

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN GENETİK
BULANIK MANTIK KULLANILARAK TORK RİPİL
MİNİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MURAT ARSLAN

BOLU, HAZİRAN - 2020

KABUL VE ONAY SAYFASI

Murat ARSLAN tarafından hazırlanan “**Anahtarlamalı Relüktans Motorun Genetik Bulanık Mantık Kullanılarak Tork Rıplı Minimizasyonu**” adlı tez çalışması Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda 30.06.2020 tarihinde savunularak **Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü** tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Danışman
Prof. Dr. Oğuz ÜSTÜN
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Üye
Prof. Dr. Erdal BEKİROĞLU
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Üye
Prof. Dr. Uğur GÜVENÇ
Düzce Üniversitesi

İmza

.....

.....

.....

Prof. Dr. Osman GÖRÜR.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



Aileme,

ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim 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.

Murat ARSLAN

ÖZET

**ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN GENETİK BULANIK
MANTIK KULLANILARAK TORK RİPİL MİNİMİZASYONU
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MURAT ARSLAN
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. OĞUZ ÜSTÜN)
BOLU, HAZİRAN - 2020**

Bu tezde anahtarlamalı relüktans motorda (ARM) genetik bulanık mantık ile tork rıpıl minimizasyonu üzerinde incelemeler yapılmıştır. Tork rıpıl minimizasyonu enerji verimliliğini göz önünde bulundurarak tork kontrolü ile gerçekleştirilmektedir. Tork kontrolünde tork paylaşım fonksiyonları (TPF) kullanılmıştır. TPF'nin tork rıpıl minimizasyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Buradaki TPF'de geleneksel yöntemlerin aksine iletme geçme açısı, yükselme açısı, düşme açısı, kesim açısının tork rıpıllara etkisi incelenmiştir. Tork rıpıl azaltılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda ARM'nin akı-akım-pozisyon ve tork-akım-pozisyon verileri ANSYS programı ile sonlu elemanlar methodu (SEM) kullanılarak farklı sarım sayılarında elde edilmiştir. Buradan elde edilen veriler kullanılarak, genetik – yapay sinir ağları yardımıyla ARM'nin modeli çıkartılmıştır. Bu model yardımı ile ARM'nin endüktans karakteristiği incelenmiştir. Bu incelemeler doğrultusunda sarım sayısını arttırmanın avantajları gözlemlenmiştir. Sonrasında motorun tork sürme sistemi için yeni bir yaklaşım olan genetik – bulanık mantık önerilmiş ve tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan bu yapının bilgisayar üzerinde simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bulanık Mantık'ın (BM) tork ve akı kural tabanları Genetik Algoritmalar (GA) ile belirlenmiştir. Önerilen yöntem ile üç açılı ve dört açılı olarak farklı hız ve torklarda simülasyonları yapılmıştır. Bu simülasyonların sonucunda önerilen dört açılı genetik fuzzy optimizasyon tekniği kullanıldığında geniş tork ve hız aralıklarında geleneksel yöntemlere göre tork rıpıllarının azaldığı açıkça görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELER: Anahtarlamalı relüktans motor, Genetik algoritma, Yapay sinir ağları, Bulanık mantık, Sonlu elemanlar methodu, Tork rıpıl minimizasyonu

ABSTRACT

**TORQUE RIPPLE MINIMIZATION OF A SWITCHED RELUCTANCE
MOTOR BY USING GENETIC FUZZY LOGIC
MSC THESIS
MURAT ARSLAN
BOLU ABANT IZZET BAYSAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
(SUPERVISOR: PROF. DR. OĞUZ ÜSTÜN)
BOLU, JUNE 2020**

Torque ripple minimization has been investigated by using with genetic fuzzy logic algorithm of switched reluctance motor (SRM) drive. Torque ripple minimization has been utilized to enable the energy efficiency. Torque sharing function (TSF) has been used in torque control. Torque ripple minimization has been examined on the effects of TSF. Turn on angle, rising angle, falling angle, turn of angle affect the torque ripple. SRM's flux-current-position and torque-current-position data has been obtained by using the finite element method (FEM). SRM's model has been created with the help of genetic - artificial neural networks. Inductance characteristic of SRM has been examined with this model. We have seen the advantages of increasing the number of turns. Genetic - fuzzy logic controller is proposed for the motor's torque drive system. Torque and flux rule bases of Fuzzy Logic has determined with Genetic Algorithms (GA). Three-angle and four-angle simulations have done with the proposed method. As a result, the torque ripple has been reduced by using the proposed four-angle genetic fuzzy optimization technique.

KEYWORDS: Switched reluctance motor, Genetic algorithm, Artificial neural network, Fuzzy logic, Finite element method, Torque ripple minimization

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xii
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	xiii
TEŞEKKÜR	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTOR.....	9
2.1 ARM'nin Temel Yapısı	9
2.2 ARM'nin Çalışma Prensibi	10
2.3 ARM'nin Eşdeğer Devresi	12
2.4 ARM'de Tork ve Akı Profillerinin Elde Edilmesi	13
3. YAPAY ZEKÂ TEKNİKLERİ.....	14
3.1 Yapay Sinir Ağları	14
3.1.1 YSA'nın Tarihçesi	14
3.1.2 YSA'nın Avantajları ve Dezavantajları	15
3.1.3 YSA'nın Uygulama Alanları.....	16
3.1.4 Yapay Sinir	16
3.1.5 YSA'ların Sınıflandırılması	18
3.1.5.1 YSA'larda yapılarına göre sınıflandırma	18
3.1.5.1.1 İleri beslemeli ağlar	19
3.1.5.1.2 Geri beslemeli ağlar	19
3.1.5.2 YSA'larda öğrenme algoritmasına göre sınıflandırma	19
3.1.5.2.1 Danışmalı öğrenme	19
3.1.5.2.2 Danışmasız öğrenme.....	19
3.1.6 Öğrenme Kuralları	20
3.1.6.1 Hebb kuralı	20
3.1.6.2 Hopfield kuralı	20
3.1.6.3 Delta kuralı	20
3.1.6.4 Kohonen öğrenme kuralı	20
3.2 Bulanık Mantık	21
3.2.1 Bulanık Mantık Denetleyici Özellikleri	22
3.2.2 Bulanık Mantık Denetleyici Yapısı.....	23
3.2.2.1 Bulanıklaştırma	24
3.2.2.1.1 Gaussian üyelik fonksiyonu.....	24
3.2.2.1.2 Pi (π) üyelik fonksiyonu	25
3.2.2.1.3 Üçgen üyelik fonksiyonu	25
3.2.2.1.4 Sigmoid üyelik fonksiyonu.....	26
3.2.2.1.5 Yamuk üyelik fonksiyonu.....	26

3.2.2.2	Bilgi Tabanı.....	26
3.2.2.3	Karar Verme.....	27
3.2.2.4	Durulaştırma.....	27
3.2.3	Bulanık Mantık Denetleyici Tasarımı.....	28
3.3	Genetik Algoritma.....	29
3.3.1	GA'ların Uygulama Alanları.....	30
3.3.2	GA'ların Avantajları ve Dezavantajları.....	30
3.3.3	GA'nın Çalışma Prensipleri.....	31
3.3.4	GA'nın Temel Yapısı.....	32
3.3.4.1	Gen.....	32
3.3.4.2	Kromozom.....	33
3.3.4.3	Popülasyon.....	33
3.3.4.4	Kodlama.....	33
3.3.4.5	Başlangıç popülasyonunun oluşturulması.....	34
3.3.4.6	Uygunluk değeri.....	34
3.3.4.7	Seçim.....	34
3.3.4.7.1	Sıralı seçim yöntemi.....	35
3.3.4.7.2	Rulet tekniği seçim yöntemi.....	35
3.3.4.7.3	Turnuva seçim yöntemi.....	36
3.3.4.8	Üreme.....	36
3.3.4.8.1	Çaprazlama operatörü.....	36
3.3.4.8.2	Mutasyon operatörü.....	36
3.3.4.8.3	Elitizm.....	37
4.	ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN TORK RİPİL MİNİMİZASYONU İÇİN GENETİK BULANIK MANTIK SÜRME SİSTEMİ.....	38
4.1	ARM Tork Karakteristikleri.....	40
4.1.1	ARM'nin sonlu elemanlar methodu ile analizi.....	41
4.1.2	YSA kullanılarak ARM'nin modellenmesi.....	44
4.1.2.1	İleri yayımlı öğrenme algoritması.....	44
4.1.2.2	Geri yayımlı öğrenme algoritması.....	46
4.2	Faz Pozisyon üretici ve sıralayıcı.....	49
4.3	Histeresis Band PWM.....	50
4.4	Tork Denetimi İçin Genetik Algoritma Yapısı.....	51
5.	GENETİK BULANIK MANTIK İLE TORK PAYLAŞIM FONKSİYONLARININ OPTİMİZASYONU.....	53
5.1	Tork Paylaşım Fonksiyonları.....	53
5.2	Bulanık Mantık Denetleyici.....	55
5.3	GA'nın Tasarımı.....	58
6.	BENZETİM SONUÇLARI.....	61
7.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	88
8.	KAYNAKLAR.....	90
9.	ÖZGEÇMİŞ.....	98

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. 8/6 ARM Motor (Üstün, 2009).....	11
Şekil 2.2. ARM'nin Eşdeğer Devresi (Üstün, 2009).....	13
Şekil 3.1. Yapay Sinir Yapısı.....	17
Şekil 3.2. Sinir Ağı Mimarisi.....	18
Şekil 3.3. Bulanık Mantık Denetleyicinin Temel Yapısı.....	22
Şekil 3.4. Giriş Üyelik İşlevleri (Yıldız, 2013).....	24
Şekil 3.5. Çıkış Üyelik İşlevi.....	28
Şekil 3.6. Genetik Algoritma Akış Şeması (Üstün vd., 2020).....	32
Şekil 3.7. Gen, Kromozom ve Popülasyon Yapısı.....	33
Şekil 4.1. 8/6 ARM Üst Görünüş.....	38
Şekil 4.2. 8/6 ARM Yan Görünüş.....	38
Şekil 4.3. 8/6 ARM 3 Boyutlu Görünüş.....	39
Şekil 4.4. ARM Sürme Sistemi.....	39
Şekil 4.5. 8/6 ARM.....	43
Şekil 4.6. Akı Tahminci İçin Sinir Ağı Mimarisi.....	44
Şekil 4.7. 8/6 ARM $T-i-\theta$ Karakteristiği.....	48
Şekil 4.8. 8/6 ARM $\phi-i-\theta$ Karakteristiği.....	49
Şekil 4.9. ARM Faz Pozisyon Değişimleri.....	50
Şekil 5.1. Tork Paylaşım Fonksiyonları (Önder vd., 2019).....	53
Şekil 5.2. Bir Faza Ait TSF'nin Grafikselsel Gösterimi.....	54
Şekil 5.3. Giriş Değişkenlerine Ait Üyelik Fonksiyonları a) Hız b) Tork.....	55
Şekil 5.4. Çıkış Değişkenlerine Ait Üyelik Fonksiyonları (a) θ_{on} (b) θ_{rise} (c) θ_{fall} ve (d) θ_{off}	57
Şekil 5.5. Kromozom Yapısı.....	59
Şekil 6.1. 84 Sarım 2 A-20 A Tork-Pozisyon Grafiği.....	61
Şekil 6.2. 84 Sarım 2 A-20 A Akı-Pozisyon Grafiği.....	62
Şekil 6.3. Üç Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (0.5 Nm,500 d/d) 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.....	63
Şekil 6.4. Üç Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (0.5 Nm,1000 d/d) 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.....	64
Şekil 6.5. Üç Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (0.5 Nm,2000 d/d) 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.....	65
Şekil 6.6. Üç Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (1 Nm,500 d/d) 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.....	67

Şekil 6.7. Üç Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (1 Nm,1000 d/d) 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	68
Şekil 6.8. Üç Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (1 Nm,2000 d/d) 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	69
Şekil 6.9. Üç Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (2 Nm,500 d/d) 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 6.10. Üç Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (2 Nm,1000 d/d) 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	72
Şekil 6.11. Üç Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (2 Nm,2000 d/d) 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 6.12. Dört Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (0.5 Nm,500 d/d) 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	75
Şekil 6.13. Dört Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (0.5 Nm,1000 d/d) 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 6.14. Dört Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (0.5 Nm,2000 d/d) 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	78
Şekil 6.15. Dört Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (1 Nm,500 d/d) 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 6.16. Dört Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (1 Nm,1000 d/d) 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	81
Şekil 6.17. Dört Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (1 Nm,2000 d/d) 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 6.18. Dört Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (2 Nm,500 d/d) 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	84
Şekil 6.19. Dört Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (2 Nm,1000 d/d) 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 6.20. Dört Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (2 Nm,2000 d/d) 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	87



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Kural Tablosu.....	27
Çizelge 4.1. 8/6 ARM Elektriksel Parametreleri.....	43
Çizelge 4.2. 8/6 ARM Geometrik Parametreleri.....	43
Çizelge 5.1. Kural Tabanı Tabloları (a) θ_{on} (b) θ_{rise} (c) θ_{fall} ve (d) θ_{off}	56

KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

ARM	: Anahtarlama Relüktans Motor
BM	: Bulanık Mantık
DA	: Doğru Akım
EMK	: Elektromotor Kuvvet
GA	: Genetik Algoritma
GBM	: Genetik Bulanık Mantık
NB	: Negatif Büyük
NK	: Negatif Küçük
PB	: Pozitif Büyük
PK	: Pozitif Küçük
PWM	: Darbe Genlik Modülasyonu
SEM	: Sonlu Elemanlar Methodu
TPF	: Tork Paylaşım Fonksiyonu
YSA	: Yapay Sinir Ağları
e_{ω}	: Hız Hatası
i_j^*	: Referans Faz Akımları
i_j	: Faz Akımları
L	: Endüktans
N_r	: Rotor Kutup Sayısı
N_s	: Stator Kutup Sayısı
P^{ψ}	: Ağ Girişi
R^{ψ}	: Gizli Katman
R_m	: Ölçüm Direnci
R_s	: Stator Faz Direnci
S^{ψ}	: Gizli Katman
T^{ψ}	: Çıkış Katmanı
T^*	: Referans Tork
ω_e	: Motorun Elektriksel Hızı
ω^*	: Referans Hız
ω	: Mekanik Hız
θ_{on}	: İletime Geçme Açısı
θ_{rise}	: Yükselme Açısı
θ_{flat}	: Düz Bölge
θ_{fall}	: Düşme Açısı
θ_{off}	: Kesim Açısı
θ_j	: Faz Pozisyonları
θ_p	: Komutasyon Açılarının Toplamı
θ_s	: Stator Kutup Açısı

θ_r	: Rotor Kutup Açısı
θ_{step}	: Rotor Adım Açısı
λ	: Bir Fazın Akı Bağıntısı
ψ	: Akı



TEŞEKKÜR

Bana bu tez çalışmasını yapma fikri veren, tez süresince zaman ayırarak engin bilgi, tecrübe 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 her aşamada yanımda olan ve hiçbir desteğini esirgemeyen hocam Sayın Arş. Gör. Mithat ÖNDER'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Desteklerinden dolayı Sayın Prof. Dr. Erdal BEKİROĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Bu günlere ulaşmamı sağlayan ve her durumda yanımda olup maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen annem Ayşe ARSLAN'a, babam Erol ARSLAN'a ve abim Cihan ARSLAN'a teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Anahtarlamaalı relüktans motor (ARM), rotor konumu değışmesi ile birlikte hava aralığının değışmesinden dolayı meydana gelen relüktansın değışimi ile çalışan değışken relüktanslı motordan gelir (Yıldız, 2013).

Değışken relüktanslı motorlar yapıları gereği direkt kaynağa bağlı olarak çalışamazlar. Çalışmaları için sürme sistemine ihtiyaçları vardır. Anahtarlamaalı relüktans motor ifadesi değışken relüktansmotor ve sürme sistemini birlikte içerdđi için böyle adlandırılmıştır (Bal, 2004).

Elektromanyetik alan teorisi nedeni ile relütans motorun çalışması rotor ve statorun meydana getirdđi manyetik akının minimum relüktansa doğru ilerlemesi prensibine dayanır. Davidson ilk olarak ARM'yi 1838 yılında tren lokomotifinde kullanmıştır (Miller, 2001). W.H. Taylor ise 19. yy başında ilk relüktans motoru yapmıştır (Polloc and Williams, 1990).

Taylor'ın relüktans motoru, rotor diye düşünebileceğimiz tahta tekerlek etrafında yedi adet demir parçası ve stator diye düşünebileceğimiz dört adet elektrik akımı kullanılarak demirden elde edilen elektromıknatıstan meydana gelmektedir. Elektromıknatıs enerjilendirildiğinde kendisine en yakın demir parçasını yüze yüz olarak kendine çekecektir. Anahtarlama mekanizması sayesinde ise rotorda dönüş meydana getirilmiş ve relüktans etki ile bir motor oluşturulmuştur ve bu motor günümüzdeki anahtarlamaalı relüktans motora benzemektedir (Elmadı, 2005).

Günümüzde ARM'ler Otomotiv, Madencilik, Tekstil, Enerji üretim sektörlerinde başta olmak üzere süpürgeler, buzdolapları, çamaşır makineleri, uzay araçları, yazıcılar, trenler, elektrikli arabalar v.b birçok cihazda sıklıkla kullanılmaktadır (Özoğlu, 1999).

ARM'lerin günümüzde kullanımı hızla artmaktadır çünkü diğer motor çeşitlerine göre birçok avantajları vardır bunlara bakacak olursak;

- ARM'nin rotorunda sargı veya mıknatıs bulunmamasından dolayı sargı kayıpları yoktur. Bu nedenle üretim ve bakım ücretleri oldukça azdır.
- Sargı kayıpları az nedeni ile verimi oldukça yüksektir.
- Statordeki sargılar karşılıklı kutuplara seri bağlı olarak sarılmış ve yapıları oldukça basittir.
- ARM'de tork üretimi DC seri motora benzerliğinden ötürü faz akımının karesi ile değişkenlik gösterir.
- Motorun yüksek hızlarda çalışmasının nedeni rotorunda sargı ve fırça yapısının olmamasıdır.
- Sürme sisteminde stator fazlarının her birinin bağımsız çalışması nedeni ile kısa devre meydana gelmez.

ARM'lerin dezavantajlarına bakacak olursak;

- Lineer bir yapıya sahip değildir.
- Sürme sistemine ihtiyaçları vardır.
- Düşük devirlerde tork rıpıl fazla olması nedeniyle gürültü ve salınım meydana gelir. Buda motordaki mekanik bileşenlerde yıpranmaya neden olur.
- Rotor konumunun bilinmesinin zorluğundan dolayı konum sensörüne ihtiyaç vardır dolayısıyla maliyet artışına neden olur (Önder, 2016).

ARM'ler endüstriyel kullanımlarda performansı, sağlamlığı, basitliği ve maliyetinin ucuzluğu nedeniyle sıklıkla tercih sebebi olmaktadır (Lawrenson et al., 1980)

1970'li yıllardan sonra yarı iletken teknolojisinin gelişimi ile birlikte istenilen güçlerde ARM'lerin üretilmesi nedeniyle motora olan ilgi artmıştır. Literatüre baktığımızda Nasar ve Ofsenani (1969), ARM'nin patentini alarak Bedford ve Hoft (1972), Polloc ve Williams (1990), Miller (1993), Husain ve Ehsani (1996), Krishnan (2001) önemli çalışmalarda bulunmuşlardır.

ARM'nin farklı hızlarda kullanılabilir olduğu ile ilgili olarak Lawrenson vd. (1980) çalışmalar yapmışlardır.

Ülkemizde ARM ile ilgili birçok çalışma yapılmış olup aşağıda bunlardan bazıları verilmiştir.

ARM'nin kontrolü ile ilgili çalışmalar: Sefa, ARM'nin sliding mode yaklaşımı ile hız kontrolü ile ilgili bir çalışma yapmıştır (Sefa, 1997). İnanç, ARM'nin modellenmesi ve yeni kontrol teknikleri ile denetimi üzerinde bir çalışma yapmıştır (İnanç, 1996). Akçayol, ARM'nin Sinirsel, Bulanık denetimi ile ilgili çalışma yapmıştır (Akçayol, 2001). Çalık, ARM'nin kontrolü üzerine bir çalışma yapmıştır (Çalık, 2005). Yiğit, ARM'nin genetik uyarlamalı denetleyici ile hız denetimi gerçekleştirmesi üzerine bir çalışma yapmıştır (Yiğit, 2005). Güvenç, ARM'nin denetimi üzerinde çalışma yapmıştır (Güvenç, 2005). Sezen, SEY ile analizi yapılmış yüksek güçlü ARM'nin yeni bir bulanık mantık algoritması kullanarak hız denetimi üzerinde çalışmıştır (Sezen, 2006). Yaşa, yüksek hız uygulamaları için yüksek güç yoğunluklu yeni bir ARM'nin geliştirilmesi üzerinde çalışmıştır (Yaşa, 2017).

ARM'nin zeki sistemler kullanarak kontrol edilebilmesi ile ilgili: Akçayol, ARM'nin sinirsel-bulanık denetimi ile ilgili çalışmıştır (Akçayol, 2001). Yiğit, ARM'nin genetik uyarlamalı denetleyici ile hız denetimi gerçekleştirmesi üzerine bir çalışma yapmıştır (Yiğit, 2005). Güvenç, ARM'nin denetimi üzerinde çalışma yapmıştır (Güvenç, 2005). Sezen, sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile analizi yapılmış yüksek güçlü ARM'nin yeni bir bulanık mantık algoritması kullanarak hız denetimi üzerinde çalışmıştır (Sezen, 2006). Aşan, ARM'de bulanık mantık ve yapay sinir ağları ile konum algılayıcısız denetimi ile ilgili çalışmıştır (Aşan, 2008). Duran, endüstriyel çamaşır makinelerinde ARM'nin kullanımı ve sistemin sezi denetimi üzerinde çalışmıştır (Duran, 2008).

ARM'nin tasarımı ile ilgili yapılan çalışmalar: Fenercioğlu, helisel yapılı ARM'nin tasarımı ile analizi ile ilgili çalışmıştır (Fenercioğlu, 2006). Karagöz, mikrodenetleyici kontrollü ARM'nin tasarımı ve marş motoru olarak kullanılması ile ilgili çalışma yapmıştır (Karagöz, 2009).

ARM'nin konum sensörsüz denetimi ile ilgili çalışmalar: Çetin, ARM'nin hibrid gözlemci ile pozisyon algılayıcısız çalıştırılması üzerine çalışmıştır (Çetin,

2001). Aşan, ARM’de bulanık mantık ve yapay sinir ağları ile konum algılayıcısız denetimi ile ilgili çalışmıştır (Aşan, 2008).

ARM’nin modellenmesi ve sürücü tasarımı ile ilgili çalışmalar: Bay, ARM’nin bulanık mantık tabanlı modellenmesi ve kontrolü ile ilgili çalışmıştır (Bay, 1996). Mutlu, ARM sürücü devre tasarımı üzerinde çalışmıştır (Mutlu, 2006).

ARM’nin konum denetimi ile yapılan çalışmalar: Yıldız, ARM’nin genetik bulanık denetleyici ile nonlinear hız ve konum denetimi ile ilgili çalışmıştır (Yıldız, 2013).

ARM’nin tork kontrolü ile ilgili yapılan çalışmalar: Özbulur, ARM’nin moment dalgalanmasının azaltılması ile ilgili bir çalışma yapmıştır (Özbulur, 1996). Bizkevelci, ARM’de tork dalgalanmalarını ve akustik gürültüyü azaltmak bir kontrol yöntemi ile ilgili çalışmıştır (Bizkevelci, 2008). Terzioğlu, segmental tip ARM’nin moment salınımlarını azaltmak için sürücü ve kontrolör tasarımı ve gerçekleştirilmesi üzerinde çalışmıştır (Terzioğlu, 2016). Önder, ARM’nin tork rıplı minimizasyonu ile ilgili çalışmıştır (Önder, 2016).

ARM’nin lineer bir motor olmamasının nedeni yapısıdır. Yapısından kaynaklı olan pozisyon ve akım değişimi ile faz endüktansının lineer olarak değişmemesi bunun en temel nedenidir. Motorun akısının ve torkunun lineer olmamasında en önemli faktör faz endüktansındaki lineer olmama durumudur (Üstün, 2009). Bu durum tork denetiminde klasik elektrik makinalarının kontrolüne göre daha güç olmaktadır. Bu nedenle doğrusal olmayan bu duruma karşı uygun bir denetim modelinin ortaya koyulması gerekir. Aynı zamanda motorun çıkıntılı yapısından dolayı motorun ürettiği tork normal çalışmada yüksek seviyede rıpların oluşmasına sebep olmaktadır. Motorun çalışması anında meydana gelen bu tork rıpları özellikle hareketli parçaların çok çabuk biçimde aşınmasına aynı zamanda aşırı derecede gürültüye neden olmaktadır. Zeki denetim ve kontrol methodları ARM’nin lineer olmayan yapısından kaynaklı sorunların çözülebilmesi için etkili olarak kullanılmaktadır.

Yapay zeka sistemlerdeki bilinmeyen unsurların giderilmesi için parametre belirlemede, doğrusal olmayan yapının modellenmesinde çözüm olarak kullanılıyor. Yapay zeka sistemleri mikroişlemcilerin gelişmesi ile birlikte anlık olarak kontrol ve tasarım yapabilmektedir. Literatürde ARM kontrol ve tasarımı için Yapay sinir ağları (YSA), Bulanık mantık (BM), Genetik Algoritma (GA) kullanılmış olup tork, akı, endüktans vb. parametreler tahmin edilmiştir (Yıldız, 2013).

YSA, insan beyninin yapısının ve çalışmasının taklit edilmesi sureti ile ağ yapısını birbirine bağlanır. Bu ağ yapıları kullanılarak oluşturulan yapay yapılar insana özel olan öğrenme, yeni bilgiler ortaya koyabilme, hafızada kalabilme gibi yeteneklere kavuşur. 20. yüzyılda YSA ile Frank Rosenblatt, Walter Pitts, Zaruda, Haykin, Danold Hebb gibi birçok kişi çalışma yapmıştır. Hücresel ağ yapısını modelleme ile ilgili Mccullough ve Pitts çalışmalar yapmıştır. Öğrenme ile ilgili ise Hebb yeni bilgiler ortaya koymuştur. XOR sorunun çözümünün olmadığını Minsky ve Papert söylemiş daha sonraları bu geri yayılım algoritması ile ortadan kalmıştır. Lu vd YSA kullanarak ARM yi tasarlamıştır. Üstün ise YSA kullanarak lineer olmayan ARM modellemiştir (Önder, 2016).

GA, Darwin'in evrim teorisindeki gen ve doğal seçim kuramını içeren olasılıksal bir daha iyileme methodudur. Bu yöntem ilk defa John Holland tarafından 1970'li yıllarda meydana gelmiştir. İleriki zamanlarda ise David Goldberg borudaki gazın taşınması sorununda bu yöntemi kullanmış ve bu sayede genetik algoritma bilinirliği daha da artmıştır (Goldberg, 1989). Genetik algoritmaların günümüzde bilinirliğinin fazla olması lineer olmayan değişken sayısı, kısıtı, parametresi fazla olan sorunlarda iyi sonuçlar elde etmesidir. İyi bir amaç fonksiyonu ile kompleks sorunların çözümü çok kısa bir sürede kolaylıkla halledilebilmektedir. Enayati vd. GA kullanarak geri besleme katsayılarını belirlemiş ve pozisyon kontrolü sağlamıştır (Enayati et al., 2005). Xu vd (2002) akım eğrilerini GA ile iyileştirerek torku daha da arttırmıştır. Moshiri vd. ARM'nin PID kontrolünde GA kullanarak modelleme yapmıştır (Moshiri et al., 2004). Xilian vd. (2005) GA ile ARM'nin tasarımını yapmıştır.

ARM'lerin performansındaki düşüklüğün en temel nedeni stator ve rotorunda bulunan çıkıntılar nedeniyle gürültü ve salınım sonucu oluşan tork rıplardır (Rodrigues et al., 2001).

Tork rıplı minimizasyonu akım kontrolü, akı kontrolü ve tork kontrolü yöntemleri kullanılarak yapılabilir. Litaratürde günümüze kadar birçok çalışma yapıldığı görülmüştür.

Akım kontrolü kullanılarak tork rıplı minimizasyonu ile ilgili çalışmalar: Sahoo vd., bulanık mantık kullanarak ARM'nin doğrudan tork kontrolü için bir akım modülasyon şeması üzerinde çalışmıştır (Sahoo et al., 2000). Derdiyok vd., minimum tork rıplı için bulanık mantık kontrolü tarafından ARM'nin optimal faz akım profili üzerinde çalışmıştır (Derdiyok vd., 1997). İnanç, minimum tork rıplı için ARM'nin faz akım modülasyonu üzerinde çalışmıştır (İnanç, 2002). Venkatesha vd. faz akımlarının optimal kontrolü ile ARM'nin tork rıplı minimizasyonu ile ilgili çalışma yapmıştır (Venkatesha et al., 1998). Khalili vd., faz/akım profilleri kullanarak ARM'nin tork rıplı minimizasyonu ile ilgili çalışmıştır (Khalili et al., 2007). Husain ve Ehsani, PWM akım kontrolü kullanarak ARM'nin tork rıplı minimizasyonu ile ilgili çalışmıştır (Husain and Ehsani, 1994). İnanç vd., Sürekli sliding mode kontrol tekniği kullanarak ARM'nin tork rıplı minimizasyonu ile ilgili çalışmıştır (İnanç vd., 2003). Ye vd. komütasyon sırasında faz akımları kontrolü ile ARM'nin tork rıplı minimizasyonu üzerinde çalışmıştır (Ye et al., 2014). Mitra vd, faz akım profili tabanlı hız sinyali kullanarak ARM'nin tork rıplı minimizasyonu ile ilgili çalışmıştır (Mitra et al., 2013). Zheng vd, yönlü akım methodu ile ARM'nin tork rıplı minimizasyonu ile ilgili çalışmıştır (Zheng at al, 2007).

Akı kontrolü kullanılarak tork rıplı minimizasyonu ile ilgili çalışmalar: Xue vd, akı bağlantı kontrolü ve tork paylaşım fonksiyonuna dayalı ARM sürücüleri için tork rıplı minimizasyonunun kontrol şeması ile ilgili çalışmıştır (Xue et al., 2006). Osama vd., ARM'nin tork rıplı minimizasyonu için değişken yapılı akı bağlantı kontrolü üzerinde çalışmıştır (Osama et al., 2002).

Tork paylaşım fonksiyonu (TPF) kullanılarak tork rıplı minimizasyonu ile ilgili çalışmalar: Xu vd, ARM'de tork rıplı azalması için direk tork kontrol ve

kestirimci kontrol modeli tabanlı yeni bir kontrol methodu üzerinde çalışmıştır (Xu et al., 2019). Li vd, ARM’de tork rıpl azalması için geliştirilmiş bir tork paylaşım fonksiyonu üzerinde çalışmıştır (Li et al., 2019). Ye vd, ARM sürmede tork rıpl azalması için çevrimdışı bir tork paylaşım fonksiyonu üzerinde çalışmıştır (Ye et al., 2015). Xue vd, elektrikli araçlarda ARM sürmede tork rıpl minimizasyonu için tork paylaşım fonksiyonunun ölçülmesi üzerinde çalışmıştır (Xue et al., 2008). Harikrishnan vd., ARM sürmede düşük tork rıpl konrole dayanan çevrimiçi tork paylaşım fonksiyonu gelişimi üzerinde çalışmıştır (Harikrishnan et al., 2016). Castro vd., geliştirilmiş doğrudan anlık tork kontrolü kullanarak ARM’de tork rıpl minimizasyonu ile ilgili çalışmıştır (Castro et al., 2012). Veena vd., optimum bant genişliği ile direkt anlık tork kontrolü kullanarak tork rıpl minimizasyonu ve elektrikli araçlarda kullanılan ARM’nin anahtarlama frekanslı ile ilgili çalışmıştır (Veena et al., 2017). Xue vd., ARM sürmede tork rıpl minimizasyonu için tork paylaşım fonksiyonu optimizasyonu ve değerlendirmesi ile ilgili çalışmıştır (Xue et al., 2009). Hu vd., direkt anlık tork kontrolüne dayanan alışılmamış modüler statorlü ARM’nin tork rıpl minimizasyonu ile ilgili çalışmıştır (Hu et al., 2016). Dowlatshahi vd., değiştirilmiş tork paylaşım fonksiyonu kullanarak ARM’nin tork rıpl minimizasyonu üzerinde çalışmıştır (Dowlatshahi et al., 2013). Wei vd., alışlagelmiş bir tork paylaşım kullanarak ARM’nin tork rıpl minimizasyonu üzerinde çalışmıştır (Wei et al., 2016). Dowlatshahi vd., bakır kayıpları minimizasyonunu hesaba katarak ARM’nin tork rıpl minimizasyonu ile ilgili çalışma yapmıştır (Dowlatshahi et al., 2014).

Bu çalışmada, ARM’nin sonlu elemanlar analizi ile tasarımı yapılmış olup farklı sarım sayılarında, devirlerde, akımlarda tork ve akı değerleri elde edilmiş ve çalışma karakteristiği incelenmiştir. Sarım sayısını arttırıp akımı azaltmanın tork ve motor verimi üzerindeki olumlu etkileri incelenmiştir. ARM’nin genetik yapay sinir ağları kullanılarak endüktansı modellenmiştir. İncelemeler sonucunda ARM’nin tork rıpllarının azaltılmasına yönelik benzetim çalışmaları yapılmıştır. Anahtarlama relüktans motoruntork rıpl azaltılmasında genetik bulanık mantık kullanılarak optimize edilmiş tork paylaşım fonksiyonu tekniği kullanılmış ve sürme sistemi tasarımı yapılmıştır. Amaç motorun hem geçici hem de sürekli çalışma koşullarında enerji verimliliğini esas alan tork rıpllarının azaltıldığı bir tork denetleyici ortaya

konulmasıdır. Ortaya konulan yaklaşımın etkinliği simulasyon ortamında üç açılı ve dört açılı olarak deneylerden elde edilen sonuçlar ile gösterilmiştir.

Bölüm 2’de anahtarlamaalı relüktans motorun yapısı, genel işleyişı, matematiksel fonksiyonları, avantaj ve dezavantajları hakkındaki bilgiler detaylı olarak verilmiştir. Bölüm 3’te yapay sinir ağları, bulanık mantık, genetik algoritmalar ile ilgili bilgi verilmiştir. Bölüm 4’te ARM tork rıpıl minimisasyonu için genetik bulanık mantık sürme sistemi ile ilgili bilgi verilmiştir. Bölüm 5’te Genetik bulanık mantık ile tork paylaşım fonksiyonu optimizasyonu ile ilgili bilgiler verilmiştir. Bölüm 6’da benzetim çalışmaların sonuçları verilmiştir. Bölüm 7’de tez kapsamı dahilinde sonuçlar ve öneriler ile genel bir değerdendirme yapılmıştır.

2. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTOR

Anahtarlamaalı relüktans motorun temeli, 1969 yılında S.A. Nasar tarafından kullanılan değişken relüktanslı motor ve sürücü sistemini içeren bir yapıdan gelir. Yapısında fırça yapısı olmaması ve komutasyon ihtiyacı olmasından dolayı sırasıyla fırçasız relüktans motor ve komutasyonlu relüktans motor ifadeleride zaman zaman söylenmiştir.

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte ARM ve diğer motorlar arasında rekabet gittikçe artmıştır. Bu rekabet neticesinde geleneksel kontrol teknikleri yerini yapay sinir ağıları, genetik, bulanık mantık gibi yeni nesil kontrol tekniklerine bırakmıştır.

ARM'ler günümüzde robot teknolojileri, biyomedikal teknolojiler, trenler, otomobiller, yük taşıma sistemleri, elektrikli ev aletleri vb. geniş kapsamlı alanlarda tercih edilmektedir.

2.1 ARM'nin Temel Yapısı

ARM bilinen diğer motorlarda olduğu gibi rotor stator yapısına sahiptir. ARM'nin stator kısmında sargı yapısı mevcuttur fakat rotor kısmında herhangi bir sargı veya mıknatıs yapısı mevcut değildir. Statorundaki sargı yapısı karşılıklı olarak birbirine seri bağlıdır ve bu seri bağlı sargı yapıları fazları oluşturur. Diğer motorların aksine stator ve rotoru çıkıntılı yapıya sahiptir. Rotorunda sargı yapısı olmaması neticesinde bakır kayıpları azdır. Komütasyon neticesinde faz sargıları sırayla enerjilendirildiğinden, enerjilendirilen faz sargısı ile stator kutuplandırılır ve rotor kutupunu kendine çeker bu suretle dönme işlemi gerçekleşmiş olur. Dönmenin yönü tamamen enerjilendirilen faz sargısının yönü ile doğru orantılıdır.

ARM'ler bir veya daha çok faz sayılı olabilir. Piyasada 3 fazlı 6/4, 4 fazlı 8/6, 5 fazlı 10/8 gibi stator/rotor sayılı ARM'ler bulunmaktadır. Faz sayısı stator kutup sayısının ikiye bölünmesi ile elde edilmektedir. Faz sayısı arttığında komutasyon

devresi daha kompleks bir yapıya sahip olacağından üretim maliyetleri dolayısıyla artacaktır. Komutasyon ne kadar düzgün yapılırsa motor o kadar sarsıntısız ve vuruntusuz çalışmış olacaktır.

N_s stator kutup sayısını, N_r rotor kutup sayısını belirtmektedir. Stator kutup sayısı ile Rotor kutup sayısı birbirine yakın seçilirse motor daha yüksek hızlarda çalışacaktır. Stator kutup sayısı Rotor kutup sayısından büyüdükçe ise daha yüksek torklarda çalışacaktır.

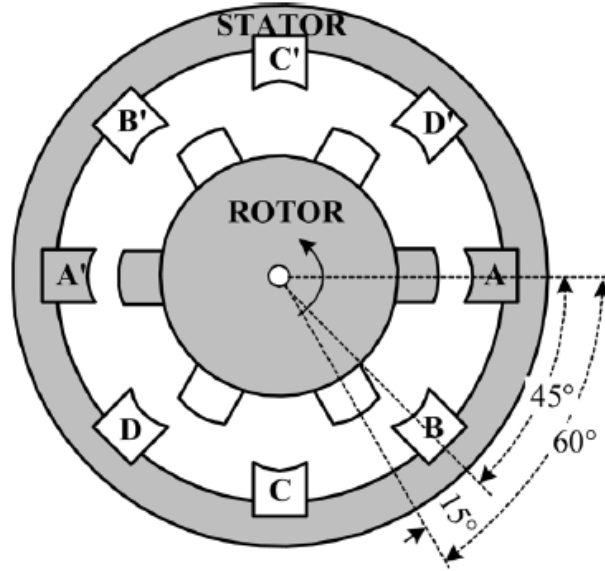
ARM'de komutasyon ile çalıştırıldığından konum bilgisinin bilinmesi gerektiğinden rotor milinde konum algılayıcı sensör mevcuttur bu sayede başlangıçta ilgili faz enerjilendirilmek suretiyle komutasyon işlemi uygulanır (Yıldız, 2013).

2.2 ARM'nin Çalışma Prensipleri

ARM'ler kutup yapısında bulunan çıkıntı nedeniyle relüktans etki ile çalışır ve bu relüktans etkiden dolayı rotor minimum relüktans pozisyonuna gelmesi şeklinde hareket gerçekleşir. Rotorda dönme meydana gelmesi relüktans etki nedeniyle oluşan döndürme momenti nedeniyledir. Seri bağlı karşılıklı sargılara faz dersek eğer, faz enerjilendirildiğinde karşılıklı stator kutupları kendine en yakın rotor kutuplarını kendisi ile aynı hizaya çekene kadar dönme devam eder. Bu durumda relüktansın değeri minimum endüktansın değeri maksimumdur. Enerjilendirilen fazda stator ve rotor son durumda aynı hizadadır ancak sıradaki fazın stator ve rotorları aynı hizada değildir. Bu nedenle komutasyon sırasındaki faz enerjilendirildiğinde enerjilendirilen fazdaki sargı kendine en yakın olan hizasız durumdaki rotoru kendine çeker ve hizalı duruma gelir bunun sonucunda dönme meydana gelir. Uygun komutasyon işlemi ile fazlar sırasıyla enerjilendirilmeye devam ettiği sürece dönme momenti devamlı olacaktır.

Rotorunda sargı olmaması ve rotorun çıkıntılı kutuplu yapıları nedeniyle manyetik devreleri rotor pozisyonu değiştikçe değişir. Pozisyonun değişimi bu nedenlerden dolayı akı ve endüktans değerlerinde değişime neden olmaktadır. Tork üretimi için gerekli olan bu olay relüktans motorlarda gayet doğaldır. Akımın yüksek

olması durumunda doyma etkisi ile olan değişiklik motorların modellenmesi ve kontrolü üzerinde problemlere neden olmaktadır. Bunun neticesinde akıma ve rotor konumuna bağlı değişiklik gösteren akı ve endüktans değerleri doğrusal bir değişime sahip değildir (Üstün, 2009).



Şekil 2.1. 8/6 ARM Motor (Üstün, 2009).

Şekil 2.1’de gösterilen 4 fazlı 8/6 kutuplu ARM birbirine seri bağlı 4 adet stator sargı grupları A, B, C, D fazlarını meydana getirmiştir. Buna göre ARM’nin rotor kutup aralığı 60^0 , stator kutup aralığı 45^0 ve adım açısı 15^0 olduğu aşıkardır. 4 faz iletimi 60^0 süren 15^0 lik açı ile komutasyon anahtarlama yapılr ve 60^0 lik açı ile akı ve endüktans değişimi periyodik olarak meydana gelir (Üstün, 2009).

Rotor kutbu relüktans etkinin minimum olması nedeniyle ayrı konumdan hizalı konuma getirilir. A fazının enerjilendirilmesini örnek olarak verecek olursak rotor hizalı pozisyonda olduğunda enerjilendirme işlemi devam ederse frenleme durumu meydana gelir ve herhangi bir tork olayı meydana gelmez. Bu nedenle enerjilendirilen fazdaki stator ve rotor hizalı duruma gelmesi sonrasında diğer faz enerjilendirilir ve hareket devamlılığı saylanır. Bu hareket devamlılığı neticesinde tork elde edilmiştir. Tork akımın yönünden bağımsızdır.

2.3 ARM'nin Eşdeğer Devresi

ARM'nin eşdeğer devresi Şekil 2.2'de görüldüğü gibidir. Temel eşdeğer devre ise fazların birbirleri arasında olan karşılıklı endüktans ihmal edilerek aşağıda görülen denklemlerdeki gibidir. Direnç üstüne düşen gerilim ve akı bağıntısının değişim oranının toplamı tek bir faza uygulanan gerilime eşit olduğu aşıkardır. Bu ifade aşağıda görüldüğü gibidir (Krishnan, 2001).

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

R_s stator faz direncini ifade eder ve ψ bir fazın akı bağıntısını ifade eder,

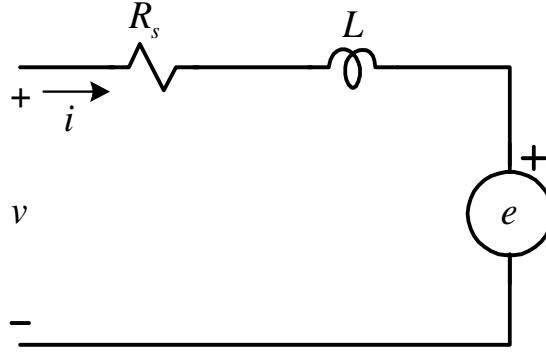
$$\psi = L(\theta, i)i \quad (2.2)$$

L endüktansı rotor pozisyonu ve faz akımı ile ilişkilidir. Buradan yola çıkarak faz gerilim denklemi,

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

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

Yukarıdaki denklem omik gerilim düşümü, endüktif gerilim düşümü ve indüklenen elektromotor kuvveti (EMK) gösterir. Buradan yola çıkarak elimizdeki denklem DC seri motora benzediği aşıkardır (Krishnan, 2001).



Şekil 2.2. ARM'nin Eşdeğer Devresi (Üstün, 2009).

ARM'nin dinamik davranışını tanımlayan tork denklemleri aşağıda olduğu gibidir,

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

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

T motor torku, J toplam atalet momenti, B sönüm katsayısı ve T_L ise yük torkunu ifade etmektedir.

İfade edilen modelde Histerezis ve Eddy akımları nedeni ile meydana gelen kayıplar dikkate alınmamıştır. Motor endüktansının modellenme hassasiyetibu modelin hassasiyetindeki en önemli noktadır (Üstün, 2009).

2.4 ARM'de Tork ve Akı Profillerinin Elde Edilmesi

ARM'de akı ve endüktans değeri ölçümü üç ana metotta toplanabilir. Bunlar Statik doğru akım, Statik alternatif akım ve Dinamik ölmüş metotlarıdır. Bu ölçüm metotlarından elde edilen akı ve endüktans verileri ile tork verisi elde edilir. Bu çalışmada ANSYS programı ile sonlu elemanlar analizi methodu kullanılarak ARM'nin tork ve akı profilleri elde edilmiştir.

3. YAPAY ZEKÂ TEKNİKLERİ

3.1 Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları (YSA), insan yapısında bulunan öğrenme, ezberleme, keşif ve yeni bilgiler üretebilme gibi özellikleri biyolojik sinir ağlarına benzeterek modelleyen bilgisayar programıdır. YSA da bulunan işlemciler ağırlıklar ile birbirine bağlanır. Ağırlık değıştikçe öğrenme işlemi devam eder. Ağırlık değışimi durduğunda ise öğrenme işlemi bitmiş demektir (Yıldız, 2013).

YSA, matematiksel ifadeleri zor olan modelleri hafıza yapısı oluşturan işlem elemanlarını paralel olarak dağıtarak geliştiren yapılardır. İnsan beyninden yola çıkılarak oluşturulan bu ağ yapısı veri işleme ya da işlemci elemanlarının (nöronların) birbirine bağlanması suretiyle meydana gelmektedir (Sağıroğlu, 2003).

3.1.1 YSA'nın Tarihçesi

McCulloch ve Pitts 1943 yılında yapay sinir ağı modelini oluşturup tanımlanmasını yaparak bu ağların öğrenmeyi gerçekleştirebileceği iddiasında bulunmuştur (Russell et al., 2003).

Donald Hebb öğrenme kuralını 1949 yılında deneysel fizyolojik kurallar ışığında sinir sinapslarını oluşturupuygun şekilde ayarlayarak Davranış Organizasyonu kitabında göstermiştir (Onduk, 2002).

Günümüzde bilgisayar ve makinelerde bulunan Hebbian Kuralının ardından gelen ve önemi yüksek olan algılayıcı (perceptron) 1958 yılında Rosenblatt tarafından geliştirilmiştir (Şen, 2004).

Widrow-Hoff öğrenme kuralının yerini alan ADALINE öğrenme kuralı model eğitim süresince oluşabilecek hataları minimum tutan önemli bir özelliğe sahiptir (Widrow and Hoff, 1960).

YSA'nın gelişiminde oluşan kısa bir duraklama dönemi yapay zekânın önde gelenlerinden olan Marvin Minsky ve Seymour Papert tarafından yazılan ve Perceptron'un XOR problemini çözmemesi durumundan meydana gelmiştir (Öztemel, 2006).

1982 yılında "Sinir Ağları ve Fiziksel Özellikler" adlı çalışması ile başlayan modern devir 1982 yılında Kohonen ve 1983 yılında Anderson ile birlikte eğitimcisiiz öğrenen sistemler ile birlikte hızlanmıştır (Önder, 2016).

Günümüzde de sıklıkla kullanılan geri yayılım algoritması önceden karşılaşılan birçok probleme ışık olmuştur (Rumelhart, 1986).

YSA günümüzde birçok alanda aktif olarak ve her geçen gün daha da ilerleyen bir ağ yapısıdır.

3.1.2 YSA'nın Avantajları ve Dezavantajları

YSA'nın avantajlarına bakacak olursak, öğrenme yetisi, farklı yapılara uyarlanabilme, genelleme yapabilmesi, hafızası, birçok işlemi aynı anda yapabilmesi, hataları ayırtması gibi birçok özellikten bahsedebiliriz.

YSA'ların en temel birim işlem elemanı diyebileceğimiz hücre nonlinear bir yapıya sahip olduğundan dolayı bu hücrelerin bütünü olarak adlandıracağımız YSA'da aynı özelliği gösterecektir. YSA'daki bu yapı bütün ağın yapısını etkilemektedir. Bu yapının en büyük avantajı ise nonlinear problemlerin çözümünde oldukça etkili olmasıdır (Kayıkçı, 2014).

Matematiksel modellenmeler kullanmasına gerek yoktur. Bir veya daha fazla giriş ile bir veya daha fazla çıkışlı arasında bağlantı kurabilme özelliğine sahiptir. Bu

özellik YSA'nın giriş ve çıkış arasındaki kural ve bağlantı yapısını eğitim ve test kümelerinden öğrenmek suretiyle oluşur.

YSA'na verilen her yeni örneğe adapte olabilir ve her yeniliği öğrenebilir.

YSA'nın dezavantajına bakacak olursak ise, eğitimin süresi belli değildir, aşırı hassas yapıya sahiptir, örnek karşısında ağın davranışı açıklanamaz ve giriş çıkış arasında ağ yapısı bilinmemesidir.

YSA'nın modellenmesi nöron sayısı ile orantılı olduğundan ağdaki gürültü nonlineer yapılarda yanlış modellenmeye neden olabilir. Bu durumda giriş ile çıkış arasındaki ağ yapısı hatalı sonuçlar üretecektir (Cui and Wong, 2004).

3.1.3 YSA'nın Uygulama Alanları

YSA günümüzde oldukça fazla alanda tahmin, veri tanımlama, veri eşleştirme, veri sınıflandırma ve filtreleme gibi durumlarında başarılı olarak çalışmaktadır. YSA'ların genel olarak kullanım alanlarına bakacak olursak (Öztemel, 2006);

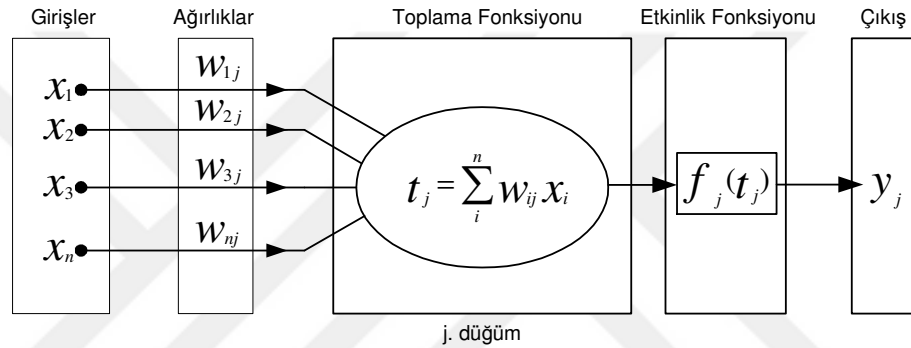
- Savunma sanayi uygulamaları,
- Ekonomik ve finansal uygulamalar,
- Sağlık ve biyomedikal uygulamalar,
- Endüstri uygulamaları,
- Vb. birçok alandır.

3.1.4 Yapay Sinir

Birden çok sayıda düğüm noktasının birleşmesi ile bir YSA meydana gelmektedir. Bir yapay sinir ağına en küçük birimi, düğüm veya işlem elemanı olarak isimlendirilen bir yapay sinirdir ve bu yapay sinir biyolojik bir sinire göre basit yapılı olmasına rağmen biyolojik sinirin çalışmasını taklit eder. Bu iki sinir ağıda birbirine benzer bir yapıya sahiptir. Biyolojik sinir de nöron, dendrit, hücre

gövdesi, aksonlar ve sinapslar YSA'da işlem elemanı, toplama fonksiyonu, etkinlik fonksiyonu, yapay nöron çıkışı, ağırlıklar olarak isimlendirmektedir.

Bir yapay nöron girişler, ağırlıklar, toplama fonksiyonu, etkinlik fonksiyonu ve çıkış olarak beş bölümden meydana gelmektedir ancak bu yapı farklılık gösterebilmektedir. Yapay sinir ağında öğrenme, belirlenen öğrenme algoritmasının ağırlıklarının ayarlanmasına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Şekil 3.1'de bir sinir ağının genel yapısı verilmiştir.



Şekil 3.1. Yapay Sinir Yapısı

Girişler: $x_1, x_2, \dots, x_n$ dışarıdan aldıkları bilgileri sinirlere iletmekle görevlidirler.

Ağırlıklar: $w_{1j}, w_{2j}, \dots, w_{nj}$ girişlerin sinire hangi oranda etki etmesini sağlayan katsayılardır. Her girişin kendine ait bir ağırlığı mevcuttur. Bu ağırlıkların büyük veya küçük olması girişin etkisinin çok veya az olacağı anlamına gelmemektedir.

Toplama Fonksiyonu: t_j , ağırlıkları ile çarpılan girişlerin toplanarak etkinlik fonksiyonuna gönderilmesi ile görevlidir. Bazı uygulamalarda toplama fonksiyonu min, max, çoğunluk veya normalleştirme algoritması gibi karmaşık yapıda da olabilmektedir.

Etkinlik Fonksiyonu: Toplama fonksiyonun sonucunu etkinlik fonksiyonunda işleme alarak bu işlemde toplama fonksiyonunun sonucu değiştirerek çıkışa gönderir. Öğrenme eğrisi olarak da isimlendirilmektedir. Bu etkinlik fonksiyonları YSA'da nöronun çıkış genliğini istenilen değerler arasına sınırlamaktadır.

Çıkış: y_j , etkinlik fonksiyonundan aldığı sonucu diğer sinirlere göndermekle görevlidir. Her bir sinirin tek bir çıkışı vardır ve kendinden sonra olan herhangi bir sinire giriş olabilmektedir. Bu yapı biyolojik sinirlere benzemektedir.

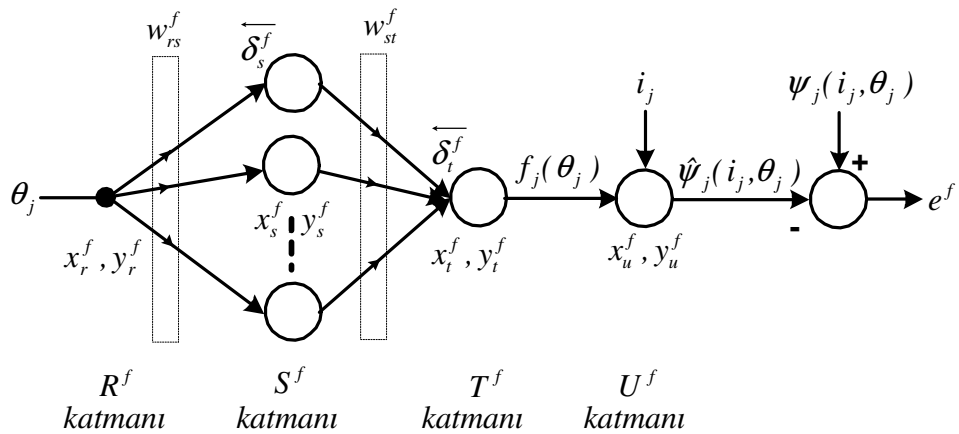
3.1.5 YSA'ların Sınıflandırılması

Nöronlar arasındaki bağlantı yapısı YSA'da ağı yapısını belirlemektedir ve öğrenme algoritması ile bu nöronlar arasındaki bağların değişimi belirlenir. Bu öğrenme kuralı ile hatayı sıfıra çekecek şekilde ağı ağırlıkları değiştirilir.

YSA'larda yapılarına göre ve öğrenme algoritmalarına göre sınıflandırmalar aşağıda verilmiştir.

3.1.5.1 YSA'larda yapılarına göre sınıflandırma

Temel olarak bağlantı yönlerine ve ağ içindeki akışa göre ileri beslemeli ağlar ve geri beslemeli ağlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Şekil 3.2'de örnek bir sinir ağı mimarisi gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Sinir Ağı Mimarisi

3.1.5.1.1 İleri beslemeli ağlar

İleri beslemeli ağlarda akış girişe gelen verinin çıkışa doğru yayılması ile gerçekleşir. Bir katmandaki düğümün çıkışı ağırlıklar ile bir sonraki katmanın girişine verilir. Son katman ağın çıkışını verir.

3.1.5.1.2 Geri beslemeli ağlar

En az bir düğümün geriye yayılmasıyla geri beslemeli sinir ağları meydana gelir. Bu tip ağlarda giriş hem ileri hem de geri yönde iletilmiş olur. Geri beslemeli ağın yapısı ve davranışı komplekstir. Bu ağlarda hafıza mevcuttur

3.1.5.2 YSA’larda öğrenme algoritmasına göre sınıflandırma

YSA’nın mutlak bir bölümü olan öğrenme, giriş değerlerine veya girişler neticesinde olan çıkış değerine göre ağın bağlantı ağırlıklarını değiştiren öğrenme kuralı ile meydana gelir. YSA’larda iki çeşit öğrenme algoritması vardır bunlar danışmalı öğrenme ve danışmasız öğrenmedir.

3.1.5.2.1 Danışmalı öğrenme

En uygun çıkış elde edilmek için nöronlar arasındaki bağlantıların ağırlıkları ağ çıkışı ile istenilen çıkış arasındaki hataya göre ayarlanır. Bu algorithmada YSA’da örnek bir çıkış ile ne öğrenmesi gerektiğini iletecek bir danışma yaklaşımına gerek duyulmaktadır. Danışmalı öğrenmeye ADALINE örnek verilebilir.

3.1.5.2.2 Danışmasız öğrenme

Ağ sınıflandırma kuralları girişteki örneğin sonucu olan çıkışa göre kendiliğinden oluşmaktadır ve bu nedenle istenilen çıkışın değerine ihtiyaç yoktur.

Giriş bilgileri öğrenme boyunca ağıya uygulanır. Danışmalı öğrenmeye göre daha hızlıdır.

3.1.6 Öğrenme Kuralları

3.1.6.1 Hebb kuralı

1949 yılında Hebb tarafından yayınlanmış olup bir nöron diğer bir nörondan giriş alıyorsa ve bu iki nöronda aktif ise nöronlar arasındaki ağırlıkların kuvvetlendirilmesi prensibine göre çalışır.

3.1.6.2 Hopfield kuralı

İstenilen giriş ile çıkış aynı anda aktif veya pasif ise bağlantı ağırlığı artırılır diğer durumlarda bağlantı ağırlıkları azaltılır. Genel olarak Hebb kuralına benzer. Genellikle sıfır ile bir arasında bir değer alır.

3.1.6.3 Delta kuralı

En çok kullanılan öğrenme kurallarından birisi olan Delta kuralı Hebb kuralına benzemektedir. Ortalama karesel hatayı bağlantıların ağırlıklarını değiştirerek azalmaya çalışan bu kural nöronun istenilen çıkışı ile gerçek çıkışı arasındaki farkı azaltan ve giriş bağlantılarını güçlendiren bir yapıya sahiptir. Hata katmanlarda geriye yayılarak azalır. Bu hata azaltma işlemi çıkış katmanından giriş katmanına kadar devam eder.

3.1.6.4 Kohonen öğrenme kuralı

Nöronların öğrenmek için yarıştığı bu kuralda kazanan nöronun ağırlıkları güncellenir. Bu kuralda çıkışa gerek duyulmadığından danışmasız öğrenme metodu gibi davranış sergiler.

3.2 Bulanık Mantık

Bulanık mantık (BM) ARİSTO'nun siyah beyaz ikiliğine karşı Lotfi A. ZADEH tarafından 1965 yılında ortaya atılmıştır. Zadeh insanın düşüncesinin kesin olmadığı yani bulanık olduğu ile ilgili görüşünü bildirmiştir. Düşünce işlemlerinde ise bu nedenden dolayı boolean mantık dediğimiz 0 ve 1 ler isteği karşılayamamıştır. İnsan düşünce yapısının mantığında az, çok, siyah, beyaz, kısa, uzun gibi kesinlik bildiren değişkenlerin yanında biraz, gri, daha kısa, daha uzun gibi değerler de mevcuttur. BM iki seviyeli klasik mantığın yerine çok seviyeli işlemler ile çalışmaktadır. Zadeh insan düşünce yapısını modelleyerek kesin olmayan durumları kullanmış ve bu durumlar karşısında insanın muhakeme yapısını makine denetleyicilerine aktararak performansının artmasını sağlamıştır. 1975 yılında bir buhar makinesinde Mamdani tarafından bulanık mantık uygulanmıştır. Klasik denetleyicilerin aksine karmaşık sistemlerde, matematiksel modelin kurulamadığı veya çok zor kurulabileceği sistemlerde bulanık mantık denetleyici kullanılarak bu zorlukların üstesinden kolayca gelinebilmektedir (Yıldız, 2013).

Bulanık denetleyicide BM kullanılarak kesin olmayan, karmaşık olan, modeli oluşturulamayan sistemlerde etkili sonuçlar vermektedir (Baba, 1995).

BM'de denetleyicinin esnek bir yapı sağlamasının nedeni uzman bir kişinin tecrübelerinde olduğu gibi çok uzun, uzun, biraz uzun, çok kısa, kısa, biraz kısa gibi varyasyonlar ile denetim gerçekleştirir.

Bir sistemin matematiksel modelini oluşturabilmenin en önemli nedeni sistemin kararlı, performanslı, yüksek verimli çalışabilmesine olanak sağlayabilmek içindir. Bu nedendir ki matematiksel modelini oluşturacağımız sistemin değişkenlerini bilemediğimiz durumlarda, matematiksel modelinin oluşturmanın çok zor olacağı durumlarda, karmaşık sistemlerde, bulanık mantık denetleyiciler sayesinde en iyi çözümü bulabilmekteyiz.

3.2.1 Bulanık Mantık Denetleyici Özellikleri

BM modellenmesi zor olan sistemlerde verilerin hepsinin bilinemediği durumlarda bile işlem yapma yeteneği vardır. Bu denetleyicilerde daha az kural ile daha iyi performans vermektedir. Klasik algoritmaların aksine bulanık mantıkta tecrübeye dayalı bir bilgi sistemi kullanılmaktadır.

BM'nin özellikleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

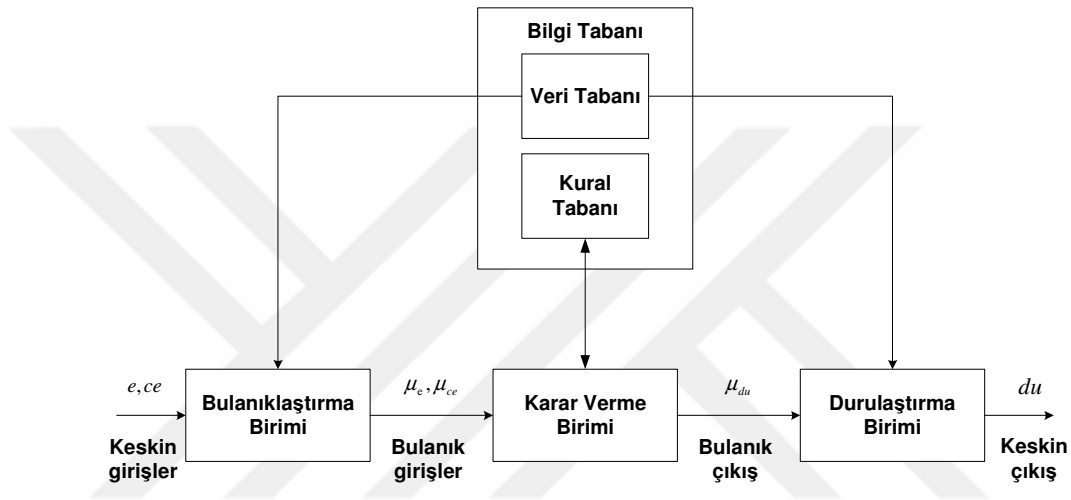
- BM'de bütün veriler $[0,1]$ arasında herhangi bir değer alabilmektedir.
- BM düşünce yapısında kesin değerler aksine kesin olmayan değerler kullanılır.
- BM sözel ifadeler ile tanımlanan kurallara dayanır.
- BM'de az, çok, en az, en çok gibi ifadeler kullanılmaktadır.
- BM parametrelerinin hepsinin bilinmediği ve matematiksel modeli zor olan sistemlerde kullanılmaya elverişlidir.

BM'nin en önemli özelliklerinden bir tanesi ise eksik, hatalı, çelişkili verilerin olduğu durumlarda bile etkisi metotlar geliştirmektedir. BM sisteminin tasarlanması, uygulanması ve sonuçlar elde edilmesi oldukça kolaydır ve daha iyi kontrol edilebilen sistemler geliştirmektedir. Sistem kontrolü sözel veriler ışığında oluşturulan niteleyiciler ile yapılmaktadır. Zamanla değişkenlik gösteren lineear olmayan sistemlerde etkili sonuçlar vermektedir. İnsan yapısındaki düşünme yeteneğini örnek alması sorun çözmedeki en önemli faktördür.

Tecrübeli kişilerin deneyimleri neticesinde bulanık mantık uygulamaları geliştirilmektedir. BM sisteminin kurallarını ve üyelik fonksiyonunu oluşturmak kolay olmamaktadır bunun nedeni ise net sonuç veren bir metot olmaması ve öğrenme yeteneğinin olmamasıdır bunun çözümü ise deneme yanılma yoluyla uzun zamanda olmaktadır. BM'nin en önemli sorunlarından biri kararlı, denetlenebilir bir sistemi oluşturabilmek için net verileri elde edememektir. Bundan dolayı oluşan deneme süreçleri maliyetleri oldukça arttırmaktadır. Bir sisteme tanımlanan üyelik fonksiyonu ve değişkenleri başka bir sistemde doğru sonuç vermeyeceğinden kullanılamamaktadır (Üstün, 2004).

3.2.2 Bulanık Mantık Denetleyici Yapısı

BM denetleyici yapısına baktığımızda, bulanıklaştırma, bilgi tabanı, karar verme ve durulaştırma olmak üzere 4 ana bölümden oluştuğunu görmekteyiz. Temel yapısı Şekil 3.3'te verilmiştir. Denetleyicideki bu dört bölüm sayesinde kontrol girişi ve durum veya çıkış değişkenleri arasında bir bağ kurar. Kural tablosu amaçladığımız çözüm doğrultusunda oluşturulur. Oluşturulan tablo ise mikrodenetleyiciye aktarılarak sabit denetleyici meydana getirilebilir (Yıldız, 2013).

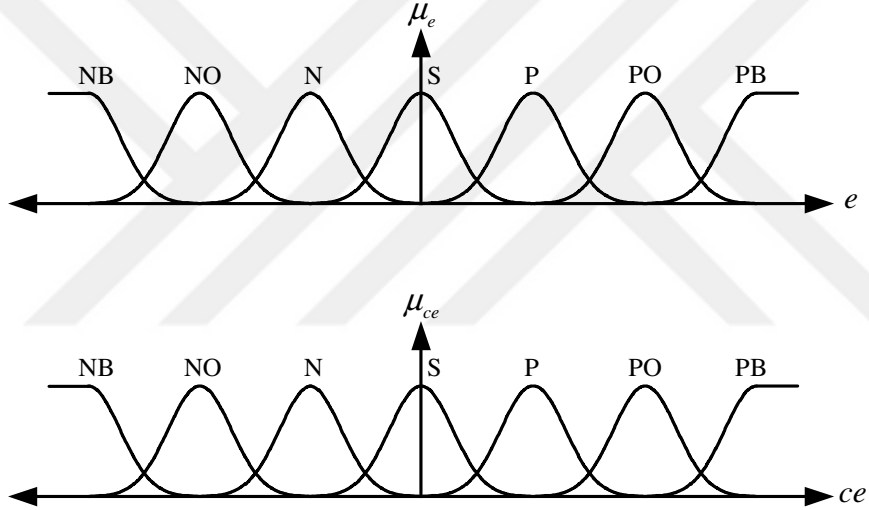


Şekil 3.3. Bulanık Mantık Denetleyicinin Temel Yapısı

Sistem değişkenlerine bakacak olursak; giriş değişkenleri e ve ce , çıkış değişkeni ise du dur. Son üretilen verinin uygun dilsel değere çevrilme işlemi bulanıklaştırma biriminde yapılır. Kural tabanı ve veri tabanının birleşimi ile bilgi tabanı meydana gelmektedir. Sistem değişkeninin değerleri gibi işleme alınan bulanık kümelerin üyelik işlevleri veri tabanı ile tanımlandırılır. Girişteki bulanık değerler ile çıkıştaki bulanık değerler arasında kesin bağ kural tabanı oluşturur. İnsan gibi karar verme yeteneğine sahip olan karar verme birimi yaklaşım çıkarım sağlaması ile denetim stratejisine ulaşım sağlar. Bulanık bilgilerin gerçek değerlere dönüştürüleceği birim ise durulaştırma birimidir (Yıldız, 2013).

3.2.2.1 Bulanıklaştırma

Sistemden elde edilen giriş verilerini dilsel niteleyici verilerine çevirme işlemi bulanıklaştırma biriminde yapılır. Girişteki sayısal değerlere büyük, küçük gibi dilsel değer verilmesi üyelik işlevi yardımı ile meydana gelir ve bu sayede hangi giriş verisi hangi bulanık kümede ve üyelik derecesi ne tespit edilmiş olur. Üçgen, yamuk, v.b üyelik fonksiyonları ile sistemin veriminin artırılması hedeflenir ve bu üyelik fonksiyonu ile üyelik değerinin hesaplanmasına yardımcı olur. Şekil 3.4'te giriş değerleri e ve ce için gaussian eğrisi üyelik işlevleri verilmiştir. Üyelik değerleri Pozitif Büyük (PB), Pozitif Orta (PO), Pozitif (P), Sıfır (S), Negatif Büyük (NB), Negatif Orta (NO), Negatif Küçük (NK) olarak 7 etiketlidir (Üstün, 2004).



Şekil 3.4. Giriş Üyelik İşlevleri (Yıldız, 2013).

Genellikle bulanıklaştırma aşamasında uygulamalarda Gaussian, Pi (π), Üçgen, Sigmoid ve Yamuk üyelik fonksiyonlarını sırası ile aşağıda gösterilmiştir (Baykal vd., 2004).

3.2.2.1.1 Gaussian üyelik fonksiyonu

Gaussian üyelik fonksiyonu c ve σ parametreleri ile tanımlanmıştır. Bu fonksiyon ile bir girişin üyelik derecesi Denklem (3.1)'deki gibi ifade edilir.

$$\mu(x; c, \sigma) = \exp \left[- \left(\frac{x - c}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (3.1)$$

Burada x girişı, c Gaussian fonksiyonunun merkezini ve σ genişliği ifade etmektedir.

3.2.2.1.2 Pi (π) üyelik fonksiyonu

Pi üyelik fonksiyonu 4 parametre ile tanımlanmıştır. Bu fonksiyon ile bir girişin üyelik derecesi Denklem (3.2)'deki gibi ifade edilebilir.

$$\mu(x; k, b, c, p) = \begin{cases} x \leq b & \text{ise } \frac{k}{b + k - x} \\ b \leq x \leq c & \text{ise } 1 \\ x > c & \text{ise } \frac{p}{(x - c + p)} \end{cases} \quad (3.2)$$

Burada $k = b - a$ ve $p = d - c$ dir.

3.2.2.1.3 Üçgen üyelik fonksiyonu

Üçgen üyelik fonksiyonu a , b ve c parametreleri ile tanımlanmıştır. Bu üyelik fonksiyonu ile bir girişin üyelik derecesi Denklem (3.3)'teki gibi ifade edilebilir.

$$\mu(x; a, b, c) = \begin{cases} x \leq a & \text{ise } 0 \\ a \leq x \leq b & \text{ise } \frac{(x - a)}{(b - a)} \\ b \leq x \leq c & \text{ise } \frac{(c - x)}{(c - b)} \\ c \leq x & \text{ise } 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

3.2.2.1.4 Sigmoid üyelik fonksiyonu

Sigmoid üyelik fonksiyonu β ve a parametreleri ile tanımlanmıştır. Bu fonksiyon ile bir girişin üyelik derecesi Denklem (3.4)'teki gibi ifade edilebilir.

$$\mu(x, \beta, a) = \frac{1}{1 + \exp^{-\beta(x-a)}} \quad (3.4)$$

Burada β eğrinin eğimini ifade eder. a parametresi ise eğrinin dönüm noktası olup üyelik derecesi daima 0.5'e eşittir.

3.2.2.1.5 Yamuk üyelik fonksiyonu

Yamuk üyelik fonksiyonu a, b, c ve d parametreleri ile tanımlanmıştır. Bu fonksiyon ile bir girişin üyelik derecesi Denklem (3.5)'teki gibi ifade edilebilir.

$$\mu(x; a, b, c, d) = \begin{cases} x \leq a & \text{ise} & 0 \\ a \leq x \leq b & \text{ise} & \frac{(x-a)}{(b-a)} \\ b \leq x \leq c & \text{ise} & 1 \\ c \leq x \leq d & \text{ise} & \frac{(d-x)}{(d-c)} \\ d \leq x & \text{ise} & 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

3.2.2.2 Bilgi Tabanı

Bilgi tabanı veri tabanı ve kural tabanı olmak üzere iki kısımda meydana gelmektedir. Kurallar kümesi denetimin stratejisi ve amacını oluşturur.

Veri tabanı sistemin denetim için kullanılacak olan bilgilerin bulunduğu kısımdır.

Kural tabanı giriş ve çıkış arasındaki kuralları belirler. A ve B'yi giriş, C'yi çıkış değişkeni olarak belirlenen sistem için kural tablosu aşağıdaki Çizelge 3.1'deki gibidir.

Çizelge 3.1. Kural Tablosu

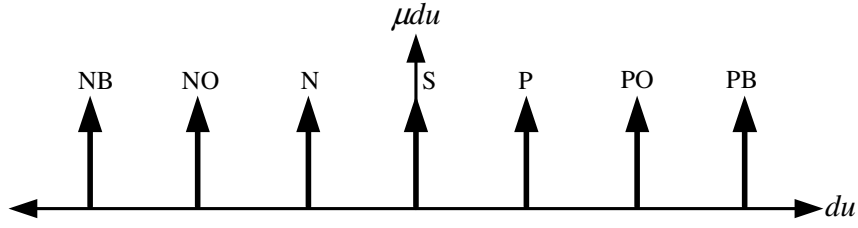
$\begin{matrix} x \\ y \end{matrix}$	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
NB	NB	NB	NB	NO	NK	NK	S
NO	NB	NB	NO	NK	NK	S	PK
NK	NB	NO	NK	NK	S	PK	PK
S	NO	NK	NK	S	PK	PK	PO
PK	NK	NK	S	PK	PK	PO	PB
PO	NK	S	PK	PK	PO	PB	PB
PB	S	PK	PK	PO	PB	PB	PB

3.2.2.3 Karar Verme

Sembolik değerler sayısal değerler kullanılarak bulanıklaştırma işlemi ile meydana getirilir. Burada denetim bulanık kavramların işlenmesi ve çıkarım yapılması ile sağlanır ve bu yapı insan beyninin işleyiş şeklinin bir yansımasıdır. Bulanık kümedeki giriş- çıkış değişkenleri ve üyelik işlevleri veri tabanını, bulanık kurallar ise kural tabanını oluşturur (Yıldız, 2013).

3.2.2.4 Durulaştırma

Karar verme sonucunda meydana gelen bir bulanık kümedir. Burada elde edilen sonuçlar sayısal değerlere dönüştürülmek suretiyle giriş değeri olarak sisteme uygulanır ve buna durulaştırma adı verilir. 7 etiketli bir çıkış üyelik işlevi Şekil 3.5'te gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Çıkış Üyelik İşlevi

Üyelik derecelerinden oluşan değer ve sonuç kural tespiti durulaştırma işleminden önce yapılır sonrasında ise uygun method ise durulaştırma işlemi yapılır.

3.2.3 Bulanık Mantık Denetleyici Tasarımı

Bulanık mantık denetleyici tasarımı aşağıdaki gibi yapılır (Elmas, 2011).

- i. Sorunun çözümü için bulanık mantık uygun mu değil mi kontrolü yapılır.
- ii. Sistemin giriş, çıkış ve durum değişkenleri tanımlanır.
- iii. Giriş ve çıkış verileri için üyelik işlevleri tanımlanır.
- iv. Giriş ve çıkış verileri, uzman dilsel kuralları ve sezgisel olarak elde edilen verileri bilginin ana bölümünü oluşturur.
- v. Kural tablosu meydana getirilir.
- vi. Meydana getirilen kural tablosu ile girişlerden çıkışlar elde edilir ve bunların doğruluğu ve kural tabanına uygunluğu neticesinde sonuç elde edilir.
- vii. Denetim işlemi ile istenilen aralıkta iyi bir çözüm elde edilir.
- viii. Kabul edilebilir aralıkta ve denetimi yüksek verimli sağlayacak olan denetleyici tasarlanır.

Bu aşamalardan sonra ise denetim kuralları denetleyicinin bulanık kurallarına göre tanımlanması yapılır.

3.3 Genetik Algoritma

Genetik algoritmalar (GA), John Holland tarafından ortaya atılan biyolojik evrimde bulunan genetik yapı ve seçim özelliklerinden yola çıkarak oluşturduğu sezgisel yapıya sahip bilgisayar ortamındaki rastgele arama metodudur.

Holland çalışmasında genetik evrimleşme sürecinde bulunan bireylerin evrimi ve değişimini bilgisayar ortamına aktarması ile çiftleşme, çoğalma, değişim gibi genetik olguların sonucunda en iyi bireyin meydana geleceğini ispat etmiştir. Holland'ın amacı karmaşık veya spesifik problemlerin çözümünü geleneksel algoritmalar yerine doğal adaptasyon ile bilgisayar sistemleri üzerinde sağlamaktır.

“Gaz borularının GA ile Optimizasyonu” konulu doktora tezi ile genç araştırmacı ödülünü kazanan David Goldberd GA'ya olan ilgili arttırmış ve farklı problem çözümlerinde işe yarayacağını göstermiştir.

GA'lar matematiksel ifadeler ile çözümü kolay olmayan problemlerin çözümünde oldukça basit bir şekilde üstesinden gelebildiği için tercih edilen popüler bir optimizasyon tekniğidir.

Canlıların geçmişten günümüze gen aktarımı iyi ve düşlü olan yaşamaya devam eder prensibi ve genlerin çaprazlaması suretiyle en iyi bireyleri bulma hedefi ile sürer. Her yeni nesil oluştuğça optimum çözüme daha da yaklaşılır.

Evrin teorisinin temelini Charles Robert Darwin'in doğal seçilime dayanan iyi olanın ayakta kalması yöntemi oluşturur. Canlıların sürekli değişen çevresel faktörlere uyum sağlama olayı bu evrimsel çalışmanın temelini oluşturur. Sürekli rekabet ortamında hayatta kalmaya devam edecek özellikleri bulunan canlılar yaşamını sürdürecektir. Bu özellikleri bulunmayan yani başka bir deyişle güçlü olmayan canlıların genleri ise yeni nesillere aktarılamayacaktır (Darwin, 1859).

3.3.1 GA'ların Uygulama Alanları

GA'lar ekonomi, üretim, pazarlama, montaj, tesis yeri seçimi, bilgi güvenliği sistemleri vb. birçok alanda modelleme yapar. GA avantajı modelleme yapılan uygulama alanlarında çıkan problemlerin çözümü kolaylıkla yapılabilmesidir (Emel ve Taşkın, 2002). GA'lar kullanılarak çok katmanlı ileri beslemeli sinir ağının oldukça verimli tasarımı yapılmıştır (Üstün vd., 2020).

3.3.2 GA'ların Avantajları ve Dezavantajları

GA ile sorunların çözümünde bazı avantajlar aşağıdaki gibidir (Şeker, 2008),

- Değişken sayısı fazla olan yapılarda optimizasyon sağlar.
- Birçok hesaplamayı aynı anda yapabilme olanağı olması.
- Optimum sonuç haricinde, optimum sonuçlar kümesini oluşturabilir.
- Türev fonksiyonuna ihtiyaç yoktur.
- Birden çok alanda ve bağımsız noktalarda çözüm için araştırma yapar.
- Kesikli ya da sürekli değişkenleri kullanarak çözüm üretebilir.

GA' nın bazı dezavantajları ise aşağıdaki gibidir (Şeker, 2008);

-Geleneksel optimizasyon yöntemlerinde bulunan giriş çıkış arasındaki sistematik yapının aksine genetik algoritmalar giriş ve çıkış arasında rastgele oluşan bir tarama yapısı vardır.

-Geleneksel optimizasyon yöntemlerinde aynı kısıtlar, durum ve şartlar altında aynı çözümü vermesine karşın, genetik algoritmalarda model rastgele olarak oluşması nedeniyle aynı sorun için farklı kullanım zamanlarında farklı sonuçlar üretebilir.

-GA'lar kullanılarak bulunan çözümlerde en iyileme göreceli olmasından dolayı elde edilen çözümlerden hangisinin en iyi olduğu anlayabilmek ve sistemin optimum sonucu bize verebilmesi için durma kısıtı konulması gerekir.

3.3.3 GA'nın Çalışma Prensibi

Goldberg tarafından genel hatları oluşturulan GA'lar rastlantısal arama tekniğinde bulunan doğal seçim ve gen yapısına sahip bir mekanizmadır. Kromozomlar peşi sıra devam eden işlemlerde uygunluk koşuluna göre evrimsel süreç geçirirler. Yeni evrimsel süreç oluşturmak için mevcutta bulunan iki kromozomun (ebeveyn) çaprazlanması ve mutasyon gibi işlemler gerçekleşir ve elde edilen yeni bireye çocuk adı verilir. Evrimsel süreç içindeki ebeveynler ve çocuklar uygunluk kriterini sağlıyorsa süreç içinde yer almaya devam eder, ancak uygunluk kriterini sağlamayan ebeveynler veya çocuklar evrimsel süreç içerisinde çıkarılırlar. Bu işleme doğal seleksiyon adı verilir. Bu işlem ile en iyi ebeveyn veya çocukların devam ettiği evrimsel süreçteki popülasyon büyüklüğü aynı kalmış olur. Bu olay ile her evrimsel süreç sonunda en iyi kromozom yapısına daha da yaklaşılar ve optimum sonuca yaklaşılar.

GA ile sorun çözümünün algoritması ve Şekil 3.6'da akış şeması aşağıdaki gibidir.

Adım 1: Başla

Adım 2: İlk popülasyonu oluştur.

Adım 3: Popülasyondaki kromozomların uygunluk değerini hesapla.

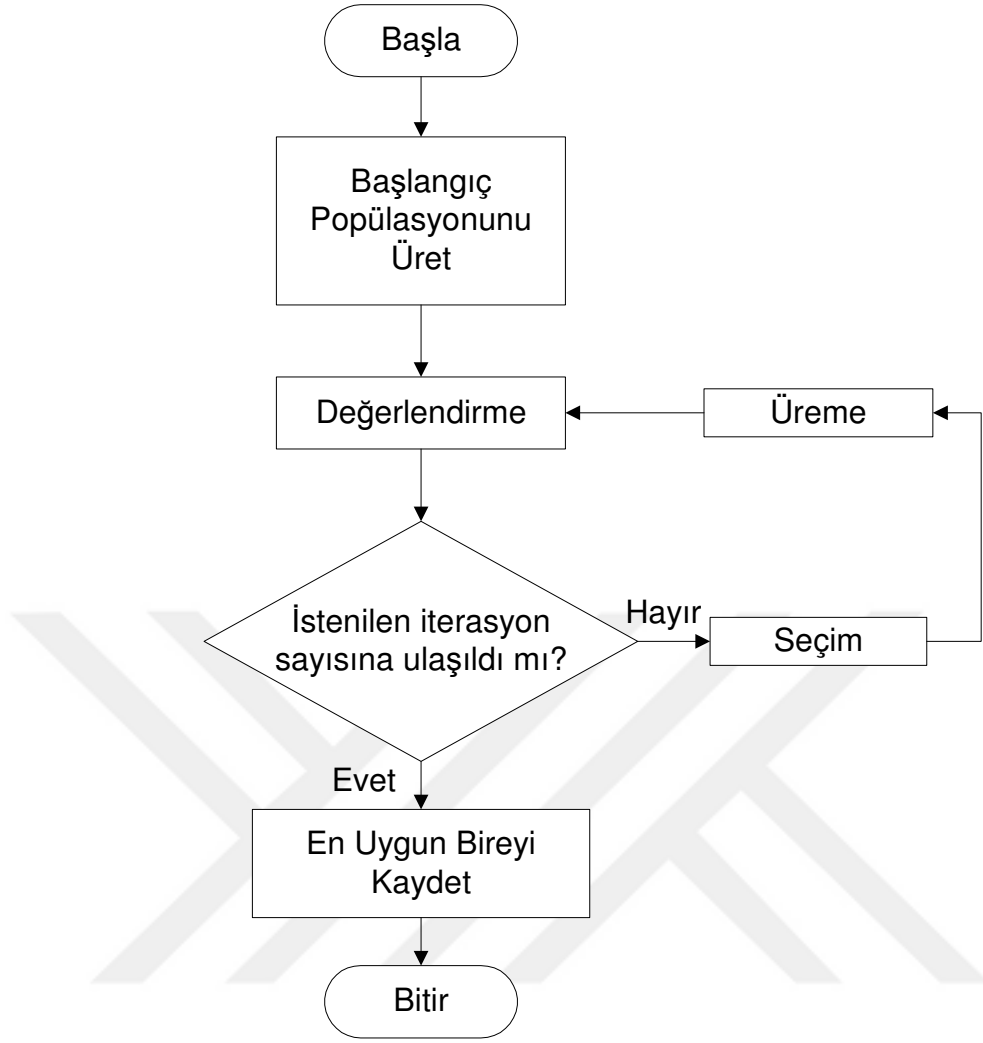
Adım 4: En iyi uygunluk değeri yakalandı mı bak. En iyi yakalandı ise işlemi sonlandır yoksa bir sonraki adıma geç.

Adım 5: Yeni nesil oluşturmak için popülasyondan seçim yap.

Adım 6: Çaprazlama ve mutasyon ile yeni birey üret.

Adım 7: Yeni Uygunluk değeri hesapla eğer daha iyi bulunduysa popülasyona ekle yoksa en iyi birey elde edilene kadar devam et.

Adım 8: Dur.



Şekil 3.6. Genetik Algoritma Akış Şeması (Üstün vd., 2020).

3.3.4 GA'nın Temel Yapısı

3.3.4.1 Gen

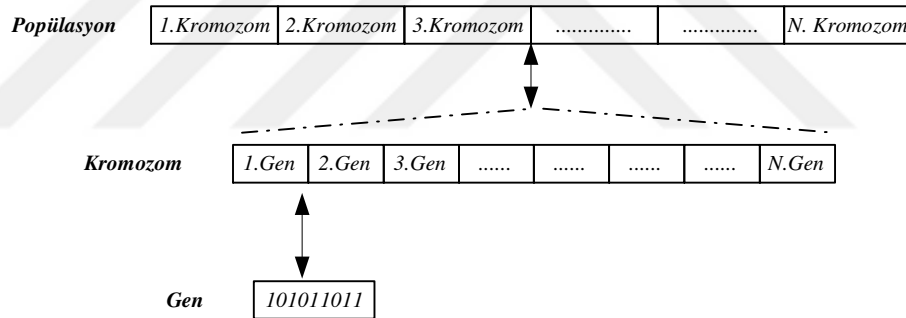
Genetik bilgi taşıyan en küçük anlamlı birimdir. Genler birleşerek Kromozomu meydana getirmektedir. Gen problem içindeki özel bilgileri tutar (Yapıcı, 2012).

3.3.4.2 Kromozom

Kromozom genlerin birleşim kümesidir. Sorunun çözümüne ilişkin bütün bilgilerin tutulduğu gen dizisidir. GA gen ve kromozon yapısı tanımlanarak başlar. Kromozomun içindeki parametreler optimum çözümü verecek şekilde tasarlanmalıdır. Kromozom kodlanması problemin durumuna ve tasarımına göre ikilik veya onluk düzende olabilir (Önder, 2016).

3.3.4.3 Popülasyon

Kromozomların birleşmesi ile popülasyon yapısı meydana gelmektedir. Popülasyon büyüklüğü oldukça önemli bir faktör olmasının sebebi GA'nın başarısı ve en iyi sonuca ulaşabilmek için geçen süreyi etkilemesidir (Yıldız, 2013). Şekil 3.7'de genel hali ile gen, kromozom ve popülasyon yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Gen, Kromozom ve Popülasyon Yapısı

3.3.4.4 Kodlama

Geleneksel algoritmalarından farklı olarak genetik algoritmalar parametrelerle değil parametrelerin kodlanmış hali ile çalışırlar. Bundandır ki öncelikle genlerin ve kromozomların kodlanması gerekir (Davis, 1991). İkili, onlu, gray, tamsayı vb. çeşitli kodlama tekniklerinden problem için en uygun olan seçilmelidir.

3.3.4.5 Başlangıç popülasyonunun oluşturulması

GA'larda popülasyonun önemli olmasının sebebi optimum sonucu yığının bütününe içinde aramasındandır. Başlangıç popülasyonu genellikle rastgele üretilir. Başlangıç popülasyonundan itibaren GA çözümleriyle oluşturulan popülasyon her bir döngü sonunda optimuma daha da yaklaşmaktadır. Popülasyonun küçük oluşturulması çeşitliliği azaltacağı için başlangıçta popülasyon büyük seçilerek hem çeşitlilik artırılır hem de daha iyi optimum sonuç elde edilir (Yıldız, 2013).

3.3.4.6 Uygunluk değeri

GA'larda uygunluk değeri $f(x)$ oluşturulan başlangıç popülasyonu içindeki bütün kromozomlar için amaç fonksiyonu ile hesaplanır. Uygunluk değeri kromozomun yeteneği ve amaca hizmet etmesi ile doğru orantılıdır. Kromozomun uygunluk değeri arttıkça hayatta kalma ve üreme ihtimali artar (Emel ve Taşkın, 2002).

Etkinlik fonksiyonlarının birçok yapısal çeşidi mevcuttur bunlardan bazıları: doğrusal, doğrusal olmayan, doyumlu, doyumsuz, sürekli, kesikli, türevlenebilir, vb.dir. Bu çeşitliliğin sebebi birçok YSA tipinin mevcut olmasındandır. Etkinlik fonksiyonlarından bazıları ise: kare, lineer, hiperbolik tanjant, sinüs, doyumlu doğrusal, vb.dir (Üstün, 2009).

3.3.4.7 Seçim

Bu adımda üreme işlemi için birey seçimi yapılmaktadır ve bireyin bir sonraki nesle aktarılma olasılığı uygunluk değerinin yüksek olmasına bağlıdır. Yeni evrimsel sürecin başlaması için uygunluk değeri ile ilişkili olarak aile seçimi yapılır (Yıldız, 2013).

Seçim genellikle en iyi olan birey ile başlanır. Amaç yeni meydana gelen nesilde uygunluk değeri fazla yeni bireyler üretmektir. Seçim yönteminin amacı bir

sonraki nesle aktarılacak bireye karar vermektir. GA’larda sıklıkla kullanılan seçim yöntemleri sıralı seçim, rulet tekniği, turnuva yöntemleridir (Yıldız, 2013).

3.3.4.7.1 Sıralı seçim yöntemi

Popülasyon çeşitliliği oldukça fazladır. Popülasyonda uygunluk değeri yüksek olan birey yüzdesi fazla ise uygunluk değeri az olan bireylerin seçilme olasılığı oldukça azdır. Popülasyon çeşitliliğinin fazla olması uygunluk değerinin büyüklük sırasına göre olmasıyla meydana gelir (Yıldız, 2013).

Bu yöntemde N bireyden meydana gelen popülasyondaki bireyler uygunluk değerleri göz önünde bulundurularak büyükten küçüğe doğru sıralanır. $f(i)$, i . bireyin uygunluk değerini ifade eder. $n(i)$ ise büyükten küçüğe sıralanmış olan $f(i)$ den i . bireyi ifade eder. Buradan yola çıkarak i . bireyin bir sonraki nesle aktarılma olasılığı, $P_i = \frac{2xn(i)}{N(N+1)}$ ile bulunur (Karakoca, 2009).

3.3.4.7.2 Rulet tekniği seçim yöntemi

Bireyin uygunluk değerinin popülasyonun tümünün uygunluk değerine oranı bireyin seçilme ihtimalini verir. Her birey ihtimallerine göre rulet çemberi etrafında dizilir. Üreme de seçim için rulet çemberi çevrilir. Bu çevirme işlemi sıfır ile toplam uygunluk değeri arasından bir sayı seçilmesi ve seçilen bu sayıya karşılık gelen kısımdaki birey üreme için seçilmiş olur. Bu işlem üreme için kaç birey seçilecekse o kadar tekrar eder ve daha sonra seçilen bütün bireyler genetik operasyonlar ile yeni nesiller elde edilir (Elmas, 2011).

Rulet yönteminin en önemli dezavantajı uygunluk değeri yüksek bireyin seçilmeme olasılığıdır.

3.3.4.7.3 Turnuva seçim yöntemi

Bu yöntemde rastgele gruplanan bireyler ile bu gruplanan bireylerin arasındaki rekabet ile birey seçimi yapılır. Bu grupta yeni nesli oluşturmak için uygunluk değeri en yüksek seçilir ve bu seçim bütün popülasyon olana dek devam eder. Performansı önemli derecede grup büyüklüğü etkiler (Coley, 1999).

3.3.4.8 Üreme

Üreme işlemi için çaprazlama, mutasyon ve elitizm adı verilen operatör işlemleri uygulanır.

3.3.4.8.1 Çaprazlama operatörü

Bir sonraki neslin üretilmesi için çaprazlama işlemi kullanılır ve seçilen ebeveynlerin döllerі çaprazlanmak suretiyle yeni döller ve yeni bireyler meydana gelir. Bu operatördeki en önemli nokta popülasyon içindeki bireylerin çeşitliliğinin azalmaması veya bunun aksine seçilen uygun bireylerin çaprazlamada komple kaybolmamasıdır. Çaprazlama işleminde de yine rastgele seçim yapılır (Üstün ve Yıldız, 2009).

3.3.4.8.2 Mutasyon operatörü

Popülasyonun çeşitliliğinin artması için çaprazlama operatörü ile üretilen bireylere mutasyon uygulanmak suretiyle yeni bir popülasyon meydana gelir. Popülasyon içindeki çeşitliliğın artması veya uygun bireylerin kaybolması mutasyon oranının büyük seçilmesi ile ilgilidir (Üstün ve Yıldız, 2009).

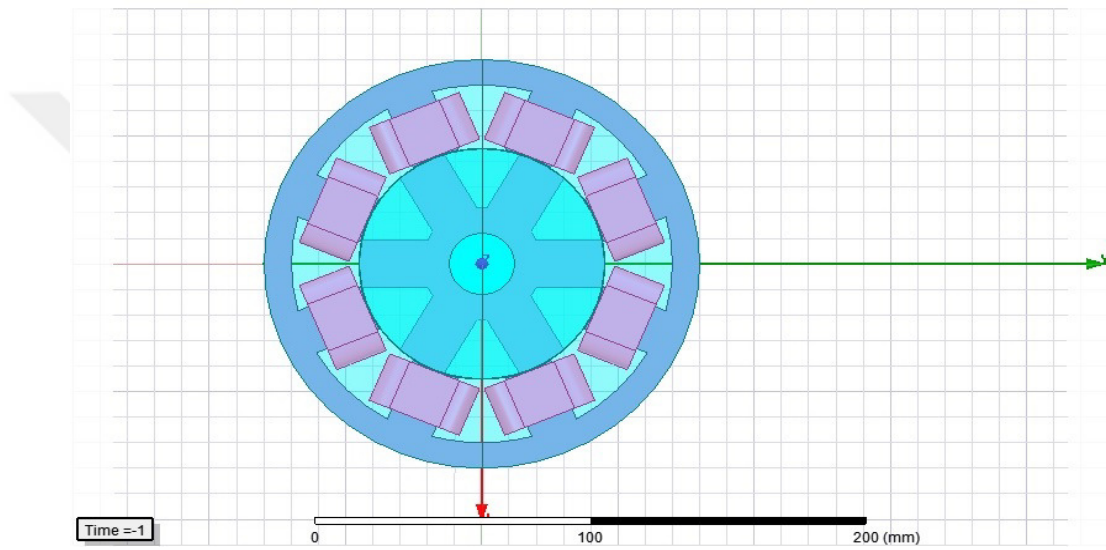
3.3.4.8.3 Elitizm

GA’larda elitizm her bir jenerasyondaki seçilen en iyi bireyin bir sonraki nesle aktarılması ile olur. Örnek verecek olursak 10 jenerasyonlu bir genetik işlemde 1. jenerasyonun en iyi bireyi 2. jenerasyon içinde herhangi bir yere yazılır daha sonra buranın en iyi bireyi 3. Jenerasyonun herhangi bir yerine yazılır bu işlem son jenerasyona kadar devam eder (Turan, 2007).

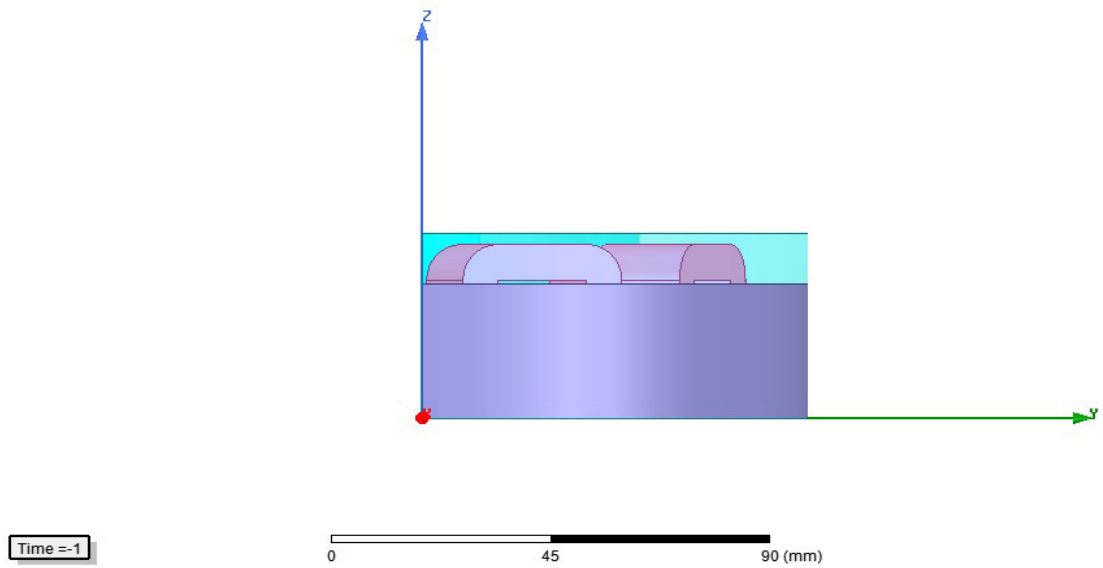


4. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN TORK RIPİL MİNİMİZASYONU İÇİN GENETİK BULANIK MANTIK SÜRME SİSTEMİ

Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te Ansys Maxwell programı kullanılarak tarasımını yaptığımız anahtarlama relüktans motorumuzun sırası ile üst görünüşü, yan görünüşü ve 3 boyutlu görünüşü verilmiştir.



Şekil 4.1. 8/6 ARM Üst Görünüş



Şekil 4.2. 8/6 ARM Yan Görünüş

Buradaki işlemleri gerçekleştirmede en önemli kısım bulanık mantık denetleyicide üyelik fonksiyonlarının ve kural tabanının uygun bir biçimde düzenlenmesi gerekir. Bu çalışmada bulanık mantık denetleyicideki bu kısımların ayarlanmasında genetik algoritma kullanılmıştır.

4.1 ARM Tork Karakteristikleri

ARM'deki karakteristiği rotor pozisyonu ve akımına bağlı olarak nonlinear bir değişim meydana getirir. En genel halde faz gerilimi elektrik makinaları teorisine göre aşağıdaki gibidir,

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

Burada m motorun toplam faz sayısını gösterir. Her faz için üretilen elektromanyetik tork ko-enerjinin kısmi türevine bağlı olarak aşağıdaki gibidir (Üstün, 2014),

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

Ko-enerji $W_j^c(i, \theta)$ aşağıdaki gibidir,

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

Toplam elektromanyetik tork aktif olan fazların üretmiş olduğu torkların toplamı aşağıda olduğu gibidir,

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

Ortalama tork ifadesi aşağıda olduğu gibidir,

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

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 ile ilgili bu çalışmada en temel nokta $T-i-\theta$ karakteristiğinin ifade edilmesidir. Bunun en önemli nedeni bu bilginin hem üretilen tork bilgisinin bilinmesi gereken çalışmalar hem de referans akım bilgisinin doğru elde edilebilmesi için ihtiyaç duyulmasıdır.

4.1.1 ARM'nin sonlu elemanlar methodu ile analizi

Günümüz teknolojisinde verim, güç, tork, performansın yüksek olduğu maliyet, gürültünün ise düşük olduğu sistemlerin oluşturulabilmesi için benzetim çalışmaları oldukça önemli bir yere sahiptir. Benzetim çalışmaları neticesinde ise tasarım doğru ve güvenilir olarak reel ortama aktarılmaktadır. Sonlu elemanlar methodu (SEM) birçok parametreye bağlı olan elektrik motorlarının modellenmesinde önemli bir yere sahiptir.

Tezin bu aşamasında SEM yardımı ile 8/6 kutuplu 4 fazlı ARM tasarımı yapılmıştır. Tasarım Çizelge 4.2'de görülen anahtarlama relüktans motorun değerleri bire bir simulasyon ortamına aktararak yapılmıştır. ARM'detork ve endüktans eğrileri sistem tasarımı ve motorun çalışma prensibi ile ilgili en önemli iki parametredir. Bu nedenle tork ve endüktans eğrilerinin farklı sarım sayıları, farklı akımlar, farklı pozisyonlar altındaki sonuçları incelenmiştir. Buradaki amacımız reel ortamda ihtiyacımız olan tork ve endüktans değerlerinin elde edilebilmesi için gerekli parametre ve sistem tasarımının simulasyon ortamında gerçekleştirilip daha

sonra reel ortam olacak çıktıların önizlemesini yapmaktır. Buradan yola çıkarak Ansys Maxwell paket programı kullanılarak farklı sarım sayılarında ARM tasarımı yapılmış ve tork ve endüsts eğrilerinin çıktıları ile değerlendirmeler yapılmıştır.

Akı bağıntısı $\varphi(\theta, i)$ ve 2 boyutlu manyetostatik dağıtımı makinanın enine kesitinin üzerindeki $\vec{A}$ manyetik vektör potansiyeli hesaplanarak belirlenir. (x,y) Kartezyen koordinat düzlemindeki manyetik vektör potansiyeli $\vec{A}$ lineer olmayan Poisson eşitliğine göre aşağıdaki gibi tanımlanıyor:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z \quad (4.7)$$

Burada v manyetik relüktivite ve J_z kaynak akım yoğunluğudur.

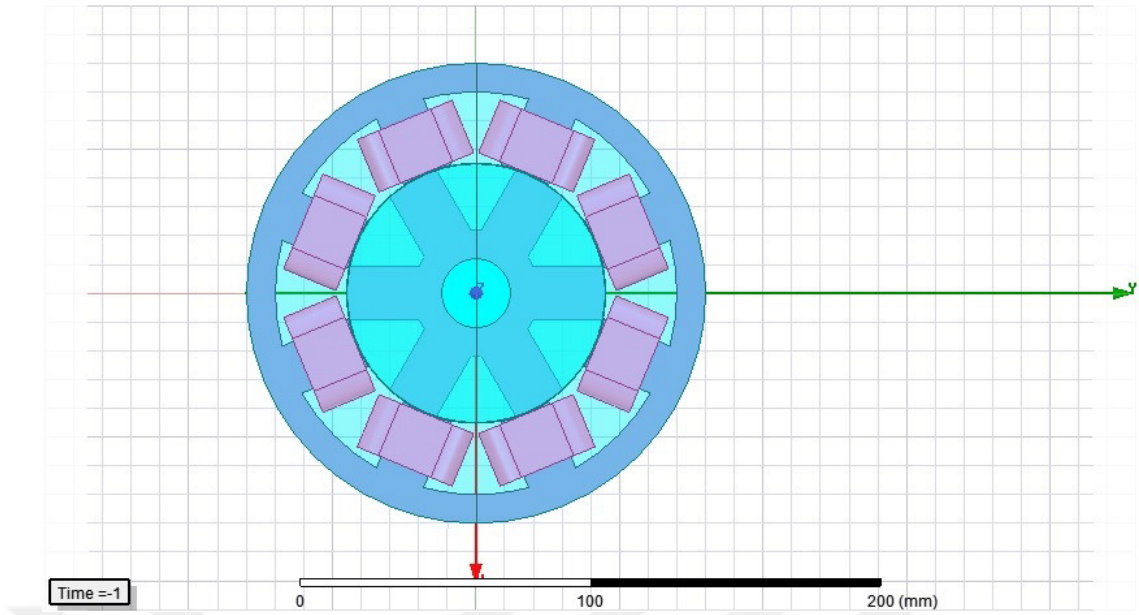
Her fazdaki akı bağıntısı aşağıdaki denklemde verilmiştir:

$$\varphi = \frac{1}{i} \int_v \vec{j} \vec{A} dV \quad (4.8)$$

Sonlu elemanlar methodundan sonra ise yukarıdaki denklem aşağıdaki gibi olur.

$$\varphi = \frac{Nl}{S} \sum_{k=1}^n A_k S_k \quad (4.9)$$

l makinanın eksen uzunluğu, N her fazın sarım sayısı ve S faz sargı alanı olarak dikkate alınır (Labiod et al., 2017). Şekil 4.5'te ise 8/6 ARM'nin genel gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.5. 8/6 ARM

Çizelge 4.1’de verilen motorun elektriksel parametreleri laboratuvarımızda bulunan ARM’nin etiket değerleridir (Üstün vd., 2018). Çizelge 4.2’de ise verilen motorun geometrik parametreleri laboratuvarımızda bulunan motorun parçalarına ayrılarak elde edilen detaylı ölçüm değerleridir.

Çizelge 4.1. 8/6 ARM Elektriksel Parametreleri

Parametreler	Değerler	Birimler
Faz sayısı	4	-
Enkoder ile Maksimum hız	3000	Rpm
Anma gerilimi	300	V
Anma akımı	11	A
Anma gücü	3.3	kW
Stator sargı direnci	0.9	Ω
Hizalanmış faz endüktansı	72	mH
Hizalanmamış faz endüktansı	9	mH

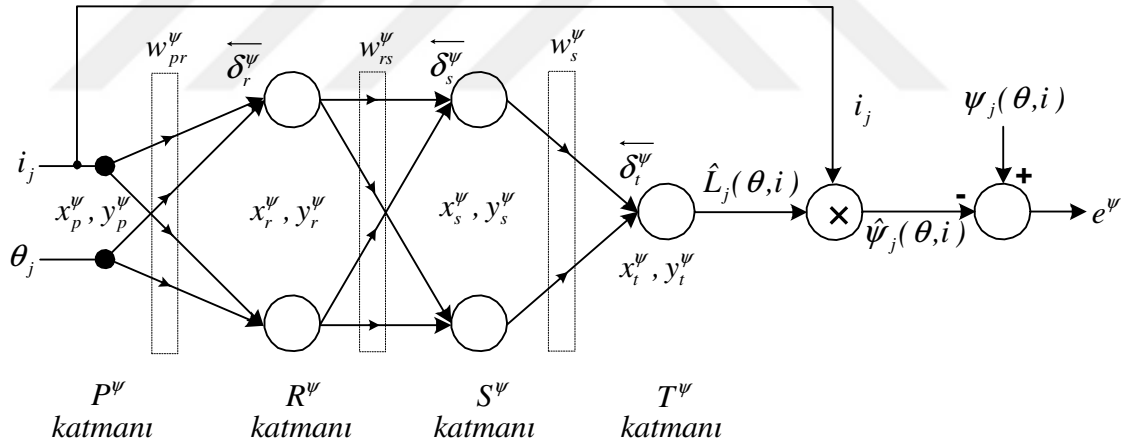
Çizelge 4.2. 8/6 ARM Geometrik Parametreleri

Stator kutup sayısı	8
Rotor kutup sayısı	6
Rotor iç çapı(mm)	30
Rotor dış çapı(mm)	90
Stator iç çapı(mm)	91
Stator dış çapı(mm)	160
Uzunluk(mm)	60
Çatal kalınlığı(mm)	10
Bölge uzunluğu(mm)	83

4.1.2 YSA kullanılarak ARM'nin modellenmesi

Şekil 4.6'da YSA'lar yardımı ile akı tahmincisinin meydana getirilmesinde kullanılan ağ yapısıdır. Ağın girişi i_j ve θ_j sırasıyla akım ve pozisyon bilgisinin algılayıcılardan alınması suretiyle normalize edilmiş değerleridir. Ağın çıkışı ise girişleri ile orantılı olarak tahmin neticesi üretilen $\hat{\psi}_j$ akı büyüklüğüdür. Ağ giriş (P^ψ), iki gizli katman (R^ψ, S^ψ) ve bir çıkış katmanı (T^ψ) olmak üzere toplam 4 katmandan meydana gelmiştir. Ağın ileri yönlü akış ve geriyayılma algoritması aşağıda ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Bu ağda kullanılan ψ üst indisi ağ değişkenlerinin akı tahmincisine ait olduğunu, j alt indisi motor fazlarını göstermektedir (Üstün, 2009).

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



Şekil 4.6. Akı Tahminci İçin Sinir Ağı Mimarisi

4.1.2.1 İleri yayımlı öğrenme algoritması

İleri besleme algoritmasında akış girişten çıkışa doğru meydana gelmektedir. Katmanların her birinde düğümlerin girişleri (x), bir önceki katmandaki çıkışlar ile katmanları birbirine bağlayan ağırlık değerlerinin çarpımlarının toplamıdır. Bu fonksiyon sonucunda elde edilen bu giriş değeri Denklem (4.10)'da gösterilen $y(x)$

etkinlik fonksiyonu yardımıyla çıkışı meydana getirir. Katmanların aşamalarına göre ileri besleme modeli aşağıdaki verilebilir,

$$y(x) = \exp\left(-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2\right) \text{ ve } y'(x) = -2\left(\frac{x-c}{\sigma^2}\right)\exp\left(-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2\right) \quad (4.10)$$

Burada x düğüm girişleri toplamını, y x 'e göre elde edilen düğüm çıkışını, c fonksiyonunun orta noktasını ve σ genişliğini ifade etmektedir.

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

$$x_p^\psi = \{i_j, \theta_j\}, \quad y_p^\psi = x_p^\psi \quad (4.11)$$

Burada $p = 0 \dots P^\psi$ dir.

R^ψ katmanı: Birinci gizli katmandır. Bu katmanın giriş ve çıkışları aşağıdaki gibi elde edilir,

$$x_r^\psi = \sum_{p=0}^{P^\psi} y_p^\psi \cdot w_{pr}^\psi \text{ ve } y_r^\psi = y(x_r^\psi) \quad (4.12)$$

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

S^ψ katmanı: İkinci gizli katmandır. Bu katmanın giriş ve çıkışları aşağıdaki gibi elde edilir,

$$x_s^\psi = \sum_{r=0}^{R^\psi} y_r^\psi \cdot w_{rs}^\psi \text{ ve } y_s^\psi = y(x_s^\psi) \quad (4.13)$$

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

T^ψ katmanı: Çıkış katmandır ve bu katmanın giriş ve çıkışları aşağıdaki gibi elde edilir,

$$x_t^\psi = \sum_{s=0}^{S^\psi} y_s^\psi \cdot w_{st}^\psi \text{ ve } y_t^\psi = y(x_t^\psi) = \hat{L}_j(\theta, i) \quad (4.14)$$

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

$$\hat{\psi}_j(\theta, i) = \hat{L}_j(\theta, i) \cdot i_j \quad (4.15)$$

Denklem (4.11) ile Denklem (4.15) arasındaki ifadeler birleştirilirse tahminci modeli aşağıdaki gibi ifade edilebilir,

$$\hat{\psi}_j(\theta, i) = y \left(\sum_s^{S^\psi} y \left(\sum_{r=0}^{R^\psi} y \left(\sum_{p=0}^{P^\psi} y_p^\psi \cdot w_{pr}^\psi \right) \cdot w_{rs}^\psi \right) \cdot w_{st}^\psi \right) \cdot i_j \quad (4.16)$$

Eğitim süresince bu eşitlikle akı tahmini yapılır. Tahmin edilen akı bilgisi geręek akı bilgisiyle karşılaştırılarak ağ eğitimi geręekleřtirilir. Daha önemli olanı eğitim tamamlandığında geliştirilen tahmincinin Denklem (4.16) ile verilen bu ileri besleme modeli kullanılır.

4.1.2.2 Geri yayılmalı öğrenme algoritması

Bir sinir ağının öğrenme algoritmasının en önemli bölümü öğrenme algoritmasındaki her bir elemanın eğim vektörünün tekrarlamalı bir biçimde nasıl elde edilebileceğinin ağ parametrelerine bağlı enerji fonksiyonunun türevinin zincir kuralı kullanılarak tanımlanmasıdır. Geriyayılmalı öğrenme kuralı denmesinin nedeni eğim vektörünün ağ akışının tersi yönünde hesaplanmasındandır. Danışmanlı eğitimli öğrenme kuralı vasıtasıyla sinir ağının çevrimiçi öğrenme algoritmasını tanımlamak için öncelikle enerji fonksiyonu aşağıdaki gibidir,

$$E(k) = \frac{1}{2} e^2(k) \quad (4.17)$$

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

$$e(k) = \psi(k) - \hat{\psi}(k) \quad (4.18)$$

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^ψ katmanı: Bu katman üzerinde herhangi bir ağırlık ayarlanmadığı için ağ çıkışındaki hata değeri zincir kuralı kullanılarak geriye yansıtılarak T^ψ katmanı girişindeki hata değeri δ_t^ψ aşağıda olduğu gibi hesaplanır,

$$\overleftarrow{\delta}_t^\psi = -\frac{\partial E}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial \hat{\psi}_j} \frac{\partial \hat{\psi}_j}{\partial y_t^\psi} \frac{\partial y_t^\psi}{\partial x_t^\psi} = e_{i_j} y'(x_t^\psi) \quad (4.19)$$

S^ψ katmanı: Bu katmandaki ağırlık değişimleri Δw_s^ψ aşağıda olduğu gibi hesaplanır,

$$\begin{aligned} \Delta w_s^\psi &= \eta_s^\psi \left(-\frac{\partial E}{\partial w_s^\psi} \right) = \eta_s^\psi \left(-\frac{\partial E}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial \hat{\psi}_j} \frac{\partial \hat{\psi}_j}{\partial y_t^\psi} \frac{\partial y_t^\psi}{\partial x_t^\psi} \frac{\partial x_t^\psi}{\partial w_s^\psi} \right) \\ \Delta w_s^\psi &= \eta_s^\psi \left(-\frac{\partial E}{\partial w_s^\psi} \right) = \eta_s^\psi \overleftarrow{\delta}_t^\psi \frac{\partial x_t^\psi}{\partial w_s^\psi} \\ &= \eta_s^\psi \overleftarrow{\delta}_t^\psi y_s^\psi \end{aligned} \quad (4.20)$$

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

$$\overleftarrow{\delta}_s^\psi = -\frac{\partial E}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial \hat{\psi}_j} \frac{\partial \hat{\psi}_j}{\partial y_t^\psi} \frac{\partial y_t^\psi}{\partial x_t^\psi} \frac{\partial x_t^\psi}{\partial y_s^\psi} \frac{\partial y_s^\psi}{\partial x_s^\psi} = \delta_t^\psi w_s^\psi y'(x_s^\psi) \quad (4.21)$$

R^ψ katmanı: Bu katmandaki ağırlık değişimleri Δw_{rs}^ψ aşağıda olduğu gibi hesaplanır,

$$\begin{aligned} \Delta w_{rs}^\psi &= \eta_{rs}^\psi \left(-\frac{\partial E}{\partial w_{rs}^\psi} \right) = \eta_{rs}^\psi \left(-\frac{\partial E}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial \hat{\psi}_j} \frac{\partial \hat{\psi}_j}{\partial y_t^\psi} \frac{\partial y_t^\psi}{\partial x_t^\psi} \frac{\partial x_t^\psi}{\partial y_s^\psi} \frac{\partial y_s^\psi}{\partial x_s^\psi} \frac{\partial x_s^\psi}{\partial w_{rs}^\psi} \right) \\ \Delta w_{rs}^\psi &= \eta_{rs}^\psi \left(-\frac{\partial E}{\partial w_{rs}^\psi} \right) = \eta_{rs}^\psi \overleftarrow{\delta}_s^\psi \frac{\partial x_s^\psi}{\partial w_{rs}^\psi} \\ &= \eta_{rs}^\psi \overleftarrow{\delta}_s^\psi y_r^\psi \end{aligned} \quad (4.22)$$

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

$$\overleftarrow{\delta}_r^\psi = -\frac{\partial E}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial \hat{\psi}_j} \frac{\partial \hat{\psi}_j}{\partial y_t^\psi} \frac{\partial y_t^\psi}{\partial x_t^\psi} \frac{\partial x_t^\psi}{\partial y_s^\psi} \frac{\partial y_s^\psi}{\partial x_s^\psi} \frac{\partial x_s^\psi}{\partial y_r^\psi} \frac{\partial y_r^\psi}{\partial x_r^\psi} = y'(x_r^\psi) \sum_{s=0}^{S^\psi} \delta_s^\psi w_{rs}^\psi \quad (4.23)$$

P^ψ katmanı: Bu katmandaki ağırlık değişimleri Δw_{pr}^ψ aşağıda olduğu gibi hesaplanır,

$$\Delta w_{pr}^\psi = \eta_{pr}^\psi \left(-\frac{\partial E}{\partial w_{pr}^\psi} \right) = \eta_{pr}^\psi \left(-\frac{\partial E}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial \hat{\psi}_j} \frac{\partial \hat{\psi}_j}{\partial y_t^\psi} \frac{\partial y_t^\psi}{\partial x_t^\psi} \frac{\partial x_t^\psi}{\partial y_s^\psi} \frac{\partial y_s^\psi}{\partial x_s^\psi} \frac{\partial x_s^\psi}{\partial y_r^\psi} \frac{\partial y_r^\psi}{\partial x_r^\psi} \frac{\partial x_r^\psi}{\partial w_{pr}^\psi} \right)$$

$$\Delta w_{pr}^\psi = \eta_{pr}^\psi \left(-\frac{\partial E}{\partial w_{pr}^\psi} \right) = \eta_{pr}^\psi \overleftarrow{\delta}_r^\psi \frac{\partial x_r^\psi}{\partial w_{pr}^\psi}$$

$$= \eta_{pr}^\psi \overleftarrow{\delta}_r^\psi y_p^\psi$$
(4.24)

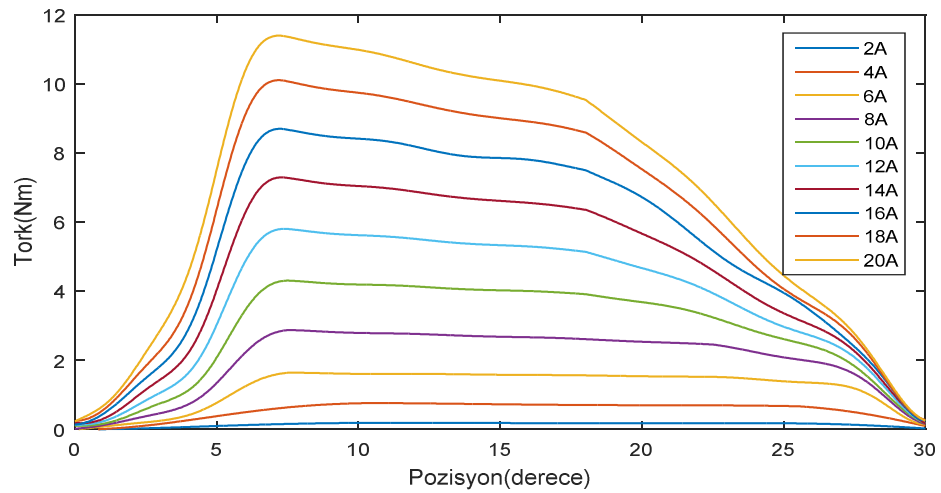
Denklem (4.20), Denklem (4.22) ve Denklem (4.24)'de sırasıyla η_s^ψ , η_{rs}^ψ ve η_{pr}^ψ ifadeleri öğrenme katsayılarıdır. Bu eşitliklerde elde edilen ağırlık değişimleri Δw_s^ψ , Δw_{rs}^ψ ve Δw_{pr}^ψ bir önceki ağırlık değerleri ile toplanarak şu anki ağırlık değerleri aşağıdaki gibi elde edilir,

$$w_s^\psi(k+1) = w_s^\psi(k) + \Delta w_s^\psi \quad (4.25)$$

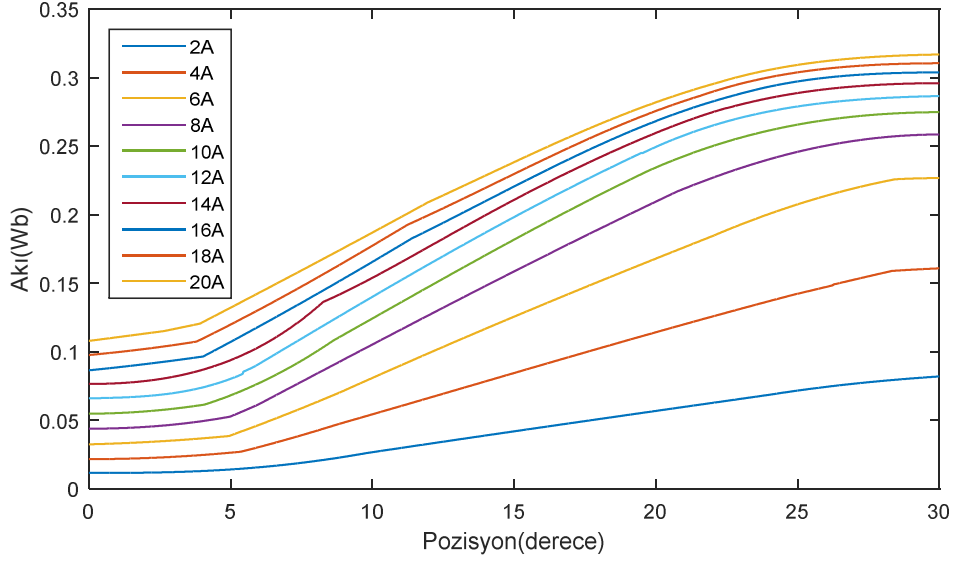
$$w_{rs}^\psi(k+1) = w_{rs}^\psi(k) + \Delta w_{rs}^\psi \quad (4.26)$$

$$w_{pr}^\psi(k+1) = w_{pr}^\psi(k) + \Delta w_{pr}^\psi \quad (4.27)$$

Ağ eğitiminin başlangıcında ağırlık değerleri daha önceki bilgilere bağlı olarak seçilebileceği gibi rastgele olarak da atanabilir. Bu çalışmada Tork-Akım-Konum ($T-i-\theta$) karakteristiği ve Akı-Akım-Konum ($\phi-i-\theta$) karakteristiği SEM kullanılarak Ansys programının da simülasyon yaparak elde edilmiştir.



Şekil 4.7. 8/6 ARM $T-i-\theta$ Karakteristiği



Şekil 4.8. 8/6 ARM $\phi-i-\theta$ Karakteristiği

SEM ile benzetimden her bir pozisyon için 2000 veri elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler sinir ağları ile işlenip temizlenmiştir. İşlenip temizlenen veriler Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de sırası ile tork ve akı için grafik halinde verilmiştir.

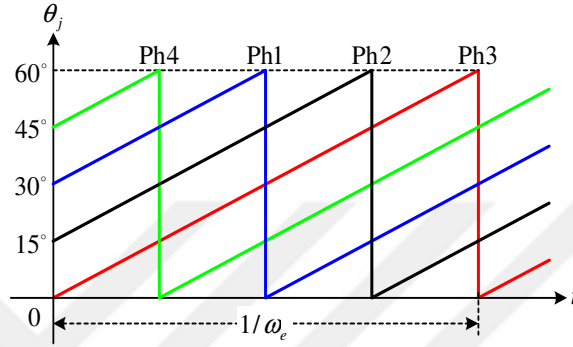
4.2 Faz Pozisyon üretici ve sıralayıcı

Pozisyona bağlı çalışan elektrik makinelerinde olduğu gibi ARM’lerde 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.

$$\theta_j = \text{mod}((\theta + \theta_s + (j-4) \times \theta_{step}), \theta_r) \quad j = 1, \dots, 4 \quad (4.28)$$

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 anahtarlamlar 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 üretecinde kullanılır. Bir faz için yapılan işlemler diğer fazlara da uygulanır, böylece işlemler daha sade olur (Üstün, 2015). Şekil 4.9’da ARM’nin faz pozisyon değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 4.9. ARM Faz Pozisyon Değişimleri

4.3 Histeresis Band PWM

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

Bipolar durumda,

$$S_j^H, S_j^L = \begin{cases} 1, & i_j^* - i_j \geq h_b \\ 0, & i_j^* - i_j \leq -h_b \end{cases} \quad \theta_{on} < \theta_j < \theta_r / 2 - \theta_{off}, \quad j = 1, \dots, 4 \quad (4.29)$$

Unipolar durumda,

$$S_j^H = \begin{cases} 1, & i_j^* - i_j \geq h_b \\ 0, & i_j^* - i_j \leq -h_b \end{cases} \quad \theta_{on} < \theta_j < \theta_r / 2 - \theta_{off}, \quad j = 1, \dots, 4 \quad (4.30)$$

$$S_j^L = \begin{cases} 1, & \theta_{on} < \theta_j < \theta_r / 2 - \theta_{off} \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad j = 1, \dots, 4 \quad (4.31)$$

Buradan yola çıkarak pozisyon ve akım geri beslemesi kullanılması suretiyle istediğimiz referans akıma bağlı olarak konverter anahtarları iletime ve kesime götürülür ve motor fazlarında istenen akım değerleri elde edilir.

4.4 Tork Denetimi İçin Genetik Algoritma Yapısı

GA sırası ile kodlama, başlangıç popülasyonunun oluşturulması, uygunluk fonksiyonunun seçilmesi, popülasyon değişikliği ve bunlardan sonra ise yeni bir neslin oluşumu için aile seçimi, çaprazlama ve mutasyon işlemleri ile gerçekleşmektedir. Çalışmamızın bu bölümünde genetik algoritma kullanarak bulanık mantık denetleyicimizin kural tabanı optimum olarak belirlenmiştir.

1. İşlem Kodlama: Bu aşamada genetik algoritmanın genleri ve kromozomları oluşturulmaktadır. Çalışmamızda ise 0 ile 9 arasında gerçek sayılar genleri, genler ise kromozomları meydana getirmiştir. Kromozomumuzun gen sayısı bulanık mantık denetleyicimizin kural tabanını meydana getiren kural sayısına eşittir. Çalışmamızda ise 36 adet kural olması nedeni ile kromozomlarımızın her biri 36 genden oluşmaktadır.

2. İşlem Başlangıç popülasyonunun oluşturulması: Birbirinden farklı denemeler sonucunda popülasyon büyüklüğü belirlenmiştir. Denemeler yapılmasında amacımız çeşitliliğin artırılmasıdır. Çalışmamızda ise popülasyonumuzu on kromozom meydana getirmektedir. Başlangıç değeri ise rastgele olarak belirlenmiştir.

3. Uygunluk fonksiyonunun belirlenmesi: GA’larda problemimiz uygunluk fonksiyonu belirlemesi sayesinde uygun çözümü elde edebilmektedir. Uygunluk fonksiyonu kromozomumuzun bir sonraki nesle aktarılıp aktarılmayacağına söz sahibi olan parametredir.

4. Seçim: Bu aşamada üreme işlemi için kullanılacak bireyler seçilmektedir. Yeni jenerasyon meydana getirilmesi için popülasyonumuzu oluşturan bireyler arasında uygunluk değeri göz önünde bulundurularak aileler belirlenmektedir.

5. Üreme: Üreme işleminde çaprazlama ve mutasyon operatörleri kullanılmıştır.

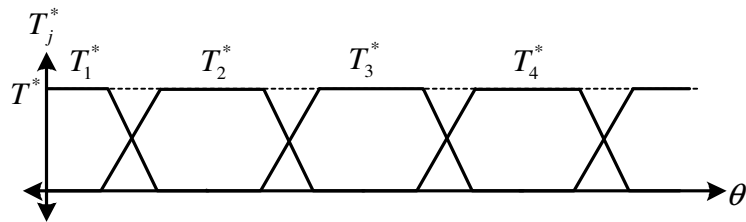
i) Çaprazlama işlemi: Çaprazlama yeni nesli oluşturmak için seçilen iki ebeveyn bireyin genlerinin karşılıklı olarak yer değiştirilmesine denir. Aile seçimi sonucu belirlenen ebeveyn bireyler kullanılarak yeni çocuklar oluşturulur. Bu çalışmada yeni neslin bireylerinin oluşturulması için iki noktadan çaprazlama belirlenmiş olup çaprazlamaya giren bireyler ve çaprazlama noktaları rastgele seçilerek 0.75 olasılık değeri kullanılmıştır.

ii) Mutasyon işlemi: GA'da belli bir iterasyonun ardından popülasyonu oluşturan bireyler birine benzerlik göstermektedir bu popülasyondaki çeşitliliği arttırmak için ise mutasyon operatörü kullanılarak popülasyonun yeni bireyleri üreme işlemi ile meydana getirilir. Çalışmamızda mutasyon olasılığı 0,25 olarak kullanılmıştır. Elde edilen bu yeni popülasyon eskisinin yerini alır. Burada en iyi bireyin sonraki nesle aktarımı için elitizm yöntemi kullanılmıştır. Bu kısımdan sonra ise 3. işlemde başlayarak en iyi sonuç elde edilinceye kadar tekrarlanır.

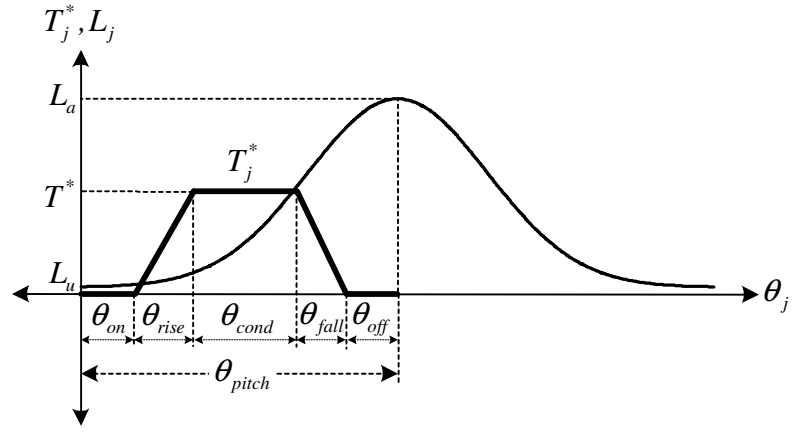
5. GENETİK BULANIK MANTIK İLE TORK PAYLAŞIM FONKSİYONLARININ OPTİMİZASYONU

5.1 Tork Paylaşım Fonksiyonları

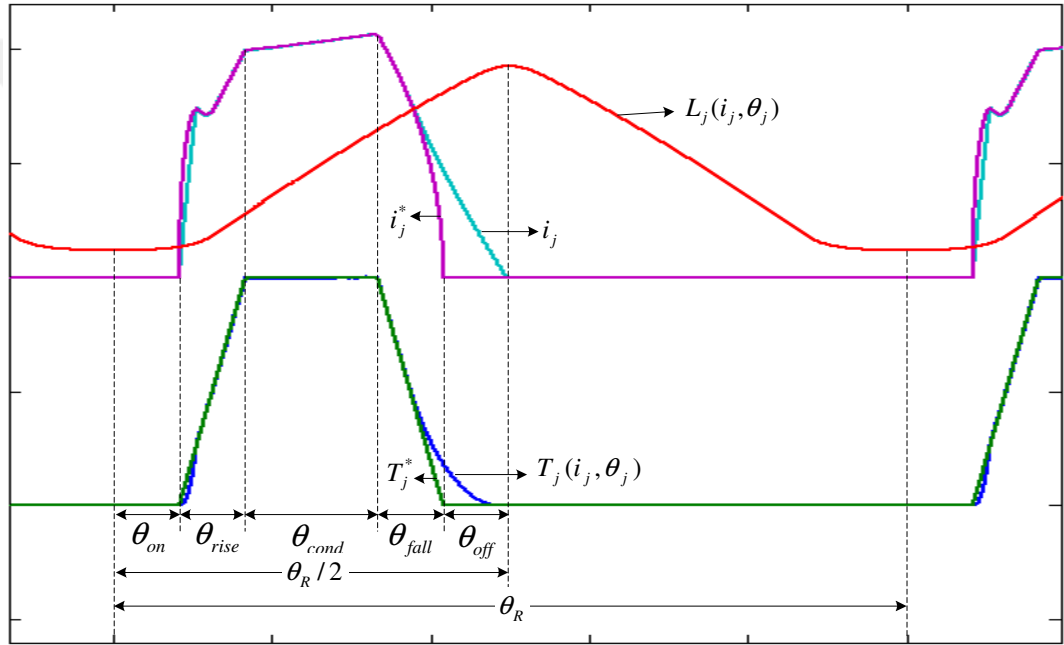
Tork rıpılıının azaltılmasına yönelik uygun bir elektronik yaklaşım ayrı ayrı fazlardan üretilen torkların, toplam torkun pozisyon ve hız kontrol döngüsünden elde edilen referans tork değerini izlemesini sağlayacak şekilde koordine etmektir (Husain, 1996). Bunun için kullanılabilecek olan genel tork paylaşım fonksiyonları Şekil 5.1’de verilmiştir. Burada amaç ardışık iki fazın bağımsız olarak ürettikleri torkların üretilen referans torku takip edebilmesini sağlamaktır. Fakat Şekil 5.1’de gösterilen sabit yapılı TPF’lerin zaman sabiti etkisiyle akımın ani olarak değiştirilememesi nedeniyle motorun tüm hız ve yük koşullarında etkinlik sağlamasını engellemektedir. Dolayısıyla tork rıpıllarının oluşması da kaçınılmaz olacaktır. Bu sebepten bu çalışmada TPF’lerin hız ve yük koşullarına uyum sağlayabilecek esneklikte olması düşünülmüştür. Bir faz için uyarlamalı TPF Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Tork Paylaşım Fonksiyonları (Önder vd., 2019).



(a)



(b)

Şekil 5.2. Bir Faza Ait TSF'nin Grafiksel Gösterimi

Burada her bir TSF iletme geçme θ_{on} , yükselme θ_{rise} , düz bölge θ_{flat} , düşme θ_{fall} ve kesim θ_{off} olmak üzere toplam beş bölge olarak düzenlenmiştir. Burada verilen pozisyon değerleri θ_{on} , θ_{rise} , θ_{fall} ve θ_{off} hız ve referans tork büyüklüğüne göre tasarlanan BM denetim mantığı kullanılarak uyarlanmaktadır. Bu pozisyon bilgisi elde edildikten sonra nümerik olarak θ_{flat} pozisyon değeri aşağıda olduğu gibi hesaplanır,

$$\theta_{flat} = \theta_{pitch} - (\theta_{on} + \theta_{off} + \theta_{rise} + \theta_{fall}) \quad (5.1)$$

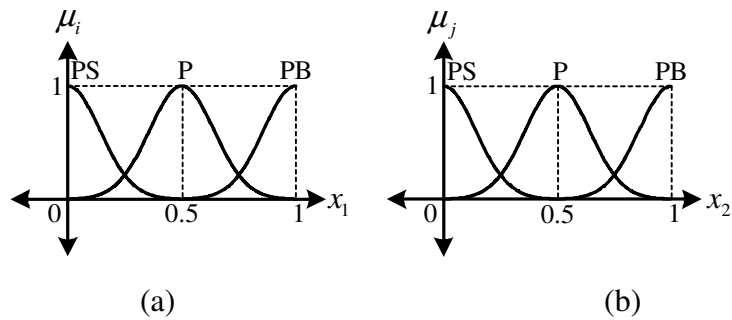
Buna göre bir faz için TPF'leri yukarıda sıralanan 5 pozisyon için aşağıda olduğu gibi verilebilir.

$$T_j^* = \begin{cases} T^*(\theta_j - \theta_{on})/\theta_{rise} & \text{eger } \theta_{on} \leq \theta_j < \theta_{on} + \theta_{rise} \\ T^* & \text{eger } \theta_{on} + \theta_{rise} \leq \theta_j < \theta_{on} + \theta_{rise} + \theta_{flat} \\ T^*(\theta_{pitch} - \theta_{off} - \theta_j)/\theta_{fall} & \text{eger } \theta_{on} + \theta_{rise} + \theta_{flat} \leq \theta_j < \theta_{pitch} - \theta_{off} \\ 0 & d.d. \end{cases} \quad (5.2)$$

BM denetleyici kural tabanı da genetik algoritma kullanılarak online olarak ayarlanmıştır. Genetik bulanık algoritma aşağıda ayrıntılı olarak izah edilecektir.

5.2 Bulanık Mantık Denetleyici

Bulanık mantık denetleyici yapısı genel olarak üç bölümden oluşturulur. Bulanıklaştırma, karar verme mantığı ve durulaştırma olarak üç bölüme ayrılabilir. Bulanıklaştırma işlemi giriş üyelik fonksiyonları ile gerçekleştirilir. Burada iki girişli dört çıkışlı olan bir bulanık mantık denetleyici kullanılmıştır. Bulanık mantık denetleyici girişleri hız değerinin mutlak değeri ile referans tork değerinin mutlak değeridir. Çıkışlar ise yukarıda belirtilmiş olan tork paylaşım fonksiyonunun θ_{on} , θ_{rise} , θ_{fall} ve θ_{off} açısı değerleridir. Buna göre aşağıda bulanık mantık denetleyici giriş fonksiyonları Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Üyelik fonksiyonu olarak Gaussian üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. Her bir giriş PS (pozitif küçük), PM (pozitif orta) ve PB (pozitif büyük) olarak etiketlenmiş üç alt kümeye ayrılarak gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Giriş Değişkenlerine Ait Üyelik Fonksiyonları a) Hız b) Tork

Burada $x_1 = |\omega|$ ve $x_2 = |T^*|$ giriş değişkenleri hız ve referans torkun mutlak değerleridir. μ_i ve μ_j de bu girişlere karşılık gelen üyelik değerlerini göstermektedir ve $[0,1]$ aralığında değer almaktadır. Girişlere karşılık gelen üyelik değerleri aşağıda olduğu gibi hesaplanır,

$$\mu_{i,j} = \exp \left[- \left(\frac{x_{1,2} - c_{i,j}}{\sigma_{i,j}} \right)^2 \right] \quad i=1,2,3 \text{ and } j=1,2,3 \quad (5.3)$$

Her bir girişe göre oluşturulan kural tablosu Çizelge 5.1’de verilmiştir. θ_{on} , θ_{rise} , θ_{fall} ve θ_{off} için düzenlenen kural tabloları Çizelge 5.1’de sırasıyla verilmiştir. Her bir çıkış için 9 kural ve toplam 36 kural bulunmaktadır. Kurallar aşağıda gösterildiği gibi if-then yapısıyla gerçekleştirilir,

$$R_{ij}^m : \text{if } x_1 \text{ is } (PS \text{ or } P \text{ or } PB) \text{ and } x_2 \text{ is } (PS \text{ or } P \text{ or } PB) \text{ then output is } u_{ij}^m = g_{ij}^m \quad (5.4)$$

Burada $m=1, \dots, 4$, sırasıyla θ_{on} , θ_{rise} , θ_{fall} ve θ_{off} çıkışlarını göstermektedir.

$x_1 \backslash x_2$	PS(1)	PM(2)	PB(3)
PS(1)	g_{11}^1	g_{12}^1	g_{13}^1
PM(2)	g_{21}^1	g_{22}^1	g_{23}^1
PB(3)	g_{31}^1	g_{32}^1	g_{33}^1

(a)

$x_1 \backslash x_2$	PS(1)	PM(2)	PB(3)
PS(1)	g_{11}^2	g_{12}^2	g_{13}^2
PM(2)	g_{21}^2	g_{22}^2	g_{23}^2
PB(3)	g_{31}^2	g_{32}^2	g_{33}^2

(b)

$x_1 \backslash x_2$	PS(1)	PM(2)	PB(3)
PS(1)	g_{11}^3	g_{12}^3	g_{13}^3
PM(2)	g_{21}^3	g_{22}^3	g_{23}^3
PB(3)	g_{31}^3	g_{32}^3	g_{33}^3

(c)

$x_1 \backslash x_2$	PS(1)	PM(2)	PB(3)
PS(1)	g_{11}^4	g_{12}^4	g_{13}^4
PM(2)	g_{21}^4	g_{22}^4	g_{23}^4
PB(3)	g_{31}^4	g_{32}^4	g_{33}^4

(d)

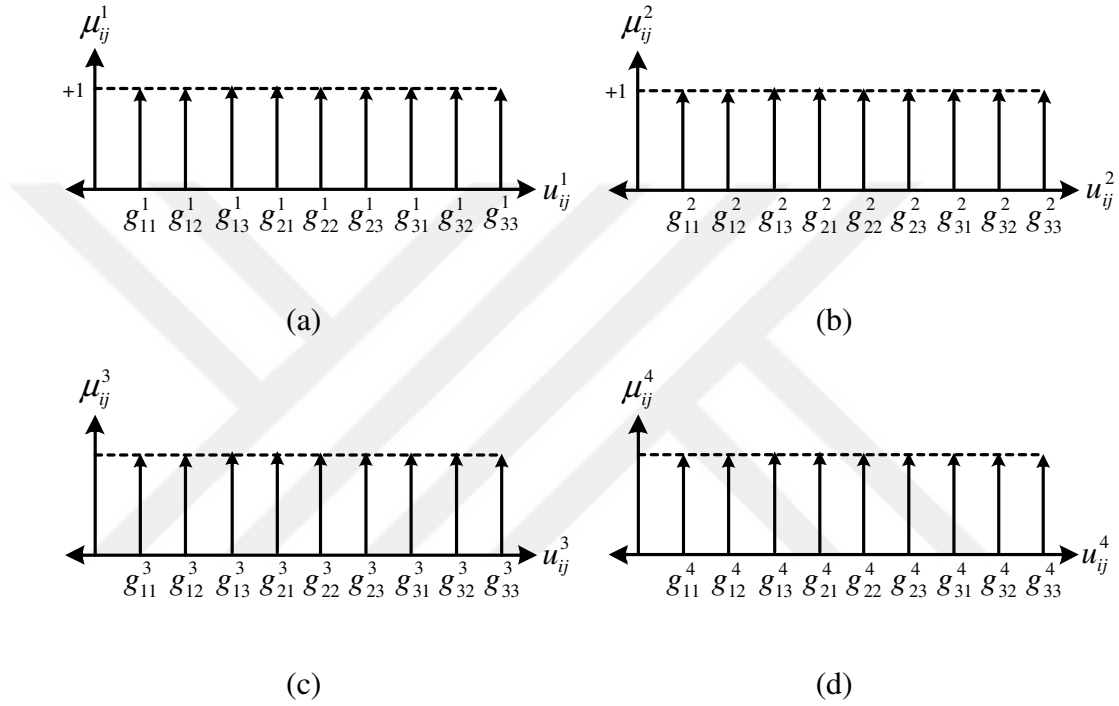
Çizelge 5.1. Kural Tabanı Tabloları (a) θ_{on} (b) θ_{rise} (c) θ_{fall} ve (d) θ_{off}

Giriş üyelik fonksiyonları vasıtasıyla her bir giriş için elde edilen $\mu_{i,j}$ üyelik değerleri hesaplandıktan sonra, kural tablosu kullanılarak girişe karşılık gelen çıkış üyelik fonksiyonlarının merkezleri u_{ij}^m belirlenir. Bunun yanında girişe göre çıkış

üyelik fonksiyonlarının üyelik değerlerinin de belirlenmesi gerekir, bunu bulanık çıkarım olarak adlandırırız. Burada min çıkarım işlemi aşağıdaki gibi gerçekleştirilir ve μ_{ij}^m aşağıdaki gibi elde edilir,

$$\mu_{ij} = \min(\mu_i \wedge \mu_j) \quad i=1,2,3 \text{ and } j=1,2,3 \quad (5.5)$$

Bu çalışmada θ_{on} , θ_{rise} , θ_{fall} ve θ_{off} çıkış üyelik fonksiyonları olarak Şekil 5.4'te gösterilen singleton üyelik fonksiyonları kullanılmıştır.



Şekil 5.4. Çıkış Değişkenlerine Ait Üyelik Fonksiyonları (a) θ_{on} (b) θ_{rise} (c) θ_{fall} ve (d) θ_{off}

Çıkış üyelik fonksiyonlarına ilişkin Denklem 5.4 ve 5.5'te elde edilen merkez değerleri ve üyelik değerleri kullanılarak bulanık mantık denetleyici çıkışlar aşağıda olduğu gibi hesaplanmaktadır. Bu işlem durulaştırma olarak adlandırılır ve burada aşağıda gösterilen alan ortalaması yöntemi kullanılmıştır.

$$o^m = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{I, J} u_{ij}^m * \mu_{ij}^m}{\sum_{i=1, j=1}^{I, J} \mu_{ij}^m} \quad (5.6)$$

Burada o^m bulanık mantık denetleyici çıkışını göstermektedir. Burada $\theta_{on} = o^1$, $\theta_{rise} = o^2$, $\theta_{fall} = o^3$ ve $\theta_{off} = o^4$ değerlerine karşılık gelmektedir. Bulanık

denetleyici çıkışları Denklem 5.1 ve 5.2’de kullanılarak tork paylaşım fonksiyonlarının uyarlanması kullanılacaktır.

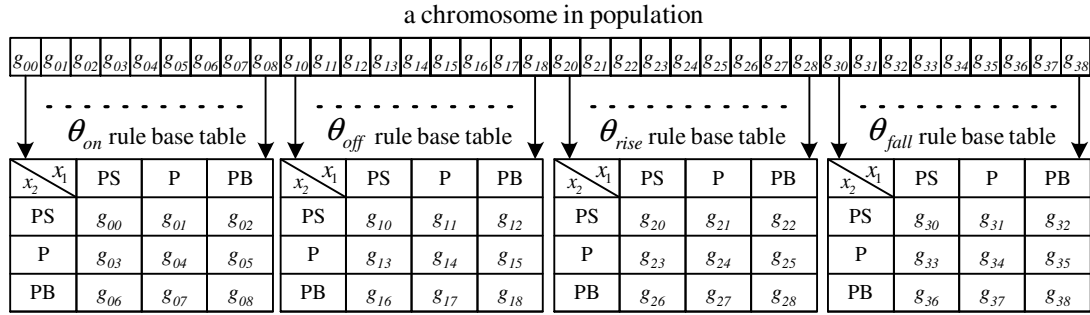
Bulanık mantık denetleyicilerde tasarım gerçekleştikten sonra uygun çıkışın elde edilebilmesi için giriş üyelik fonksiyonları, kural tabanı ve çıkış üyelik fonksiyonlarının ayarlanması gerekir. Bu kısımların ayarlanması ilk zamanlarda deneme yanılma yöntemi ile gerçekleştirilmekteydi. Bu yöntem hem uzun zaman alması hem de çok iyi uzmanlar gerektirmesi dezavantajdır. Bunun yerine sinir ağları vasıtasıyla bu bölümlerin ayarlanması gerçekleştirilmektedir. Sinir ağları kullanarak bulanık denetleyicilerin parametre ayarlaması bulanık mantıktaki matematikler işlemlerle uyuşmaması ve online öğrenmede sınırlılıklar getirmesi nedeniyle burada bulanık mantık denetleyici kural tabanının eğitimi genetik algoritmalar vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Bulanık mantık denetleyici çıkışı tek ise hem giriş hem de kural tablosu eğitilebilir. Burada aynı girişlere karşılık birden fazla giriş olduğu için eğitim işlemini etkin hale getirmek için sadece kural tabanının eğitimi gerçekleştirilmiştir. Burada çıkış olarak singleton üyelik fonksiyonları kullanıldığı için aynı zamanda çıkış üyelik fonksiyonlarının ayarlanması da gerçekleştirilmiş olmaktadır. Buna göre bulanık denetleyicinin uyarlanması için kullanılan genetik algoritma aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir.

5.3 GA’nın Tasarımı

GA’lar başlangıç popülasyonunun seçimi, değerlendirme işleminin yani uygunluk fonksiyonunun belirlenmesi, üreme işlemi için uygun ailelerin seçimi, çaprazlama işlemi ve mutasyon işleminden oluşan bir algoritmadır. Genetik algoritma ile bulanık mantık denetleyicinin kural tabanının iyileştirilmesine yönelik algoritma aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir.

Adım 1. Kromozom yapısının belirlenmesi: İlk olarak, optimizasyon problemi için arama parametre dizisinin tanımlanması gerekir. Bu parametreler kromozom içerisindeki genlerdir ve ikili ya da gerçek sayılarla tanımlanabilirler. Burada dizi gerçek desimal sayılardan 0,1,2,3,4,5,6,7,8,9 oluşturulmuştur. Her bir kromozom Şekil 5.5’te gösterildiği gibi 36 genden oluşturulmuştur. Kromozom içerisindeki gen

sayısını bulanık denetleyicideki kural tabanını oluşturan kural sayısı kadardır. 1-9 arasındaki genler θ_{on} , 10-18 arasındaki genler θ_{rise} , 19-27 arasındaki genler θ_{fall} ve 27-36 arasındaki genler θ_{off} değişkenlerine ait olan kuralları temsil etmektedirler.



Şekil 5.5. Kromozom Yapısı

Adım 2. Başlangıç popülasyonunun ve büyüklüğünün belirlenmesi: Başlangıç popülasyonu daha önceden elde edilmiş bilgilere göre kural tabanı oluşturarak yapılabileceği gibi rastgele olarak da belirlenebilir. Bu çalışmada aynı girişlere sahip 4 farklı kural tablosu olması nedeniyle başlangıç popülasyonu rastgele seçilmiştir. Popülasyon büyüklüğü sistemin kontrolünde kullanılacak olan işlemcinin kapasitesine göre belirlenmiştir. Burada dikkat edilen nokta popülasyonda yeterli çeşitliliği sağlamak ve işlemci yükünü artırmama arasındaki dengeyi iyi kurmak gerekir. Buna göre bu çalışmada her bir neslin oluşturulduğu popülasyon büyüklüğü 10x36 boyutunda seçilmiştir.

Adım 3. Uygunluk fonksiyonunun belirlenmesi: Uygunluk fonksiyonu her bir kromozomun yaşamını devam ettirip ettiremeyeceğini gösteren GA'nın performans göstergesidir. Bu algorithmada aşağıda belirtilen uygunluk fonksiyonu kullanılmıştır,

$$fitness = \frac{1}{1 + |e_T|} \quad (5.7)$$

$$e_T = T^* - T_e \quad (5.8)$$

Burada e_T referans tork ile gerçek tork arasındaki hatayı göstermektedir.

Adım 4. Değerlendirme işleminin gerçekleştirilmesi: Elde edilen bu popülasyondaki her bir kromozomu için bulanık mantık denetimli olarak SRM tork denetimi gerçekleştirildi ve Denklem 5.7 ve 5.8'e göre etkinlik değerleri hesaplandı. Eğer bu işlem sonunda popülasyondaki herhangi bir birey istenen etkinliği sağlamışsa en son elde edilen bireyler saklanır ve eğitim işlemi sonlandırılır. Aksi durumda bir sonraki adımdan işlemlere devam edilir.

Adım 5. Ailelerin belirlenmesi işlemi: Aile seçiminin nesil seçiminden farklı olduğuna dikkat edilmelidir. Aileler seçme mutasyon ve çaprazlama ile aynı sayıda popülasyon çocuklarının üretilmesi için mevcut popülasyondan rasgele diziler seçer. Burada diziler daha yüksek uygunluk değerine sahip olanlardan seçilir. Burada popülasyon içerisindeki çeşitliliğin korunabilmesi için turnuva tipi seçim gerçekleştirilmiştir.

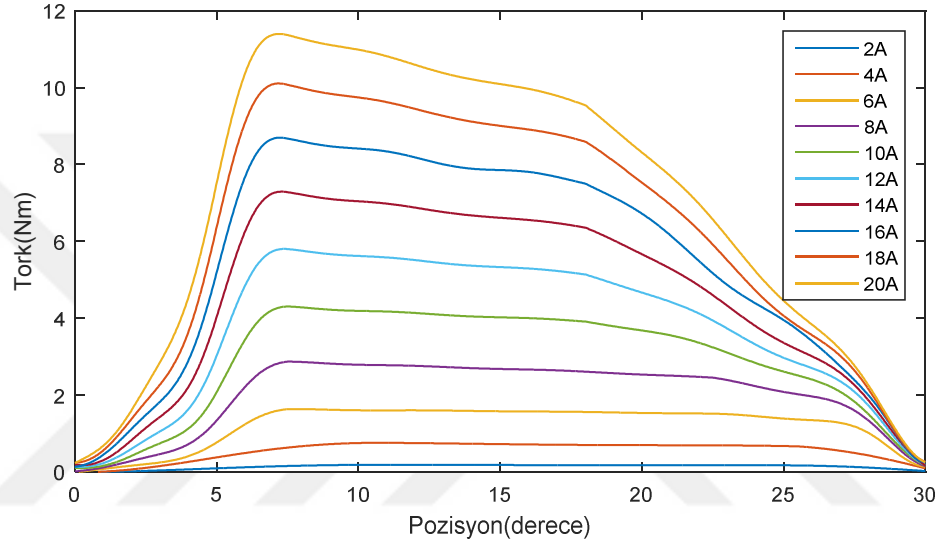
Adım 6. Çaprazlama işlemi: Çaprazlama iki çocuk yapmak için iki aile dizisindeki genetik malzemelerin birleştirilmesidir. Amaç kötü özellikleri atmak ve sadece güzel özellikleri yaratmaktır. Çaprazlama rastgele seçilmiş çaprazlama noktasından diziyi iki parçaya ayırır ve diğer aynı noktadan ayrılmış dizi ile kombinasyon oluşturur. Burada, çok noktadan çaprazlama gerçekleştirilmiştir. Burada bir sonraki nesil için gerekli bireylerin oluşturulması için çok noktadan çaprazlama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Adım 7. Mutasyon işlemi: Çaprazlama sonucu elde edilen bireylere popülasyondaki çeşitliliği artırmak için mutasyon uygulanarak yeni popülasyonun oluşumu tamamlanır. Eğitim algoritması dördüncü adımdan itibaren tekrarlanır.

Adım 8. Yerdeğiştirme: Adım 7 ile elde edilen yeni popülasyon eskisiyle yer değiştirilir. Burada çeşitli yöntemler kullanılabilir burada en iyi bireyin sonraki nesle aktarılabilmesi için elitizm yapısı kullanılmıştır. Bu aşamadan sonra algoritma Adım 3'ten itibaren en uygun sonuç elde edilinceye kadar tekrarlanır.

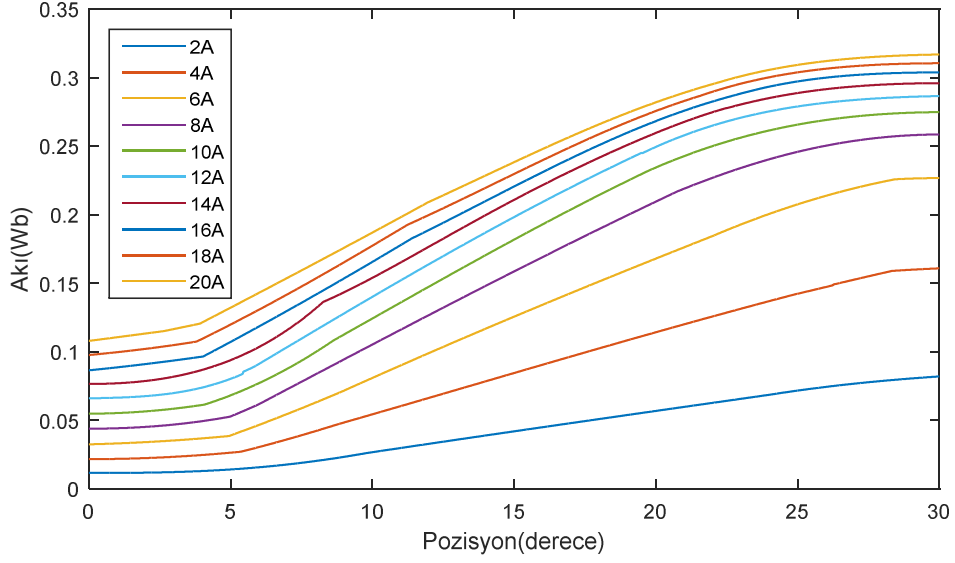
6. BENZETİM SONUÇLARI

Şekil 6.1’de Ansys Maxwell programını kullanarak anahtarlama relüktans motorumuzun tasarımını yapıp sonlu elemanlar analizi kullanılarak statoründe 84 sarım ile 2 A ile 20 A arasında gerçekleştirilen simulasyonda Tork-Pozisyon sonuçları verilmiştir.



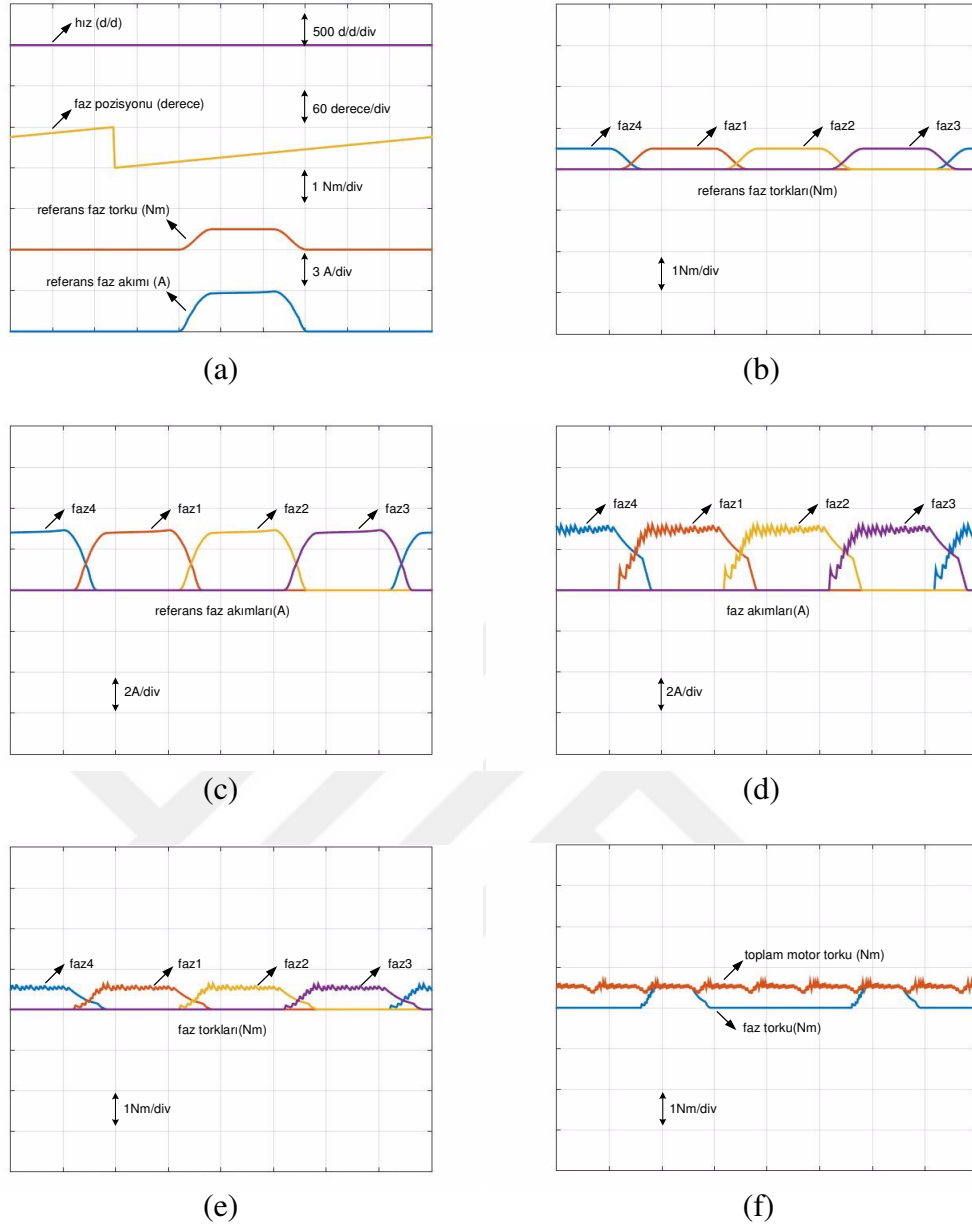
Şekil 6.1. 84 Sarım 2 A-20 A Tork-Pozisyon Grafiği

Şekil 6.2’de Ansys Maxwell programını kullanarak anahtarlama relüktans motorumuzun tasarımını yapıp sonlu elemanlar analizi kullanılarak statoründe 84 sarım ile 2 A ile 20 A arasında gerçekleştirilen simulasyonda Akı-Pozisyon sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.2. 84 Sarım 2 A-20 A Akı-Pozisyon Grafiği

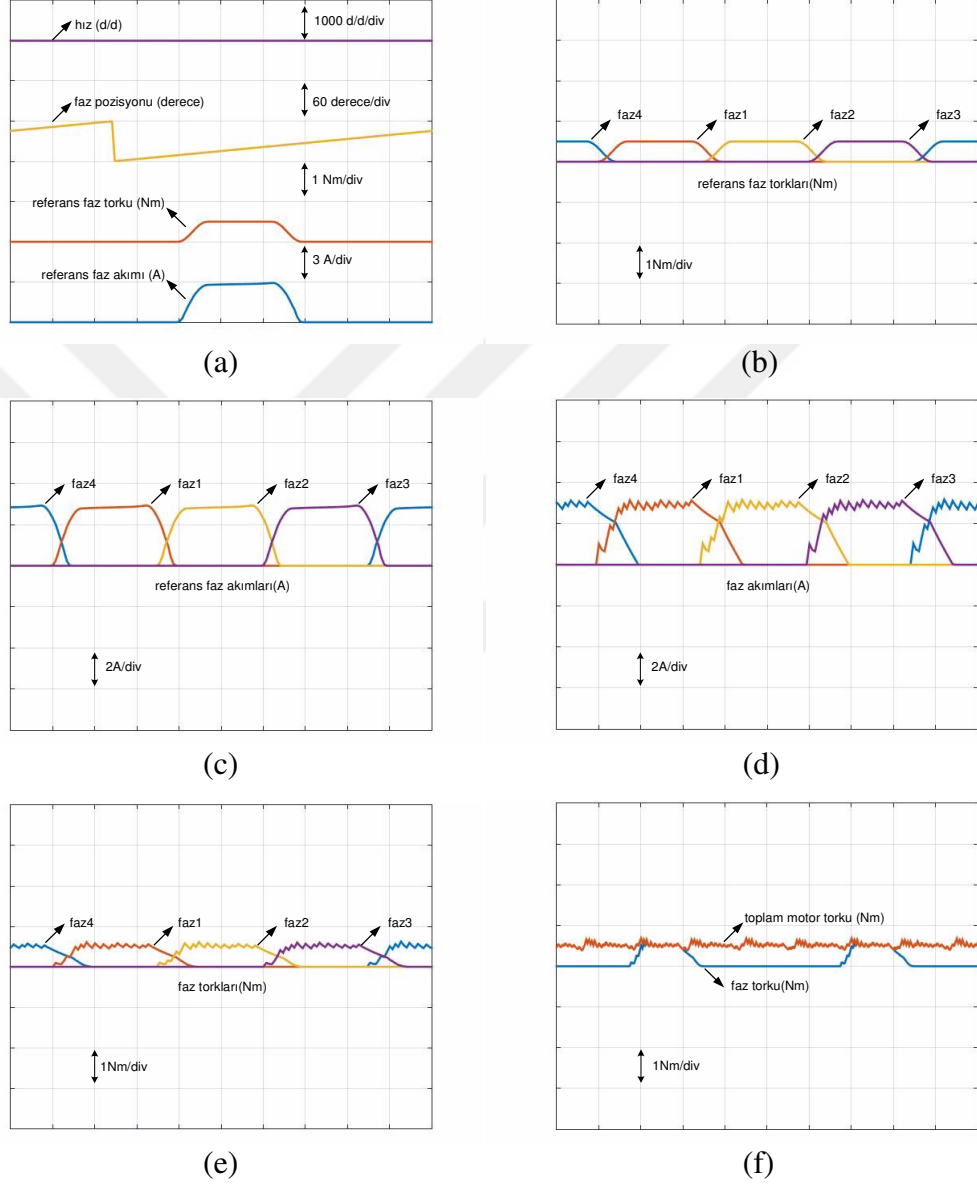
Şekil 6.3'te 0.5 Nm referans torku ve 500 d/d referans hızında elde edilen simulasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 6.3 (a)'da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 6.3 (b)'de referans faz torkları, Şekil 6.3 (c)'de referans faz akımları, Şekil 6.3 (d)'de faz akımları, Şekil 6.3 (e)'de faz torkları ve Şekil 6.3 (f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak Sinus TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır. Genetik-Bulanık Mantık tabanlı komütasyon açılı generatörü tarafından iletim açısı 9.14° , yükselme açısı 4.75° , kesim açısı 22.70° ve düşme açısı 4.75° olarak verilmiştir. Generatör bölgesi çalışması incelendiğinde ortalama tork ve tork rıpılların azaldığı gözlemlenmiştir. Motor çalışma durumunda tork rıpılların değişim değeri 0.35 Nm ile 0.66 Nm arasında olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 6.3. Üç Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (0.5 Nm,500 d/d) 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 6.4'te 0.5 Nm referans torku ve 1000 d/d referans hızında elde edilen simulasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 6.4 (a)'da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 6.4 (b)'de referans faz torkları, Şekil 6.4 (c)'de referans faz akımları, Şekil 6.4 (d)'de faz akımları, Şekil 6.4 (e)'de faz torkları ve Şekil 6.4 (f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak Sinus TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır. Genetik-Bulanık Mantık tabanlı komütasyon açılı generatörü

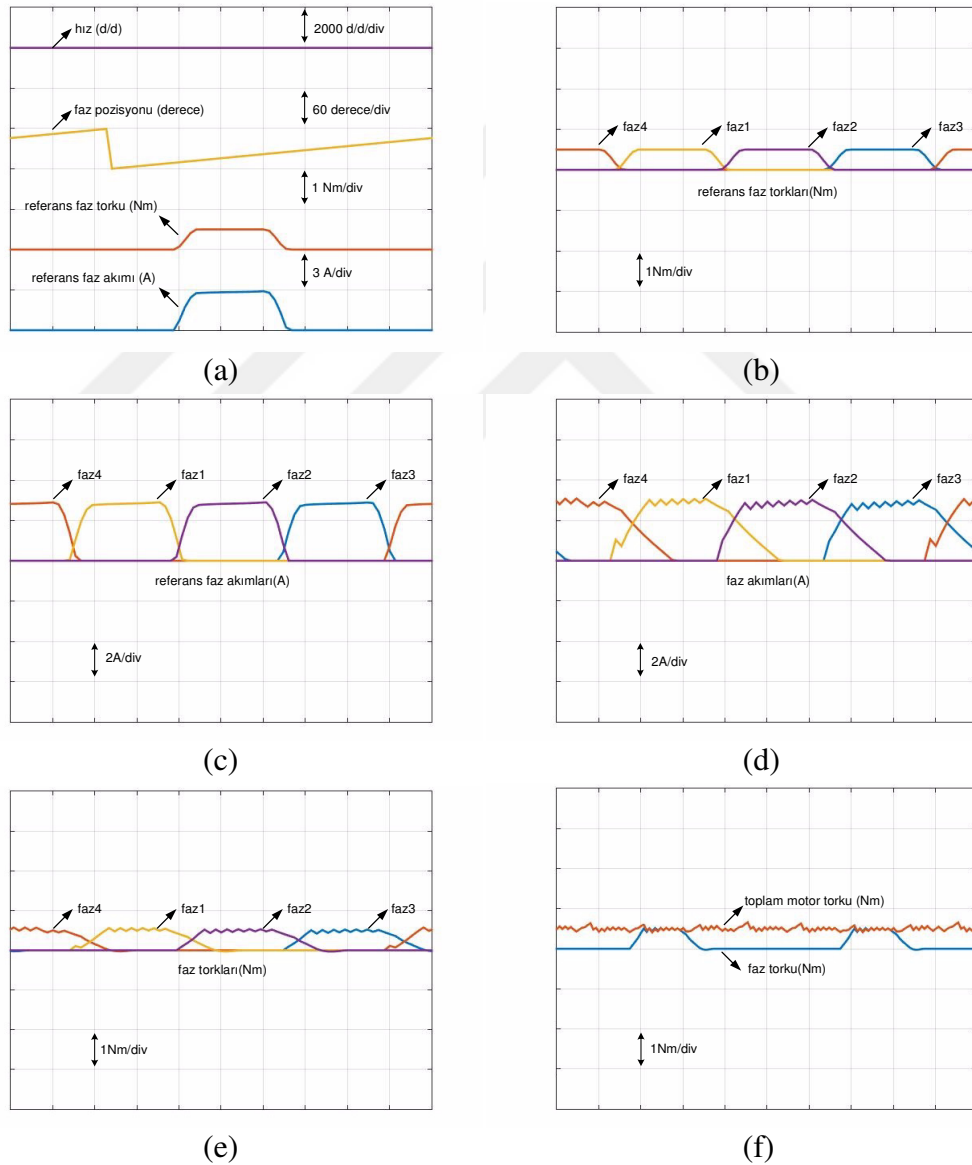
tarafından iletim açısı 9.22° , yükselme açısı 4.20° , kesim açısı 22.70° ve düşme açısı 4.20° olarak verilmiştir. Generatör bölgesi çalışması incelendiğinde ortalama tork ve tork rıppılların azaldığı gözlemlenmiştir. Motor çalışma durumunda tork rıppılların değişim değeri 0.38 Nm ile 0.70 Nm arasında olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 6.4. Üç Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (0.5 Nm,1000 d/d) 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

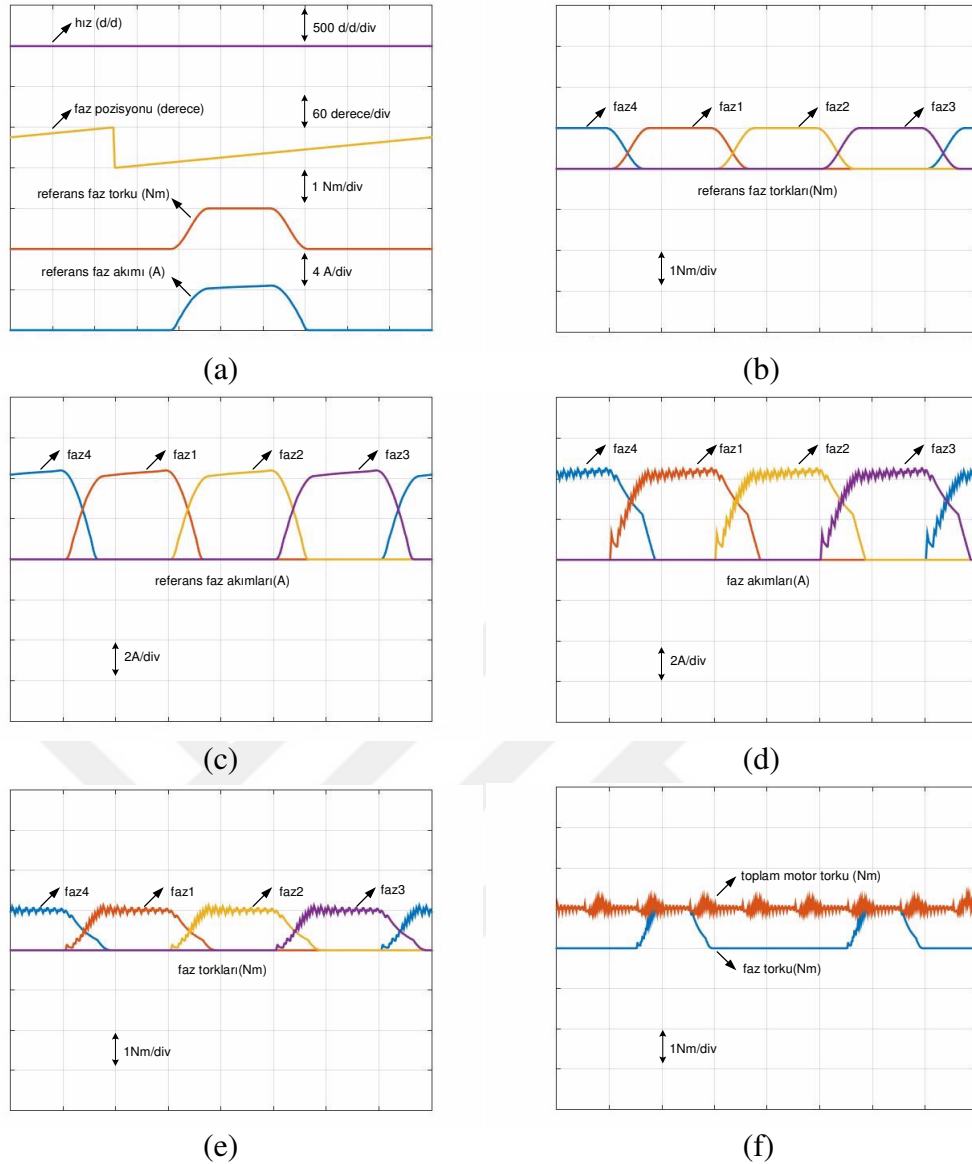
Şekil 6.5'te 0.5 Nm referans torku ve 2000 d/d referans hızında elde edilen simulasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 6.5 (a)'da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 6.5 (b)'de

referans faz torkları, Şekil 6.5 (c)'de referans faz akımları, Şekil 6.5 (d)'de faz akımları, Şekil 6.5 (e)'de faz torkları ve Şekil 6.5 (f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak Sinus TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır. Genetik-Bulanık Mantık tabanlı komütasyon açısı generatörü tarafından iletim açısı 9.01° , yükselme açısı 3.38° , kesim açısı 22.06° ve düşme açısı 3.38° olarak verilmiştir. Generatör bölgesi çalışması incelendiğinde ortalama tork ve tork rıppıların azaldığı gözlemlenmiştir. Motor çalışma durumunda tork rıppıların değişim değeri 0.35 Nm ile 0.66 Nm arasında olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 6.5. Üç Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (0.5 Nm, 2000 d/d) 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

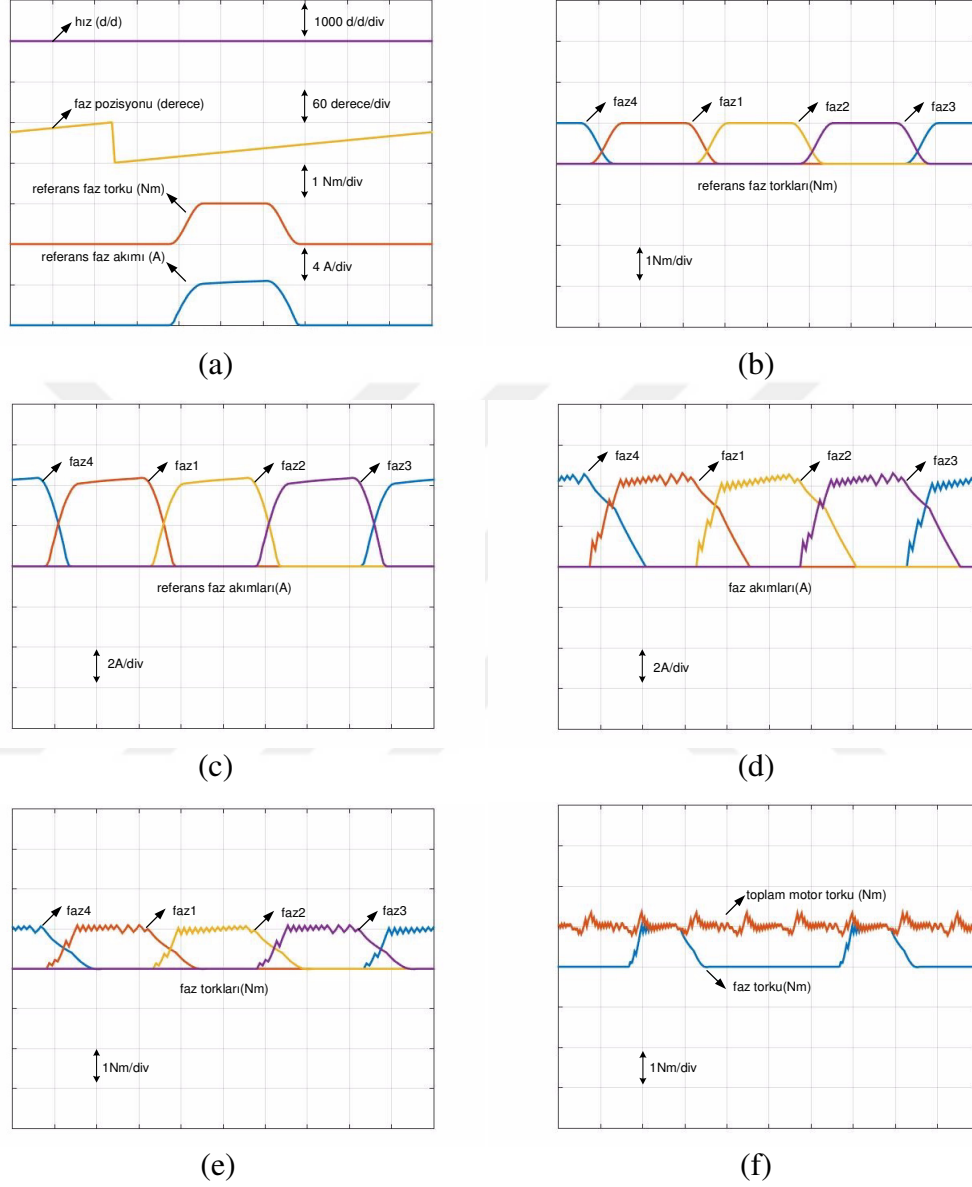
Şekil 6.6'da 1 Nm referans torku ve 500 d/d referans hızında elde edilen simulasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 6.6 (a)'da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 6.6 (b)'de referans faz torkları, Şekil 6.6 (c)'de referans faz akımları, Şekil 6.6 (d)'de faz akımları, Şekil 6.6 (e)'de faz torkları ve Şekil 6.6 (f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak Sinus TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır. Genetik-Bulanık Mantık tabanlı komütasyon açılı generatörü tarafından iletim açısı 8.00^0 , yükselme açısı 5.40^0 , kesim açısı 22.21^0 ve düşme açısı 5.40^0 olarak verilmiştir. Generatör bölgesi çalışması incelendiğinde ortalama tork ve tork rıpılların azaldığı gözlemlenmiştir. Motor çalışma durumunda tork rıpılların değişim değeri 0.79 Nm ile 1.31 Nm arasında olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 6.6. Üç Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (1 Nm, 500 d/d)
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 6.7’de 1 Nm referans torku ve 1000 d/d referans hızında elde edilen simulasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 6.7 (a)’da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 6.7 (b)’de referans faz torkları, Şekil 6.7 (c)’de referans faz akımları, Şekil 6.7 (d)’de faz akımları, Şekil 6.7 (e)’de faz torkları ve Şekil 6.7 (f)’de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak Sinus TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır. Genetik-Bulanık Mantık tabanlı komütasyon açılı generatörü tarafından iletim açısı 8.09° , yükselme açısı 4.71° , kesim açısı 21.85° ve düşme açısı

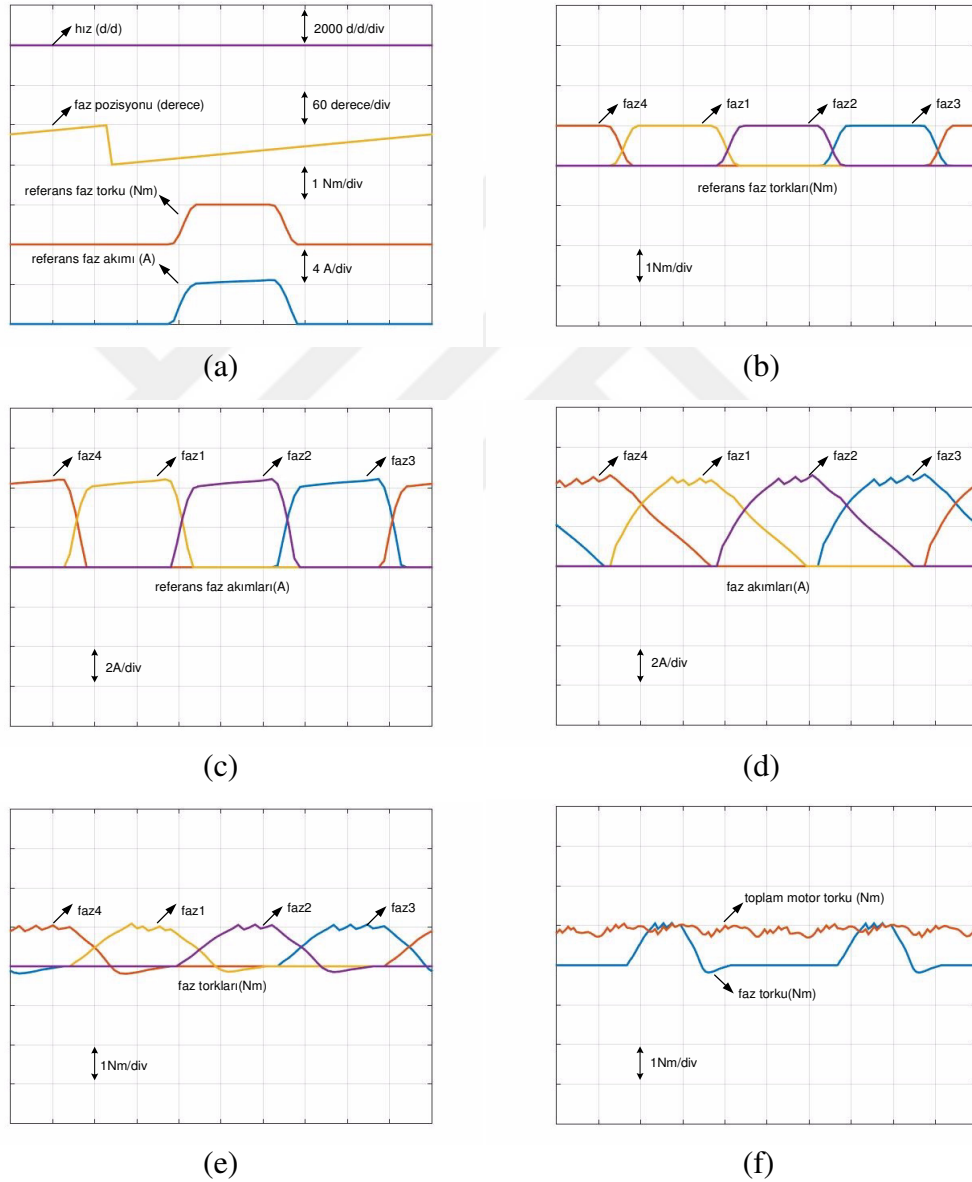
4.71⁰ olarak verilmiştir. Generatör bölgesi çalışması incelendiğinde ortalama tork ve tork rıplarının azaldığı gözlemlenmiştir. Motor çalışma durumunda tork rıplarının değişim değeri 0.76 Nm ile 1.39 Nm arasında olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 6.7. Üç Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (1 Nm,1000 d/d) 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

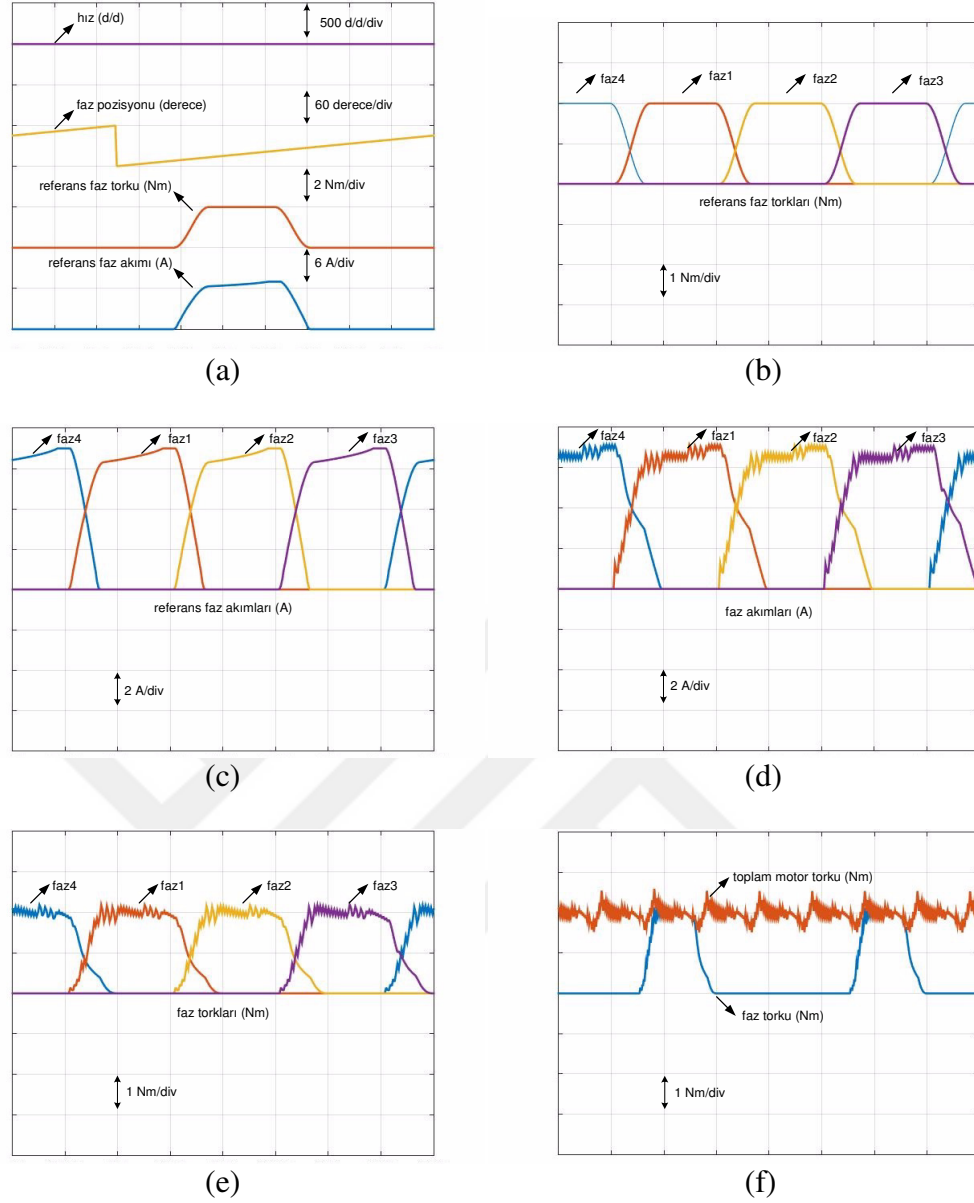
Şekil 6.8’de 1 Nm referans torku ve 2000 d/d referans hızında elde edilen simulasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 6.8 (a)’da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 6.8 (b)’de referans faz torkları, Şekil 6.8 (c)’de referans faz akımları, Şekil 6.8 (d)’de faz

akımları, Şekil 6.8 (e)'de faz torkları ve Şekil 6.8 (f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak Sinus TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır. Genetik-Bulanık Mantık tabanlı komütasyon açısı generatörü tarafından iletim açısı 8.63^0 , yükselme açısı 3.62^0 , kesim açısı 23.04^0 ve düşme açısı 3.62^0 olarak verilmiştir. Generatör bölgesi çalışması incelendiğinde ortalama tork ve tork rıplarının azaldığı gözlemlenmiştir. Motor çalışma durumunda tork rıplarının değişim değeri 0.70 Nm ile 1.05 Nm arasında olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 6.8. Üç Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (1 Nm, 2000 d/d) 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

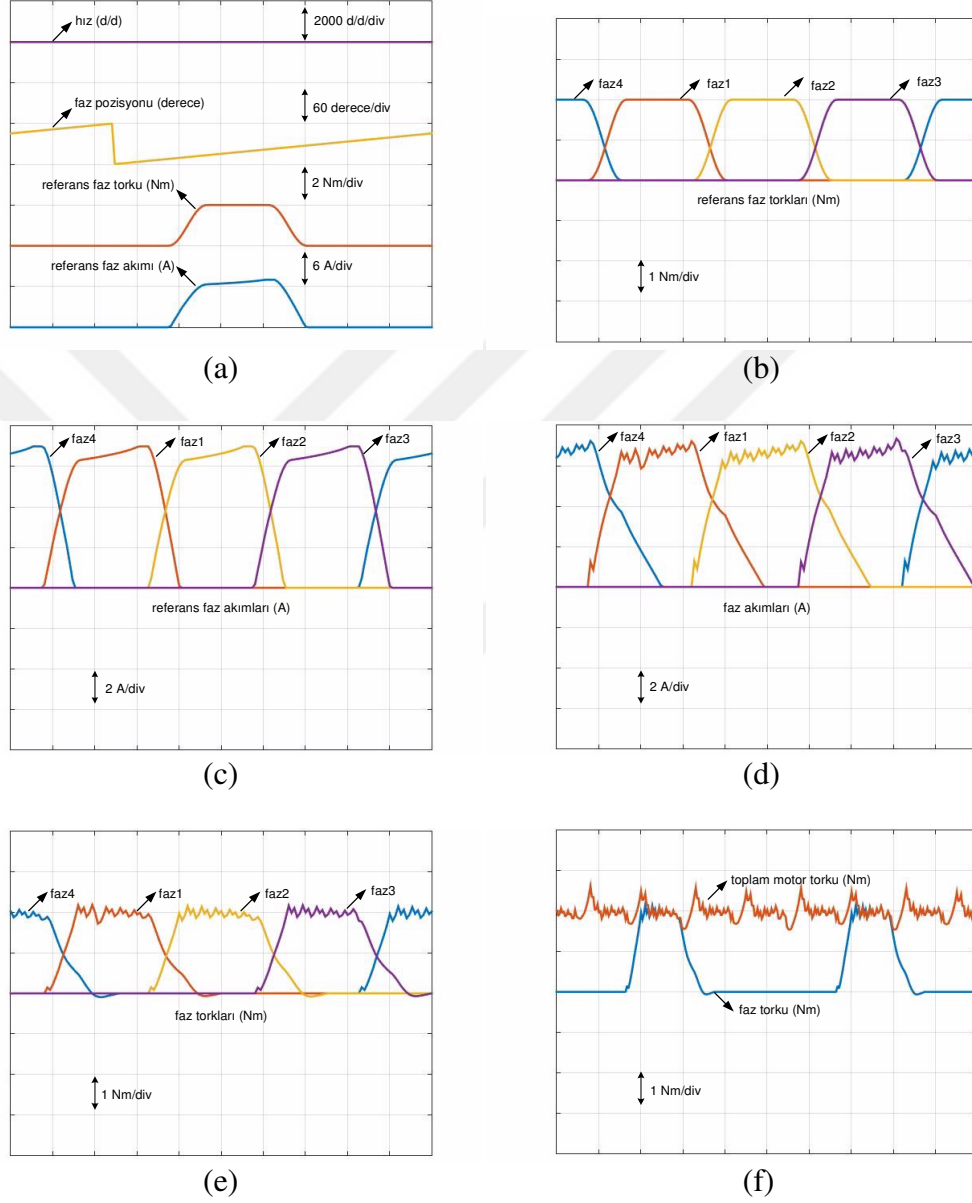
Şekil 6.9’da 2 Nm referans torku ve 500 d/d referans hızında elde edilen simulasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 6.9 (a)’da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 6.9 (b)’de referans faz torkları, Şekil 6.9 (c)’de referans faz akımları, Şekil 6.9 (d)’de faz akımları, Şekil 6.9 (e)’de faz torkları ve Şekil 6.9 (f)’de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak Sinus TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır. Genetik-Bulanık Mantık tabanlı komütasyon açılı generatörü tarafından iletim açısı 8.12^0 , yükselme açısı 5.05^0 , kesim açısı 22.55^0 ve düşme açısı 5.05^0 olarak verilmiştir. Generatör bölgesi çalışması incelendiğinde ortalama tork ve tork rıplarının azaldığı gözlemlenmiştir. Motor çalışma durumunda tork rıplarının değişim değeri 1.50 Nm ile 2.60 Nm arasında olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 6.9. Üç Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (2 Nm, 500 d/d) 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 6.10'da 2 Nm referans torku ve 1000 d/d referans hızında elde edilen simulasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 6.10 (a)'da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 6.10 (b)'de referans faz torkları, Şekil 6.10 (c)'de referans faz akımları, Şekil 6.10 (d)'de faz akımları, Şekil 6.10 (e)'de faz torkları ve Şekil 6.10 (f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak Sinus TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır. Genetik-Bulanık Mantık tabanlı komütasyon açısı generatörü tarafından iletim açısı 7.91° , yükselme açısı 5.40° , kesim açısı 22.22° ve

düşme açısı 5.40^0 olarak verilmiştir. Generatör bölgesi çalışması incelendiğinde ortalama tork ve tork rıplarının azaldığı gözlemlenmiştir. Motor çalışma durumunda tork rıplarının değişim değeri 1.48 Nm ile 2.66 Nm arasında olduğu açıkça görülmektedir.

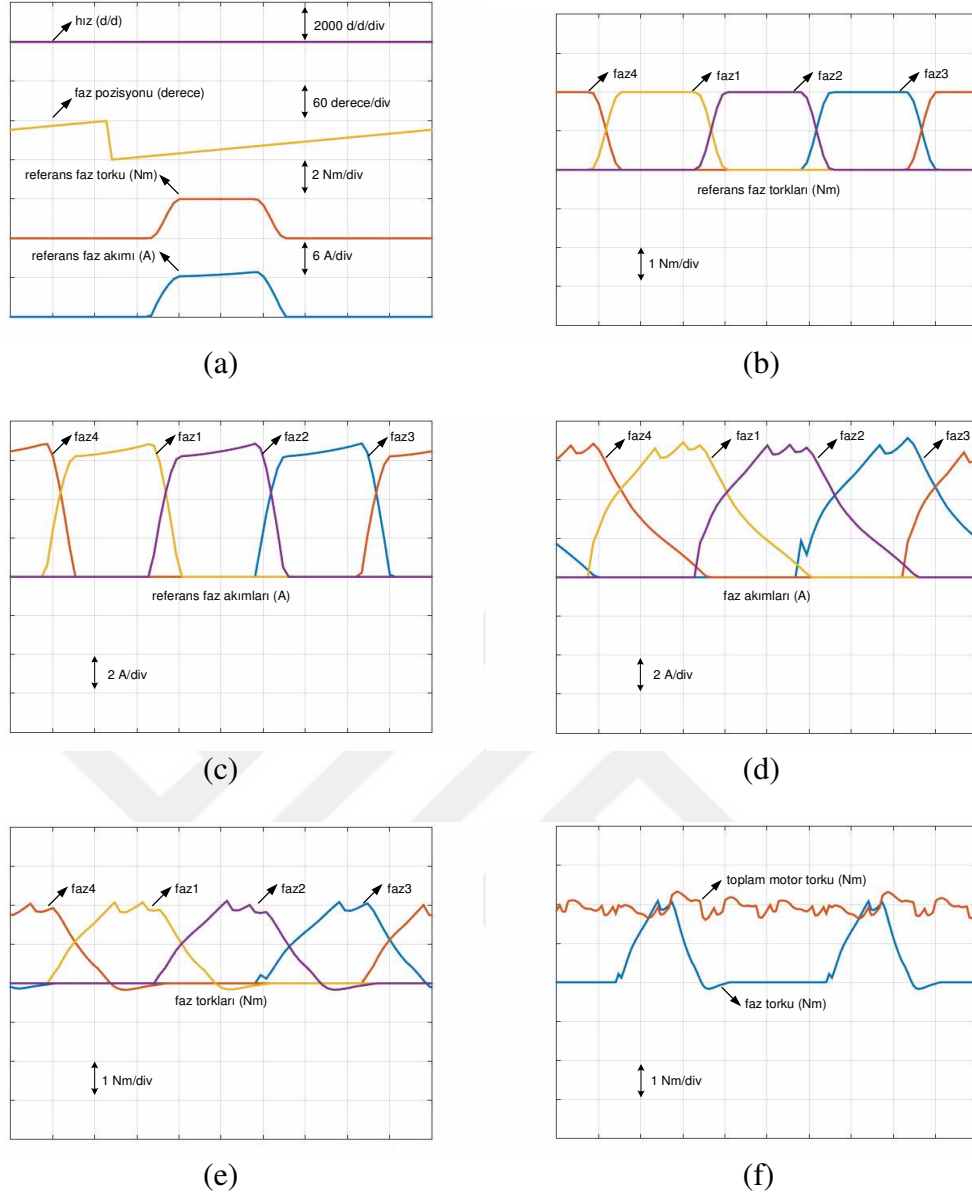


Şekil 6.10. Üç Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (2 Nm,1000 d/d) a) Hız, Faz Pozisyonu, Referans Faz Torku, Referans Faz Akımı b) Referans Faz Torkları c) Referans Faz Akımları d) Faz Akımları e) Faz Torkları f) Toplam Tork ve Faz Torku

Şekil 6.11’de 2 Nm referans torku ve 2000 d/d referans hızında elde edilen simülasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 6.11 (a)’da hız, faz pozisyonu, bir faz için

referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 6.11 (b)'de referans faz torkları, Şekil 6.11 (c)'de referans faz akımları, Şekil 6.11 (d)'de faz akımları, Şekil 6.11 (e)'de faz torkları ve Şekil 6.11 (f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak Sinus TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır. Genetik-Bulanık Mantık tabanlı komütasyon açısı generatörü tarafından iletim açısı 5.61^0 , yükselme açısı 4.32^0 , kesim açısı 20.70^0 ve düşme açısı 4.32^0 olarak verilmiştir. Generatör bölgesi çalışması incelendiğinde ortalama tork ve tork rıpılların azaldığı gözlemlenmiştir. Motor çalışma durumunda tork rıpılların değişim değeri 1.61 Nm ile 2.33 Nm arasında olduğu açıkça görülmektedir.

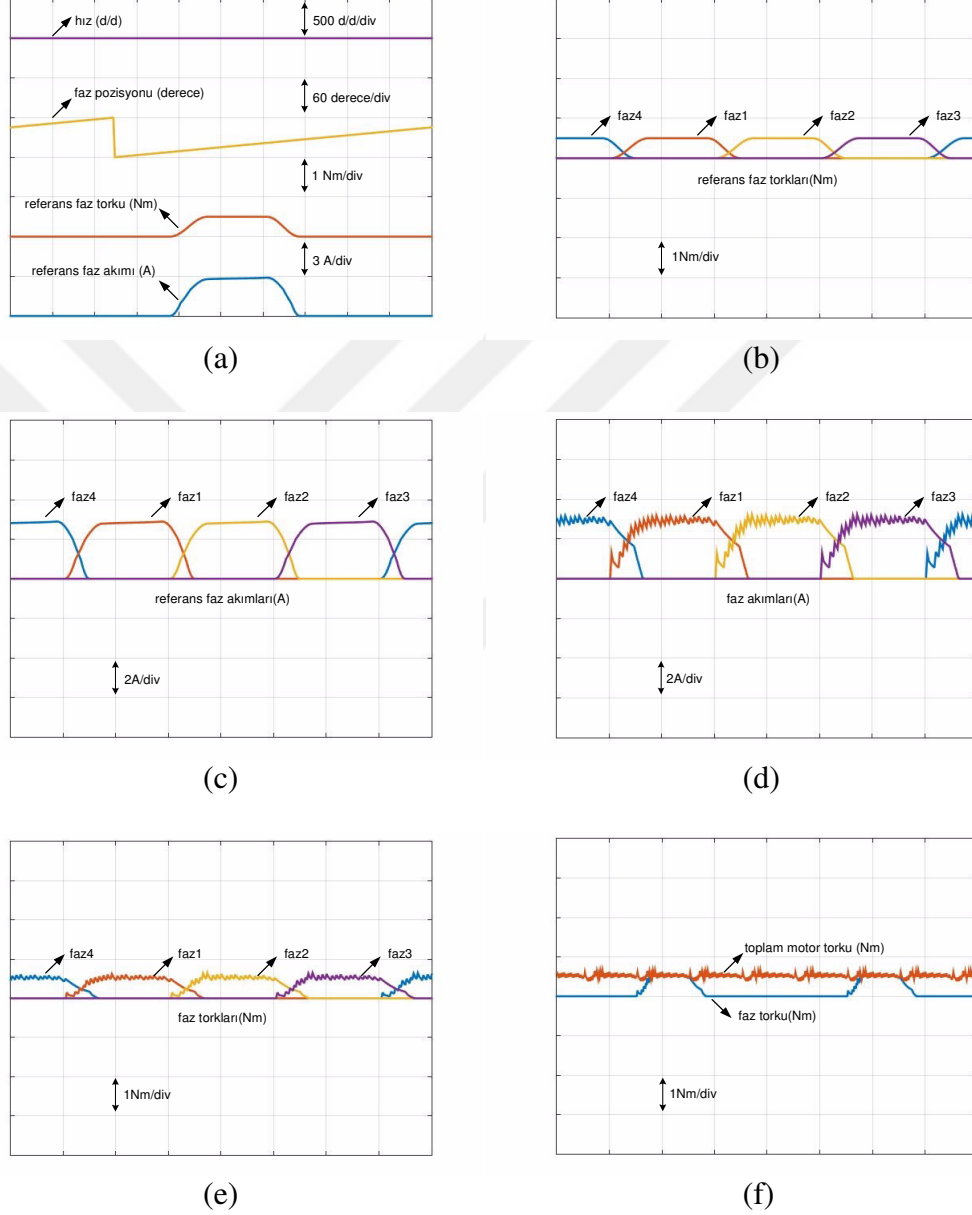




Şekil 6.11. Üç Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (2 Nm, 2000 d/d) a) Hız, Faz Pozisyonu, Referans Faz Torku, Referans Faz Akımı b) Referans Faz Torkları c) Referans Faz Akımları d) Faz Akımları e) Faz Torkları f) Toplam Tork ve Faz Torku

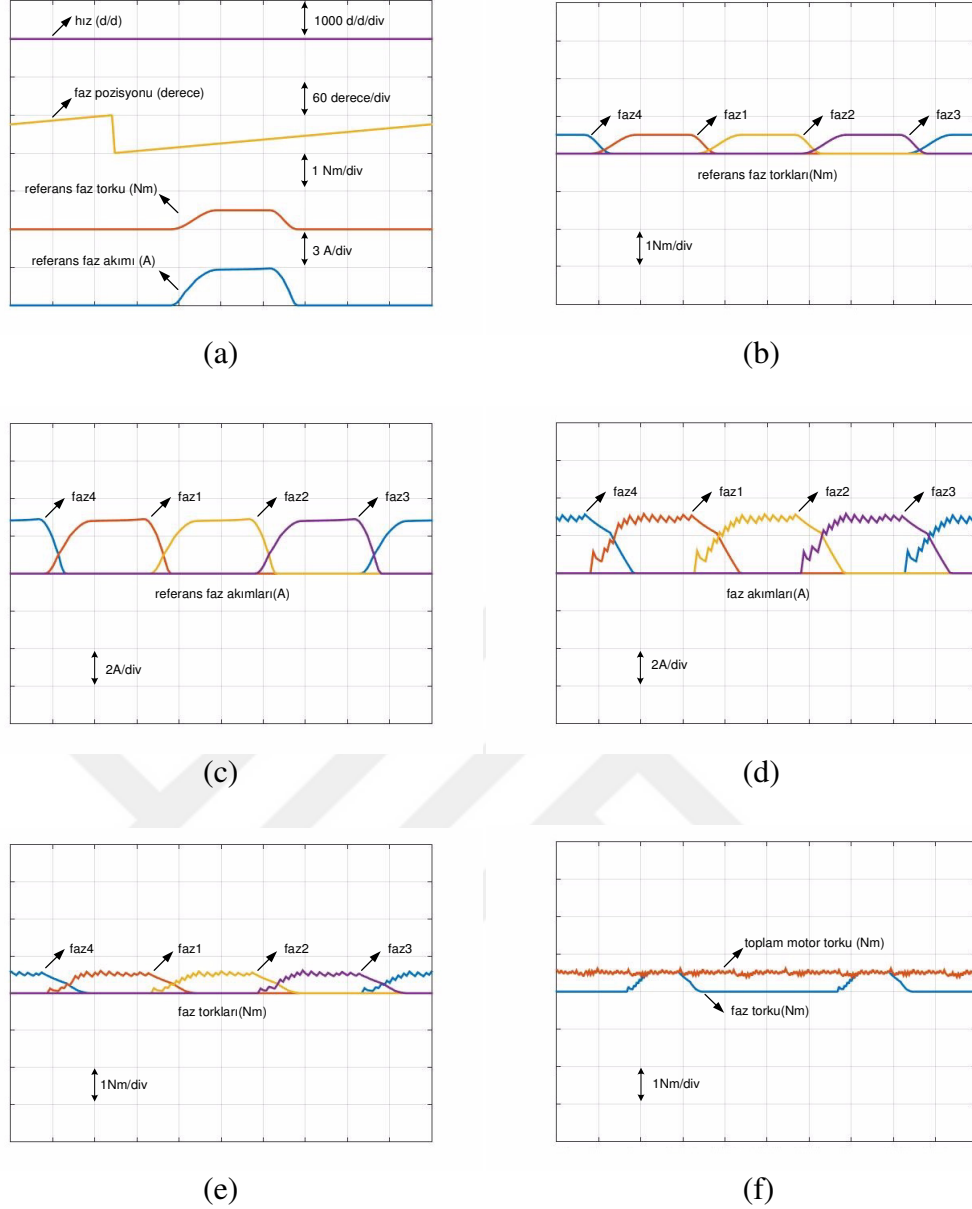
Şekil 6.12’de 0.5 Nm referans torku ve 500 d/d referans hızında elde edilen simulasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 6.12 (a)’da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 6.12 (b)’de referans faz torkları, Şekil 6.12 (c)’de referans faz akımları, Şekil 6.12 (d)’de faz akımları, Şekil 6.12 (e)’de faz torkları ve Şekil 6.12 (f)’de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak Sinus TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır. Genetik-Bulanık Mantık tabanlı komütasyon açısı generatörü tarafından iletim açısı 7.89° , yükselme açısı 5.33° , kesim açısı 21.72° ve

düşme açısı 4.68^0 olarak verilmiştir. Generatör bölgesi çalışması incelendiğinde ortalama tork ve tork rıplarının azaldığı gözlemlenmiştir. Motor çalışma durumunda tork rıplarının değişim değeri 0.35 Nm ile 0.65 Nm arasında olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 6.12. Dört Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (0.5 Nm, 500 d/d) 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

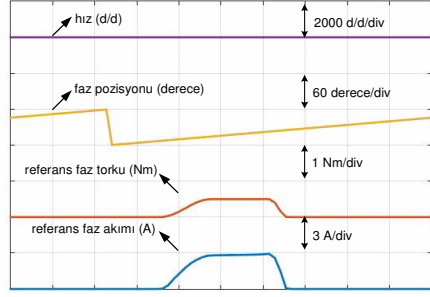
Şekil 6.13'te 0.5 Nm referans torku ve 1000 d/d referans hızında elde edilen simulasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 6.13 (a)'da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 6.13 (b)'de referans faz torkları, Şekil 6.13 (c)'de referans faz akımları, Şekil 6.13 (d)'de faz akımları, Şekil 6.13 (e)'de faz torkları ve Şekil 6.13 (f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak Sinus TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır. Genetik-Bulanık Mantık tabanlı komütasyon açısı generatörü tarafından iletim açısı 8.24^0 , yükselme açısı 6.54^0 , kesim açısı 22.35^0 ve düşme açısı 3.90^0 olarak verilmiştir. Generatör bölgesi çalışması incelendiğinde ortalama tork ve tork rıpılların azaldığı gözlemlenmiştir. Motor çalışma durumunda tork rıpılların değişim değeri 0.39 Nm ile 0.62 Nm arasında olduğu açıkça görülmektedir.



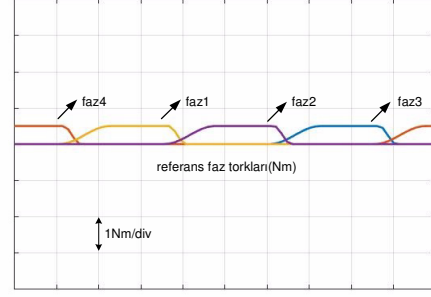
Şekil 6.13. Dört Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (0.5Nm,1000 d/d) a) Hız, Faz Pozisyonu, Referans Faz Torku, Referans Faz Akımı b) Referans Faz Torkları c) Referans Faz Akımları d) Faz Akımları e) Faz Torkları f) Toplam Tork ve Faz Torku

Şekil 6.14'te 0.5 Nm referans torku ve 2000 d/d referans hızında elde edilen simulasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 6.14 (a)'da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 6.14 (b)'de referans faz torkları, Şekil 6.14 (c)'de referans faz akımları, Şekil 6.14 (d)'de faz akımları, Şekil 6.14 (e)'de faz torkları ve Şekil 6.14 (f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak Sinus TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır. Genetik-Bulanık Mantık tabanlı komütasyon aç

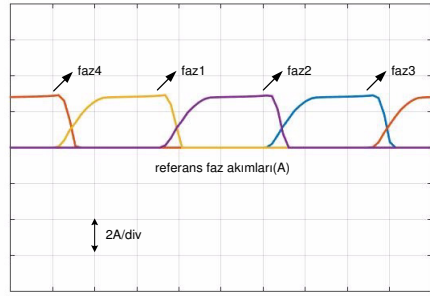
generatörü tarafından iletim açısı 7.12° , yükselme açısı 7.25° , kesim açısı 22.74° ve düşme açısı 2.46° olarak verilmiştir. Generatör bölgesi çalışması incelendiğinde ortalama tork ve tork rıplarının azaldığı gözlemlenmiştir. Motor çalışma durumunda tork rıplarının değişim değeri 0.41 Nm ile 0.71 Nm arasında olduğu açıkça görülmektedir.



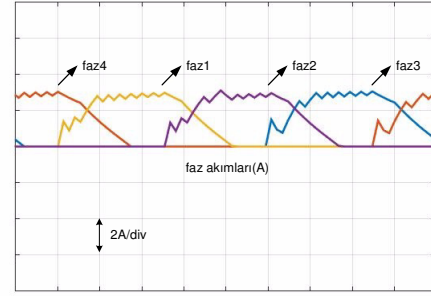
(a)



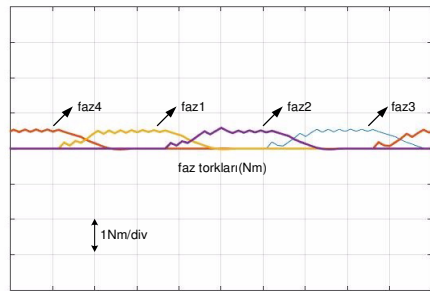
(b)



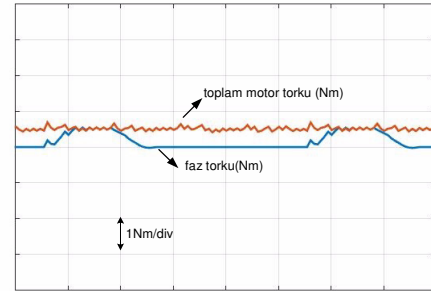
(c)



(d)



(e)



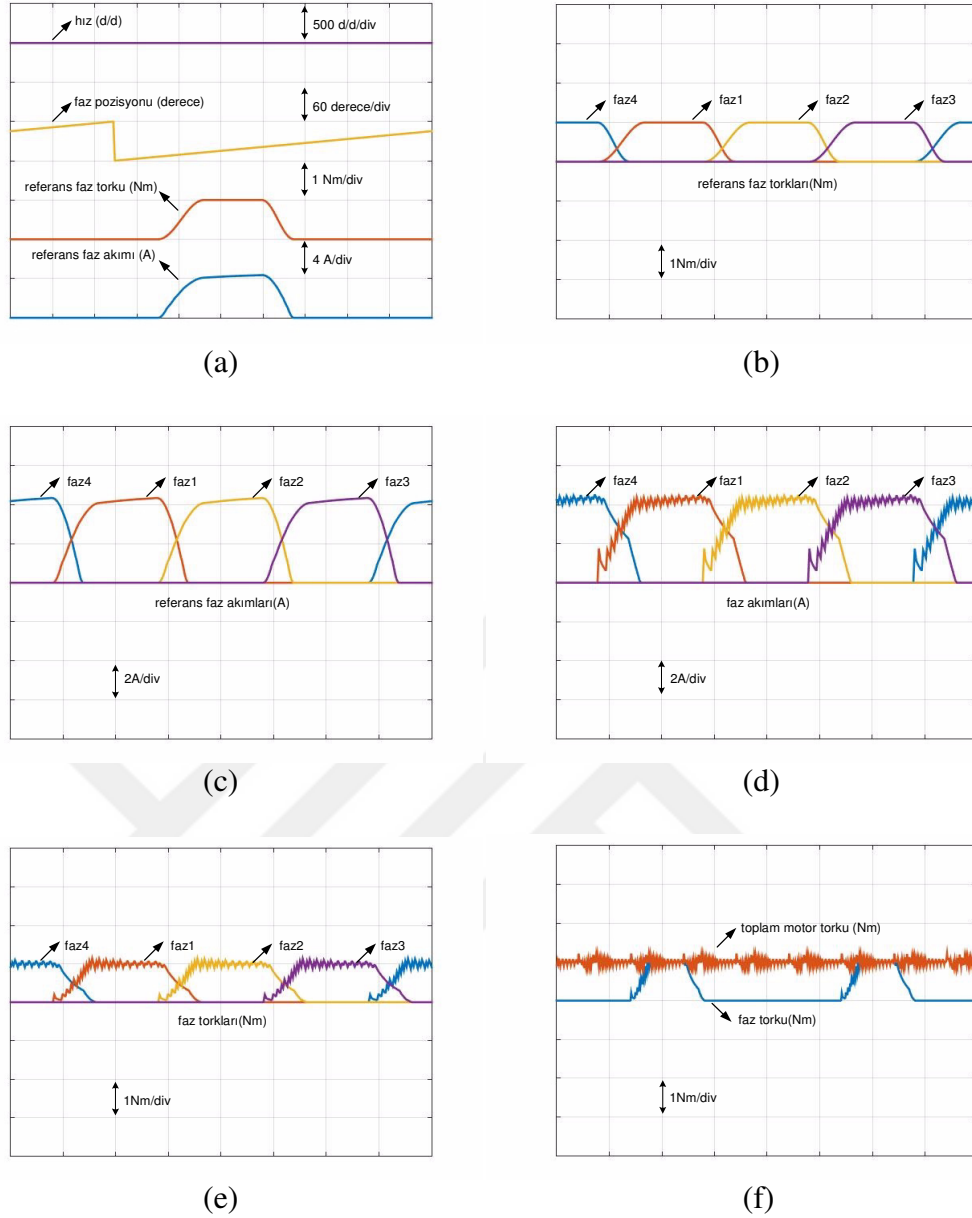
(f)

Şekil 6.14. Dört Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (0.5 Nm, 2000 d/d)
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 6.15'te 1 Nm referans torku ve 500 d/d referans hızında elde edilen simülasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 6.15 (a)'da hız, faz pozisyonu, bir faz için

referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 6.15 (b)'de referans faz torkları, Şekil 6.15 (c)'de referans faz akımları, Şekil 6.15 (d)'de faz akımları, Şekil 6.15 (e)'de faz torkları ve Şekil 6.15 (f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak Sinus TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır. Genetik-Bulanık Mantık tabanlı komütasyon açısı generatörü tarafından iletim açısı 6.20^0 , yükselme açısı 6.56^0 , kesim açısı 21.02^0 ve düşme açısı 4.53^0 olarak verilmiştir. Generatör bölgesi çalışması incelendiğinde ortalama tork ve tork rıpılların azaldığı gözlemlenmiştir. Motor çalışma durumunda tork rıpılların değişim değeri 0.78 Nm ile 1.22 Nm arasında olduğu açıkça görülmektedir.

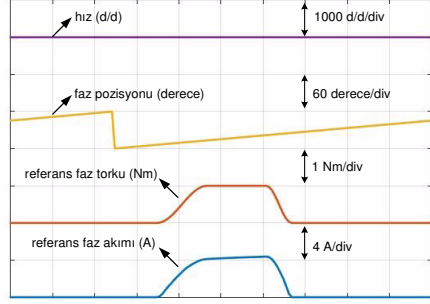




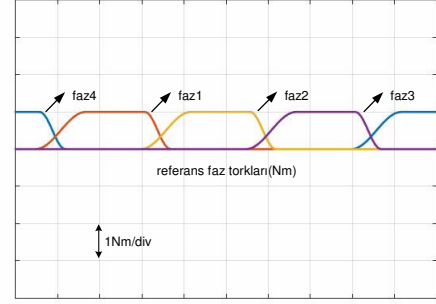
Şekil 6.15. Dört Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (1 Nm, 500 d/d) a) Hız, Faz Pozisyonu, Referans Faz Torku, Referans Faz Akımı b) Referans Faz Torkları c) Referans Faz Akımları d) Faz Akımları e) Faz Torkları f) Toplam Tork ve Faz Torku

Şekil 6.16'da 1 Nm referans torku ve 1000 d/d referans hızında elde edilen simulasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 6.16 (a)'da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 6.16 (b)'de referans faz torkları, Şekil 6.16 (c)'de referans faz akımları, Şekil 6.16 (d)'de faz akımları, Şekil 6.16 (e)'de faz torkları ve Şekil 6.16 (f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak Sinus TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır. Genetik-Bulanık Mantık tabanlı komütasyon aç

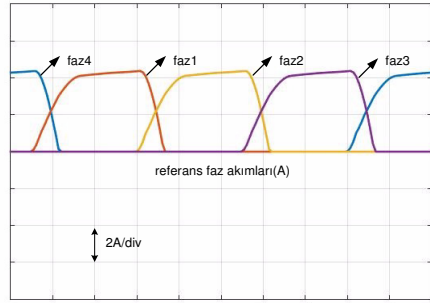
generatörü tarafından iletim açısı 6.22^0 , yükselme açısı 7.17^0 , kesim açısı 21.82^0 ve düşme açısı 3.65^0 olarak verilmiştir. Generatör bölgesi çalışması incelendiğinde ortalama tork ve tork rıplarının azaldığı gözlemlenmiştir. Motor çalışma durumunda tork rıplarının değişim değeri 0.86 Nm ile 1.30 Nm arasında olduğu açıkça görülmektedir.



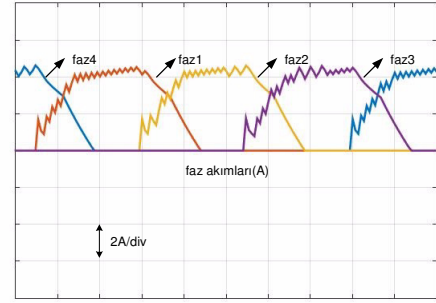
(a)



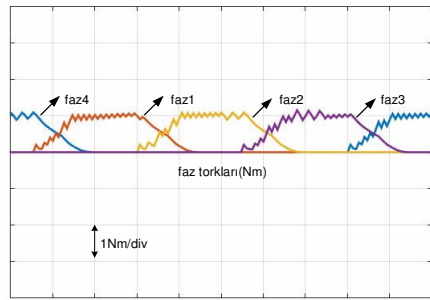
(b)



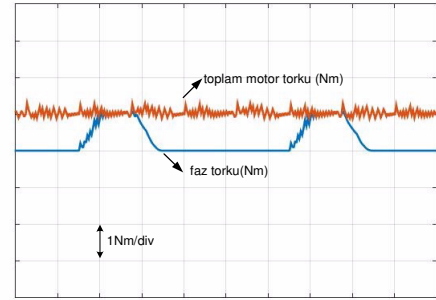
(c)



(d)



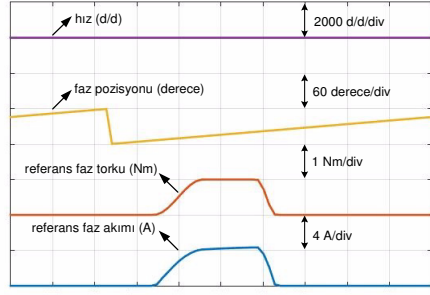
(e)



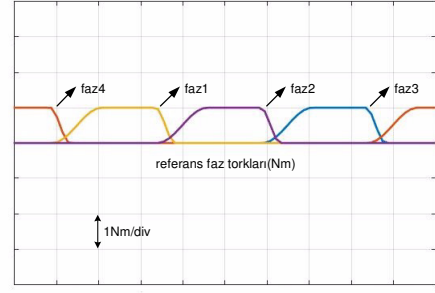
(f)

Şekil 6.16. Dört Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (1 Nm,1000 d/d) 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

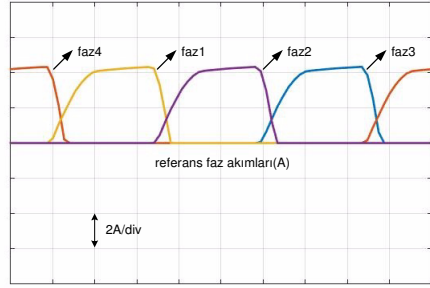
Şekil 6.17’de 1 Nm referans torku ve 2000 d/d referans hızında elde edilen simulasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 6.17 (a)’da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 6.17 (b)’de referans faz torkları, Şekil 6.17 (c)’de referans faz akımları, Şekil 6.17 (d)’de faz akımları, Şekil 6.17 (e)’de faz torkları ve Şekil 6.17 (f)’de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak Sinus TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır. Genetik-Bulanık Mantık tabanlı komütasyon açısı generatörü tarafından iletim açısı 6.13^0 , yükselme açısı 7.10^0 , kesim açısı 20.86^0 ve düşme açısı 2.80^0 olarak verilmiştir. Generatör bölgesi çalışması incelendiğinde ortalama tork ve tork rıplarının azaldığı gözlemlenmiştir. Motor çalışma durumunda tork rıplarının değişim değeri 0.77 Nm ile 1.22 Nm arasında olduğu açıkça görülmektedir.



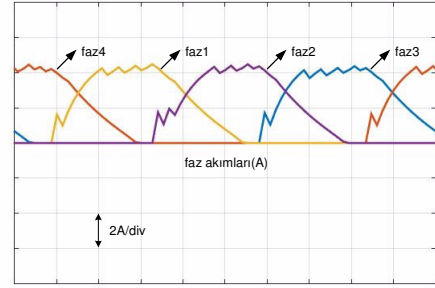
(a)



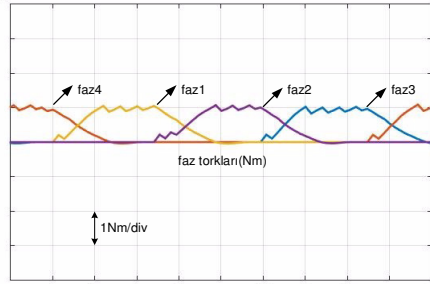
(b)



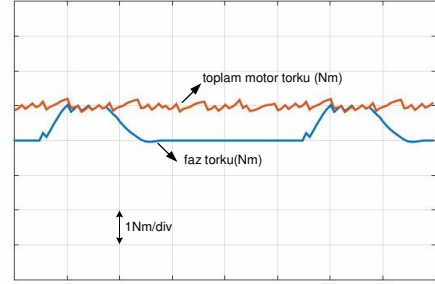
(c)



(d)



(e)

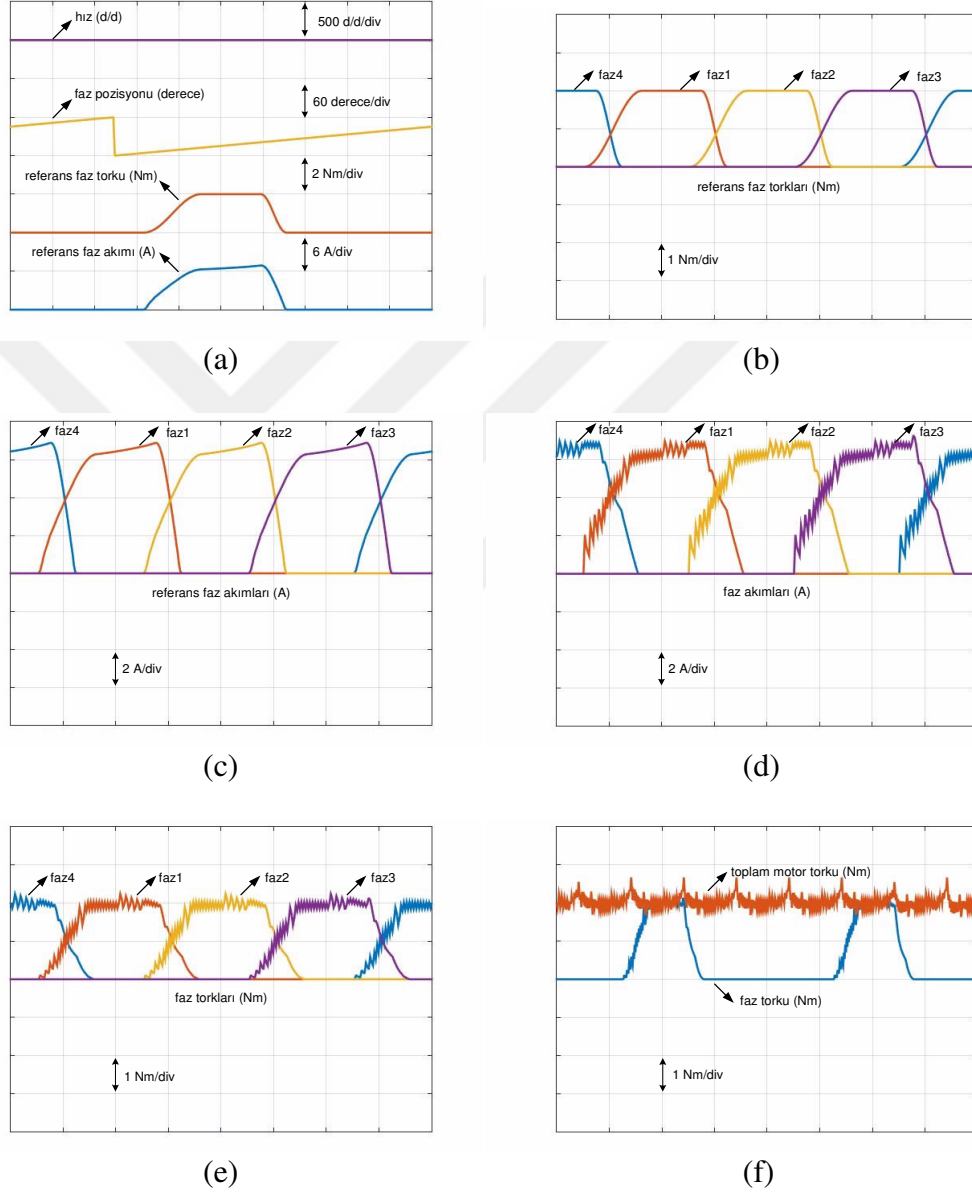


(f)

Şekil 6.17. Dört Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (1 Nm,2000 d/d) 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

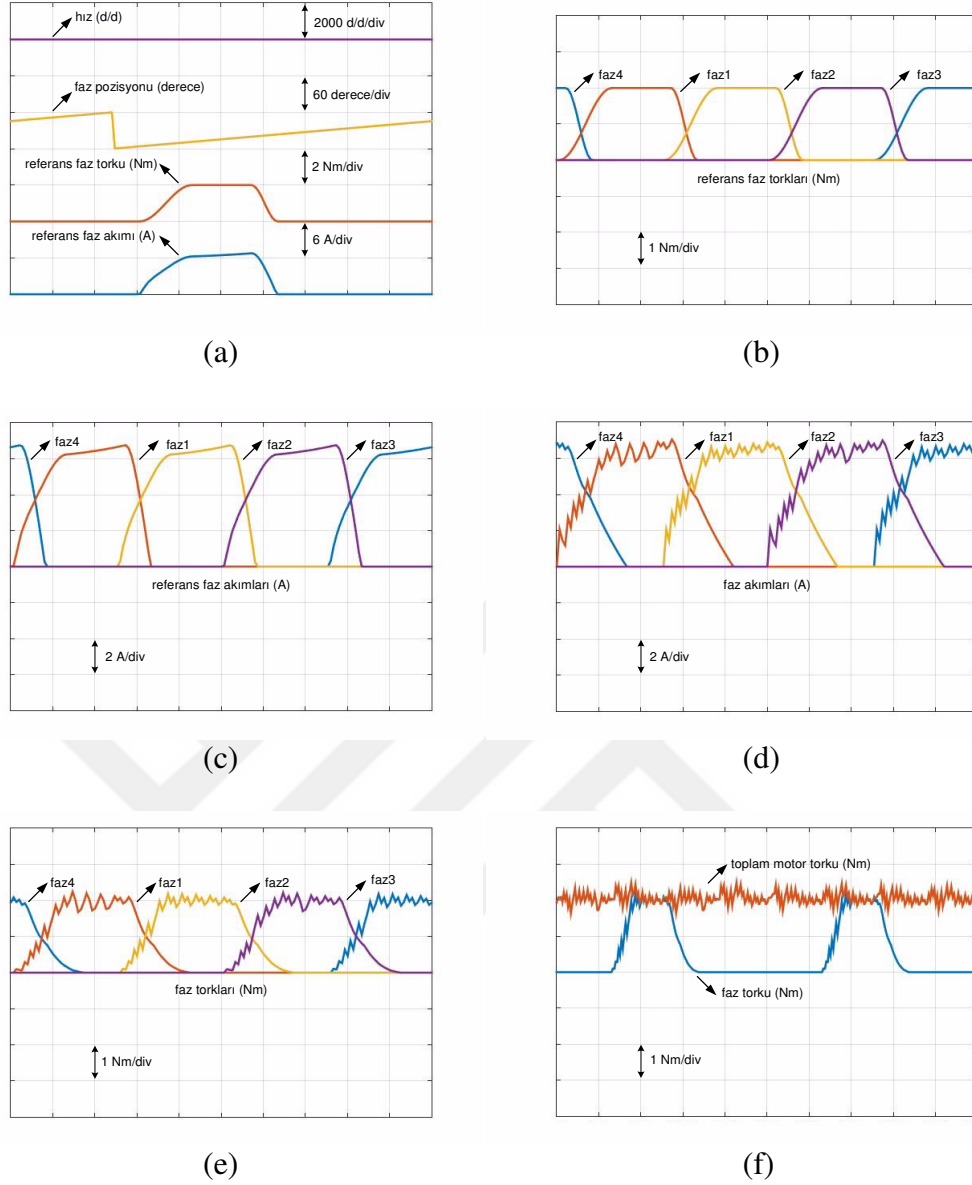
Şekil 6.18’de 2 Nm referans torku ve 500 d/d referans hızında elde edilen simulasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 6.18 (a)’da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 6.18 (b)’de referans faz torkları, Şekil 6.18 (c)’de referans faz akımları, Şekil 6.18 (d)’de faz akımları, Şekil 6.18 (e)’de faz torkları ve Şekil 6.18 (f)’de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak Sinus TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır. Genetik-Bulanık Mantık tabanlı komütasyon aç

generatörü tarafından iletim açısı 4.13^0 , yükselme açısı 8.24^0 , kesim açısı 20.85^0 ve düşme açısı 3.67^0 olarak verilmiştir. Generatör bölgesi çalışması incelendiğinde ortalama tork ve tork rıplarının azaldığı gözlemlenmiştir. Motor çalışma durumunda tork rıplarının değişim değeri 1.64 Nm ile 2.67 Nm arasında olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 6.18. Dört Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (2 Nm,500 d/d) 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

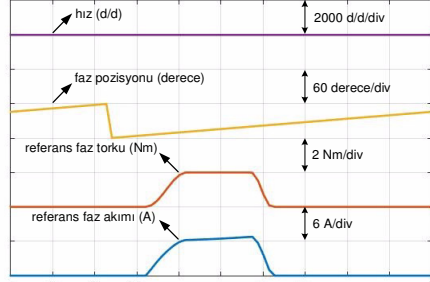
Şekil 6.19'da 2 Nm referans torku ve 1000 d/d referans hızında elde edilen simulasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 6.19 (a)'da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 6.19 (b)'de referans faz torkları, Şekil 6.19 (c)'de referans faz akımları, Şekil 6.19 (d)'de faz akımları, Şekil 6.19 (e)'de faz torkları ve Şekil 6.19 (f)'de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak Sinus TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır. Genetik-Bulanık Mantık tabanlı komütasyon açısı generatörü tarafından iletim açısı 3.70^0 , yükselme açısı 7.60^0 , kesim açısı 19.70^0 ve düşme açısı 3.77^0 olarak verilmiştir. Generatör bölgesi çalışması incelendiğinde ortalama tork ve tork rıplarının azaldığı gözlemlenmiştir. Motor çalışma durumunda tork rıplarının değişim değeri 1.64 Nm ile 2.51 Nm arasında olduğu açıkça görülmektedir.



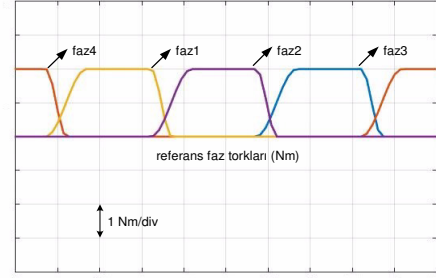
Şekil 6.19. Dört Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (2 Nm,1000 d/d) a) Hız, Faz Pozisyonu, Referans Faz Torku, Referans Faz Akımı b) Referans Faz Torkları c) Referans Faz Akımları d) Faz Akımları e) Faz Torkları f) Toplam Tork ve Faz Torku

Şekil 6.20’de 2 Nm referans torku ve 2000 d/d referans hızında elde edilen simulasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 6.20 (a)’da hız, faz pozisyonu, bir faz için referans faz torku ve bir faz için referans faz akımı verilmiştir. Şekil 6.20 (b)’de referans faz torkları, Şekil 6.20 (c)’de referans faz akımları, Şekil 6.20 (d)’de faz akımları, Şekil 6.20 (e)’de faz torkları ve Şekil 6.20 (f)’de toplam tork ve bir faz torku verilmiştir. Referans olarak Sinus TPF seçilmiştir ve generatör bölgesi çalışması dikkate alınmıştır. Genetik-Bulanık Mantık tabanlı komütasyon açısı generatörü tarafından iletim açısı 5.06° , yükselme açısı 5.82° , kesim açısı 20.09° ve

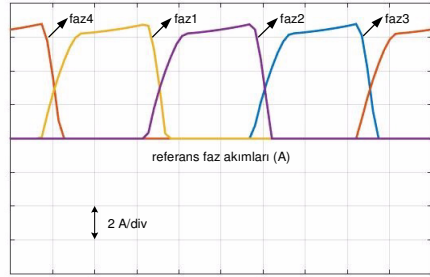
düşme açısı 2.92^0 olarak verilmiştir. Generatör bölgesi çalışması incelendiğinde ortalama tork ve tork rıplarının azaldığı gözlemlenmiştir. Motor çalışma durumunda tork rıplarının değişim değeri 1.62 Nm ile 2.24 Nm arasında olduğu açıkça görülmektedir.



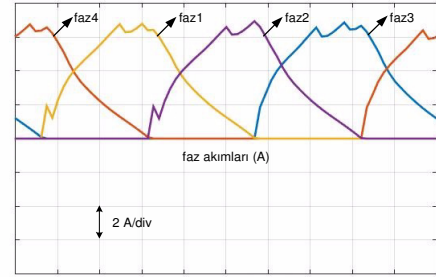
(a)



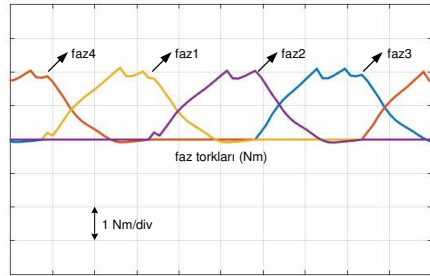
(b)



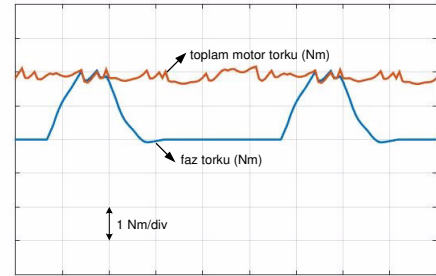
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 6.20. Dört Açılı Modelden Elde Edilen Benzetim Sonuçları (2Nm,2000 d/d) 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

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın ilk kısmında ARM'nin ANSYS ile Sonlu Elemanlar Methodu kullanılarak benzetimi yapılmış olup tork ve akı karakteristikleri elde edilmiştir. Böylece istenilen güç ve tork sürme için yapılan tasarımın ve sonlu elemanlar methodunun hassas, güvenilir ve nümerik sonuçlar elde edilebileceğini görüldü.

Bunların sonrasında ARM'de her pozisyon için SEM ile elde edilen 2000'er veri Genetik Yapay Sinir Ağlarında girdi olarak kullanılarak işlenip, temizlenip endüktans modellemesi yapılmış olup tork ve akı çıktıları incelenmiştir. Bu sayede ise yapay zeka tekniklerin bu konuda na kadar etkili olduğu görüldü.

Daha sonrasında Anahtarlama Relüktans Motorun Sonlu Elemanlar Analizi Methodu ile tasarımı yapıp stator sarım sayısının değiştirilmesinin tork ve akı üzerine etkisi farklı akımlarda incelenmiştir. Sarım sayısını arttırıp akımı azalttığımızda torkun arttığı gözlemlenmiştir. Buda sarım sayısını arttırarak daha az güç harcayarak yüksek tork değerine ulaşabileceğimizi görmüş olduk. Aynı akım değerleri için sarım sayısının artması torkun ve akının artmasına neden olduğu gözlemlendi. Ve böylelikle gerçek sistemlerde ARM'yi daha az güç harcayarak daha yüksek tork değerinde sürebileceğimiz sonucu görüldü. Bu sayede ise enerji tasarrufu sağlanabildi.

Çalışmamızın devamında ise Anahtarlama Relüktans Motorun tork rıplarının giderilmesi için genetik bulanık algoritmalar ile optimize edilen bir Tork Paylaşım Fonsiyonu (TSF) tasarlanmıştır. Genetik bulanık denetleyici ile motor akısı, motor torku ve referans tork büyüklüğüne göre sırasıyla açma, kapama, yükselme ve düşme açılarının elde edilmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda motor modeli yapay sinir ağı vasıtasıyla tam bir nonlinear modeli de elde edilmiştir.

Tasarlanan yapay sinir ağları ve genetik bulanık algoritmalar ile 3 açılı ve 4 açılı olarak eğitilmiştir. Elde edilen deneysel sonuç kullanılan 4 açılı genetik bulanık algoritma ile optimize edilmiş olan TSF'nin ARM'nin geniş hız ve tork aralıklarında

tork rıpıllarının önemli ölçüde azaltıldığını göstermektedir. Buradaki sonuç ışığında tork paylaşım fonksiyonun yükselme ve düşme açılarının gerçekte farklı olduğu teyit edilmiş oldu. Ve yükselme düşme açıları eşit kabul edilerek yapılan uygulamalardaki torktaki gürültü, sarsıntı, rıpıl ve diğer olumsuz etkenlerin önerdiğimiz 4 açılı model ile önüne geçilebileceği görülmüş oldu.

Bu çalışmada yapılan GBM ile ARM'nin tork rıpıl minimizasyonu literatüre büyük katkı sağlayacaktır. Benzetim çalışması yapılan bu denetleyici ise hassas tork sürme gerektiren uygulamalarda rahatlıkla uygulanabilecektir.



8. KAYNAKLAR

- Akçayol MA (2001) Bir Anahtarlama Relüktans Motorun Sinirsel-Bulanık Denetimi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Aşan T (2008) Anahtarlama Relüktans Motorlarında Bulanık Mantık ve Yapay Sinir Ağları ile Konum Algılayıcısız Denetim, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Baba AF (1995) İTÜ Triga Mark-II Reaktörünün Bulanık Kontrolü, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bal G (2004) Özel Elektrik Makinaları, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- Bay ÖF (1996) Anahtarlama Relüktans Motorun Bulanık Mantık Tabanlı Modellenmesi ve Kontrolü, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Baykal N ve Beyan T (2004) Bulanık Mantık İlke ve Temelleri, Bıçaklar Kitabevi, Ankara.
- Bedford BD (1972) US PatentNo:3678352 ve 3679953.
- Bizkevelci E (2008) Anahtarlama Relüktans Motorlarda Tork Dalgalanmalarını ve Akustik Gürültüyü Azaltmak İçin Bir Kontrol Yöntemi, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Castro J, Andrada P and Blanque B (2012) “Minimization of Torque Ripple in Switched Reluctance Motor Drives Using an Enhanced Direct Instantaneous Torque Control”, IEEE, pp. 1021-1026.
- Coley DA (1999) An Introduction to Genetic Algorithms For Scientist and Engineers, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., London.
- Cui G and Wong ML (2004) “Implementing Neural Networks for Decision Support in Direct Marketing”, International Journal of Market Research, 46: 230-250.
- Çalık H (2005) Anahtarlama Relüktans Motorun Kontrolü, Doktora Tezi, Marmara Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çetin A (2001) Bir Anahtarlama Relüktans Motorun Hibrid Gözlemci İle Pozisyon Algılayıcısız Çalıştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- 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.
- Davis L (1991) Handbook Of Genetic Algorithms, Van Nostrand Reinhold, NY.
- Derdiyok A, İnanç N, Özbülür V and Özoğlu Y (1997) “Optimal Phase Current Profiling of SRM by Fuzzy Logic Controller to Minimize Torque Ripple”, International Symposium on Intelligent Control, Proceedings of the 12th IEEE, July 16-18.
- Dowlatshahi M, Nejad SMS and Ahn J-W (2013) “Torque Ripple Minimization of Switched Reluctance Motor Using Modified Torque Sharing Function”, IEEE.
- Dowlatshahi M, Saghaian Nejad SM, Moallem M and Ahn J-W (2014) “Torque Ripple Reduction of Switched Reluctance Motors Considering Copper Loss Minimization”, International Conference on Industrial Technology ICIT, IEEE 2014, Feb. 26-Mar. 1, pp. 858-865.
- Duran F (2008) Endüstriyel Çamaşır Makinelerinde Anahtarlama Relüktans Motor Kullanımı ve Sistemin Zeki Denetimi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Emel GG ve Taşkın Ç (2002) “Genetik Algoritmalar ve Uygulama Alanları”, Uludağ Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi Cilt XXI, 1:129-152.
- Enayati B, Mirzaeian B, Saghaiannejad SM and Moallem M (2005) “Coefficient Determination of Adaptive Feedback Linearization Method, Using Multi-Objective Optimization based on Genetic Algorithm for Position Control of Switched Reluctance Motors”, IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2005, pp. 1713-1717.
- Elmas Ç (2011) Yapay Zeka Uygulamaları, 2. baskı, Seçkin Yayınevi, Ankara.
- Emadi A (2005) Energy-Efficient Electric Motors, Third Edition, Marcel Dekker Inc., New York.
- Fenercioğlu A (2006) Helisel Yapılı Anahtarlama 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.
- Güvenç U (2005) Anahtarlama Relüktans Motorun Denetimi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- Harikrishnan R and Fernandez FM (2016) “Improved Online Torque-Sharing-Funtion based Low Ripple Torque Control of Switched Reluctance Motor Drives”, IEEE.
- Husain I (2002) “Minimization of Torque Ripple in SRM Drives”, IEEE Trans. Ind. Electron.,49(1):28-39.
- Husain I and Ehsani M (1994) “Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives by PWM Current Control”, IEEE, pp. 72-77.
- Husain I and Ehsani M (1996) “Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives by PWM Current Control”, IEEE Trans. On Power Electronic., 11(1): 83-88.
- Hu Y and Ding W (2016) “Torque Ripple Minimization of a Novel Modular Stator Switched Reluctance Motor Based on Direct Instantaneous Torque Control”, 2016 Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies EVER, IEEE.
- Inanc N (2002) “Phase Current Modulation of Switched Reluctance Motor to Minimize Torque Ripple”, Elektric Power Systems Research 61, pp. 51-55.
- Inanc N and Ozbulur V (2003) “Torque Ripple Minimization of a Switched Reluctance Motor by using Continuous Sliding Mode Control Technique”, Electric Power Systems Research 66, pp.241-251.
- İnanç N (1996) Anahtarlamalı Relüktans Motorun Modellenmesi ve Yeni Kontrol Teknikleri ile Denetimi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Karagöz F (2009) Mikrodenetleyici Kontrollü Anahtarlamalı Relüktans Motorların Tasarımı ve Marş Motoru Olarak Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Karakoca A (2009) Çok Değişkenli Lineer Olmayan Modellerde Genetik Algoritma, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye.
- Kayıkçı Ş (2014) Web Sayfalarının Yapay Sinir Ağları ile Sınıflandırılması, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Khalili H, Afjei E and Najafi A (2007) “Torque Ripple Minimization in SRM Drives Using Phase/Current Profiles”, IEEE.
- Krishnan R (2001) Switched Reluctance Motor Drives, Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications, CRC Press, London.
- Labioud C, Bahri M, Srairi K, Mahdad B, Benchouia MT and Benbouzid MEH (2017) “Static and Dynamic Analysis of Non-linear Magnetic Characteristics in Switched Reluctance Motors based on Circuit-Coupled Time Stepping Finite

Element Method”, Int J Syst Assur Eng Manag 8, January 2017, Suppl. 1 , pp. 47-55.

Lawrenson PJ, Stephenson JM, Blenkinsop PT, Corda J and Fulton NN (1980) “Variable-Speed Switched Reluctance Motors”, IEEProc., 253-265.

Li H, Bilgin B and Emadi A (2019) “An Improved Torque Sharing Function for Torque Ripple Reduction in Switched Reluctance Machines”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 34, No. 2, pp. 1635-1644.

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

Miller TJE (2001) Electronic Control Of Switched Reluctance Machines. Ser. Newnes Power Engineering Series, Oxford, U.K.

Mir S, Husain I and Elbuluk ME (1998) “Switched reluctance motor modeling with on-line parameter identification, IEEE Transactions on Industry Applications”, Vol. 34, No. 4, pp. 776-783.

Mitra R, Uddin W, Sozer Y and Husain I (2013) “Torque Ripple Minimization of Switched Reluctance Motors Using Speed Signal Based Phase Current Profiling”, IEEE.

Moshiri B and Rashidi F (2004) “Speed Control and Torque Ripple Minimization of Switch Reluctance Motors using Genetic Algorithms”, WSEAS Transactions on Circuits and Systems, Issue 2, Volume 3, 404-410.

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

Nasar SA and Ofsenani RDC (1969) “Switched Reluctance Motor”, In Proceedings of the Institution Electrical Engineers, 116(6):1048-1969.

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

Osama AM, Abdel Fattah HA and Sakr AM (2002) “Variable Structure Flux Linkage Controller for Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor”, Preceedings of the American Control Conference, May 8-10, pp. 3105-3110.

Önder M (2016) Anahtarlamalı Relüktans Motorun Tork Rıplı Minimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Abant İzzet Baysal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Önder M, Doğan MU ve Arslan M (2019) “Anahtarlama Frekansının Anahtarlamalı Relüktans Motorda Tork Dalgalanmasına Etkisinin İncelenmesi”, Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, Cilt 11, Sayı 1, Sayfa 13-23.

- Özbulur V (1996) Anahtarlmalı Relüktans Motorun Moment Dalgalanmasının 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.
- Polloc C and Williams BW (1990) "PowerConverterCircuitsforSwitched Reluctance Motorswiththe Minimum Number of Switches", IEE Proccedings, 137(6): 374-384.
- Rodrigues M, Branco PJC and Suemitsu W (2001) "Fuzzy Logic Torque Ripple Reductionby Turn-Off Angle Compensation for SwitchedReluctanceMotors", IEEE Transactions of Industrial Electronics:711-714.
- Rumelhart DE, Hinton GE and Williams RJ (1986) "Learning Representations by Back Propagation Error", Nature, 32: 533-536.
- Russell SJ and Norvig P (2003) Artificial Intelligent, A Modern Approach, Second Edition, Prentice Hall, Oxford.
- Sağıroğlu Ş, Beşdok E ve Erler M (2003) Mühendislikte Yapay Zeka uygulamaları-I: Yapay Sinir Ağları, Ufuk Kitap Kırtasiye Yayıncılık, Kayseri.
- Sahoo NC, Panda SK and Dash PK (2000) "A Current Modulation Scheme for Direct Torque Control of Switched Reluctance Motor Using Fuzzy Logic", Mechatronics 10, pp. 353-370.
- 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.
- Şen Z (2004) Yapay Sinir Ağları İlkeleri, Su vakfı Yayınları, İstanbul.
- Terzioğlu H (2016) Segmental Tip Anahtarlmalı Relüktans Motorun Moment Salınımlarını Azaltmak için Sürücü ve Kontrolör Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
- Turan Ö (2007) Turbofan Motorlarının Elitizmlı Genetik Algoritma Yöntemiyle Optimizasyonu, Yüksek lisans tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

- 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) "Anahtarlama Reluktans Makinaların Akı ve Enduktans Ölçüm Metotlarının İncelenmesi", SDU International Journal of Technologic Sciences, 1(2): 21-23.
- Üstün O (2009) "Genetik Algoritma Kullanılarak İleri Beslemeli Bir Sinir Ağında Etkinlik Fonksiyonlarının Belirlenmesi", Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15(3): 225-234.
- Üstün 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.
- Üstün O (2014) "Elektrik Makinalarının Modellenmesi ve Simülasyonu Ders Notları", Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bolu.
- Üstün O (2015) "Elektrik Makinalarının Gerçek Zamanlı Kontrolü Ders Notları", Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bolu.
- Üstün O (2016) "Genetik Tabanlı Geleneksel Denetleyicilerle Anahtarlama Reluktans Motorun Pozisyon Takip kontrolü", SDU International Journal of Technologic Sciences, 8(1):21-23.
- Üstün O (2004) Sürekli Mıknatıslı Bir Senkron Motor Hızının Bulanık Sinirsel ve Kayma Kipli Denetleyicilerle Dönüşümlü Denetimi, Denetimi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Üstün O, Önder M and Sefa İ (2018) "Identification of Mechanical Parameters for the Switched Reluctance Motor", IEEE, 978-1-5386-4184-2/18/\$31.00
- Üstün O, Bekiroğlu E and Önder M (2020) "Design of Highly Effective Multilayer Feedforward Neural Network by Using Genetic Algorithm", WILEY, DOI: 10.1111/exsy.12532
- Venkatesha L and Ramanarayanan V (1998) "Torque Ripple Minimisation in Switched Reluctance Motor with Optimal Control of Phase Currents", IEEE, pp. 529-534.
- Veena ND and Raghuram NL (2017) "Minimization of Torque Ripple using DITC with Optimum Bandwidth and Switching Frequency for SRM Employed in Electric Vehicle", International Conference on Smart Grids, Power and Advanced Control Engineering, ICSPACE 2017, IEEE, pp. 143-148.

- Wei Y, Qishuang M, Poming Z and Yangyang G (2016) “Torque Ripple Reduction in Switched Reluctance Motor Using a Novel Torque Sharing Function”, CSAA International Conference on Aircraft Utility Systems AUS, IEEE 2016, October 10-12, pp. 177-182.
- Widrow B and Hoff ME (1960) “Adaptive Switching Circuits”, Information Systems Laboratory: 97-104.
- Xu A, Shang C, Chen J, Zhu J and Han L (2019) “A New Control Method Based on DTC and MPC to Reduce Torque Ripple in SRM”, Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2019.2917317, IEEE, pp. 68584-68593.
- Xu JX, Panda SK and Zieng Q (2002) “Multiobjective Optimization Of Current Waveforms For Switched Reluctance Motors By Genetic Algorithm”, Congress on Evolutionary Computation:1860-1865.
- Xue XD, Cheng KWE and Cheung NC (2008) “Evaluation of Torque Sharing Functions for Torque Ripple Minimization of Switched Reluctance Motor Drives in Electric Vehicles”, Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2008, pp. 187.
- Xue XD, Cheng KWE and Ho SL (2006) “A Control Scheme of Torque Ripple Minimization SRM Drives Based on Flux Linkage Controller and Torque Sharing Function”, 2nd International Conference on Power Electronics Systems and Applications, pp. 79-84.
- Xue XD, Cheng KWE and Ho SL (2009) “Optimization and Evaluation of Torque-Sharing Functions for Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives”, IEEE Transactions on Power Electronics, pp. 2076-2090.
- Xilian W, Yihuang Z, Huaijuan L and Hui H (2005) “Nonlinear Modeling Of Switched Reluctance Motor Based On Combination Of Neural Network And Genetic Algorithm”, ICEMS:572-574.
- Yiğit T (2005) Genetik Uyarlamalı Denetleyici İle Anahtarlama Reluktans Motorun Hız Denetiminin Gerçekleştirilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yıldız İ (2013) Anahtarlama Reluktans Motorun Genetik Bulanık Mantık Denetleyici İle Nonlineer Hız ve Konum Denetimi, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ye W, Ma Q and Hu J (2014) Torque Ripple Minimization of Switched Reluctance Motors by Controlling the Phase Currents During Commutation, ICEMS 2014, Oct. 22-25, pp. 1866-1870.
- Ye J, Bilgin B and Emadi A (2015) “An Offline Torque Sharing Function for Torque Ripple Reduction in Switched Reluctance Motor Drives”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 30, No. 2, pp. 726-735.

- Yaşar Y (2017) Yüksek Hız Uygulamaları İçin Yüksek Güç Yoğunluklu Yeni Bir Anahtarlama Relüktans Motorunun Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Zheng Y, Sun H, Dong Y and Wang W (2007) “Torque Ripple Minimization with Current Oriented Method for Switched Reluctance Motor”, Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems, Oct 8-11, pp 1640-1644.



9. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Murat ARSLAN

Doğum Yeri ve Tarihi : BOLU – 19.06.1993

Lisans Üniversite : Gazi Üniversitesi – Elektrik Elektronik

Mühendisliği

Gazi Üniversitesi – Endüstri Mühendisliği

(Çift Anadal)

Elektronik posta : muratarslan1993@gmail.com

İletişim Adresi :Borazanlar Mah. 408.Sk No:7/1 Merkez/BOLU

Yayın Listesi :Önder M, Doğan M U, Arslan M (2019)

“Anahtarlama Frekansının Anahtarlama Relüktans Motorda Tork Dalgalanmasına Etkisinin İncelenmesi”, Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, Cilt:11, Sayı:1, Sayfa: 13-23.