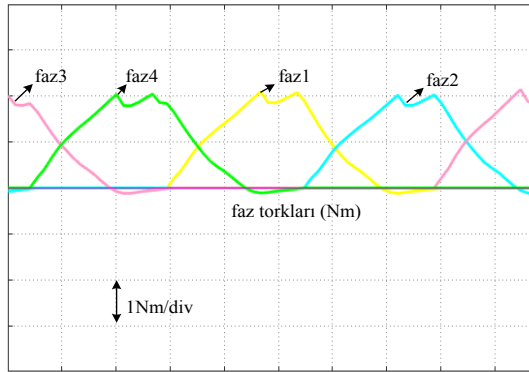
(b)



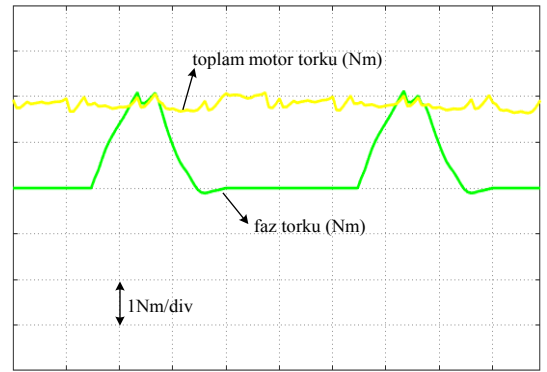
(c)



(d)

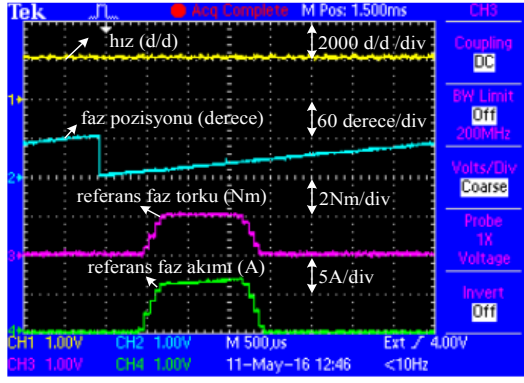


(e)

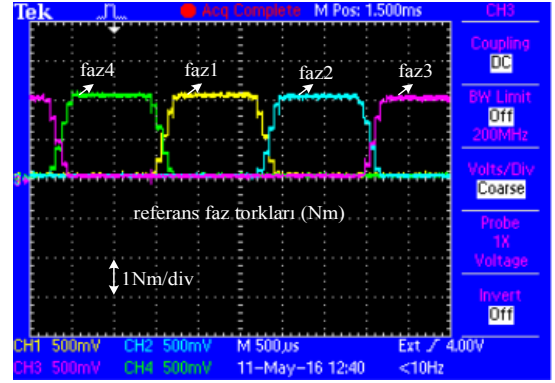


(f)

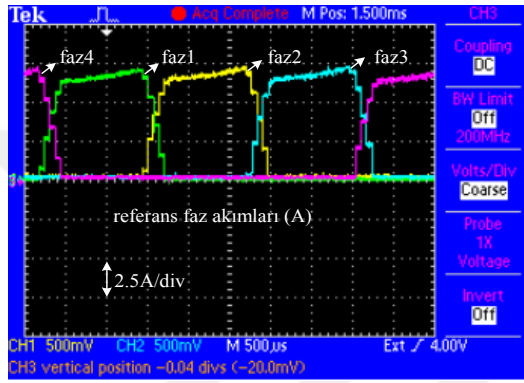
Şekil 7.13. Tip III' den Elde Edilen Benzetim Sonuçları (2Nm,2000 d/d, $m=10$, Doğrusal Olmayan TPF) a) Hız, Faz pozisyonu,Referans Faz Torku, Referans Faz Akımı b) Referans Faz Torkları c) Referans Faz Akımları d) Faz akımları e) Faz Torkları f) Toplam Tork ve Faz Torku



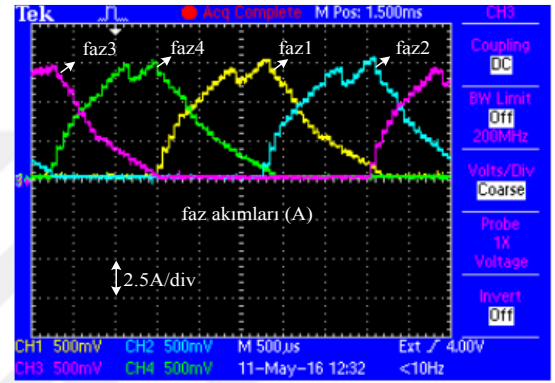
(a)



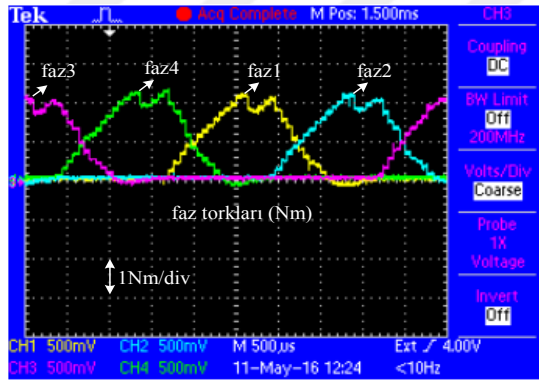
(b)



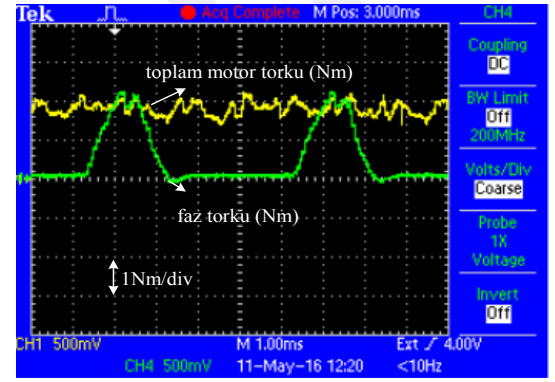
(c)



(d)



(e)

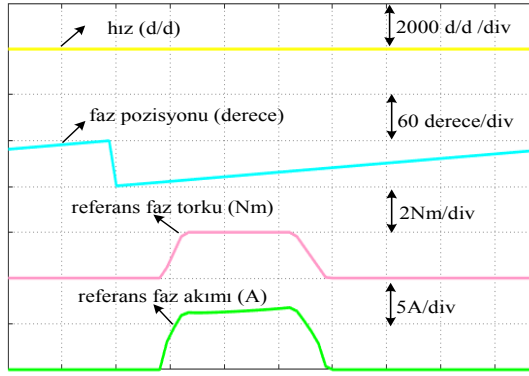


(f)

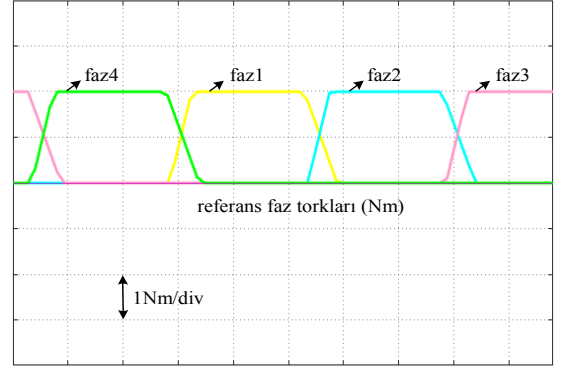
Şekil 7.14. Tip III' den Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (2Nm,2000 d/d, $m=10$, Doğrusal Olmayan TPF) a) Hız, Faz pozisyonu,Referans Faz Torku, Referans Faz Akımı b) Referans Faz Torkları c) Referans Faz Akımları d) Faz akımları e) Faz Torkları f) Toplam Tork ve Faz Torku

Şekil 7.15'de Tip IV' ün performansı test edilmiş ve elde edilen benzetim sonuçları verilmiştir. Şekil 7.15(a)'da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 7.15(b)'de referans faz torkları, Şekil 7.15(c)'de referans faz akımları, Şekil 7.13(d)'de faz akımları, Şekil 7.15(e)'de faz torkları ve Şekil 7.15(f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak doğrusal TPF seçilmiştir ve genaratör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır. Referans hız 2000 d/d ve referans faz torku 2Nm'dir. Motor 300V sabit faz gerilimi altında çalıştırılmıştır. Genetik arama algoritması tabanlı komütasyon açısı genaratörü tarafından iletim açısı 5.76° , yükselme açısı 2.36° , kesim açısı 20.36° ve düşme açısı 3.58° olarak belirlenmiştir. Referans faz akımları maksimum 6.8A ve minimum ise 6.2A dir. Motor çalışma durumunda faz akımları maksimum 7.1A ve minimum ise 6.3A dir. Genaratör bölgesi çalışması dikkate alındığında ortalama tork ve tork rıpilları azalmaktadır. Motor çalışma durumunda tork rıpilllarının 1.7Nm ile 2.05Nm arasında salınımlı olduğu görülmektedir. Tork genaratör bölgesine maksimum 0.11 Nm değerine inmektedir.

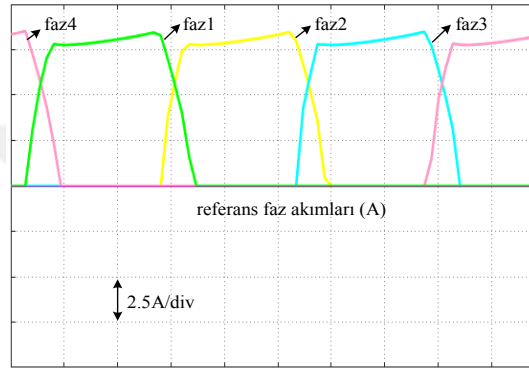
Şekil 7.16'de Tip IV' ün performansı test edilmiş ve elde edilen deneysel sonuçları verilmiştir. Şekil 7.16(a)'da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 7.16(b)'de referans faz torkları, Şekil 7.16(c)'de referans faz akımları, Şekil 7.16(d)'de faz akımları, Şekil 7.16(e)'de faz torkları ve Şekil 7.16(f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak doğrusal TPF seçilmiştir ve genaratör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır. Referans hız 2000 d/d ve referans faz torku 2Nm'dir. Motor 300V sabit faz gerilimi altında çalıştırılmıştır. Genetik arama algoritması tabanlı komütasyon açısı genaratörü tarafından iletim açısı 5.76° , yükselme açısı 2.36° , kesim açısı 20.36° ve düşme açısı 3.58° olarak belirlenmiştir. Referans faz akımları maksimum 6.8A ve minimum ise 6.2A dir. Motor çalışma durumunda faz akımları maksimum 7.2A ve minimum ise 6.2A dir. Genaratör bölgesi çalışması dikkate alındığından ortalama tork ve tork rıpilları azalmaktadır. Motor çalışma durumunda tork rıpilllarının 1.7Nm ile 2.05Nm arasında salınımlı olduğu görülmektedir. Tork genaratör bölgesine maksimum 0.11 Nm değerine inmektedir.



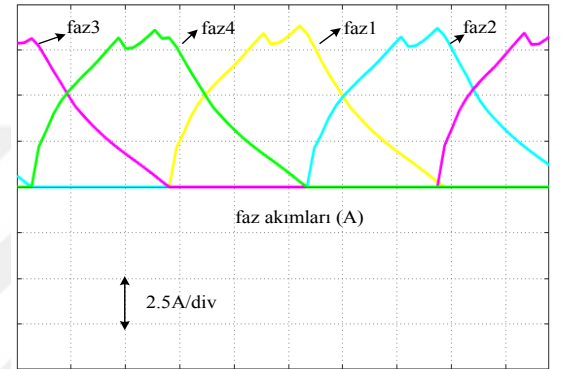
(a)



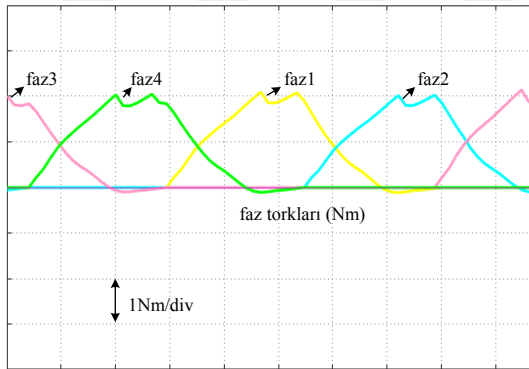
(b)



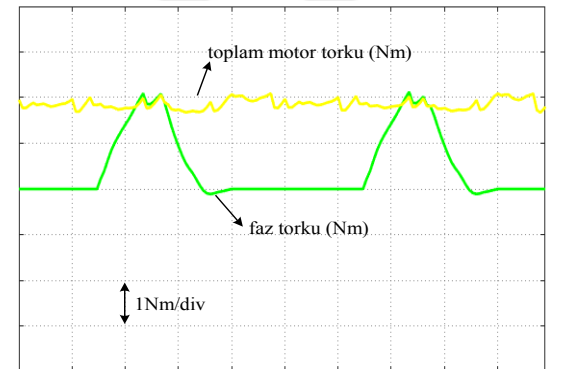
(c)



(d)

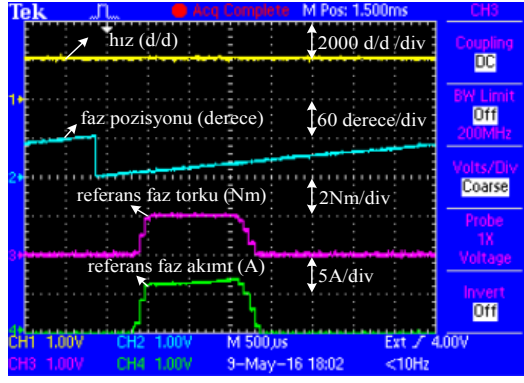


(e)

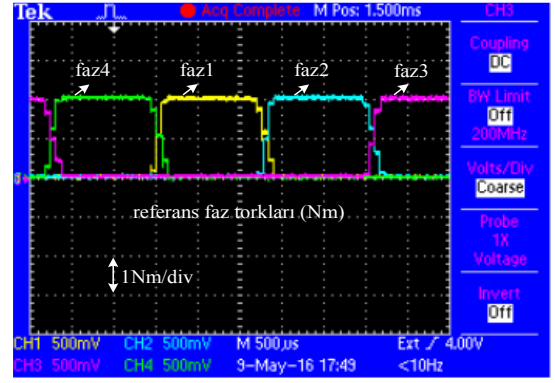


(f)

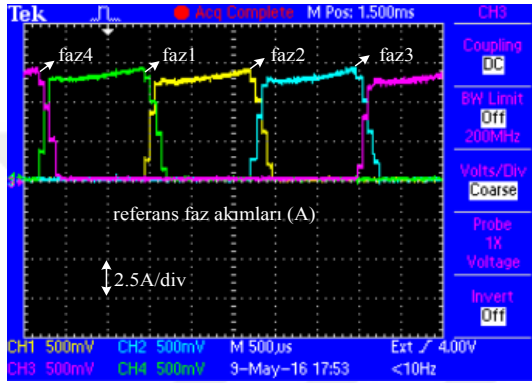
Şekil 7.15. Tip IV den Elde Edilen Benzetim Sonuçları (2Nm,2000 d/d, $m=10$, Doğrusal TPF) a) Hız, Faz pozisyonu,Referans Faz Torku, Referans Faz Akımı b) Referans Faz Torkları c) Referans Faz Akımları d) Faz akımları e) Faz Torkları f) Toplam Tork ve Faz Torku



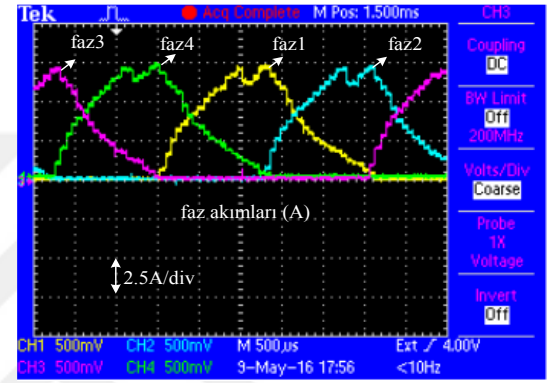
(a)



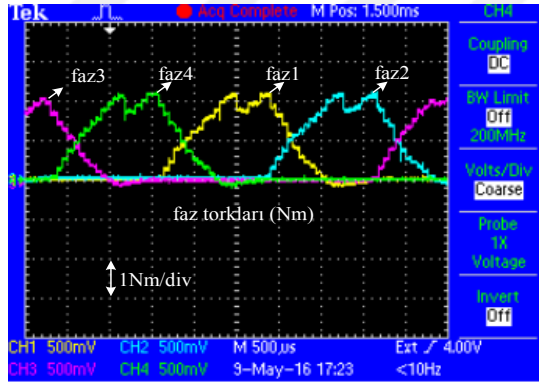
(b)



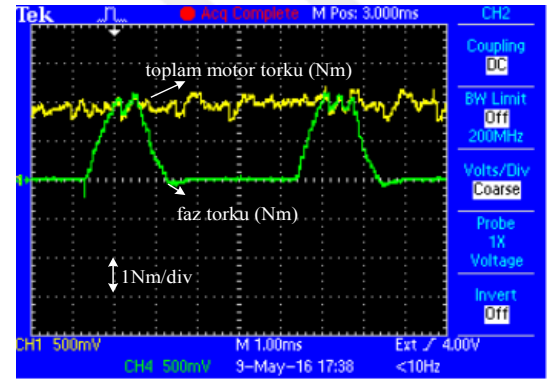
(c)



(d)



(e)

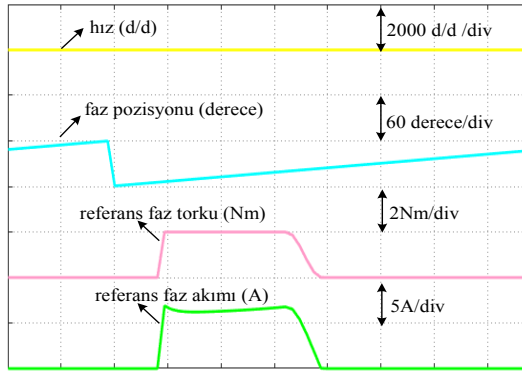


(f)

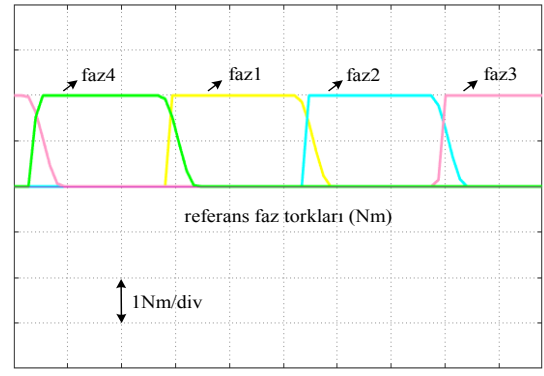
Şekil 7.16. Tip IV den Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (2Nm,2000 d/d, $m=10$, Doğrusal TPF) a) Hız, Faz pozisyonu,Referans Faz Torku, Referans Faz Akımı b) Referans Faz Torkları c) Referans Faz Akımları d) Faz akımları e) Faz Torkları f) Toplam Tork ve Faz Torku

Şekil 7.17'de Tip IV' ün performansı test edilmiş ve elde edilen benzetim sonuçları verilmiştir. Şekil 7.17(a)'da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 7.17(b)'de referans faz torkları, Şekil 7.17(c)'de referans faz akımları, Şekil 7.17(d)'de faz akımları, Şekil 7.17(e)'de faz torkları ve Şekil 7.17(f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak doğrusal olmayan TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır. Referans hız 2000 d/d ve referans faz torku 2Nm'dir. Motor 300V sabit faz gerilimi altında çalıştırılmıştır. Genetik arama algoritması tabanlı komütasyon açısı generatörü tarafından iletim açısı 5.78° , yükselme açısı 0.52° , kesim açısı 20.02° ve düşme açısı 3.96° olarak belirlenmiştir. Referans faz akımları maksimum 6.9A ve minimum ise 6.2A dir. Motor çalışma durumunda faz akımları maksimum 7.1A ve minimum ise 6.1A dir. Generatör bölgesi çalışması dikkate alındığında ortalama tork ve tork rıpilları azalmaktadır. Motor çalışma durumunda tork rıpilllarının 1.7Nm ile 2.05Nm arasında salınımlı olduğu görülmektedir. Tork generatör bölgesine maksimum 0.11 Nm değerine inmektedir.

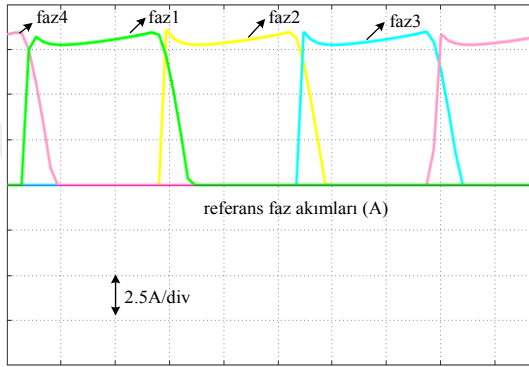
Şekil 7.18'de Tip IV' ün performansı test edilmiş ve elde edilen deneysel sonuçları verilmiştir. Şekil 7.18(a)'da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 7.18(b)'de referans faz torkları, Şekil 7.18(c)'de referans faz akımları, Şekil 7.18(d)'de faz akımları, Şekil 7.18(e)'de faz torkları ve Şekil 7.18(f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak doğrusal olmayan TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır. Referans hız 2000 d/d ve referans faz torku 2Nm'dir. Motor 300V sabit faz gerilimi altında çalıştırılmıştır. Genetik arama algoritması tabanlı komütasyon açısı generatörü tarafından iletim açısı 5.78° , yükselme açısı 0.52° , kesim açısı 20.02° ve düşme açısı 3.96° olarak belirlenmiştir. Referans faz akımları maksimum 6.9A ve minimum ise 6.2A dir. Motor çalışma durumunda faz akımları maksimum 7.4A ve minimum ise 6.1A dir. Generatör bölgesi çalışması dikkate alındığından ortalama tork ve tork rıpilları azalmaktadır. Motor çalışma durumunda tork rıpilllarının 1.7Nm ile 2.05Nm arasında salınımlı olduğu görülmektedir. Tork generatör bölgesine maksimum 0.11 Nm değerine inmektedir.



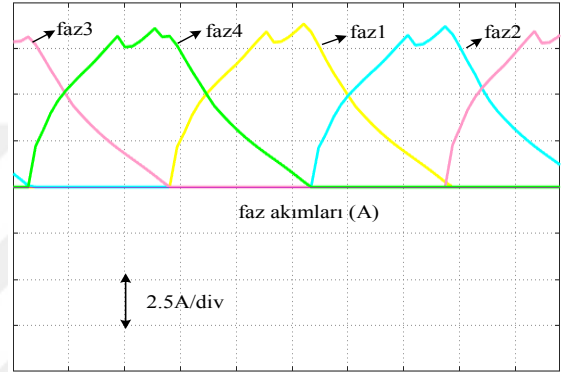
(a)



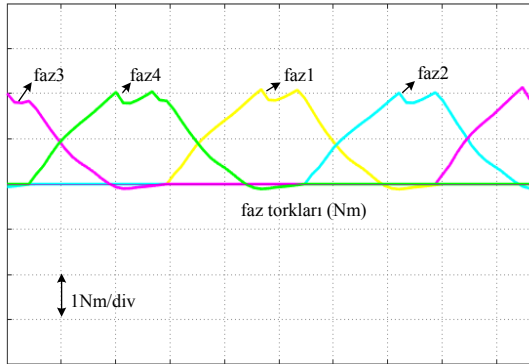
(b)



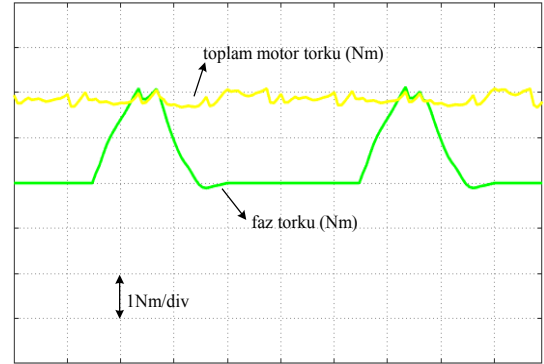
(c)



(d)

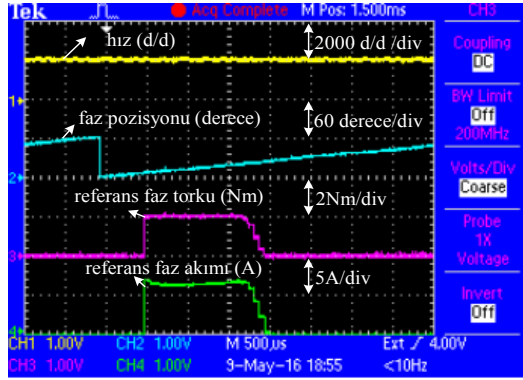


(e)

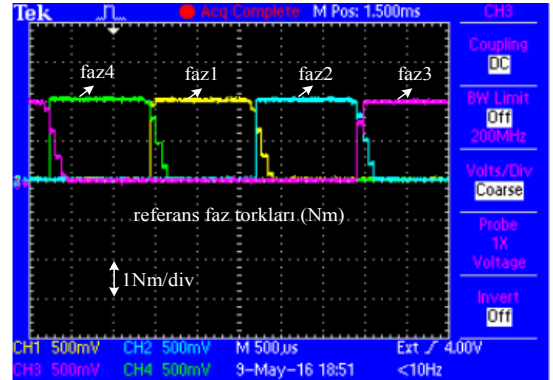


(f)

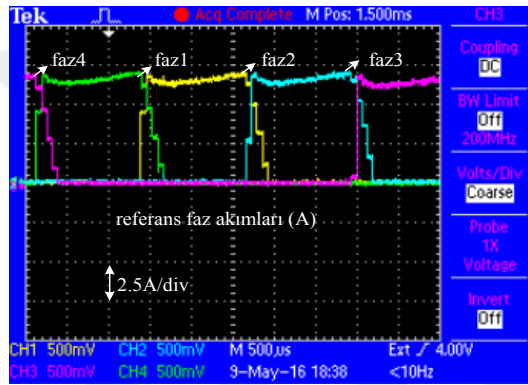
Şekil 7.17. Tip IV'den Elde Edilen Benzetim Sonuçları (2Nm,2000 d/d, $m=10$, Doğrusal olmayan TPF) a) Hız, Faz pozisyonu,Referans Faz Torku, Referans Faz Akımı b) Referans Faz Torkları c) Referans Faz Akımları d) Faz akımları e) Faz Torkları f) Toplam Tork ve Faz Torku



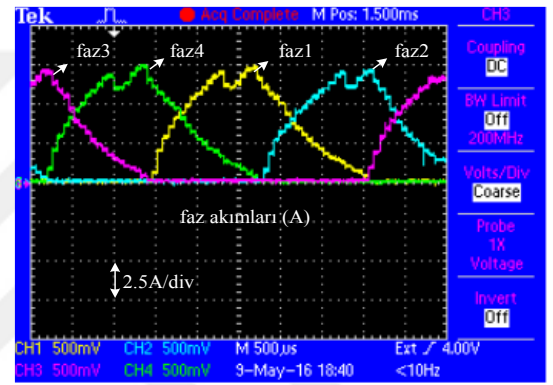
(a)



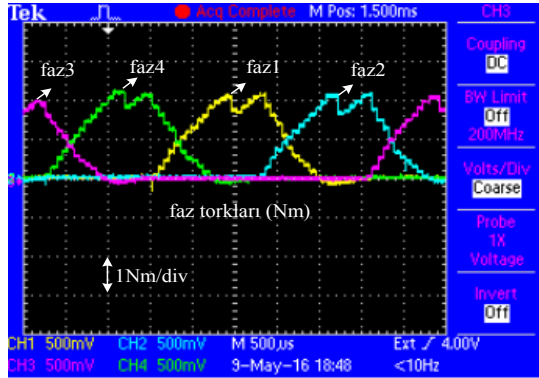
(b)



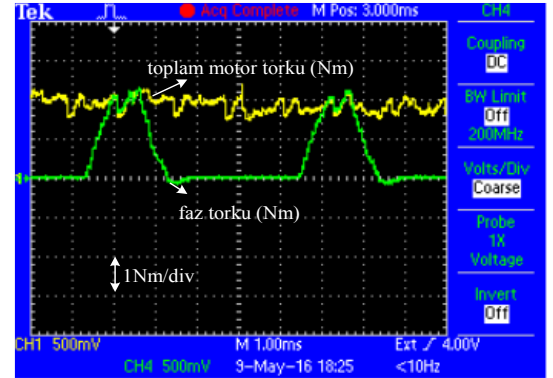
(c)



(d)



(e)



(f)

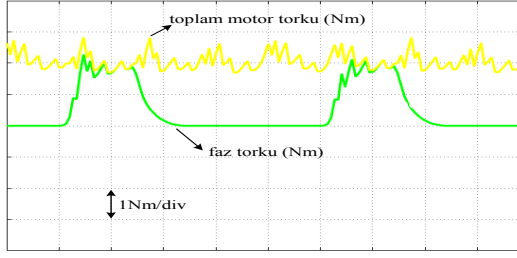
Şekil 7.18. Tip IV'den Elde Edilen Deneysel Sonuçlar (2Nm,2000 d/d, m=10, Doğrusal olmayan TPF) a) Hız, Faz pozisyonu,Referans Faz Torku, Referans Faz Akımı b) Referans Faz Torkları c) Referans Faz Akımları d) Faz akımları e) Faz Torkları f) Toplam Tork ve Faz Torku

Şekil 7.19'de Tip III ve Tip IV'den elde edilen toplam tork ve faz torkunun performansları karşılaştırılmış ve elde edilen benzetim sonuçları verilmiştir. Şekil 7.19(a)'da Tip III- $m=0$ - Doğrusal TPF, 7.19(b)'de Tip III- $m=10$ - Doğrusal TPF, 7.19(c)'de Tip IV- $m=10$ - Doğrusal TPF, 7.19(d)'de Tip IV- $m=0$ - Doğrusal TPF, 7.19(e)'de Tip III- $m=0$ - Doğrusal Olmayan TPF, 7.19(f)'de Tip III- $m=10$ - Doğrusal Olmayan TPF, 7.19(g)'de Tip IV- $m=10$ - Doğrusal Olmayan TPF, 7.19(h)'de Tip IV- $m=0$ - Doğrusal Olmayan TPF grafikleri verilmiştir. Referans hız 2000 d/d ve referans faz torku 2Nm'dir. Herbir grafik için tork salınım değerleri ve tork generatör bölgesindeki maksimum değerleri önceki grafiklerde verilmiştir. Bu grafikler değerlendirildiğinde faz torku referansı olarak doğrusal TPF ve doğrusal olmayan TPF tercih edilmesinin tork salınımına kayda değer bir etkisi olmamıştır. Geleneksel TPF yöntemi olan Tip III ve önerilen TPF yöntemi olan Tip IV kıyaslandığında önerilen TPF yöntemi olan Tip IV' ün tork rıpilları daha fazla azalttığı görülmüştür. Generatör bölgesi çalışması dikkate alınmadığında tork rıpilllarının ve ortalama torkun arttığı , generatör bölgesi çalışması dikkate alındığında ise tork rıpilllarının ve ortalama torkun azaldığı gözlemlenmektedir.

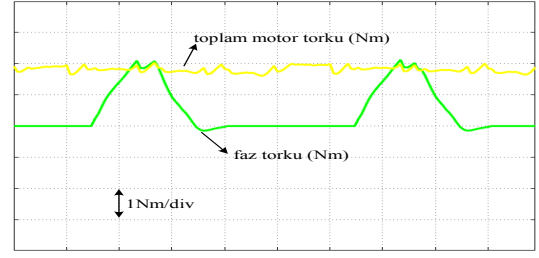
Şekil 7.20'de Tip III ve Tip IV'den elde edilen toplam tork ve faz torkunun performansları karşılaştırılmış ve elde edilen deneysel sonuçlar verilmiştir. Şekil 7.20(a)'da Tip III- $m=0$ - Doğrusal TPF, 7.20(b)'de Tip III- $m=10$ - Doğrusal TPF, 7.20(c)'de Tip IV- $m=10$ - Doğrusal TPF, 7.20(d)'de Tip IV- $m=0$ - Doğrusal TPF, 7.20(e)'de Tip III- $m=0$ - Doğrusal Olmayan TPF, 7.20(f)'de Tip III- $m=10$ - Doğrusal Olmayan TPF, 7.20(g)'de Tip IV- $m=10$ - Doğrusal Olmayan TPF, 7.20(h)'de Tip IV- $m=0$ - Doğrusal Olmayan TPF grafikleri verilmiştir. Referans hız 2000 d/d ve referans faz torku 2Nm'dir. Herbir grafik için tork salınım değerleri ve tork generatör bölgesindeki maksimum değerleri önceki grafiklerde verilmiştir. Bu grafikler değerlendirildiğinde faz torku referansı olarak doğrusal TPF ve doğrusal olmayan TPF tercih edilmesinin tork salınımına kayda değer bir etkisi olmamıştır. Geleneksel TPF yöntemi olan Tip III ve önerilen TPF yöntemi olan Tip IV kıyaslandığında önerilen TPF yöntemi olan Tip IV' ün tork rıpilları daha fazla azalttığı görülmüştür. Generatör bölgesi çalışması dikkate alınmadığında tork rıpilllarının ve ortalama torkun arttığı , generatör bölgesi çalışması dikkate alındığında ise tork rıpilllarının ve ortalama torkun azaldığı gözlemlenmektedir. Aşağıdaki çizelgede TipIII ve TipIV tork değerleri için benzetim ve deneysel sonuçlar verilmiştir.

	Benzetim Sonuçları	Deneysel Sonuçlar
Tip III-m=0-Doğrusal TPF	1.6 Nm-2.8Nm	1.6 Nm-3.1Nm
Tip III-m=0-Doğrusal Olmayan TPF	1.65 Nm-2.8Nm	1.5 Nm-3.2Nm
Tip IV-m=0-Doğrusal TPF	1.7 Nm-2.2Nm	1.7 Nm-2.5Nm
Tip IV-m=0-Doğrusal Olmayan TPF	1.7 Nm-2.2Nm	1.7 Nm-2.5Nm
Tip III-m=10-Doğrusal TPF	1.6 Nm-1.95Nm	1.5 Nm-2.1Nm
Tip III-m=10-Doğrusal Olmayan TPF	1.7 Nm-2.1Nm	1.5 Nm-2.1Nm
Tip IV-m=10-Doğrusal TPF	1.7 Nm-2.05Nm	1.7 Nm-2.05Nm
Tip IV-m=10-Doğrusal Olmayan TPF	1.7 Nm-2.05Nm	1.7 Nm-2.05Nm

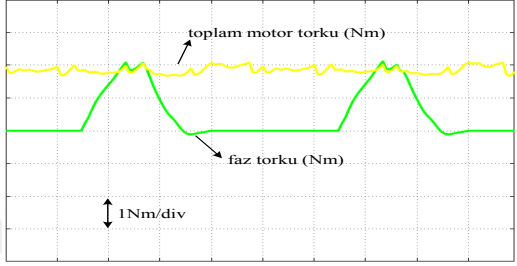
Çizelge 7.1 TipIII ve Tip IV için benzetim ve deneysel sonuçlar



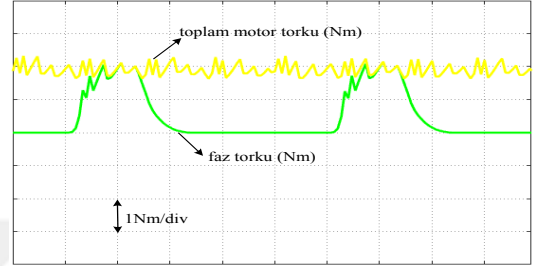
(a)



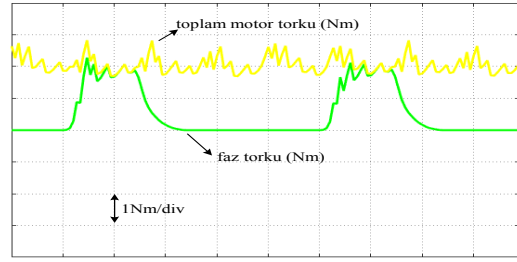
(b)



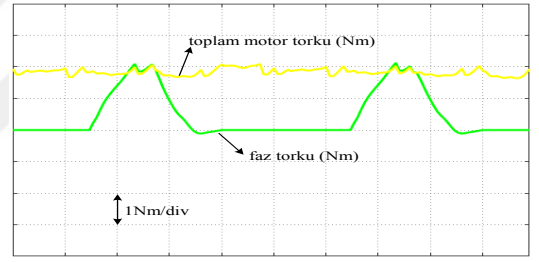
(c)



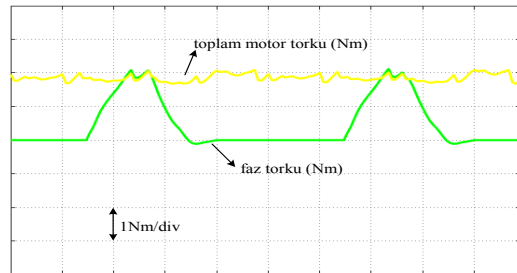
(d)



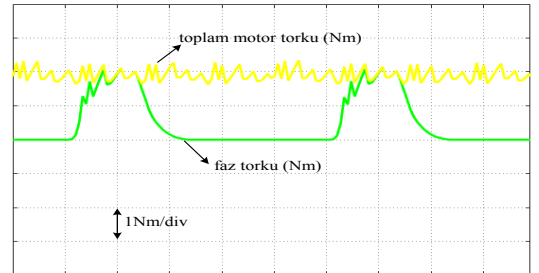
(e)



(f)



(g)

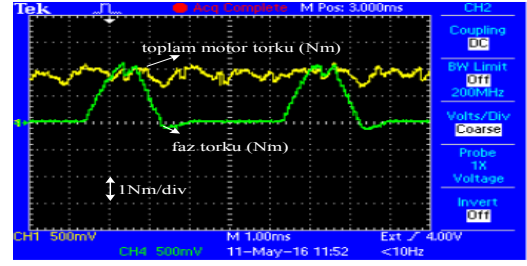


(h)

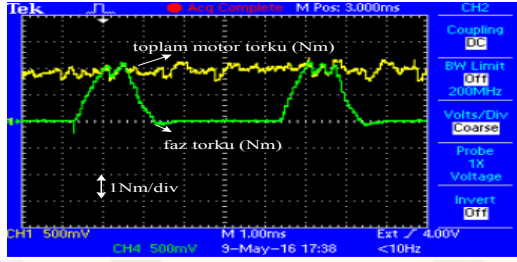
Şekil 7.19. 2 Nm ve 2000 d/d da Tip III ve Tip IV'den Elde Edilen Toplam Tork ve Faz Torku Benzetim Sonuçları a) Tip III- m=0- Doğrusal TPF b) Tip III- m=10- Doğrusal TPF c) Tip IV- m=10- Doğrusal TPF d) Tip IV- m=0- Doğrusal TPF e) Tip III- m=0- Doğrusal Olmayan TPF f) Tip III- m=10- Doğrusal Olmayan TPF g) Tip IV- m=10- Doğrusal Olmayan TPF h) Tip IV- m=0- Doğrusal Olmayan TPF



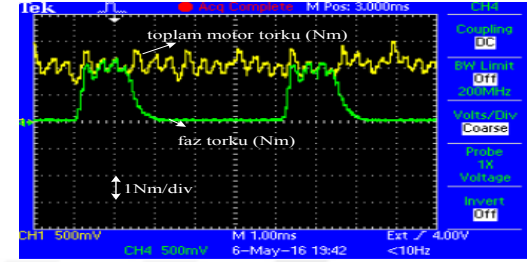
(a)



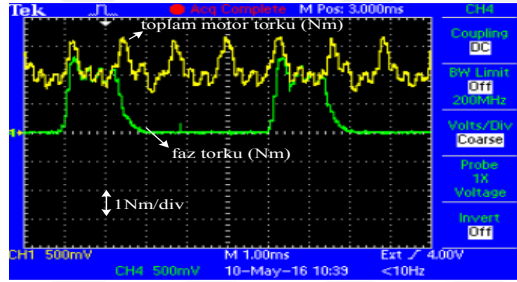
(b)



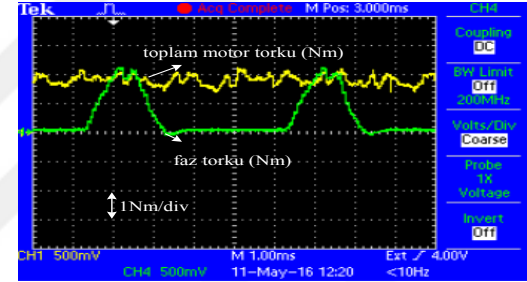
(c)



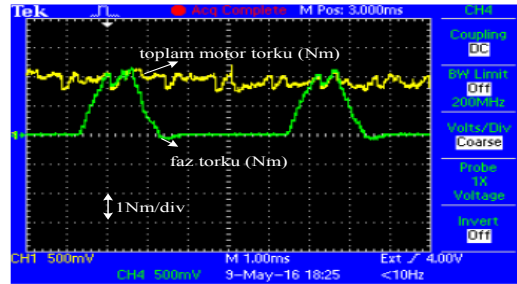
(d)



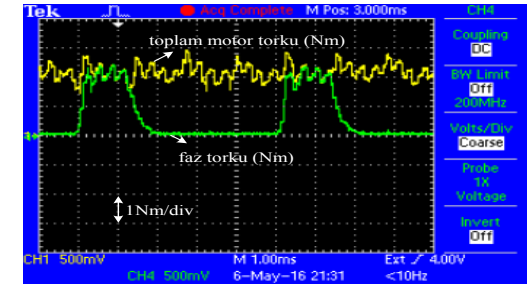
(e)



(f)



(g)



(h)

Şekil 7.20. 2 Nm ve 2000 d/d da Tip III ve Tip IV'den Elde Edilen Toplam Tork ve Faz Torku Deneyisel Sonuçları a) Tip III- m=0- Doğrusal TPF b) Tip III- m=10- Doğrusal TPF c) Tip IV- m=10- Doğrusal TPF d) Tip IV- m=0- Doğrusal TPF e) Tip III- m=0- Doğrusal Olmayan TPF f) Tip III- m=10- Doğrusal Olmayan TPF g) Tip IV- m=10- Doğrusal Olmayan TPF h) Tip IV- m=0- Doğrusal Olmayan TPF

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ilk olarak tork rıpıl minimizasyonu etkileyen faktörler incelenmiştir. Generatör bölgesi sınırlaması yapılması durumunda tork rıpıllarının arttığı görülmektedir. Klasik optimizasyon tekniği özellikle generatör bölgesi sınırlama durumunda yetersiz kaldığı açıkça görülmüştür. Önerilen 4 açılı optimizasyon yapısının tüm durumlarda klasik metotlara göre daha iyi performans verdiği gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde seçilen hız ve tork aralığında TPF tiplerinin ortalama benzer sonuçlar ürettiği ortadadır. Dolayısıyla tork rıpılın büyüklüğü belirleyen en önemli faktörlerden ikisi; generatör bölgesi sınırlaması ve tüm komutasyon açılarının optimizasyonudur.

Bu çalışma, bulanık mantık veya yapay sinir ağları ile komutasyon açılarının optimizasyonu yapılarak tekrarlanabilir. Akım ve akı profillerine önerilen 4 açılı yöntem uygulanabilir ve çalışmalar tekrarlanabilir.

9. KAYNAKLAR

Akçayol MA (2001) Bir Anahtarlamaalı Relüktans Motorun Sinirsel-Bulanık Denetimi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Akın M (1997) Türkiye'deki Enflasyonun Tahmini için Yapay Sinir Ağı ile Bir Uygulama, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.

Allahverdi N (2002) Uzman Sistemler- Bir Yapay Zeka Uygulaması, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul.

Altrock CV (1997) Fuzzy Logic and Neurofuzzy Applications in Business and Finance, Prentice Hall.

Anderson JA (1983) " Cognitive and Psychological Computation with Neural Models", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics SMC-13, 799-814.

Arumugam R, Lindsay JF, Krishnan R (1988) "Sensitivity of Pole Arc/Pole Pitch Ratio on Switched Reluctance Motor Performance", IEEE IAS Annual Meeting: 50-54

Bagley JD (1967) Behavior of Adaptive Systems Which Employ Genetic and Correlational Algorithms, University of Michigan.

Bal G (2004) Özel Elektrik Makinaları, Seçkin Yayıncılık, Ankara.

Bausch H. ve Reike B (1978) "Speed and Torque Control of Thyristor-Fed Reluctance Motors", Proceedings ICEM, 128:1-10.

Bay ÖF (1996) Anahtarlamaalı Relüktans Motorun Bulanık Mantık Tabanlı Modellenmesi ve Kontrolü, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

Bedford BD (1972) US Patent No:3678352 ve 3679953.

Carpenter GA ve Grossberg S (1988) " ART of Adaptive Pattern Recognition by A Self Organizing Neural", The Network Computers, 1:77-88.

Choi C, Kim S, Kim Y, Park K (2002) "A New Torque Control Method of a Switched Reluctance Motor Using a Torque-Sharing Function," IEEE Trans. On. Magnetic.,38(5):3288-3290.

Choi JYK, Yoon H S , Koh C S (2007) "Pole-Shape Optimization of a Switched-Reluctance Motor for Torque Ripple Reduction", IEEE Trans. On. Magnetic., 43(4):1797-1800.

Cui G ve Wong M L (2004) " Implementing Neural Networks for Decision Support in Direct Marketing", International Journal of Market Research,46:230-250.

Çetin A. (2001) Bir Anahtarlmalı Relüktans Motorun Hibrid Gözlemci İle Pozisyon Algılayıcısız Çalıştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Çınar MA (2008) Elektrikli Taşıtın Tekerlek Tahriği İçin Geliştirilen Dış Rotorlu Anahtarlmalı Relüktans Motor Tasarımı ve Analizi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Darwin C (1859) " On the Origin of Species by Means of Natural Selection or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life, John Murray, London, Modern Reprint Charles Darwin, Julian Huxley, On The Origin of Species Signet Classics, ISBN 0-451-52906-5.4

Demirkoparan A (2010) Zaman Serisi Analizinde Esnek Hesaplama Yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sivas.

Derdiyok A (1997) Anahtarlmalı Relüktans Motorun Doyma Modelinde Ortak Endüktans Etkilerinin incelenmesi ve Bulanık ve Kayan Kipli Denetleyicilerle moment Dalgalanmasının Azaltılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Dikmen İ (2001) "Strategic Decision Making in Construction Companies: An Artificial Neural Networks Based Decision Support System for International Market

Selection", Doktora tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Diril O (1999) Anahtarlamaalı Relüktans Motorda Moment Dalgalılığını Enazlama Üzerine Bir Çalışma, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Doğan A (2002) Yapay Zeka, 1 Baskı, Kariyer Yayıncılık, İstanbul.

Duran F (2008) Endüstriyel Çamaşır Makinelerinde Anahtarlamaalı Relüktans Motor Kullanımı ve Sistemin Zeki Denetimi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Durmuş O (1994) Anahtarlı Relüktans Motorunun Tasarımı, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Elmas Ç (2003) Bulanık Mantık Denetleyiciler: Kuram, Uygulama, Sinirsel Bulanık Mantık, Seçkin Yayıncılık, Ankara.

Elmas, Ç (2003) Yapay Sinir Ağları. Seçkin Yayıncılık, Ankara.

Elmas Ç (2007) Yapay Zeka Uygulamaları/ Yapay Sinir Ağları-Bulanık Mantık-Genetik Algoritma, 1.Baskı, Seçkin Yayıncılık, Ankara.

Elmas Ç ve De La Parra HZ (1992) "A DSP Controlled Switched Reluctance Drive System for Wide Range of Operating Speeds", IEEE PESC'92: 844-850.

Emel GG ve Taşkın Ç (2002) "Genetik Algoritmalar ve Uygulama Alanları", Uludağ Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi Cilt XXI, 1:129-152.

Farley BG ve Clark WA (1954) " Simulation of Self-Organizing Systems by Digital Computer", Transactions of the IRE Professional Group on Information Theory, 4(4):76-84.

Fausett L (1994) Fundamentals of Neural Networks: Architectures Algorithms and Applications, Prentice Hall, New Jersey,1994.

Fenercioğlu A (2006) Helisel Yapılı Anahtarlamaalı Relüktans Motorun (HY-ARM) Tasarımı Ve Analizi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Goldberg DE (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts.

Goldberg DE ve Miller J (1995) "Genetic Algorithms, Tournament Selection, and the Effects of Noise", Complex Systems, 9(3):193-212.

Görz G ve Nebel B (2005) Yapay Zeka, İnkılap Kitabevi, İstanbul.

Güvenç U (2005) Anahtarlmalı Relüktans Motorun Denetimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Haykin S (1999) Neural Networks: A Comprehensive Foundation, Second Edition, Prentice Hall, New Jersey.

Hebb DO (1949) The Organization of Behavior, Willey, New York.

Holland JH (1975) Adaptation in Natural and Artificial Systems, The University of Michigan Press, USA

Hopfield JJ (1982) "Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities", Proc. Natl. Acad. Sci, 79:2554-2558.

Husain I (2002) "Minimization of Torque Ripple in SRM Drives," IEEE Trans. Ind. Electron., 49(1):28-39.

Husain I ve Ehsani M (1996) "Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives by PWM Current Control", IEEE Trans. On Power Electronic., 11(1):83-88.

Ikeuchi T, Ikkai Y, Araki D, Ohkawa T, Komoda N (1998) " Project Scheduling Using a Genetic Algorithm with Adaptable Changing Genetic Operators", Electrical Engineering in Japan, 124(2):36-42.

Ilic'-Spong M, Marino R, Peresada S, Taylor DG (1987) "Feedback Linearizing Control of A Switched Reluctance Motors", IEEE Trans Automatic Control, AC-32:371-9.

Islam MS ve Husain I (2000) "Torque-Ripple Minimization with Indirect Position and Speed Sensing for Switched Reluctance Motors", IEEE Trans. Ind. Electron., 47(5):1126-1133.

İnanç N (1996) Anahtarlamaalı Relüktans Motorun Modellenmesi ve Yeni Kontrol Teknikleri ile Denetimi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Karagöz F (2009) Mikrodenetleyici Kontrollü Anahtarlamaalı Relüktans Motorların Tasarımı ve Marş Motoru Olarak Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

Kayıkçı Ş (2014) Web Sayfalarının Yapay Sinir Ağları ile Sınıflandırılması, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.

Kohonen T (1982), Self-Organized Formation of Topologically Correct Feature Maps", Biological Cybernetics, 43:59-69.

Kohonen T (1988) " An Introduction to Neural Computing", Neural Networks,1:30-38

Krishnan R (2001) Switched Reluctance Motor Drives, Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications, CRC Press, London.

Krishnan R, Arumugam R, Lindsay JF (1988) " Design Procedure For Switched-Reluctance Motors", 24(3):456-461.

Lawrenson PJ, Stephenson JM , Blenkinsop PT, Corda J, Fulton NN, (1980) "Variable-Speed Switched Reluctance Motors", IEE Proc.,253-265.

Lee DH, Lee ZG , Liang J, Ahn JW (2007) "Single-Phase SRM Drive With Torque Ripple Reduction and Power Factor Correction", IEEE Trans. Ind. Applications, 43(6):1578-1587.

Lee JW, Kim HS, Kwon BI, Kim BT (2004) "New Rotor Shape Design for Minimum Torque Ripple of SRM Using FEM", IEEE Trans. On. Magnetic,40(2):754-757.

Lee DH, Pham TH, Ahn JW (2013) "Design and Operation Characteristics of Four-Two Pole High-Speed SRM for Torque Ripple Reduction", IEEE Trans. Ind. Electron, 60(9):401-413.

Lin Z , Reay DS, Williams BW , He X (2006) "Torque Ripple Reduction in Switched Reluctance Motor Drives Using B-Spline Neural Networks", IEEE Trans. Ind. Applications, 42(6)::1445-1453.

Lin Z, Reay DS, Williams BW, He X (2007), " Online Modeling for Switched Reluctance Motors Using B-Spline Neural Networks", IEEE Trans. Ind. Electron, 54(6):3317-3322.

Lu W, Keyhani A, Fardoun A (2003) " Neural Network-Based Modeling and Parameter Identification of Switched Reluctance Motor " IEEE Trans.Energy Conversions, 18(22):284-290.

Miller TJE (1993) Switched Reluctance Motors and Their Control, Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford.

Mir S, Elbuluk ME, Husain I (1999) "Torque-Ripple Minimization in Switched Reluctance Motors Using Adaptive Fuzzy Control", IEEE Trans. Ind. Electron., 35(2):461-468.

Mitchell M (1996) An Introduction to Genetic Algorithms, MIT Press.

Mutlu Ü (2006) Anahtarlmalı Relüktans Motor Sürücü Devre Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Nasar SA ve Ofsenani R D C (1969) " Switched Reluctance Motor" In Proceedings of the Institution Electrical Engineers,116(6):1048-1969.

Omaç Z (2006) Yeni Bir Anahtarlmalı Relüktans Motorun Tasarımı ve Akım Kontrolü, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Onduk A (2002) Güç Jeneratörlerinin Yapay Sinir Ağlarıyla Denetimi, Doktora Tezi, Yıldız Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Önder E (2004) Yapay Sinir Ağları ve Uygulamaları, Boğaziçi Üniversitesi Yayınları, İstanbul.

Özbulur V (1996) Anahtarlmalı Relüktans Motorun Moment Dalgılanmasının Azaltılması, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Özoğlu Y (1999) Anahtarlmalı Relüktans Motorunda Kutup Başlarına Şekil Vererek Moment Dalgalanmasının Azaltılması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Öztemel E (2006) Yapay Sinir Ağları, 2. Baskı, Papatya Yayıncılık, İstanbul.

Öztürk A (2007) Güç Sistemlerinde Gerilim Kararlılığının Genetik Algoritma İle İncelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Paksoy S (2007), Genetik Algoritma ile Proje Çizelgeleme, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Adana.

Pollock C ve Williams BH (1989) “The Design Performance of Multiphase Switched Reluctance Drive, EPE’89,Aachen:29-34.

Polloc C ve Williams BW (1990) “Power Converter Circuits for Switched Reluctance Motors with the Minimum Number of Switches”, IEE Proccedings, 137(6):374-384.

Rodrigues M, Branco PJC, Suemitsu W (2001) “Fuzzy Logic Torque Ripple Reduction by Turn-Off Angle Compensation for Switched Reluctance Motors”, IEEE Transactions of Industrial Electronics:711-714

Rumelhart DE (1990) " Brain Style Computation Learning and Generalization", In An Introduction to Neural and Electronics Networks,420-437.

Rumelhart DE, Hinton GE, Williams RJ (1986) " Learning Representations by Back Propagation Error", Nature, 32:533-536.

Russell SJ ve Norvig P (2003) “Artificial Intelligent, A Modern Approach”, Second Edition, Prentice Hall, Oxford.

Sefa İ (1997) Sliding Mode Yaklaşımı ile Anahtarlmalı Relüktans Motorun Hız Kontrolü, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

Sezen S (2006) Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile Analizi Yapılmış Yüksek Güçlü Anahtarlmalı Relüktans Motorun Yeni Bir Bulanık Mantık Algoritması Kullanılarak Hız Denetimi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Shaked NT ve Rabinovici R (2005) “New Procedures for Minimizing the Torque Ripple in Switched Reluctance Motors by Optimizin the Phase-Current Profile”, IEEE Trans. On Magnetic, 41(3):1184-1192.

Shang C, Reay D, Williams B (1999) “Adapting CMAC Neural Networks with Constrained LMS Algorithm for Efficient Torque Ripple Reduction in Switched Reluctance Motors”, IEEE Trans. Ind. Electron, 7(4):401-413.

Shapiro AF ve Jean LC (2003) Intelligent and Other Computational Techniques in Insurance, World Scientific Publishing, USA.

Stankovic AM, Tadmor G, Coric ZJ, Ağırman İ (1999) “On Torque Ripple Reduction in Current-Fed Switched Reluctance Motors", IEEE Trans. Ind. Electron., 46(1):177-183.

Şeker T (2008) Düzlemsel Çelik Çerçevelerin Genetik Algoritma ile Optimizasyonu, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Şen Z (2004) Yapay Sinir Ağları İlkeleri, Su vakfı Yayınları, İstanbul.

Torrey DA ve Lang JH (1990) "Modelling A Nonlinear Variable Reluctance Motor Drive", IEE 548 Proc.,137-B(5):314–26.

Turan Ö (2007) Turbofan Motorlarının Elitizmlı Genetik Algoritma Yöntemiyle Optimizasyonu, Yüksek lisans tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Unnewehr LE ve Koch WH (1975) “An Axial Air-Gap Reluctance Motor for Variable Speed Applications", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 93:367-376.

Ustun O (2009) "A Nonlinear Full Model Of Switched Reluctance Motor with Artificial Neural Network", IEEE Transaction on Energy Conversion, 50:241-2421.

Ustun O (2009) " Anahtarlmalı Relüktans Makinaların Akı ve Endüktans Ölçüm Methotlarının İncelenmesi", SDU International Journal of Technologic Sciences, 1(2):21-23.

Ustun O (2009) “Genetik Algoritma Kullanılarak İleri Beslemeli Bir Sinir Ağında Etkinlik Fonksiyonlarının Belirlenmesi”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15(3),:225-234, 2009.

Ustun O ve Yıldız İ (2009) “Geri-Yayılmalı Öğrenme Algoritmasındaki Öğrenme Parametrelerinin Genetik Algoritma İle Belirlenmesi”, SDU International Journal of Technologic Sciences, 1(2): 61-73, 2009.

Ustun O (2014) " Elektrik Makinalarının Modellenmesi ve Simülasyonu Ders Notları", Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bolu.

Ustun O (2015) " Elektrik Makinalarının Gerçek Zamanlı Kontrolü Ders Notları", Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bolu.

Ustun O (2016) " Genetik Tabanlı Geleneksel Denetleyicilerle Anahtarlama Relüktans Motorun Pozisyon Takip kontrolü", SDU International Journal of Technologic Sciences, 8(1):21-23.

Yapıcı M M (2012) Genetik Algoritma Kullanarak Ders Çizelgeleme Yazılımının Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü, Ankara.

Ye J, Bilgin B, Emadi A (2015) " An Extended-Speed Low-Ripple Torque Control of Switched Reluctance Motor Drives”, IEEE Trans. Ind.On Power Electron, 30(3):1457-1470.

Ye J, Bilgin B, Emadi A (2015) “An Offline Torque Sharing Function for Torque Ripple Reduction in Switched Reluctance Motor Drives”, IEEE Trans. On Energy Conversion.,30(2):726-735.

Yıldız İ (2013) Anahtarlama Relüktans Motorun Genetik Bulanık Mantık Denetleyici İle Nonlineer Hız ve Konum Denetimi, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Yiğit T (2005) Genetik Uyarlamalı Denetleyici İle Anahtarlama Reluktans Motorun Hız Denetiminin Gerçekleştirilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Xilian W, Yihuang Z, Huaijuan L, Hui H (2005) "Nonlinear Modeling Of Switched Reluctance Motor Based On Combination Of Neural Network And Genetic Algorithm", ICEMS:572-574.

Xue XD, Cheng KWE, Ho SL (2009) "Optimization and Evaluation of Torque-Sharing Functions for Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives," IEEE Trans. Ind.On Power Electron", 24(9):2076-2090.

Xu JX, Panda SK, Zieng Q (2002) " Multiobjective Optimization Of Current Waveforms For Switched Reluctance Motors By Genetic Algorithm", Congress on Evolutionary Computation:1860-1865.

Widrow B ve Hoff ME (1960) " Adaptive Switching Circuits", Information Systems Laboratory:97-104

Wong KF, Cheng KWE, Ho SL (2009) "On-Line Instantaneous Torque Control of a Switched Reluctance Motor Based on Co-Energy Control", IET Electric Power Applications.,3(4):257-264.

10. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mithat ÖNDER

Doğum Yeri ve Tarihi : Yenimahalle-21.07.1988

Lisans Üniversite : Ankara Üniversitesi-Elektronik Mühendisliği

Elektronik posta : ondermithat@hotmail.com