

**YAPAY SİNİR AĞLARI KULLANARAK
ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLARDA
HATA TESPİT VE TEŞHİSİ**

**2014
DOKTORA TEZİ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ**

ALİ UYSAL

**YAPAY SİNİR AĞLARI KULLANARAK ANAHTARLAMALI RELÜKTANS
MOTORLARDA HATA TESPİT VE TEŞHİSİ**

Ali UYSAL

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Ocak 2014**

Ali UYSAL tarafından hazırlanan “YAPAY SİNİR AĞLARI KULLANARAK ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLARDA HATA TESPİT VE TEŞHİSİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Raif BAYIR

Tez Danışmanı, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 17/ 01/ 2014

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Ömer Faruk BAY (GÜ)



Üye : Prof. Dr. Mehmet AKBABA (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Raif BAYIR (KBÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Salih GÖRGÜNOĞLU (KBÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Fecir DURAN (GÜ)



...../...../2014

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Mustafa BOZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Ali UYSAL

ÖZET

Doktora Tezi

YAPAY SİNİR AĞLARI KULLANARAK ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLARDA HATA TESPİT VE TEŞHİSİ

Ali UYSAL

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Raif BAYIR

Ocak 2014, 103 sayfa

Bu çalışmada anahtarlama relüktans motoru (ARM) hatalarının yapay sinir ağı (YSA) ile gerçek zamanlı olarak tespit ve teşhisi gerçekleştirilmiştir. ARM'ler günümüzde birçok kritik uygulamada kullanılmaktadır. Örneğin kan karıştırma cihazı, hibrid araçlar vb. Bu motorların bozulması durumunda hem maddi kayıplar hem de istenilmeyen durumlar ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada ARM hatalarını tespit ve teşhis edebilmek ve arızalanmadan durumunu öğrenmek için bir test düzeneği hazırlanmıştır. Bu test düzeneğinde ARM'ye ait parametreler bir veri alış verişi kartı ile gerçek zamanlı olarak bilgisayar ortamına aktarılmaktadır. Hata tespit ve teşhisi için Matlab ortamında kullanıcı ara yüzü yazılımı gerçekleştirilmiştir. Bu yazılım gerçek zamanlı olarak tercih edilen YSA ile ARM hatalarını tespit ve teşhis etmektedir. Hata tespit ve teşhisinde Kohonen sinir ağı, İleri beslemeli sinir ağı ve Elman sinir ağı kullanılmaktadır. ARM'lerde YSA'lar ile gerçek zamanlı hata tespit ve teşhisine en uygun sinir ağı, başarımlarına göre Elman sinir ağı olarak belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler : Yapay sinir ağları, anahtarlamalı relüktans motor, hata tespit ve teşhisi.

Bilim Kodu : 902.1.182

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

FAULT DETECTION AND DIAGNOSIS OF SWITCHED RELUCTANCE MOTORS USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Ali UYSAL

**Karabük University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Computer Engineering**

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Raif BAYIR

January 2014, 103 pages

In this study real time fault detection and diagnosis of Switched Reluctance Motors (SRM) via artificial neural networks (ANN) is realized. Nowadays, SRMs are used in many critical applications. For example, blood mixing device, hybrid vehicles, etc. The breakdown of this motor causes financial losses and undesirable situations. An experimental setup is established to detect and diagnosis of SRM faults and determined the status of motor before it breaks down. In this experimental setup, parameters of SRM are measured in real time and transferred to the computer environment via data acquisition card. A user interface software is developed in Matlab environment to detect and diagnose SRM faults. This software detects and diagnoses faults using one of the proposed ANN algorithms in real time. Self-organizing neural network, Feed forward neural network and Elman neural network algorithms are used in fault detection and diagnosis. The performances of ANNs are compared and the most compatible ANN to real time fault detection and diagnosis of SRM's is determined as Elman neural network.

Key Word : Artificial neural networks, switched reluctance motors, fault detection and diagnosis.

Science Code : 902.1.182

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Raif BAYIR'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Tez çalıőmalarım sırasında desteklerini esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Muhammet KAYFECİ, Arő. Gör. Tuncay SOYLU ve Arő. Gör. Emel SOYLU'ya teşekkür ederim.

Sevgili aileme maddi manevi hiçbir yardımını esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
BÖLÜM 1.	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	9
ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLAR	9
2.1. ARM'NİN YAPISI VE ÇALIŞMASI.....	9
2.2. ARM'NİN EŞDEĞER DEVRE MODELİ.....	12
2.3. ARM'NİN TORK HIZ KARAKTERİSTİĞİ.....	15
2.4. ARM'LERDE KULLANILAN DÖNÜŞTÜRÜCÜ DEVRE ÇEŞİTLERİ ...	16
2.5. ARM'NİN ÜSTÜNLÜKLERİ VE SAKINCALARI.....	21
2.6. ARM'NİN ENDÜSTRİDEKİ KULLANIM ALANLARI	24
2.7. ARM HATALARI	25
BÖLÜM 3.	27
YAPAY SİNİR AĞLARI	27
3.1. KOHONEN SİNİR AĞI.....	30
3.1.1. Kohonen Sinir Ağının Yapısı.....	30
3.1.2. Kohonen Sinir Ağının Eğitimi	31
3.2. İLERİ BESLEMELİ SİNİR AĞI.....	32
3.2.1. İleri Beslemeli Sinir Ağının Yapısı.....	32

	<u>Sayfa</u>
3.2.2. İleri Beslemeli Sinir Ağının Eğitimi	33
3.3. ELMAN SİNİR AĞI.....	37
3.3.1. Elman Sinir Ağının Yapısı	38
3.3.2. Elman Sinir Ağının Eğitimi	40
3.4. MATLAB ORTAMINDA YSA'LARIN EĞİTİMİ	41
BÖLÜM 4.	47
ARM HATALARININ ÖLÇÜMÜ İÇİN TEST DÜZENEGİ TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ.....	47
4.1. DENEY DÜZENEGİNDE KULLANILAN CİHAZLAR.....	48
4.1.1. Deneysel çalışmada kullanılan ARM'nin yapısı ve teknik özellikleri .	49
4.1.2. ARM Dönüştürücü Tasarımı	58
4.1.3. PMD ve Dokunmatik Panel	60
4.1.4. Güç Kaynağı	62
4.1.5. Senkron Alternatör.....	63
4.1.6. Enkoder	65
4.1.7. Tork dönüştürücüsü	65
4.1.8. Akım Dönüştürücüsü	66
4.1.9. Gerilim Dönüştürücüsü.....	66
4.1.10. Veri Alış-Veriş Kartı	67
4.2. ARM'İN PMD KULLANARAK PID İLE DENETİMİ.....	68
4.3. HATA TESPİTİNDE KULLANILACAK PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ	71
4.4. MATLAB ORTAMINA VERİ AKTARIMI	72
4.5. YSA'LARA VERİ SETİ OLUŞTURMAK İÇİN DENEYSEL ÖLÇÜMLER.....	74
BÖLÜM 5.	83
YAPAY SİNİR AĞLARI İLE ARM HATALARININ TESPİT VE TEŞHİSİ	83
5.1. KOHONEN SİNİR AĞI İLE ARM'LERDE HATA TESPİT VE TEŞHİSİ	83
5.2. İLERİ BESLEMELİ SİNİR AĞI İLE ARM'LERDE HATA TESPİT VE TEŞHİSİ	86

	<u>Sayfa</u>
5.3. ELMAN SİNİR AĞI İLE ARM'LERDE HATA TESPİT VE TEŞHİSİ	88
5.4. YAPAY SİNİR AĞLARI İLE ARM HATALARININ GERÇEK ZAMANLI TESPİT VE TEŞHİSİ	90
BÖLÜM 6.	95
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	95
KAYNAKLAR	96
EK AÇIKLAMALAR A. HATA TESPİT VE TEŞHİS YÖNTEMLERİ.....	101
ÖZGEÇMİŞ	103

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Elektrik motorları hata çeşitleri.	2
Şekil 1.2. Elektrik motorlarında hataların oranı.	3
Şekil 2.1. 8/6 kutuplu bir ARM'nin iç yapısı.	10
Şekil 2.2. ARM'nin rotor konumları.	11
Şekil 2.3. Bir faz için endüktans, tork ve akım eğrileri.	12
Şekil 2.4. ARM'nin bir faz eşdeğer devresi.	12
Şekil 2.5. ARM'nin tork-hız karakteristiği.	16
Şekil 2.6. ARM dönüştürücü çeşitleri.	17
Şekil 2.7. Asimetrik köprü dönüştürücü.	18
Şekil 2.8. Söndürme dirençli dönüştürücü.	18
Şekil 2.9. Ortak anahtarlı dönüştürücü.	19
Şekil 2.10. RC dönüştürücü.	19
Şekil 2.11. Ayrık beslemeli dönüştürücü.	20
Şekil 2.12. Kondansatör boşalmalı dönüştürücü.	20
Şekil 2.13. ARM'de meydana gelebilen hatalar.	25
Şekil 3.1. Danışmanlı öğrenme yapısı.	29
Şekil 3.2. Danışmansız öğrenme yapısı.	29
Şekil 3.3. Takviyeli öğrenme yapısı.	30
Şekil 3.4. Kohonen sinir ağı yapısı.	31
Şekil 3.5. Çok katmanlı ileri beslemeli sinir ağı.	33
Şekil 3.6. Ağ içindeki katmanlar ve sinir hücrelerinin sıralanması.	34
Şekil 3.7. Çıkış katmanından hatanın geriye yayılması.	35
Şekil 3.8. Gizli katmanlar boyuca hatanın yayılımı.	35
Şekil 3.9. Elman ağı yapısı.	38
Şekil 3.10. Elman ağının ayrıntılı gösterimi.	39
Şekil 3.11. Nntool araç kutusu ekran görüntüsü.	45
Şekil 3.12. Nntool yeni veri ve sinir ağı tanımlama ekranı.	46
Şekil 4.1. ARM test düzeneği blok diyagramı.	47

Şekil 4.2. Deneysel düzeneğin resmi.	48
Şekil 4.3. 8/6 kutuplu ARM'nin içyapısı.	49
Şekil 4.4. ARM'nin dış görünümü.	49
Şekil 4.5. ARM'nin fiziksel boyutları.	50
Şekil 4.6. ARM'nin kablo bağlantıları.	50
Şekil 4.7. ARM'nin dinamik karakteristik eğrisi.	51
Şekil 4.8. ARM rotor konumuna göre faz endüktans ölçüm deney düzeneği.	52
Şekil 4.9. ARM rotor konumuna göre faz endüktans değeri.	52
Şekil 4.10. Faz endüktans değişim grafiği.	53
Şekil 4.11. Faz akımı ve rotor açısına bağlı manyetik akı değişim grafiği.	54
Şekil 4.12. ARM'nin faz akımı ve rotor açısına göre statik tork değer grafiği.	54
Şekil 4.13. ARM'nin Simulink açık döngü benzetim modeli.	55
Şekil 4.14. ARM'nin açık döngü denetimsiz tork ve devir grafiği.	56
Şekil 4.15. ARM'nin açık döngü denetimsiz manyetik akı ve akım grafiği.	56
Şekil 4.16. ARM'nin kapalı döngü PID denetimli modeli.	57
Şekil 4.17. ARM'nin PID denetimli tork ve devir grafiği.	57
Şekil 4.18. ARM'nin PID denetimli manyetik akı ve akım grafiği.	58
Şekil 4.19. 4 Faz ARM sürücü blok şeması.	59
Şekil 4.20. 4 Faz ARM sürücü devre resmi.	59
Şekil 4.21. Deneysel çalışmada kullanılan asimetrik dönüştürücünün bir fazına ait akım ve anahtarlama sinyalleri.	60
Şekil 4.22. Siemens S7-1200 PMD.	61
Şekil 4.23. Siemens SIMATIC HMI dokunmatik panel resmi.	62
Şekil 4.24. Programlanabilir güç kaynağı.	63
Şekil 4.25. Senkron alternatör.	63
Şekil 4.26. Alternatör performans grafiği.	64
Şekil 4.27. Senkron alternatör bağlantı şeması.	64
Şekil 4.28. Kuadrotik enkoder.	65
Şekil 4.29. Tork dönüştürücüsü.	65
Şekil 4.30. LA-55P akım dönüştürücüsü.	66
Şekil 4.31. LV-25P gerilim dönüştürücüsü.	67
Şekil 4.32. Veri alışı verişi kartı ve terminal bordu.	67

Sayfa

Şekil 4.33. S7-1200 PMD için PID parametrelerinin optimize edilmesi.	68
Şekil 4.34. ARM'nin 3000 dev/dak için PMD'nin PID parametrelerinin ayarlandığı yazılım ekran görüntüsü.	69
Şekil 4.35. ARM'nin 3000dev/dak'da yüksüz devir grafiği.	70
Şekil 4.36. ARM'nin 3000dev/dak'da yarım yüklü devir ve tork grafiği.	70
Şekil 4.37. ARM'nin 0-1500dev/dak-3000dev/dak'da tam yüklü devir grafiği.	71
Şekil 4.38. Hata teşhis sisteminin blok şeması.	72
Şekil 4.39. Veri alış veriş kartından gerçek zamanlı olarak verilerin alınması için kullanılan Simulink modeli.	73
Şekil 4.40. ARM yarım yükte normal durumu.	75
Şekil 4.41. ARM tam yükte normal durumu.	75
Şekil 4.42. ARM yarım yükte bir fazı açık devre hatası durumu.	76
Şekil 4.43. ARM tam yükte bir fazı açık devre hatası durumu.	76
Şekil 4.44. ARM yarım yükte iki fazı açık devre hatası durumu.	77
Şekil 4.45. ARM tam yükte iki fazı açık devre hatası durumu.	77
Şekil 4.46. ARM yarım yükte bir fazı kısa devre hatası durumu.	79
Şekil 4.47. ARM tam yükte bir fazı kısa devre hatası durumu.	79
Şekil 4.48. ARM yarım yükte bir fazı sargı hatası durumu.	80
Şekil 4.49. ARM tam yükte bir fazı sargı hatası durumu.	80
Şekil 4.50. ARM yarım yükte kaynak hatası durumu.	81
Şekil 4.51. ARM tam yükte kaynak hatası durumu.	81
Şekil 4.52. ARM'de aşırı yük hatası durumu.	82
Şekil 4.53. ARM'de kilitli rotor hatası durumu.	82
Şekil 5.1. Kohonen ağ yapısı.	84
Şekil 5.2. Kohonen sinir ağı ağırlık pozisyonları grafiği.	84
Şekil 5.3. ARM'nin durumuna göre aktif olan sinir hücreleri.	85
Şekil 5.4. Hata teşhis için kullanılan ileri beslemeli sinir ağı yapısı.	86
Şekil 5.5. İleri beslemeli sinir ağı yapısı.	87
Şekil 5.6. İleri beslemeli sinir ağı eğitim performans grafiği.	87
Şekil 5.7. Elman sinir ağı yapısı.	89
Şekil 5.8. Elman sinir ağı eğitim performans grafiği.	89
Şekil 5.9. Gerçek zamanlı hata tespit ve teşhis yazılımı ekran görüntüsü.	91
Şekil EK A.1. Hata tespit yöntemleri.	102

Şekil EK A.2. Hata teşhis yöntemleri 102

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. ARM'nin diğer motorlarla karşılaştırılması.....	23
Çizelge 4.1. ARM'nin 0°-30° aralığında kilitli rotorda ürettiği tork değerleri.	55
Çizelge 4.2. ARM'de ölçülen hatalar.....	74
Çizelge 5.1. Kohonen sinir ağı hata tespit ve teşhis yazılımı performansı.	85
Çizelge 5.2. İleri beslemeli sinir ağı ile ARM hata teşhis performansı.	88
Çizelge 5.3. Elman sinir ağı ile ARM hata teşhis performansı.	90
Çizelge 5.4. YSA'ların gerçek zamanlı hata tespit ve teşhis performans karşılaştırması.	92
Çizelge 5.5. Yapay sinir ağlarının performans karşılaştırması.	94

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

θ	: ARM'nin faz açısı
n	: Gaussian fonksiyonunun orta noktası
σ	: Gaussian fonksiyonunun genişlik değeri
φ	: manyetik akı
v	: gerilim
p	: güç
i	: akım
t	: zaman
L	: endüktans
R	: direnç
ω	: açısal hız
T	: tork
e	: elektromotor kuvvet
η	: kazanç terimi
d_i	: giriş ve çıkış düğümleri arası mesafe
x_i	: i. giriş düğümü
j	: çıkış düğümü
w_{ij}^k	: k. katmandaki i. giriş düğümü ile j. çıkış düğümü arasındaki ağırlık
J_r	: maliyet fonksiyonu
NE_j	: komşuluk miktarı
S_i^k	: k. katmandaki i. sinir hücresinin net toplamı
O_i^k	: k. katmandaki i. sinir hücresinin çıkışı
∇w	: ağırlık parametresinin kısmi türevi

KISALTMALAR

ARM	: Anahtarlamalı Relüktans Motor
BP	: Back Propagation (Geri Yayılım)
DGM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
FIFO	: First in first out (İlk giren ilk çıkar)
GUI	: Graphical User Interface (Grafiksel Kullanıcı Arayüzü)
HFD	: Hızlı Fourier Dönüşümü
HMI	: Human Machine Interface (İnsan Makine Arayüzü)
LVQ	: Learning Vector Quantization (Vektör Nicelemeli Öğrenme)
MLP	: Multi Layer Perceptron (Çok Katmanlı Perceptron)
MSCA	: Motor Current Signature Analysis (Motor Akımı Sinyal Analizi)
NNTOOL	: Neural Network Toolbox (Sinir Ağları Araç Kutusu)
PI	: Proportional Integral (Oransal İntegral)
PID	: Oransal Integral Derivative (Oransal İntegral Türev)
PMD	: Programlanabilir Mantık Denetleyicisi
PTO	: Pulse Train Outputs (Darbe Dizisi Çıkışı)
SOM	: Self Organisation Map (Öz Örgütlemeli Harita)
VRM	: Variable Reluctance Motor (Değişken Relüktanslı Motor)
YSA	: Yapay Sinir Ağları

BÖLÜM 1

GİRİŞ

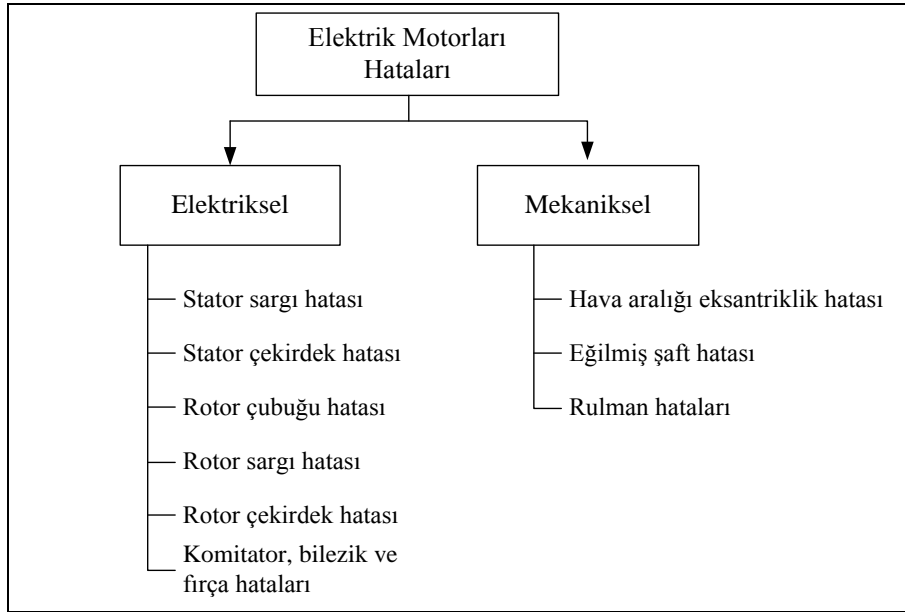
Elektrik motorları, elektrik enerjisini, mekanik enerjiye dönüştüren makinelerdir. Elektrik motorları çok geniş güç aralığında (1mW-1MW) üretilmektedir. Her elektrik motoru biri sabit (stator) ve diğeri kendi çevresinde dönen (rotor ya da endüvi) iki ana parçadan oluşur. Elektrik motorları iyi montaj edilmiş ve sağlam olmalarına rağmen, çalışmaları esnasında hatalar meydana gelmektedir. Elektrik motorlarının durumlarının izlenmesi ve önceden hata teşhisinin yapılması ile elektrik motorunun arızalanması sonucu meydana gelecek maddi kayıplar önlenir. Elektrik motorlarının durumunu izleme ve hata teşhisi sayesinde motorun emniyeti ve güvenilirliği artırılmaktadır [1,2]. Elektrik motorlarının hatalarını tespit eden ve önceden teşhis edebilen farklı yöntemler vardır. Bu yöntemlerin her biri değişik bilimsel metotlar ve teknolojiler içerir [3-7]. Hata tespit yöntemleri sınır denetimi, eğilim denetimi, sinyal model tabanlı, süreç model tabanlı ve çok değişkenli veri analizi, vb. yöntemlerinden oluşmaktadır (Şekil EK-A.1.).

Hata teşhis yöntemleri ise sınıflama ve çıkarım yöntemleri olmak üzere iki ana başlık altında incelenebilir. Sınıflandırma yöntemleri, örüntü tanıma, istatistiksel sınıflandırma, yaklaşma yöntemleri, yoğunluk tabanlı yöntemler ve yapay zeka yöntemleri olarak alt bölümlerden oluşmaktadır. Çıkarım yöntemleri ikili muhakeme ve yaklaşık muhakeme olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir. Hata teşhis yöntemlerinde bulanık mantık ve YSA'lar hem sınıflandırma hem de çıkarım yöntemleri altında yer almaktadır. Hata teşhis yöntemlerinin tamamı Şekil EK-A.2.'de verilmektedir.

Motorlarda hata teşhisi; hatanın oluştuğunun anlaşılması, hatanın nerede meydana geldiği ve yalıtım, hatanın tipi ve büyüklüğünün ne kadar olduğunu tespit etme işlemidir. Hata teşhis sistemlerinde, olması gereken en önemli özelliklerden bir

tanesi de duyarlılığıdır. Küçük değerlikli ve yeni oluşmaya başlamış bir hatanın tespit edilebilmesi gerekir. Bunu parametreler değiştiğinde ve sistemde bozucu etkiler olduğunda da yapabilmelidir. Ayrıca yanlış teşhislerin sayısının azaltılabilmesi için teşhis sisteminin belli bir esnekliğinin de olması gerekir [8].

Elektrik motorlarında meydana gelen hatalar elektriksel ve mekaniksel hatalar olmak üzere iki ana gruba ayrılır (Şekil 1.1).

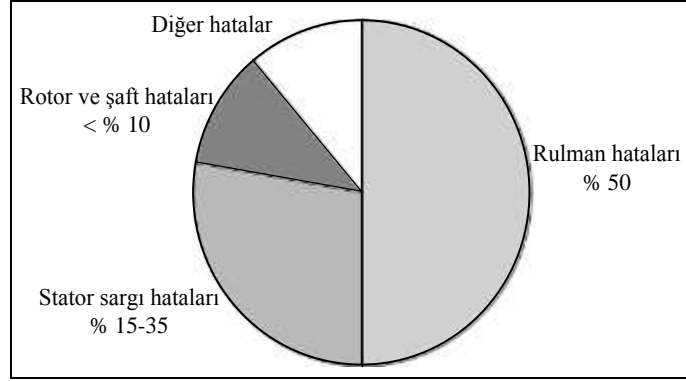


Şekil 1.1. Elektrik motorları hata çeşitleri.

Elektriksel hatalar; stator sargı, stator çekirdek, rotor sargı, rotor çekirdek, rotor çubuğu, komitator, bilezik ve fırça hatalarıdır. Mekaniksel hatalar ise hava aralığı eksantrikliği, eğrilmiş şaft ve rulman hatalarıdır. Elektrik motorlarında meydana gelen hataların yaklaşık yarısı rulman hatası olarak meydana gelmektedir. Stator sargılarında meydana gelen hataların oranı % 15-35 aralığındadır. Rotor ve şaftta meydana gelen hataların oranı % 10'dan daha azdır (Şekil 1.2). Bu yüzden elektrik motorlarının uygulamalarında, emniyet, güvenilirlik, verim en çok ilgilenilen ve olması istenilen özelliklerdir [9,10].

Yapay zeka teknikleri ile elektrik makinelerinde hata tespit ve teşhisi sıklıkla tercih edilmektedir. Kohonen sinir ağı kullanarak bir senkron generatör stator ve rotor

akımları ile hataları teşhis edilmiştir [11]. Kohonen sinir ağı ile bir asenkron motor titreşim sinyali Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) analizi uygulanarak hata teşhisi gerçekleştirilmiştir [12]. Kohonen ağı spektral verileri kullanılarak, indüksiyon motorların hata teşhisi yapılmıştır. Bu motor için; kısa devre, dengesiz ve kırık rotor çubuğu hatalarını % 100 başarı ile teşhis edilmiştir [13].



Şekil 1.2. Elektrik motorlarında hataların oranı.

Asenkron motorlar, rulman hataları, güç kaynağı, kaçak akı ölçümü, vibrasyon spektral değerleri ve vibrasyon sinyallerinin asimetrisi kullanarak Kohonen sinir ağı ile teşhis edilmiştir [14,15]. Diğer YSA'lar ile Kohonen ağı birleştirilerek, elektrik motorları hata teşhis çalışmaları yürütülmektedir [16].

Kohonen sinir ağı ile marş motorlarının (seri sargılı doğru akım motoru) kondisyonu izlenmiş ve hata teşhisi yapılmıştır. Marş motorunun çektiği akım ve motor uçlarındaki gerilim Kohonen sinir ağına uygulanmıştır. Geliştirilen bu hata teşhis sistemi ile marş motorlarında gözlenen 6 hatayı başarıyla teşhis edilmiştir. Hata teşhisi için Visual Basic 6.0'da kullanıcı ara yüzü (Graphical User Interface -GUI) yazılım geliştirilmiştir [17].

Elektrikli valflerin bakım masraflarını önlemek için Kohonen sinir ağı kullanarak hata tespit, teşhis ve tahmin sistemi gerçekleştirilmiştir. Bu hata tespit, teşhis ve tahmin sistemini alanı programlanabilir kapı dizileri tabanlı platform içerisine gömülmüştür [18].

Mahamad ve Hiyama, çeşitli yapay zeka yöntemlerini kullanarak asenkron motorun

rulman hatalarının tespitini gerçekleştirmişler. Bu çalışmanın en önemli amacı yapay zeka yöntemlerinden en uygun yöntemin belirlenmesidir. En yaygın olarak kullanılan yapay zeka yöntemlerinden, İleri beslemeli sinir ağı, Elman ağı, Radyal temelli fonksiyon ağı ve adaptif sinirsel bulanık çıkarım sistemi kullanılmıştır. Rulman hata sinyalleri işlenmeden önce HFD ile zaman ekseninden frekans eksenindeki işaretlere dönüştürülmüş ve yapay zeka tekniklerine uygulanmıştır. Sonuçta yapay zeka teknikleri performans karşılaştırması yapılmıştır [19].

Bir başka çalışmada Aksoy ve Muhurcu, sincap kafesli bir indüksiyon motorun durum tahmini için PI (oransal integral) Elman sinir ağı kullanmışlardır. Önerilen algoritma stator akımları ve rotor açısız hız ölçümlerini kullanır. Bu ölçümler durum gözlemcisi motorun dinamik davranışını öğrenir ve tahmin hatasını en aza indirir. Çalışmada stator akımı ve rotor açısız hız parametrelerini, algoritmanın durum vektör değişkenlerini ve sonuçları kontrol etmek için kullanmışlardır. Tahmin sonuçları önerilen algoritmanın genişletilmiş Kalman filtresinden daha iyi performans gösterdiğini belirtilmektedir [20].

Asfani ve arkadaşları, asenkron motorlarda yeni başlayan hatayı tespit etmek için bir izleme sistemi geliştirmişler. Bu sistem çalışan motorun durmasını önlemek için ilerleyen hatayı tespit etmek için kullanılmıştır. Bu çalışmada asenkron motorun geçici kısa devre hatasını algılamak için yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen sistem motor akım sinyalinin dalgacık dönüşümünü kullanmaktadır. Dalgacık dönüşümü yüksek frekans sinyalinin enerji seviyesini algılama sistemi olarak çalışmaktadır. Çalışmalarında ileri beslemeli sinir ağı, Elman sinir ağı ve radyal temelli fonksiyonlar sinir ağı olmak üzere üç çeşit sinir ağı kullanmışlardır. Çalışma sonucunda Elman sinir ağının testlerinde en basit ve en doğru sistem oluşu belirtilmiştir. Bu çalışmada laboratuvar tabanlı gerçek zamanlı ölçümler yapılmıştır [21].

Seera ve Lim çalışmalarında, gerçek zamanlı motor tespit ve teşhisi için bulanık sinir ağı ve regresyon ağacı yöntemlerini birleştiren bir hibrid model tanımlamaktadırlar. Bu yöntemlerinin üstünlüklerini veri sınıflandırmada ve kural çıkarım problemlerinde bir araya getiren hibrid model kullanmışlardır. Bu çalışmada

indüksiyon motorun eksantrik hatalarını tespit ve teşhis etmek için laboratuvar deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalar gerçek zamanlı motor hata tespit ve teşhisinde bulanık min-maks sinir ağı ve regresyon ağacı yönteminin olumlu sonuçlar gösterdiği belirtilmektedir [22].

Cococcioni ve arkadaşları çalışmalarında rulman hatalarının otomatik olarak tespit ve teşhisi için sınıflama tekniklerine dayalı bir yöntem sunmuşlardır. Deneysel çalışmada, veri seti mekanik cihazların üzerinde bulunan dört adet ivme ölçerden elde edilen verilerden oluşmaktadır. Veri setleri hatasız ve hatalı rulmanları değiştirerek elde edilmiştir. Frekans ekseninde titreşim sinyalleri üzerinde yapılan deneylerde, sınıflandırma hassasiyeti % 99 doğrulukla gerçekleştirmişlerdir. Sınıflandırmada çok katmanlı Perceptron sinir ağı, Radyal temelli fonksiyon sinir ağı olmak üzere iki sinir ağı, ile doğrusal ve kuadrotik diskriminant sınıflandırma yöntemleri kullanılmıştır [23].

Torkaman ve arkadaşları 1997 yılında yüksek frekans darbe enjeksiyon kullanarak anahtarlamalı relüktans makinelerinin eksantriklik hatalarının geniş kapsamlı tespit çalışması gerçekleştirmiştir. Bu çalışma çevrimdışı ve durma modu sırasında ARM'nin eksantriklik hata teşhis için kapsamlı bir yöntem sunmaktadır. Bu yöntemde, hata bilgisi motor sargılarına uygulanan yüksek frekanslı teşhis darbelerinden elde edilen farksal akım olarak elde edilmektedir. Önerilen yöntemin fizibilite değerlendirmesi için, diferansiyel akım ve eksantriklik olayı arasındaki ilişki analitik olarak gösterilmiştir [24].

Normal ve hatalı durumlarında anahtarlamalı relüktans motorun manyetik özellikleri performans tahmini ve motorun doğrulanması için önemlidir. Torkoman ve arkadaşları, bu çalışmada, rotor kayma durumundaki ARM'nin hava boşluğu manyetik alan analizi için yeni bir bakış açısı sunmaktadır. Bu analiz, kesin bir hata tanısı için üç boyutlu sonlu elemanlar metoduna dayanmaktadır. Bu yöntem, uç nokta ve eksenel saçaklanma etkilerini dikkate alınarak, güvenilir ve hassas modeli simüle etmek için kullanılır. Sonlu elemanlar analizi, akı bağlantıları içeren ARM'nin statik manyetik karakteristiğini, terminal endüktansını ve karşı karşıya olmama durumunun değişen dereceleri için farklı rotor pozisyonları altındaki statik tork profilini elde

etmek için gerçekleştirilmiştir. Teşhis indeksi çeşitlerini çalışmak için Fourier analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar tespiti ile ilgili olarak hizalama hatası miktarı ile faydalı bilgiler sunulmuştur [25].

Torkaman ve arkadaşları 2012 yılında, geçici sonlu elemanlar metodu ve deneyler kullanarak anahtarlamalı relüktans motorlar statik, dinamik ve karma eksantriklik hatalar teşhisi gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma anahtarlamalı relüktans motorlarda statik, dinamik ve karışık eksantriklik hatalarının tanısı için yeni bir yöntem sunmaktadır. Bu yöntem motor akımın analizine dayanmaktadır. Bunun teorik olarak gerçekleşmesi ve hata seviyesindeki büyüme, üretilen akım sinyalinin genliğinde bir artışa neden olmasının hata teşhisi ve durum bilgilerini elde etmek için kullanılabilir olduğunu gösterilmiştir [26].

Chen ve Lu 2012 yılında anahtarlamalı relüktans motorlarının sürücü devrelerindeki güç transistörleri için sayısal hata teşhis yöntemi sunmaktadırlar. Bu çalışmada güç transistörleri üzerinde anahtarlamalı relüktans motor sürücüsünde asimetrik köprü güç çevirici dört ana hata türü açıklanmaktadır. Güç dönüştürücüsündeki güç transistörleri için iki on-line hata teşhis yöntemleri önerilmektedir [27].

Torkaman ve arkadaşları 2013 yılında anahtarlamalı relüktans makineleri eksantriklik hata takip ve teşhis için stator gerilimi bağlı algılayıcısız yöntem kullanmışlardır. Bu çalışmada, çevrimdışı ve duraklama modu sırasında anahtarlamalı relüktans makinalarda eksantriklik hata teşhis için kapsamlı bir yöntem sunmuştur. Bu algılayıcısız yöntem olay yer, yön ve ARM de eksantriklik hata şiddeti tespit edebilmektedir. İlk olarak, yöntem teorisi sunulmuştur ve daha sonra arka plan formülasyonu araştırılmış ve tartışılmıştır [28].

Bir başka çalışmada Hang, ARM sürücü sisteminin güç dönüştürücüsünün hataları için, bir faz kısa devre hatası ve bir faz açık devre hataları çalışılmıştır. Bu iki durumun ortak özelliği faz akımı ve çıkış torkunun beklenmedik sinyallere sahip olmasıdır. Dalgacık dönüşümünün en önemli noktası sinyalin ani değişim noktası için uygun olmasıdır. Benzetim modeli Matlab simulink ortamında kurulmuştur, dalgacık dönüşümü maksimum metoduna göre iki hata durumu teşhis edilmiştir.

Benzetim sonuçları dalgacık dönüşümünün güç dönüştürücülerinin hata teşhisinde etkin şekilde başarılı olduğunu ortaya koymuştur [29].

Gameiro ve Cardoso 2012 yılında Anahtarlama relüktans motorlarının sürücülerindeki güç dönüştürücü hata tespiti için yeni bir yöntem sunmaktadırlar. Bu çalışmada güç kaynağı akım analizine dayalı, anahtarlama relüktans motor sürücülerine uygulanan yeni bir hata teşhis tekniği sunar. Doğru akım gerilim kaynağının akımının ölçülen genliği normal çalışma koşullarında belirlenerek, beklenen genlik farklı olduğunda hata tespit edilir. Asimetrik bir köprü çeviricide kullanılan faz akımları, genlik ve tüm güç anahtarlarının kontrol komutları hakkında kolayca bilgiler edinmek için, mevcut güç kaynağı akımı tahmin için izin verir. Dönüştürücü güç anahtarları açık ve kısa devre hatası durumları analiz edilir. Önerilen teknik ile bu hata durumları tespit erken edebilir ve aynı zamanda etkilenen motor fazı belirlenebilir. Hemen hemen tüm durumlarda, hatalı elemanı tanımlanmaktadır [30].

Anahtarlama relüktans motor için sinirsel tabanlı kontrol ve hata teşhisi gerçekleştirilmiştir. YSA tabanlı optimum hız kontrolü sağlayan denetleyici tasarlanmıştır. Bu denetleyicide bulanık mantık ve geleneksel oransal integral kontrol ile performanslarını karşılaştırılmıştır. Geri yayımlı (Back Propagation, BP) ve Öz örgütlemeli harita sinir ağları ARM'de hataları tespit etmek için kullanılmıştır. Benzetim sonucu anahtarlama relüktans motor için önerilen kontrol ve hata teşhis programının yüksek performans gösterdiği belirtilmektedir [31].

Bir başka çalışmada 6/4 anahtarlama relüktans motor için bulanık tabanlı kontrol ve hata tespit işlemi gerçekleştirilmiştir. Bulanık tabanlı hata teşhisi ve kontrol sisteminin öncelikle benzetimini yaparak sistem gerçekleştirilmiştir [32]. İki farklı ARM'nin farklı stator hataları oluştuğunda motorların hata toleransları karşılaştırılmıştır [33].

Bu tez çalışmasında ARM hataları YSA'lar ile gerçek zamanlı olarak tespit ve teşhis edilmektedir. ARM'lerde karşılaşılan hatalar oluşmaya başladığı anda tespit edilmekte ve hatanın nerede oluştuğu bildirilmektedir. ARM ye ait parametreler bir veri alış veriş kartı ile gerçek zamanlı olarak bilgisayar ortamına alınmaktadır. Hata

tespit ve teşhis işlemi için grafiksel kullanıcı arayüzü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu arayüz ile hata tespit ve teşhis işlemi için yapay sinir ağı seçilerek gerçek zamanlı olarak ARM hataları belirlenmektedir. Bu arayüz yazılımında Kohonen sinir ağı, ileri beslemeli sinir ağı ve Elman sinir ağı kullanarak ARM hataları tespit ve teşhis edilebilmektedir. ARM’de karşılaşılan hatalardan bir fazlı açık devre, iki fazlı açık devre, bir fazlı kısa devre, bir faz endüktansı değişmiş sargı hatası, aşırı yük, besleme hatası ve kilitli rotor hatalarının tespit ve teşhis işlemi gerçekleştirilmektedir. ARM’lerde hata tespit ve teşhis işlemine en uygun yapay sinir ağı belirlenmiştir.

Bu çalışmanın birinci bölümünde, motor hata tespit ve teşhisinde yapılmış çalışmalara yer verilmektedir. ikinci bölümünde ARM’ler hakkında bilgi verilmektedir. Üçüncü bölümünde, ARM hatalarını tespit ve teşhis etmek için kullanılan YSA’lar ve bu ağların eğitimleri verilmektedir. Dördüncü bölümde, ARM hatalarının tespit ve teşhis işleminin gerçekleştirilen deney düzeneği ve bu düzenekte kullanılan materyaller verilmektedir. ARM’nin PMD (Programlanabilir Mantık Denetleyicisi) kullanarak denetimi anlatılmaktadır. Hata tespit ve teşhis işlemlerinde kullanılacak olan parametreler belirlenmektedir. Matlab ortamına veri aktarılması ve YSA’lara veri seti oluşturmak için deneysel ölçüm sonuçları verilmektedir. Beşinci bölümde YSA’ları kullanarak gerçek zamanlı hata tespit ve teşhisi anlatılmaktadır. Altıncı bölümde sonuç ve öneriler sunulmaktadır.

BÖLÜM 2

ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLAR

ARM'ler adını rotor konumuna göre hava aralığının değişmesi ve dolayısıyla relüktansının değişmesinden dolayı değişken relüktanslı motorlardan almaktadır. Doğrudan bir kaynağa bağlı olarak çalışmadıkları için bu motorlarda bir anahtarlama devresinin kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Hem değişken relüktanslı hem de anahtarlama devresini birlikte ifade etmek için ARM adı kullanılmaktadır [34].

ARM'lerin geçmişi 1942 yılına kadar geri gitmektedir. Anahtarlama elemanlarının ucuz ve yüksek güçlü olmasının getirdiği avantajlar bu motorun yeniden keşfedilmesini sağlamıştır [35]. ARM yapı olarak çok basit olmasına rağmen denetimi karmaşıktır. Motorun moment üretebilmesi için faz sargılarının rotor konumuna göre tetiklenmesi gerekmektedir. Günümüzde yaygın ve düşük maliyetli mikrodenetleyici ve güç elektroniği elemanlarının elde edilebilmesi, ARM'lerin diğer DA ve AA motorları ile rekabet edebilmesini sağlamaktadır.

2.1. ARM'İN YAPISI VE ÇALIŞMASI

ARM yapı olarak diğer motor türlerinden farklıdır. Hem statoru hem de rotoru çıkık kutuplu yapıya sahiptir. Stator ve rotor paketleri değişik özelliklerde olan silisyumlu saçlardan yapılır. Demir kayıplarını azaltmak için, stator ve rotor çekirdekleri bir tarafı yalıtılmış belirli kalınlıktaki (0,3-0,5 mm gibi) lamine saçların paketlenmesi ile oluşturulur. Stator sargıları, stator kutupları etrafına manyetik alan şiddetinden daha fazla faydalanmak üzere genelde ince telli sarımlardan oluşan sarımlar şeklinde sarılır. Sargılar, aynı ekseninde, karşılıklı kutuplarda ve aynı yönde sarılmış seri bağlı sargılardır. Bundan dolayı statorun her bir zıt kutup çifti bir fazı oluşturur [36].

ARM'ler bir fazdan başlayıp değişik faz sayılarında üretilebilirler. Ancak ticari

amaçla yaygın olarak 3 ve 4 fazlı ARM'ler üretilmektedir. Bir fazlı ARM'lerin yapısı çok basittir, sürücü devresi ile motor arasında en az bağlantısı olan makinadır. Çok yüksek hızlı uygulamalar için cazip olmasına karşın bu motorlar kendiliğinden yol alamazlar, ayrıca girdap kayıpları fazladır. Bu tip motorlar 2/2 ve 4/4 kutuplu da yapılabilmektedir. Fakat bu durumda ürettikleri moment çok dalgalıdır. İki fazlı ARM'lerde yol alma problemi rotor kutuplarındaki asimetrik bir yapı ile aşılmıştır. Fakat momentteki dalgalanma hala yüksektir. Üç fazlı ARM'ler genel olarak 6/4 ve 12/8 kutuplu yapılıdır. Bunlar yüksek yol alma momentine sahiptir. Bu motorlarda momentteki dalgalanma azalmakla beraber devam etmektedir. Dört fazlı ARM'ler 8/6 kutuplu ve beş fazlı ARM'ler 10/8 kutuplu yapılıdır, moment dalgalanmasını azaltmak için önerilen tipteki motorlardır. Ancak sürücü devresi ile makine arasındaki bağlantı sayısı, fazla güç elektroniği elemanı kullanıldığı için artmaktadır.

ARM'lerin dönebilmesi için stator ve rotor kutup sayılarının farklı olması gerekmektedir. ARM'lerde stator kutup sayısı, rotor kutup sayısına göre büyük yapılmaktadır. Bunun nedeni ise yüksek hız yerine yüksek moment isteğidir. 8/6 bir ARM'nin iç yapısı Şekil 2.1'de görülmektedir.

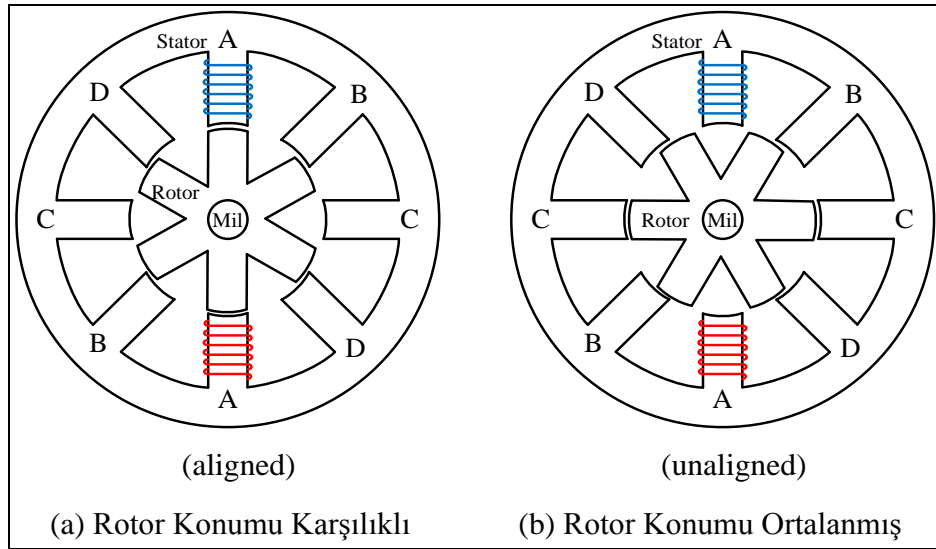


Şekil 2.1. 8/6 kutuplu bir ARM'nin iç yapısı.

Motor dört fazlıdır ve her fazda karşılıklı stator kutuplarına sarılmış, akıları birbirini destekleyecek yönde bağlanmış iki bobin bulunmaktadır. Bu bağlantı seri veya

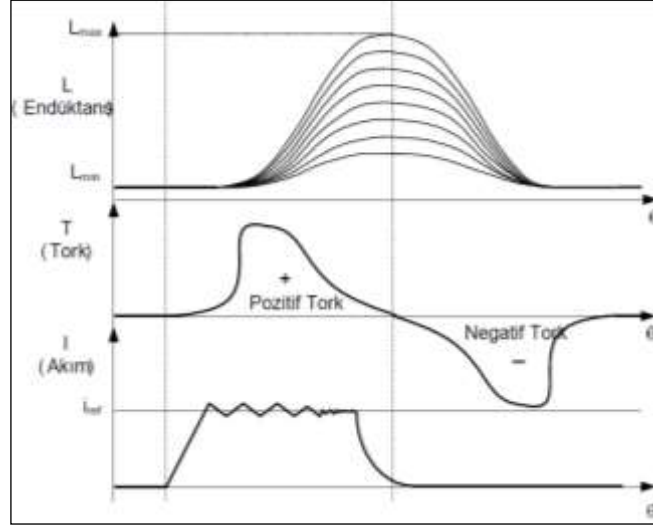
paralel olarak yapılabilmektedir. ARM modelinde endüktansın değeri rotor konumuna göre değişmektedir. Şekil 2.2 (a)'da A fazı için stator ve rotor yüz yüze konumdadır ve bu durumda endüktans en yüksek değerindedir. Şekil 2.2 (b)'de ise stator ve rotor kutupların bir birini hiç görmemesi durumunda o faza ait endüktans en küçük değerdedir [36].

ARM'de stator fazlarının sıralı olarak enerjilendirilmesi ile her iki yönde sabit ortalama tork üretmek mümkün olmaktadır. Motorun stator yapısı simetrik çıkıntılara sahip olduğundan ve devrenin mıknatıslılığı manyetik akının yönünden bağımsız olduğundan üretilen tork stator kutbundaki akımın yönünden bağımsız olmaktadır.



Şekil 2.2. ARM'nin rotor konumları.

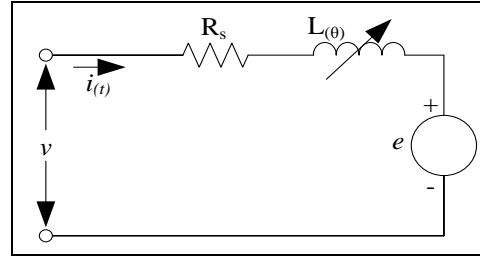
ARM'nin davranışını manyetik akı, akım ve rotor pozisyonu eğriileri ile açıklamak mümkündür. Tork, endüktansın maksimum olduğu noktaya kadar rotörü hareket ettirir. Nüvede artık mıknatıslılık yok ise akımın yönü önemli değildir. Rotorun yönü daima en yakın hizalı konuma doğru olur. Dolayısı ile pozitif tork sadece rotor ayrık konum ile ileri yönde bir sonraki hizalı konum arasında iken üretilir. Pozitif tork sadece yükselen endüktans bölgesinde üretilir. ARM'de bir faz için, endüktans değişimi, üretilen pozitif, negatif tork ve faz sargısından geçen akım grafiği Şekil 2.3'de verilmektedir [37].



Şekil 2.3. Bir faz için endüktans, tork ve akım eğrileri.

2.2. ARM'NİN EŞDEĞER DEVRE MODELİ

ARM için temel eşdeğer devre, fazlar arasındaki ortak endüktans ihmal edilerek elde edilmektedir. Bir faza uygulanan gerilim; sargı direncine düşen gerilim ile sargı akısının değişiminin toplamına eşittir [38]. Gerilim denklemi ve indüklenen elektromotor kuvvet ifadelerinden elde edilen ARM'nin bir faz eşdeğer devresi Şekil 2.4'te verilmektedir. Bu devrede faz gerilimi Eşitlik 2.1 ile hesaplanmaktadır.



Şekil 2.4. ARM'nin bir faz eşdeğer devresi.

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

Eşitlik (2.1)'de v faz gerilimini (V), R_s sargı direncini (Ω), i sargı akımını (A), θ rotor konumunu (rad), $L_{(\theta, i)}$ rotor konumu ve faz akımına bağlı faz endüktansını (H), φ faz manyetik akısı, θ rotor konumu referans noktasına göre açısıdır. Bir faz

manyetik akısı φ Eşitlik (2.2)'de, faz gerilim değeri Eşitlik (2.3) ve Eşitlik (2.4)'te verilmektedir.

$$\varphi = L_{(\theta,i)} i \quad (2.2)$$

$$v = R_s i + \frac{d\{L_{(\theta,i)} i\}}{dt} = R_s i + L_{(\theta,i)} \frac{di}{dt} + \frac{id_\theta}{dt} \frac{dL_{(\theta,i)}}{d\theta} \quad (2.3)$$

$$v = R_s i + L_{(\theta,i)} \frac{di}{dt} + \frac{dL_{(\theta,i)}}{d\theta} \omega_m i \quad (2.4)$$

Eşitlik (2.4)'deki $R_s i$ omik gerilim düşümünü, $L_{(\theta,i)} \frac{di}{dt}$ endüktif gerilim düşümünü, $\frac{dL_{(\theta,i)}}{d\theta} \omega_m i$ indüklenen elektromotor kuvveti temsil etmektedir. Bir faza ait gerilim eşitliği kullanılarak dört fazlı bir ARM'nin faz gerilimleri Eşitlik 2.5 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ v_d \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a \\ L_b \\ L_c \\ L_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{di_b}{dt} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{di_c}{dt} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{di_d}{dt} \end{bmatrix} + \omega_m \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dL_a}{d\theta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{dL_b}{d\theta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{dL_c}{d\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{dL_d}{d\theta} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Eşitlik 2.5'de ω_m açısal hızını (rad/s) ifade etmektedir. Sargı akısı, gerilim denkleminde yerine konulduğunda ve denklem akım ile çarpıldığında ani giriş gücü Eşitlik (2.6)'deki gibi bulunur.

$$p_i = v_i = R_s i^2 + i^2 \frac{dL_{(\theta,i)}}{dt} + L_{(\theta,i)} i \frac{di}{dt} \quad (2.6)$$

$$\frac{di}{dt} \left(\frac{1}{2} L_{(\theta,i)} i^2 \right) = L_{(\theta,i)} i \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL_{(\theta,i)}}{dt} \quad (2.7)$$

Ani giriş gücü Eşitlik (2.7) yerine konulursa, ani giriş gücü p_i Eşitlik (2.8)'deki gibi

bulunur.

$$p_i = v_i = R_s i^2 + \frac{di}{dt} \left(\frac{1}{2} L_{(\theta,i)} i^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL_{(\theta,i)}}{dt} \quad (2.8)$$

Eşitlik (2.8)'deki $R_s i^2$ sargı omik kayıplarını, $\frac{di}{dt} \left(\frac{1}{2} L_{(\theta,i)} i^2 \right)$ alan enerjisindeki değişim oranını, $\frac{1}{2} i^2 \frac{dL_{(\theta,i)}}{dt}$ hava aralığı gücü p_a ifade etmektedir.

Bir faza ait giriş gücü eşitliği kullanılarak dört fazlı bir ARM'nin faz giriş güçleri Eşitlik (2.9) kullanılarak hesaplanabilir.

$$\begin{bmatrix} P_{ia} \\ P_{ib} \\ P_{ic} \\ P_{id} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a^2 \\ i_b^2 \\ i_c^2 \\ i_d^2 \end{bmatrix} + \frac{di}{dt} \left(\frac{1}{2} \begin{bmatrix} L_a(\theta, i_a) \\ L_b(\theta, i_b) \\ L_c(\theta, i_c) \\ L_d(\theta, i_d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & i_b^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & i_c^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & i_d^2 \end{bmatrix} \right) + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_a^2 \\ i_b^2 \\ i_c^2 \\ i_d^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dL_a}{dt} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{dL_b}{dt} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{dL_c}{dt} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{dL_d}{dt} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Hava aralığı gücünde yer alan rotor konumu ve hız terimlerindeki t yerine Eşitlik (2.10) kullanılmaktadır.

$$t = \frac{\theta}{\omega_m} \quad (2.10)$$

Hava aralığı gücü Eşitlik 2.11'deki gibi elde edilmektedir.

$$p_a = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL_{(\theta,i)}}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL_{(\theta,i)}}{d\theta} \frac{d\theta}{dt_s} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL_{(\theta,i)}}{d\theta} \omega_m \quad (2.11)$$

Hava aralığı gücü elektromanyetik moment T_e ile rotor hızının çarpımına eşittir (Eşitlik 2.12).

$$p_a = \omega_m T_e \quad (2.12)$$

$$T_e = \frac{p_a}{\omega_m} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta,i)}{d\theta} \omega_m \quad (2.13)$$

Motor momenti Eşitlik (4.14) ile hesaplanmaktadır.

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta,i)}{d\theta} \quad (2.14)$$

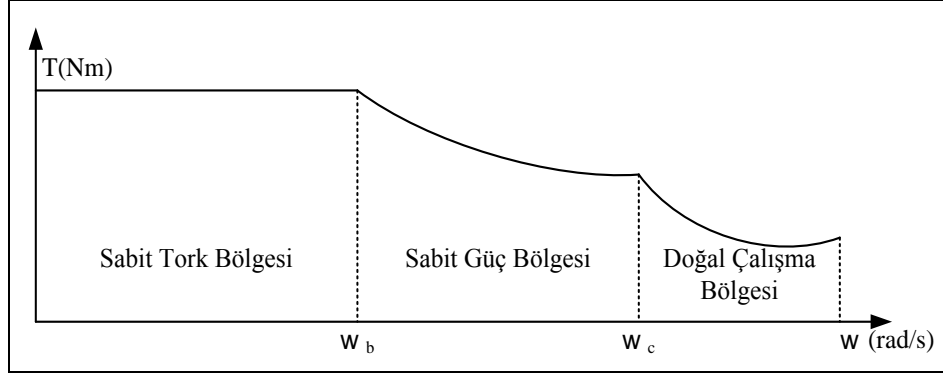
Bir faza ait moment eşitliği kullanılarak dört fazlı bir ARM'nin faz momentleri Eşitlik 2.15 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\begin{bmatrix} T_{ea} \\ T_{eb} \\ T_{ec} \\ T_{ed} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_a^2 \\ i_b^2 \\ i_c^2 \\ i_d^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dL_a(\theta,i)}{d\theta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{dL_b(\theta,i)}{d\theta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{dL_c(\theta,i)}{d\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{dL_d(\theta,i)}{d\theta} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

2.3. ARM'İN TORK HIZ KARAKTERİSTİĞİ

ARM'lerin tork-hız eğrilerinin üretici firma tarafından belirlenmiştir. Motora uygulanan denetim şekline göre tork-hız eğrileri oldukça geniş bir yelpazeye sahiptir. Bir ARM için çalışma şartları Şekil 2.5'de görüldüğü gibi motor hızına göre sabit tork bölgesi, sabit güç bölgesi ve doğal çalışma bölgesi olarak üç farklı bölgeye ayrılmaktadır.

Sabit Tork Bölgesi, taban hız ω_b 'nin altındaki hızlar için, dönüştürücü tetikleme açısı sabit bir değerde tutulmakta ve böylece motor torku en az dalgalanma ile en büyük değere çıkarılmaktadır. Motor faz akımları ayarlanarak motor ortalama torku denetlenmektedir. Motor stator fazları sıralı bir şekilde enerjilendirilmekte ve bir anda sadece bir faz aktif olmaktadır. İki fazın da geçici olarak aktif olduğu komütasyon periyotları bunun dışındadır. Tork denetimli çalışmada, aktif fazdaki akım bir akım regülatörü tarafından kontrol edilmektedir.



Şekil 2.5. ARM'nin tork-hız karakteristiği.

Sabit Güç Bölgesi, taban hız ω_b 'nin üzerindeki hızlar için akım regülatörü etkili olmamaktadır. Çünkü bu çalışma bölgesinde zıt emk yükselmekte ve zorlama gerilimi sabit akım sağlamak için yeterli olmamaktadır. Dönüştürücü tetikleme açısı, hızın bir fonksiyonu olarak artırılarak, motor hızı artırılabilen ve böylece tork değeri sabit hale getirilebilmektedir.

Doğal Çalışma Bölgesi, motor hızı ω_c hızından büyük olduğu zaman, dönüştürücü tetikleme açısı en büyük değerine getirilebilmektedir. ARM böylece doğal tork-hız karakteristiği ile çalışabilmektedir [37].

2.4. ARM'LERDE KULLANILAN DÖNÜŞTÜRÜCÜ DEVRE ÇEŞİTLERİ

ARM için kullanılan dönüştürücüler, moment tek yönlü akım ile üretildiği için AA motorlarının beslediği dönüştürücülere göre daha basit yapıdadırlar [39].

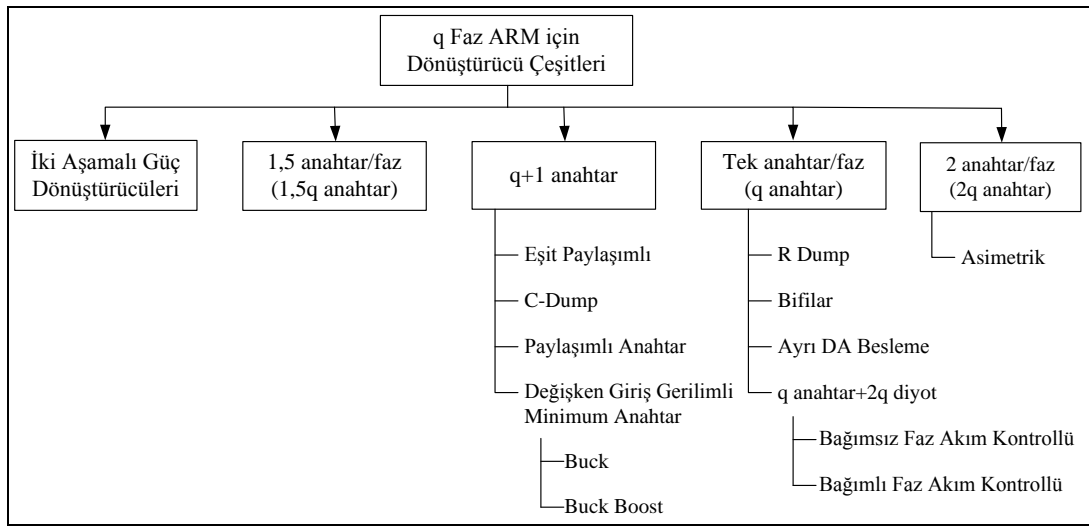
ARM'lerde kullanılacak dönüştürücüler iki temel özelliği karşılamalıdır.

- ARM'de her faz diğerinden bağımsız olarak ilettime geçmelidir.
- ARM motor olarak çalışırken, generatör çalışma bölgesine geçmemelidir.

Bunların yanı sıra ARM'nin toplam performansını arttırmak için kullanılacak olan dönüştürücü ek olarak aşağıdaki özellikleri de sağlamalıdır.

- Fazlardan biri tamamen kesime gitmeden diğer faz ilettime geçirilmeli,
- Dönüştürücü, kesime götürülen faz sargısında depo edilen enerjiyi kaynağa ya da ilettime geçirilecek bir sonraki faza aktarabilmeli,
- Komütasyon süresini kısa tutabilmeli,
- Kısıyıcı olarak çalışma esnasında anahtarlama serbest dolaşım sağlayabilmelidir.

ARM'nin dönüştürücü çeşitleri q faz sayısına göre Şekil 2.6'da verilmektedir.

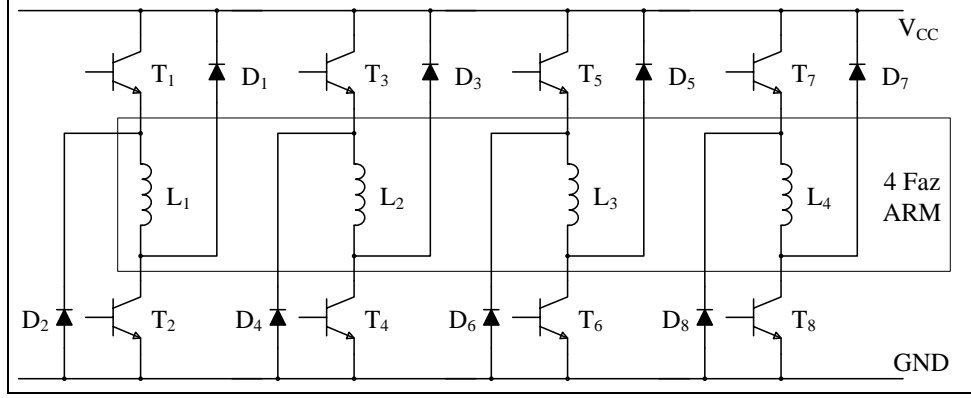


Şekil 2.6. ARM dönüştürücü çeşitleri.

Asimetrik köprü dönüştürücü motor sargı akımları birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilen bir dönüştürücüdür. Her fazda akımı hem ilettime hem de kesime sokmak için, sargı uçlarından her iki polariteye ters bağlanmış diyot mevcuttur (Şekil 2.7). V_{CC} kaynak gerilimini fazlara tamamen uygulama özelliğine sahiptir [35]. ARM dönüştürücü devrelerinde BJT, MOSFET ve IGBT gibi aç kapa kontrol yapılabilen yarıiletken güç anahtarları kullanılmaktadır.

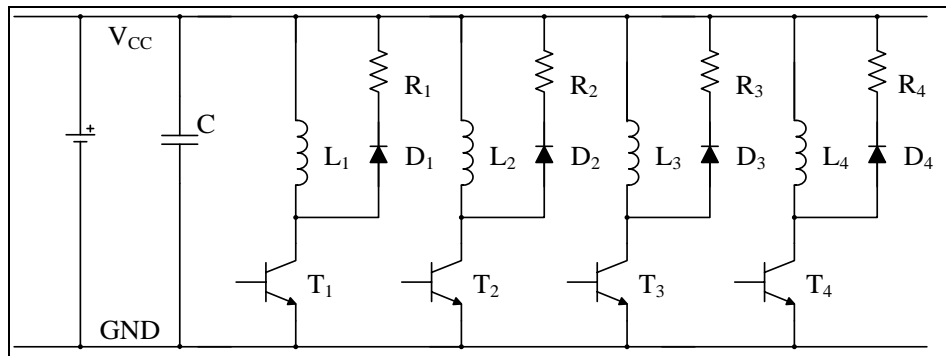
Asimetrik köprü dönüştürücü modeli 6-darbeleri geleneksel AA dönüştürücüye benzerdir. Farkı, motor sargılarının faz anahtarları ile seri olmasıdır. Üstteki ve alttaki anahtarlar birlikte ilettime ve kesime giderler ve pratikte AA dönüştürücü sürücülerinin eşdeğeri oranındaki akım ve gerilime sahiptirler. Kullanılan ek anahtarlar ile kesim süresince depolanan enerji güç kaynağına geri gönderilir. Kesim

süresi böylece düşürülebilir. Ancak bu dönüştürücüdeki faz başına anahtar oranının yüksek olmasından dolayı yüksek maliyetlidir [39].



Şekil 2.7. Asimetrik köprü dönüştürücü.

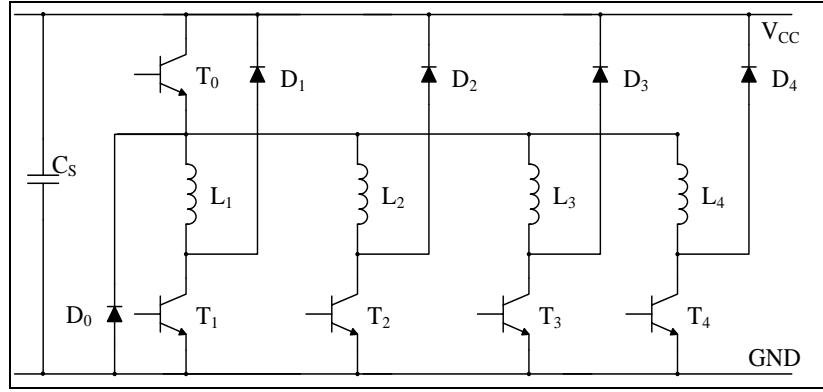
Besleme devreleri içinde en ekonomik olan söndürme dirençli dönüştürücü devresi Şekil 2.8’de verilmektedir. Fazlar bağımsız olduğu için fazlara ayrı ayrı dirençler bağlamakla birlikte tek bir direnç üzerinden de bu olay gerçekleştirilebilir. Bu devrede R direncinin değeri oldukça önemlidir. Direnç küçük seçilirse, hız yüksek iken kuyruk akımının uzun olmasına ve dolayısıyla düzensiz moment üretimine neden olup verimi de düşürür. Eğer direnç büyük seçilirse, komutasyondaki faza bağlı anahtarda yarı iletken elemanlar için tehlikeli büyük değerli gerilim sıçramaları olabilir. Bu devre genelde düşük maliyet ve performans istenen uygulamalar için uygun olup kontrolü basittir [36].



Şekil 2.8. Söndürme dirençli dönüştürücü.

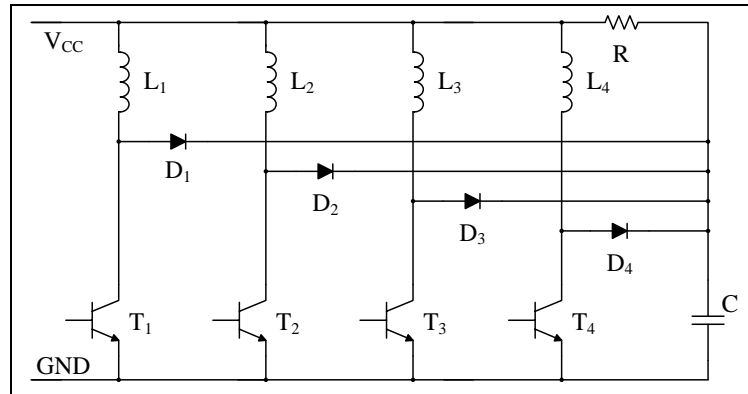
Miller besleme devresinde minimum anahtar ihtiyacından sadece bir adet fazla

anahtara gereksinim duyulur. Miller besleme devre şeması Şekil 2.9'da verilmektedir. Dört fazlı ARM için sadece beş anahtar ve beş diyot gereklidir. Fakat ana anahtar (T_1) ve ana diyotun (D_1) gücünün faz anahtarı veya faz diyotlarından çok daha yüksek olması gerektiğinden dolayı bu anahtar ve diyot pahalıdır. Faz akımları tek güç anahtarı ile denetlenebileceği gibi iki güç anahtarı ile de denetlenebilir. Miller devresinin kötü yanı, fazlar birbirinden tamamen bağımsız değildir [36].



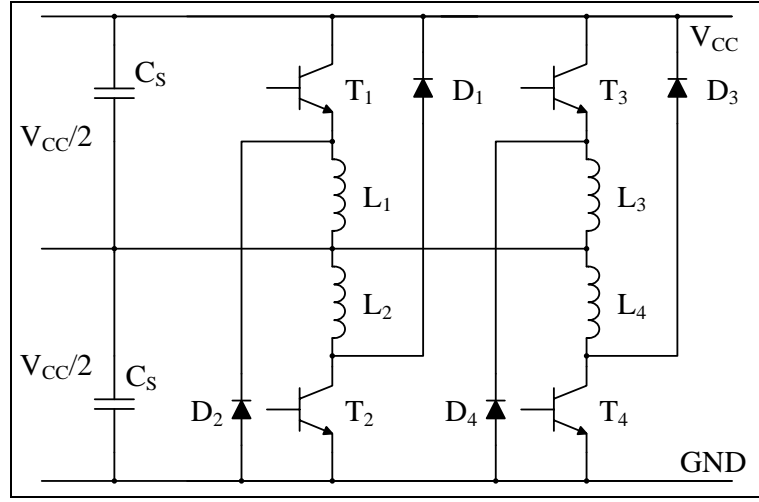
Şekil 2.9. Ortak anahtarlı dönüştürücü.

Sargı akımları birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilen Şekil 2.10'daki RC dönüştürücü devresinde anahtar ihtiyacı en az sayıdadır. Anahtarlar, ortak noktaya sahip oldukları için kolayca sürülebilirler. Kaynak geriliminin iki katı oranında bir gerilime sahip olan anahtarların açılması esnasında kondansatöre boşaltılan enerji sayesinde sargı akımı hemen düşürülebilir. Böylece negatif döndürme momenti oluşması önlenir. Bu devrede kondansatöre depolanan enerji R direncinde harcanır. Bu ise verimi düşürür. Fakat dönüştürücü ucuz ve basit yapıya sahiptir [36].



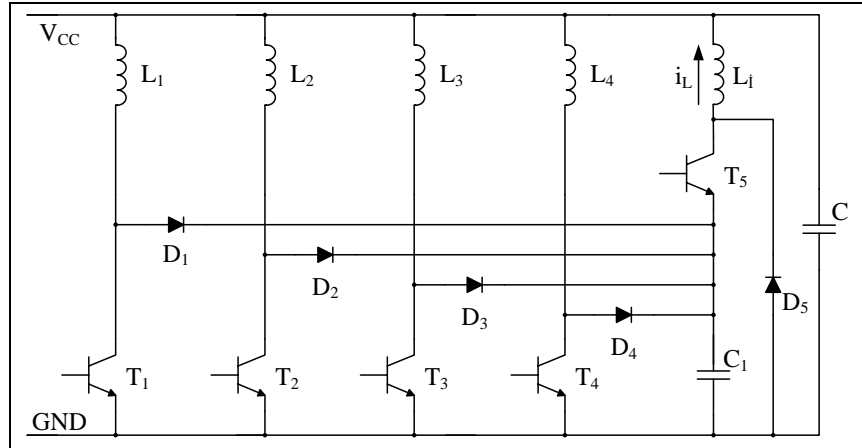
Şekil 2.10. RC dönüştürücü.

Ayrık beslemeli dönüştürücü en az anahtar gerektiren denetim sistemidir ve Şekil 2.11’de görülmektedir. Ancak, bu durumda faz sayısı çift olmalıdır. Dönüştürücü herhangi bir fazdaki hata veya dengesizliğe izin vermez. Herhangi bir fazdaki hata üst ve alt seviyelerin dengesini bozar ve kondansatör grubunda gerilim yükselmesine neden olur. Bu yüzden bu devre fazlar arası bağımsızlığa sahiptir. Sadece $V_{CC}/2$ kullanıldığından dolayı, DA kaynak gerilimi kullanımı zayıftır [39].



Şekil 2.11. Ayrık beslemeli dönüştürücü.

Kondansatör-boşalmalı (C-Dump) devre şeması Şekil 2.12’de verilmektedir. Bu devredeki anahtar ihtiyacı faz sayısından bir fazladır. Besleme devresinde, kesimdeki fazın enerjisini harcamak için bir kondansatör kullanılır ve bu devre kondansatörü boşaltmak için düşürücü ilkelı kıyıcı gibi çalışır. Bu da kayıplara neden olur.



Şekil 2.12. Kondansatör boşalmalı dönüştürücü.

Kondansatör-boşalmalı devrede sargı akımları bağımsız şekilde hem iletim hem de kesim süresi boyunca kontrol edilebilir. Kesimdeki fazlarda toplanan enerji boşalma kondansatörüne aktarılır. Geri alınan enerji, makul değerde kondansatör gerilimi içeren yardımcı bir kıyıcı kullanarak güç kaynağına geri aktarılır. Bu durum dönüştürücü verimini artırır ve kesim süresini azaltır. Fakat, kondansatör gerilimi yüksek bir değerde tutulmalıdır. Bu besleme devreleri yüksek verimli çalışırlar. Ancak birkaç olumsuzluğa sahiptirler. Bunlar; anahtarların yüksek gerilim oranları, ek anahtar ve sönümlenme kondansatörüdür [35].

2.5. ARM'İN ÜSTÜNLÜKLERİ VE SAKINCALARI

ARM'lerin motorun çalışması bakımından üstünlükleri ve sakıncaları aşağıda verilmektedir [36].

Üstünlükleri;

- Mekaniksel olarak ARM çok basit bir yapıya sahiptir. Rotorda mıknatıs veya iletken yoktur. Sadece statorunda sargı mevcuttur. Sarılması son derece kolaydır, sargılar önceden bir kalıp üzerinde tasarlanan sarım sayısında sarılarak stator kutuplarına yerleştirilebilir. Bütün bu özelliklerden dolayı üretim maliyeti oldukça düşüktür.
- ARM'nin rotorunda iletken bulunmamasının anlamı rotor bakır kayıplarının olmaması ve bundan dolayı rotor sıcaklığının diğer motorlara göre düşük olmasıdır. Motorlarda özellikle rotordaki sıcaklığı ortadan kaldırmak güç olduğundan dolayı bu iyi bir özelliktir. Ayrıca rotorda iletkenin yanı sıra mıknatıs da olmadığından yüksek hızlara çıkmak mümkündür.
- Hız kontrollü uygulamalarda özellikle başlatma ve durdurma anlarında referans hız çok değişir. Bu anlarda referans hızları yakalamak için düşük atalet çok önemlidir. Verim açısından hızlanma ve büyük atalet her zaman kötü bir durumdur. Aynı güç aralığındaki ARM'lerin rotoru diğer elektrik makinalarıyla karşılaştırıldığında düşük bir ataletle sahiptirler.
- ARM fırçasız bir makinadır. Fırçalı tip motorlarla karşılaştırıldığı zaman bakım gereksinimlerinin çok düşük olduğu söylenebilir.

- Motorun moment üretmesinde etkili olan sargılar rotora paralel olan sargılardır. Sargıların uç kısımları ile sargılar arası bağlantıların geliştirilen moment üzerinde düşük bir etkisi mevcuttur. Ayrıca iletkenin boyunun artmasından dolayı da kayıplar da artmaktadır. Bu sebeplerden dolayı da verim düşmektedir. Ancak ARM diğer motorlara göre kısa sargı uçlarına sahiptir. Sargılarda çapraz bağlantı ve toplam sargı boyunun da kısa olmasından dolayı sargı ucu kayıpları düşüktür.
- Şu ana kadar diğer faktörlere de bağlı olarak tam bir genelleme yapılmasa da ARM'lerin verimlerinin diğer tipteki motorlara göre yüksek olduğu eğilimi mevcuttur. Genel olarak karşılaştırmalar asenkron motor üzerinden yapılmıştır.
- ARM'de fazlar arasında herhangi bir bağlantı olmadığından dolayı fazlar birbirinden bağımsız olarak çalışır. Bu nedenle motordaki fazlardan herhangi birinde hata meydana gelse bile, motor çalışmaya devam eder.

Sakıncaları;

- ARM'nin hem statoru hem de rotoru çıkıntılıdır. Kare dalga şeklindeki uyarım ile yüksek gürültü, titreşimler ve moment dalgalanması meydana gelmektedir.
- Çıkıntılı kutuplardan dolayı yüksek hızlarda rüzgâr kayıpları oluşur. Özellikle 3000 dev/dk'nın üzerindeki hızlarda rüzgâr kayıplarının etkisi dikkate alınır.
- ARM'de rotorun başlangıç konumunun tespit edilmesinden dolayı yol alma problemi vardır. Genelde ilk başlatma için rampa frekanslı açık çevrimli yöntem kullanılır.
- ARM'lerde verim de dikkate alınarak, elektrik enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülür. Bunun için komutasyon açısının rotor konumuyla senkronize olması gerekmektedir. Bu nedenle denetleyici rotor konum bilgisine gerek duymaktadır. Bu bilgi ya konum algılayıcılarından ya da son zamanlarda üzerinde çalışmaların yoğunlaştığı algılayıcısız metotla elde edilebilir.
- ARM direk bir AA veya DA şebekeye bağlanıp çalıştırılmaz. ARM'yi çalıştırmak için bir sürücü devresi gerekmektedir. Bu durum motorların kullanım alanlarına göre karşılaştırıldığı zaman bazı kullanım alanlarında (özellikle denetleyicinin yapılmadığı alanlar) ve bazı tip motorlara (asenكرون motor vb.) göre ek maliyetten dolayı bir olumsuzluk getirir.

- Deneyim her alanda olduğu gibi elektrik makinalarının tasarımında da önemli bir etkidir. ARM’yi tasarım açısından asenkron motorlarıyla karşılaştırdığımız zaman asenkron motorlarının tasarımı adeta ezberlenmiş gibi bilinmektedir. Ancak ARM’nin tasarımı farklı olduğu için asenkron makinanın üzerindeki tecrübelerden kısmen yararlanılabilmektedir. ARM tasarımının karmaşıklığının nedenleri arasında örtüşmeyen konumdaki düzensiz akı dağılımları, doyum, unipolar akı yoğunluğu dalga formları, sürücü devre topolojileri ve kontrol yöntemleri sıralanabilir.

ARM ile endüstride kullanılan asenkron, senkron, fırçalı doğru akım, fırçasız doğru akım ve adım motorlarının karşılaştırılması Çizelge 2.2’de verilmektedir.

Çizelge 2.1. ARM’nin diğer motorlarla karşılaştırılması.

	Sincap Kafesli Asenkron Motor	Senkron Motor	Doğru Akım Motoru	Fırçasız DA Motoru	Adım Motoru	ARM
Besleme Şekli	Alternatif gerilim	Alternatif gerilim	Doğru gerilim	Doğru gerilim	Doğru gerilim	Doğru gerilim
Uyarma Durumu	Uyarma gerekmez	Doğru gerilimle uyarılır	Doğru gerilimle uyarılır	Uyarma gerekmez	Uyarma gerekmez	Uyarma gerekmez
Sürücü	Değişken hız uygulamasında gerekir	Değişken hız uygulamasında gerekir	Değişken hız uygulamasında gerekir	Daima gerekir	Daima gerekir	Daima gerekir
İşletme ve Bakım Masrafı	Yok denebilir	Kısmen bakım gerekir	Bakım gerekir	Yok denebilir	Yok denebilir	Yok denebilir
Motor Maliyeti	Ucuz	Pahalı	Pahalı	Orta	Orta	Ucuz
Sürücü Maliyeti	Pahalı	Pahalı	Orta	Orta	Orta	Orta
Verim	iyi	iyi	Orta	Orta	Orta	iyi
Çalışma Ortamı	Her ortamda çalışır	Her ortamda çalışır	Patlayıcı ortamda kullanılmaz	Her ortamda çalışır	Her ortamda çalışır	Her ortamda çalışır
Kararlılık	İyi	İyi	İyi	İyi	İyi	İyi

ARM’nin doğru akımla çalışması, işletme ve bakım masrafının çok az olması, her

ortamda çalışması, yüksek verimli ve kararlı olması diğer motorlara göre en önemli üstünlükleridir. Daima sürücüye ihtiyaç duyması ve sürücü maliyetli olması en önemli sakıncası olarak belirtilmektedir.

2.6. ARM'İN ENDÜSTRİDEKİ KULLANIM ALANLARI

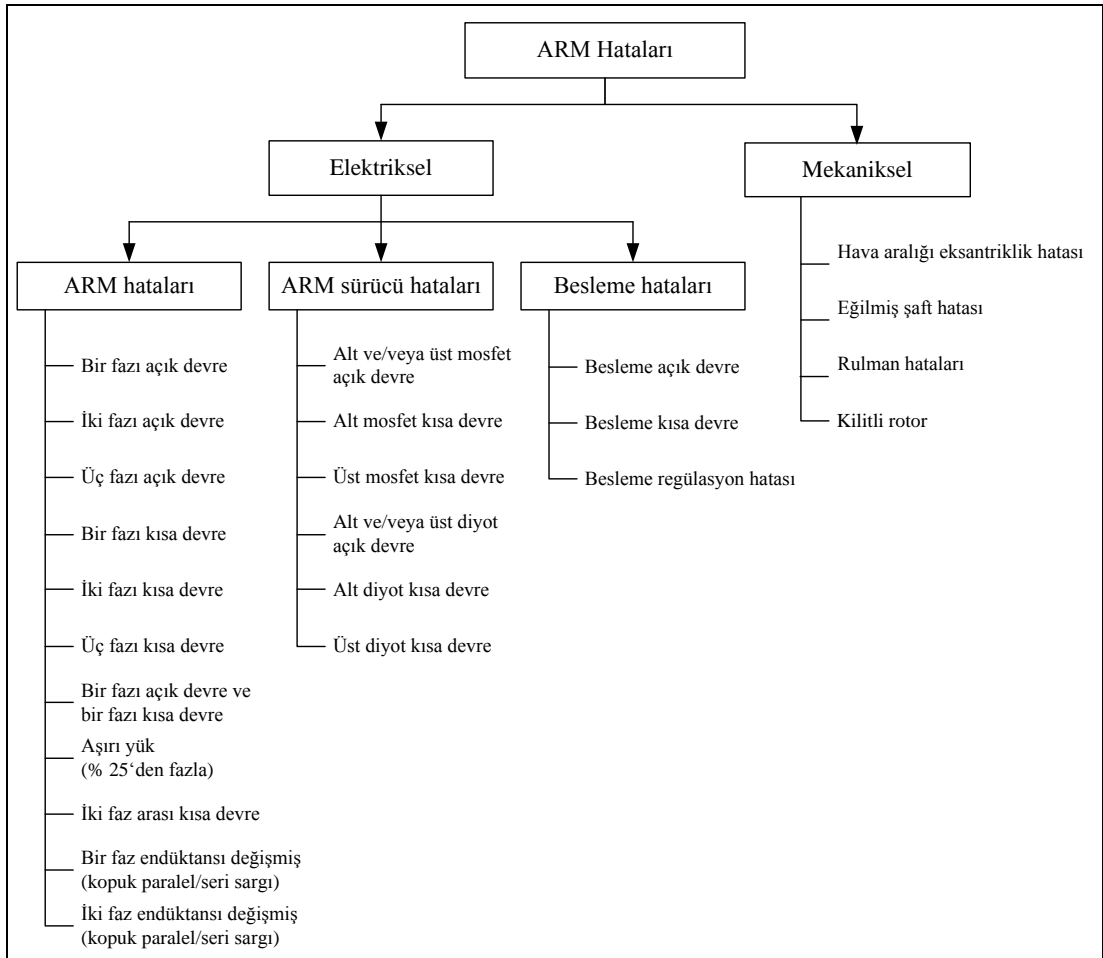
ARM'ler endüstride birçok uygulamada kullanılmaktadır. ARM'nin endüstrideki bazı uygulamaları ve kullanılan motor tipleri aşağıda verilmektedir [35].

- Hewlett-Packard firması, 8/6 kutup oranında 0,1275 Nm tork 4000 dev/dak hız ve 53 W gücünde bir ARM'yi çizim makinesinde kullanmıştır.
- A.O.Smith firması, büyük marketler için el kurutma cihazında 0,5 HP güce sahip bir ARM kullanmıştır.
- Radio Energie firması, el forklift cihazında 1,8 KW gücünde ve 1500 dev/dk hızına sahip bir ARM kullanmıştır.
- Besam firması otomatik kapı sistemlerinde 3 fazlı 12/8 kutuplu, 5 Nm tork üreten 300 dev/dk hıza sahip bir ARM kullanmıştır.
- Çamaşır makinesi, elektrik süpürgesi gibi ev cihazlarında iki firma ekonomikliği yüzünden ARM kullanmaya başlamışlardır.
- Endüstriyel amaçlı pek çok uygulamada 140 HP ve üzeri güçte ARM'ler kullanılmaktadırlar.
- Normalair Garrett firması, trenlerde havalandırma sistemleri için 40 KW gücünde 30000 dev/dk hıza sahip, 3 fazlı, 6/4 kutuplu ARM kullanmaktadır.
- British Jeffrey Diamond firması, madencilik endüstrisinde 150 KW ve 300 KW'lık 1500 dev/dk hıza sahip 3 fazlı 12/8 kutuplu ARM kullanılmaktadırlar.
- CompAir BroowWade firması, vidalama kompresörü olarak iki fazlı 8/4 kutup oranında 75 KW gücünde ve 4500 dev/dk hıza sahip ARM'ler kullanılmaktadır.
- Backman Instruments firması, tıp uygulamaları için pompalama sistemlerinde kullanılmak üzere 3 fazlı 6/4 kutuplu, 2,5 KW ve 30000 dev/dk hıza sahip ARM kullanılmıştır.
- Uzay uygulamalarında jet motorunu ateşlemek üzere başlangıç motoru olarak ARM'ler kullanılmaktadır. Bunun için hız oranı 27000 dev/dk ile 50000 d/dk

arasında hızlara sahip ARM'ler kullanılmaktadır.

2.7. ARM HATALARI

ARM'ler pratik olarak basit ve dayanıklı bir yapıya sahiptirler. Bu yüzden ARM'lerde sadece rotor/şaft, sargı ve rulman hataları meydana gelmektedir [2,40]. ARM ve denetim sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan hatalar Şekil 2.13'de verilmektedir [27,31,32,41-47].



Şekil 2.13. ARM'de meydana gelebilen hatalar.

ARM'lerde meydana gelen hatalar mekaniksel ve elektriksel hatalar olmak üzere iki ana grupta incelenir. Elektriksel hatalar kendi arasında motorda, motor sürücünde ve beslemede meydana gelen hatalar olmak üzere ayrı ayrı incelenir. Mekaniksel hatalar genellikle hava aralığı eksantrikliği, eğilmiş şaft, rulman ve kilitli rotor hatası olarak

meydana gelmektedir. Kilitli rotor hatası eğilmiş şaft ve/veya rulman hatası sonucunda ortaya çıkabilmektedir. ARM’de meydana gelen fazların açık devre hatası durumunda ARM çalışmaya devam etmektedir. Eksik fazla çalışma durumunda motor akımı ve torkunda dalgalanmalar meydana gelmektedir. Fazların kısa devre hatası meydana gelmesi durumunda da motor hala çalışmaktadır. Fakat bu durumda motor torkunda dalgalanmaların yanı sıra kısa devre sonucu kaynaktan çekilen akım artmaktadır.

BÖLÜM 3

YAPAY SİNİR AĞLARI

YSA'lar insan beyninden esinlenerek geliştirilmiş, ağırlıklı bağlantılar aracılığıyla birbirine bağlanan ve her biri kendi belleğine sahip işlem elemanlarından oluşan paralel ve dağıtılmış bilgi işleme yapılarıdır. Bir başka deyişle, YSA'lar biyolojik sinir ağlarını taklit eden bilgisayar programlarıdır. YSA'lar zaman zaman bağlantıcılık, paralel dağıtılmış işlem, sinirsel işlem, doğal zeka sistemleri ve makine öğrenme algoritmaları gibi isimlerle anılmaktadır [48].

YSA'lar bir programcının geleneksel yeteneklerini gerektirmeyen, kendi kendine öğrenme düzenekleridir. Bu öğrenmenin yanı sıra, ezberleme ve bilgiler arasında ilişkiler oluşturma yeteneğine de sahiptir. YSA'lar insan beyninin bazı organizasyon ilkelerine benzeyen özellikleri kullanmaktadırlar. YSA'lar bilgi işleme sistemlerinin yeni neslini temsil ederler. Genel olarak YSA'lar model seçimi ve sınıflandırılması, işlev tahmini, en uygun değeri bulma ve veri sınıflandırması gibi işlerde başarılıdır. Geleneksel bilgisayarlar ise özellikle model seçme işinde verimsizdir ve sadece algoritmaya dayalı hesaplama işlemleri ile kesin aritmetik işlemlerde hızlıdırlar.

Birçok YSA tipi bulunmakla birlikte bazıları diğerlerinden daha yaygındır. En çok kullanılan YSA geri yayımlı olarak bilinen YSA'dır. Bu tip YSA tahmin ve sınıflandırma işlemlerinde çok iyi sonuçlar vermektedir. Bir başkası Kohonen Özöğütlemeli Harita'dır. Bu tip sinir ağları karışık bilgi kümeleri arasında ilişki bulma konusunda başarılı sonuçlar vermektedir.

YSA'lar bilgi sınıflama ve bilgi yorumlamanın da içinde bulunduğu çok değişik problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. YSA'ların kullanıldığı alanlar şu şekilde sıralanabilir;

- Denetim
- Sistem modelleme
- Sınıflandırma
- Ses tanıma
- Parmak izi tanıma
- Elektrik işaret tanıma
- Meteorolojik yorumlama
- Otomatik araç denetimi
- Fizyolojik işaretleri (Kalp fonksiyonları gibi) izleme, tanıma ve yorumlama

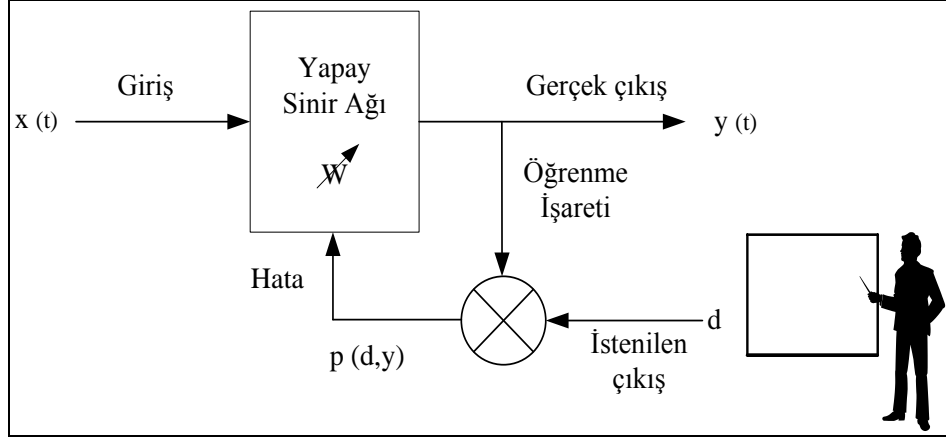
YSA'ların başlıca uygulama alanları sınıflandırma, tahmin ve modelleme olarak ele alınabilir.

Öğrenme; eğitim ve hareketin doğal yapıda meydana getirdiği davranış değişikliği olarak tanımlanmaktadır. Bir takım metot ve kurallara, gözlem ve eğitime göre ağdaki ağırlıkların değiştirilmesi sağlanır. 1990'lı yıllardan bugüne gelinceye kadar birçok öğrenme algoritması geliştirilmiştir. Öğrenme algoritmaları temelde üç grupta toplanmaktadır. Danışmanlı, danışmansız ve takviyeli öğrenme algoritmalarıdır.

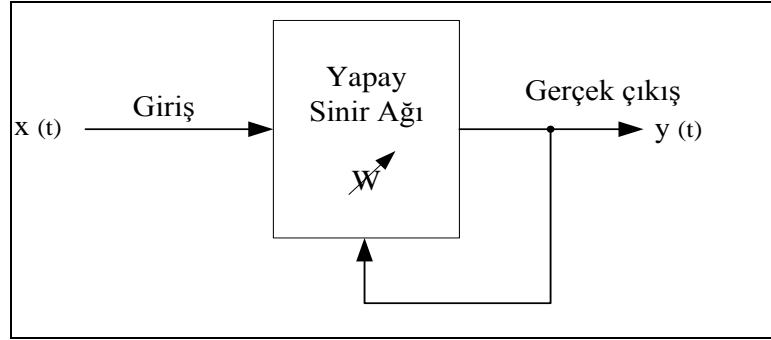
Danışmanlı öğrenme YSA'ya örnek olarak bir doğru çıkış verilir. İstenilen ve gerçek çıktı arasındaki farka (hataya) göre sinir hücreleri arasındaki bağlantıların ağırlığını en uygun çıkışı elde etmek için sonradan düzenlenebilir. Bu sebeple danışmanlı öğrenme algoritmasının bir "öğretmene" veya "danışmana" ihtiyacı vardır. Şekil 3.1'de danışmanlı öğrenme yapısı gösterilmiştir. Widrow-Hoff tarafından geliştirilen delta kuralı ve Rumelhart ve McClelland tarafından geliştirilen genelleştirilmiş delta kuralı veya geri besleme algoritması danışmanlı öğrenme algoritmalarına örnek olarak verilebilir.

Danışmansız öğrenme girişe verilen örnekten elde edilen çıkış bilgisine göre ağ sınıflandırma kurallarını kendi kendine geliştirmektedir. Bu öğrenme algoritmalarında, istenilen çıkış değerinin bilinmesine gerek yoktur. Öğrenme süresince sadece giriş bilgileri verilir. Ağ daha sonra bağlantı ağırlıklarını aynı özellikleri gösteren desenler oluşturmak üzere ayarlar. Danışmansız öğrenme yapısı

Şekil 3.2’de verilmektedir. Grossberg tarafından geliştirilen adaptif rezonans teorisi veya Kohonen tarafından geliştirilen öz örgütleme harita ağları (Self Organizing Map, SOM) öğrenme kuralı danışmansız öğrenmeye örnek olarak verilebilir.

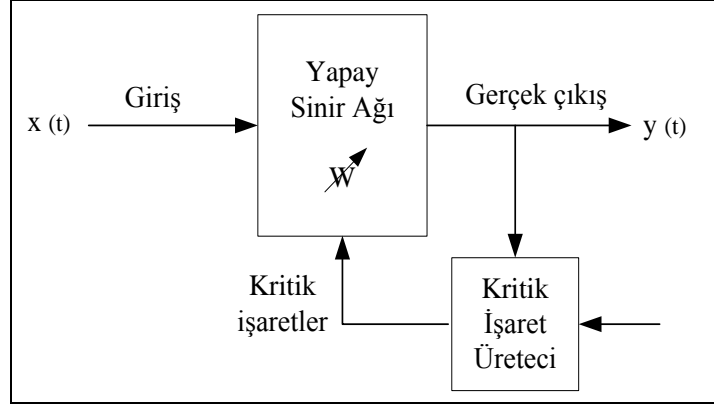


Şekil 3.1. Danışmanlı öğrenme yapısı.



Şekil 3.2. Danışmansız öğrenme yapısı.

Takviyeli öğrenme: Bu öğrenme kuralı danışmanlı öğrenmeye yakın bir metottur. Denetimsiz öğrenme algoritması, istenilen çıkışın bilinmesine gerek duymaz. Hedef çıktıyı vermek için bir “öğretmen” yerine, burada YSA’ya bir çıkış verilmemekte fakat elde edilen çıkışın verilen girişe karşılık iyiliğini değerlendiren bir kriter kullanılmaktadır. Takviyeli öğrenme (Reinforcement Learning) yapısı Şekil 3.3’de verilmektedir. Eniyileme problemlerini çözmek için Hinton ve Sejnowski’nin geliştirdiği Boltzmann kuralı veya Genetik Algoritmalar takviyeli öğrenmeye örnek olarak verilebilirler.



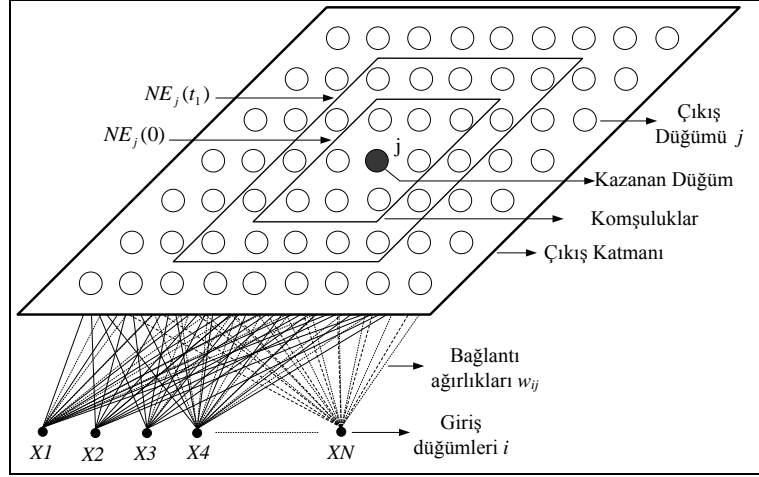
Şekil 3.3. Takviyeli öğrenme yapısı.

3.1. KOHONEN SINİR AĞI

Özörgütlemeli harita sinir ağı diğer bir deyişle SOM (Self Organization Map) danışmansız öğrenmeli bir ağıdır. Bu ağ yapısı Teove Kohonen tarafından geliştirilmiştir [49]. Özörgütlemeli sinir ağı Kohonen Sinir ağı olarak anılmaktadır. Kohonen sinir ağı genel olarak sınıflama yapmak için kullanılmaktadırlar. Bu ağların girdi vektörlerini sınıflandırma ve girdi vektörlerinin dağılımını öğrenebilme yetenekleri çok yüksektir. Bu ağın en temel özelliği olayları öğrenmek için bir öğretmen veya ağın üretmesi gereken çıktılarına söylenme zorluğunun olmamasıdır. Özellikle beklenen çıktılarının belirlenemediği problemler için kullanılmaktadır [50].

3.1.1. Kohonen Sinir Ağının Yapısı

Kohonen sinir ağında giriş ve çıkış olmak üzere iki katmandan oluşur. Çıkış katmanındaki sinir hücreleri birbirleriyle ve giriş katmanındaki sinir hücreleriyle bağlantılıdır. Ağ çalıştırıldığında rastgele ağırlıklar atanır. Giriş bilgisinin uygulanmasıyla ağ işlevini icra etmeye başlar. Eğitim sonucunda bir sinir hücresi kazanır. Bu sinirin komşuluklarını belirten sınır içersindeki sinir hücrelerinin ağırlıkları değiştirilir. Sonuçta ağ sinir gurubunu içeren bir bölgeyi işaret eder (Şekil 3.4). Kohonen ağı tek ve çift boyutlu olmak üzere ikiye ayrılır [51].



Şekil 3.4. Kohonen sinir ağı yapısı.

3.1.2. Kohonen Sinir Ağının Eğitimi

Kohonen sinir ağı algoritması aşağıda maddeler halinde verilmiştir. Ağın katman sayısının az olması ve hesapsal kolaylığı ağın hızını artırmaktadır. Ağın algoritmasının işletilmeden önce komşuluk miktarı NE_j ve η kazanç terimi (öğrenme hızı) sabitlerine değer atanmalıdır.

- Ağırlıkların belirlenmesi
- N giriş ve M çıkış düğümleri arasında bağlantı için rastgele küçük değerler atanır.
- Giriş ağı uygulanır.
- Düğümler arası uzaklıklar hesaplanır.

Giriş ve çıkış düğümleri arası mesafe (d_j), Eşitlik (3.1) kullanılarak hesaplanır.

$$d_j = \sum_{i=0}^{N-1} (x_i(t) - w_{ij}(t))^2 \quad (3.1)$$

Bu denklemde $x_i(t)$ i. giriş düğümü, t zaman ve $w_{ij}(t)$ i. giriş düğümü ve j. çıkış düğümü arasında t. zamanındaki ağırlık değeridir.

4. Çıkış düğümü en küçük mesafeye sahip olanlardan seçilir.

Seçilen j^* çıkış düğümü d_j 'nin en küçük uzaklık değerine sahip olan çıkış düğümüdür.

5. j^* düğümünün ağırlıkları ve komşulukları yenilenir.

$NE_j(t)$, j^* düğümünün ağırlıkları ve komşulukları Eşitlik (3.2) kullanılarak yenilenir.

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \eta(t)(x_i(t) - w_{ij}(t)) \quad (3.2)$$

$$j \in NE_j(t) \quad 0 \leq i \leq N-1$$

Burada, $\eta(t)$ kazanç terimidir. Bu terim ($0 < \eta(t) < 1$) zamanla azalır.

6. Süreç ikinci adıma dönülerek tekrar edilir [51].

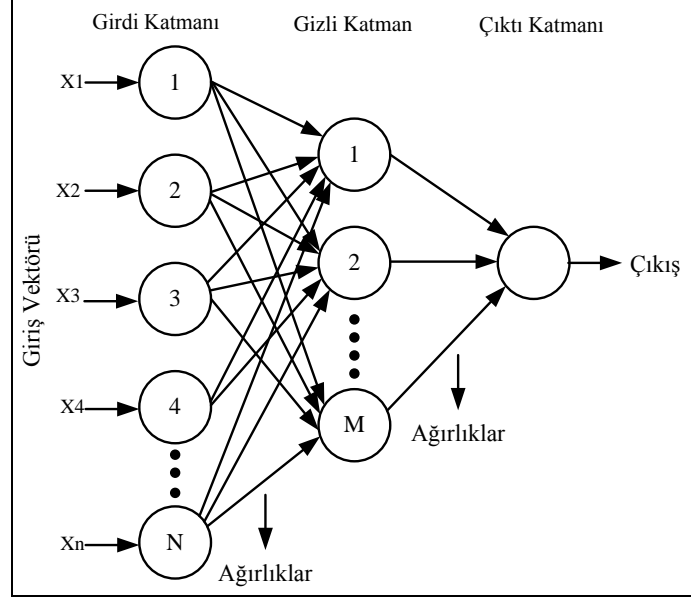
3.2. İLERİ BESLEMELİ SİNİR AĞI

İleri beslemeli bir ağda sinir hücreleri genellikle katmanlara ayrılmıştır. İşaretler, giriş katmanından çıkış katmanına doğru tek yönlü bağlantılarla iletilir. Sinir hücreleri bir katmandan diğer bir katmana bağlantı kurarken, aynı katman içerisinde bağlantıları bulunmaz. İleri beslemeli ağlara örnek olarak çok katmanlı perseptron (Multi Layer Perceptron) ve öğrenme vektör kuantalama ağları verilebilir. İleri beslemeli YSA'larda gecikmeler yoktur, işlem girişlerden çıkışlara doğru ilerler. Çıkış değerleri öğreticiden alınan istenen çıkış değeriyle karşılaştırılarak bir hata sinyali elde edilerek ağ ağırlıkları güncellenir [10].

3.2.1. İleri Beslemeli Sinir Ağının Yapısı

Çok katmanlı ileri beslemeli bir YSA mimarisi üç kısımdan oluşur. Bunlar girdi katmanı, gizli katman (ya da katmanlar) ve çıktı katmanıdır. Katmanlar, sinir hücresi (düğüm) adı verilen birimlerden oluşmaktadır. Mimarinin tam olarak belirlenmesi katmanlardaki sinir hücresi sayısına karar verilmesi ile gerçekleşir. İleri beslemeli ağlarda bağlantılar tek yönlü ve ileri doğrudur. Aynı katmanın birimleri arasında bağlantı yoktur. YSA'larda ağırlıkların belirlenmesinde kullanılan birçok öğrenme algoritması vardır. En yaygın kullanılan öğrenme algoritmalarından biri geri yayılım (back propagation) algoritmasıdır. Geri yayılım algoritması eldeki veri ile ağın çıktısı arasındaki farka dayalı olarak ağırlıkların güncellenmesini gerçekleştirir. Geri yayılım algoritmasında kullanılan öğrenme parametresi en uygun sonuca yeterli derecede yaklaşımlarında önemli rol oynar. Öğrenme parametresi sabit olarak

alınabileceği gibi, algoritma içinde dinamik olarak da güncellenebilir. En basit hali ile çok katmanlı ileri beslemeli bir YSA mimari yapısı Şekil 3.5’de verilmektedir.



Şekil 3.5. Çok katmanlı ileri beslemeli sinir ağı.

İleri beslemeli sinir ağında sinir hücreleri katmanlara ayrılır. Sinyaller tek yönlü bağlantılar ile giriş katmanından çıkış katmanına doğru bağlantılıdır. Sinir hücreleri başka bir katman ile bağlantı yaparken, aynı katmanda da bağlantısı vardır. İleri beslemeli YSA’larda girişten çıkışa işlem gerçekleşirken herhangi bir gecikme yoktur. Çıkış değerleri böylece kendi ağırlıkları güncelleyerek, bir hata sinyali kazanıyor, eğitmen istenen çıkış değerleri elde ve çıkış değerleri ile karşılaştırarak eğitilmektedir [10].

3.2.2. İleri Beslemeli Sinir Ağınaın Eğitimi

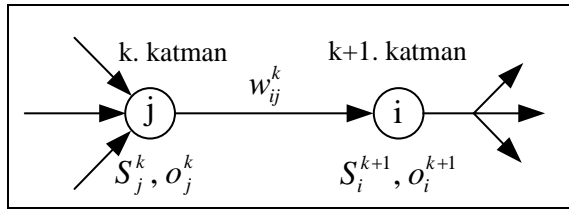
Geri yayılım algoritması, sinir ağınaın öğrenmeli ağı sınıfında kullanılan genel bir algoritmadır. Girişlerle çıkışlar arasındaki hata sinyali bulunarak, ağırlıklar bu hata sinyaliyle güncellenmektedir. Hata $e(k)$, arzu edilen çıkış (gerçek çıkış = $y(k)$) ile sinir ağınaın çıkışı $o(k)$ arasındaki farktır ($e(k) = y(k) - o(k)$).

İleri beslemeli sinir ağınaında giriş katmanını ile çıkış katmanını arasındaki katman veya

katmanlar gizli katman olarak adlandırılır. Sinir ağlarında kaç tane gizli katman kullanılacağı ve her bir gizli katmanda kaç sinir hücresi olacağı bugüne kadar belirlenememiştir, probleme göre değişen bu nitelikler deneme-yanılma yoluyla bulunur.

İleri Beslemeli sinir ağı yapısı geri besleme bağlantıları yoktur. Bu yapıda giriş katmanını giriş vektörünü gizli katman ulaştırmakla yükümlüdür ve doğrusal olmayan bir davranışa sahip değildir. Dolayısıyla giriş katmanındaki her bir sinir hücresinin çıkışında bağlı olduğu giriş değeri görünür.

Ağ üzerindeki katmanlar k indisi ile sıralanır ve L adet gizli katman olduğu edilir. Şekil 3.6'daki ağ için L=1 olacak, k=0 giriş katmanına, k=1 gizli katmanına ve k=L+1 çıkış katmanına karşılık gelir. k+1. katmanın i. sinir hücresini k. katmanın j. sinir hücresine bağlayan bağlantının ağırlık değeri w_{ij}^k sembolü ile gösterilir ve k. katmanın i. sinir hücresinin çıkışı ile gösterilir, k+1. katmanındaki i. sinir hücresinin net toplamı S_i^{k+1} ve çıkış değeri o_i^{k+1} Eşitlik 3.3 ve Eşitlik 3.4 eşitliklerinden elde edilir. Eşitlik 3.3 eşitliğinde görülen n_k değişkeni, k. katmandaki sinir hücresi sayısını simgeler.



Şekil 3.6. Ağ içindeki katmanlar ve sinir hücrelerinin sıralanması.

$$S_i^{k+1} = \sum_{j=1}^{n_k} w_{ij}^k o_j^k \quad (3.3)$$

$$o_i^{k+1} = \Psi(S_i^{k+1}) \quad (3.4)$$

Hata geriye yayılım yöntemi ile ileri beslemeli sinir ağının eğitimi için Eşitlik 3.5'te verilen maliyet fonksiyonunun minimize edilmesi gerekir. Ayrıca Eşitlik 3.6'da parametre güncelleme eşitliği temel alınarak hata geriye yayılım işleminin eşitlikleri elde edilir. Eşitlik 3.6'deki ∇_w sembolü w parametresine göre kısmi türevi

göstermektedir. Katmalar arasında hatanın nasıl geriye yayıldığı Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de verilmektedir.

$$J_r = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_{k+1}} (d_i - o_i)^2 \quad (3.5)$$

$$\Delta w = -\eta \nabla_w J_r \quad (3.6)$$

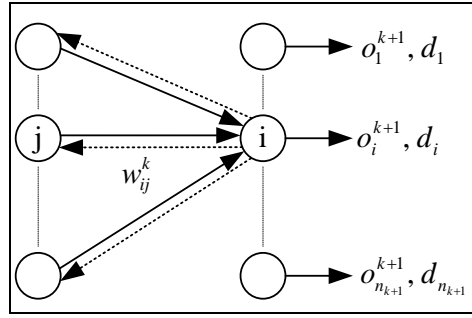
J_r : Maliyet fonksiyonu

d_i : Ağın i inci çıkışı için istenen çıkış değeri

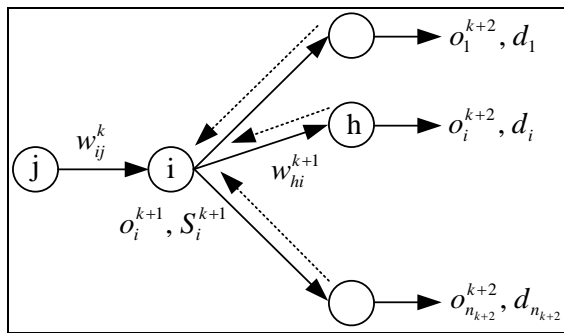
o_i^{k+1} : $k+1$. katmanın i . sinir hücresinin çıkışında gözlenen değer

w_{ij}^k : $k+1$. katmanın i . sinir hücresi ile k . katmandaki j . sinir hücresini birleştiren ağırlık

S_i^{k+1} : $k+1$. katmanın i . sinir hücresinin girişinde oluşan net toplamı.



Şekil 3.7. Çıkış katmanından hatanın geriye yayılması.



Şekil 3.8. Gizli katmanlar boyuca hatanın yayılımı.

Türev zincir kuralının kullanımıyla Eşitlik 3.7’teki eşitlik üç çarpandan oluşacak şekilde açılabilir. Bu çarpanların açılımı sırasıyla Eşitlik 3.8- 3.10 eşitliklerinde verilmiştir.

$$\frac{\partial J_r}{\partial w_{ij}^k} = \frac{\partial J_r}{\partial o_i^{k+1}} \frac{\partial o_i^{k+1}}{\partial S_i^{k+1}} \frac{\partial S_i^{k+1}}{\partial w_{ij}^k} \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial J_r}{\partial o_i^{k+1}} = -(d_i - o_i^{k+1}) \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial o_i^{k+1}}{\partial S_i^{k+1}} = \frac{d\Psi(S_i^{k+1})}{dS_i^{k+1}} = \Psi'(S_i^{k+1}) \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial S_i^{k+1}}{\partial w_{ij}^k} = \frac{\partial}{\partial w_{ij}^k} \left[\sum_{j=i}^{n_k} w_{ij}^k o_j^{k+1} \right] = o_j^k \quad (3.10)$$

Eğer Eşitlik 3.11’de verilen kısmi türev, delta değeri olarak tanımlanırsa, çıkış katmanındaki sinir hücreleri için delta değerinin genel hali Eşitlik 2.12 eşitliğinde verilen biçimde, parametredeki değişim miktarı ise Eşitlik 5.13 eşitliğinde verilen biçimde olacaktır.

$$\delta_i^{k+1} = \frac{\partial J_r}{S_i^{k+1}} \quad (3.11)$$

$$\delta_i^{k+1} = (d_i - o_i^{k+1})\Psi'(S_i^{k+1}) \quad (3.12)$$

$$\Delta w_{ij}^k = \eta \delta_i^{k+1} o_j^k \quad (3.13)$$

Parametre güncelleme kuralı her bir çıkış sinir hücresinden gelen hata bilgisini kullanarak bu hataların toplamından oluşan maliyeti uyarlanabilir. Parametreleri güncelleyerek minimize etmeyi amaçlamaktadır. Gizli katmandaki sinir hücrelerinin parametrelerinin güncellenmesi gerektiği için Eşitlik 3.7 eşitliği Eşitlik 3.14 olarak tekrar yazılır; Eşitlik 3.10’da kısmi türevlerini oluşturan terimler Şekil 3.8’de verildiği gibi, değişik yollardan gelebilmektedirler. Bu durum Eşitlik 3.14 eşitliğindeki zincir kuralının ilk terimlerinin açık hali olan Eşitlik 3.15 eşitliğinde de görülmektedir. Aynı terimin daha açık ifadeleri Eşitlik 3.16 ve Eşitlik 3.17’de verilmektedir.

$$\frac{\partial J_r}{\partial w_{ij}^k} = \frac{\partial J_r}{\partial o_i^{k+1}} \frac{\partial o_i^{k+1}}{\partial S_i^{k+1}} \frac{\partial S_i^{k+1}}{\partial w_{ij}^k} \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial J_r}{\partial o_i^{k+1}} = \sum_{h=1}^{n_{k+2}} \left[\frac{\partial J_r}{\partial S_h^{k+2}} \frac{\partial}{\partial o_i^{k+1}} \left(\sum_{i=1}^{n_{k+1}} w_{hi}^{k+1} o_i^{k+1} \right) \right] \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial J_r}{\partial o_i^{k+1}} = \sum_{h=1}^{n_{k+2}} \frac{\partial J_r}{\partial S_h^{k+2}} w_{hi}^{k+1} \quad (3.16)$$

$$\delta_i^{k+1} = \frac{\partial J_r}{\partial S_i^{k+1}} \quad (3.17)$$

$$\delta_i^{k+1} = \frac{\partial J_r}{\partial S_i^{k+1}} \quad (3.18)$$

Çıkış katmanı için yapıldığı gibi gizli katmanlar için de Eşitlik 3.18 ile verilen değerleri tanımlanabilir. Bu tanımın kullanılması ile Eşitlik 3.14 eşitliğinin ilk terimi, Eşitlik 3.19 eşitliğinde gösterilen biçimde yazılabilir. Eşitlik 3.20 ve Eşitlik 3.21 eşitlikleri ise, Eşitlik 3.18 eşitliğinde görülen ikinci ve üçüncü terimlerin daha açık ifade edilmiş durumlarıdır.

$$\frac{\partial J_r}{\partial o_i^{k+1}} = \sum_{h=1}^{n_{k+2}} \frac{\partial J_r}{\partial S_h^{k+2}} w_{hi}^{k+1} \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial o_i^{k+1}}{\partial S_i^{k+1}} = \frac{d\Psi(S_i^{k+1})}{d(S_i^{k+1})} = \Psi'(S_i^{k+1}) \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial S_i^{k+1}}{\partial w_{ij}^k} = o_j^k \quad (3.21)$$

3.3. ELMAN SINIR AĞI

Elman ağı en basit yapıya sahip olan bir geri dönüşümlü ağıdır. Geri dönüşümlü ağlarda, ağın süreç elemanlarının çıktıları yine ağa belirli bir şekilde geri gönderilerek girdi olarak kullanılmaktadır. Dinamik sistemlerin modellenmesinde ve öğrenilmesinde geri dönüşümlerin olması özellikle zaman gecikmelerini dikkate almak için önemlidir [50].

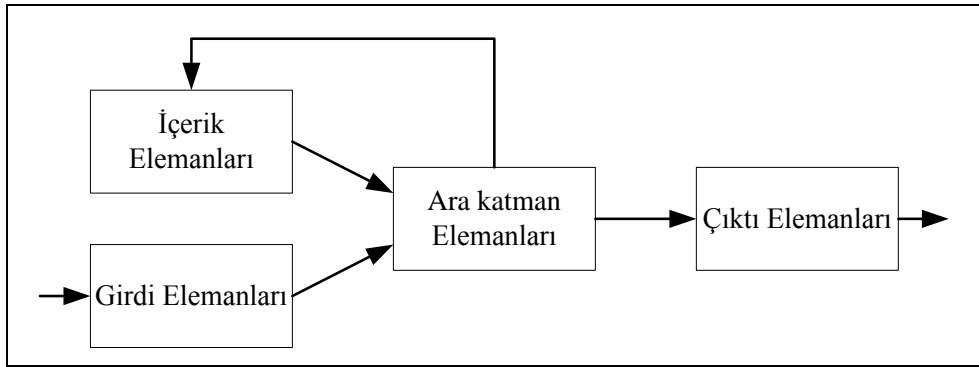
Geri dönüşümlü ağlar iki şekilde olabilir;

- Tam geri dönüşümlü ağlar: bu ağlar gelişigüzel ileri ve geri bağlantıları olan ağlardır. Bu bağlantıların hepsi eğitilebilir.
- Kısmi geri dönüşümlü ağlar: Bu ağlarda ağın süreç elemanlarına ek olarak içerik elemanları vardır. Bu ağlar temelde ileri beslemeli bir ağıdır. İleri bağlantılar eğitilebilir. Geri dönüşüm sadece içerik elemanları üzerinden yapılır ve bu bağlantılar eğitilemezler. İçerik elemanları ara katman elemanlarının geçmiş durumlarını hatırlamak için kullanılırlar. Ağın çıktısı hem önceki

durumlara hem de o andaki durumuna bağılı olarak oluşturulmaktadır. Geçmiş durumları hatırlayabilmeleri bu ağlara dinamik hafızaya sahip olma özelliğı kazandırmaktadır.

3.3.1. Elman Sinir Ağının Yapısı

Elman ağı çok katmanlı ileri beslemeli ağıın öğrenme kuralına göre öğrenmektedir. Elman ağıının yapısı Şekil 3.10'da verilmektedir. Ağ yapısı incelendiğinde girdi elemanları, ara katman elemanları, çıktı elemanları, içerik elemanları olmak üzere dört çeşit işlem elemanı vardır.

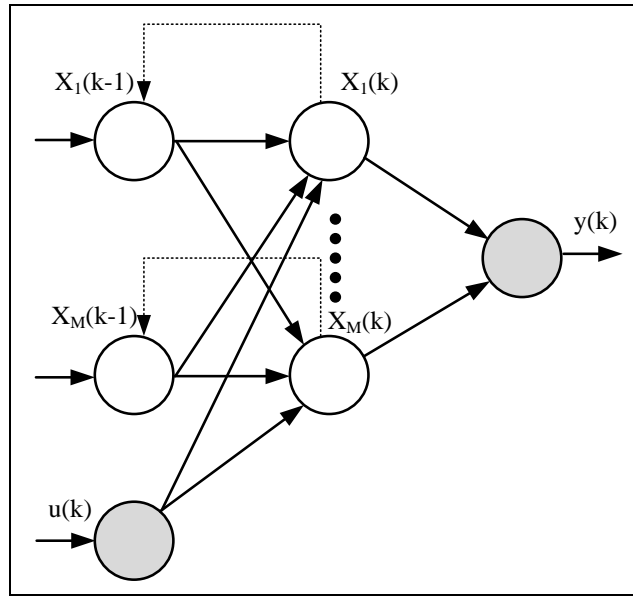


Şekil 3.9. Elman ağı yapısı.

Elman ağı yapısındaki elemanlardan girdi ve çıktı elemanları dış dünya ile etkileşim hallindedir. Girdi elemanları dış dünyadan bilgileri alır ara katmanlara iletirler. Elman ağıında girdi elemanlarının bilgi işleme özellikleri yoktur. Bilgileri olduğu gibi ara katmana gönderirler. Çıktı elemanları ise ağıın çıktısını dış dünyaya iletirler. Çıktı ünitelerinin bilgi işleme fonksiyonları doğrusaldır ve kendilerine gelen bilgileri toplarlar. Ara katman elemanları hem doğrusal hem doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyonlarına sahip olabilirler. İçerik elemanları ara katman elemanlarının önceki aktivite değerlerini hatırlatmak için kullanılmaktadır. Bu elemanlar bir adım gecikmeyi içermektedirler. Bir önceki iterasyondaki aktivasyon değeri bir sonraki iterasyonda girdi olarak taşırılır. İleri beslemeli bağlantıların ağırlıkları eğitim sırasında değiştirilebilirler. Geri dönüşüm bağlantı ağırlıkları ise sabittir. Bu ağırlıklar değiştirilemezler. Geri dönüşümlerin ağırlıkları sabit olduğundan Elman ağıına kısmi geri dönüşümlü ağ denilebilir.

Elman ağındaki, herhangi bir (t) zamanındaki girdi değerleri hem de ara katmanların (t-1) zamanındaki aktivite değerleri ağa girdi olarak verilirler. Ağın girdileri belirlendikten sonra ağ artık ileri beslemeli birçok katmanlı algılayıcıya dönüşmektedir. Bu girdiler kullanılarak ileri doğru ağın çıktıları belirlenir. İleri doğru hesaplamadan sonra ağın ara katmanlarının aktivasyon değerleri geriye doğru içerik elemanlarına girdi olarak gönderilir ve orada bir sonraki iterasyonda kullanılmak üzere saklanır.

Başlangıçta ara katmanların aktivasyon değerleri bilinmediğinden içerik elemanlarının başlangıç değerlerinin belirlenmesi gerekir. Bunun için, genel olarak bir ara katmanın alabileceği maksimum değer yarısı içerik elemanlarının başlangıç girdi değerleri olarak atanır. Eğer sigmoid fonksiyonu kullanılacak ise genellikle bu elemanlar başlangıçta girdi değerleri olarak atanmaktadır.



Şekil 3.10. Elman ağına ayrıntılı gösterimi.

M girdi ara katman elemanı ve bir çıktıdan oluşan Elman ağına daha ayrıntılı bir şekli Şekil 3.10'da verilmektedir. Şekildeki $u(k)$, k. zaman dilimindeki dış dünyadan gelen girdiyi; $y(k)$, k. zaman dilimindeki üretilen çıktıyı; $x(k)$ ise, k. zaman dilimindeki ara katman elemanlarının çıktıları; $x(k-1)$ ise bir önceki zaman diliminde ara katman elemanlarının çıktıları göstermektedir.

3.3.2. Elman Sinir Ağının Eğitimi

Elman ağının öğrenmesi genelleştirilmiş delta öğrenme kuralına göre gerçekleşmektedir. Delta öğrenme kuralı sinir hücresinin gerçek çıkışı ile istenilen çıkış değerleri arasındaki farkı azaltan, giriş bağlantılarını güçlendiren ve sürekli olarak değiştiren bir düşünceye dayanmaktadır. Ara katmanda bulunan elemanlara gelen net girdi değeri girdi katmanındaki elemanın girdi değeri ile ağırlığının çarpılıp toplanması sonucu bulunan değerlere içerik elemanlarından gelen bağlantı değerlerinin ara katmanlarının bir önceki aktivite değerleri ile çarpılıp eklenmesi sonucu bulunur. Bu değer bir fonksiyondan geçirilerek ara katman elemanlarının çıktısı (x) bulunur. Herhangi bir k zaman diliminde kullanılan aktivasyon fonksiyonunun sigmoid olması durumunda ara katman elemanlarının çıktıları Eşitlik 3.22 ile hesaplanmaktadır.

$$x_i(k) = \frac{1}{1 + e^{-NET_i(k)}} \quad (3.22)$$

Burada hesaplanan NET girdi yukarıda belirtildiği gibi ara katmanlardan gelecek olan geri beslemeler dikkate alınarak hesaplanır.

Elman ağının eğitim algoritması aşağıda verilen işlem adımlarından oluşmaktadır.

1. Başlangıçta ağırlık vektörleri $w(0)$ rastgele sayılar atanır. k, iterasyon sayısı, K, tekrar sayısıdır.
2. k'inci iterasyondaki ağırlık $w(K)$ olsun,
 - i. k'inci iterasyon başlar. w ağırlık vektörü şimdiki değeri saklanır.
 $w_{old} = w(K)$
 - ii. $n=1,2,\dots,N$ 'e kadar
 - a. eğitim örneği seçilir, kısmi türevi uygulamak için hatanın geri yayılımı uygulanır.
 - b. Ağırlıklar güncellenir.
 - c. Gizli katmanların değerleri bağlantı birimi için kopyalanır.
 - d. K sayısı 1 arttırılır.

- iii. k'inci iterasyonun sonu, eğer doğru ise sonlandır.
3. k=k+1, 2. adıma git.

YSA'ların doğrusal olmayan verilerde yüksek performans göstermesinin sebebi giriş verilerinin ölçeklendirmeye tabi tutulmasıdır. Ölçeklendirme giriş verilerinin transfer edilirken fonksiyonun aktif olan bölgesinden aktarılmasını sağlar. Verilerde yapılan ölçeklendirme işlemci elemanlarını verilerin birikmiş toplamlarının oluşturacağı olumsuzlukların engellenmesi sağlanmaktadır. Verilerin [0,1] veya [-1,+1] aralıklarından birine ölçeklendirilmesi önerilmektedir. Veri seti aşırı salınımlar içeren problemlerin YSA modellerini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu olumsuzluk, kullanılacak öğrenme fonksiyonunda başarısızlığa yol açabilmektedir. Veri setinin [0,1] aralığında ölçeklendirilmesi için Eşitlik 2.23 kullanılmaktadır.

$$A_{\text{ölçeklenmiş}} = \frac{A - A_{\text{min}}}{A_{\text{maks}} - A_{\text{min}}} \quad (3.23)$$

3.4. MATLAB ORTAMINDA YSA'LARIN EĞİTİMİ

Matlab ortamında YSA'ların eğitimi ve test edilmesi için sinir ağı araç kutusu (Neural Network Toolbox) kullanılır. Sinir ağı araç kutusu kolayca bir kapalı form denklemleri, doğrusal olmayan sistemler için fonksiyonlarının ve uygulamalarının modellenmesini sağlar. Sinir ağı araç kutusu ileri beslemesi ile danışmanlı öğrenme, radyal temelli ve dinamik sinir ağlarını destekler. Aynı zamanda Kohonen sinir ağı ile danışmansız öğrenmeyi de desteklemektedir. Sinir ağı araç kutusu kullanılarak sinir ağlarının tasarımı, görselleştirilmesi ve benzetimi gerçekleştirilebilir. Nntool kullanılırken YSA'ların tanımlanması, eğitimi ve test edilmesi iki şekilde yapılabilmektedir. Bunlardan biri m-file kod yazmak diğeri ise nntool araç kutusu kullanmaktır. YSA'nın tanımlanması, eğitimi ve test edilmesi için kullanılan kod örnekleri aşağıda verilmektedir. Kohonen sinir ağının tanımlanması için gerekli komut ve parametrelerinin açıklaması;

Komut dizimi;

$$net = newsom(PR, [d1, d2, \dots], tfcn, dfcn, olr, osteps, tlr, tnd)$$

Açıklama;

net = newsom (PR,[D1,D2,...],TFCN,DFCN,OLR,OSTEPS,TLR,TND)

%newsom :Yeni Kohonen(SOM) sinir ağı tanımlar
%PR :R giriş elemanları için minumum ve maksimum
% :değerlerinin R x 2 matrisi
%I :i. katman boyutunun boyutu, varsayılan = [5 8].
%TFCN :Topoloji fonksiyonu, varsayılan = 'hextop'.
%DFCN :Uzaklık fonksiyonu, varsayılan = 'linkdist'.
%OLR :Faz öğrenme oranının sıralaması, varsayılan = 0.9.
%OSTEPS :Faz adımlarının sıralaması, varsayılan = 1000.
%TLR :Faz öğrenme oranının ayarlaması, varsayılan = 0.02;
%TND :Faz komşuluklarının ayarlanması, varsayılan = 1.

İleri beslemeli sinir ağının tanımlanması için gerekli komut ve parametrelerinin açıklaması;

Komut dizimi;

net = newff(PR,[S1 S2...SN1],{TF1 TF2...TFN1},BTF,BLF,PF)

Açıklama;

newff(PR,[S1 S2...SN1],{TF1 TF2...TFN1},BTF,BLF,PF)

%PR :R giriş elemanları için minumum ve maksimum
% :değerlerinin R x 2 matrisi
%Si :Ni katmanları için i. katmanın boyutu
%TFi :i. katmanın transfer fonksiyonu, varsayılan = 'tansig'.
%BTF :İleri beslemeli ağın eğitim fonksiyonu,
% varsayılan = 'traingdx'.
%BLF :Geri yayılım öğrenme fonksiyonunun öğrenme fonksiyonu,
% varsayılan = 'learnqdm'.
%PF :Performans fonksiyonu, varsayılan = 'mse'.

Elman sinir ağının tanımlanması için gerekli komut ve parametrelerinin açıklaması;

Komut dizimi;

```
net = newelm(PR,[S1 S2...SNl},{TF1 TF2...TFNl},BTF,BLF,PF)
```

Açıklama;

```
newelm(PR,[S1 S2...SNl},{TF1 TF2...TFNl},BTF,BLF,PF)
```

%PR :R giriş elemanları için minimum ve maksimum
% :değerlerinin R x 2 matrisi
%Si :Ni katmanları için i. katmanın boyutu
%TFi :i. katmanın transfer fonksiyonu, varsayılan = 'tansig'.
%BTF :İleri beslemeli ağın eğitim fonksiyonu,
% varsayılan = 'traingdx'.
%BLF :Geri yayılım öğrenme fonksiyonunun öğrenme fonksiyonu,
% varsayılan = 'learngdm'.
%PF :Performans fonksiyonu, varsayılan = 'mse'.

Tanımlanmış olan sinir ağlarının eğitimi için gerekli komut ve parametrelerinin açıklaması;

Komut dizimi;

```
[net,tr] = train(NET,P,T,Pi,Ai)
```

Açıklama;

```
train(net,P,T,Pi,Ai)
```

%train :Net ağını parametrelere göre eğitir
%net :Ağ
%P :Ağın girişleri
%T :Ağın hedef değerleri, varsayılan = 0

<i>%Pi</i>	:Başlangıç giriş gecikme şartları, varsayılan = 0
<i>%Ai</i>	:Başlangıç katmanı gecikme şartları, varsayılan =0
<i>%net</i>	:yeni ağ
<i>%tr</i>	:eğitim kayıtları (iterasyon sayısı ve performansı)

Eğitimi tamamlanmış olan sinir ağlarının yeni veriler ile test edilmesi için gerekli komut ve parametrelerinin açıklaması;

Komut dizimi;

$[Y,Pf,Af] = sim(net,P,Pi,Ai)$

Açıklama;

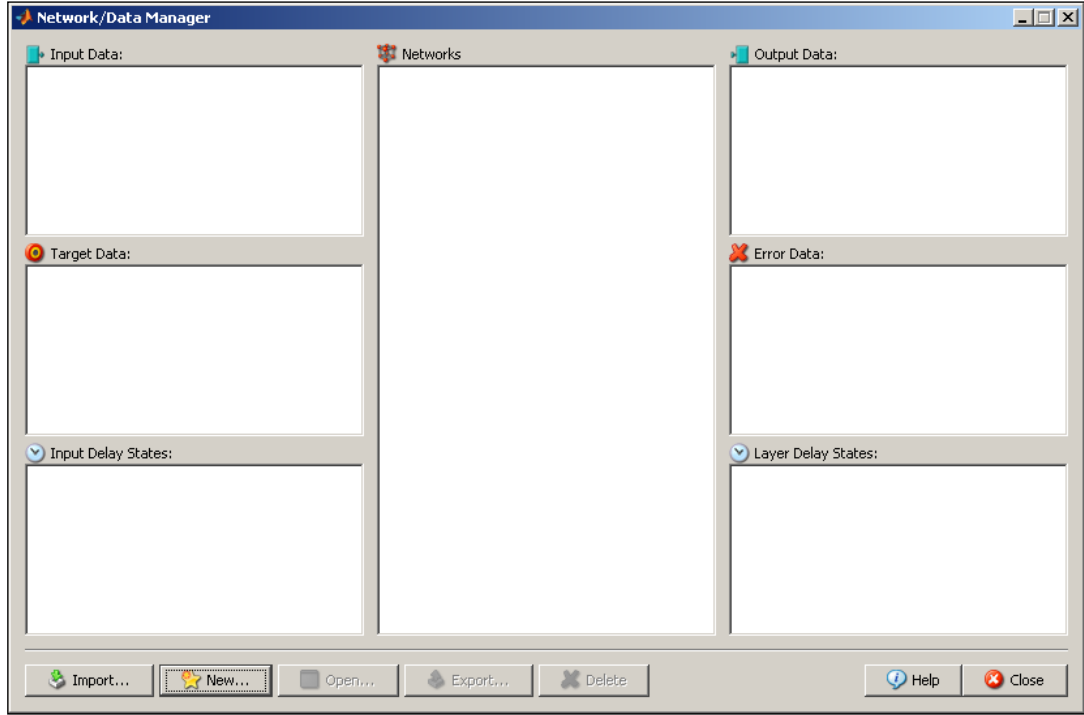
$[Y,Pf,Af] = sim(net,P,Pi,Ai)$

<i>%Sim</i>	:Ağı benzetimini yapar
<i>%Net</i>	:Ağ
<i>%P</i>	:Ağ girişleri
<i>%Pi</i>	:Başlangıç giriş gecikme şartları, varsayılan = 0
<i>%Ai</i>	:Başlangıç katmanı gecikme şartları, varsayılan =0
<i>%Y</i>	:Ağın çıkışı
<i>%Pf</i>	:Son giriş gecikme şartları
<i>%Af</i>	:Son katmanı gecikme şartları

Matlab ortamında nntool araç kutusu kullanarak yapat sinir ağlarının oluşturulması, eğitilmesi ve test verileri ile simule edilebilmektedir. Şekil 3.11de nntool araç kutusu erken görüntüsü verilmektedir. Araç kutusu üzerinde yer alan ifadeler aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [61].

<i>Networks</i>	:Ağların listesi
<i>Input Data</i>	:Bir ağa sunmak için giriş verileri
<i>Target Data</i>	:İstenen ağ çıkışları tanımlayan veriler
<i>Output Data</i>	:Tanımlanan ağın girişlerine bağlı ürettiği çıkış verileri

Error Data :Hedef veriler ile çıkış verileri arasındaki fark
Input Delay States :giriş gecikmeli ağlar için giriş gecikme durumları
Layer Delay States :Katman gecikmeli ağlar için katman gecikme durumları

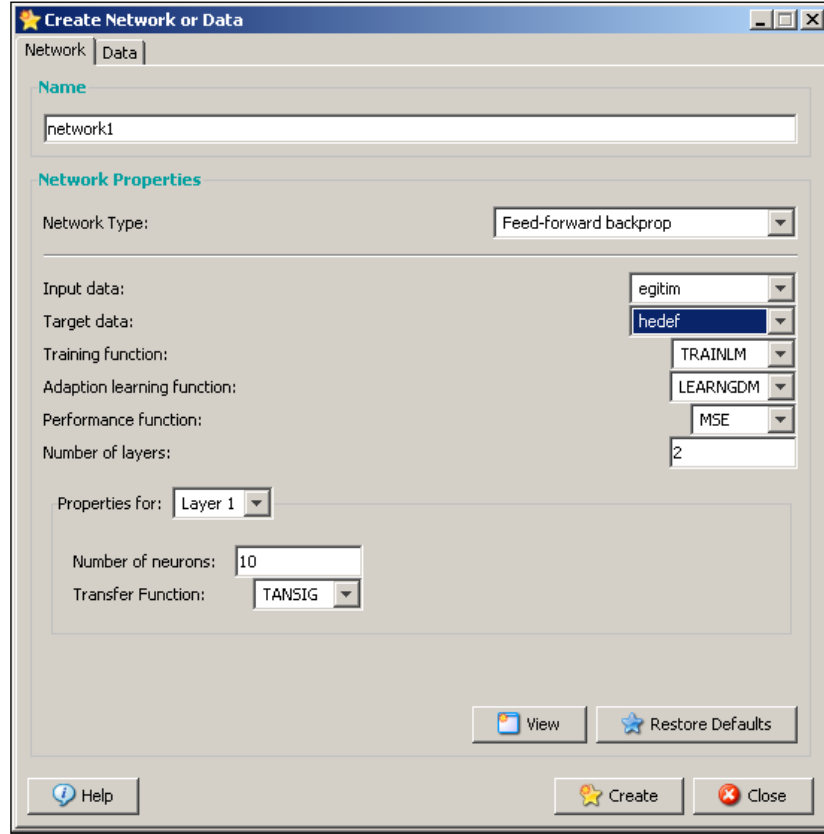


Şekil 3.11. Nntool araç kutusu ekran görüntüsü.

Nntool araç kutusunda bulunan butonların görevleri aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

Import :Çalışma alanına giriş, hedef ve ağ verilerini alır.
New :Yeni bir ağ oluşturur.
Open :Seçili veri veya ağların açılması ve düzenlenmesi için kullanılır.
Export :Seçilen verileri ve ağları bir dosyaya veya çalışma alanına aktarır.
Delete :Seçilen veri veya ağı siler.

Nntool araç kutusunda yeni bir sinir ağı eklemek için New butonu tıklanır. Açılan pencerede (Şekil 3.12) oluşturulacak olan yeni ağın adı ve tipi belirlenir. Yeni ağın tanımlanmasında kullanılacak giriş ve hedef veriler seçilir. Ağın eğitimi için eğitim, öğrenme ve performans fonksiyonları seçilir. Yeni ağın katman sayısı ve her bir katman için sinir hücresi sayıları belirlendikten sonra sinir ağı oluşturulur.



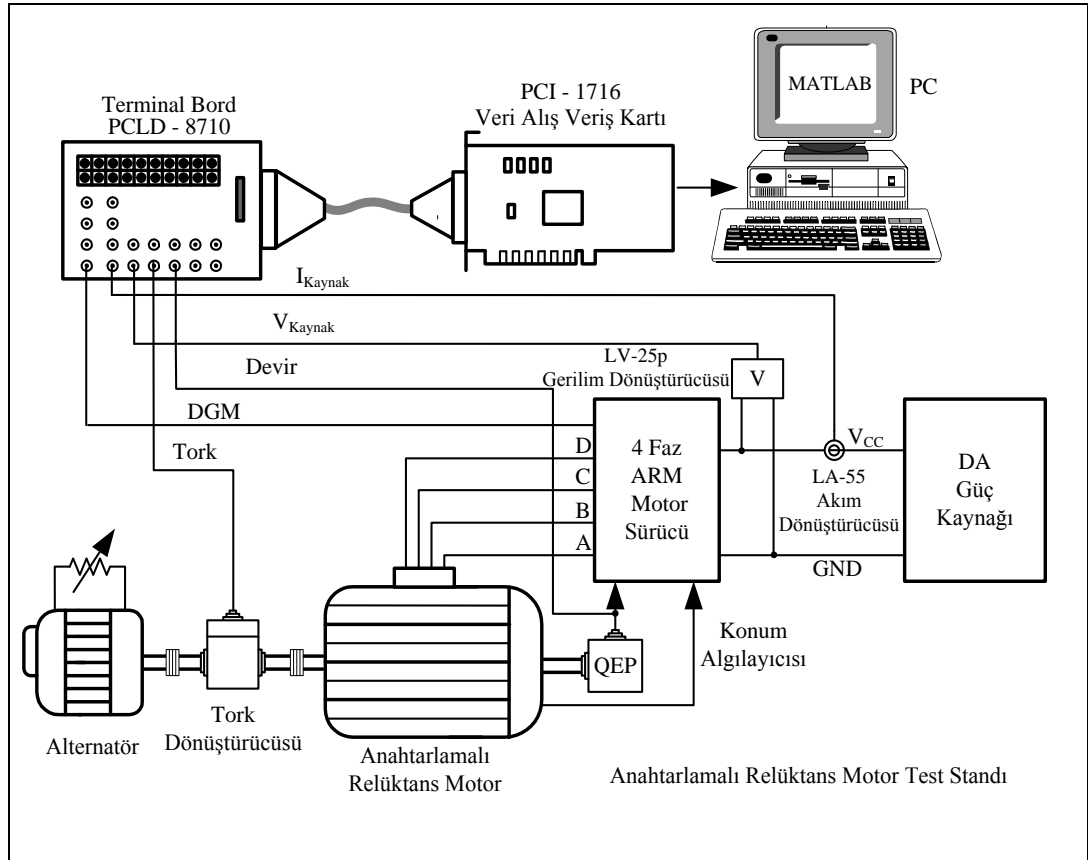
Şekil 3.12. Nntool yeni veri ve sinir ağı tanımlama ekranı.

<i>Name</i>	:Ağın adı tanımlanır.
<i>Network Type</i>	:Ağın tipi seçilir.
<i>Input data</i>	:Giriş verileri seçilir.
<i>Target data</i>	:Hedef veriler seçilir.
<i>Training function</i>	:Eğitimde kullanılacak fonksiyon seçilir.
<i>Adaptation learning function</i>	:Öğrenme fonksiyonu seçilir.
<i>Performance function</i>	:Performansı belirleyen fonksiyon seçilir.
<i>Number of layers</i>	:Katman sayısı belirlenir.
<i>Number of neurons</i>	:Her bir katmandaki sinir hücresi sayısı belirlenir.
<i>Transfer Function</i>	:Her bir katmandaki sinir hücresi çıkışları hesaplanırken kullanılacak transfer fonksiyonu belirlenir.

BÖLÜM 4

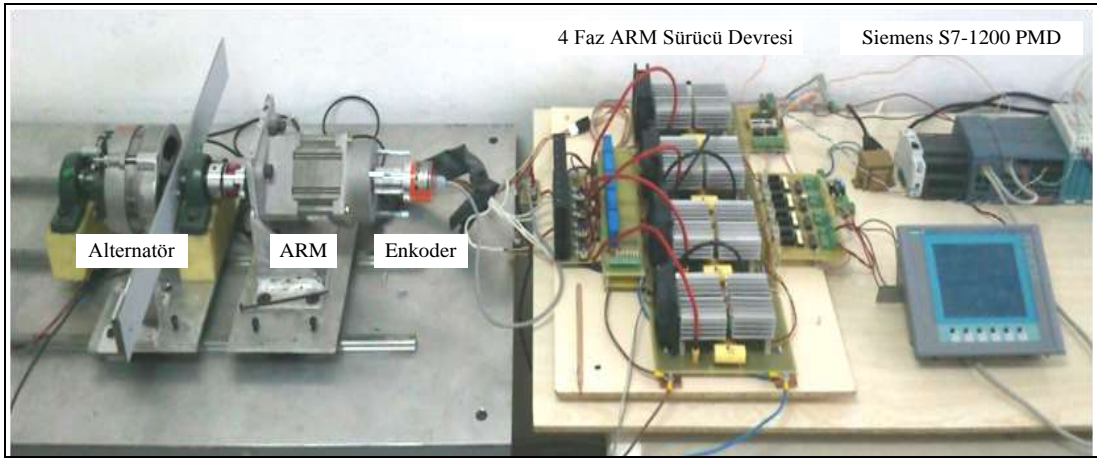
ARM HATALARININ ÖLÇÜMÜ İÇİN TEST DÜZENEGİ TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

ARM hatalarının tespit ve teşhisi için hazırlanan test düzeneğinin blok şeması Şekil 4.1'de verilmektedir. Test ve ölçüm düzeneğinde ARM'yi yüklemek için senkron alternatör tercih edilmiştir. ARM sürücü devresi olarak asimetrik köprü dönüştürücü kullanılmaktadır. Bu dönüştürücü bir programlanabilir mantık denetleyicisi kullanarak denetlenmektedir. Motor hız denetiminde PID algoritması kullanılmaktadır.



Şekil 4.1. ARM test düzeneği blok diyagramı.

Deney düzeneğinde motor besleme akımı, besleme gerilimi, devir, tork ve denetleyicinin ürettiği darbe genişlik modülasyonu (DGM) görev saykıl verileri ölçülmektedir. Bu veriler bir veri alış-veriş kartı kullanılarak bilgisayar ortamına alınmaktadır. Matlab ortamında YSA kullanılarak veri alış-veriş kartı ile gerçek zamanlı olarak hata tespit ve teşhis işlemi gerçekleştirilmektedir. Gerçekleştirilen deney düzeneğinin resmi Şekil 4.2’de verilmektedir.



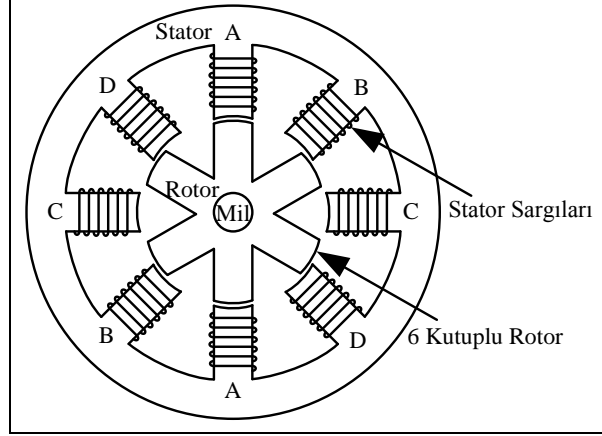
Şekil 4.2. Deney düzeneğinin resmi.

4.1. DENEY DÜZENEĞİNDE KULLANILAN CİHAZLAR

Deney çalışmada, statorunda 8 rotorda 6 kutup bulunan 1.38 KW gücünde ARM kullanılmaktadır. ARM'nin çalıştırılabilmesi için asimetrik köprü yapısında bir motor sürücü tasarımı gerçekleştirilmiştir. ARM sürücünün denetiminde Siemens S7-1200 PMD kullanılmaktadır. Motor sürücünün beslemesinde Lambda 3.3 KW gücünde regülatörlü gerilim kaynağı kullanılmaktadır. ARM'yi istenilen tork değerlerinde yüklemek için senkron alternatör kullanılmaktadır. ARM'nin devir bilgisi ölçmek için 1024 pals/tur çözünürlükte bir kuadroitik enkoder kullanılmaktadır. ARM'nin torkunu ölçmek için ± 10 Nm tork ölçebilen bir tork dönüştürücüsü kullanılmaktadır. ARM'nin kaynaktan çektiği akımı ölçmek için LEM LA55-P akım dönüştürücüsü kullanılmaktadır. ARM'nin kaynak gerilimini ölçmek için LEM LV25-P gerilim dönüştürücüsü kullanılmaktadır. Deney çalışmada ölçülen verilerin bilgisayar ortamına aktarılması için Advantech PCI 1716 veri alış veriş kartı kullanılmaktadır.

4.1.1. Deneysel çalışmada kullanılan ARM'nin yapısı ve teknik özellikleri

Deneysel çalışmada kullanılmak üzere tercih edilen 8/6 kutuplu ARM'nin iç yapısı Şekil 4.3'de dış görünümü ise Şekil 4.4'de verilmektedir.



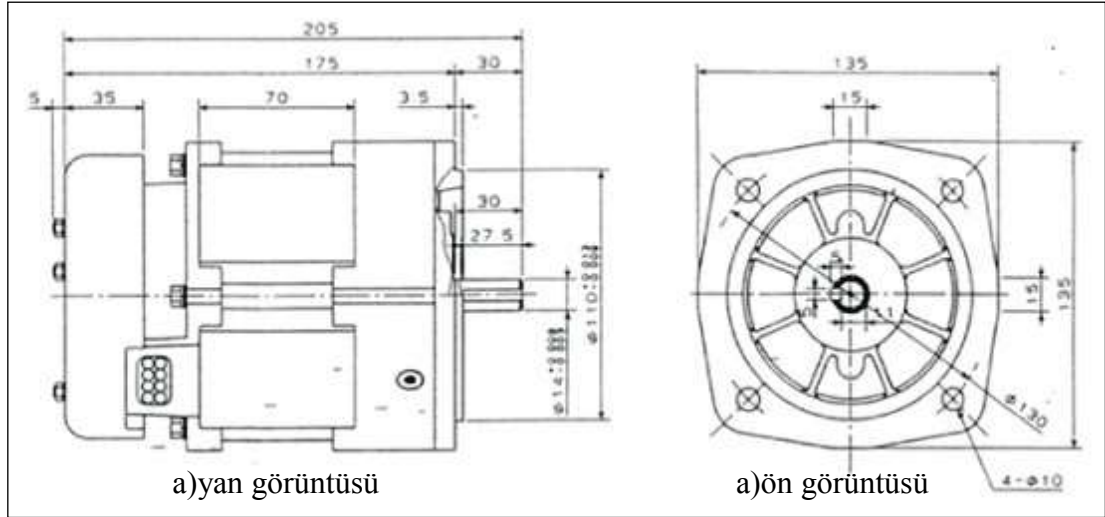
Şekil 4.3. 8/6 kutuplu ARM'nin iç yapısı.

ARM hem motor hem de güç üreten uygulamaları için uygundur. Motor 2,31 KW maksimum 1,34 KW sürekli güç üretebilmektedir. Motorun ürettiği maksimum tork değeri 3,4 Nm, maksimum devir değeri 15000 dev/dak'dır.

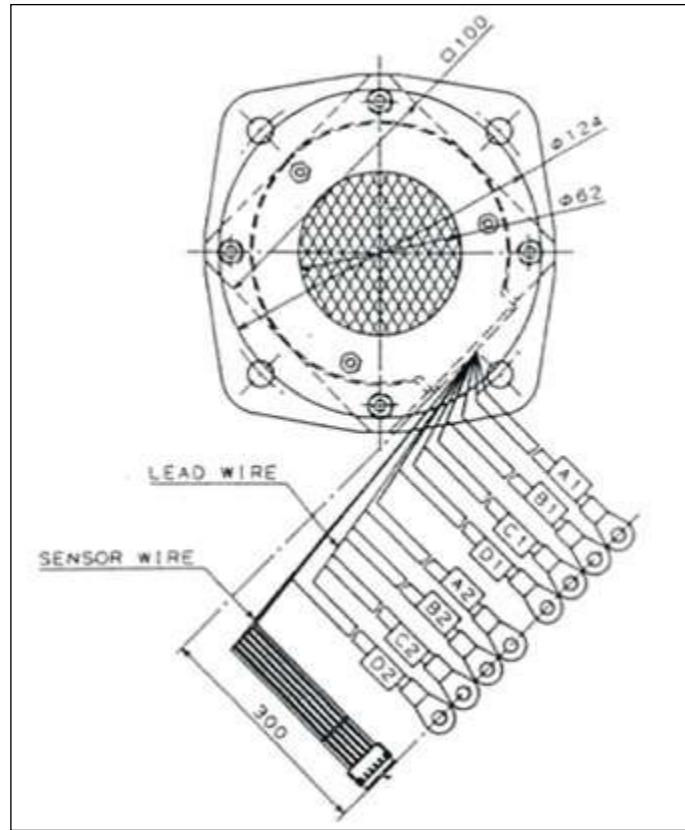


Şekil 4.4. ARM'nin dış görünümü.

AMC Technologies firmasının motorun ölçülendirilmiş ön ve yan görüntüleri Şekil 4.5'de, kablo bağlantıları Şekil 4.6'da verilmektedir.

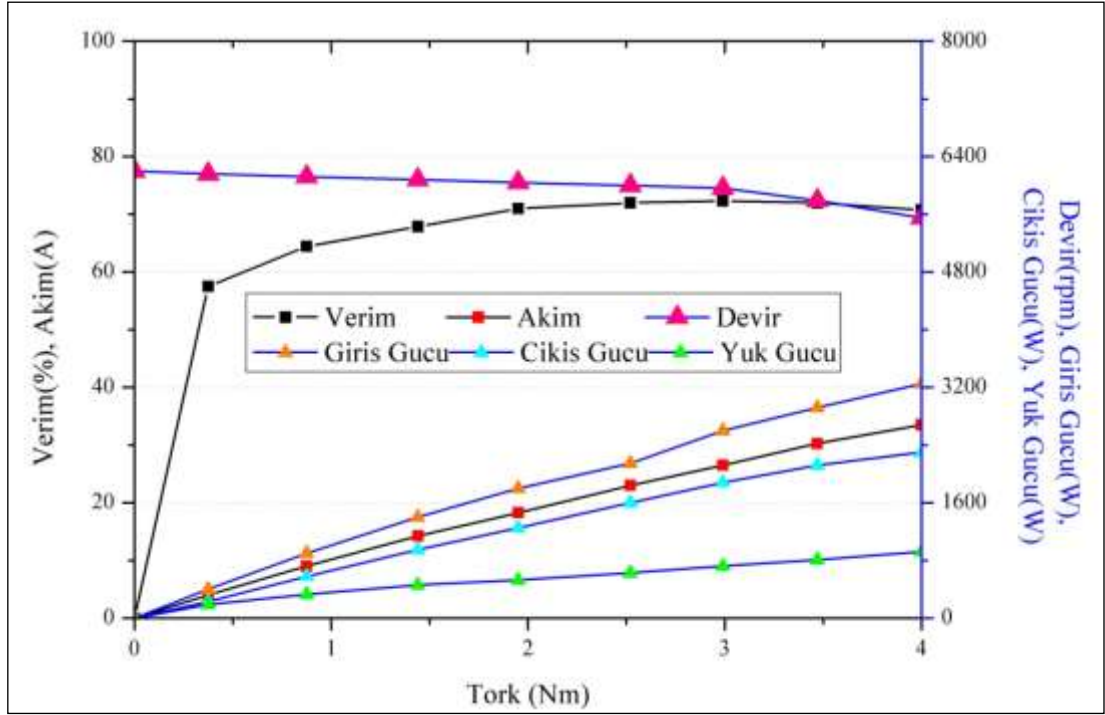


Şekil 4.5. ARM'nin fiziksel boyutları.



Şekil 4.6. ARM'nin kablo bağlantıları.

Motorun katalog verileri incelendiğinde; motor besleme gerilimi 96 V, bir faz sargı direnci $R_a=110 \text{ m}\Omega$, rotor konumu karşılıklı bir faz endüktansı $L_{AL}=2,06 \text{ mH}$, rotor konumu ortalanmış bir faz endüktansı $L_{UAL}=0,45 \text{ mH}$ 'dir.



Şekil 4.7. ARM'nin dinamik karakteristik eğrisi.

Şekil 4.7'de verilen ARM'nin dinamik karakteristik eğrisi incelendiğinde motor 6000 dev/dak devirdeyken motor yüklenmektedir. Bu grafikte motor maksimum 4 Nm moment üretecek yük ile yüklenmiştir. Motor 0,5 Nm - 4 Nm ürettiği tork değerlerinde yaklaşık % 70 verim ile çalışmaktadır.

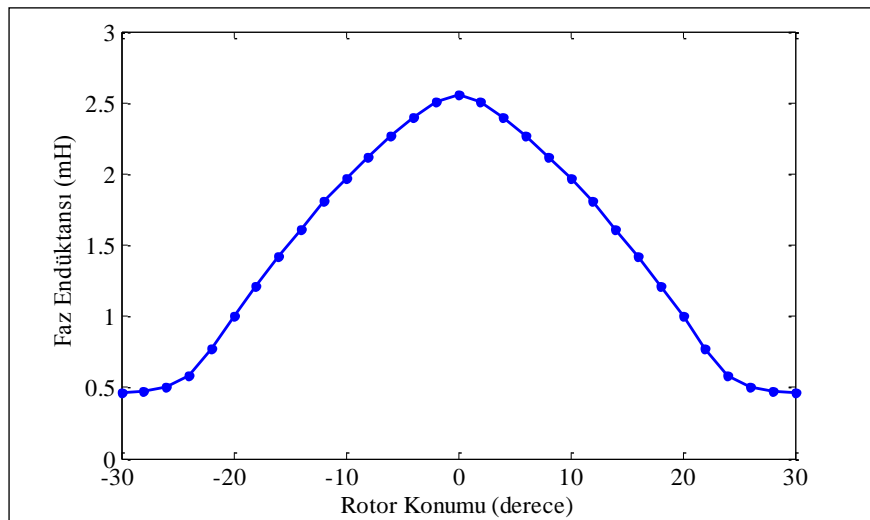
Deneysel çalışmada kullanılacak olan ARM'nin karakteristik özelliklerinin belirlenmesi için rotor konumuna göre faz endüktansı ölçülmüştür. Rotor konumuna ve akıma göre değişen faz endüktans değeri hesaplanmıştır. ARM'nin Matlab ortamındaki özellikli modelinin çalıştırılabilmesi için deneysel çalışmada kullanılan ARM'nin akım manyetik akı karakteristiğine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüzden motorun rotor konumu ve akıma göre endüktans değişimi verileri kullanılarak rotor konumu ve akıma bağlı değişen manyetik akı verileri hesaplanmıştır.

ARM'nin Faz Endüktansının Ölçülmesi: ARM'nin faz endüktansının ölçülmesi için hazırlanan düzenek Şekil 4.8'de verilmektedir. Motora tork dönüştürücüsü bağlanmıştır. Tork dönüştürücüsünün diğer ucu rotor konumuna göre sabitlenmektedir.



Şekil 4.8. ARM rotor konumuna göre faz endüktans ölçüm deney düzeneği.

ARM'nin A fazının rotor konumu karşılıklı ve ortalanmış rotor konumları için deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. 8/6 ARM'nin rotor karşılıklı konumu ile ortalanmış konumu arasında 30° açısal fark vardır. Rotor konumu karşılıklı iken faz endüktans değeri maksimum, rotor konumu ortalanmış iken faz endüktansı minimum olmaktadır. Bu yüzden ARM'nin rotor konumu karşılıklı konumu 0° olmak üzere -30° ile $+30^\circ$ arasında ikişer derecelik aralıklar ile rotor konumu kilitlenerek faz endüktans ölçümü gerçekleştirilmiştir. Deneysel ölçüm sonucunda elde edilen endüktans değerleri Şekil 4.9'da verilmektedir.

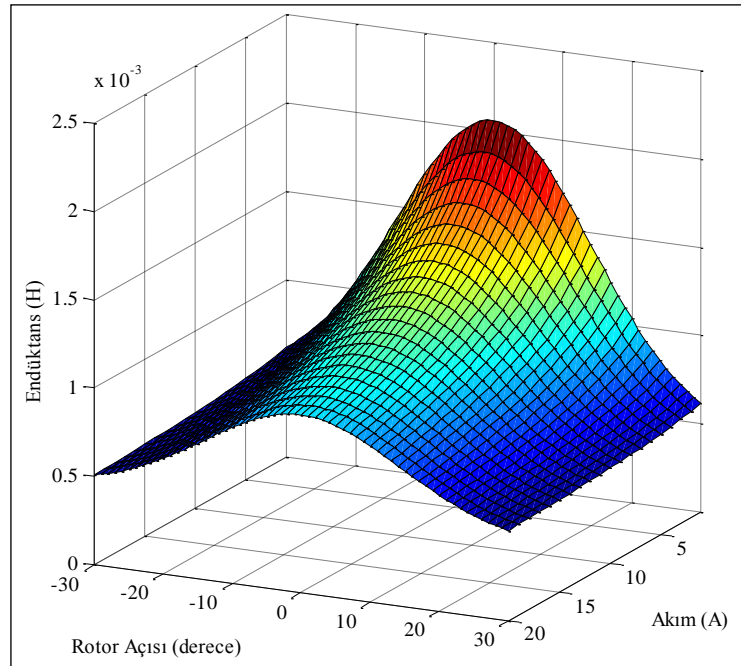


Şekil 4.9. ARM rotor konumuna göre faz endüktans değeri.

ARM'nin Endüktans Modeli: Deneysel çalışmada kullanılacak ARM'nin rotor konumuna ve akıma bağlı endüktans değeri hesaplanmaktadır. Eşitlik 4.1'de verilen endüktans ifadesi akım ve rotor konumuna bağlı bir Gaussian fonksiyonu ile minimum endüktans değerinin eklenmesi ile oluşturulmaktadır [53].

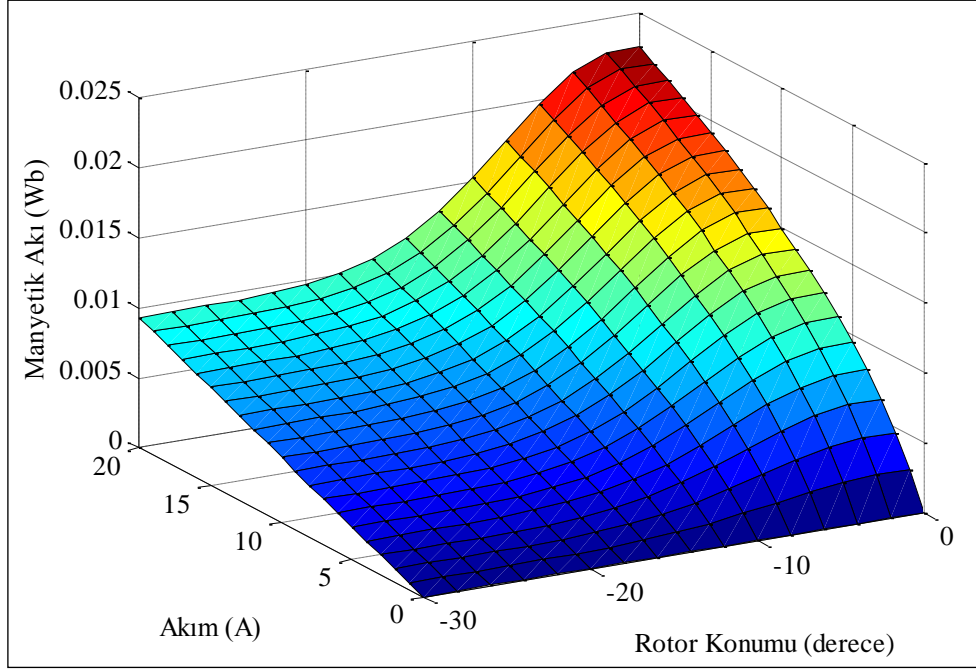
$$L(\theta, i) = L_u + \left(\frac{L_a}{1+i_{pu}} \right) \exp \left(- \left[\frac{\theta_{pu} - n}{\sigma} \right]^2 \right) \quad (4.1)$$

Eşitlik 4.1'de L faz endüktans değişimini, L_u minimum endüktans değerini, L_a+L_u maksimum endüktans değerini, i_{pu} birim akım değerini, θ_{pu} birim rotor konum değerini, n Gaussian fonksiyonunun orta noktasını, σ Gaussian fonksiyonunun genişlik değerini göstermektedir. Eşitlik 4.1 kullanılarak elde edilen faz endüktans değerleri Şekil 4.10'da verilmektedir.



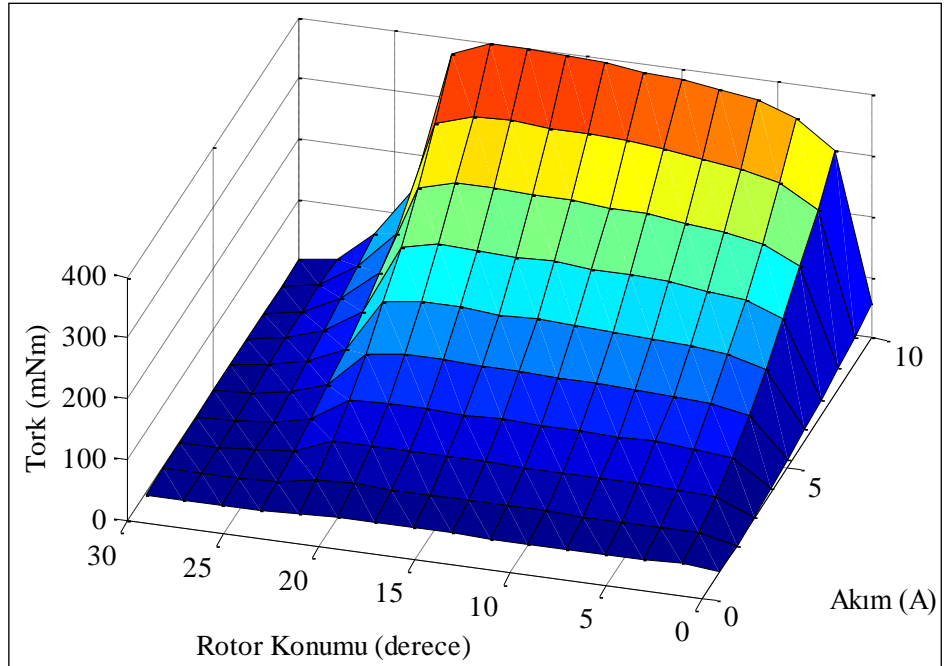
Şekil 4.10. Faz endüktans değişim grafiği.

Faz endüktans değerlerini Eşitlik 4.1'de yerine konularak 0 ile 10A arasında -30° ile 0° arasında motorun bir fazında meydana gelen manyetik akı değerleri hesaplanmaktadır. Hesaplanan faz manyetik akı değerleri Şekil 4.11'de verilmektedir.



Şekil 4.11. Faz akımı ve rotor açısına bağlı manyetik akı değişim grafiği.

ARM'nin Bir Fazının Statik Torkunun Ölçülmesi: ARM'nin rotoru 0° - 30° aralığında ikişer derecelik açılar ile kilitli şekilde faz bobini içinden 1'den 10 A'ya kadar akım geçirilerek motorun ürettiği tork değerleri ölçülmüştür. Ölçüm değerleri Çizelge 4.1'de grafiği Şekil 4.12'de verilmektedir.

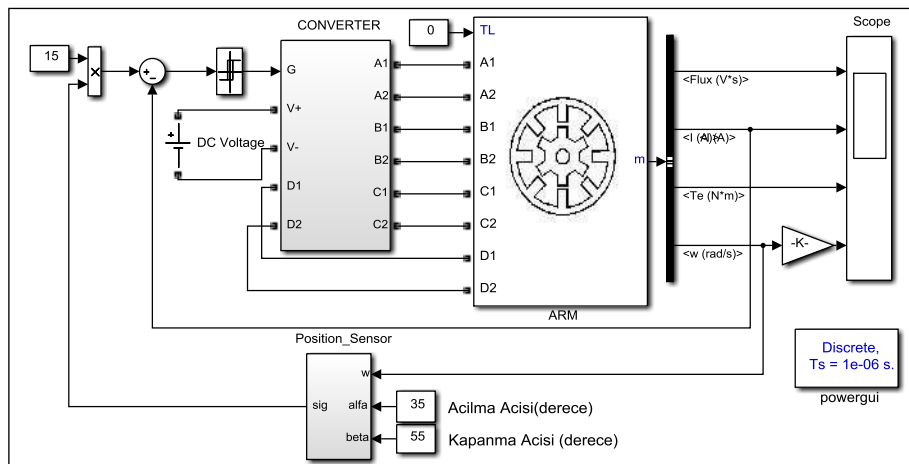


Şekil 4.12. ARM'nin faz akımı ve rotor açısına göre statik tork değer grafiği.

Çizelge 4.1. ARM'nin 0°-30° aralığında kilitli rotorda ürettiği tork değerleri.

ARM Bir Fazın Açısı ve Akımına bağlı Endüktans Değerleri										
Motor Torku (mNm)										
Açı/Akım	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A	9A	10A
0°	0,720	1,088	3,786	8,354	13,940	21,420	27,000	36,860	44,820	55,800
2°	5,300	13,664	30,000	51,620	78,520	111,260	150,040	196,100	244,600	299,000
4°	3,720	13,374	33,000	57,340	88,920	128,260	172,380	223,000	279,800	343,000
6°	3,696	14,272	34,420	60,600	92,540	133,160	180,320	234,200	295,400	365,800
8°	2,532	14,460	34,380	60,320	94,340	135,960	186,160	240,000	304,000	374,200
10°	3,932	16,008	35,740	61,760	96,680	138,600	189,280	246,400	310,800	382,400
12°	3,270	15,218	34,500	61,660	97,300	140,500	189,000	247,600	315,200	386,600
14°	4,824	16,020	37,340	65,320	100,120	142,280	194,620	253,400	318,800	393,800
16°	4,376	15,394	36,100	62,360	98,960	140,780	193,040	254,000	320,200	395,600
18°	5,608	16,442	37,280	64,880	103,000	145,560	196,360	256,800	324,200	399,200
20°	5,826	17,614	37,240	65,080	102,520	145,220	196,840	255,000	322,600	398,600
22°	3,722	16,356	35,840	61,300	94,380	137,100	184,280	240,400	303,600	373,200
24°	0,626	5,048	11,828	23,500	36,280	52,520	70,060	90,700	113,100	141,600
26°	0,626	2,486	5,800	9,654	16,592	22,340	32,000	40,360	50,520	62,420
28°	1,090	0,714	1,238	4,008	5,508	8,966	10,616	11,756	11,940	10,878
30°	0,752	0,752	0,752	0,752	0,752	0,752	0,752	0,752	0,752	2,440

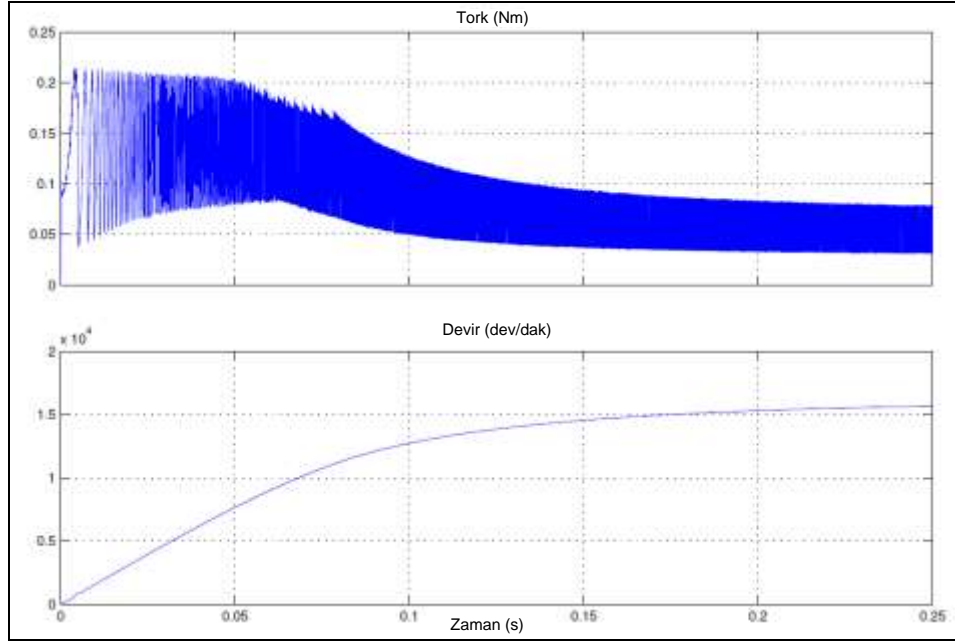
ARM'nin Simulink'te benzetimi: Deneysel çalışmada kullanılacak olan ARM'nin faz direnci, ataleti, rotor konumu ve akıma göre manyetik akı değerleri Simulink ARM modeline giriş parametresi olarak uygulanmaktadır. Bu sayede deneysel çalışmada kullanılan ARM'nin benzetimi yapılmaktadır. Benzetimi yapılan ARM modelinin açık çevrim benzetimi Şekil 4.13'de verilmektedir.



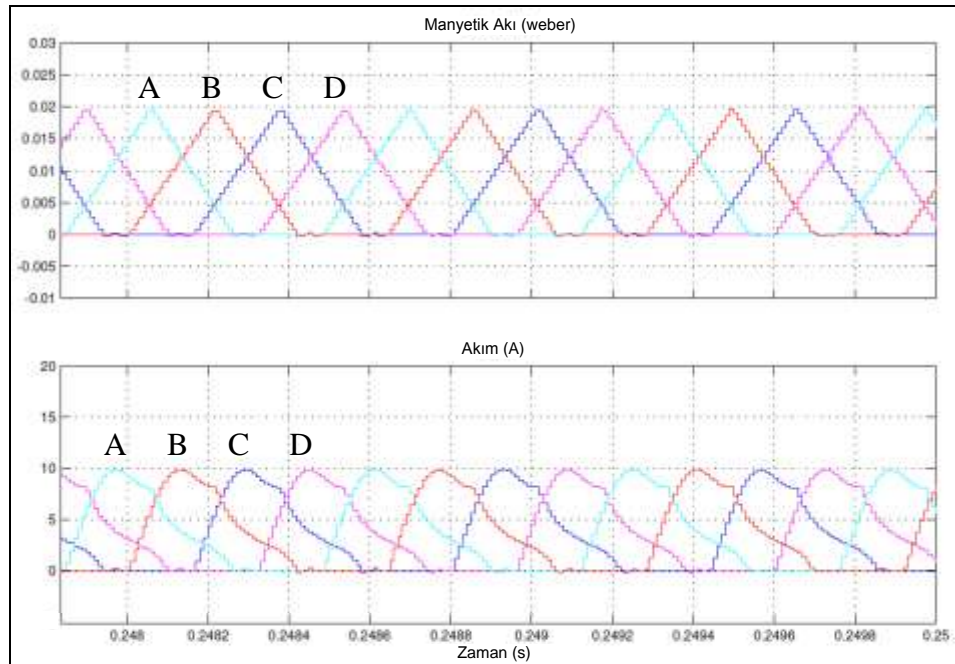
Şekil 4.13. ARM'nin Simulink açık döngü benzetim modeli.

ARM'nin açık çevrim çalışmasında elde edilen tork ve devir grafiği Şekil 4.14'te

verilmektedir. ARM benzetim modelinde motorun katalog değerindeki giriş parametreleri uygulandığında motorun maksimum devri olan 15000 dev/dak değerine ulaştığı görülmektedir. ARM'nin açık çevrim denetimsiz fazlara ait manyetik akı ve akım grafiği Şekil 4.15'te verilmektedir.

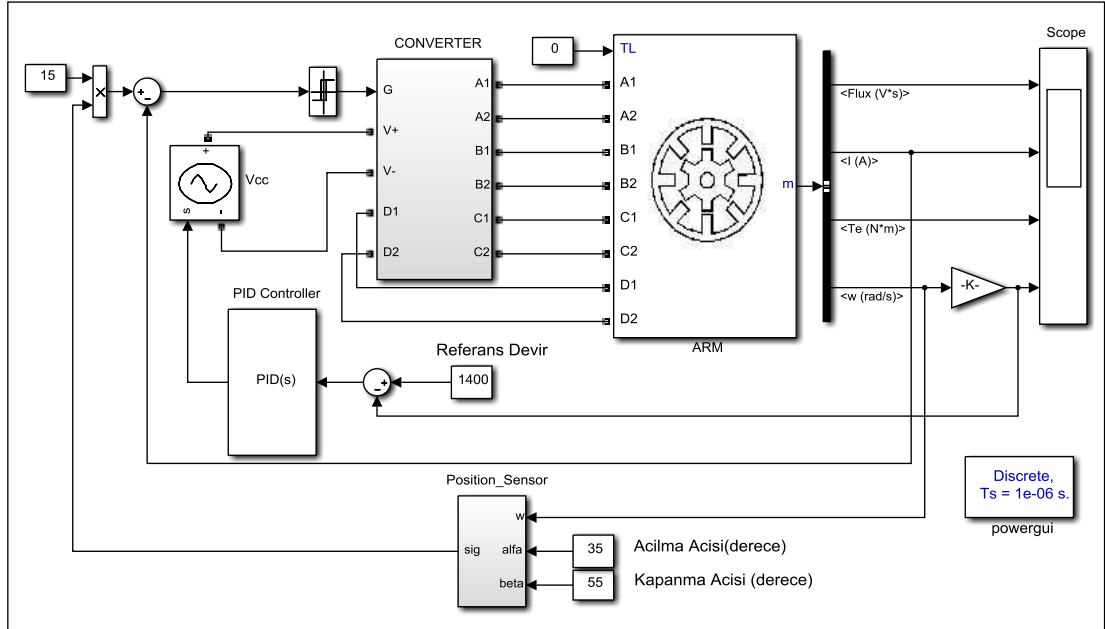


Şekil 4.14. ARM'nin açık döngü denetimsiz tork ve devir grafiği.

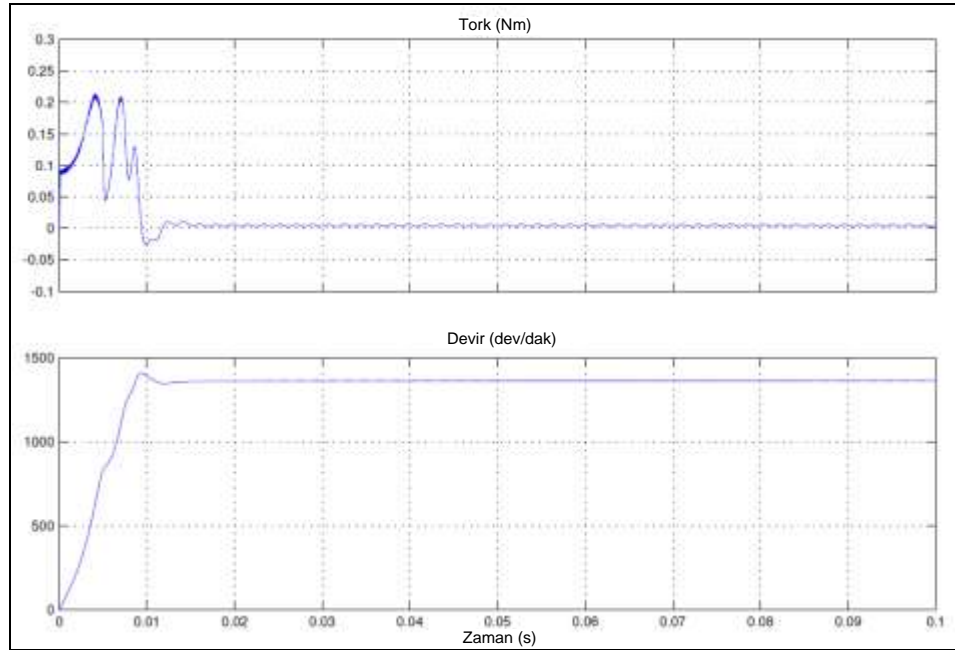


Şekil 4.15. ARM'nin açık döngü denetimsiz manyetik akı ve akım grafiği.

ARM modelinin 1400 dev/dak referans hızda PID denetimli Simulink modeli Şekil 4.16’da verilmektedir. Şekil 4.16’da PID denetleyiciye 1400 dev/dak referans devir ile ölçülen hız bilgisinin farkı hata girişi olarak verilmektedir.

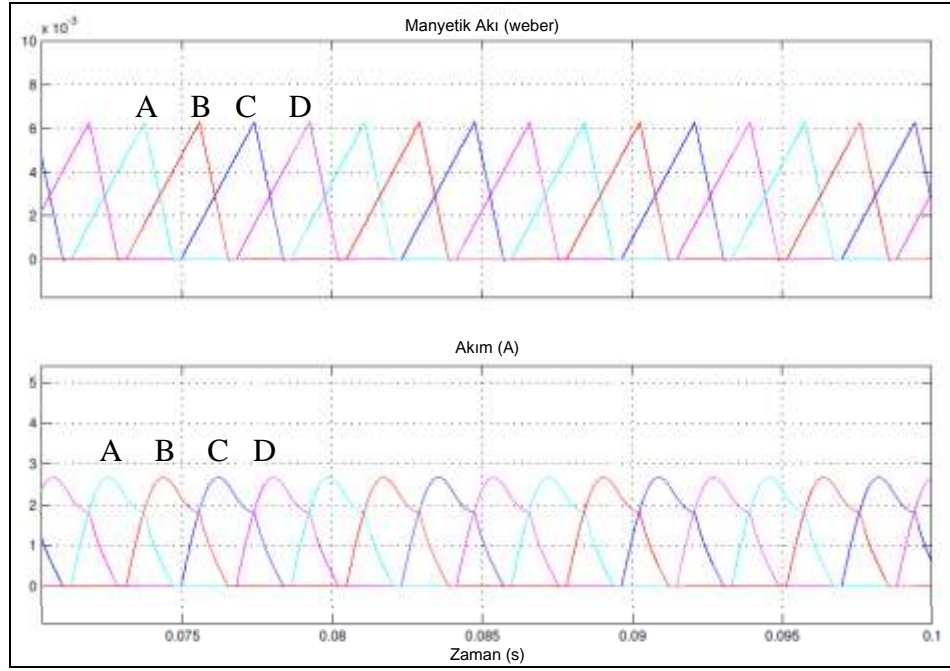


Şekil 4.16. ARM'nin kapalı döngü PID denetimli modeli.



Şekil 4.17. ARM'nin PID denetimli tork ve devir grafiği.

PID ile denetimi gerçekleştirilen modelin tork ve devir grafiği Şekil 4.17’de verilmektedir. Bu grafik benzetimi yapılan motor modelinin PID denetleyici ile 1400 dev/dak referans değerinde çalıştırılmıştır. Modelde motor 15 ms’de referans hız değerine ulaşmış ve referans değerinde sabit olarak çalışmaya devam etmektedir. ARM’nin PID denetimli manyetik akı ve akım grafiği Şekil 4.18’de verilmektedir.



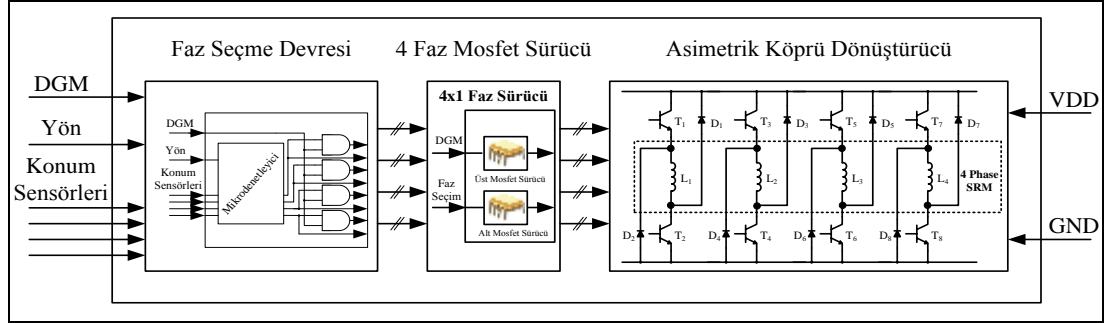
Şekil 4.18. ARM’nin PID denetimli manyetik akı ve akım grafiği.

4.1.2. ARM Dönüştürücü Tasarımı

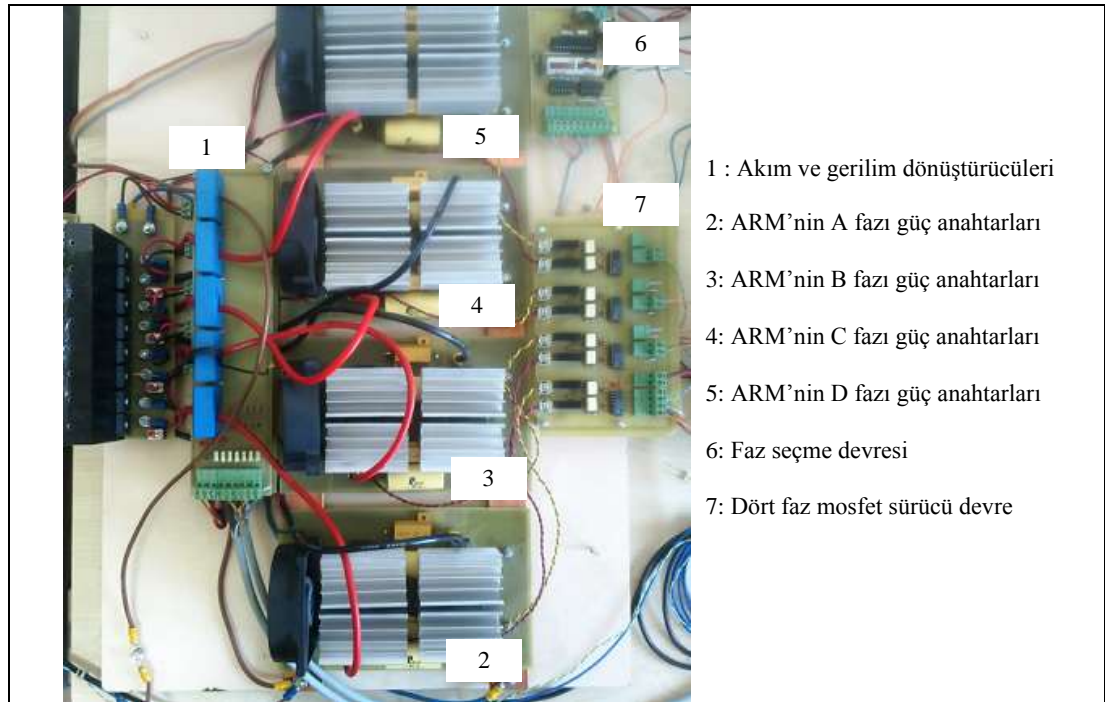
ARM’leri sürmek için birçok dönüştürücü kullanılmaktadır. Bu çalışmada ARM nin denetimi için asimetrik dönüştürücü tercih edilmiştir. Bu dönüştürücülerin enerji verimliliği yüksektir. Asimetrik dönüştürücüde motor sargı akımları birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir. Her fazda akımı, hem iletme hem de kesime sokmak için, sargı uçlarından her iki polariteye ters bağlanmış diyot mevcuttur. Kaynak gerilimini fazlara birebir uygulama özelliğine sahiptir. Kullanılan ek anahtarlar ile kesim süresince depolanan enerji güç kaynağına geri gönderilir.

Tasarlanan ARM sürücüsü (Şekil 4.19); faz seçme devresi, dört faz kapı sürücü devresi ve dört faz asimetrik dönüştürücü devresinden oluşmaktadır. Faz seçme

devresi ARM'nin konum bilgisi ve yön bilgisine göre tetiklenecek fazı belirlenmektedir. Faz sürücü devre asimetrik dönüştürücü yapısında bulunan mosfetlerin sürülmesi için kullanılmaktadır. Asimetrik dönüştürücü devrenin resmi Şekil 4.20'de verilmektedir.



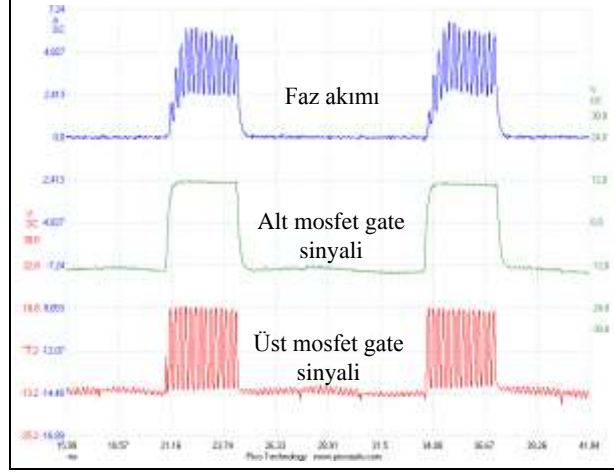
Şekil 4.19. 4 Faz ARM sürücü blok şeması.



Şekil 4.20. 4 Faz ARM sürücü devre resmi.

Gerçekleştirilen asimetrik dönüştürücünün bir fazına ait akım ve anahtarlama elemanlarının kapı gerilimleri Şekil 4.21'de verilmektedir. Bir fazdan çekilen akım alt mosfet iletimde iken üst mosfetin kapı sinyaline bağlı olarak değişmekte ve ortalama değeri zaman içerisinde artmaktadır. Motorun bir faz gerilimi üst ve alt

mosfetler iletimde iken pozitif, yalıtımda iken negatiftir. Bu mosfetler yalıtımda iken bobin üzerinde biriken enerji kaynağa diyotlar aracılığıyla aktarılmaktadır.



Şekil 4.21. Deneysel çalışmada kullanılan asimetrik dönüştürücünün bir fazına ait akım ve anahtarlama sinyalleri.

4.1.3. PMD ve Dokunmatik Panel

PMD temel mantıksal işlemler zamanlama, sayma, veri işleme, veri kaydırma gibi fonksiyonları programlama desteğiyle gerçekleştiren ve buna göre girişleri değerlendirip çıkışlara atama yapan tümleşik bir cihazdır. Bu cihazlar teknolojik açıdan kontrol sistemlerine yeni boyutlar kazandırmakta ve klasik röleli kumanda sistemlerine göre daha işlevsel ve esnek bir kullanım sağlamaktadır.

Siemens firmasının yeni nesil S7-1200 PMD ile sayma, ölçme, kapalı çevrim kontrol ve konum kontrolü gibi çok farklı endüstriyel uygulamalarında kullanılabilecek çok yönlü bir denetleyicidir. Bu PMD'nin 6 adet hızlı sayıcı girişi sayesinde artırılmış enkoderleri hassas olarak izlemek, frekans ölçmek, hızlı proses sinyallerini saymak mümkündür. S7-1200'ün üzerindeki entegre iki adet hızlı çıkış, darbe dizisi (pulse train outputs, PTO) veya darbe genişlik modülasyonu yapmak üzere kullanılabilir. Bu özellikleri ile kapalı çevrim uygulamalarda rahatlıkla kullanılabilir.

PMD'nin hızlı çıkışı DGM olarak ayarlandığında sabit periyot içerisinde görev saykılının oran yüzdesi değiştirilerek motor hızını kontrol etmek için

kullanılabilmektedir. S7-1200 Step motorların ve servo sürücülerin açık çevrim, hız ve konum kontrolünü destekler. S7-1200 basit süreç kontrol uygulamaları için 16 adet PID (Proportional Integral Derivative, PID) kontrol çevrimini destekler. Bu kontrol çevrimleri PID kontrol bloğu kullanılarak kolayca gerçekleştirilebilir. Aynı zamanda S7-1200, optimum kazanç, integral zamanı ve türev zamanlarının hesaplanması için otomatik PID ayarlamasını desteklemektedir. Tek kontrol çevrimine ait parametrelerin hem otomatik hem de manüel olarak ayarlanmasına olanak tanır. Ayrıca referans parametresi ve kontrol edilen parametrenin gerçek zamanlı olarak grafiksel olarak izlenmesini sağlar. Siemens S71200 PMD resmi Şekil 4.22’de verilmektedir.



Şekil 4.22. Siemens S7-1200 PMD.

Siemens firmasının S7-1200 PMD de Kapalı çevrim kontrol görevlerini kolayca SIMATIC STEP 7 yazılımı kullanarak denetleyici bir blok olarak ladder diyagrama yerleştirilebilmektedir. Kullanıcı programında denetleyici bloğu yerleştirildikten sonra, set değeri, süreç değeri ve manipüle edilmiş değişkenleri rahatlıkla izleyebilmektedir. Bu PMD’ler iki farklı PID kontrol algoritması kullanılabilmektedir: Bunlar; sürekli kontrol ve darbe kontrolü için PID ve 3 Step Valfler ve kapaklar için step PID kontrolüdür.

PID parametreleri istenirse manüel olarak girilebilir veya program içerisinde bulunan iki aşamalı autotuning ile de otomatik olarak ayarlanabilmektedir. Kazanç için en uygun parametreler, integral zamanı, türev zamanı başlangıç optimizasyon ve ince ayar aşamada otomatik olarak hesaplatılır [54]. Bu özellik ile denetimi zor olan sistemlerin üstesinden kolaylıkla gelinebilir. Ayrıca PMD ye bağlanacak kontrol paneli ile, gerçek zamanlı grafik, kontrol döngüsünü izleme, autotuning ve

denetleyiciyi elle kontrol edilmesinde izin vermektedir.

SIMATIC HMI (Human Machine Interface) Basic Paneller yeni SIMATIC S7-1200 kompakt kontrolör ile tam uyum sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. SIMATIC S7-1200 kompakt otomasyon uygulamaları için basit kontrol ve görüntüleme seçenekleri sunacak şekilde SIMATIC HMI Basic Panellerle mükemmel bir entegrasyon sağlar. SIMATIC Basic paneller sezgisel kullanım için dokunmatik ekrana sahiptir. SIMATIC HMI Basic Paneller entegre PROFINET portuna sahiptir. Bu port denetleyici ile haberleşmeyi, parametre ve konfigürasyon verilerinin aktarımını için kullanılır. SIMATIC S7-1200 denetleyiciye entegre PROFINET portu denetleyici ve SIMATIC HMI Basic panellerle etkileşimi kolay ve güvenilir kılar. Siemens SIMATIC HMI dokunmatik panel resmi Şekil 4.23’de verilmektedir.



Şekil 4.23. Siemens SIMATIC HMI dokunmatik panel resmi.

4.1.4. Güç Kaynağı

Deneysel çalışmada motor besleme gerilimini sağlamak için TDK-Lambda

firmasının 100V 33A'lık programlanabilir güç kaynağı kullanılmaktadır. Bu güç kaynağının gerilimi 0,1V, akım sınır değeri 0,1A artım miktarları ile ayarlanabilmektedir. Aynı zamanda güç kaynağı paralel port aracılığı ile bilgisayar ortamından akım ve gerilim ayarları yapılabilmektedir. Güç kaynağının resmi Şekil 4.24'te verilmektedir.



Şekil 4.24. Programlanabilir güç kaynağı.

4.1.5. Senkron Alternatör

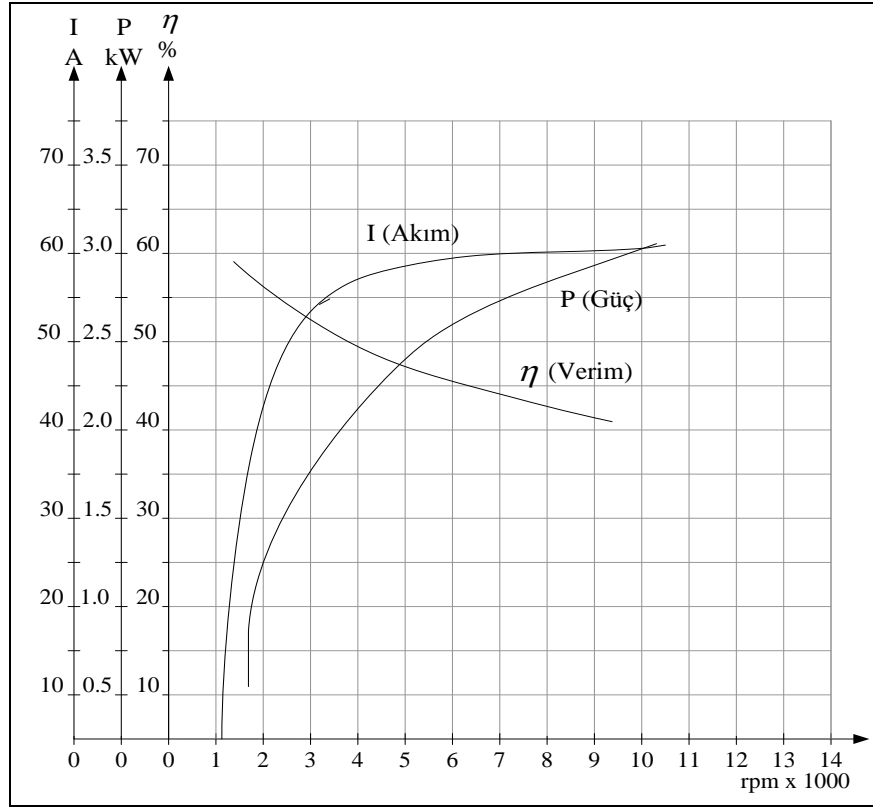
Doğrusal olmayan yük olarak senkron alternatör kullanılmaktadır. Alternatörün resmi Şekil 4.25'te verilmektedir. Mako A125R model alternatörü 14 V'da 55 A akım üretebilmekte ve % 55 verimle çalışmaktadır. Alternatör performans grafiği Şekil 4.26'te verilmektedir.



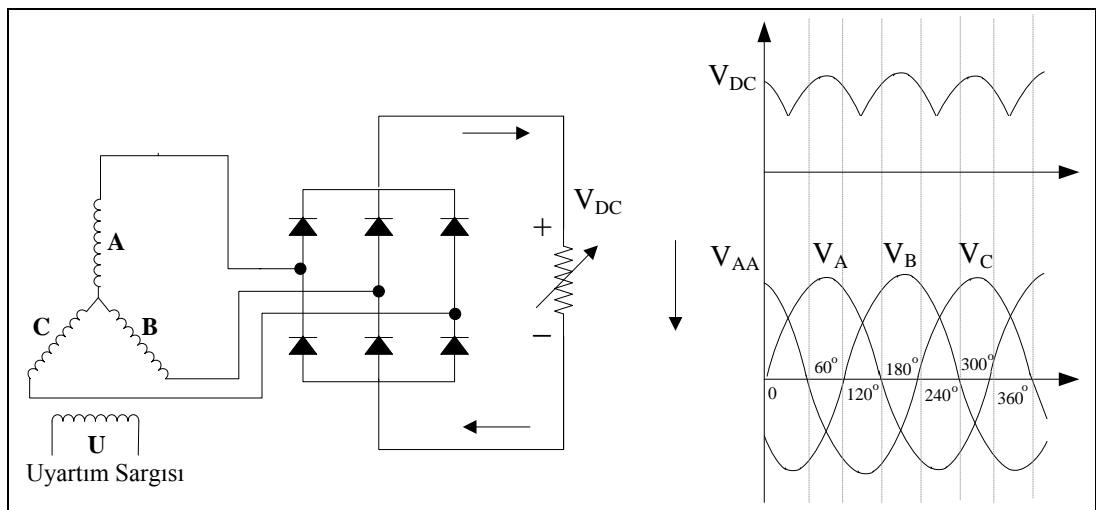
Şekil 4.25. Senkron alternatör.

Alternatörün regülâtörü devre dışı bırakılmıştır. Alternatörün uyarım sargısı kontrol edilerek doğrusal veya doğrusal olmayan yük elde edilebilmektedir. Senkron

alternatör bağlantı şeması Şekil 4.27’de verilmektedir. Alternatörün verimi ve ürettiği güç değerleri kullanılarak ARM’nin mekanik olarak yüklenme miktarı hesaplanabilmektedir.



Şekil 4.26. Alternatör performans grafiği.



Şekil 4.27. Senkron alternatör bağlantı şeması.

4.1.6. Enkoder

Motorun devrini ölçmek için EN5810 serisi 1024 puls/tur çözünürlükte kuadroitik enkoder kullanılmaktadır. Enkoder maksimum 6000 dev/dak değerine kadar ölçüm yapabilmektedir. Enkoderin resmi Şekil 4.28’de verilmektedir.



Şekil 4.28. Kuadroitik enkoder.

4.1.7. Tork dönüştürücüsü

Deneysel çalışmada tork ölçümünde kullanılmak ETH Messtechnik firmasının ürettiği tork dönüştürücüsü tercih edilmiştir (Şekil 4.29).

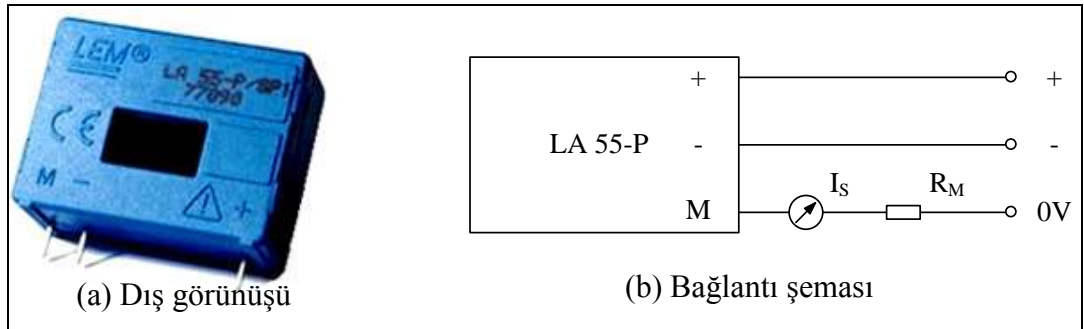


Şekil 4.29. Tork dönüştürücüsü.

Bu dönüştürücü 0-10 Nm aralığındaki burulma torkunu % 0,5 doğrulukla yapmaktadır. Dönüştürücü besleme gerilimi 11,5-30 V'dur. Dönüştürücü çıkışında ± 5 V arası analog gerilim üretmektedir. Çalışma sıcaklığı 0-60° C'dir. Çıkış tepkime süresi maksimum 2 ms'dir. Dönüştürücü 22000 dev/dak hıza kadar tork ölçümü yapabilmektedir.

4.1.8. Akım Dönüştürücüsü

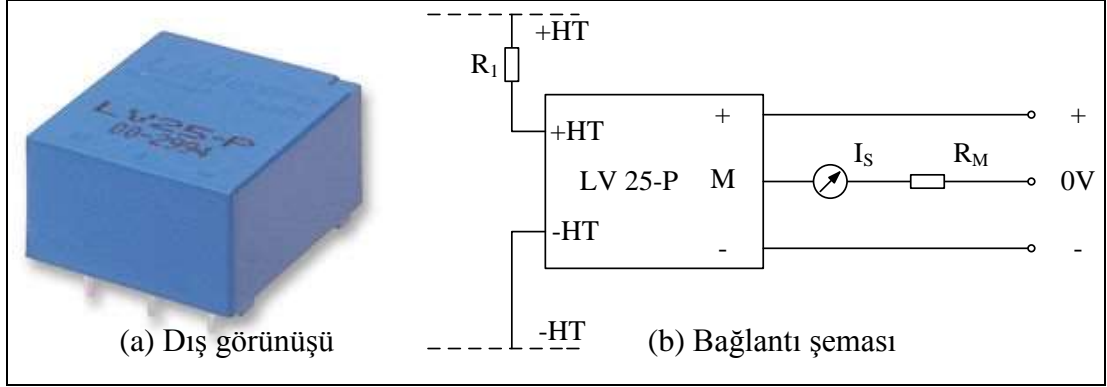
ARM'nin faz akımlarını ve toplam akım değerini ölçmek için LA-55p akım dönüştürücüsü kullanılmaktadır. Şekil 4.30'de LA-55p dönüştürücüsü dış görünüşü ve bağlantı şeması verilmektedir. LA-55P gerilim dönüştürücüsü yüzde $\pm 0,65$ doğruluğa, yüzde 0,15'den küçük doğusallığa sahiptir. Akım dönüştürücüsünün tepki süresi 1 μ s ve akım dönüştürme oranı 1:1000'dir.



Şekil 4.30. LA-55P akım dönüştürücüsü.

4.1.9. Gerilim Dönüştürücüsü

ARM'nin faz gerilimleri ve kaynak gerilim değerini ölçmek için LV-25P gerilim dönüştürücüsü kullanılmaktadır. Şekil 4.31'de LV-25P dönüştürücüsünün (a) dış görünüşü ve (b) bağlantı şeması verilmektedir.

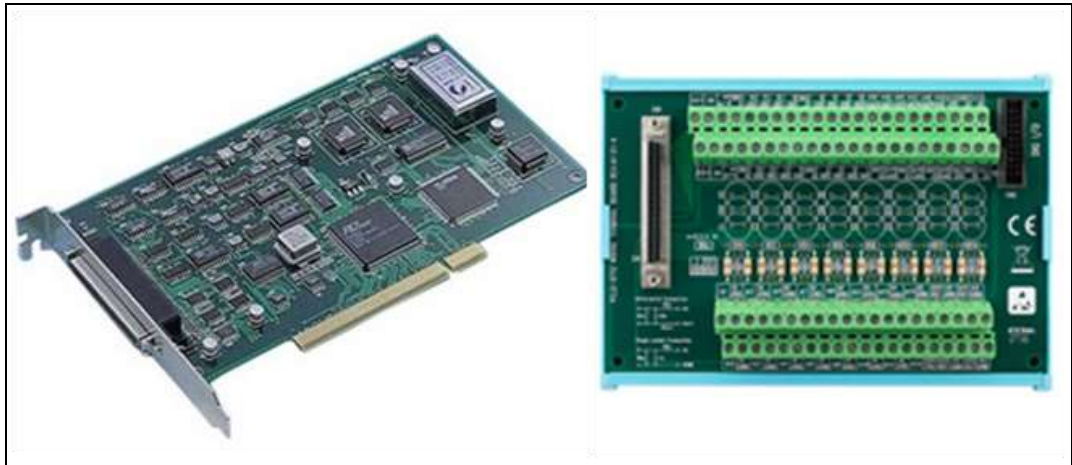


Şekil 4.31. LV-25P gerilim dönüştürücüsü.

LV-25P gerilim dönüştürücüsü yüzde $\pm 0,8$ doğruluğa ve yüzde 0,2'den küçük doğrusallığa sahiptir. Gerilim dönüştürücüsünün tepki süresi $40 \mu s$ ve gerilim dönüştürme oranı 2500:1000'dir.

4.1.10. Veri Alış-Veriş Kartı

Sistemde ölçülen parametrelerin bilgisayar ortamına aktarılması için PCI 1716 veri alış veriş kartı kullanılmaktadır. PCI 1716 çok işlevli yüksek çözünürlüklü bir veri alış veriş kartıdır. 250 kS/s örnekleme oranı, 16 bit analog/sayısal dönüştürücü ve A/D dönüştürücü için dahili ilk giren ilk çıkar (First in first out, FIFO) 1 Kb belleğe sahiptir. Şekil 4.32'de PCI 1716 veri alış veriş kartı ve terminal bordu verilmektedir.



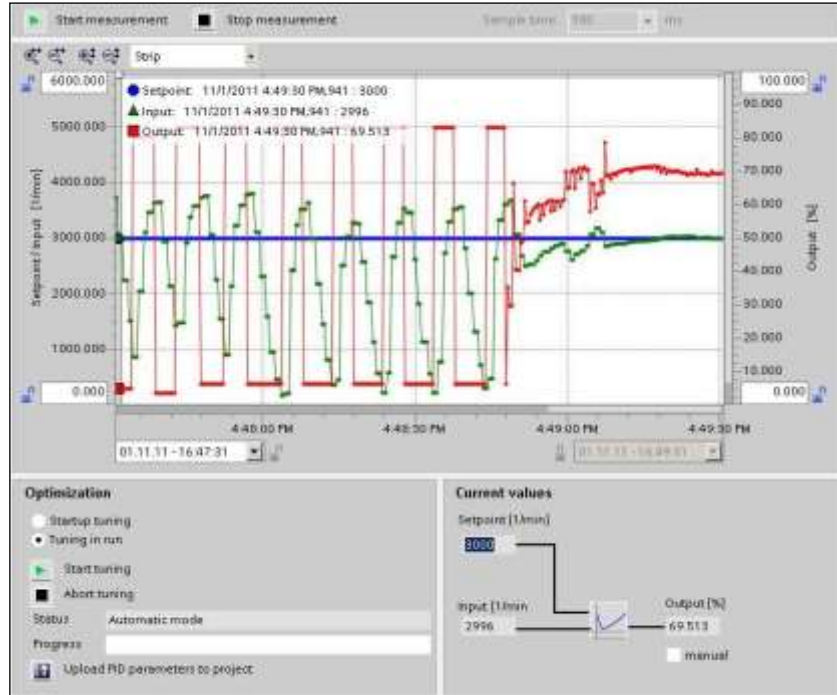
Şekil 4.32. Veri alış veriş kartı ve terminal bordu.

Bu kart 16'ya kadar tek, 8 diferansiyel A/D giriş kanalı ya da bu ikisinin birleşimi

şeklinde kullanılabilir. İki 16 bit D/A çıkış kanalı, 16 dijital giriş çıkış kanalı ve bir 10 Mhz 16 bit sayıcı kanalına sahiptir. Algılayıcılardan gelen bilgilerin karta aktarılması için Advantech PCLD 8712 terminal bordu kullanılmaktadır. PCLD serisi terminal bordu endüstriyel uygulamalardaki sinyallerin kablolanması için tasarlanmış evrensel vidalı parçalardan oluşur.

4.2. ARM'İN PMD KULLANARAK PID İLE DENETİMİ

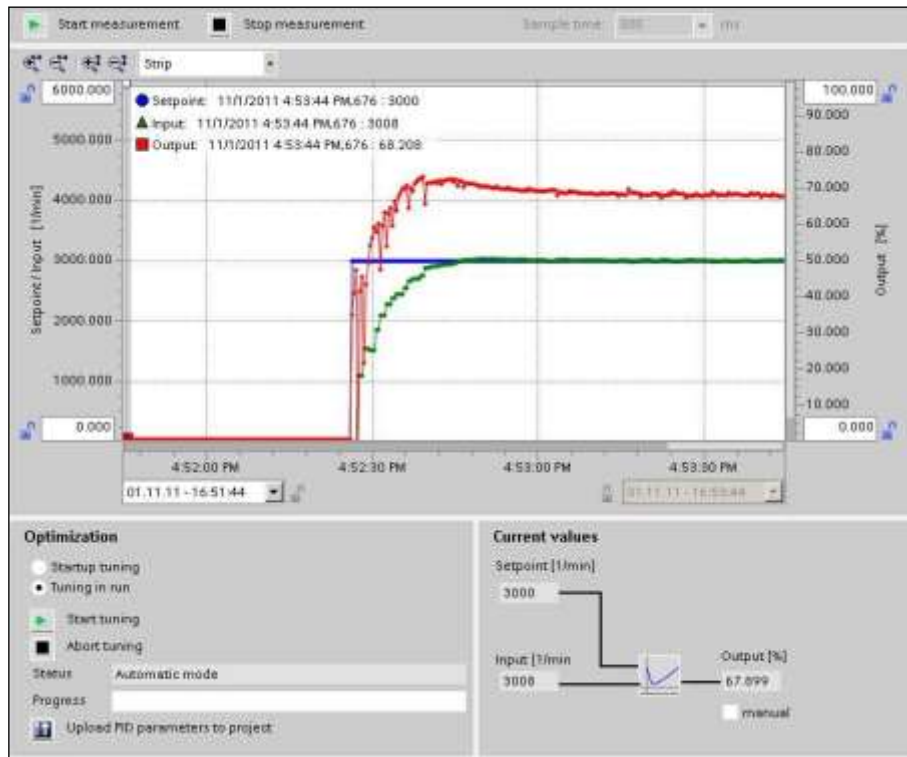
ARM'nin hız denetiminde kullanılan Siemens firmasının S7-1200 PMD'sine yazılan yazılım, bir dokunmatik panelle kontrol edilebilmektedir. Dokunmatik panelden alınan referans ve enkoderden alınan devir bilgisinin farkı hata bilgisi olarak PMD'nin PID bloğuna uygulanmaktadır. ARM, PID kontrol yöntemi ile dokunmatik panelden girilen referans hız değerinde çalıştırılmaktadır. PMD ARM'nin verilen referans hız değerine ulaşması için gerekli DGM sinyalini ve motorun yön bilgisini motor sürücüyeye göndermektedir. ARM'nin denetimi için S7-1200 PMD'de PID parametreleri otomatik olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.33'de 3000 dev/dak devrinde PID parametrelerinin optimize edilmesinin ekran görüntüsü verilmektedir.



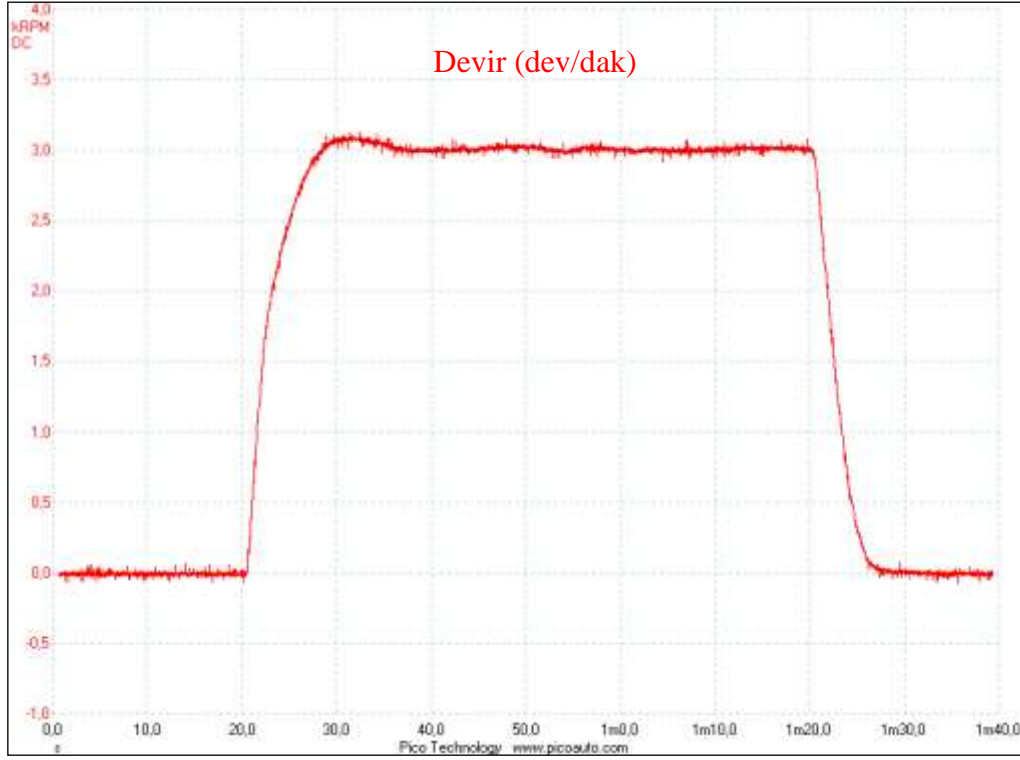
Şekil 4.33. S7-1200 PMD için PID parametrelerinin optimize edilmesi.

ARM'nin 3000 dev/dak için PMD'nin PID parametrelerinin ayarlandığı yazılımda ölçülen devir grafiği Şekil 4.34'de verilmektedir. Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'de mavi çizgi; ayar noktasını, yeşil çizgi; ARM devir bilgisini, kırmızı çizgi, PMD'nin DGM görev saykılı değerlerini ifade etmektedir.

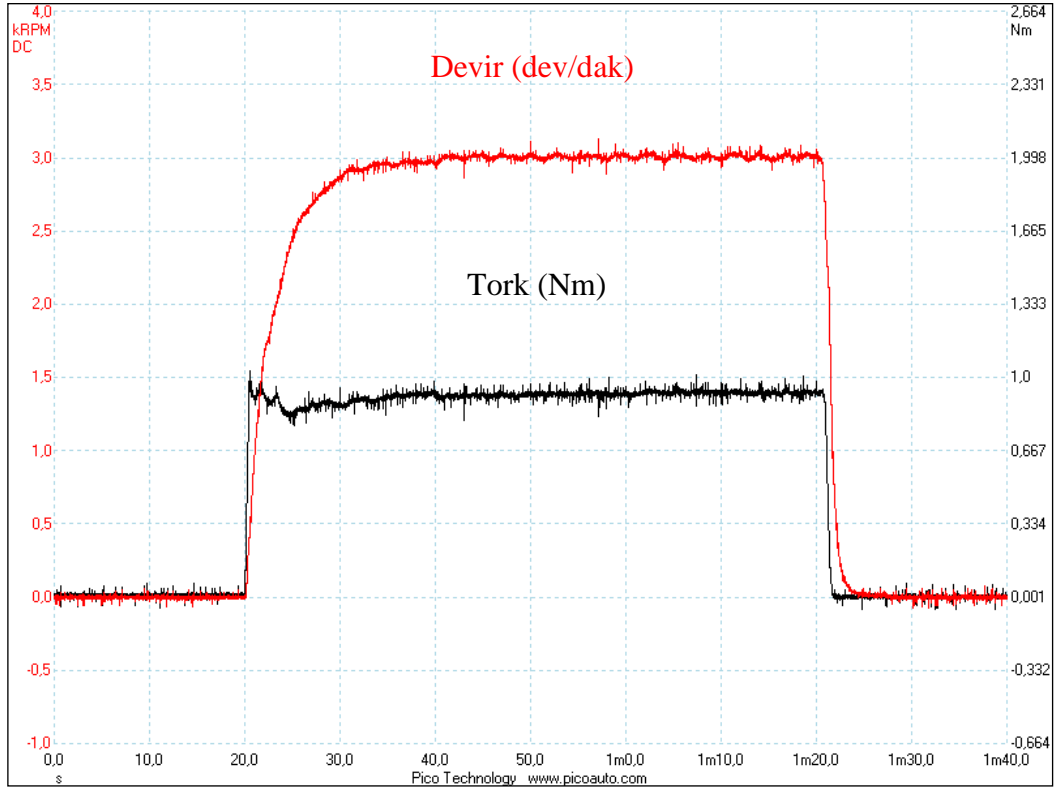
ARM'nin PID denetimli 3000 dev/dak hızında yapılan yüksüz ölçüm sonuçları Şekil 4.35'de, yarım yüklü ölçüm sonuçları Şekil 4.36'da ve tam yüklü ölçüm sonuçları Şekil 4.37'de verilmektedir.



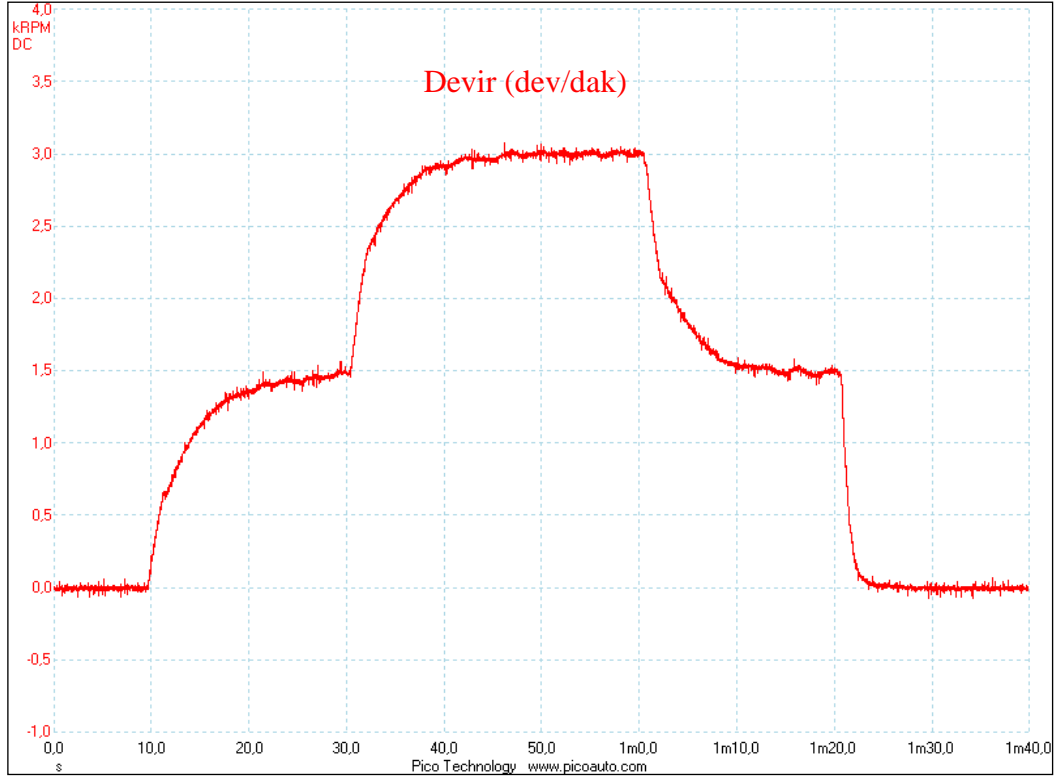
Şekil 4.34. ARM'nin 3000 dev/dak için PMD'nin PID parametrelerinin ayarlandığı yazılım ekran görüntüsü.



Şekil 4.35. ARM'nin 3000dev/dak'da yüksüz devir grafiği.



Şekil 4.36. ARM'nin 3000dev/dak'da yarım yüklü devir ve tork grafiği.



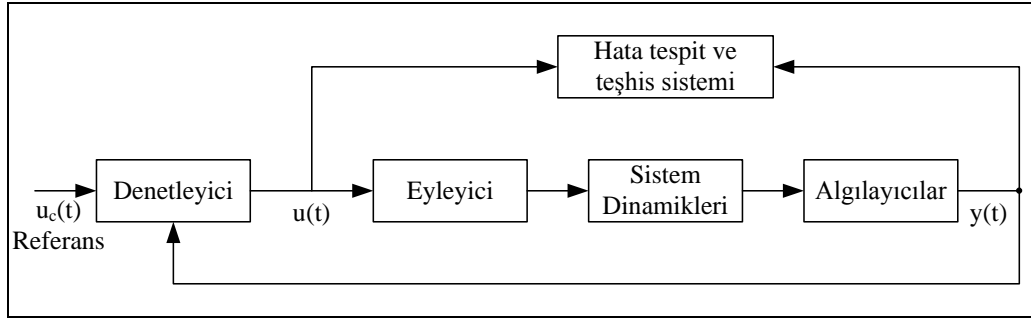
Şekil 4.37. ARM'nin 0-1500dev/dak-3000dev/dak'da tam yüklü devir grafiği.

4.3. HATA TESPİTİNDE KULLANILACAK PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ

ARM'lerde meydana gelen hatalarının tespit ve teşhisinde kullanılacak doğru parametrelerin belirlenmesi hata tespit başarımı için çok önemlidir. Bu yüzden ARM'de meydana gelen hataları, motora ait hangi parametrelerin ölçülmesi gerektiğini belirlenmesinde en önemli unsurdur. ARM'de meydana gelen aşırı yük hatası, fazların açık devre ve kısa devre hataları durumunda, motorun akımı, motor sürücünün DGM görev saykılı ve motorun tork değeri hatanın teşhisinde belirleyici parametrelerdir. Medyana gelen hatanın kaynak hatası ve kilitli rotor hataları durumunda ise kaynak gerilimi ve motorun devir değeri hataların teşhisinde belirleyici parametrelerdir. Bu yüzden ARM hatalarının tespitinde; kaynak gerilimi, kaynak akımı, motorun devri, motorun torku ve motor sürücü DGM sinyali görev saykılı giriş parametreleri olarak seçilmiştir [27,31,32,45-48].

Hata teşhis sisteminde hata tespit bloğuna denetleyici çıkış sinyali ve denetlenen

sisteme bağılgılayıcılarından elde edilen parametreler uygulanır. Burada denetlenen sistem eyleyiciler, sistem dinamikleri ve algılayıcılardan oluşmaktadır. Bu parametrelere göre denetlenen sistem üzerinde hata tespit ve teşhis işlemi gerçekleştirilir [55]. Genel bir hata teşhis sisteminin blok şeması Şekil 4.38’de verilmektedir.



Şekil 4.38. Hata teşhis sisteminin blok şeması.

4.4. MATLAB ORTAMINA VERİ AKTARIMI

ARM hatalarının tespit ve teşhis işlemlerinde kullanılacak olan YSA’ların eğitimleri ve eğitilmiş ağların testleri için kaydedilmiş verilere ihtiyaç vardır. Bu yüzden ARM’de meydana gelen hata durumları için motora ait veriler Matlab ortamında Advantech veri alış veriş kartı kullanılarak aktarılmaktadır. Matlab ortamına verilerin alınabilmesi için iki yöntem vardır. Bunlardan biri m-file kod yazmaktır. Bir diğer yöntem ise simulink ortamında model oluşturmaktır. Advantech veri alışveriş kartı ile gerçek zamanlı verilerin bilgisayar ortamına aktarılması için kullanılan m-file kod örneği aşağıda verilmektedir.

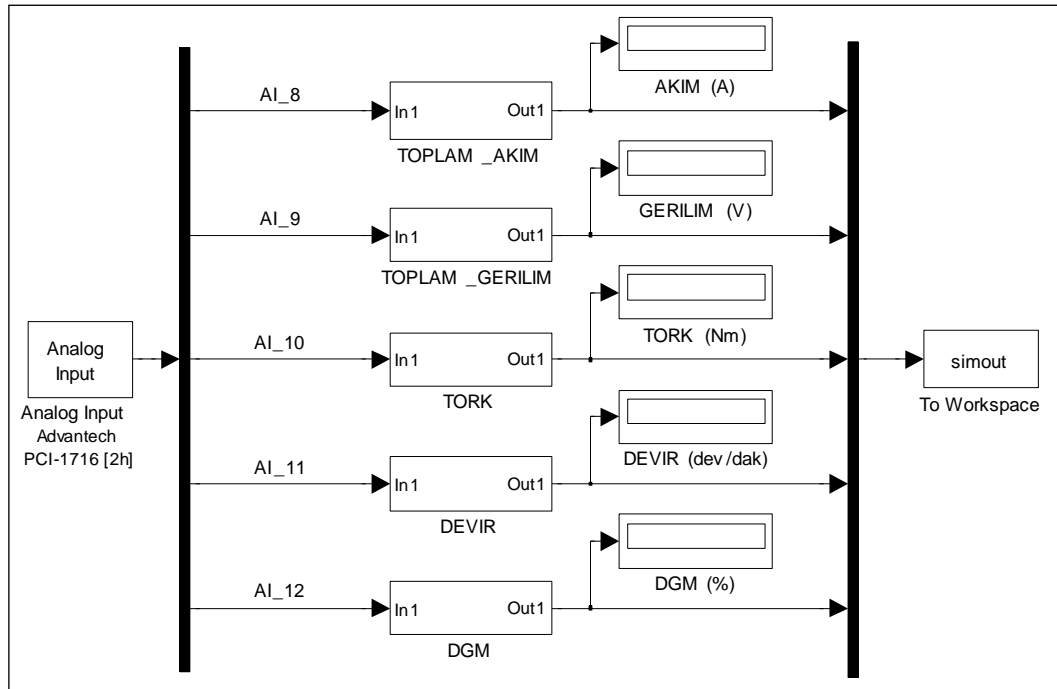
```

ai_daq = analoginput('advantech');           %veri alış veriş kartını tanımla
addchannel(ai_daq,8);                         % toplam akım
addchannel(ai_daq,9);                         % toplam gerilim
addchannel(ai_daq,10);                       %tork
addchannel(ai_daq,11);                       %devir
addchannel(ai_daq,12);                       %pwm
start(ai_daq)                                % veri alış veriş kartı aktif
data_daq = getdata(ai_daq);                  % verileri al

```

Veri alış veriş kartından alınan veriler Simulink ortamında da bilgisayara kaydedilebilmektedir. Advantech veri alışveriş kartı ile gerçek zamanlı verilerin bilgisayar ortamına aktarılması için kullanılan Simulink modeli Şekil 4.39'da verilmektedir. Simulink ortamında veri alış veriş kartından gelen veriler gerçek zamanlı olarak görüntülenebilmekte ve dosyaya kaydedilebilmektedir.

YSA'lar ile hata tespit ve teşhis işleminde motora ait verilerin ortalama değerleri kullanıldığından, veri alış veriş kartından alınan her 5000 verinin ortalaması alınarak kaydedilmiştir. ARM'nin normal ve hatalı durumları için, motora ait veriler motor yüksüz, yarım yük ve tam yük altında çalışırken ölçülmüştür. ARM'de meydana gelen her bir durum için 100 örnek kullanılarak toplamda 2400 veriden oluşan veri seti elde edilmiştir. Bu veri setindeki verilerin % 80'i YSA'ların eğitim verisi, % 20'si ise eğitilmiş ağların test verisi olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4.39. Veri alış veriş kartından gerçek zamanlı olarak verilerin alınması için kullanılan Simulink modeli.

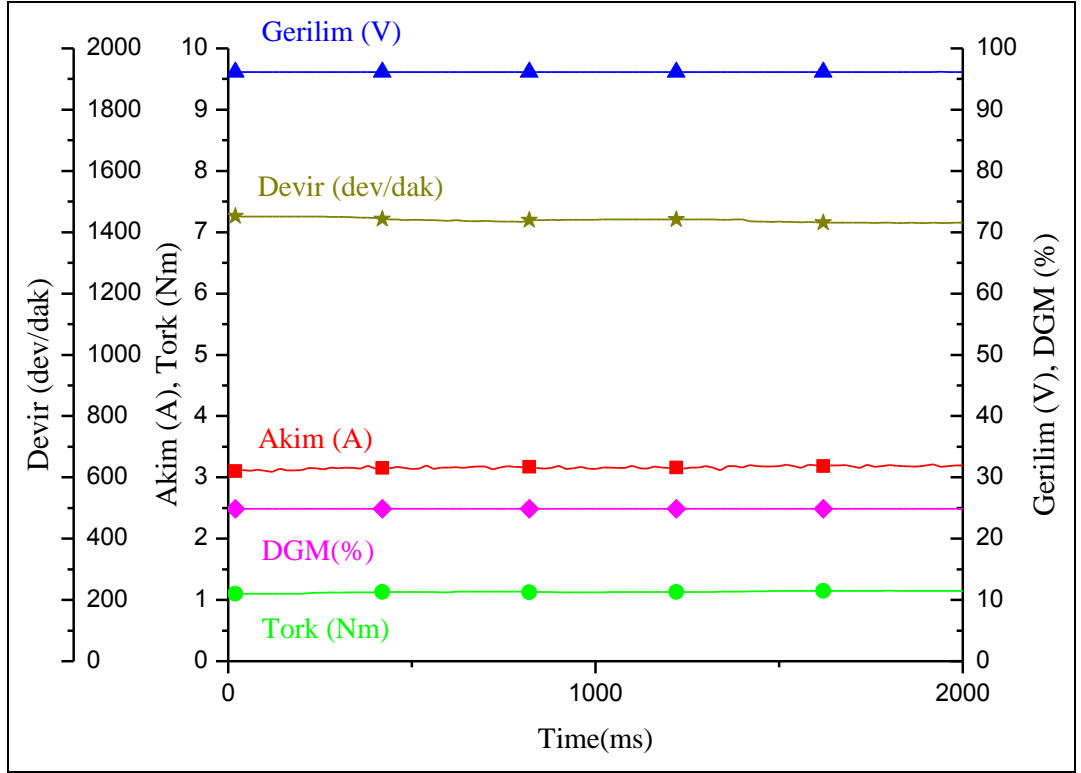
4.5. YSA'LARA VERİ SETİ OLUŞTURMAK İÇİN DENEYSEL ÖLÇÜMLER

ARM'ler kilitli rotor hatası durumu dışındaki diğer hata durumlarında motor çalışmaya devam etmektedir. Bu nedenden dolayı motor tamamen bozulmadan bu durum tespit edilmeli ve hata giderilmelidir. ARM'lerin ürettiği tork değeri kaynaktan çektiği akıma bağlıdır. Sabit tork altında çalışan motor fazlarında hata olması durumunda toplam akım değeri çok değişmediği için faz başına çekilen akım değeri artmaktadır. ARM'nin normal ve hatalı durumları için 1400 dev/dak referans hız değerinde yüksüz, yarım yük ve tam yük değerlerinde çalıştırılarak akım, gerilim, tork, görev saykılı ve devir parametreleri ölçülmektedir. ARM'de ölçülen hata türleri Çizelge 4.2'de verilmektedir.

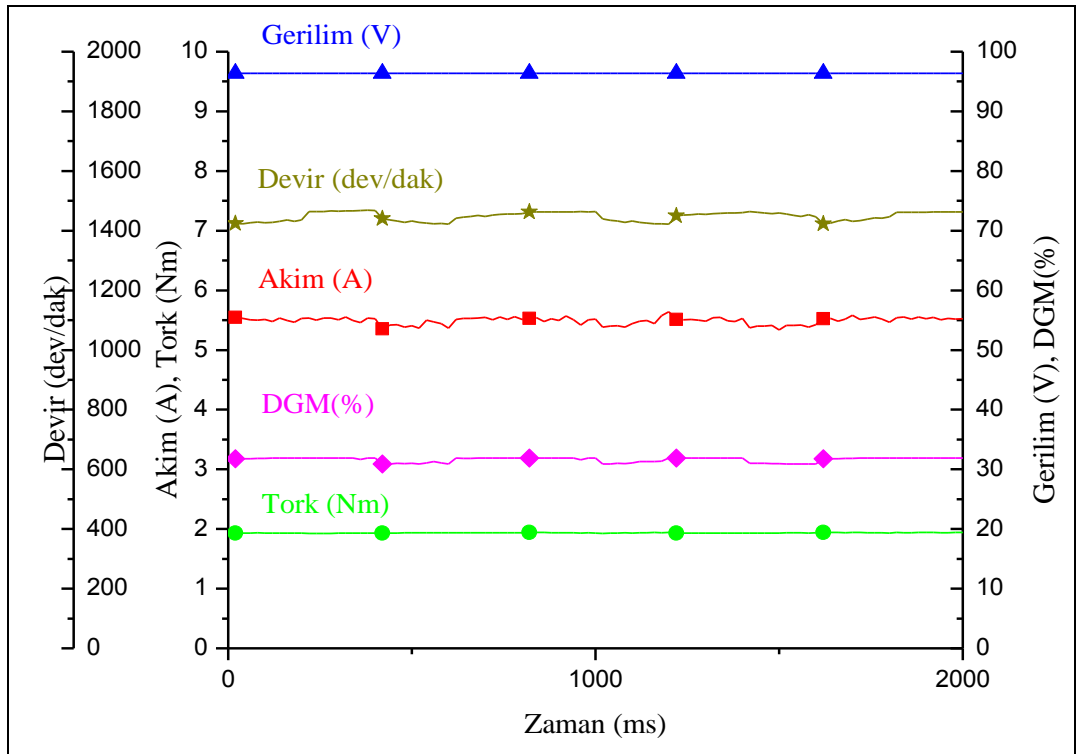
ARM 1400 dev/dak devirde iken yarım ve tam yük ile yüklenerek, normal çalışma durumlarında motorun akım, gerilim, tork, görev saykılı ve devir ölçüm grafikleri Şekil 4.40 ve Şekil 4.41'da verilmektedir. ARM 1400 dev/dak devirde yarım ve tam yük ile çalışırken bir fazı açık devre hatası durumunda motora ait parametrelerin ölçüm grafikleri Şekil 4.42 ve Şekil 4.43'de verilmektedir. ARM 1400 dev/dak devirde yarım ve tam yük ile çalışırken iki fazı açık devre hatası durumunda motora ait parametrelerin ölçüm grafikleri Şekil 4.44 ve Şekil 4.45'de verilmektedir. Bir veya iki fazı açık devre hatası durumlarında, motor sabit devir ve tork altında çalıştığı için motorun çektiği akım çok değişmemiştir. Fakat motorun eksik faz sayısı ile aynı devir ve tork değerlerini sağlayabilmesi için DGM görev saykılı değeri artmıştır.

Çizelge 4.2. ARM'de ölçülen hatalar.

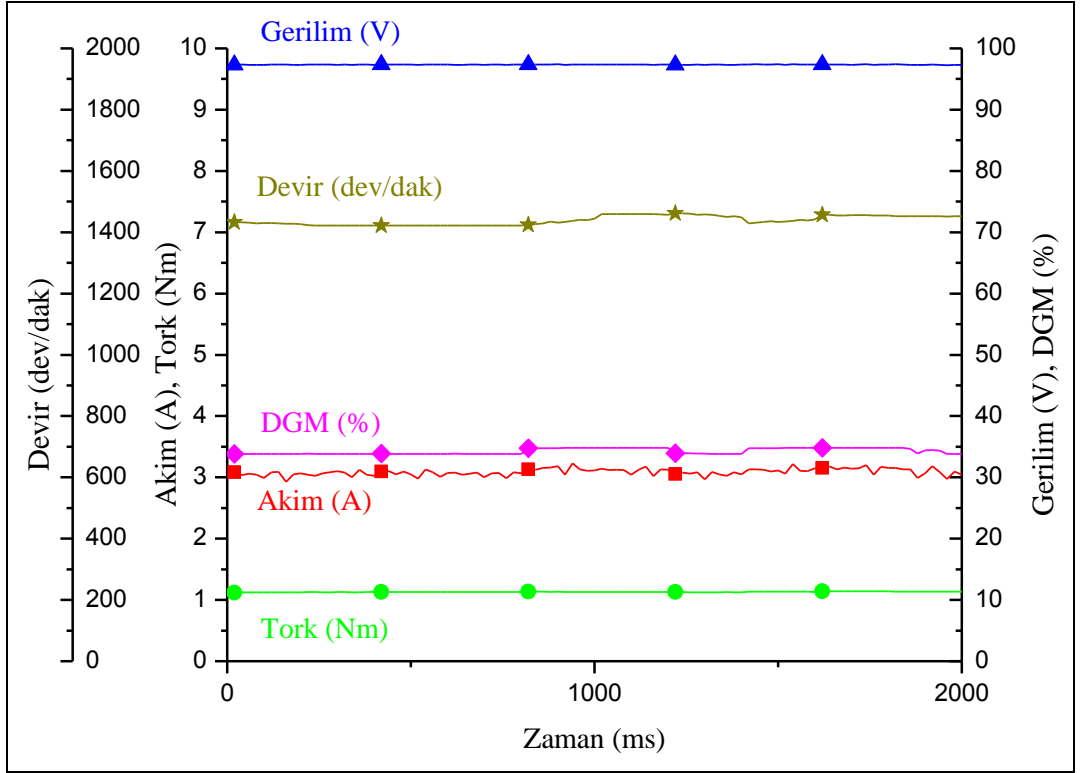
No	Hata Türü
1	Normal
2	Bir fazı açık devre hatası
3	İki fazı açık devre hatası
4	Bir fazı kısa devre hatası
5	Bir faz sargı hatası
6	Kaynak hatası
7	Aşırı yük hatası
8	Kilitli rotor hatası



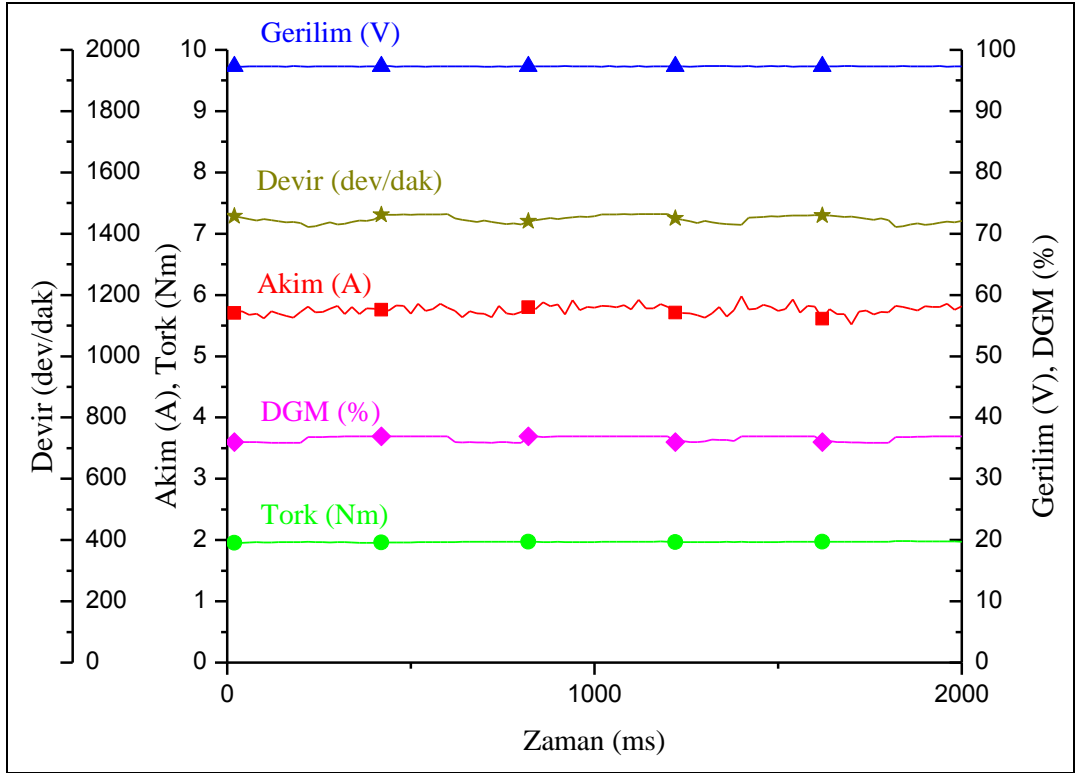
Şekil 4.40. ARM yarım yükte normal durumu.



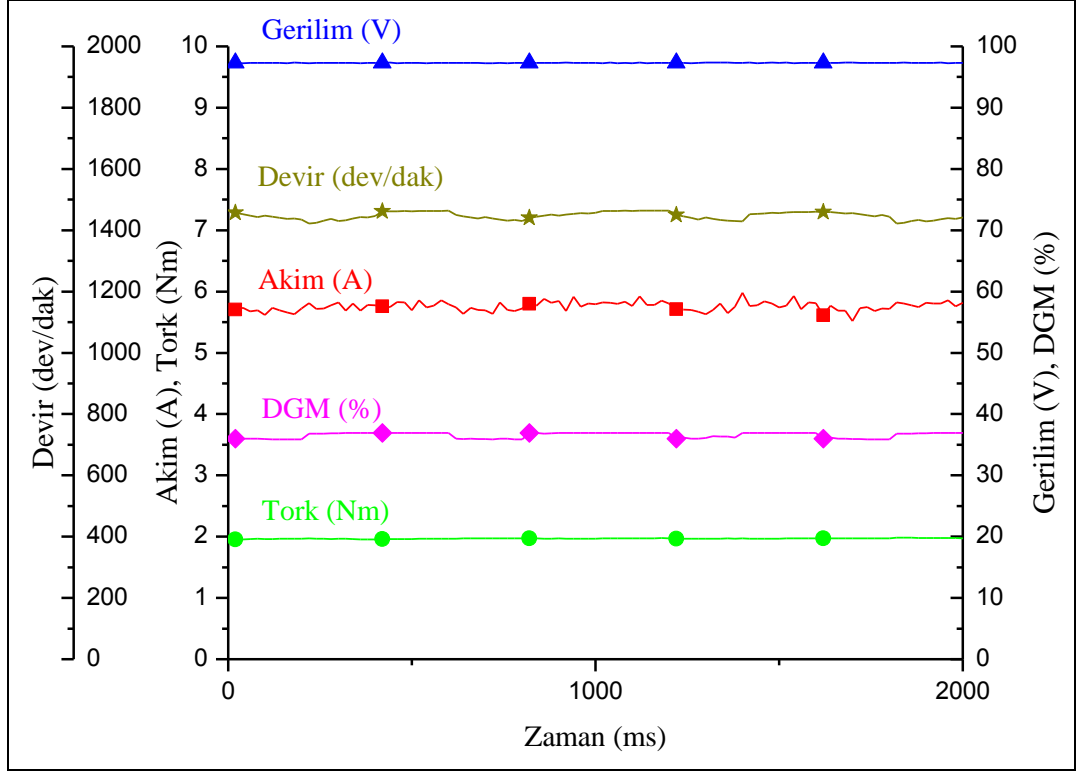
Şekil 4.41. ARM tam yükte normal durumu.



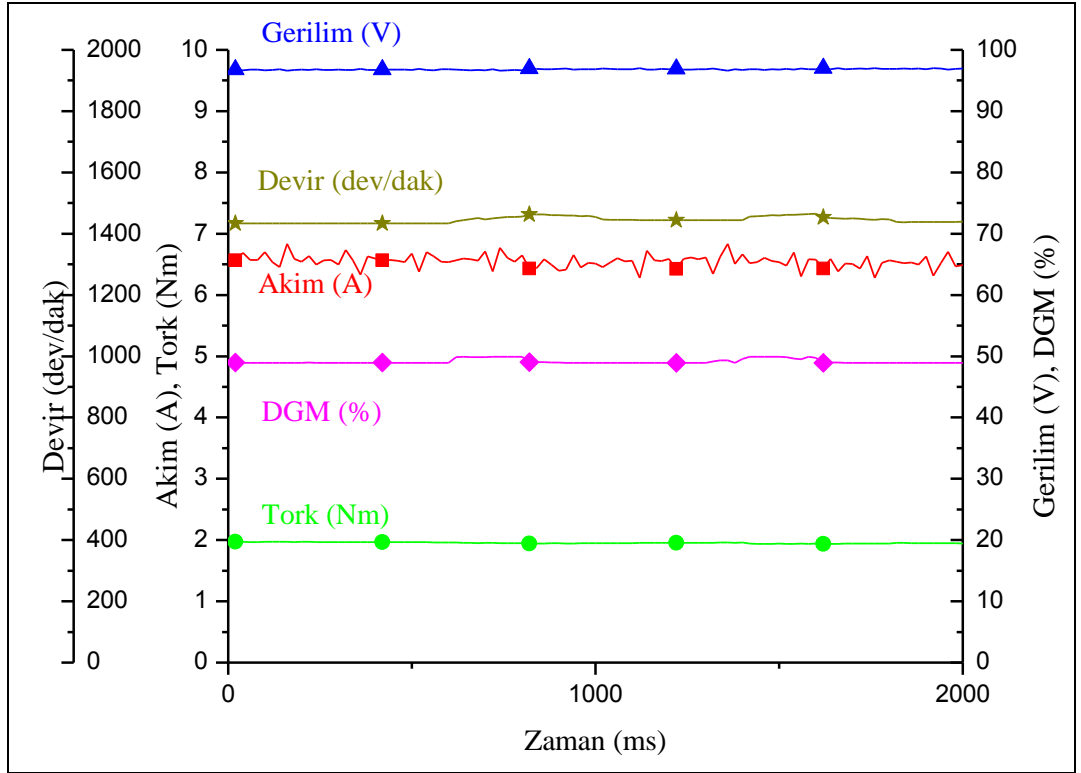
Şekil 4.42. ARM yarım yükte bir fazlı açık devre hatası durumu.



Şekil 4.43. ARM tam yükte bir fazlı açık devre hatası durumu.



Şekil 4.44. ARM yarım yükte iki fazı açık devre hatası durumu.



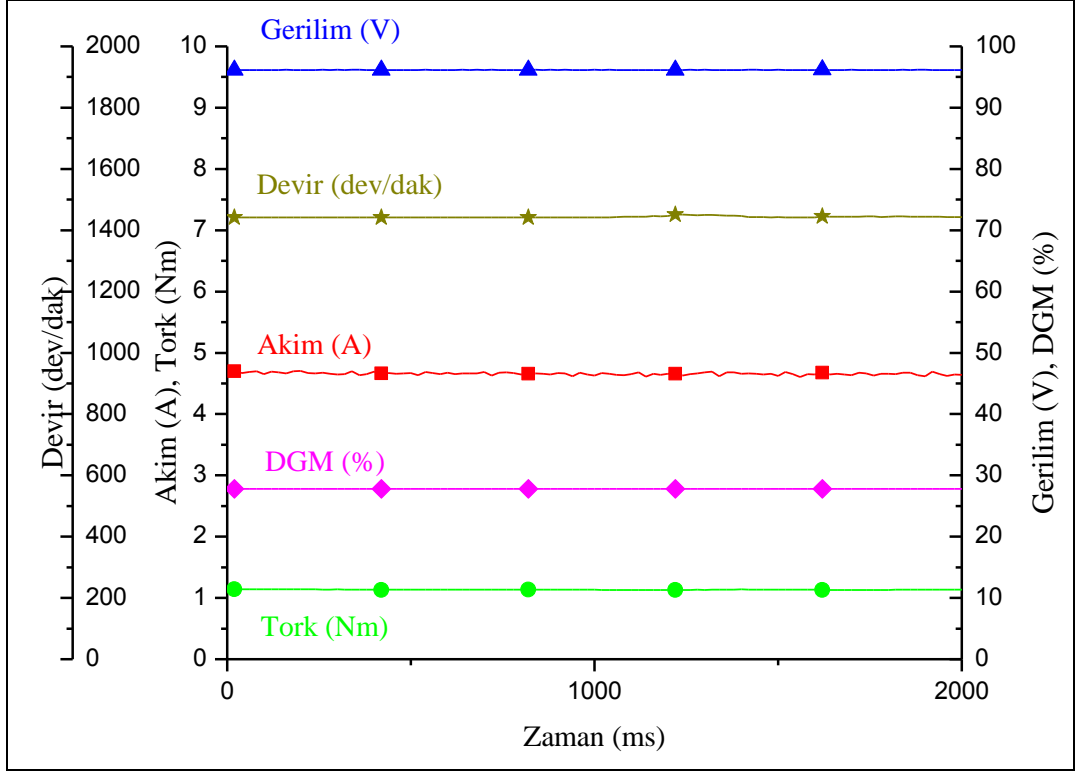
Şekil 4.45. ARM tam yükte iki fazı açık devre hatası durumu.

ARM 1400 dev/dak devirde yarım ve tam yük ile çalışırken bir fazı kısa devre hatası durumunda motora ait parametrelerin ölçüm grafikleri Şekil 4.46 ve Şekil 4.47’de verilmektedir. Burada motor fazlarından birinin kısa devre olması durumunda, o faza ait tork sıfır olur ve referans tork ve devir değerlerinin korunabilmesi için DGM görev saykılı değeri artmaktadır. Aynı zamanda kısa devre olan fazdan dolayı kaynaktan çekilen akım miktarı artmıştır. Bir fazı kısa devre hatasının belirlenmesinde DGM görev saykılı değeri ve kaynak akım değeri değişimleri belirleyici özellik göstermektedir.

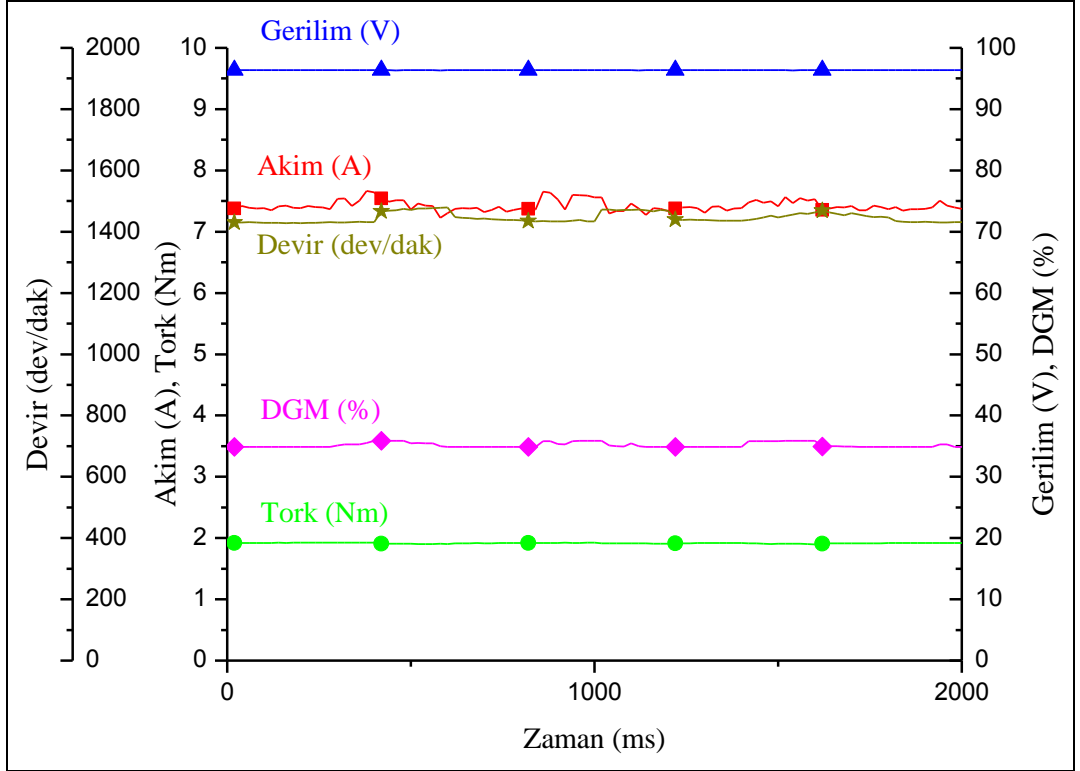
ARM 1400 dev/dak devirde yarım ve tam yük ile çalışırken bir faz sargı hatası durumunda motora ait parametrelerin ölçüm grafikleri Şekil 4.48 ve Şekil 4.49’de verilmektedir. ARM 1400 dev/dak devirde yarım ve tam yük ile çalışırken kaynak hatası durumunda motora ait parametrelerin ölçüm grafikleri Şekil 4.50 ve Şekil 4.51’de verilmektedir.

Kaynak hatası durumunda kaynaktan çekilen akım çekildikçe besleme gerilimi düşmektedir. Besleme geriliminin düşmesi, motorun referans devir ve tork değerlerinde çalışabilmesi için kaynaktan çekilen akım değerini ve DGM görev saykılı değerlerini artırmaktadır.

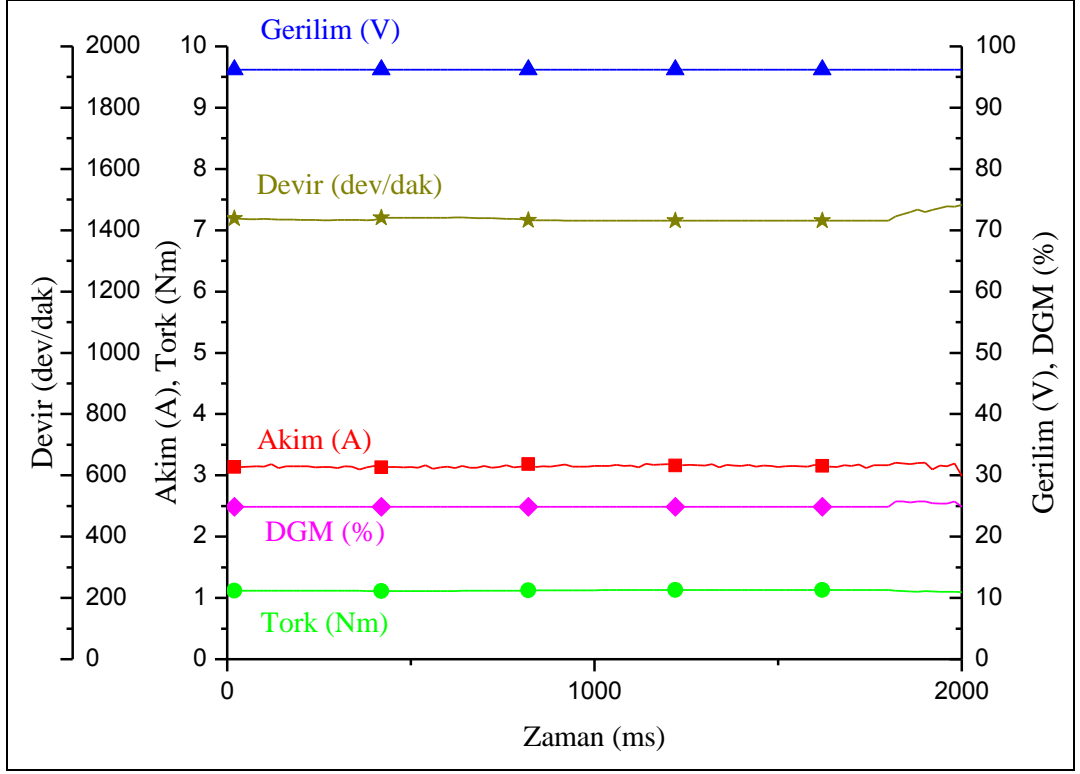
ARM 1400 dev/dak devirde çalışırken aşırı yük hatası durumunda motora ait parametrelerin ölçüm grafikleri Şekil 4.52’de verilmektedir. Bu durumda motorun ürettiği tork değeri ve kaynaktan çekilen akım değerleri motorun normal çalışma durumuna göre artış göstermektedir. ARM kilitli rotor hatası durumunda motora ait parametrelerin ölçüm grafikleri Şekil 4.53’de verilmektedir. ARM’nin rotorunun kilitlenmesi durumunda kaynaktan çekilen akım ve DGM görev saykılı en yüksek sınır değerlerine ulaşmaktadır. Motorun devri ve ürettiği tork değeri sıfır olmaktadır. ARM hataları içerisinde en belirgin parametrelere sahip hata türü kilitli rotor hatasıdır.



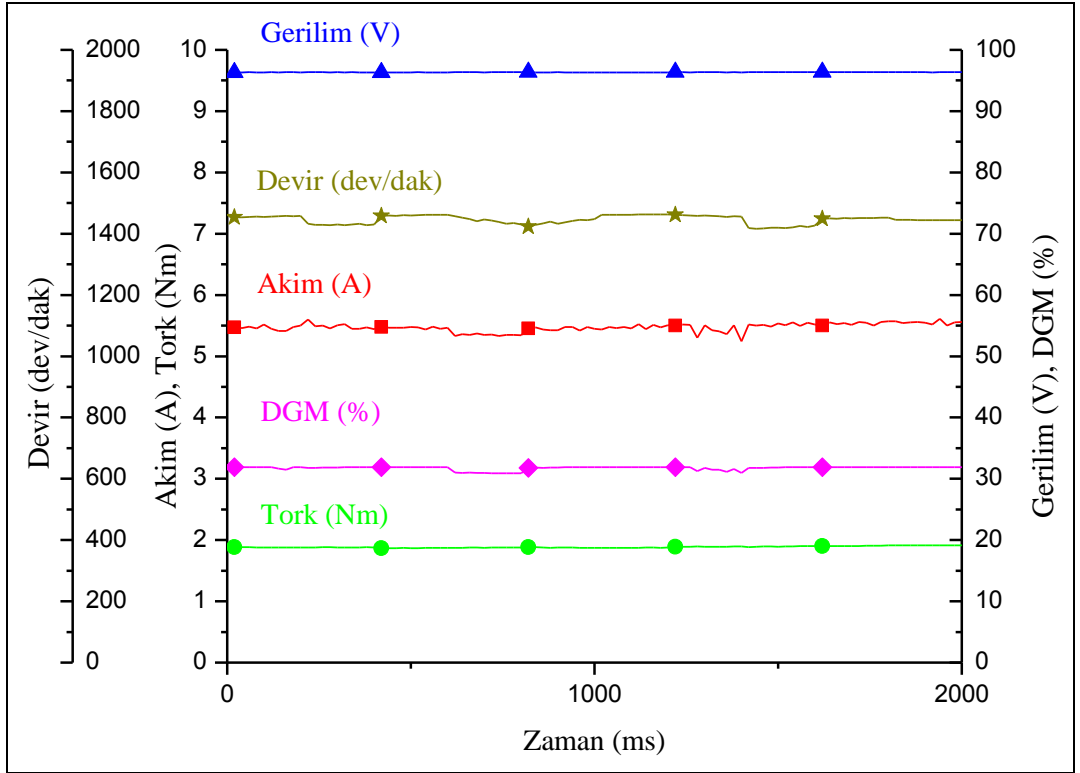
Şekil 4.46. ARM yarım yükte bir fazlı kısa devre hatası durumu.



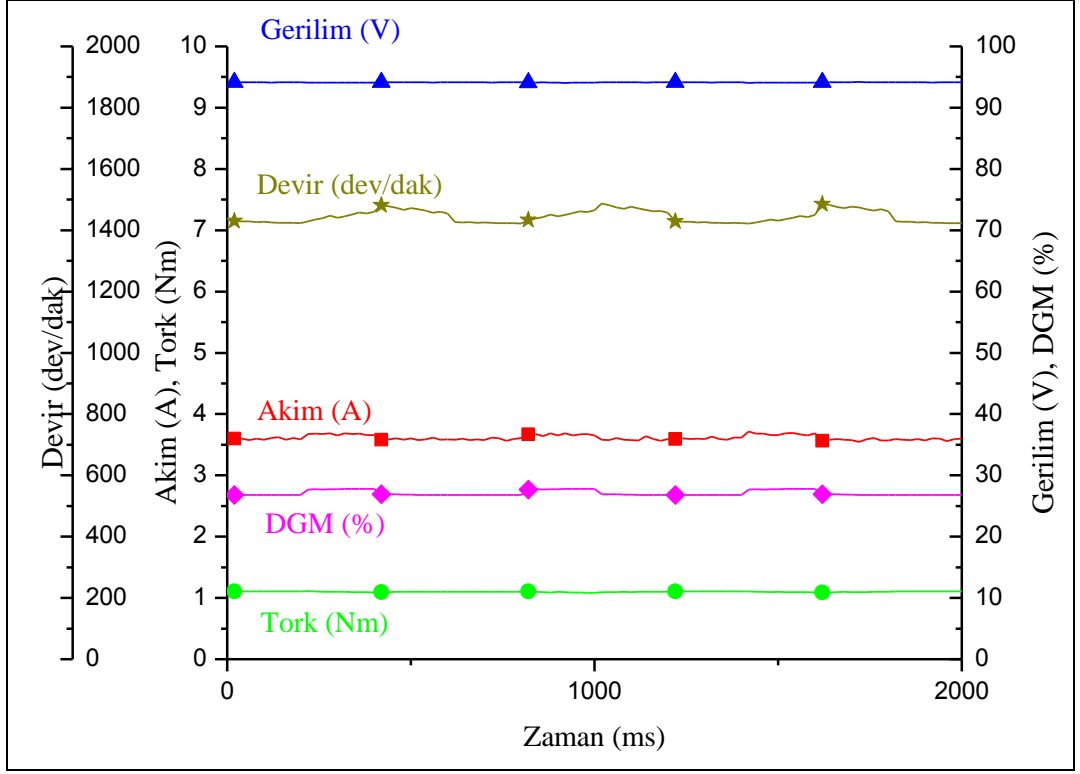
Şekil 4.47. ARM tam yükte bir fazlı kısa devre hatası durumu.



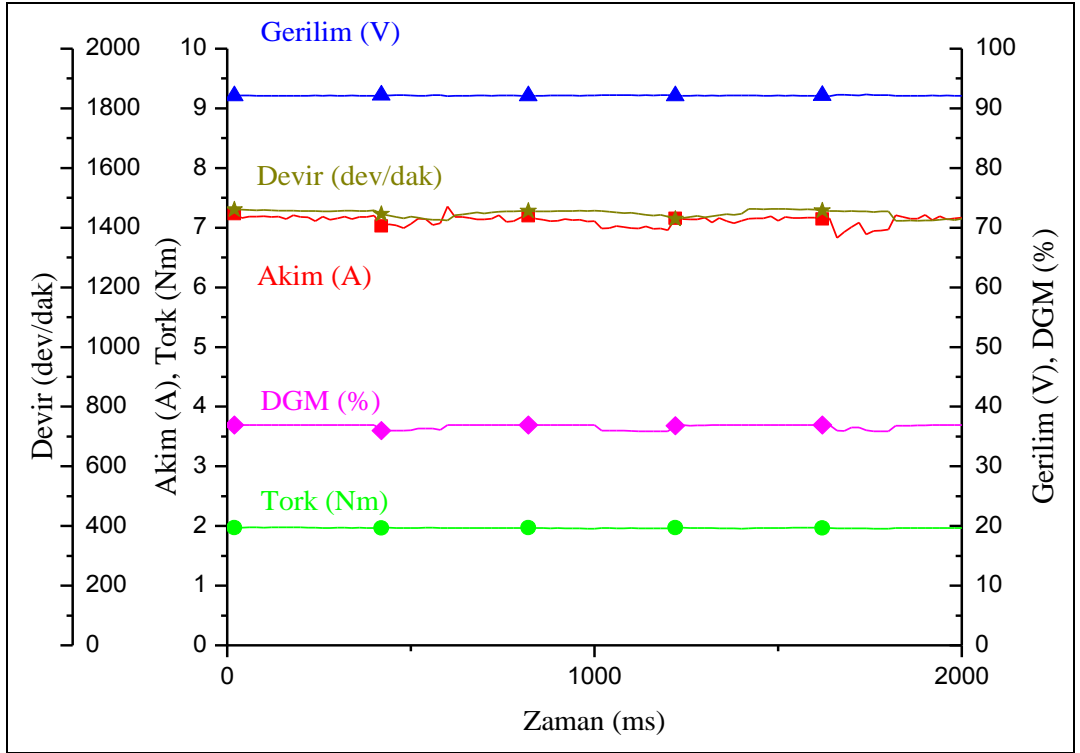
Şekil 4.48. ARM yarım yükte bir fazlı sargı hatası durumu.



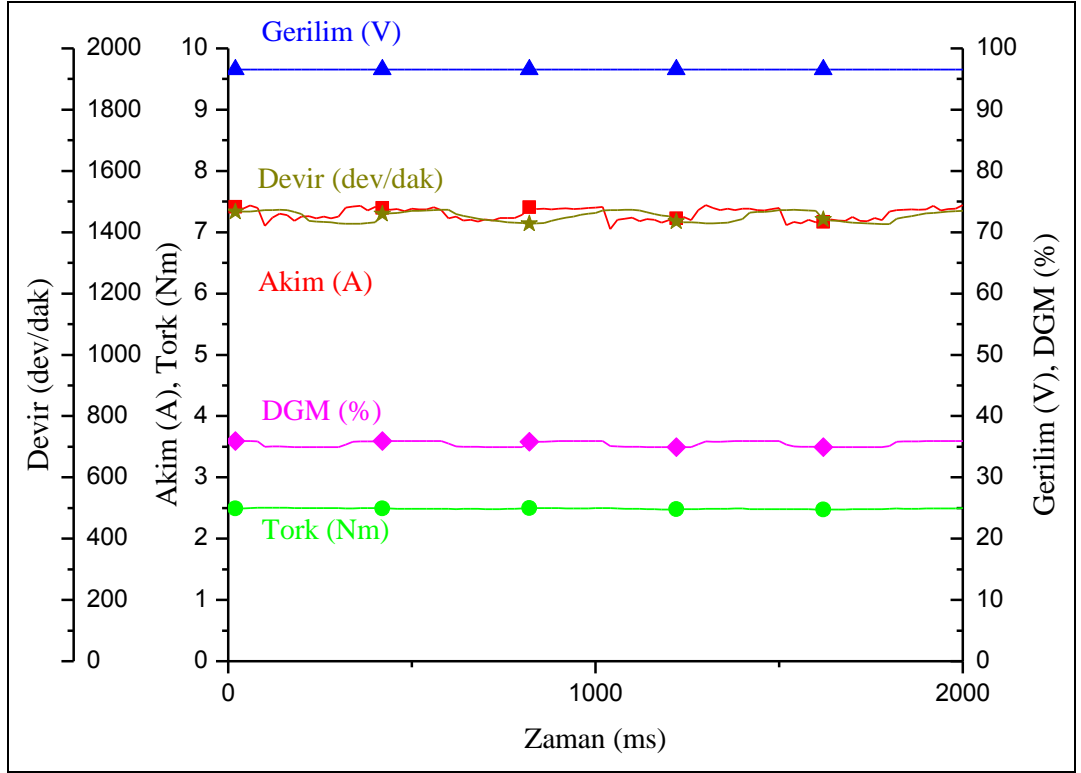
Şekil 4.49. ARM tam yükte bir fazlı sargı hatası durumu.



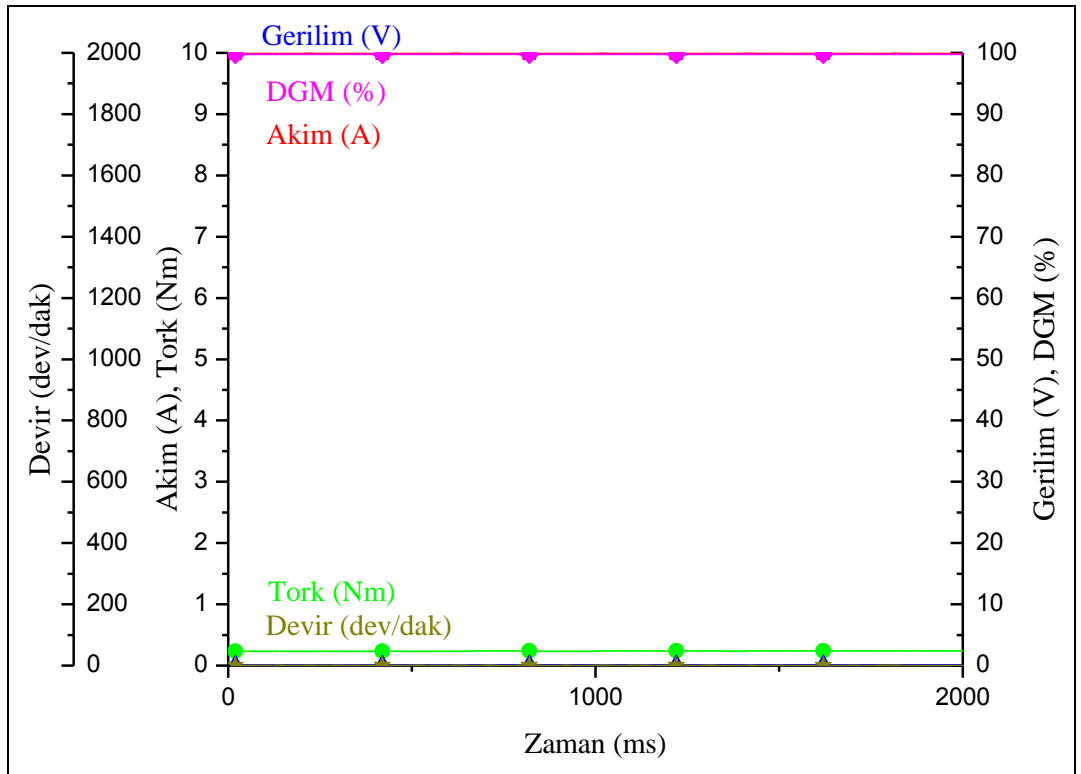
Şekil 4.50. ARM yarım yükte kaynak hatası durumu.



Şekil 4.51. ARM tam yükte kaynak hatası durumu.



Şekil 4.52. ARM'de aşırı yük hatası durumu.



Şekil 4.53. ARM'de kilitli rotor hatası durumu.

BÖLÜM 5

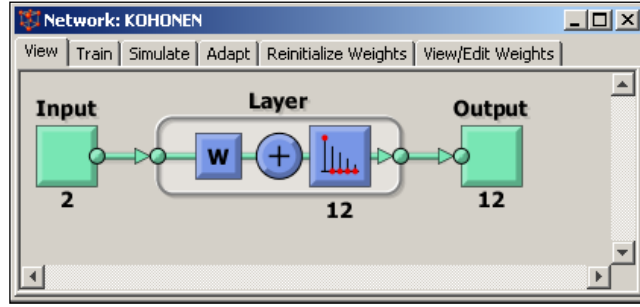
YAPAY SİNİR AĞLARI İLE ARM HATALARININ TESPİT VE TEŞHİSİ

Elektrik makinelerinin hata teşhisinde YSA'lar yaygın olarak kullanılmaktadır [56-60]. Bu yüzden ARM'lerin hata tespit ve teşhisinde YSA'lar tercih edilmiştir. YSA'lar içerisinde sınıflandırma başarımı yüksek olan Kohonen sinir ağı, İleri beslemeli sinir ağı ve Elman sinir ağı ARM hatalarının tespit ve teşhisinde kullanılmaktadır.

5.1. KOHONEN SİNİR AĞI İLE ARM'LERDE HATA TESPİT VE TEŞHİSİ

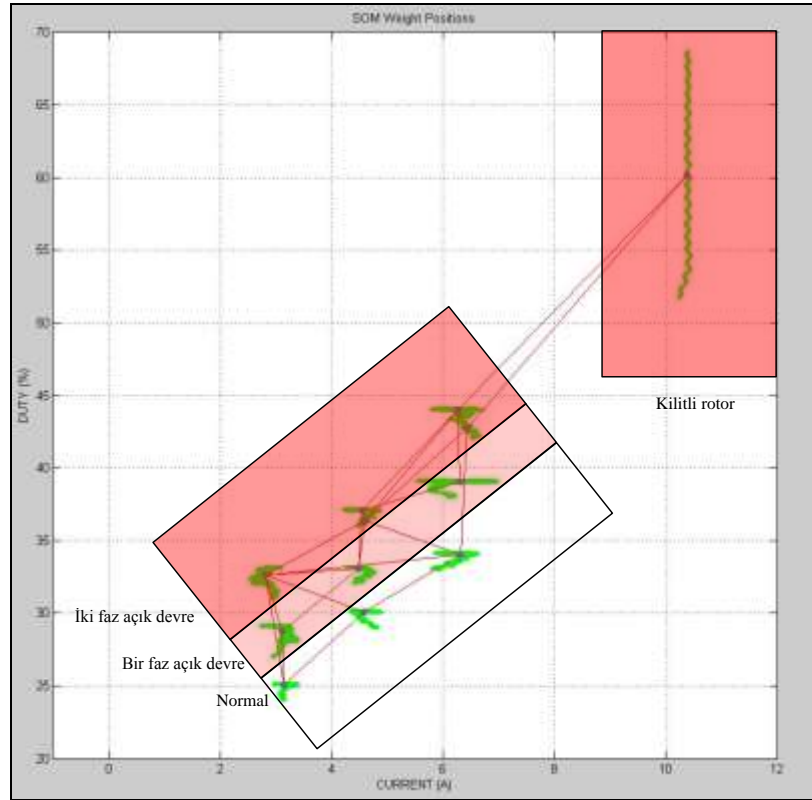
Kohonen sinir ağının sınıflandırma başarımı YSA'lar içerisinde çok yüksektir. Aynı zamanda Kohonen sinir ağı az giriş parametresine sahip olduğu ve öğrenmesiz olduğu için diğer sinir ağlarına göre hızlı sonuç üretmektedir. Akademik çalışmalar incelendiğinde elektrik makineleri ve sürücü hatalarının sınıflandırılmasında Kohonen sinir ağının tercih edildiği görülmektedir. Bu yüzden ARM'lerde gerçek zamanlı hata tespit ve teşhisi için Kohonen Sinir Ağı tercih edilmiştir.

Bu çalışmada normal ve hatalı durum veri setleri incelenerek Kohonen sinir ağı için giriş parametreleri olarak ARM toplam akım değeri ve DGM görev saykılı tercih edilmiştir. ARM 1 Nm, 1.5 Nm ve 2 Nm tork değerlerinde normal bir fazı açık devre, iki fazı açık devre ve kilitli rotor durumlarında çalıştırılmıştır. Toplamda veri setinde 11000 veri kullanılarak Matlab ortamında Kohonen sinir ağı tanımlanmıştır. Kohonen sinir ağı hataları ağırlık pozisyon grafiğine 200 iterasyonda yerleştirmiştir. Normal ve hatalı durumları sınıflandırmak için Kohonen sinir ağı çıkışı 4x3 adet sinir hücresi seçilmiştir. Tanımlanan Kohonen ağ yapısı Şekil 5.1'de verilmektedir.



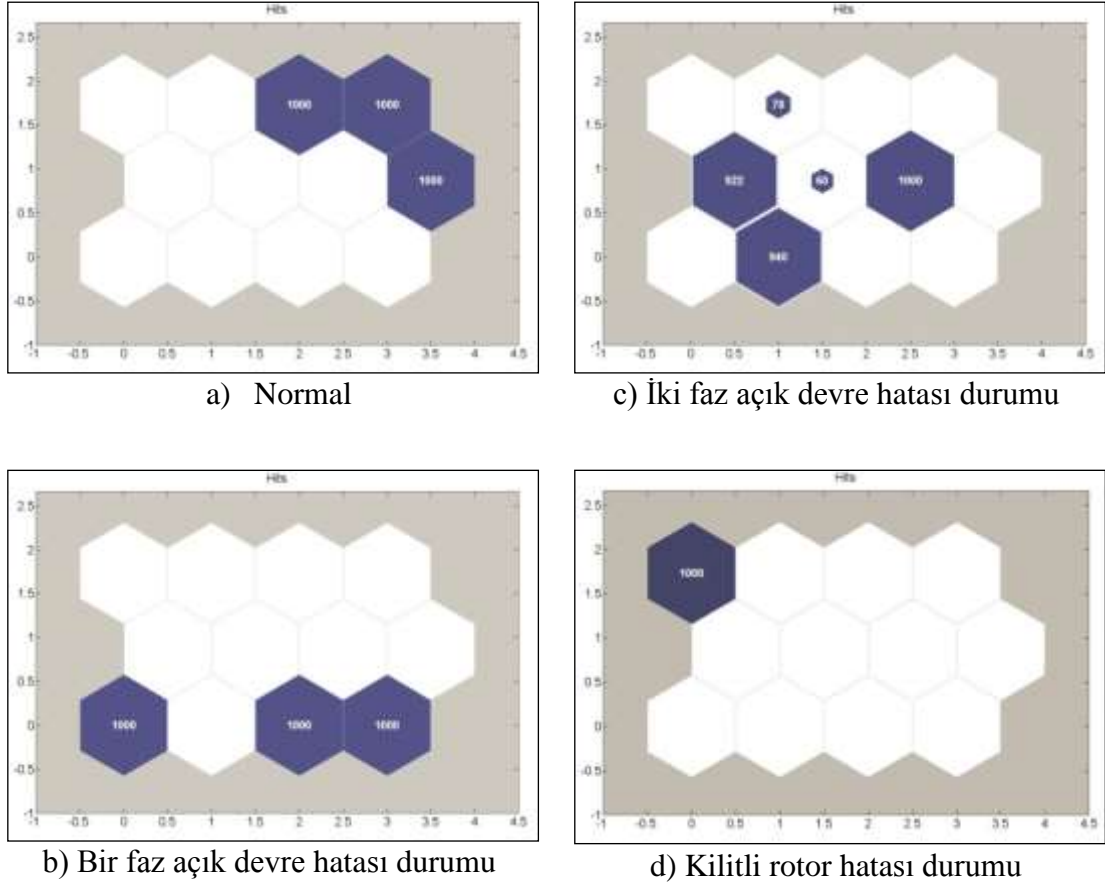
Şekil 5.1. Kohonen ağ yapısı.

Kohonen sinir ağında sınıflandırma verilerinin ağırlık pozisyonları grafiği üzerindeki yerleşimi Şekil 5.2’de verilmektedir. Bu grafikte motora ait durumların farklı alanlarda konumlandığı görülmektedir.



Şekil 5.2. Kohonen sinir ağı ağırlık pozisyonları grafiği.

ARM'nin normal ve hata durumlarına göre, Kohonen sinir ağında her bir giriş verisi için çıkışında 4x3 yapıda olan sinir hücrelerinden biri aktif olmaktadır. Bu on iki hücreden hangisinin hangi hata durumlarında aktif olduğu Şekil 5.3’de görülmektedir.



Şekil 5.3. ARM'nin durumuna göre aktif olan sinir hücreleri.

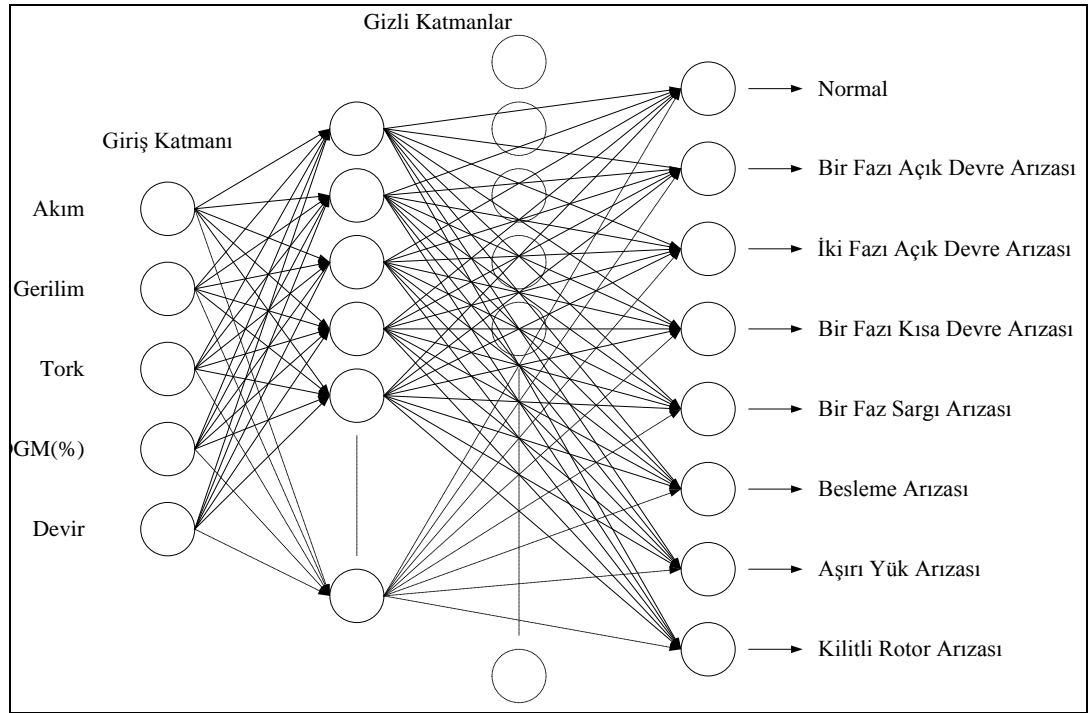
ARM'nin hata tespit ve teşhis yazılımında kullanılan Kohonen sinir ağı, eğitim verileri kullanılarak performansı test edilmiş ve % 100 başarı elde edilmiştir (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1. Kohonen sinir ağı hata tespit ve teşhis yazılımı performansı.

Kohonen Sinir Ağı ile ARM Hata Tespit ve Teşhisi Performans Sonuçları				
No	Motor Durumu	Eğitim		
		Örnek Sayısı	Doğru Örnek Sayısı	Doğru Yüzdesi(%)
1	Normal	3000	3000	100
2	Bir Fazlı Açık Devre Hatası	3000	3000	100
3	İki Fazlı Açık Devre Hatası	3000	3000	100
4	Kilitli Rotor Hatası	1000	1000	100
	TOPLAM	10000	10000	100

5.2. İLERİ BESLEMELİ SİNİR AĞI İLE ARM'LERDE HATA TESPİT VE TEŞHİSİ

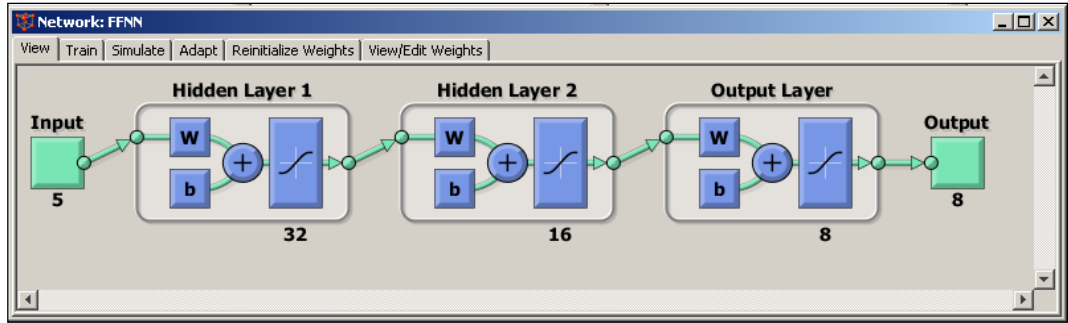
İleri beslemeli sinir ağının sınıflandırma başarımı çok yüksektir. İleri beslemeli sinir ağının elektrik makineleri ve sürücü hatalarının sınıflandırılmasında sıklıkla tercih edildiği görülmektedir [5]. ARM hata teşhis işlemi için tercih edilen ileri beslemeli sinir ağının sinir hücrelerinin yapısı Şekil 5.4'de verilmektedir. Bu ağın eğitiminde de Levenberg-Marquard öğrenme algoritması tercih edilmiştir. Matlab ortamında Neural Network araç kutusu ile ileri beslemeli sinir ağı çok kolay tanımlanabilmektedir. Tanımlanan ağa örnek veriler sunularak ağın eğitimi gerçekleştirilir. Eğitilen ağa test verisi sunularak ağın performansı test edilebilmektedir.



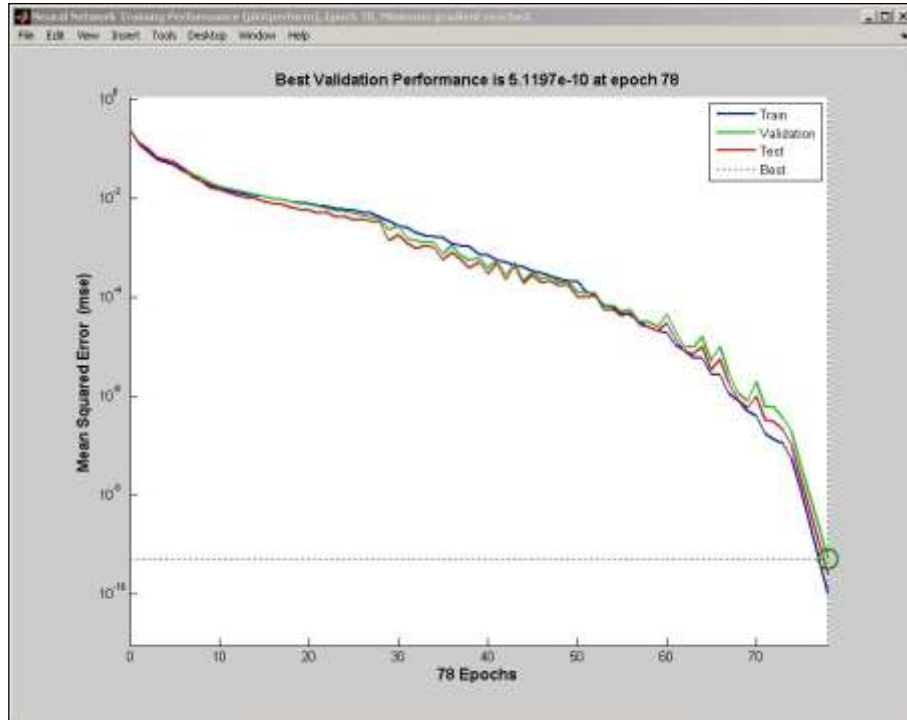
Şekil 5.4. Hata teşhis için kullanılan ileri beslemeli sinir ağı yapısı.

Deneysel ölçüm sonuçlarında normal ve hatalı durum veri setleri incelenmiştir. İleri beslemeli sinir ağı için giriş parametreleri olarak kaynak akım, gerilim değeri, tork, devir ve DGM görev sayıklı tercih edilmiştir. ARM yüksüz, yarım yük (0,9 Nm), tam yük (1,8 Nm) altında normal ve hatalı durumlarda çalıştırılmıştır. Toplamda ölçülen

2400 verinin % 20'si (480 veri) test için, % 80'i (1920 veri) eğitim için kullanılarak Matlab ortamında ileri beslemeli sinir ağı tanımlanmıştır. Sinir ağı giriş katmanında 5, birinci gizli katmanda 32 sinir hücresi, ikinci gizli katmanda 16 sinir hücresi, üçüncü gizli katmanda 8 sinir hücresi, çıkış katmanında 8 sinir hücresi bulunmaktadır(Şekil 5.5). İleri beslemeli sinir ağı eğitimi 621 iterasyonda gerçekleştirilmiştir. İleri beslemeli sinir ağı performans grafiği 5.6'da verilmektedir. Performans grafiği incelendiğinde en iyi doğrulamanın 561. iterasyonda gerçekleştiği görülmektedir. Grafikte mavi çizgi hatanın karesinin ortalamasına göre eğitimi, kırmızı çizgi test sonuçlarını, yeşil çizgi ise doğrulama miktarını göstermektedir.



Şekil 5.5. İleri beslemeli sinir ağı yapısı.



Şekil 5.6. İleri beslemeli sinir ağı eğitim performans grafiği.

İleri beslemeli sinir ağı kullanılarak gerçekleştirilen ARM'lerin hataları tespit ve teşhis edilmiştir. İleri beslemeli sinir ağı eğitim verileri kullanılarak performansı test edilmiş ve % 98,4 başarımla elde edilmiştir. Matlab ortamında gerçekleştirilen ileri beslemeli sinir ağı performansı ise Çizelge 5.2'de verilmektedir. Hata teşhis sisteminde motorun sekiz durumu için toplam 1920 örnek ile test edilmiş 1890 doğru 30 hatalı ölçüm gerçekleştirilmiştir. İleri beslemeli sinir ağının toplamda % 98,4 oranında başarı ile motorun durumunu tespit ettiği görülmektedir. Bir fazlı kısa devre hatası, kaynak hatası, aşırı yük hatası ve kilitli rotor hata durumlarının tespit edilme oranının yüksek olmasının sebebi ölçülen parametrelerin değerlerinin diğer durumlardan çok farklı olmasıdır.

Çizelge 5.2. İleri beslemeli sinir ağı ile ARM hata teşhis performansı.

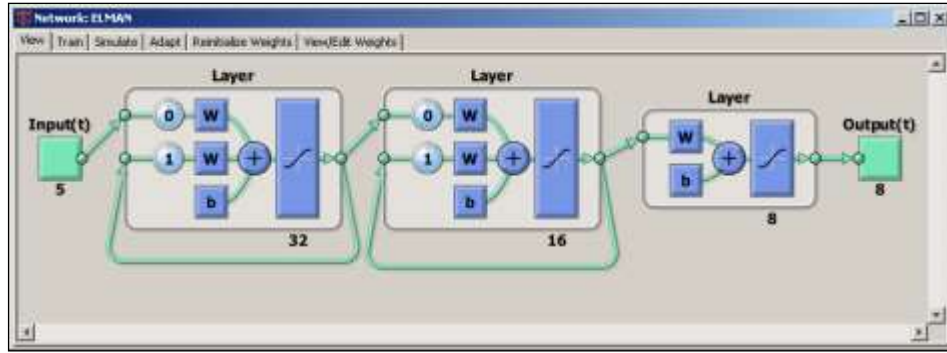
İleri Beslemeli Sinir Ağı ile ARM Hata Tespit ve Teşhisi Performans Sonuçları							
No	Motor Durumu	Eğitim Verileri			Test Verileri		
		Örnek Sayısı	Doğru Örnek Sayısı	Doğru Yüzdesi (%)	Örnek Sayısı	Doğru Örnek Sayısı	Doğru Yüzdesi (%)
1	Normal	240	235	97,9	60	58	96,7
2	Bir Fazlı Açık Devre Hatası	240	230	95,8	60	54	90,0
3	İki Fazlı Açık Devre Hatası	240	231	96,3	60	54	90,0
4	Bir Fazlı Kısa Devre Hatası	240	240	100,0	60	60	100,0
5	Bir Fazlı Sargı Hatası	240	234	97,5	60	57	95,0
6	Kaynak Hatası	240	240	100,0	60	60	100,0
7	Aşırı Yük Hatası	240	240	100,0	60	60	100,0
8	Kilitli Rotor Hatası	240	240	100,0	60	60	100,0
	ORTALAMA			98,4			96,4

5.3. ELMAN SİNİR AĞI İLE ARM'LERDE HATA TESPİT VE TEŞHİSİ

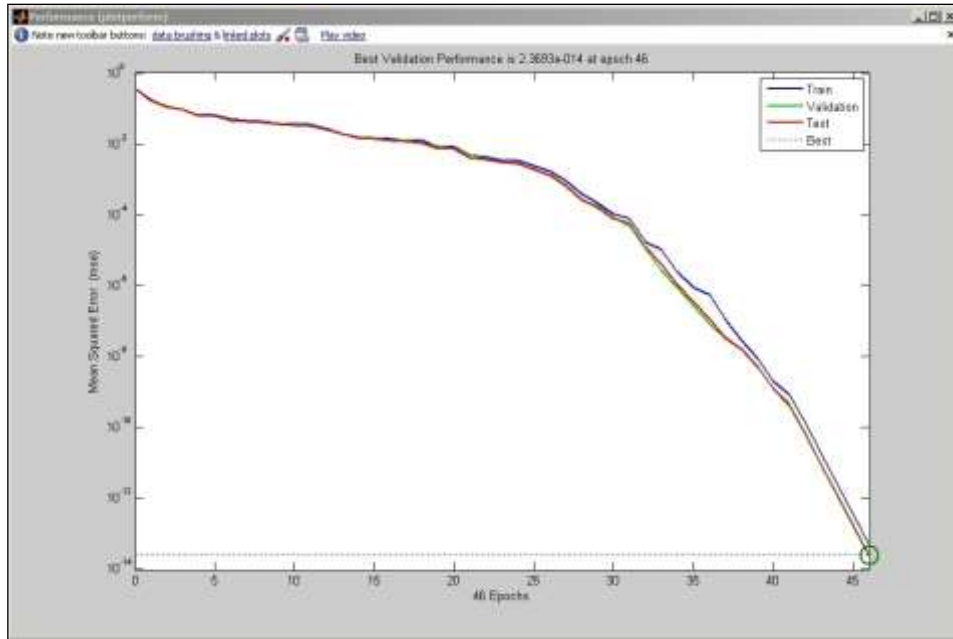
Bu çalışmada hata teşhis ve tespit için kullanılan Elman sinir ağı eğitiminde de Levenberg-Marquard öğrenme algoritması tercih edilmiştir. Matlab ortamında Elman sinir ağı tanımlanmıştır. Tanımlanan ağa örnek veriler sunularak ağın eğitimi gerçekleştirilir. Eğitilen ağa test verisi sunularak ağın performansı test edilebilmektedir. Bu çalışmada normal ve hatalı durum veri setleri incelenmiş ve Elman sinir ağı için giriş parametreleri olarak kaynak akım, gerilim değeri, tork, devir ve DGM görev saykılı tercih edilmiştir. ARM yüksüz, yarım yük, tam yük altında normal ve hatalı durumlarda çalıştırılmıştır. Performans grafiği incelendiğinde en iyi doğrulamanın 46. iterasyonda gerçekleştiği görülmektedir.

Grafikte mavi çizgi hatanın karesinin ortalamasına göre eğitimi, kırmızı çizgi test sonuçlarını, yeşil çizgi ise doğrulama miktarını göstermektedir.

Toplamda ölçülen 2400 verinin % 20'si (480 veri) test için, % 80'i (1920 veri) eğitim için kullanılarak Matlab ortamında Elman sinir ağı tanımlanmıştır. Sinir ağı giriş katmanında 5, birinci gizli katmanda 32 sinir hücresi, ikinci gizli katmanda 16 sinir hücresi, üçüncü gizli katmanda 8 sinir hücresi, çıkış katmanında 8 sinir hücresi bulunmaktadır (Şekil 5.7). Elman sinir ağı eğitimi 322 iterasyonda gerçekleştirilmiştir. Elman sinir ağı performans grafiği Şekil 5.8'de verilmektedir.



Şekil 5.7. Elman sinir ağı yapısı.



Şekil 5.8. Elman sinir ağı eğitim performans grafiği.

Elman sinir ağı eğitim verileri kullanılarak performansı test edilmiş ve % 98,3 başarımla elde edilmiştir. Matlab ortamında gerçekleştirilen Elman sinir ağı performansı ise Çizelge 6.3’de verilmektedir.

Çizelge 5.3. Elman sinir ağı ile ARM hata teşhis performansı.

Elman Sinir Ağı ile ARM Hata Tespit ve Teşhisi Performans Sonuçları							
No	Motor Durumu	Eğitim Verileri			Test Verileri		
		Örnek Sayısı	Doğru Örnek Sayısı	Doğru Yüzdesi (%)	Örnek Sayısı	Doğru Örnek Sayısı	Doğru Yüzdesi (%)
1	Normal	240	234	97,5	60	59	98,3
2	Bir Fazlı Açık Devre Hatası	240	231	96,3	60	56	93,3
3	İki Fazlı Açık Devre Hatası	240	232	96,7	60	55	91,7
4	Bir Fazlı Kısa Devre Hatası	240	240	100,0	60	60	100,0
5	Bir Faz Sargı Hatası	240	235	97,9	60	58	96,7
6	Kaynak Hatası	240	236	98,3	60	57	95,0
7	Aşırı Yük Hatası	240	240	100,0	60	60	100,0
8	Kilitli Rotor Hatası	240	240	100,0	60	60	100,0
	ORTALAMA			98,3			96,9

Hata teşhis sisteminde motorun sekiz durumu için toplam 1920 örnek ile test edilmiş 1888 doğru 32 hatalı ölçüm gerçekleştirmiştir. Elman sinir ağı ile toplamda % 98,3 oranında başarı ile motorun durumunu tespit ettiği görülmektedir. Bir fazlı kısa devre hatası, kaynak hatası, aşırı yük hatası ve kilitli rotor hatası durumlarının tespit edilme oranının yüksek olmasının sebebi, ölçülen parametrelerin değerlerinin diğer durumlardan çok farklı olmasıdır.

5.4. YAPAY SİNİR AĞLARI İLE ARM HATALARININ GERÇEK ZAMANLI TESPİT VE TEŞHİSİ

ARM’lerde gerçek zamanlı hata tespiti ve teşhisi için Matlab GUI ortamında yazılım gerçekleştirilmiştir. Yazılım ekranında ARM’ye ait parametreler gerçek zamanlı olarak görüntülenmektedir. Bu yazılım ile Kohonen sinir ağı, İleri beslemeli sinir ağı ve Elman sinir ağı kullanılarak ARM’nin durumu gerçek zamanlı olarak

belirlenmektedir. Yazılım ekranında her bir sinir ağı için bir başla butonu tanımlanmıştır. Bu butonlara basılarak gerçek zamanlı olarak ARM'ye ait veriler alınıp ARM'nin çalışma durumunu belirlemektedir. Dur butonu ile gerçek zamanlı çalışma durdurulmaktadır. Yazılım ekran görüntüsünün sağ tarafında ARM'nin çalışma durumu görüntülenmektedir.



Şekil 5.9. Gerçek zamanlı hata tespit ve teşhis yazılımı ekran görüntüsü.

Yazılımda gerçek zamanlı olarak veri alış veriş kartından elde edilen akım, gerilim tork, devir ve DGM görev saykıl verileri sinir ağlarına uygulanmaktadır. Bu veriler analog girişten her saniyede bir defada 5000 örnek alınıp ortalaması sinir ağına giriş verisi olarak uygulanmaktadır. Bu veriler aynı zamanda yazılım ekranından takip edilebilmektedir. YSA'lar gelen verileri sınıflandırmaktadır. Sınıflandırma sonucu ARM'nin durumu gerçek zamanlı olarak tespit edilmektedir. Gerçek zamanlı olarak YSA'lar yaklaşık olarak saniyede bir sonuç üretmektedir. Bu sayede ARM'nin gerçek zamanlı olarak hata durumunda hatanın ne olduğu ara yüz programı tarafından görüntülenmektedir.

ARM'nin normal hatalı durumları için YSA'ların gerçek zamanlı hata tespit ve teşhis performansları Çizelge 5.4'te verilmektedir. Bu çizelgede gerçek zamanlı olarak her bir sinir ağının girişine uygulanan örnek sayısı, doğru ölçüm sayısı, yanlış ölçüm sayısı ve başarımları verilmektedir.

Çizelge 5.4. YSA'ların gerçek zamanlı hata tespit ve teşhis performans karşılaştırması.

Yapay Sinir Ağları ile Gerçek Zamanlı Hata Tespit ve Teşhis Performansı						
	No	Motor Durumu	Örnek Sayısı	Doğru Ölçüm Sayısı	Hatalı ölçüm Sayısı	Başarım Yüzdesi(%)
Kohonen Sinir Ağı	1	Normal	77	67	10	87,0
	2	Bir Fazlı Açık Devre	92	76	16	82,6
	3	İki Fazlı Açık Devre	81	70	11	86,4
	4	Kilitli Rotor	85	79	6	92,9
	5	TOPLAM	335	292	43	87,2
İleri Beslemeli Sinir Ağı	1	Normal	80	78	2	97,5
	2	Bir Fazlı Açık Devre Hatası	80	77	3	96,3
	3	İki Fazlı Açık Devre Hatası	80	76	4	95,0
	4	Bir Fazlı Kısa Devre Hatası	80	74	6	92,5
	5	Bir Faz Sargı Hatası	80	71	9	88,8
	6	Kaynak Hatası	80	77	3	96,3
	7	Aşırı Yük Hatası	80	79	1	98,8
	8	Kilitli Rotor Hatası	80	80	0	100,0
		TOPLAM	640	612	28	95,6
Elman Sinir Ağı	1	Normal	80	76	4	95,0
	2	Bir Fazlı Açık Devre Hatası	80	79	1	98,8
	3	İki Fazlı Açık Devre Hatası	80	79	1	98,8
	4	Bir Fazlı Kısa Devre Hatası	80	76	4	95,0
	5	Bir Faz Sargı Hatası	80	72	8	90,0
	6	Kaynak Hatası	80	80	0	100,0
	7	Aşırı Yük Hatası	80	80	0	100,0
	8	Kilitli Rotor Hatası	80	80	0	100,0
		TOPLAM	640	622	18	97,2

Gerçek zamanlı hata teşhis sistemimde Kohonen sinir ağı ARM'nin dört durumu için toplam 335 örnek ile test edilmiş 292 doğru 43 hatalı ölçüm gerçekleştirmiştir. Kohonen sinir ağı kilitli rotor hatası durumunu % 92,9 başarımla en başarılı,

bir faz açık devre hatasını % 82,6 başarı oranı ile en az başarılı olarak teşhis etmiştir. Kohonen sinir ağının toplamda % 87,2 oranında başarı ile ARM'nin durumunu tespit ettiği görülmektedir.

İleri beslemeli sinir ağının performans testinde ARM'nin sekiz durumu için toplam 640 test verisi kullanılmış, bu verilerin 612'si doğru, 28'i yanlış olarak tespit edilmiştir. İleri beslemeli sinir ağı kilitli rotor hatasını % 100 başarı oranı ile en başarılı, bir faz sargı hatasını % 88,8 başarı oranı ile en az başarılı olarak teşhis etmiştir. İleri beslemeli sinir ağının toplamda % 95,6 oranında başarı ile ARM hatalarını teşhis ettiği görülmektedir.

Elman sinir ağının ARM hatalarının tespit ve teşhis performans testinde motorun sekiz durumu için 640 test verisi kullanılmış, bu verilerin 622'si doğru, 18'i yanlış olarak tespit edilmiştir. Elman sinir ağı kilitli rotor, kaynak ve aşırı yük hatalarını % 100 başarı oranı ile en başarılı, bir faz sargı hatasını % 90 başarı oranı ile en az başarılı olarak teşhis etmiştir. Elman sinir ağının toplamda % 97,2 oranında başarı ile ARM hatalarını tespit ettiği görülmektedir.

Kohonen sinir ağı ile bir fazlı açık devre durumunun tespit edilme oranının diğer durumlara göre düşük olmasının sebebi, ağırlık konumlarının normal ve iki fazlı açık devre durumlarının arasında kalması ve bunlara yakın olmasıdır. İleri beslemeli sinir ağı ve Elman sinir ağında bir faz sargı hatasının tespit edilme oranı diğer durumların oranlarından daha düşüktür. Bu durumun sebebi, motorun normal ve bir faz sargı hatası durumunda ölçülen verilerin birbirlerine çok yakın olmasıdır.

YSA'ların aşırı yük ve kilitli rotor hatasının tespit edilme oranı çok yüksek elde edilmektedir. Aşırı yük durumunda ölçülen tork değeri diğer durumlardan çok farklı olduğu için bu hatanın teşhis edilme oranı çok yüksek olmaktadır. Kilitli rotor hata durumunda ise motorun devir bilgisi sıfır iken kaynaktan çekilen akım maksimum değerini alır. Bu yüzden kilitli rotor hatasının tespit edilme oranı da çok yüksektir.

ARM'nin gerçek zamanlı hata tespit ve teşhisinde kullanılan YSA'ların belirli performanslarının karşılaştırması Çizelge 5.5'de verilmektedir.

Çizelge 5.5. Yapay sinir ağlarının performans karşılaştırması.

Özellik	Yapay Sinir Ağları		
	Kohonen Sinir Ağı	İleri Beslemeli Sinir Ağı	Elman Sinir Ağı
Öğrenme	yok	var	var
Esneklik	var	var	var
Doğru sınıflandırma	iyi	çok iyi	çok iyi
Bilgileri güncelleme	kolay	zor	zor
Eğitim iterasyon sayısı	32	78	46
Eğitim süresi	1 dk 43 s	1 dk 27 s	22 dk 20 s
Hatayı önceden teşhis etme	var	var	var
Hatayı tahmin etme	var	var	var
Sisteme uygulanan giriş verisi sayısı	2	5	5
Sisteme uygulanan giriş verileri	akım, DGM(%)	akım, gerilim, tork, devir, DGM(%)	akım, gerilim, tork, devir, DGM(%)
Teşhis edilen hata türü sayısı	4	8	8
Ortalama hata teşhis başarısı	% 87,2	% 95,6	% 97,2

İleri beslemeli ve Elman sinir ağlarının doğru sınıflandırma yapma kabiliyeti çok yüksektir. Fakat ağın hataları teşhis edebilmesi için eğitilmesi gerekmektedir. İleri beslemeli sinir ağı ARM'nin sekiz durumunu gerçek zamanlı olarak % 95,6 doğrulukla tespit etmiştir. İleri beslemeli sinir ağı, ağın eğitim süresi ve hata teşhis oranı bakımından değerlendirildiğinde ARM hatalarının teşhisinde kullanılacak en uygun ağ olarak belirlenmiştir. Kohonen sinir ağının öğrenmesiz ve hızlı sınıflandırma yapabilmesi en büyük üstünlüğüdür. Ayrıca bu ağda ARM hatalarının sınıflandırması için iki giriş değişkeni yeterli olmaktadır.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Kohonen, ileri beslemeli ve Elman sinir ağları kullanılarak ARM hataları gerçek zamanlı olarak tespit ve teşhis edilmiştir. YSA'lar eğitim ve test verileri ile test edilmiş; Kohonen sinir ağı % 98,9, ileri beslemeli sinir ağı % 98,4, Elman sinir ağı % 98,3 doğrulukla ARM hatalarını teşhis etmişlerdir. Gerçek zamanlı yapılan testlerde; Kohonen sinir ağı % 87,2, ileri beslemeli sinir ağı % 95,6 Elman sinir ağı % 97,2 doğrulukla ARM hatalarını teşhis etmektedir.

Deneysel çalışma sonucunda Kohonen, İleri beslemeli ve Elman sinir ağları ARM hatalarının teşhisini yüksek doğrulukla gerçekleştirmişlerdir. Kohonen sinir ağının iki giriş değişkeni ile sınıflandırma yapabilmesi en önemli üstünlüğüdür. YSA'ların performansları karşılaştırıldığında ileri beslemeli sinir ağı ile Elman sinir ağı başarımlarının birbirlerine çok yakın ve yüksek olduğu görülmektedir. Sinir ağlarının eğitim süreci dikkate alındığında ileri beslemeli sinir ağının eğitiminin daha hızlı gerçekleştiği görülmektedir. Elman sinir ağı gerçek zamanlı hata teşhis performansı en yüksek sinir ağı olmasına rağmen sinir ağının eğitim sürecinin diğer ağlara göre çok uzun olması ağın en büyük sakıncası olarak dikkat çekmektedir. Buna rağmen performans değerinin yüksek olması Elman sinir ağını ARM hatalarının teşhisinde öncelikle tercih edilebilir kılmaktadır. YSA'lar ile sınıflandırma çalışmalarında tercih edilen Kohonen, ileri beslemeli ve Elman sinir ağlarının yüksek sınıflandırma başarımına sahip oldukları görülmektedir.

Bu tez çalışmasında, Kohonen sinir ağı ile ARM arızalarının gerçek zamanlı olarak tespit teşhisi konusunda ilk akademik çalışma gerçekleştirilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda, ARM hatalarını tespit ve teşhisi için YSA'lar Matlab destekli sayısal işaret işleyici/mikrodenetleyicilere gömülerek prototip çalışması gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Vas, P., Parameter Estimation, "Condition Monitoring and Diagnosis of Electrical Machines", *Clarendon Press*, New York, 307-344 (1993).
2. Nandi, S., Toliyat, H. A. and Li, X., "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines - a review," *IEEE Transactions. On Energy Conversion*, 20(4): 719-729 (2005).
3. Leonhardt S., M and Ayoubi, M., "Methods of fault diagnosis", *Control Engineering Practice*, 5 (5): 683-692 (1997).
4. Isemann, R., "Supervision, fault-detection and fault–diagnosis methods an introduction", *Control Engineering Practice*, 5 (5): 639-652 (1997).
5. Chow, M. Y., "Methodologies of Using Neural Network and Fuzzy Logic Technologies for Motor Incipient Fault Detection", *World Scientific Pub.*, Singapore, 99-135 (1997).
6. Gao X. Z., Ovazska S. J., "Soft computing methods in motor fault diagnosis", *Applied Soft Computing*, 1 (1): 73-81 (2001).
7. Isemann, R., "Fault diagnosis applications: Model-Based Condition Monitoring: Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-tolerant Systems", *Springer*, London, (2011).
8. Dalton, T., "Fuzzy Logic in Fault Diagnosis", *University of Duisburg*, 2-15: (1999).
9. Schump, D. E., "Reliability Testing of Electric Motors", *IEEE Transactions on Industrial Applications*, 25 (3): 386–390 (1989).
10. Bayır, R., "Yapay zeka teknikleri kullanılarak marş motorlarında hata teşhisi", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri*, Ankara, 48-75 (2005).
11. Jiang, H., Penman, J., "Using Kohonen feature maps to monitor the condition of synchronous generators". *Neural Network Applications and Tools. Workshop on*, 89–94 (1993).
12. Penman, J., Yin, C. M., "Feasibility of using unsupervised learning, artificial neural networks for the condition monitoring of electrical machines", *Electric Power Applications. IEE Proc.*, 141 (6): 317–322 (1994).

13. Murray, A., Penman, J., “Extracting useful higher order features for condition monitoring using artificial neural networks”, *IEEE Transactions Signal Processing*, 45 (11): 2821–2828 (1997).
14. Kowalski, C. T., Orłowska-Kowalska T., “Neural networks application for induction motor faults diagnosis”, *Mathematics and Computers in Simulation*, 63 (3-5): 435–448 (2003).
15. Hoffman, A. J., Van Der Merwe, N. T., “The application of neural networks to vibrational diagnostics for multiple fault conditions”, *Computer Standards & Interfaces*, 24 (2): 139–149 2002.
16. Yang, B. S., Han, T. and An, J. L., “Art-Kohonen neural network for fault diagnosis of rotating machinery”, *Mechanical System and Signal Processing*, 18 (3): 645–657 (2004).
17. Bay, O.F., Bayır, R., “Kohonen network based fault diagnosis and condition monitoring of pre-engaged starter motors”, *International Journal of Automotive Technology*, 6 (4): 341–350 (2005).
18. Gonçalves, L. F., Balen, T. R., Lubaszewski, M. S., Schneider, E. L. and Henriques, R. V., “Fault detection, diagnosis and prediction in electrical valves using self-organizing maps”, *Journal of Electronic Testing*, 27 (4): 551-564 (2011).
19. Mahamad, A., Hiyama, T., “Fault classification based artificial intellicent methods of induction motor bearing”, *International Journal of Innovative Computing Information and Control*, 7(9): 5477-5494 (2011).
20. Aksoy, S., Muhurcu, A., “PI-Elman neural network based nonlinear state estimation for induction motors”, *International Review Of Electrical Engineering-IREE*, 6 (2): 706-718 (2011).
21. Asfani, D.A., Muhammad, A.K., Syafaruddin, Purnomo, M.H. and Hiyama, T., “Temporary short circuit detection in induction motor winding using combination of wavelet transform and neural network” *Expert Systems with Applicaitons*, 39 (5): 5367-5375 (2012).
22. Seera, M., Lim, C.P., “Online motor fault detection and diagnosis using a hybrid FMM-CART model”, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 99: 1-7 (2013).
23. Cococcioni, M., Lazzerini, B. and Volpi, S.L., “Robust diagnosis of rolling element bearings based on classification techniques”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9 (4): 2256-2263 (2013).
24. Torkaman, H., Afjei, E., “Comprehensive detection of eccentricity fault in switched reluctance machines using high-frequency pulse injection”, *IEEE Transactions On Power Electronics*, 28 (3): 1382-1390 (1997).

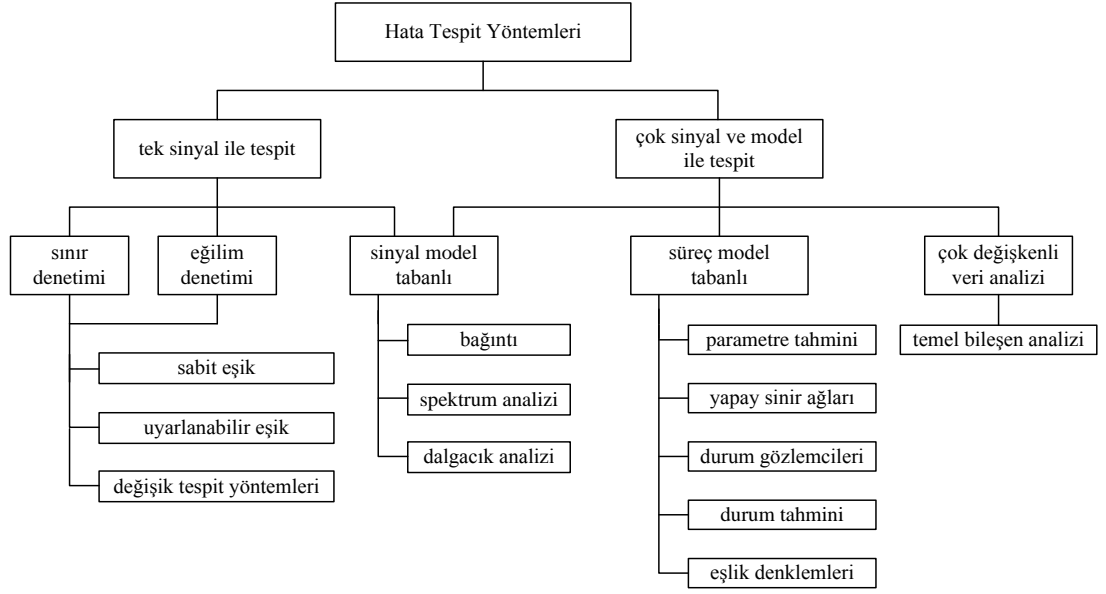
25. Torkaman, H., Afjei, E., Ravaud, R. and Lemarquand, G., "Misalignment fault analysis and diagnosis in switched reluctance motor", *International Journal of Applied Electromagnetics And Mechanics*, 36 (3): 253-265 (2011).
26. Torkaman, H., Afjei, E. and Yadegari, P., "Static, dynamic, and mixed eccentricity faults diagnosis in switched reluctance motors using transient finite element method and experiments", *IEEE Transactions on Magnetics*, 48 (8), 2254-2264 (2012).
27. Chen, H., Lu, S.L., "Fault diagnosis digital method for power transistors in power converters of switched reluctance motors", *Industrial Electronics*, 60 (2), 749-763 (2012).
28. Torkaman, H., Afjei, E., "Sensorless method for eccentricity fault monitoring and diagnosis in switched reluctance machines based on stator voltage signature", *IEEE Transactions on Magnetics*, 49 (2): 912-920 (2013).
29. Hang, J., "Fault detection simulation research on switched reluctance motor based on wavelet transform", *International Conference on Future Control and Automation*, Nanjing, 44-47 (2010).
30. Gameiro, N. S., Cardoso, A. J. M., "A new method for power converter fault diagnosis in srm drives", *Transactions on Industry Applications*, 48 (2): 653-662 (2012).
31. Selvaganesan, N., Raja, D., Srinivasan, S. and Renganathan, S., "Neural control and fault diagnosis for 6/4 switched reluctance motor", *IEEE International Conference on Industrial Technology*, Mumbai, 1741-1746 (2006).
32. Selvanagesan, N., Raja, D., Srinivasan, S., "Fuzzy based fault detection and control for 6/4 switched reluctance motor", *Iranian Journal of Fuzzy System*, 4 (1): 37-51, (2007).
33. Ruba, M., Szabo, L., "Fault tolerance study of switched reluctance machines by means of advanced simulation techniques", *An International Journal for Engineering and Information Sciences*, 4 (2): 107-116 (2009).
34. Bal, G., "Anahtarlamalı relüktans motorlar", Özel Elektrik Makinaları 3. Baskı, *Seçkin Yayıncılık*, Ankara, 155-175 (2006).
35. Krishnan, R., "Switched reluctance motors drives: modeling simulation, analysis, design and applications", *CRC Press*, New York, 30-50 (2001)
36. Polat, M., "Anahtarlamalı relüktans motorda algılayıcısız konum kontrolü ve moment dalgalılığının azaltılması", Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 9-35 (2010).
37. Güvenç, U., "Anahtarlamalı relüktans motorun denetimi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 4-8, 17-22 (2005)

38. Miller, T.J.E., Stephenson, J.M., MacMinn S.R. and Handersot, J.R., "Switched reluctance drives", *IEEE Industry Applications Society*, Tutorial Course. (1990).
39. Duran, F., "Endüstriyel çamaşır makinelerinde anahtarlamalı relüktans motorun kullanımı ve sistemin zeki denetimi", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü*, Ankara, 7-18 (2008).
40. Miller, T. J. E., "Faults and unbalance forces in the switched reluctance machine," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31 (2):319-328 (1995).
41. Stephens, C. M., "Fault detection and management system for fault-tolerant switched reluctance motor drives", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 27 (6): 1098-1102 (1991).
42. Basak, D., Tiwari A. and Das, S. P., "Fault diagnosis and condition monitoring of electrical machines - a review", *Industry Applications Conference*, Phoenix, AZ, 197-204 (1999).
43. Altuğ, S., Chow M. Y. and Trussell, H. J., "Fuzzy inference system implemented on neural architectures for motor fault detection and diagnosis", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 46 (6): 1069-1079 (1999).
44. Bouji, M., Arkadan, A. A. and Ericson, T., "Fuzzy inference system for the characterization of srm drives under normal and fault conditions", *IEEE Transactions on Magnetics*, 37 (5): 3745-3748 (2001).
45. Mir, S., Islam, M. S., Sebastian, T., Husain, I., "Fault-tolerant switched reluctance motor drive using adaptive fuzzy logic controller", *IEEE Transactions On Power Electronics*, 19 (2): 289-295 (2004).
46. Gopalakrishnan, S., Omekanda, A. M. and Lequesne, B., "Classification and remediation of electrical faults in the srm", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 42 (2), 479-486 (2006).
47. Lee, K. J., Park, N. J., Kim, K. H. and Hyun, D. S., "Simple fault detection and tolerant scheme in vsi-fed switched reluctance motor", *Power Electronics Specialists Conference*, Jeju, 1-6 (2006).
48. Elmas, Ç., "Yapay Zeka Uygulamaları", *Seçkin Yayıncılık*, Ankara, 22-30 (2007).
49. Kohonen, T., "Self-Organizing Map 3th Ed.", *Springer*, Germany, 1-28 (2001).
50. Öztemel, E., "Yapay Sinir Ağları", *Papatya Yayıncılık*, İstanbul, 165-184 (2006).

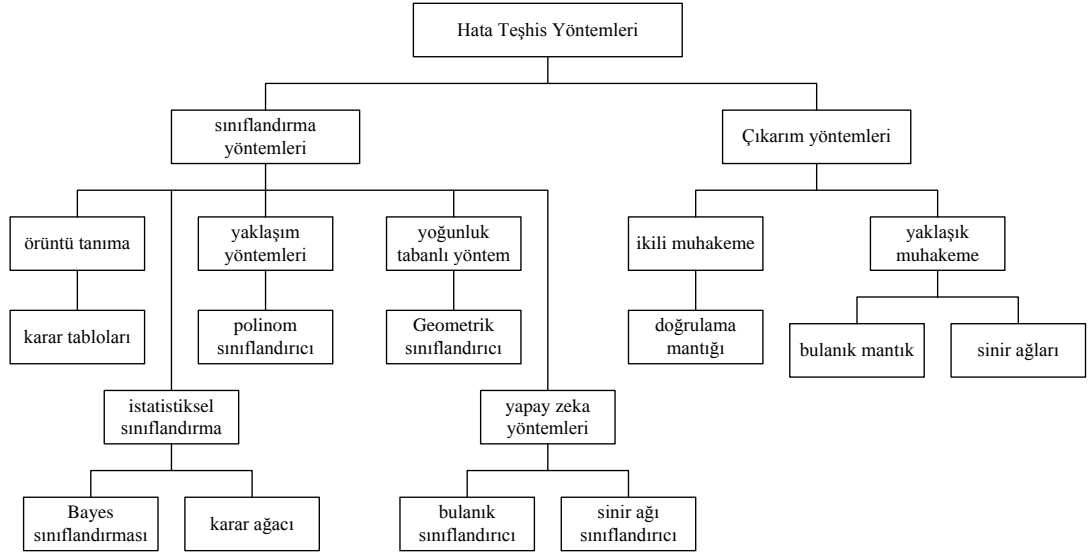
51. Haykin, S., “Neural Networks: a Comprehensive Foundation”, **Prentice-Hall Inc.**, USA, (1998).
52. Lippmann, R. P., “An introduction to computing with neural nets” **IEEE ASSP Magazine**, 4 (2): 4-22 (1987).
53. Üstün, O., “Anahtarlamalı relüktans makinaların akı ve endüktans ölçüm metotlarının inelenmesi”, **SDU International Journal of Technologic Sciences**, 1 (2): 21-33 (2009).
54. Uysal, A., Bayır, R., “Design and implementation of switched reluctance motor driver for industrial controller”, **Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2013 Fourth International Conference on**, İstanbul, 770-774 (2013).
55. Palade, V., Bocaniala, C. D., “Computational intelligence in fault diagnosis”, **Springer**, USA, (2010).
56. Liu, X. Q., Zhang, H. Y., Jun, L. and Yang, J., “Fault detection and diagnosis of permanent-magnet dc motor based on parameter estimation and neural network”, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 47 (5): 1021-1030 (2000).
57. Bayır, R., Bay, Ö.F., “Serial wound starter motor faults diagnosis using artificial neural network”, **IEEE International Conference on Mechatronics**, İstanbul, 194-199 (2004).
58. Li, B., Chow, M.Y., Tipsuwan, Y. and Hung, J.C., “Neural-network-based motor rolling bearing fault diagnosis”, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 47 (5): 1060-1069 (2000).
59. Samanta, B., AI-Balushi, K.R., “Artificial neural network based fault diagnostics of rolling element bearings using time-domain features”, **Mechanical System and Signal Proc.**, 17 (2): 317-328 (2003).
60. Uysal, A., Bayır, R., “Real-time condition monitoring and fault diagnosis in switched reluctance motors with Kohonen neural network”, **Computers & Electronic**, 14 (12): 941-952 (2013).
61. Beale, M. H., Hag, M. T. and Demuth, H. B., “Neural Network Toolbox User Guide”, Mathworks (2013).

EK AÇIKLAMALAR A

HATA TESPİT VE TEŞHİS YÖNTEMLERİ



Şekil EK A.1. Hata tespit yöntemleri



Şekil EK A.2. Hata teşhis yöntemleri

ÖZGEÇMİŞ

Ali UYSAL 1983 yılında İzmir’de doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. İzmir Çınarlı Teknik Lisesi Elektronik Bölümü’nden mezun oldu. 2001 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü’nde öğrenime başlayıp 2006 yılında mezun oldu. 2009 yılında Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalında yüksek lisansını bitirdi. 2009 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliğinde doktora başladı. 2008 yılında Karabük Üniversitesi’nde öğretim görevlisi olarak göreve başladı ve halen aynı yerde çalışmaya devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Karabük Üniversitesi
Teknoloji Fakültesi
Mekatronik Mühendisliği Bölümü
Demir Çelik Kampüsü 78050/ KARABÜK

Tel : (505) 5024980

E-posta : aliuysal@karabuk.edu.tr