

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**OTONOM BİR NÖBETÇİ ROBOT PROTOTİPİNİN TASARIMI
VE LQR TABANLI BULANIK-SİNİR AĞLARIYLA HEDEF
İZLEME KONTROLÜNÜN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Bilal COŞKUN

Doktora Tezi

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Elektrik Elektronik Mühendisliği Teknolojileri Programı

Kontrol ve Kumanda Sistemleri Bilim Dalı

ŞUBAT 2024

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Elektronik Mühendisliği Teknolojileri Programı

Doktora Tezi

OTONOM BİR NÖBETÇİ ROBOT PROTOTİPİNİN TASARIMI VE
LQR TABANLI BULANIK-SİNİR AĞLARIYLA HEDEF İZLEME
KONTROLÜNÜN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Tez Yazarı
Bilal COŞKUN

Danışman
Prof. Dr. Muammer GÖKBULUT

ŞUBAT 2024
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Elektronik Mühendisliği Teknolojileri Programı

Doktora Tezi

Başlığı:	Otonom Bir Nöbetçi Robot Prototipinin Tasarımı ve Lqr Tabanlı Bulanık-Sinir Ağlarıyla Hedef İzleme Kontrolünün Gerçekleştirilmesi
Yazarı:	Bilal COŞKUN
İlk Teslim Tarihi:	11.01.2024
Savunma Tarihi:	12.02.2024

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof. Dr. Muammer GÖKBULUT Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Servet TUNCER Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Üye:	Prof. Dr. Beşir DANDIL İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi	Onayladım
Üye:	Doç. Dr. Ömer Faruk ALÇİN İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Doç. Dr. Muzaffer ASLAN Bingöl Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Burhan ERGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Otonom Bir Nöbetçi Robot Prototipinin Tasarımı ve Lqr Tabanlı Bulanık-Sinir Ağlarıyla Hedef İzleme Kontrolünün Gerçekleştirilmesi” Başlıklı Doktora Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

12.02.2024

Bilal COŞKUN



ÖNSÖZ

Günümüzde, toplumların güvenlik ihtiyaçları giderek daha fazla artmaktadır. Artan ihtiyaçlara etkin ve yenilikçi çözümler bulma zorunluluğu, teknolojik gelişmelerin hız kazanmasıyla birlikte daha da belirgin hale gelmiştir. Bu bağlamda, nöbetçi robotlar; geleneksel güvenlik sistemlerine kıyasla daha etkili, esnek bir çözüm sunma potansiyeline sahip olmalarıyla dikkat çekmektedirler. Yapılan tez çalışmasında, bu potansiyeli daha da geliştirmek amacıyla bir nöbetçi robot prototipi tasarımı yapılmış ve eksen hareketini sağlayan motorların bulanık sinir ağlarıyla dayanıklı ve hassas konum kontrolü ele alınmıştır.

Bu tez çalışmasının fikrinin bulunmasında, yürütülmesinde ve sonuçlandırılmasında bilgi ve tecrübesini benden esirgemeyen, tezin her aşamasında bana yol gösteren, değerli hocam Sayın Prof. Dr. Muammer GÖKBULUT’a teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca tez çalışması boyunca katkı ve yönlendirme sağlayan tez izleme komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Servet TUNCER ve Prof. Dr. Beşir DANDIL’a teşekkürlerimi sunarım.

Bilal COŞKUN
ELAZIĞ, 2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	11
2.1. Otonom Sistemler	11
2.1.1. Otonominin Boyutları	11
2.1.2. Otonom Sistem Birimleri	12
2.1.3. Otonom Silah Sistemleri ve Nöbetçi Robotlar	13
2.2. Elektrik Motorları	13
2.2.1. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların Yapısı	14
2.2.2. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun dq Eksen Modeli	16
2.2.3. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun AYK Tabanlı Konum kontrolü	18
2.3. Anahtarlama Eviriciler	21
2.3.1. Üç Fazlı Eviriciler	21
2.4. Kontrol Sistemleri Yapay Zekâ Uygulamaları	27
2.4.1. Katmanlı Yapay Sinir Ağları (KYSA)	28
2.4.2. Bulanık Mantık.....	31
2.4.3. Sinirsel Bulanık Sistemler	34
3. NÖBETÇİ ROBOT PROTOTİP TASARIMI.....	38
3.1. Mekanik Sistem Tasarımı	38
3.1.1. Motor Seçimi.....	39
3.2. Robot Donanım ve Yazılımı.....	41
3.2.1. Dijital Sinyal İşlemcisi (DSP)	41
3.2.2. DSP Yazılımı Oluşturma.....	42
3.2.3. Motor Sürücü Sistemi.....	47
3.2.4. Matlab/SIMULINK'te SMSM'nin Konum Kontrol Sisteminin Oluşturulması	49
3.2.5. PI Akım Kontrolör Tasarımı	50
4. LQR TABANLI ANFİS KONUM KONTROLÖRÜ TASARIMI	53
4.1. SMSM için LQR Tabanlı Konum Kontrolü Yaklaşımları.....	53
4.1.1. LQR Hız Kontrolörü ve Oransal Konum Kontrolörü.....	55
4.1.2. Doğrudan LQR Konum Kontrolörü	56
4.1.3. Tork Gözleyiciler	56
4.2. ANFİS Tork Gözleyici Tasarımı	58
4.3. LQR Tabanlı ANFİS konum Kontrolör Tasarımı.....	59
4.4. Hedef Tespit ve Takip Sistemi	61
5. BENZETİM VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	62

5.1. SMSM'nin LQR Hız ve Oransal Konum Kontrolü	62
5.2. SMSM'nin Doğrudan LQR Konum Kontrolü	67
5.3. SMSM'nin ANFIS Tabanlı Konum Kontrolü	70
5.4. Nöbetçi Robotun Hedef Takip Performansı	74
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	77
ÖNERİLER	79
KAYNAKLAR	80
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

Otonom Bir Nöbetçi Robot Prototipinin Tasarımı ve Lqr Tabanlı Bulanık-Sinir Ağlarıyla Hedef İzleme Kontrolünün Gerçekleştirilmesi

Bilal COŞKUN

Doktora Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Elektronik Mühendisliği Teknolojileri Programı

Şubat 2024, Sayfa: xv + 87

Sınır hatlarını veya hassas güvenlik bölgelerini korumak günümüzde önemli bir problemdir. Bu amaçla nöbetçi robotların kullanımı bazı potansiyel avantajlar sağlamaktadır. Nöbetçi robot ve bu kategoride değerlendirilen sistemler tarafından algılanan hedefin hassas bir şekilde takip edilmesi kritik öneme sahiptir. Eksen hareketlerinin tahrikinde kullanılan sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM) yüksek verim, güç yoğunluklarının fazla olması, sağlam yapıda olmaları gibi sebeplerden dolayı bu çalışmada tercih edilmiştir. Bununla birlikte bu motorların sahip oldukları doğrusal olmayan dinamikler ve yük torku bozucuları bu motorların hassas kontrolünü kısıtlar.

Bu tez çalışmasında iki eksenle hedef takibi yapabilen, eksen tahrikinde SMSM'ler kullanan nöbetçi bir robot prototipi tasarlanmış ve lineer kuadratik regülatör (Linear quadratic regülatör-LQR) tabanlı bulanık sinir ağı çıkarım sistemi (Adaptive neuro-fuzzy inference system-ANFIS) kontrolör ile hassas konum kontrolü gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yük torkundan kaynaklanan bozulmaların minimize edilmesi amacıyla ANFIS tabanlı yük torku gözleyici tasarlanarak kontrol sistemi daha dayanıklı hale getirilmiştir.

Farklı LQR kontrolör yapıları için Matlab/SIMULINK ortamında yapılan benzetim çalışmalarından elde edilen verilerle ANFIS tabanlı kontrolör ve tork gözleyici tasarımları gerçekleştirilmiştir. Sistemin hedef takip performansını değerlendirmek amacıyla iki eksenle girilen referans konum bilgilerine göre eksen hareketleri incelenmiştir. Devamında Matlab/SIMULINK Open CV eklentisi yüz takip algoritması vasıtasıyla hedefin konum bilgileri gerçek zamanlı olarak elde edilmiş ve konum bilgilerine göre nöbetçi robotun hedefi yüksek hassasiyet ile izlemesi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nöbetçi Robot, SMSM, LQR, ANFIS, Tork gözleyici

ABSTRACT

Design of an Autonomous Sentry Robot Prototype and Realization of Target Tracking Control with Lqr Based Fuzzy-Neural Networks

Bilal COŞKUN

Ph.D. Thesis

FIRAT UNIVERSITY

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

Electrical and Electronics Engineering Technologies

February 2024, Pages: xv + 87

Protecting border lines or sensitive security areas is an important problem today. The use of sentry robots for this purpose provides some potential advantages. It is critical to precisely track the target detected by the sentry robot and the systems evaluated in this category. Permanent magnet synchronous motors (SMSM) used in the drive of axis movements were preferred in this study due to their high efficiency, high power density, and robust structure. However, the nonlinear dynamics and load torque disturbances of these motors restrict the precise control of these motors.

In this thesis study, a sentry robot prototype that can track targets in two axes and uses SMSMs in the axis drive was designed and sensitive with a LQR based ANFIS controller. position control has been carried out. In addition, in order to minimize distortions caused by load torque, an ANFIS-based load torque observer has been designed and the control system has been made more durable.

ANFIS-based controller and torque observer designs were realized with the data obtained from simulation studies in Matlab/SIMULINK environment for different LQR controller structures. In order to evaluate the target tracking performance of the system, axis movements were examined according to the reference position information entered in two axes. Subsequently, the location information of the target was obtained in real time through the face tracking algorithm of the Matlab/SIMULINK Open CV plug-in, and the sentry robot was successfully able to track the target with high precision according to the location information.

Keywords: Sentry Robot, PMSM, LQR, ANFIS, Torque observer

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Samsung SGR1-A nöbetçi robot	2
Şekil 1.2. Dodaam super aegis 2	3
Şekil 1.3. Rahpael nöbetçi robot	3
Şekil 1.4. Nöbetçi robot prototipi	4
Şekil 1.5. PID kontrollü iki eksen servo mekanizma	4
Şekil 2.1. SMSM'nin stator akısı ile rotor akısı arasındaki etkileşim.....	15
Şekil 2.2. Sabit mıknatıslı senkron motor	16
Şekil 2.3. $\alpha\beta$ stator referans düzlemi ve dq rotor referans düzlemi	16
Şekil 2.4. SMSM'nin dq eksen eşdeğer devreleri.....	17
Şekil 2.5. Üç fazlı stator akımları	18
Şekil 2.6. Alfa beta eksen akımları.....	19
Şekil 2.7. dq eksen akımları	19
Şekil 2.8. SMSM'nin AYK tekniği ile konum kontrolü genel blok şeması	20
Şekil 2.9. Evirici blok diyagramı.....	21
Şekil 2.10. Gerilim kaynaklı üç fazlı evirici devresi	22
Şekil 2.11. Ölü zaman diyagramı	22
Şekil 2.12. SDGM anahtarlama ve çıkış gerilim sinyali (a) Sinüs üçgen sinyali karşılaştırma (b) Evirici faz faz arası çıkış gerilimi.....	24
Şekil 2.13. Eviricinin gerilim vektörleri ve anahtarlama bölgeleri.....	24
Şekil 2.14. V_1 , V_2 , V_0 gerilim vektörleri	25
Şekil 2.15. Birinci sektör için modülasyon sinyalleri.....	26
Şekil 2.16. Sektörlere göre anahtarlama sıralaması.....	26
Şekil 2.17. UVDGM tekniği karşılaştırma ve gerilim sinyalleri (a) Taşıyıcı üçgen sinyali ile üç fazlı sinüs sinyali (b) V_{ab} gerilimi (c) V_{an} gerilimi	27
Şekil 2.18. Katmanlı YSA yapısı	28
Şekil 2.19. Üç katmanlı ve tek çıkışlı ileri beslemeli YSA'nın sinyal akış şeması	29
Şekil 2.20. Doğrudan YSA ters model kontrol yapısı	31
Şekil 2.21. Üçgen üyelik fonksiyonu.....	32
Şekil 2.22. BM denetleyici yapısı.....	32
Şekil 2.23. Giriş üyelik fonksiyonları (a) Hata, (b) Hatanın değişimi	33
Şekil 2.24. Yirmi beş kurallı örnek kural tabanı.....	33

Şekil 2.25. Sonuç bulanık kümesi	34
Şekil 2.26. Sugeno tipi ANFIS mimarisi	35
Şekil 3.1. Robot koordinat sistemi	38
Şekil 3.2. Nöbetçi robot üç boyutlu modeli	38
Şekil 3.3. Nöbetçi robot deney düzeneği	39
Şekil 3.4. Kasnak dönüşüm oranı	39
Şekil 3.5. SMSM tork karakteristiği	40
Şekil 3.6. Nöbetçi robot deney düzeneği elektronik ünitesi	41
Şekil 3.7. C2000 TMS320F28379D Delfino geliştirme kartı	42
Şekil 3.8. Matlab/SIMULINK hızlı prototipleme blok diyagramı	43
Şekil 3.9. Donanım için yazılım oluşturma akış şeması	43
Şekil 3.10. ePWM alt modülleri	44
Şekil 3.11. ePWM modülü modülasyon sinyali ve anahtarlama sinyali üretme	45
Şekil 3.12. Döner artımlı enkoder	46
Şekil 3.13. Rotasyonel artımlı enkoder çıkış sinyalleri	46
Şekil 3.14. DRV8301 Booster Pack üç fazlı motor sürücü	47
Şekil 3.15. DRV8301 motor sürücü akım ölçme devresi	48
Şekil 3.16. DRV8301 sürücü ofset ve kazanç devresi	49
Şekil 3.17. SMSM'nin AYK tabanlı Matlab/SIMULINK benzetim modeli	49
Şekil 3.18. Akım kontrolör bloğu Matlab/SIMULINK benzetim modeli	50
Şekil 3.19. P konum ve PI hız kontrolörü Matlab/SIMULINK benzetim modeli	50
Şekil 4.1. LQR tabanlı konum kontrolör yapısı	54
Şekil 4.2. LQR hız oransal konum kontrolör yapısı	55
Şekil 4.3. Doğrudan LQR kontrolör yapısı	56
Şekil 4.4. Motor modelinden oluşturulmuş tork gözleyici yapısı	57
Şekil 4.5. SMSM'nin LQR tabanlı konum kontrolü blok şeması	57
Şekil 4.6. ANFIS tabanlı tork gözleyici yapısı	58
Şekil 4.7. SMSM'nin LQR+ANFIS tork gözleyici tabanlı konum kontrolü	59
Şekil 4.8. Üç girişli tek çıkışı ANFIS konum kontrolörü ağ yapısı	60
Şekil 4.9. SMSM'nin ANFIS+Tork gözleyici tabanlı konum kontrolü blok şeması	60
Şekil 4.10. Matlab/SIMULINK OpenCV yüz takip modeli	61
Şekil 5.1. SMSM'nin LQR+ANFIS _{OBS} konum kontrol Matlab/SIMULINK benzetim modeli	63
Şekil 5.2. Konum kontrolörü oransal-hız kontrolörü LQR Matlab/SIMULINK modeli	63
Şekil 5.3. LQR ve LQR+ANFIS _{TLOBS} kontrolörlerin referans konumu takip performansı benzetim grafiği	64

Şekil 5.4. LQR kontrolör q eksen akımlarının benzetim grafiği.....	64
Şekil 5.5. ANFIS tork gözleyici çıkış benzetim sinyali.....	65
Şekil 5.6. LQR ve LQR+ANFIS _{OBS} referans sinyali takip performansı deneysel grafiği	65
Şekil 5.7. LQR kontrol q eksen akımı deneysel çıkış sinyali	66
Şekil 5.8. ANFIS tork gözleyicisi deneysel çıkış sinyali.....	66
Şekil 5.9. SMSM'nin doğrudan LQR ile konum kontrolü Matlab/SIMULINK benzetim modeli	67
Şekil 5.10. Doğrudan LQR konum kontrolörü Matlab/SIMULINK modeli	67
Şekil 5.11. Doğrudan LQR ile referans sinyali takip performansı benzetim çıkış grafiği	68
Şekil 5.12. Doğrudan LQR kontrolör q eksen akımları benzetim grafiği.....	68
Şekil 5.13. Doğrudan LQR referans sinyali izleme performansı deneysel çıkış grafiği	69
Şekil 5.14. Doğrudan LQR q eksen akımları deneysel çıkış sinyali.....	69
Şekil 5.15. SMSM'nin ANFIS tabanlı konum kontrolü Matlab/SIMULINK modeli	70
Şekil 5.16. ANFIS konum kontrolör Matlab/SIMULINK modeli.....	70
Şekil 5.17. Hedef çıkış ve ANFIS ağ çıkışı	71
Şekil 5.18. ANFIS esaslı konum kontrolü referans sinyali takip performansı benzetim grafiği	71
Şekil 5.19. ANFIS esaslı konum kontrolü q eksen akımları benzetim grafiği.....	72
Şekil 5.20. ANFIS ve P+PI esaslı konum kontrolör referans sinyali takip performansı benzetim grafiği ...	72
Şekil 5.21. ANFIS konum kontrolör ile referans sinyali takip performansı deneysel grafiği.....	73
Şekil 5.22. ANFIS esaslı konum kontrolörü q eksen akımları deneysel çıkış grafiği	73
Şekil 5.23. ANFIS esaslı konum kontrolörü i_a ve i_b faz akımları deneysel çıkış grafiği	74
Şekil 5.24. ANFIS konum kontrolörlü nöbetçi robot hedef izleme performansı benzetim grafiği.....	74
Şekil 5.25. İki eksen de konum kontrolü deney düzeneği	75
Şekil 5.26. ANFIS kontrolörlü nöbetçi robotun lazer işaretleyicisi konum değişimi deneysel sonucu	75
Şekil 5.27. Belirli yörüngede hareket eden hedefin konum değişimi	76
Şekil 5.28. Nöbetçi robotun iki eksen de hedef izleme performansı deneysel çıkış grafiği	76

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. SMSM parametreleri	40
--	----



SİMGELER VE KISALTMALAR

B	: Sürtünme kuvveti
i_d	: d eksen akımı
i_q	: q eksen akımı
J	: Atalet momenti
K_e	: Elektrik sabiti
K_t	: Tork sabiti
L_d	: q eksen endüktansı
L_q	: d eksen endüktansı
P	: Kutup sayısı
R_s	: Stator direnci
T_e	: Motor torku
t_d	: Ölü Zaman
T_L	: Yük torku
t_r	: Yükselme zamanı
t_s	: Yerleşme zamanı
V_{an}	: Faz-nötr gerilimi
V_d	: d eksen gerilimi
V_q	: q eksen gerilimi
V_{LL}	: Hat gerilimi
V_{ref}	: Referans gerilim
ω_r	: Rotor hızı
Δ_e	: Hatanın değişimi
λ_d	: d eksen akısı
λ_q	: q eksen akısı
θ	: Rotor açısı

AA	: Alternatif Akım
ABKKK	: Uyarlanabilir Geri Adımlı Kayan Kipli Kontrol
ADC	: Analog Dijital Konvertör
ALNiCO	: Alüminyum Nikel Kobalt (AlNiCo)
ANFIS	: Bulanık sinir Ağı Tabanlı Çıkarım Sistemi
AQ	: Eylem Niteleyici
AVR	: Otomatik voltaj Regülatörü
AYK	: Alan Yönlendirmeli Kontrol
BM	: Bulanık Mantık
BJT	: Bipolar Jonksiyon Transistör
BSA	: Bulanık Sinir Ağları
CCP	: Karşılaştırma Yakalama Dalga
CCS	: Code Composer Studio
DA	: Doğru Akım
DAC	: Dijital Analog Konvertör
DGM	: Dalga Genişlik Modülasyonu
DSP	: Dijital Sinyal İşlemcisi
EKF	: Genişletilmiş Kalman Filtresi
FALCON	: Fuzzy Adaptive Learning Control Network
FINEST	: Fuzzy Inference and Neural Network in Fuzzy Inference Software
FUNE	: Fuzzy Net
GA	: Genetik Algoritma
IGBT	: Kapıdan İzoleli Bipolar Transistör
IR	: Kızılötesi
İBKYS	: İleri Beslemeli Katmanlı Yapay Sinir Ağları
KKK	: Kayan Kipli Kontrol
LESO	: Doğrusal Durum Gözlemcisi
LTID	: Yük Torku Tanımlama
LQR	: Doğrusal Karesel Regülatör
MCT	: Mos Kontrollü Tristör
MOSFET	: Metal Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör
MPC	: Model Tahminli Kontrol
MRAS	: Model Referans Adaptif Sistem
NDFEB	: Neodim Demir Bor (NdFeB)
NDO	: Doğrusal Olmayan Yük Torku Gözlemcisi
NEFCLASS	: Neuro Fuzzy Classification
NEFCON	: Neuro Fuzzy Control
NEMA	: Ulusal Elektrik Üreticileri Birliği
OEM	: Orijinal Ürün Üreticisi
OCR	: Çıkış Karşılaştırma Registeri
PID	: Oransal İntegral Türev
PPR	: Dakikadaki Darb Sayısı
PU	: Per-Unit
RBFN	: Radyal Tabanlı Fonksiyon Ağları
RMSE	: Hataların Karelerinin Ortalaması
RWENN	: Tekrarlayan Elmacık Tabanlı Elman Sinir Ağı
S&H	: Örnekleme ve Tutma

SDGM	: Sinüzoidal Dalga Genişlik Modülasyonu
SMSM	: Sabit Miknatıslı Senkron Motor
TB	: Zaman Tabanı
TBPRD	: Zaman Tabanlı Sayıcı Periyodu
TMCTR	: Zaman Tabanlı Sayıcı
TZ	: Zaman bölgesi
UVDGM	: Uzay Vektör Dalga Genişlik Modülasyonu
UZ	: Uzman Sistemler
YSA	: Yapay Sinir Ağları
YZ	: Yapay Zekâ



1. GİRİŞ

Yapay zekâ (YZ), makinelere zekâ kazandırmaya adanmış faaliyetler bütünü olarak tanımlanmaktadır [1]. Bu tanımla birlikte daha teknik bir yaklaşımla YZ genel olarak insan zekâsının yazılım veya elektronik sistemler yardımıyla taklit edilmesi olarak ifade edilebilir. YZ teknikleri son yıllarda geniş bir uygulama ve araştırma alanı bulmuştur. Görüntü işleme, ses tanıma, nesne takibi, veri analizi, sınıflandırma ve tahmin amacıyla yaygın şekilde kullanılan bu teknikler bulanık mantık (BM), yapay sinir ağları (YSA), genetik algoritma (GA), uzman sistemler (US) ve bu sistemlerinin kombinasyonu şeklinde olabilmektedir. [2]. Yapay zekâ için; dar yapay zekâ, genel yapay zekâ, süper zekâ gibi sınıflamalar yapılmış olsa da bu çalışmanın konusu olmadığından yapay zekânın sınıflandırma detayları verilmeyecektir. YZ sistemleri, önceden belirlenmiş görevler doğrultusunda çevreden sensörler yardımıyla alınan verilerin algoritmalar vasıtasıyla değerlendirilerek tahminler, yorumlar ve çıktılar üretilmesi döngüsü ile çalışmaktadır Bu yorum ve çıktılar herhangi bir konudaki bilgisel veriler olabileceği gibi, robotik bir sistemi yörünge planı dâhilinde hareket ettiren bir manipülatörün kontrol komutu da olabilir [3]. Yazılım ve donanım alanındaki gelişmeler ile yapay zekâ tekniklerinin fiziksel dünyada uygulamalarının yaygınlaşması, bu sistemleri günlük hayatta daha görünür hale getirmiştir. Bu tekniklerinin fiziksel dünyada kullanıldığı alanlardan biri de robotik sistemlerdir. YZ'nin robotik sistemlere uygulanması ile otonom robotik sistemler tasarlamak mümkün olmuştur. Temizlik robotları, insansız hava ve kara araçları, hedef takip sistemleri YZ tekniklerinin robotik sistemlere uygulanmasının örneklerinden sadece birkaçıdır [4].

Otonom sistemler işlev bazında veya tamamen kendi kendini kontrol edebilen, hedef tanımlı ve takibini insan müdahalesi olmadan yapabilen sistemlerdir [5]. Başka bir yaklaşıma göre ise önceden yapılandırılmış algoritmalarla göre belli bir işlevi yerine getiren sistemler olarak tanımlanmıştır [6]. Sade tanımlı otonom sistemler aktif edildikten sonra, belli bir görevi ya da işlevi, kendi kendine yerine getiren sistemler olarak tanımlanabilir. ABD savunma bakanlığının otonom sistemler için tanımladığı üç boyut bulunmaktadır. Bu boyutlar makinanın görevi, görevi icra ederken makinanın insan ile olan ilişkisi ve makinanın karar mekanizması şeklinde tanımlanmaktadır [7].

Otonom sistemlerin çeşitli formları askeri uygulamalarda uzun yıllardır kullanılmaktadır. Genel olarak insansız araçlar (Hava, kara, deniz üstü, denizaltı), uzaktan kumandalı veya otonom olarak hareket edebilen arama-tarama, lojistik faaliyetlerde kullanılan mobil robotlar, robotik nöbetçi silahlar ve güdümlü mühimmatlar otonom sistemlerin askeri alanda uygulanmasının örneklerindendir. Bu uygulamalara bakıldığında otonomluğu kısıtlanmış, işlev bazında otonom sistemler olduğu gibi, hedefi arayıp bulan, hedefe kilitlenen (güdümlü) müdahale kararını kendisi alabilen otonom sistemlerde mevcuttur. Otonom silah sistemlerinin çoğu yarı-otonom silah

sistemleridir. Yarı-otonom silah sistemleri döngünün üzerinde insanın olduğu hedef tespiti ve takibi yapma kapasitesi olan sistemlerdir. Bu sistemlerin hangi hedefe yöneleceğine insan karar vermektedir. Yarı otonom, tam otonom sistem ayrımı tam olarak yapılmadığından genel olarak bu sistemlere otonom sistemler denilmektedir [8].

Otonom nöbetçi robotlar sınır hatlarını korumak veya insandan arındırılmış bölgelerde güvenliği sağlamak için geliştirilen sistemler olarak tanımlanmaktadır. Bu sistemler sabit platformlarda kullanılabileceği gibi çeşitli mobil araçlara akuple bir şekilde kullanılabilirler. Otonom nöbetçi robotların hangi oranda otonom olacağı konusunda belirsizlikler bulunmaktadır. Hedef tespitlerini genellikle dijital ve kızılötesi (IR) kameralar vasıtasıyla hareket ve ısı modeline dayanarak yapan bu sistemlerin tam-otonom modda kullanımı için halen çekinceler mevcuttur [9].

Bu çalışma disiplinler arası bir çalışma olduğundan, literatür iki kısımda incelenmiştir. Öncelikle otonom nöbetçi robotlar ve bu kategoride değerlendirilen sistemlerin literatür incelemesi verilecektir. Sonrasında bu tezin temel konusu olan SMSM'lerin hassas konum kontrolünde kullanılan doğrusal olmayan kontrol yöntemleri ile ANFIS kontrolöre ait literatür verilecektir.

Otonom nöbetçi robotlar, hedeflerini otomatik olarak algılayabilen, takip edebilen ve etkileşime girebilen sistemlerdir.

Kaynak [10]'da, Güney Kore'de Samsung Techwin firması ve Kore Üniversitesi tarafından geliştirilen SGR-A1 model nöbetçi silah, Güney Kore Kuzey Kore arasındaki askerden arındırılmış bölgede sınır ihlali yapan kişileri tespit ve takip amacıyla kullanılmaktadır. Bu otonom robot takip ve izleme için ayrı ayrı kameraya sahip olup, ısı ve hareket dedektörleri ile donatılmıştır [10]. Şekil 1.1'de Samsung SGR1-A nöbetçi robot verilmiştir.



Şekil 1.1. Samsung SGR1-A nöbetçi robot [10]

Kaynak [11]'de, Güney Kore'de DODAAM firması tarafından geliştirilen otonom olarak çalışabilen Super aEgis 2 model nöbetçi robot verilmiştir. Sınır güvenliği dışında da çeşitli görevler için kullanılabilen bekçi robot olarak tanımlanan silah kategorisindedir. Otonom olarak hedef tespit

ve takibi yapabilen bu silah sistemi, hedefe müdahalesini manuel konumda veya otonom olarak yapabilmektedir [11], [12]. Şekil 1.2’de DODAAM süper aegis model bekçi robot görülmektedir.



Şekil 1.2. Dodaam super aegis 2 [11]

Kaynak [13]’te, İsrail tarafından geliştirilen Rahpael Sentry Gun sınır hatlarını korumak için kullanılan nöbetçi kulesi montajlı nöbetçi silah olarak tanımlanmaktadır [13]. Şekil 1.3’te Rahpael nöbetçi robot verilmiştir.



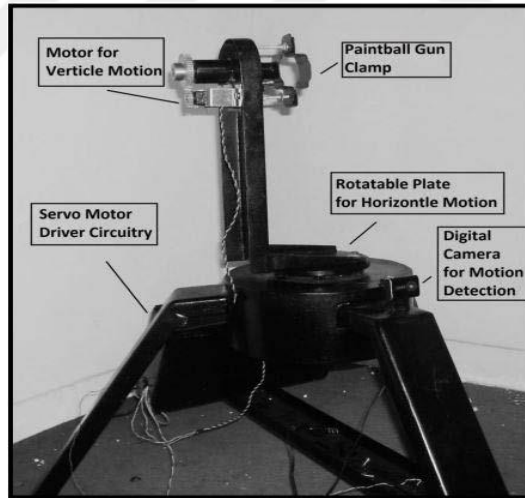
Şekil 1.3. Rahpael nöbetçi robot [13]

Kaynak [14]’te, otonom olarak çalışan düşük maliyetli bir nöbetçi robot silah tasarımı yapılmıştır. Tasarımı yapılan robotun hedef tespit ve hedef takibinde Matlab Image Processing araç kutusundan yararlanılmış ve arka plan tahmin yöntemiyle hedef takibi gerçekleştirilmiştir. Kameradan gelen görüntü sinyalleri bilgisayara aktarılarak optimizasyonu yapılan görüntülerden elde edilen konum bilgileri mikrodenetleyiciye gönderilmiştir. Deneysel çalışmalar Şekil 1.4’te verilen prototip üzerinde yapılmıştır. Uygulaması yapılan düşük maliyetli bu sistemin istenen amacı yerine getirdiği belirtilmiştir [14].



Şekil 1.4. Nöbetçi robot prototipi [14]

Kaynak [15]'te, otomatik hedef takibi yapabilecek iki eksenli servo mekanizmaya sahip bir silah kulesinin tasarlanmış ve. eksen hareketini sağlayan motorların konum kontrolünde PID kontrolör kullanılmıştır. Çeşitli referans açılar için sistemin referansı izleme başarısı değerlendirilmiş ve sistemde aşmaların olduğu bildirilmiştir [15]. Şekil 1.5'te PID kontrollü iki eksen servo mekanizmaya sahip silah kulesi tasarımı verilmiştir.



Şekil 1.5. PID kontrollü iki eksen servo mekanizma [15]

Kaynak [16]'da, Matlab/SIMULINK ortamında iki eksenli hedef takibi yapabilen bir servo mekanizmanın benzetimi yapılmıştır. DA servo motorların konum kontrolü herhangi bir denetleyici olmadan, BM kontrolör, PID kontrolör ve son olarak da ANFIS tabanlı kontrolör kullanılarak yapılmıştır. Yükselme zamanı (t_r), oturma zamanı (t_s), maksimum aşma (% M) gibi performans kriterlerine göre önerilen yöntem incelenmiş, ANFIS algoritmasıyla kontrol edilen sistemin

performansının çok daha iyi olduğu gözlemlendiği ve gelecek çalışmalarda benzetimi yapılan sistemin uygulanmasının da yapılacağı belirtilmiştir [16].

Kaynak [17]'de, otonom bir nöbetçi silahın hedef takip sistemi için Pixy CMUCam5 kamera ve PixyMon yazılımından faydalanılmıştır. Hedefin renginin koyuluğu-açıklığı, boyutu ve uzaklığına göre denemeler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Hedefin renkleri koyulaştırıldığında takip sistemi hatalı çalışmış, renkler daha açık seçildiğinde takip sistemi daha doğru çalışmıştır. Aynı şekilde yakın mesafedeki hedeflerde ve daha büyük hedeflerde sistemin hedef takibini daha doğru yaptığı ifade edilmiştir. Görüntüdeki hedefin pixel koordinatları konum bilgileri seri iletişim vasıtası mikrodenetleyiciye gönderilmiş ve servo sistemin hareketi sağlanmıştır. [17].

Kaynak [18]'de, Matlab ortamında çerçeve farkları (FM) ve mean-shift algoritmaları kullanılarak hedef tespit ve takibi yapılmıştır. Çalışmanın devamında benzetimi yapılan sistemin pan/tilt mekanizması üzerinde uygulaması yapılmıştır. Kameradan alınan görüntüler çerçeve farkları (FM) ve mean-shift algoritmalarında işlenerek nesnenin koordinatları belirlenmiştir. Hedefin konum bilgisi yatay ve dikey açı bilgilerine dönüştürülerek seri port üzerinden mikrodenetleyiciye gönderilmiştir. AVR mikrodenetleyicinin çıkış karşılaştırma register (OCR) birimi vasıtasıyla servo motorlar sürülmüş ve pan/tilt mekanizması üzerindeki lazerin hedefi izlemesi sağlanmıştır [18].

Kaynak [19]'da, askeri araçlarda kullanılan silah kulesinin kontrolü için PID ve kayan kipli kontrol (KKK) tabanlı denetleyici önerilmiştir. İki eksenli servo mekanizmanın tanımlanmış referans açılara göre hareket etmesi sağlanmıştır. Benzetim Matlab/SIMULINK ortamında yapılmış ve servo mekanizmaların hareketi için DA motorlar kullanılmış. Önerilen KKK tabanlı kontrolörün, PID tabanlı kontrolöre göre silah kulesinin daha doğru ateş açısına yönlendirdiği ve sistemin referans açı takibini yüksek hassasiyet ve doğrulukta yaptığı belirtilmiştir [19].

Kaynak [20]'de, manuel olarak çalışan araç üstü silah kulesinin otomatikleştirilmesi için kamera görüntülerinin çok katmanlı sinir ağlarıyla işlenerek hedef takibi yapılması önerilmiştir. Kameradan alınan veriler çok katmanlı sinir ağında işlendikten sonra servo sisteme konum bilgileri gönderilmiştir. V-REP robot benzetim ortamında yapılan bu çalışmada hedef takip sisteminin bazı karelerde nesne takibinde yavaş kaldığı bildirilmiştir [20].

Nöbetçi robotlara yönelik ilgili literatürdeki ulaşılabilen kaynaklar incelendiğinde bu robotlarla ilgili çalışma ve tasarımların sınırlı olduğu gözlemlenmektedir.

SMSM'ler rotor kayıplarının olmaması, yüksek verimli olmaları, yüksek tork/ağırlık oranına sahip olmalarından dolayı endüstride, savunma sanayiinde, yüksek performanslı hassas hareket kontrol uygulamalarında, yaygın şekilde kullanılmaktadırlar. Bununla birlikte ölçülemeyen yük torkundan kaynaklanan bozulmalar, SMSM'nin sahip olduğu doğrusal olmayan dinamikler, parametre değişimlerine karşı duyarlı olması motorun yüksek hassasiyetli hız/konum kontrolünü

önemli oranda kısıtlayan etmenlerdir. SMSM'nin hassas kontrolünü kısıtlayan bu dezavantajlı durumun ortadan kaldırılması için literatürde geleneksel oransal+integral (PI) kontrolöre ek olarak, uyarlamalı kontrol, lineer olmayan kontrol, optimal kontrol ile bulanık sinir ağı tabanlı kontrol teknikleri SMSM'nin kontrolü için uygulanmıştır [21]. SMSM'nin kontrolünde bu tekniklerin kullanılması ile yüksek performanslı SMSM sürücülerinin geliştirilmesi mümkün olmuştur [22].

Kaynak [23]'te, tanklarda bulunan ve iki eksenle hareket edebilen silah kulesinin tahriki için SMSM'ler kullanılmıştır. SMSM'nin yörünge kontrolündeki lineer olmayan belirsizlikleri ve bozucu girişleri ortadan kaldırmak için adaptif öğrenme kontrol algoritması ve iteratif öğrenme kontrol (ILC) algoritmaları birleştirilmiştir. Benzetim sonuçlarına göre önerilen yöntemin kullanılmasıyla sistemin, referans konumu yüksek hassasiyetle izlediği rapor edilmiştir [23].

Kaynak [24]'te, robot manipülatörlerinde kullanılan SMSM'ler için modelden bağımsız bir kontrolör tasarımı yapılmıştır. Manipülatör dinamiğindeki belirsizliklerin ve dış bozulmalar SMSM'nin gerilim denklemlerine dâhil edilmiş ve uyarlanabilir BM kullanılarak, akıllı bir konum kontrol algoritması önerilmiştir. Önerilen kontrol yöntemi ile ilgili benzetimler yapılmıştır. Yapılan benzetimler önerilen yöntemin etkinliğini vurgulamaktadır [24].

Kaynak [25]'te, SMSM'nin konum kontrolörü olarak bulanık uyarlamalı PID kontrolör önerilmiştir. SMSM'nin konum kontrolünün Matlab/SIMULINK benzetim ortamında yapıldığı çalışmada, sistem performansının artırılması amaçlanmıştır. Geleneksel PID ve uyarlamalı bulanık PID kontrolörler karşılaştırılmış, bulanık uyarlamalı PID kontrolöre sahip sistemin daha yüksek performans gösterdiği belirtilmiştir [25].

Kaynak [26]'da, SMSM sürücüleri için H_∞ kontrolörü önerilmiş konum ve hız döngüsü birleştirilerek, kontrol yapısı optimize edilerek basitleştirilmiştir. Benzetim ve deneysel çalışmalar önerilen kontrol yapısının PI kontrolörden daha iyi bir performans gösterdiği ve önerilen denetim yapısının daha dayanıklı olduğu vurgulanmıştır [26].

Kaynak [27]'de, SMSM servo sürücüsünün konum kontrolü için tekrarlayan elmacık tabanlı elman sinir ağı (RWENN) tabanlı kontrolör, optimal bir kontrolör ve dayanıklı bir kontrolör birlikte kullanılarak akıllı optimal RWENN kontrolör tasarlanması ve SMSM'nin konum izleme performansının yüksek oranda artırılması amaçlanmıştır. TMS320C31 DSP kullanılarak deneyler yapılmıştır. Benzetim ve deneysel sonuçlar önerilen tümleşik akıllı kontrol algoritmasının yük bozulmaları ve sistem belirsizliklerinden bağımsız olarak konum izleme performansını önemli ölçüde arttırdığı rapor edilmiştir [27].

Kaynak [28]'de, SMSM tahrikli iki eklemlili bir robotunun konum kontrolünde RBF sinir ağı ve bilinmeyen yük torku tahmini amacıyla Sage-Husa uyarlanabilir kalman filtresi kullanılmıştır. Modelleme hatası, yük torku bozulmaları ve düşük kararlılık kaynaklı sorunları çözmek için önerilen bu yöntem ile kayan kipli kontrol (KKK) ve PD denetleyiciye sahip sistemlerin karşılaştırmalı benzetimi ve deneysel çalışmaları yapılmıştır. Önerilen kontrolör yapısının diğer

kontrolör yapılarına göre, kararlı duruma daha çabuk ulaştığı ve kararlı durum performansının daha iyi olduğu belirtilmiştir [28].

Kaynak [29]'da, harici yük torku dalgalanmaları ve sistem parametrelerindeki değişim durumlarında SMSM için güvenilir bir konum kontrolü sağlamak için, doğrusal olmayan bir yük torku gözlemcisine (NDO) sahip uyarlanabilir geri adımlı kayan kipli kontrol (ABSMC) yapısına sahip bir kontrolör önerilmiştir. Doğrusal olmayan yük torku gözlemcisinin, bilinmeyen bozulmaları tahmin etmesi ve ABSMC için ileri yol besleme telafisi sağlaması amaçlanmıştır. SMSM'nin kademeli kontrol yapısının aksine bu sistem, tek döngülü bir yapı olarak tasarlanmıştır. STM32F446VC işlemci (Cortex-M4, 168Mhz) kart kullanılarak yapılan bu deneysel çalışmada önerilen kontrolör yapısının etkinliğini göstermek için beş adet farklı kontrolör yapısına sahip sistemlerle denemeler yapılmıştır. ABSMC+NDO denetleyiciye sahip sistemin ani harici yük torku uygulanması durumunda üstün bir şekilde bozulma reddi ürettiği, yerleşme süresinin daha kısa olduğu ve sistemde aşmanın çok daha az olduğu bildirilmiştir [29].

Kaynak [30]'da, yük torku gözlemcisine sahip bulanık bir kayan mod kontrolör SMSM'nin hız kontrolü için önerilmiştir. Önerilen kontrol algoritmasının TMS320F28335 kayan noktalı bir DSP kullanılarak uygulaması yapılmıştır. PI, BM ve bulanık kayan mod denetleyiciye sahip sistemlerle karşılaştırmalı olarak yapılan benzetim ve deneysel çalışmalar, önerilen denetleyici yapısının, diğer denetleyiciye sahip sistemlere göre daha etkin performans gösterdiği belirtilmiştir [30].

Kaynak [31]'de, vektör kontrolü kullanan SMSM'nin konum kontrol performansının iyileştirilmesi amacıyla sinirsel uyarlamalı bir KKK algoritması önerilmiştir. Önerilen algoritma hızlı terminal kaydırma modu ve radyal tabanlı fonksiyon ağları (RBFN) birleştirilerek sunulmuştur. YSA parametreleri Lyapunov yaklaşımına göre güncellenmiştir. Deneysel sonuçların önerilen algoritmanın uygulanabilir olduğunu, SMSM'nin yanıt hızını ve konum izleme performansını iyileştirdiği bildirilmiştir [31].

Kaynak [32]'de, SMSM uzun bir mile bağlı yükü tahrik amacıyla kullanılmıştır. SMSM'nin hassas konum kontrolü performansını önemli oranda etkileyen, aktarma organlarında meydana gelen histerisiz sapma ve doğrusal olmayan dinamiklerden kaynaklı bozulmaların giderilmesi için genişletilmiş doğrusal durum gözlemcisi (LESO) tabanlı parazit önleyici (BPC) bir konum kontrol yöntemi önerilmiştir. Hazırlanan prototip ile yapılan deneyler sonucunda, önerilen kontrol yapısının yük konum hatasını bastırmada üstün performans gösterdiğini ve önerilen kontrol yöntemiyle dayanıklı bir kontrol yapısı elde edildiği bildirilmiştir [32].

Kaynak [33]'de, SMSM'nin hız kontrolünde PI ve ANFIS kontrolör kullanılarak, yüklü ve yüksüz durumlar için farklı referans hızlarda benzetimler gerçekleştirilmiştir. ANFIS kontrolöre sahip sistemde ihmal edilebilecek seviyede kalıcı durum hatası olduğu gözlenmiştir. Kalıcı durum

hatası dışında maksimum aşma, yerleşme süresi gibi performans kriterleri açısından ANFIS kontrolörün PI kontrolörden daha iyi performans gösterdiği ifade edilmiştir [33].

Kaynak [34]'te, SMSM'nin sensörsüz kontrolünde parametre değişimlerinin ve dinamik çalışma koşullarından kaynaklı sorunların üstesinden gelmek için uyarlanabilir model referans adaptif sistem (MRAS) ve uyarlama mekanizmasının ANFIS ile ayarlandığı ANFIS tabanlı MRAS gözlemcisi önerilmiştir. Hız ve konum gözlemcisi olarak kullanılan ANFIS tabanlı MRAS, kayan mod gözlemcisi ile karşılaştırılmıştır. Benzetim ve deneysel çalışmalar ANFIS tabanlı MRAS tabanlı gözlemciye sahip sistemin, kayan mod gözlemcisine sahip sisteme göre daha iyi performans gösterdiği ve yük değişimlerine karşı daha dayanıklı olduğu rapor edilmiştir [34].

Kaynak [35]'de doğrusal olmayan PI denetleyici kullanılarak SMSM'nin hız ve konum problemi ele alınmıştır. PI denetleyicisine doğrusal olmayan BM, YSA, ANFIS kontrolör eklenerek farklı denetim yapılarının SMSM'nin hız ve konum kontrolündeki etkileri incelenmiştir. Benzetim ve deneysel çalışmalar doğrusal olmayan PI kontrolörün bu tür uygulamalar için uygulanabilir olduğu, ancak ANFIS kullanılarak elde edilen doğrusal olmayan denetim yapısının ise daha dayanıklı olduğu bildirilmiştir. ANFIS kontrolörün YSA tabanlı kontrolöre göre DSP'deki işlem süresini ciddi oranda azalttığı ve pratik uygulamalar açısından ANFIS kontrolör kullanımının avantajı vurgulanmıştır [35].

Kaynak [36]'da, SMSM'nin hassas konum kontrolü için ANFIS tabanlı ters kontrol yöntemi önerilmiştir. ANFIS kontrolörün eğitimi için mikro habitat parçacık sürü optimizasyonu tekniği (MPSO) kullanılmıştır. Yapılan benzetimler önerilen uyarlanabilir denetleyici yapısının SMSM'nin konum izleme performansını büyük ölçüde iyileştirdiği ve sistemin parametre değişimine oldukça dayanıklı olduğu belirtilmiştir [36].

Kaynak [37]'de SMSM'den yüksek kontrol performansı elde etmek için yüksek doğrulukta hız ve konum sensör ihtiyacı olduğu, yüksek doğrulukta hız ve konum sensörlerinin çoğu uygulama için pahalı olduğu, ayrıca yük torkunun değişiminin rotor dalgalanmalarına sebep olacağı vurgulanmıştır. Bu sorunların üstesinden gelmek için genişletilmiş kalman filtresi (EKF) hız ve yük torku tahmini için önerilmiştir. Önerilen tork gözleyici çıkışı hız kontrolörü olarak kullanılan PI kontrolörün ileri yoluna eklenerek yük torku kompanzasyonu yapılmıştır. Benzetim ve deneysel sonuçların önerilen gözleyicinin düşük doğruluklu enkodere sahip sistemlerde kullanımının uygun olduğu ve ani yük torku değişiminde motorun hız kontrol performansını büyük oranda geliştirdiği raporlanmıştır [37].

Kaynak [38]'de, SMSM tarafından tahrik edilen esnek bağlantılı yüklerin, yük torkunu tahmin etmek için bulanık çıkarıma dayalı uyarlanabilir bir tork gözlemcisi önerilmiştir. Bu yaklaşımda yük ataletine bağlı olarak kutupların esnek şekilde yapılandırılması amacıyla kazanç matrisinin otomatik olarak ayarlanmasını sağlandığı belirtilmiştir. Uygulaması ve benzetimi yapılan uyarlanabilir tork gözlemcisinin Luenberger gözlemcisi ile karşılaştırmalı sonuçlarına göre

önerilen tork gözlemcisinin daha doğru gözlem sonuçları verdiği, değişken yük koşullarında daha iyi dinamik performans sergilediği ifade edilmiştir [38].

Kaynak [39]'da yörünge takibi, bozulma reddi ve doğrusal olmayan yük torku bozukluğu altındaki SMSM'nin doğrusal olmayan dâhili model tabanlı çıkış geri beslemeli kontrolör tabanlı konum kontrol problemi incelenmiştir. Önerilen kontrol yönteminin belirli parametre belirsizliklerine izin verdiği, doğrusal olmayan yük torku bozuklukları altında konum izleme performansının oldukça iyi olduğu, benzetim ve deneysel çalışmalarla bu durumun geçerliliği gösterilmiştir [39].

Kaynak [40]'da, parametre duyarsızlığı ve kolay uygulama gibi avantajlarından dolayı yük torku tanımlama (LTID) algoritmalarında yaygın şekilde kullanılan kayan kipli kontrol (KKK) yapısı incelenmiştir. KKK ile yük torku tahmininde yüksek frekanslı çatırtı ve zayıf tahmin doğruluğu gibi dezavantajlara sahip olduğu belirtilerek, problemin üstesinden gelmek için yeni bir LTID-KKK önerilmiştir. Deneysel sonuçlar geleneksel yük torku gözlemcisine göre önerilen yöntemin yük torkunu daha yüksek doğrulukla tahmin ettiği ve sistemin yüksek dinamik performans gösterdiği raporlanmıştır [40].

Kaynak [41]'de, SMSM'nin hassas konum kontrolünün gerçekleştirilmesi amacıyla sinir ağı tabanlı bir tork gözlemcisi ve yinelemeli en küçük kareler yöntemi (RLSM) tabanlı bir parametre tahmincisine sahip parametre kompanzatorü kullanılmıştır. Benzetim ve deneysel sonuçlara göre kullanılan bu teknik ile parametre değişimine ve yük torkuna karşı dayanıklı bir konum kontrol sistemi elde edildiği belirtilmiştir [41].

Kaynak [42]'de SMSM'nin stator akım dalgalanmasını azaltmak için akım döngüsünde PI yerine model tahminli kontrol (MPC), hız döngüsünde BM tabanlı aktif bozucu engelleme kontrolörü (ADRC), konum ve hızı elde etmek için ise kayan kipli gözlemci (SMO) kullanan hibrit bir SMSM kontrol sistemi önerilmiştir. Matlab/SIMULINK ortamında karşılaştırmalı yapılan benzetimlerde bu yöntemin üstünlüğü doğrulanmıştır [42].

Kaynak [43]'te, SMSM'nin konum kontrolü için bulanık kesir dereceli PI (Fuzzy PI^λ) kontrolör, geleneksel PI kontrolör yerine önerilmiştir. Hız kontrolü ve akım döngüleri için PI kontrolör kullanılmıştır. Kesir dereceli bulanık PI kontrolör ve geleneksel PI kontrolör benzetim sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Benzetim sonuçlarına göre önerilen kontrol algoritmasının konum kontrolünde kullanılması sonucunda, SMSM'nin referans sinyali izleme performansının daha iyi olduğu ve yük torkuna karşı daha dayanıklı bir kontrol sistemi elde edildiği belirtilmiştir [43].

Bu tez çalışmasında otonom nöbetçi robot ve bu kategoride değerlendirilen sistemlerin hassas konum kontrolüne odaklanılmıştır. Eksen hareketini sağlayan motorların hassas kontrolü bu tür sistemlerin hatasız çalışması için kritik öneme sahiptir. Eksen tahrikinde kullanılan SMSM'ler robotik sistemler, endüstriyel takım tezgahları ve hassas kontrol gerektiren uygulamalarda, sahip

olduğu yüksek verim, sağlamlık, bakım gerektirmemeleri vs. gibi özelliklerinden dolayı yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte motorun sahip olduğu lineer olmayan dinamikler, parametre değişimlerinden etkilenmesi, yük torkundan kaynaklanan bozulmalar bu motorların hassas kontrolünü kısıtlayan etkenlerdir. SMSM'nin hassas kontrolü için literatürde çeşitli yöntemler önerilmiştir. Bu bağlamda SMSM'nin hassas kontrolü için YZ tekniği olarak bilinen ANFIS konum kontrolör ile birlikte ANFIS tabanlı tork gözleyici önerilmiştir. SMSM'lerin konum kontrolünde ANFIS kontrolör kullanılarak ve hedef takibinin hassas bir şekilde yapılması amacıyla öncelikle farklı LQR kontrolör yapıları incelenmiştir. Yapılan benzetim çalışmalardan elde edilen veriler kullanılarak ANFIS kontrolörün eğitimi gerçekleştirilmiştir. Böylece yük torku ve parametre değişimlerinin etkisinde bulunan nöbetçi robotun hızlı bir şekilde hedefe yönelmesi ve hassas bir şekilde hedef takibini gerçekleştirebilmesi amaçlanmıştır.

Tezin ilk bölümünde yapay zekâ, otonom sistem, otonomi kavramı ve otonomluk seviyesi gibi kavramlar açıklanmıştır. Tezin amacı ve ilgili literatür incelemesine yer verilmiştir.

Tezin ikinci bölümünde otonomluk kavramının daha geniş ve kabul görmüş tanımları verilmiştir. Otonom sistemlerin birimleri tanımlanarak, otonom sistemlerin boyutları ifade edilmiştir. Bölümün devamında SMSM'nin matematiksel modeli çıkarılarak, AA motor kontrolünde yaygın bir biçimde kullanılan alan yönlendirmeli kontrol (AYK) tekniği açıklanmıştır. Sonrasında üç fazlı evirici yapıları verilerek, eviricilerin kontrolünde kullanılan evirici anahtarlama tekniklerinden sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu (SDGM) tekniği ile uzay vektör darbe genişlik modülasyonu (UVDGM) tekniği açıklanmıştır. SMSM'nin AYK tekniği ile konum kontrol yapısı verilerek YSA, BM ve ANFIS kontrol yapıları açıklanmıştır.

Tezin üçüncü bölümünde nöbetçi robotun tasarımı detaylandırılmıştır. Sırasıyla mekanik sistem, bu çalışmada kullanılan sürücü ve DSP özellikleri ile seçim kriterleri açıklanmıştır. Ayrıca hızlı prototipleme amacıyla kullanılan, DSP'ler için C/C++ kodları üretebilen programlar verilmiş, Matlab/SIMULINK ortamında oluşturulan program detayları ve PI akım kontrolörlerin tasarımı verilmiştir.

Dördüncü bölümde geleneksel LQR kontrolör ile SMSM'nin farklı konum kontrol yaklaşımları incelenmiş ve LQR tabanlı ANFIS konum kontrolör tasarımları detaylandırılmıştır.. Bu kısmın devamında geleneksel bir tork gözleyici açıklanarak ANFIS tork gözleyici tasarlanmış ve konum kontrol sistemindeki olumlu etkileri gösterilmiştir. Ayrıca Matlab/SIMULINK ortamında OpenCV araç kutusu ile oluşturulan hedef takip sistemi verilmiştir.

Beşinci bölümde tasarlanan otonom nöbetçi robotun eksenlerinin tahrikinde kullanılan SMSM'lerin LQR tabanlı ANFIS konum kontrolörleri ve tork gözleyicilerle birlikte hassas hedef takip performansını gösteren benzetim ve deneysel çalışmaların sonuçları verilmiştir.

Tezin son bölümünde benzetim ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş, öneriler sunulmuştur.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Otonom Sistemler

Teknolojik ilerlemeye bağılı olarak otonomi veya otonom sistemler konusu, askeri ve sivil alanlarda giderek daha önemli hale gelmektedir. En genel tanımla otonomi ve otonom sistemler insan müdahalesi olmadan bilgisayar ve etkileşimli bilgisayar programları yardımıyla bir işlevi veya bir görevi yerine getirebilen sistemler olarak tanımlanmaktadır. Diğer bir ifadeyle kendi hedefleri doğrultusunda kararlar alabilen ve çalışma koşullarındaki belirsizliklerle başa çıkabilen sistemler otonom sistemler olarak adlandırılmaktadır. Bu tanımlamalara rağmen bir sistemin otonom olup olmadığına ya da ne kadar otonom olduğuna karar vermek zor olabilmektedir. Otonom sistemlerin kullanımı sadece insansız sistemlerde sınırlı kalmamıştır. Günlük kullanılan birçok cihazda otonom veya otomatik işlevlere rastlamak mümkündür [5], [9], [44]. Otonomi veya otonom sistem kavramının daha iyi anlaşılması için farklı otonom sistemlerin otonomluk seviyelerinin karşılaştırılması yerine üç ana boyutta bu sistemlerin tanımı yapılmıştır. Bunlar, insan odaklı yaklaşım, teknoloji odaklı yaklaşım ve fonksiyon odaklı yaklaşım şeklinde sınıflandırılmıştır. Bu boyutlar birbirinden bağımsız gibi görünmesine rağmen, otonomluk kavramı bu üç boyutun birbirleriyle etkileşimini içermektedir [45], [46].

2.1.1. Otonominin Boyutları

İnsan odaklı yaklaşımda, bir sistemin otonomluk düzeyi sistemin karmaşıklığından çok, insanın makineyle olan ilişkisiyle alakalıdır. Yani sistemin çalışma döngüsünde yer alan insanın nerede bulunduğu hangi işlevlere müdahale ettiğinin otonomluk seviyesi açısından önemli olduğu yaklaşımdır. Bu yaklaşımda operatörün çalıştırma, durdurma, kilitlenme vs. gibi direktiflerine ihtiyaç duyan sistemler ‘yarı-otonom’, sadece arıza ve hata durumlarında insan müdahalesine ihtiyaç duyan, insanın gözetmen olduğu sistemler ‘insan-süpervizör otonom’ sistemler, insanın tamamen devre dışı olduğu kendi başlarına bir fonksiyonu yerine getirebilen sistemler ise ‘tam-otonom’ sistemler olarak tanımlanmaktadır. Daha teknik olan teknoloji odaklı yaklaşım, otonomluk seviyesini ‘makinenin karmaşıklığı ile karar verme süreci’ açısından değerlendirmektedir. Bu yaklaşımda sistemler otomatik, otomatikleştirilmiş ve otonom sistemler olarak sınıflandırılmıştır. Mühendislik uygulamalarında genellikle benimsenen bu yaklaşımda sistemin çalışma prensibi, menzili ve kapasitesi önemlidir. Diğer iki yaklaşımın aksine fonksiyon odaklı yaklaşım, otonomluğu makinenin ‘verdiği karar türleri ve otonom fonksiyonları’ yönünden değerlendirir. Bu yaklaşımda bütün olarak bir sistemin otonomluk düzeyinden çok, yerine getirilen görevin otonomluğu ve alt fonksiyonların otonomluğu daha önceliklidir. Sistemin hangi oranda otonom olduğu kullanılan teknoloji türüne ve teknolojik gelişmişliğine bağılı olmayıp, seçme ve müdahale

etme gibi kavramlar otonomluk seviyesi açısından değerlendirir. Sonuç olarak bu üç tanımsal yaklaşım otonomluk kavramını farklı açılardan ele almasına rağmen bu yaklaşımların doğru kombinasyonu birbirlerinin tamamlayıcısıdır [9], [45]–[47].

2.1.2. Otonom Sistem Birimleri

Otonom sistemlerin sınıflandırılmasında tek bir yöntemden bahsedilmemektedir. Teknik açıdan bakıldığında otonom sistemler insan makine ilişkisinden ve yerine getirdikleri işlevden bağımsız olarak, üç temel birimin uygun şekilde entegre edilmesinden oluşmuşlardır. Bu birimler temel olarak algılama, karar verme ve eylem olarak tanımlanmaktadır [9], [44]

Algılama

Otonom bir robotik sistemin verilen görevi yerine getirmesi için içinde bulunduğu ortamı doğru şekilde algılayabilmesi gerekmektedir. Dış dünyadan algılanan verilerin doğru şekilde işlenmesi ve yorumlanması otonom robotik sistemler için kritik bir eylemdir. Veri işlemede kullanılan bilgisayar ve etkileşimli yazılımlar her ne kadar bulundukları ortamı ve algılamada ve anlamlandırmada oldukça gelişmiş olsalar da son yapılan çalışmalarda basit tekniklerle yanıltılabilecekleri gösterilmiştir. Bu açıdan bakıldığında, basit ve öngörülebilir ortamlar dışında, daha karmaşık ve öngörülmeyen ortamlarda otonom robotik sistemlerin kullanılabilmesinin mümkün olması, algısal zekânın gelişimiyle doğru orantılıdır [48]. Robotik sistemlerin içinde bulunduğu ortamı algılaması için kullanılan birçok sensör olmasına rağmen, robotikte genel yaklaşım kameradan alınan görüntülerin görüntü işleme teknikleriyle işlenip nesnelerin tespit edilmesi veya ışık tespiti-ölçüm prensibiyle çalışan lidar ışık tespiti ve ölçümü (LIDAR) sensörlerin kullanılması şeklinde olmaktadır [15]. Görüntü işleme tekniklerinin kullanımının diğer yöntemlere göre daha düşük maliyetli olması ve bu alanda kullanılan yazılımların gelişmesi ile birlikte görüntü işleme teknikleriyle desteklenmiş otonom robotik sistemlerin kullanımı yaygınlaşmıştır [9]

Karar Verme

Algılama yazılımları tarafından işlenen veriler kontrol sistemi için girdi görevindedir. Daha önce de bahsedildiği gibi algılama biriminin içinde bulunduğu ortamı doğru şekilde anlamlandırması ve bunu karar verme sistemine doğru şekilde aktarması, karar verme ve kontrol sisteminin verimli çalışması için son derece önemlidir. Kontrol sisteminin göreve özgü eylemini gerçekleştirme biçimi sistemler arasında büyük farklılıklar gösterebilmektedir. Genel olarak ‘reaktif kontrol sistemleri’ ve ‘bilinçli kontrol sistemleri’ şeklinde ayrılır. Reaktif kontrol yöntemi daha katı bir kontrol sistemi kullanmaktadır. Kontrol sisteminin bir girdiye nasıl tepki vereceği bir dizi koşul-eylem (IF-THEN) planından oluşmaktadır. Bilinçli kontrol sistemleri ise esnek

öngörülmeven durumlarda eylemlerin olası sonuçları hakkında akıl yürütebilir bu yeni duruma göre hareket tarzı geliştirebilirler [44], [48].

Eylem

Otonom sistemin içinde bulunduğu çevre ile etkileşime girmesini sağlayan, karar verme sistemi alınan kararların uyguladığı kısım olarak tanımlanmaktadır. Bu uygulama bir bilgisayar yazılımı olabildiği gibi, fiziksel bir eylemde olabilir. Robotik sistemlerde bu fiziksel eylem elektrik motoru, pnömotik silindir, hidrolik silindir, selenoid eyleyiciler tarafından tahrik edilen tekerlek, tutucu, kanat, silah gibi uç-efektörler tarafından sağlanmaktadır [48].

2.1.3. Otonom Silah Sistemleri ve Nöbetçi Robotlar

Otonom bir silah sisteminin genel olarak tanımını yapmak zor olabilmektedir. Sistemin hangi oranda otonom olduğu, çalışma döngüsünde insanın rolü ve uluslararası hukuk açısından bu sistemlerin kullanımı ile ilgili tartışmalar devam etmektedir. Buna rağmen askeri gücünü geliştirmek isteyen ülkeler otonom silah sistemlerine yatırım yapmaktadırlar. Bu otonom sistemlerin savunma ve askeri alanda çeşitli kullanım formları bulunmaktadır. Bu alanlar genel olarak insansız araçlar (Hava, kara, deniz üstü, denizaltı), uzaktan kumandalı veya otonom olarak hareket edebilen mobil robotlar, robotik nöbetçi silahlar, savunma sistemleri, arama tarama ve kurtarma faaliyetleri YZ destekli otonom sistemlerin askeri alanda kullanılmasının örneklerindendir [6], [49].

Nöbetçi robotlar genel olarak, hedeflerini otomatik olarak belirleyebilen, izleyebilen ve etkileşime girebilen sistemler olarak tanımlanmaktadır. Sınır hatlarını korumak içinde kullanılan bu sistemler sabit platformlarda kullanılabileceği gibi çeşitli mobil araçlara entegre edilerek de kullanılabilirler. Diğer otonom silah sistemlerinde olduğu gibi nöbetçi robotların hangi oranda otonom olacağı tartışmalı bir konudur. Tam-otonom modda kullanımı için halen çekinceler mevcuttur [48]. Otonom nöbetçi robotların kullanımının nadir olduğu ifade edilmektedir. Bu sistemlerden bazıları otonom olarak tasarlanmalarına rağmen hedef tespiti yapıldıktan sonra bir operatörün çalışma döngüsüne dahil olması ve hedefe müdahale kararını operatörün vermesi sağlanmaktadır. Bazı tasarımların farklı çalışma modlarına sahip olduğu bildirilmiştir [8], [50].

2.2. Elektrik Motorları

Elektrik motorları; ev gereçleri, robotik sistemler, otomotiv endüstrisi, savunma sanayi ve takım tezgâhları gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulama alanlarının tamamında hassas kontrol gerekliliği olmasa da, özellikle robotik sistemlerde, takım tezgâhlarında ve savunma sanayi ürünlerinde kullanılan motorların hassas kontrol ihtiyacı giderek artmaktadır.

Bir sistemin veya ürünün performansı, kullanılan motorun türü, motor sürücüsünün performansı ve kullanılan kontrol yöntemi ile doğrudan ilişkilidir [51], [52].

Doğru akım motorları dinamik performanslarının yüksek olması, kontrolünün AA motorlara göre daha basit bir şekilde yapılabilmesi, kalkış momentlerinin yüksek olması gibi avantajlara sahiptirler. Bununla birlikte fırça komütatör düzeneklerinin sık bakım gerektirmesi, boyutlarının büyük olması, patlayıcı parlayıcı ortamda kullanılmamaları, fırça komütatörden dolayı çok yüksek hız uygulamaları için uygun olmamaları bu motorların dezavantajlarındandır [53].

Endüstride yaygın olarak kullanılan diğer bir motor türü ise asenkron motorlardır. Asenkron motorlar doğru akım motorların aksine endüvi yerine sincap kafesli rotorla donatılmışlardır. Rotorlarında fırça komütatör düzeneklerinin bulunmaması bakım ihtiyacını ortadan kaldırmıştır. Ancak asenkron motorların güç faktörleri ve verimleri düşüktür. Bu motorların kalıcı durum performansları yeterli olsa da, motordan istenen dinamik performansı elde etmek için vektör kontrol yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır [54], [55]

Diğer bir yaygın motor çeşidi senkron motorlardır. Senkron motorlarda, asenkron motorlarda olan kayma olayı olmadığından rotor ile manyetik alan senkron hızda dönerler. Senkron motorlar stator yapıları bakımından asenkron motorlara benzemelerine rağmen, rotorlarında doğru akımla beslenen bir alan sargısına sahiptirler. Stator ve rotordaki bu sargıların oluşturduğu bu iki elektromanyetik kuvvet (emk)'in etkileşimi motorda bir moment indüklemektedir. Senkron motorların güç katsayısı alan akımı ile kontrol edilebilir [56].

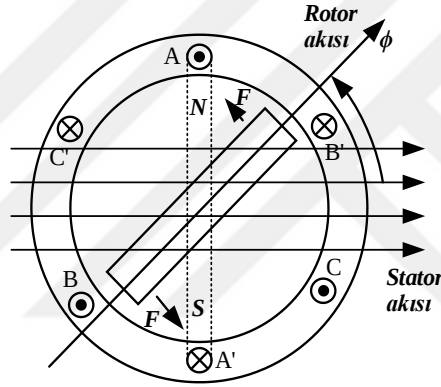
2.2.1. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların Yapısı

Senkron motorlarda rotor alan sargısı yerine sabit mıknatısların kullanılması ile SMSM'ler oluşturulmuştur. Bu motorlarda rotorda bulunan bakır sargıların, yüksek mıknatısiyet özellikli mıknatıslar ile yer değiştirmesi sonucu doğru akım kaynağına ve fırça komütatör düzenekleri ortadan kaldırılarak motor yapısı oldukça basitleştirilmiştir. Başlıca kullanılan sabit mıknatıs çeşitleri Alüminyum-Kobalt-Nikel-Demir (AlNiCo), ferrit mıknatıslar ve nadir toprak elementi mıknatıslarıdır. AlNiCo mıknatıslar düşük koersif alan şiddetine sahip olmaları ve pahalı olmaları sebebiyle elektrik makinalarında kullanımı yaygınlaşmamıştır. Diğer bir mıknatıs çeşidi olan ferrit mıknatıslar, ucuz olmalarından dolayı geniş bir kullanım alanı bulmuşlardır. Buna rağmen ferrit mıknatıslar düşük mıknatısiyet özelliği gösterdiklerinden elektrik makinalarında kullanımı sınırlı kalmıştır. Mıknatısiyeti yüksek olan Neodim-Demir-Bor (NdFeB) gibi nadir toprak elementi mıknatıslarının elektrik makinalarında kullanılması ile yüksek verimli sabit mıknatıslı senkron motorlar tasarlamak mümkün olmuştur [57]. Rotorda bakır sargılar yerine yüksek mıknatısiyet özellikli mıknatısların kullanılması sonucunda senkron motorun bakır kayıpları azalmış; böylece senkron motorda yüksek tork akım oranı, yüksek güç yoğunluğu, yüksek verim, sağlamlık, güvenilirlik gibi özellikler elde edilmiştir [57]–[59]. Bu özelliklerinden dolayı robotik, savunma

sanayi ve takım tezgâhlarında artan bir şekilde uygulama alanı bulan bu motorlar fırçasız motor olarak adlandırılırlar. Fırçasız motorlar, fırçasız doğru akım motoru (FDAM) ve SMSM olarak ikiye ayrılmaktadır [56].

FDAM'ların statorunda oluşan manyetik alan, statorun toplu sargı biçiminden dolayı trapez (yamuk) şeklindedir. FDAM'nin kontrolü genel olarak, konum algılayıcılardan gelen sinyallere göre veya zıt emk'ya bağlı olarak, elektronik anahtarların belli sıra ile stator sargılarını devreye alıp çıkarması ile gerçekleştirilmektedir.

Zıt emk'sı sinüzoidal olan senkron motorlara SMSM denilmektedir. SMSM'lerin tork dalgalanması FDAM'lere göre daha azdır. SMSM'ler ayrıca rotorlarında kullanılan mıknatısların montaj biçimine göre yüzey mıknatıslı ve dâhili mıknatıslı olarak ikiye ayrılır. Yüzey mıknatıslı SMSM'ler daha basit yapıda olduklarından kullanımı daha da yaygınlaşmıştır [57].



Şekil 2.1. SMSM'nin stator akısı ile rotor akısı arasındaki etkileşim

Şekil 2.1'de Sabit mıknatıslı senkron motorun stator akısı ile rotor akısı arasındaki etkileşim gösterilmiştir. Rotor ve stator arasındaki manyetik etkileşim rotorun dönmesine neden olacak bir torku üretmektedir.

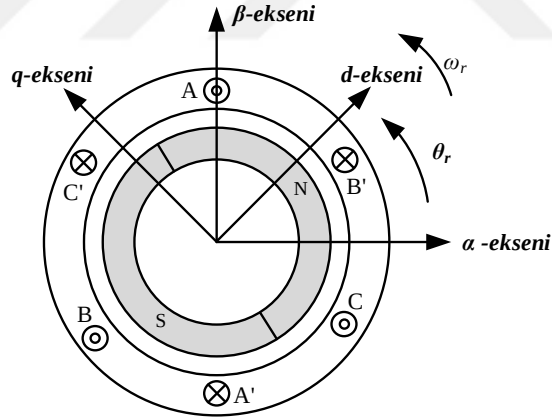
SMSM'nin stator sargısı ise asenkron motorlardaki gibi dağıtılmış sargı olduğundan, oluşan manyetik alan sinüzoidal tiptir. FDAM ve SMSM'ler kontrol edilme şekli bakımından da birbirlerinden farklılıklar göstermektedirler. SMSM'lerde statora uygulanan üç fazlı gerilim dönel stator manyetik alanı ile rotor manyetik alanı birbirine kenetlenerek rotorun senkron hızda dönmesi sağlanmaktadır. SMSM'nin stator sargı yapısı asenkron motorlarda benzediğinden, asenkron motorlara uygulanan kontrol yöntemleri bu motorlara da uygulanabilir. SMSM'ler endüstriyel robotlarda, savunma sanayiinde, yüksek performans gerektiren hassas kontrol uygulamalarında istenen dinamik performansı sağlayabilmesi için vektör kontrol yöntemleri ile kontrol edilirler. Alan yönlendirmeli kontrol (AYK) tekniği bu motorların kontrolünde etkin bir şekilde uygulanır [56]. Şekil 2.2.'de Teknic marka SMSM verilmiştir.



Şekil 2.2. Sabit mıknatıslı senkron motor [60]

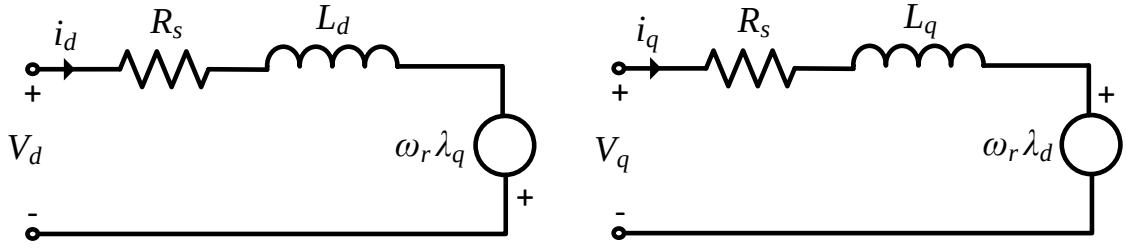
2.2.2. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun dq Eksen Modeli

Üç fazlı dağıtılmış stator sargılarına sahip SMSM'nin kontrolü için iki eksenli dinamik dq eşdeğer modeli kullanılmaktadır. Şekil 2.3'te verildiği gibi SMSM'nin $\alpha\beta$ stator referans düzlemi durağan çerçevede ve dq rotor referans düzlemi ise dönen çerçevededir.



Şekil 2.3. $\alpha\beta$ stator referans düzlemi ve dq rotor referans düzlemi

Şekil 2.4'te SMSM'nin dq eksen eşdeğer devreleri verilmiştir. Yapılacak analizde sabit mıknatısların manyetik alanının sabit olduğu, manyetik doygunluğun olmadığı, demir kayıplarının olmadığı, sıcaklık ile mıknatısların özelliklerini kaybetmediği, faz gerilimlerin ise sinüzoidal olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 2.4. SMSM'nin dq eksen eşdeğer devreleri

Şekil 2.4'teki SMSM'nin dq eksen eşdeğer devreleri kullanılarak dq eksen matematiksel modeli çıkarılabilir.

$$V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r \lambda_q \quad (2.1)$$

$$V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r \lambda_d \quad (2.2)$$

Eşdeğer devreden elde edilen Denklem 2.1 ve 2.2'deki V_d, V_q dq eksen gerilimleri, i_d, i_q dq eksen akımları λ_d, λ_q ise dq eksen akılarıdır.

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_m \quad (2.3)$$

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (2.4)$$

Elektromanyetik tork ifadesi Denklem 2.5'teki gibidir. Bu denklemde P çift kutup sayısı T_e motorun ürettiği elektromanyetik tork ifadesidir.

$$T_e = \frac{3}{2} P \{ \lambda_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \} \quad (2.5)$$

Denklem 2.5'te torku oluşturan iki terim olduğu görülmektedir. Mıknatıs akısının ve i_q akımının etkileşiminden meydana gelen ilk terim SMSM'nin ana torkunu, ikinci terim ise karşılıklı endüktansların farkından kaynaklanan relüktans torkunu oluşturmaktadır. Yüzey mıknatıslı SMSM'lerde karşılıklı endüktansların farkı yaklaşık sıfır kabul edildiğinden tork ifadesi Denklem (2.6)'daki gibi ifade edilmektedir [61].

$$T_e = 1.5P \{ \lambda_m i_q \} \quad (2.6)$$

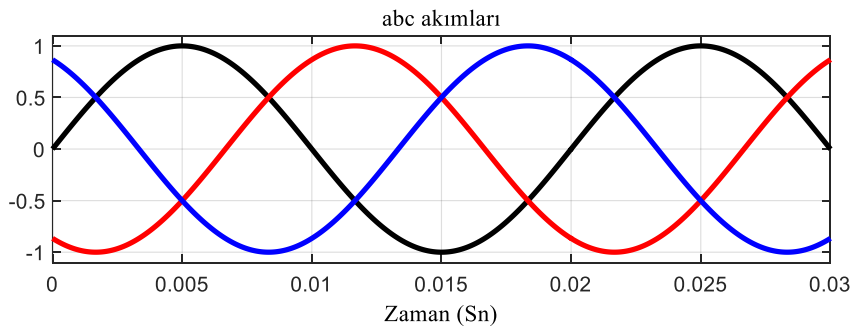
SMSM'nin mekanik eşitliği Denklem 2.7'de verilmiştir.

$$\omega_r = \int \frac{T_e - T_L - B\omega_r}{J} \quad (2.7)$$

Yukarıdaki verilen motorun mekanik eşitliğinde T_L yük torku, J atalet momenti, B ise sürtünme katsayısı olarak tanımlanır. Elde edilen denklemler kullanılarak SMSM'nin alan yönlendirmeli kontrol tekniği ile yüksek dinamik performanslı kontrolü gerçekleştirilebilir [62].

2.2.3. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun AYK Tabanlı Konum kontrolü

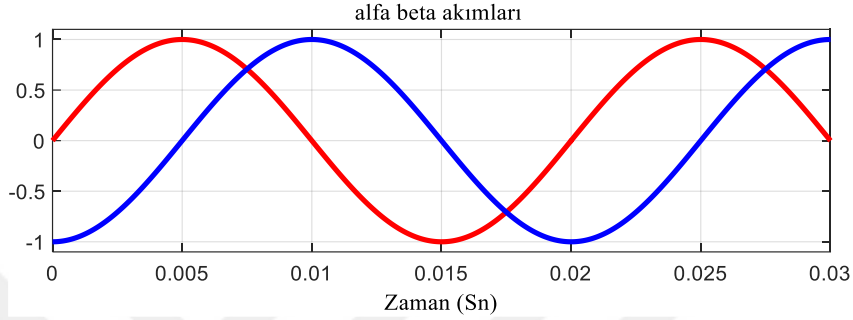
SMSM'lerde, diğer üç fazlı AA motorlarda olduğu gibi, skaler kontrol yöntemleri ile motordan istenen dinamik performans elde edilememektedir. Skaler kontrol yöntemlerinin kalıcı durum performansları yeterli olsa da dinamik cevapları, yüksek performans gerektiren uygulamalar için yetersiz kalmaktadır [63]. AA motorlarda motorlardan istenen dinamik cevabı almak için ileri kontrol yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kontrol yöntemleri genel olarak vektör kontrol yöntemleri olarak adlandırılır. Vektör kontrol tekniği ile üç fazlı AA motorun, bir doğru akım motorun dinamik performansına yakın bir şekilde çalıştırılması mümkün hale gelir. AYK tekniği, birbirine bağımlı doğrusal olmayan karakteristikler sergileyen üç fazlı AA motorun, akımlarının veya akıllarının DA motorlarınkine benzer şekilde göreceli iki eksenli dq bileşenlere dönüştürülerek bağımsız olarak kontrol edilmesi prensibine dayanır. Akım dönüşümleri sonrası d eksen akımı serbest uyarımlı bir DA motordaki uyarım akımına, q eksen akımı ise alan (endüvi) akımına karşılık gelmektedir Bu şekilde yapılan kontrolde motorun kontrol karakteristiği doğrusallaştırılmış olmaktadır. [56], [62], [64]. Yüzey mıknatıslı SMSM'lerde karşılıklı endüktanslar yaklaşık eşit kabul edildiğinden relüktans torku sıfırdır. Bu yüzden SMSM'nin kontrolünde d eksen akımının motorun torku üzerinde bir etkisi olmadığından genellikle d eksen akımı $i_d = 0$ 'da tutularak q eksen akımı ile motorun kontrolü gerçekleştirilir. [61]. Kontrol döngüsünde kullanılan dq eksen akımları motora geri beslenmeden önce tekrar üç fazlı sisteme dönüştürülmektedir. AYK tekniğinde üç fazlı motor akımları referans alınarak dönüşümler gerçekleştirilir. Denklem 2.8'de verildiği gibi ilk olarak ölçülen üç fazlı i_a, i_b, i_c akımları clark dönüşümü ile iki fazlı i_α, i_β (durağan stator düzlemi) akımlarına dönüştürülür. Şekil 2.5'te üç fazlı akımlar verilmiştir.



Şekil 2.5. Üç fazlı stator akımları

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Şekil 2.6’da clark dönüşümü sonrası akımlar verilmiştir. Bu akımlar arasındaki faz farkı 90 derece olmaktadır.

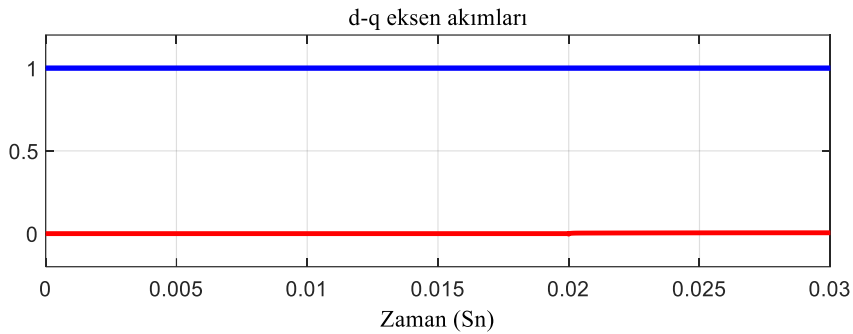


Şekil 2.6. Alfa beta eksen akımları

Bu dönüşümden sonra i_α, i_β durağan stator düzlemi akımları Denklem 2.9’deki gibi park dönüşümü yapılarak iki fazlı dönen rotor referans düzlemi akımlarına dönüştürülür. İki fazlı dönen rotor referans düzlemi akımlarına dönüşen faz akımları artık ayrı ayrı denetlenebilir hale gelmektedir.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Şekil 2.7’de $\alpha\beta$ eksen akımlarının dq eksen akımlarına dönüşümü verilmiştir.



Şekil 2.7. dq eksen akımları

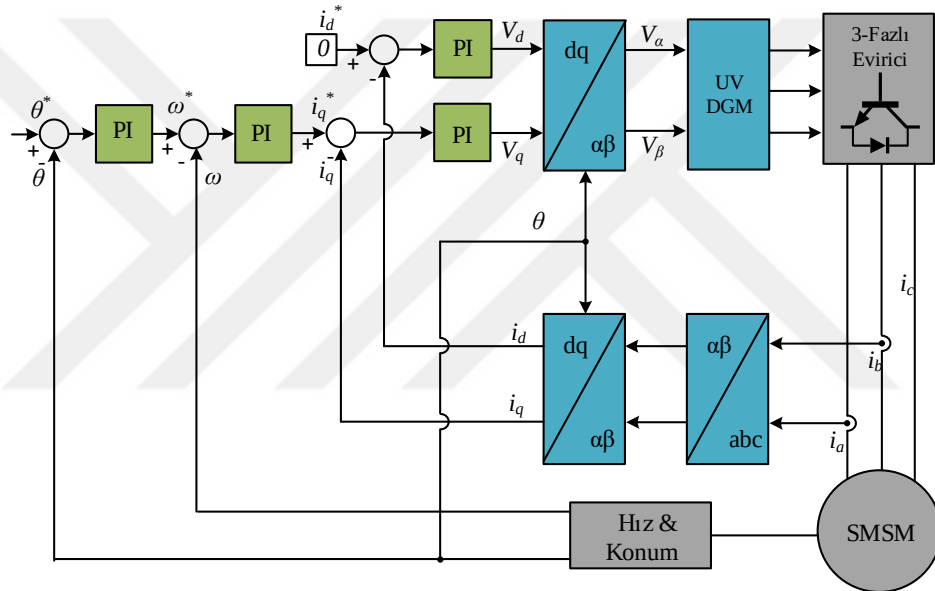
Denklem 2.10-2.11’de verilen ters park ve ters clark dönüşümü yapılarak üç fazlı modülasyon sinyalleri elde edilir.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Üç fazlı dengeli sistemlerde $i_a + i_b + i_c = 0$ olduğundan stator akımları iki akım sensörü kullanarak ölçülebilmektedir. Ölçülmeyen faz akımı $i_c = -(i_a + i_b)$ formülü ile hesaplanabilir.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Şekil 2.8.'de SMSM motorun AYK tekniği ile konum kontrolünün genel blok şeması verilmiştir.



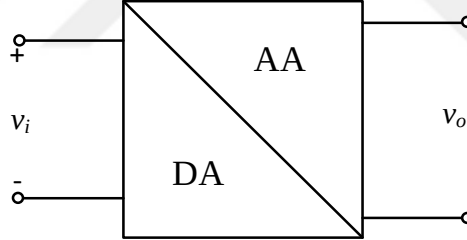
Şekil 2.8. SMSM'nin AYK tekniği ile konum kontrolü genel blok şeması

Denklem 2.6'ya bakıldığında momenti oluşturan akımın i_q eksen akımı olduğu görülmektedir. SMSM'nin AYK tabanlı konum kontrolünde sensörler yardımıyla ölçülen hız ve konum bilgisi, referans hız ve konum ile karşılaştırılarak oluşan fark hız ve konum kontrolörüne uygulanmaktadır. Hız kontrolör çıkışı akım kontrolör devresi için referans oluşturmaktadır. Akım kontrolörlerin çıkış sinyalleri dq eksen gerilimleri olarak ifade edilmektedir. Elde edilen dq eksen gerilimleri ters park dönüşümü yapılarak DGM bloğu için sinüzoidal modülasyon sinyalleri oluşturulur. DGM bloğun çıkışından elde edilen anahtarlama sinyalleri evirici devresindeki güç anahtarlarının uygun sıra ile devreye alınıp çıkarılmasını sağlayarak motorun kontrolünü gerçekleştirmektedir. Genel blok şemasında dış çevrimde kullanılan konum ve hız kontrolörler ve iç çevrimde kullanılan akım kontrolörler PI olarak gösterilmiştir. Fakat hassas kontrol uygulamaları için birçok kontrolör yapısına literatürde rastlamak mümkündür. AYK tekniği ile AA motorların kontrolü yapılırken,

rotor akısının konumunu doğru ölçmek veya sensörsüz kontrol için doğru hesaplamak kritik öneme sahiptir. Sabit referans çerçeveden, dönen referans çerçeveye eşzamanlı dönüşüm için rotorun konum bilgisi gerekmektedir. Konum bilgisindeki bu hata dq eksen akımlarının yanlış hizalanmasına neden olmaktadır. Motorlarda konum ve hız bilgisi ölçmek için enkoderler yaygın olarak kullanılır. Enkoder bağlı bulunduğu milin hareketinden elektrik sinyali üretebilen elektromekanik cihazlar olarak tanımlanabilir [65], [66].

2.3. Anahtarlama Eviriciler

Eviriciler girişlerinde bulunan DA kaynağından istenilen genlikli ve frekanslı AA sinyal elde etmek için kullanılırlar. Çıkış gerilimi, DA giriş gerilimi değiştirilerek elde edilebileceği gibi DA kaynağı sabit tutulmak suretiyle eviricinin kazancı değiştirilerek de yapılabilir. Faz sayısına göre tek fazlı ve üç fazlı şeklinde ayrılabilen eviriciler, besleme kaynağı olarak akım veya gerilim kaynaklı olabilirler. AA motor kontrol uygulamalarında genellikle gerilim kaynaklı evirici kullanılmaktadır. Bir motor sürücü sisteminde şebeke gerilimi doğrultulup süzüldükten sonra, evirici vasıtasıyla değişken frekans ve gerilime çevrilerek motora uygulanmaktadır [54]. Şekil 2.9'da evirici blok diyagramı verilmiştir.



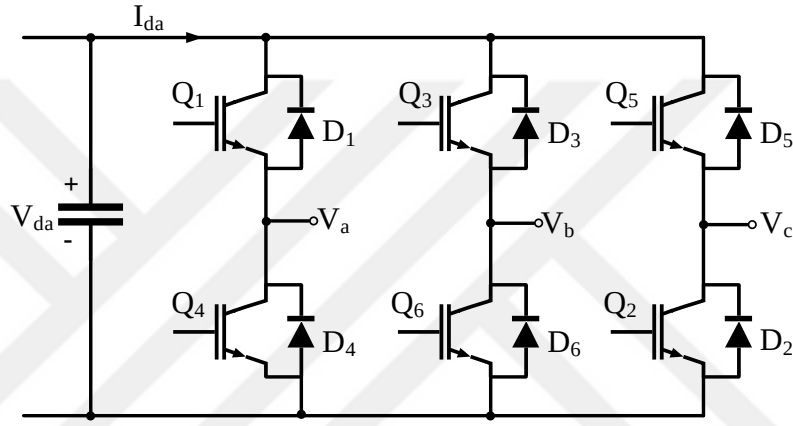
Şekil 2.9. Evirici blok diyagramı

Eviricilerde kullanılan anahtarlama elemanları kontrollü olarak iletme ve kesime gitmektedirler. Bu anahtarlama elemanları genel olarak bipolar eklem transistör (BJT), metal oksit yarıiletken alan etkili transistör (MOSFET), kapı yalıtımlı bipolar transistör (IGBT), Mos kontrollü tristör (MCT) olabilir. Eviricilerin çıkış geriliminin sinüzoidal olması istenir. Fakat pratikte çıkış gerilimi sinüzoidal olmayıp belli harmonikleri içermektedir. Çıkış gerilimi harmonikleri anahtarlama teknikleriyle azaltılabilir [67].

2.3.1. Üç Fazlı Eviriciler

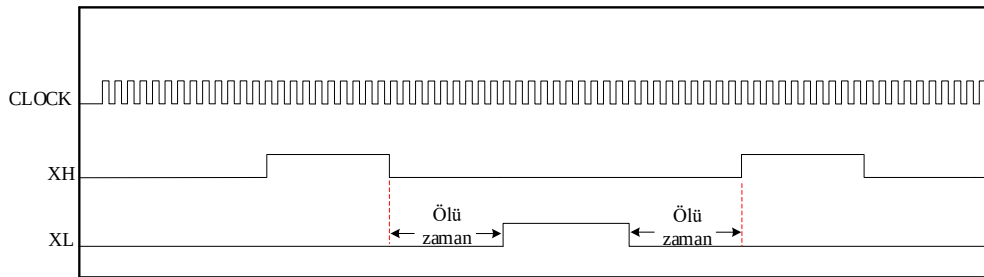
Eviricilerin yaygın olarak kullanıldığı alanlar motor sürücüleri, kesintisiz güç kaynakları, yenilenebilir enerji sistemleri, ulaşım vb. sistemlerdir. AA motor sürme sistemlerinde genel olarak

üç fazlı gerilim kaynaklı eviriciler kullanılmaktadır [68]. İki seviye üç fazlı evirici her kolunda yarım köprü evirici bulunan üç koldan oluşmaktadır. Eviricilerin çalışması esnasında aynı kol üzerinde bulunan güç anahtarlarının aynı anda ilettime girmesi doğru akım kaynağının iki ucunun kısa devre olması anlamına gelmektedir. Bunu önlemek için anahtarın biri iletimdeyken diğerinin kesimde tutulması gerekmektedir. Anahtarların biri ilettime girip kesime gittikten sonra devreyi tekrar kapatması belli bir süre alacağından aynı kol üzerindeki diğer anahtarın belli bir süre sonra ilettime sokulması kolun kısa devre olmasını engellemektedir. Bu süre ölü zaman olarak adlandırılır [54], [56], [66]. Şekil 2.10’da gerilim kaynaklı üç fazlı evirici devresi verilmiştir.



Şekil 2.10. Gerilim kaynaklı üç fazlı evirici devresi

Anahtarlara uygulanacak ölü zaman miktarı kullanılan güç anahtarlarının veri sayfalarında belirtilmektedir. Genellikle mosfetlerde bu süre nano saniyeler mertebesinde iken IGBT’lerde bu süre μs mertebesinde olabilir. DSP tarafından üretilen DGM işaretlerine ölü zaman eklendikten sonra, eviriciye uygulanması durumunda güvenli bir çalışma sağlanmış olur [68]. DGM çıkışlarına ölü zaman ekleme elektronik devreler yardımıyla yapılabileceği gibi yazılımsal olarak da gerçekleştirilebilir. Şekil 2.11’de evirici alt ve üst anahtarları arasındaki ölü zaman diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.11. Ölü zaman diyagramı

SMSM'nin kontrolünde motora gerilim ve frekansın değişken şekilde uygulanması darbe genişlik modülasyon tekniklerinin (DGM) kullanımı ile mümkün olur. Eviricinin anahtarlama sinyalleri DGM teknikleri vasıtası ile gerçekleştirilmektedir. Üç fazlı motor sürücü sistemlerinde yaygın olarak kullanılan DGM teknikleri Sinüzoidal DGM, histerisiz bant kontrol, uzay vektör DGM teknikleridir [69]

Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu

Üç fazlı eviricilerde çıkış gerilimlerinin dengeli ve sinüs elde etmek için Sinüzoidal dalga genişlik modülasyonu (SDGM) tekniği kullanılır. Şekil 2.12'de gösterildiği gibi aralarında 120° faz farklı olan üç adet sinüs kontrol dalgası ile bir adet üçgen taşıyıcı dalgası karşılaştırılarak anahtarlama sinyalleri üretilir. SDGM tekniği endüstriyel uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılır [67]. Denklem 2.12'de modülasyon oranı verilmiştir. Denklemden m_a modülasyon oranı $\hat{V}_{kontrol}$ sinüs dalgasının genliği, $\hat{V}_{üçgen}$ ise taşıyıcı dalga genliği olarak tanımlanmaktadır.

$$m_a = \frac{\hat{V}_{kontrol}}{\hat{V}_{üçgen}} \quad (2.12)$$

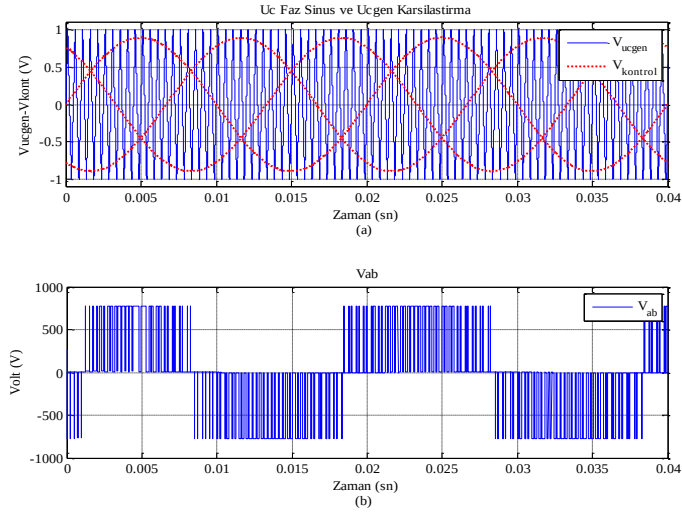
Doğrusal bölgede ($m_a \leq 1$) çıkış gerilimi temel frekans bileşeni genliği Denklem 2.13'teki gibidir. Burada $\hat{V}_{an}$ eviricinin bir kolundaki temel frekans bileşeni, V_d evirici girişindeki doğru akım kaynağı genliği olarak bilinmektedir [54].

$$\hat{V}_{an} = m_a \frac{V_d}{2} \quad (2.13)$$

Temel frekanstaki fazlar arası gerilimin etkin değeri, 120°'lik faz farkı nedeniyle Denklem 2.14'teki gibi olarak ifade edilmektedir.

$$V_{LL} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \hat{V}_{an} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a V_d = 0,612 m_a V_d \quad (2.14)$$

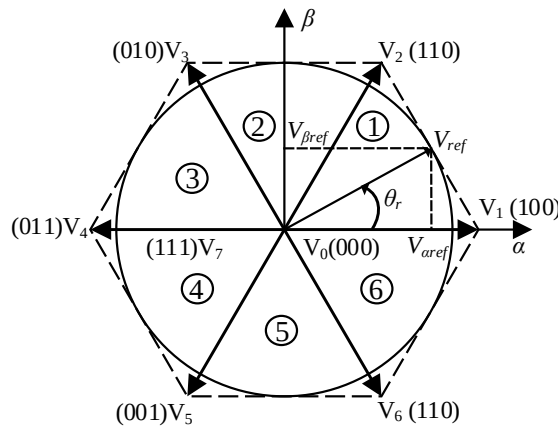
Şekil 2.12 (a)'da düşük frekanstaki referans sinüs sinyali ile taşıyıcı üçgen sinyali karşılaştırılmıştır. Şekil 2.12 (b)'de ise evirici çıkışındaki faz-faz gerilimleri verilmiştir.



Şekil 2.12. SDGM anahtarlama ve çıkış gerilim sinyali (a) Sinüs üçgen sinyali karşılaştırma (b) Evirici faz faz arası çıkış gerilimi

Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu (UVDGM)

İki seviyeli gerilim kaynaklı eviriciler için literatürde yaygın olarak kullanılan anahtarlama tekniklerinden biri de uzay vektör darbe genişlik modülasyonu (UVDGM) tekniği olarak bilinmektedir. Bu anahtarlama tekniği mikrodnetleyicilerde kolay uygulanması DA kaynak gerilimini daha etkin kullanması, doğrusal modülasyon aralığının daha geniş olması ve çıkış harmoniklerinin SDGM tekniğine göre daha düşük olması gibi avantajlara sahiptir [70]. Bununla birlikte karmaşık matematiksel işlemlerin yapılması gerekliliği bu tekniğin dezavantajlarındandır. Bu teknikte üç fazlı dönen nicelikler iki fazlı niceliklere dönüştürülmektedir. Dönüştürülen iki fazlı niceliklerden referans bir vektör hesaplanmaktadır. Genliği sabit olan bu dönen vektör kullanılarak üç fazlı eviricinin çıkışı modüle edilmektedir. Referans gerilim vektörü hava boşluğunda indüklenen dönen manyetik alanı oluşturmaktadır. Uzay vektör şeması Şekil 2.13'te verildiği gibidir. Çıkış geriliminin genliği referans gerilimin genliği ile değiştirilebilir [54], [69], [70].



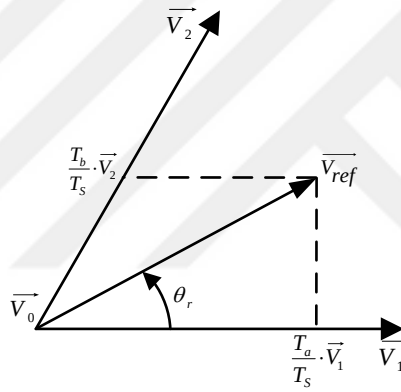
Şekil 2.13. Eviricinin gerilim vektörleri ve anahtarlama bölgeleri.

Referans gerilim vektörü Denklem 2.15 kullanılarak hesaplanabilir. Referans gerilim vektörünün bulunduğu bölgenin tespiti Denklem 2.16 vasıtasıyla hesaplanmaktadır. θ açısı değiştikçe referans gerilim vektörünün içinde bulunduğu bölgede değişmektedir.

$$\overrightarrow{V_{ref}} = \sqrt{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \quad (2.15)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_{\beta}}{V_{\alpha}} \right) \quad (2.16)$$

Şekil 2.14'te gösterildiği gibi $\overrightarrow{V_{ref}}$ komşu üç vektör tarafından meydana gelmektedir. Referans vektör $\overrightarrow{V_{ref}}$ ve $\overrightarrow{V_{ref}}$ 'in hangi sektörde olduğunu belirten θ açısı hesaplandıktan sonra her sektör için T_a , T_b ve T_0 süreleri hesaplanır. Son adımda anahtarlama sinyalleri üretilerek eviriciye uygulanmaktadır.



Şekil 2.14. V_1 , V_2 , V_0 gerilim vektörleri

Denklem 2.17'de referans gerilim vektörü ile komşu üç vektörün zamanları eşitlenmiştir.

$$\overrightarrow{V_{ref}} T_s = V_1 T_a + V_2 T_b + V_0 T_0 \quad (2.17)$$

Sektör 1(100)'i için referans gerilim vektörü ve komşu üç vektör Denklem 2.18'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\overrightarrow{V_{ref}} = V_{ref} e^{j\theta}, \overrightarrow{V_1} = \frac{2}{3} V_{da}, \overrightarrow{V_2} = \frac{2}{3} V_{da} e^{j\frac{\pi}{3}}, \overrightarrow{V_0} = 0 \quad (2.18)$$

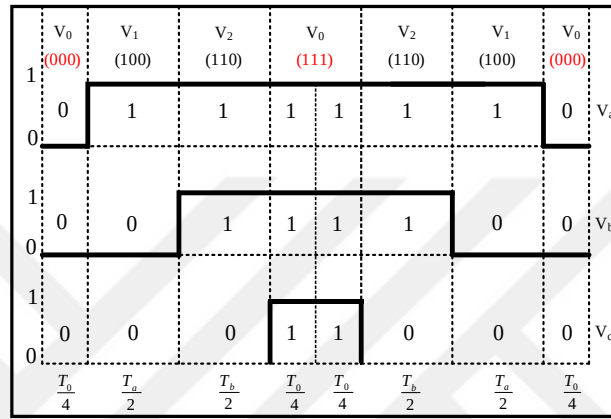
Denklem 2.18'deki gerilim vektörleri Denklem 2.17' da yerine koyulur ve denklemler düzenlenirse sektör 1'e ait T_a , T_b , T_0 zamanları Denklem 2.19-2.21'deki gibi hesaplanabilir.

$$T_a = \frac{\sqrt{3} V_{ref}}{V_{da}} T_s \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) \quad (2.19)$$

$$T_b = \frac{\sqrt{3}V_{ref}}{V_{da}} T_s \sin(\theta) \quad (2.20)$$

$$T_s = T_a + T_b + T_0 \quad (2.21)$$

Sektör 1 için hesaplanan süreler diğer sektörler içinde aynı şekilde hesaplanabilir. Şekil 2.15’de gösterildiği gibi sektörlerdeki anahtarlama sırasına bakıldığında sektörler arası geçişte minimum anahtarlama kayıpları elde etmek için üç fazlı anahtarlardan sadece bir tanesi konum değiştirir [56].



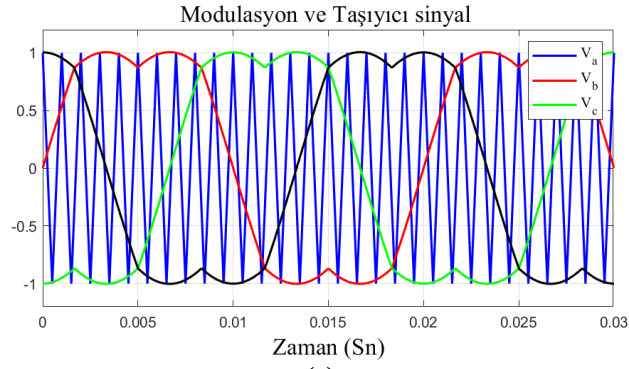
Şekil 2.15. Birinci sektör için modülasyon sinyalleri.

Diğer sektörler için eviricinin anahtarlama sırası Şekil 2.16’deki gibidir.

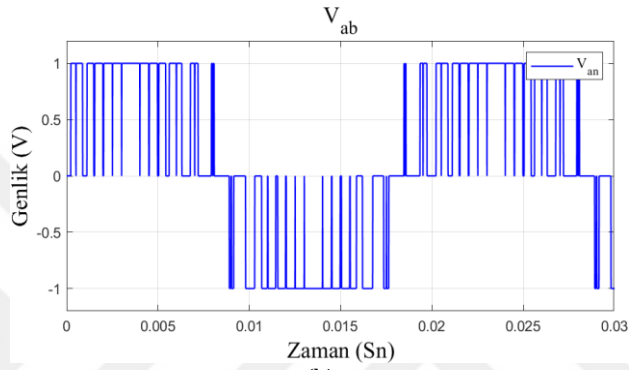
	1	2	3	4	5	6	7
Sektör 1 : V ₀	V ₁	V ₂	V ₇	V ₂	V ₁	V ₀	
Sektör 2 : V ₀	V ₃	V ₂	V ₇	V ₂	V ₃	V ₀	
Sektör 3 : V ₀	V ₃	V ₄	V ₇	V ₄	V ₃	V ₀	
Sektör 4 : V ₀	V ₅	V ₄	V ₇	V ₄	V ₅	V ₀	
Sektör 5 : V ₀	V ₅	V ₆	V ₇	V ₆	V ₅	V ₀	
Sektör 6 : V ₀	V ₁	V ₆	V ₇	V ₆	V ₁	V ₀	

Şekil 2.16. Sektörlere göre anahtarlama sıralaması

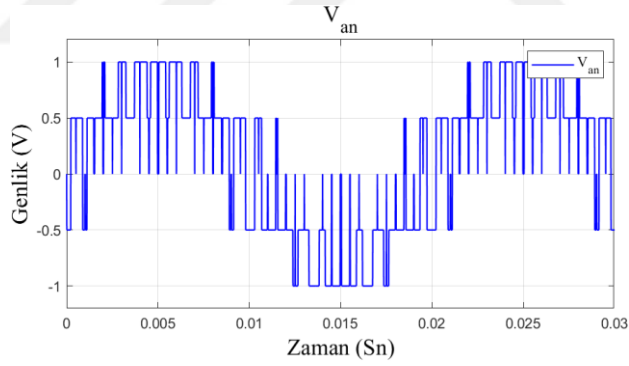
Şekil 2.17 (a)’da UVDGM tekniği taşıyıcı üçgen sinyali ile üç fazlı sinüs sinyali karşılaştırılmıştır. Faz-faz gerilimi Şekil 2.17 (b)’de faz-nötr gerilimi ise Şekil 2.17 (c)’deki gibidir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.17. UVDGM tekniği karşılaştırma ve gerilim sinyalleri (a) Taşıyıcı üçgen sinyali ile üç fazlı sinüs sinyali (b) V_{ab} gerilimi (c) V_{an} gerilimi

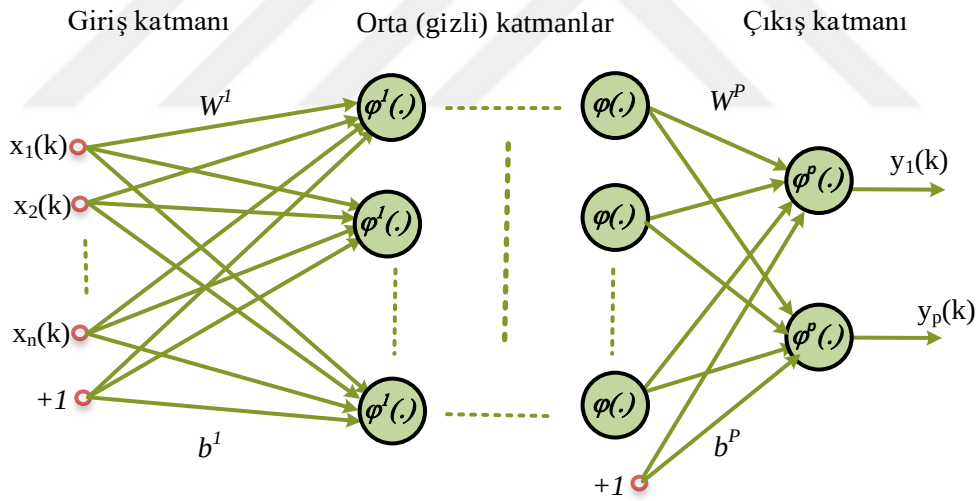
2.4. Kontrol Sistemleri Yapay Zekâ Uygulamaları

Kontrol sistemlerinin yüksek dinamik performansa sahip olması ve bozucu girişlere karşı dayanıklı olması kontrol edilen sistem açısından kritik öneme sahiptir. Ancak modellemesi mümkün olmayan ya da belirsizlikler ihtiva eden karmaşık ve doğrusal olmayan sistemler için bu özellikleri sağlamak bir o kadar zor olabilmektedir. Bu nedenlerden dolayı yapay zekâ algoritmalarından YSA, BM ve BSA gibi öğrenmeli yöntemlerin kontrol sistemlerine uygulanmaktadır [2].

2.4.1. Katmanlı Yapay Sinir Ağları (KYSA)

İnsan beynindeki bir nöronun çalışma prensibinin modellenmesiyle başlayan ve çok sayıda nöronun farklı şekillerde bağlanmasıyla oluşan YSA görüntü işleme, nesne/örüntü tanıma ve sınıflandırma problemlerinin çözümünün yanında, doğrusal olmayan sistemlerin uyarlamalı denetimi amacıyla kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. YSA'nın güçlü yanları bir problemi öğrenebilme ve genelleme yapabilme yeteneği olarak bilinmektedir. Bununla birlikte YSA'nın uyarlanabilir ağ yapısı, ilgilendiği problemin çözümü için büyük önem taşımaktadır. YSA donanımsal olarak yüksek hızlı işlemcilerin kullanılmasıyla gerçekleştirileceği gibi, yazılımsal olarak da gerçekleştirilebilir [2], [71], [72].

YSA tek veya çok katmanlı olarak düzenlenebilen, paralel olarak çalışan, yapay nöronların birbirleriyle çeşitli şekillerde bağlanmalarından oluşmaktadır. Şekil 2.18'de verilen ileri beslemeli katmanlı yapay sinir ağları (İBKYSYA) eğri uydurma ve modelleme gibi çeşitli problemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılan bir ağ yapısı olarak bilinmektedir. İBKYSYA'da, hücreler katmanlar şeklinde düzenlenmekte ve bir katmandaki hücrelerin çıkışları bir sonraki katmandaki hücrelere ağırlıklar üzerinden giriş olarak verilmektedir [2].

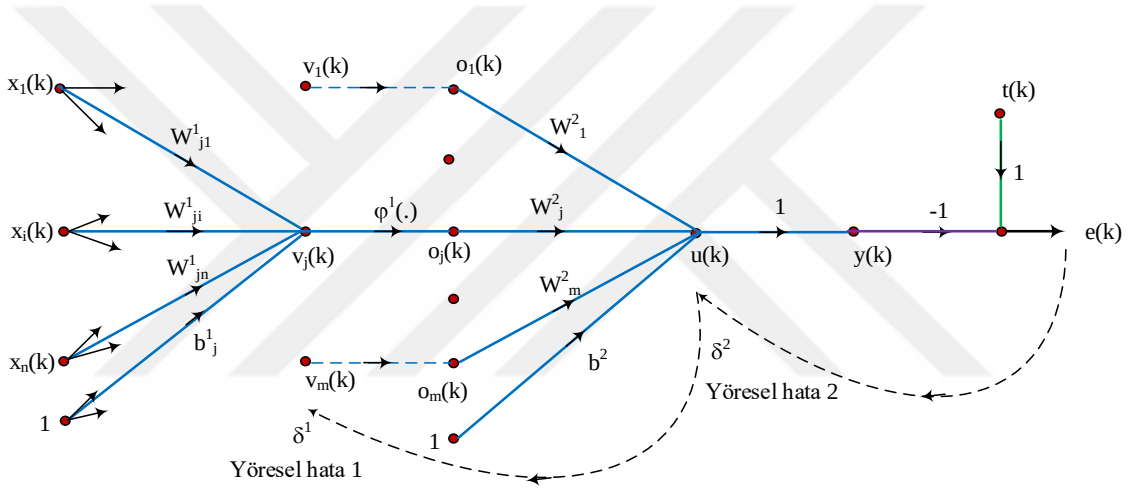


Şekil 2.18. Katmanlı YSA yapısı

Giriş katmanı, dışarıdan uygulanan bilgileri herhangi bir değişiklik yapmadan orta katman ağırlıkları üzerinden orta (gizli) katmanda bulunan hücrelere iletmektedir. Bilgi, orta katmanlarda ve çıkış katmanında işlenerek ağ çıkışı belirlenmektedir. Doğrusal olmayan problemlerin çözümünde kullanılan İBKYSYA'da orta katmandaki aktivasyon fonksiyonları genellikle sigmoid ya da tanjant hiperbolik, çıkış katmanı ise doğrusal olabilir. Yaygın olarak kullanılan geriye yayılım öğrenme algoritması, bu tip YSA'ların eğitiminde etkin bir şekilde kullanılmakta ve bundan dolayı bu ağlara geriye yayılım ağları da denilmektedir [73].

Geriye Doğru Öğrenme Algoritması

YSA'nın en önemli üstünlüğü problemten aldığı eğitim örnekleri ile eğitilerek problemi öğrenebilmesi ve eğitildikten sonra farklı çalışma şartlarında problem gibi davranabilmesidir. Geriye yayılım öğrenme algoritması çok katmanlı ağların eğitiminde en iyi bilinen öğrenme algoritması olarak tanımlanmaktadır. Problemden alınan veriler ağ girişine uygulandıktan sonra giriş ve gizli katmanlardaki işlemlerden geçirilen giriş sinyalleri ağ çıkışına aktarılmaktadır. Ağın öğreneceği problem çıkışı ile ağ çıkışı arasındaki hata, bir performans kriterini minimize edecek şekilde çıkıştan geriye doğru yayılarak katmanlardaki ağırlıklar yenilenmektedir. Ağırlıklar her örnekte yenilenebildiği gibi bütün örnekler kullanılarak toplu olarak da yenilenebilir [71], [74]. Geriye doğru öğrenme algoritmanın çıkarılışı ve uygulanışında kolaylık sağlaması açısından Şekil 2.18'deki 3 katmanlı YSA'nın tek çıkışlı bir YSA için sinyal akış şeması Şekil 2.19'da verilmiştir.



Şekil 2.19. Üç katmanlı ve tek çıkışlı ileri beslemeli YSA'nın sinyal akış şeması

Şekil 2.19'daki yapıda $t(k)$ ağın öğreneceği problem çıkışını (hedef çıkışı) göstermektedir. Ayrıca $k = 1, 2, \dots, N$ adet örnek için ileri besleme yolundaki ağ işlemleri Denklem 2.22.a ve Denklem 2.22.b deki gibi yazılabilir.

$$v_j(k) = \sum_{i=1}^n W_{ji}^1 x_i(k) + b_j^1 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2.22.a)$$

$$o_j(k) = \varphi^1(v_j(k)) \quad (2.22.b)$$

Burada v orta katman net girdilerini, o orta katman çıkışlarını, W^1 ve b^1 orta katman ağırlıklarını ve polarmalarını ve φ ise orta katman aktivasyon fonksiyonu göstermektedir. Bir adet doğrusal çıkış katmanı için ağ çıkışı ise Denklem 2.23.a ve Denklem 2.23.b'deki gibi ifade edilebilir.

$$u(k) = \sum_{j=1}^m W_j^2 o_j(k) + b^2 \quad (2.23.a)$$

$$y(k) = u(k) \quad (2.23.b)$$

Bu ağ probleminden alınan giriş $x(k)$ ve hedef $t(k)$ örnekleri (eğitim verileri) kullanılarak eğitilir. Bu durumda tek çıkışlı ağın çıkış hatası $e(k)$ Denklem 2.24'te verildiği gibidir.

$$e(k) = t(k) - y(k) \quad (2.24)$$

Örneksel amaç ölçütü diyebileceğimiz her bir örnekteki hataların karelerini gösteren ölçüt ise Denklem 2.25'teki gibi ifade edilir.

$$E(k) = \frac{1}{2} e^2(k) \quad (2.25)$$

Tüm örneklerdeki hataların karelerinin ortalamasını gösteren toplam amaç ölçütü ise Denklem 2.26'daki gibi yazılabilir.

$$J = \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^N e^2(k) \quad (2.26)$$

Denklem 2.25 veya Denklem 2.26'nın ağırlıklara göre negatif gradyanı ile ağırlıkların yenilenmesine geriye yayılım algoritması denilmektedir. Buna göre, Denklem 2.25'in çıkış katman ağırlıklarına ($\mathbf{W}^2$) göre gradyanı yukarıdaki eşitlikler kullanılarak Denklem 2.27'deki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{\partial E}{\partial \mathbf{W}^2} = \frac{\partial E}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial \mathbf{W}^2} = -e(k) \cdot \mathbf{o}(k) \quad (2.27)$$

Çıkış katma ağırlıkları Denklem 2.28'deki gibidir .

$$\mathbf{W}^2 = \mathbf{W}^2 - \alpha \frac{\partial E}{\partial \mathbf{W}^2} \quad (2.28)$$

Benzer biçimde amaç ölçütünün orta katman ağırlıklarına göre gradyanı Denklem 2.29'daki gibi hesaplanabilir.

$$\frac{\partial E}{\partial \mathbf{W}^1} = \frac{\partial J}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial \mathbf{o}} \frac{\partial \mathbf{o}}{\partial \mathbf{v}} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{W}^1} = -e(k) \cdot \mathbf{W}^2 \cdot [(\boldsymbol{\varphi}^1(\mathbf{v}(k)))'] \cdot \mathbf{x}(k) \quad (2.29)$$

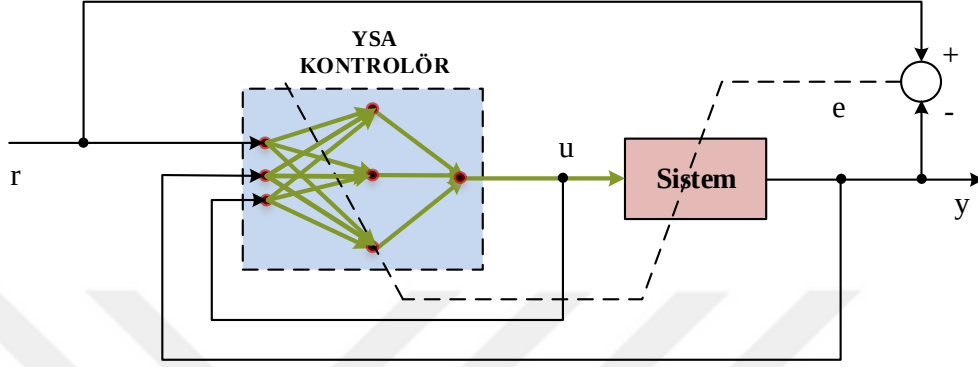
Orta katman ağırlıkları Denklem 2.30'deki gibi hesaplanabilmektedir.

$$\mathbf{W}^1 = \mathbf{W}^1 - \alpha \frac{\partial E}{\partial \mathbf{W}^1} \quad (2.30)$$

Eğer yukarıdaki işlemlerde olduğu gibi her bir örnekte ağırlıklar yenilenirse örneksel ya da gerçek zamanlı öğrenme denilmektedir. Eğer ağ $k = 1, 2, \dots, N$ 'e kadar tüm örneklerdeki gradyanların ortalaması ile eğitilirse bu toplu öğrenme olarak adlandırılır. Toplu öğrenme Denklem 2.31'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\frac{\partial J}{\partial \mathbf{W}^1} = \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^N E \rightarrow \mathbf{W}^1 = \mathbf{W}^1 - \alpha \frac{\partial J}{\partial \mathbf{W}^1} \quad (2.31)$$

Çıkış katmanını doğrusal olan ağlarda çıkış katman ağırlıkları orta katman çıkışlarından yararlanarak en küçük kareler (EKK) yöntemiyle de eğitilebilir. Bu tür eğitim yöntemleri hibrit öğrenme olarak adlandırılmaktadır. Doğrudan YSA ters model kontrol yapısı Şekil 2.20’de verilmiştir.



Şekil 2.20. Doğrudan YSA ters model kontrol yapısı

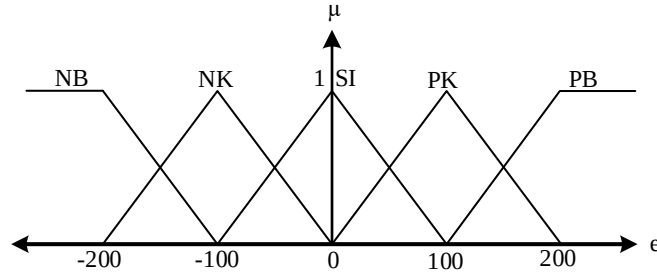
Eğer YSA kontrolör, sistemin doğru bir ters modelini temsil edebilirse sistem çıkışı referans sinyali doğru bir şekilde izleyebilecektir.

2.4.2. Bulanık Mantık

BM denetleyici bir sistemin matematiksel modelinden bağımsız olarak dilsel değişkenler yardımıyla insanın düşünme mantığına yakın şekilde sistem için uygun olan denetleyici oluşturulmasıdır. Zadeh tarafından 1965 yılında önerilen BM yönteminde klasik kümede var olan kesinliğin (0,1) aksine, bulanık kümede aitlik derecesi kavramı vardır. Aitlik derecesi, [0 1] kapalı değerleri arasında olmaktadır [75]. Bulanık bir kümedeki üyelik ağırlıkları olarak da bilinen aitlik derecesi Denklem 2.32’deki gibi ifade edilmektedir.

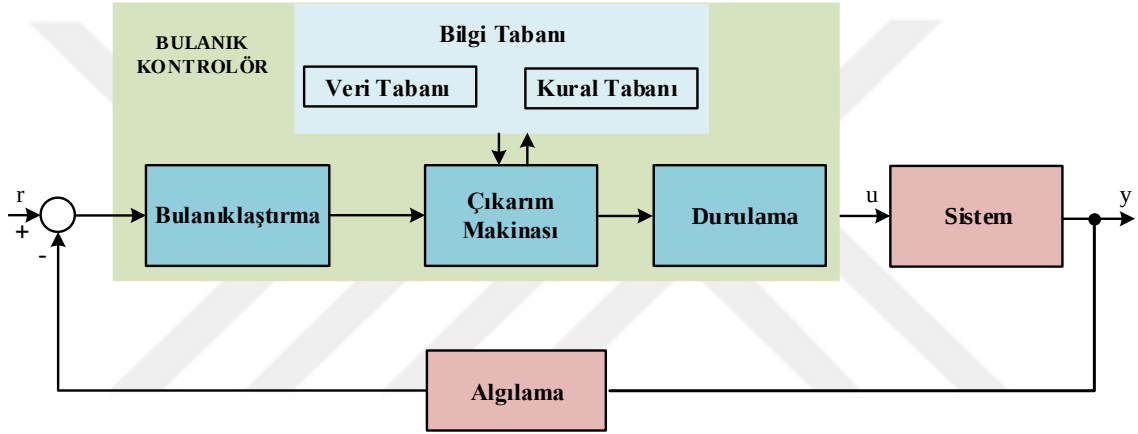
$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\} \quad (2.32)$$

A , x elemanlarının oluşturduğu bir küme, X , A kümesinin tanımlı olduğu uzay, $\mu_A(x)$ ise üyelik değeri olarak tanımlanmaktadır. Yaygın olarak kullanılan üyelik fonksiyonları üçgen, çan, yamuk üyelik fonksiyonları şeklindedir. Üyelik fonksiyonlarının şekli ve etiket sayısı kullanıcıya ve yapılacak uygulamaya bağlı olarak değişebilir. Şekil 2.21’de verilen giriş üyelik fonksiyonları negatif büyük (NB), negatif küçük (NK), sıfır (SI), pozitif küçük (PK), pozitif büyük (PB), şeklinde etiketlenmiştir. Uygulama türüne göre üyelik fonksiyonu için uygun etiketlemeler seçilebilir.



Şekil 2.21. Üçgen üyelik fonksiyonu

BM birçok farklı alanda uygulama imkânı bulmuş fakat bu alandaki en önemli uygulamalar bulanık denetim alanında olmuştur.



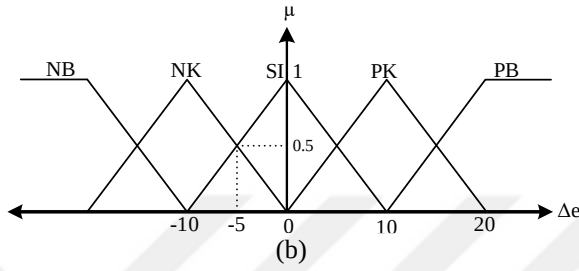
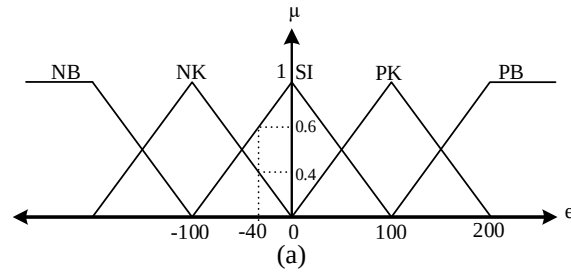
Şekil 2.22. BM denetleyici yapısı

BM denetleyiciler bir sistemin matematiksel modelinin bilinmemesi durumunda oldukça etkin bir şekilde sistem kontrolünü sağlayabilirler. Şekil 2.22’de standart bir BM denetleyici sistemi gösterilmiştir. BM denetleyici temel olarak dört bölümden oluşur. Bunlar bulanıklaştırma, kural tabanı, çıkarım mekanizması, durulama şeklindedir [2].

Giriş Birimi (Bulanıklaştırma)

Bulanıklaştırma birimi sisteme girilen verilerin dilsel ifadelerle dönüştürülmesi işleminden gerçekleştirildiği birimdir. Bu işlem sırasında üyelik fonksiyonlarının belirlenmesinde kesin bir kural olamamakla beraber, denetimi yapılacak sistemin özellikleri ve uzman kişinin deneyimi bu tanımlamaların yapılmasında kritik rol oynamaktadır [76]. Giriş değişkenleri çoğu denetleyici uygulamasında hata (e) ve hatanın değişimi (Δe) şeklindedir. Hatanın değişimi ayrık zamanda Denklem 2.33’teki gibi ifade edilir. Şekil 2.23’de üçgen giriş üyelik fonksiyonları verilmiştir.

$$\Delta e = e(k) - e(k - 1) \quad (2.33)$$



Şekil 2.23. Giriş üyelik fonksiyonları (a) Hata, (b) Hatanın değişimi

Kural tabanı

Uzman kişi tarafından oluşturulan, denetim amaçlarının bir grup IF-THEN (EĞER-İSE) gibi dilsel niceliklerle ifade edildiği birimdir. BM sisteminin temelini kural tablosu oluşturur. BM kontrol sisteminin verimli çalışması bu kuralların uygulanabilir şekilde oluşturulmasından doğrudan ilişkili olmaktadır [76]. Kural tabanından elde edilmiş örnek bir kural tabanı aşağıdaki Şekil 2.24’teki gibidir.

EĞER (e NK VE Δe SI) İSE u NK

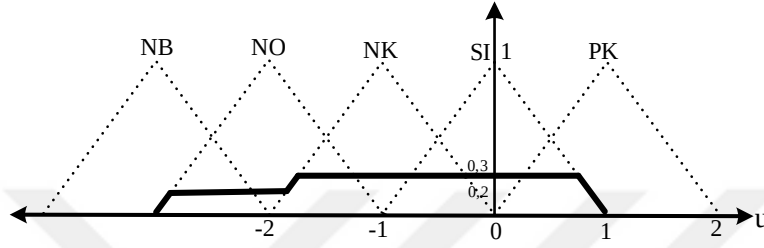
hatanın değişimi (Δe)

<u>u</u>	NB	NK	SI	PK	PB
NB	NB	NB	NO	NK	SI
NK	NB	NO	NK	SI	PK
SI	NO	NK	SI	PK	PO
PK	NK	SI	PK	PO	PB
PB	SI	PK	PO	PB	PB

Şekil 2.24. Yirmi beş kurallı örnek kural tabanı

Çıkarım Mekanizması

Kural tabanı ve bulanıklaştırma birimlerinin çıkışları kullanılarak, giriş ve çıkış değişkenleri arasındaki bağlantıların kurulduğu yani bulanık kümenin oluşturulduğu birimdir. Hesaplama süresinin daha kısa olmasından dolayı kontrol sistemlerinde genellikle bireysel kural tabanlı çıkarım mekanizması kullanılır [2], [76]. AND, İMA, TOPARLAMA işlemleri sırasıyla gerçekleştirilerek Şekil 2.25'teki sonuç bulanık kümesi elde edilebilir.



Şekil 2.25. Sonuç bulanık kümesi

Çıkış Birimi (Durulama)

Çıkarım mekanizmasından gelen sonuç çıkış bulanık kümesini, uygulaması yapılacak olan sistemde kullanılacak şekilde bulanık olmayan gerçek değerlere dönüştürülmesi işleminin yapıldığı birim olarak tanımlanmaktadır. Ağırlık merkezinin yaklaşık değeri Denklem 2.34'teki gibi hesaplanabilir.

$$u^* = \frac{\sum_{n=1}^m w_n u_n}{\sum_{n=1}^m w_n} \quad (2.34)$$

Bulanık Denetleyici Tipleri

Standart BM denetleyici mandami tipi denetleyici olarak adlandırılmaktadır. Mandami haricinde sıklıkla kullanılan denetleyici Sugeno tipi denetleyicilerdir. Bu denetleyiciler arasındaki temel fark Sugeno tipi denetleyicinin çıkışlarının, girişlerin bir fonksiyonu olarak gösterilmesidir. Örneğin; EĞER (e NK VE Δe SI) İSE u NK mandami tipi denetleyici çıkış fonksiyonu bulanık kümeye ait bir değer şeklinde iken Sugeno tipi denetleyicide çıkış fonksiyonu EĞER (x₁ NK VE x₂ SI) İSE y = f (x₁, x₂) gibi ifade edilir. Çıkış girişin bir fonksiyonu olarak elde edildiğinden durulama birimine ihtiyaç ortadan kalkmaktadır [2], [77].

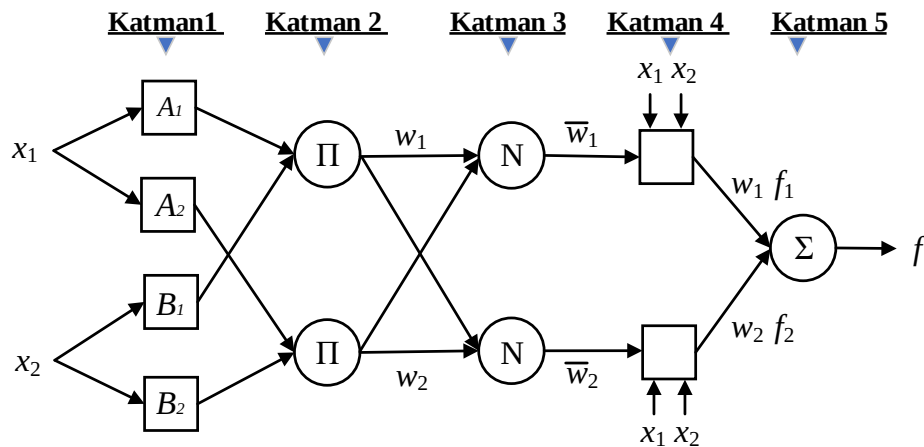
2.4.3. Sinirsel Bulanık Sistemler

Yapay zekâ tekniklerinin her birinin kendine has yetenekleri mevcuttur. YSA öğrenme yeteneği açısından ön plana çıkarken, karar verme konusunda yetersiz kalabilmektedir. BM sistemleri ise karar verme açısından çok iyi sonuçlar verebilirken, karar alma sürecinde kuralları

kendisinin oluşturmaması ve uzman bilgisine ihtiyaç duyması gibi dezavantajlara sahiptirler [2], [76]. BM kontrol sistemlerinin yaygınlaşması ile yüksek performanslı kontrolör yapılarının oluşturulmasının zorlukları ortaya çıkmıştır. BM kontrol sisteminde kuralların ve üyelik işlevlerinin oluşturulmasında kesin bir yöntemin olmaması, deneme yanılma yönteminin uzun zaman alması ve buna rağmen en iyi sonuçların elde edilememesi bu denetleyici yapılarına öğrenme özelliğinin eklenmesi fikrini doğurmuştur. Sinirsel bulanık mantık yapıları, BM ve YSA'ların avantajlı özelliklerini birleştirmeyi amaçlar. BM denetleyicinin karar verme aşamasında üyelik işlevleri belirlenirken, YSA'nın öğrenme ve tanılama gibi avantajları kullanılması sonucu uzman bilgi ve tecrübesine olan bağlılık azaltılmış olur [78]. Literatürde farklı sinirsel bulanık mantık yapıları çalışılmıştır. Bunlar genel olarak, uyarlamalı sinirsel bulanık çıkarım sistemi (ANFIS), Fuzzy Adaptive Learning Control Network (FALCON), NEuro Fuzzy CONtrol (NEFCON), NEuro Fuzzy CLASSification (NEFCLASS), Generalized Approximate Reasoning based Intelligent Control (GARIC), FUZZY Net (FuNe), Fuzzy Inference and Neural Network in Fuzzy Inference Software (FINEST)'dir [79]. ANFIS kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılan sinirsel bulanık ağ yapılarından biri olmuştur.

Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS)

ANFIS, bulanık çıkarım sisteminde bulanık kuralların oluşturulmasında uyarlamalı bir öğrenme prosedürü sunmaktadır. Sugeno tipi bulanık sisteme uyarlamalı sinirsel bir çıkarım sistemi eklenmesiyle oluşturulmuştur. İlk olarak Jang tarafından önerilen bu hibrit yapay zekâ tekniği, doğrusal olmayan sistemleri modellemek, bir kontrol sistemindeki doğrusal olmayan bileşenleri tanımlamak, tahmin yapmak için yaygın şekilde kullanılmaktadır [78], [80].



Şekil 2.26. Sugeno tipi ANFIS mimarisi

Şekil 2.26'da verilen Sugeno tipi ANFIS mimarisinden görüldüğü gibi ANFIS beş katmandan oluşmuştur. Birinci katman her bir girişin üyelik derecesin hesaplandığı bulanıklaştırma

katmanıdır. A_i , B_i sözel etiketlerden oluşan bulanık küme parametreleri $\mu_{A_i}(x)$ ve $\mu_{B_{i-2}}(y)$ üyelik dereceleri olarak tanımlanır. Bu katmandaki çıkışlar Denklem 2.35a ve 2.35b’teki gibi ifade edilir.

$$o_{1,i} = \mu_{A_i}(x) \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.35a)$$

$$o_{1,i} = \mu_{B_{i-2}}(y) \quad i = 3, 4, \dots, n. \quad (2.35b)$$

Her bir düğüm için 1 ve 0 arasında çıkış üretecek (bell, gauss ya da sigmoid) üyelik fonksiyonlarının kullanıldığı katman olarak tanımlanmaktadır. Çan eğrisi üyelik fonksiyonu ifadesi Denklem 2.36’daki gibidir. Burada m_i üyelik fonksiyonun orta noktası, a_i ise standart sapma olarak ifade edilmektedir.

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - m_i}{a_i} \right|^{2b}} \quad (2.36)$$

İkinci katman, bulanık kuralların oluşturduğu kural tabanını belirlemektedir. Birinci katmandan gelen tüm sinyaller Π ile işaretlenmiş düğümlerde AND (VE) işlemine tabi tutulmaktadır. İkinci katman çıkışı herhangi bir düğüm için Denklem 2.37’deki gibi hesaplanabilmektedir.

$$o_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y) \dots \mu_{Z_i}(z) \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.37)$$

Üçüncü katman bulanık kuralların kesinlik derecelerinin hesaplandığı katman olarak tanımlanmakta ve normalleştirme katmanı olarak adlandırılmaktadır. Herhangi bir düğüm için normalleştirme işlemi, o düğümün bulanık kural kesinlik derecesinin, kuralların kesinlik derecelerinin toplamına bölünmesiyle Denklem 2.38 elde edilebilir.

$$o_{4,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_i w_i}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.38)$$

Dördüncü katman bir kuralın ateşleme derecesinin boyutu olarak adlandırılmaktadır. Bu katmanda normalize edilmiş kuralların ateşleme derecesi doğrusal bir f fonksiyonu ile çarpılarak bulanık kuralların durulaştırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu işlem Denklem 2.39’daki gibi ifade edilmektedir.

$$o_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i z) \quad (2.39)$$

Beşinci katman ANFIS’in çıkış düğümüdür. Önceki katmandan gelen sinyallerin toplanarak, çıkış değerinin elde edildiği katman olarak tanımlanabilir. Ağırlık çıkış değeri Denklem 2.40’da verilmiştir.

$$o_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (2.40)$$

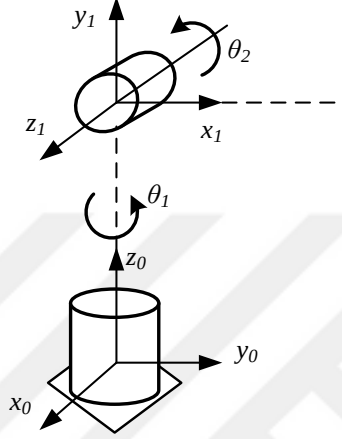
ANFIS'in çıkış fonksiyonu parametreleri $(p_i + q_i + r_i)$ ile giriş üyelik fonksiyonu parametrelerinin en uygun değerleri, ağ eğitilerek probleme çözüm olabilecek şekilde belirlenmesi gerekmektedir [78].

ANFIS' in Eğitimi

ANFIS'in giriş (üyelik fonksiyonu) parametreleri ve sonuç parametreleri eğitilerek probleme uygun anlamlı bir çıkış üretmesi sağlanmaktadır. ANFIS' in hem üyelik fonksiyonu hem de sonuç parametreleri geriye yayılım öğrenme algoritması ile yenilenebilmektedir. ANFIS' in çıkışında doğrusal bir ilişki bulunduğundan çıkış fonksiyonlarıyla ilişkili parametreleri yenilemek için en küçük kareler yöntemi kolayca kullanılabilir. Giriş üyelik fonksiyonları ile ilişkili parametreler ise geriye yayılım algoritması ile eğitilebilir. Hibrit öğrenme algoritması olarak bilinen bu yöntemle ANFIS' in eğitimi daha kısa sürede yapılabilir [2], [78].

3. NÖBETÇİ ROBOT PROTOTİP TASARIMI

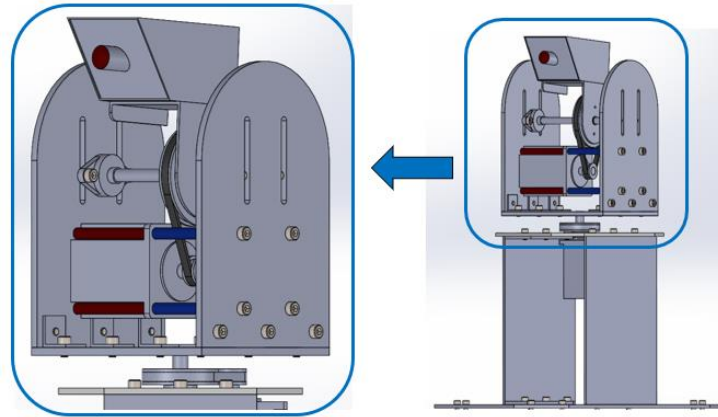
Nöbetçi robot prototipi, üst ve alt tabla olmak üzere iki eksende dönel hareket yapabilecek şekilde tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1’de robotun kartezyen koordinat sistemindeki çerçeveleri verilmiştir.



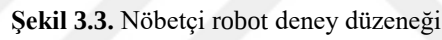
Şekil 3.1. Robot koordinat sistemi

3.1. Mekanik Sistem Tasarımı

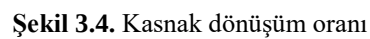
Mekanik tasarımın gerekli çizimleri SolidWorks programında hazırlanmıştır. Mekanik tasarım yapılırken, eksen hareketlerini sağlayan motorlara aşırı ve dengesiz yük oluşturmayacak şekilde, alt tabla 4mm ST 34 çelik, üst tabla ise 5 mm alüminyum malzemeden imal edilmiştir. Tasarımı yapılan parçalar gerekli kesimler yapıldıktan sonra, montajlanarak nöbetçi robot şasesi oluşturulmuştur. Şekil 3.2’de nöbetçi robot prototipinin üç boyutlu modeli verilmiştir



Şekil 3.2. Nöbetçi robot üç boyutlu modeli



SMSM'ler yüksek verimli, sağlam yapılı olmaları gibi sahip olduğu avantajlarından dolayı robotikte yaygın şekilde kullanılırlar. Bu özelliklerinden dolayı robotun eksenlerin tahrikinde üç fazlı düşük gerilimli Teknic 2310P marka SMSM'ler tercih edilmiştir. Teknic 2310P model SMSM makine üreticileri için özel olarak tasarlanmış ve boyutları NEMA 23 standartlarındadır. [81]. Motor tork sabiti 0,0384 Nm/A, motorun akım değeri 7,1 A olduğundan motorun sürekli torku 0,27 Nm'dir. Şekil 3.4'te kasnak dönüşüm oranı verilmiştir.



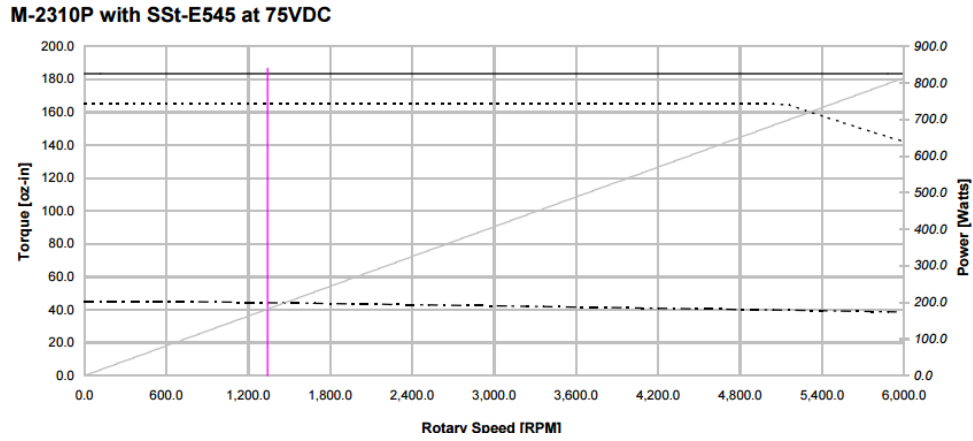
39

$$n = \frac{r_2}{r_1} \times \frac{r_4}{r_3} \quad (3.1)$$

Kasnak oranlarına göre dönüşüm yapıldığında tork dönüştürme oranı $n=14$ olarak hesaplanabilir. Dönüşüm oranı ve motorun ürettiği tork kullanılarak dönüştürülen tork Denklem 3.2’deki gibi ifade edilebilir.

$$\text{Dönüşüm Torku} = n \times 0,273 \quad (3.2)$$

Değerler yerine koyulduğunda sistemin toplam torku 3,83 Nm bulunur. İkinci kasnağın dönme eksenine olan uzaklık 5 cm olduğundan motorun döndürebileceği yük miktarı yaklaşık 8 kg olarak hesaplanmıştır. Üst tabla toplam ağırlığı 2 kg civarı olduğundan seçilen motorun mekanik sistemi sürmek için yeterli güce sahip olduğu belirlenebilir. Şekil 3.5’te SMSM’nin tork karakteristiği verilmiştir.



Şekil 3.5. SMSM tork karakteristiği [60]

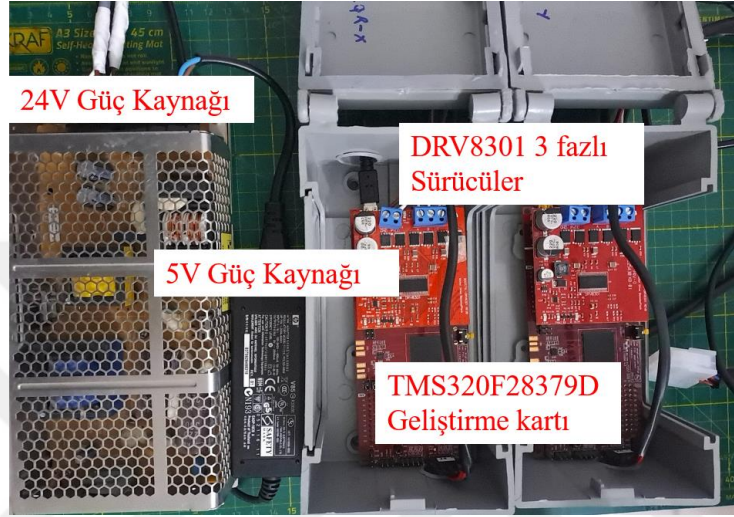
Tablo 3.1’de SMSM’nin teknik özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.1. SMSM parametreleri

Parametreler	Değerler
Stator direnci	$R_s = 0,36 \, \Omega$
dq eksen endüktanslar	$L = 0.2 \, \text{mH}$
Çift kutup sayısı	$P = 4$
Atalet momenti	$J = 7.06 \times 10^{-6} \, \text{kgm}^2$
Motor sürtünmesi	$B = 2.36 \times 10^{-6} \, \text{kgm}^2/\text{s}$
Zıt emk sabiti	$K_e = 4.64 \, \text{Vpp/krpm}$
Tork sabiti	$K_t = 0.0384 \, \text{Nm/A}$
Gerilim	60V DA
Nominal akım	7.1 A
Enkoder Çözünürlüğü	1000 PPR

3.2. Robot Donanım ve Yazılımı

Nöbetçi robotun mekanik tasarımının yanı sıra bu robotu süren motorların kontrolü için uygun elektronik donanım seçilmesi, hazırlanan yazılımlarla donanımın uyumlu hale getirilmesi ve kamera görüntüsünden elde edilen verilerin kontrol sistemine uyarlanması da tezin önemli bir çalışma konusudur. Şekil 3.6’da nöbetçi robot elektronik kontrol kısmı verilmiştir.

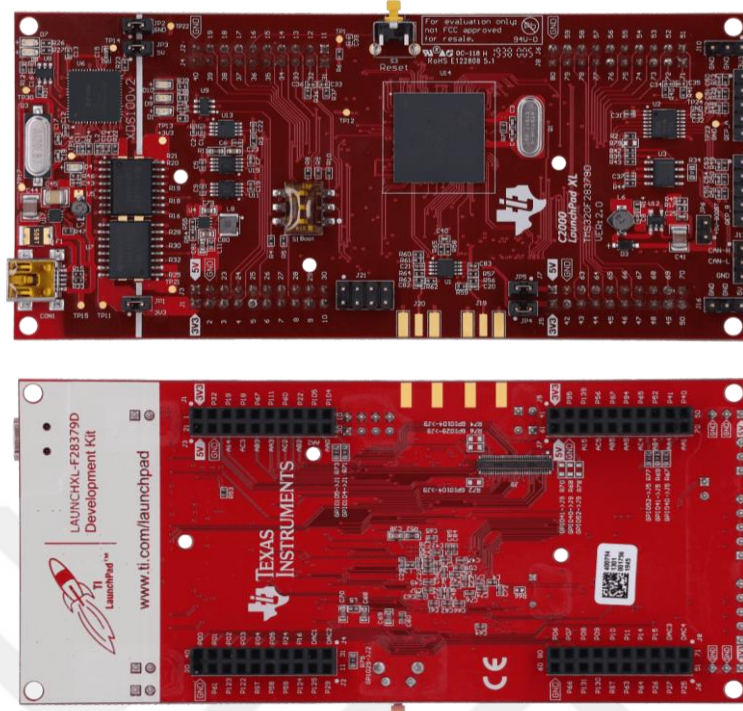


Şekil 3.6. Nöbetçi robot deney düzeneği elektronik ünitesi

3.2.1. Dijital Sinyal İşlemcisi (DSP)

DSP’ler özellikle robotik, endüstriyel otomasyon, aydınlatma, güç kaynakları ve diğer kontrol uygulamaları gibi gerçek zamanlı uygulamaların gerçekleştirilmesinde etkin bir araç olmuştur [82]. DSP’ler klasik tasarımlarının üstünde bir performans artışı sağlamakla birlikte sistem tasarım maliyetlerini önemli ölçüde düşürmüşlerdir [83], [84]. Teknolojinin gelişimine paralel olarak mikrodeneleyici (MCU) teknolojisindeki gelişmeler ile daha fazla işlem gücüne sahip, matematiksel işlemleri daha hızlı yapabilen, motor kontrolü amacıyla kullanılabilen mikrodeneleyicilerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu alandaki hızlı ilerlemeler, çeşitli yüksek performanslı AA sürücülerin geliştirilmesine katkı sağlamıştır [85]. DSP’ler güç elektroniğinde yüksek hızda hesaplama gerektiren sistemlerin kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada Texas Instruments firmasının C2000 Delfino serisi TMS320F28379D işlemcisine sahip geliştirme kartı kullanılmıştır. Düşük maliyetli bu geliştirme kartı 200 Mhz hızında 32 bit CPU’ya sahiptir. Diğer DSP’ler ile karşılaştırıldığında gerçek zamanlı güç elektroniği uygulamaları için ucuz ve performanslı bir çözüm sunmasından dolayı bu geliştirme kartı tercih edilmiştir. Geliştirme kartının üzerinde bulunan izolasyonlu USB bağlantısı sayesinde PC ile güç sistemi arasında optik izolasyon sağlanmış ve daha güvenli bir çalışma ortamı elde edilmiştir. Şekil 3.7’de C2000 serisi TMS320F28379D Delfino model geliştirme kartı verilmiştir.

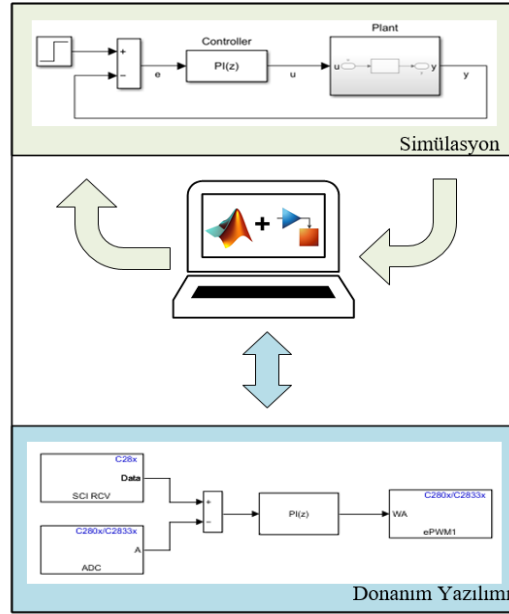


Şekil 3.7. C2000 TMS320F28379D Delfino geliştirme kartı [86]

3.2.2. DSP Yazılımı Oluşturma

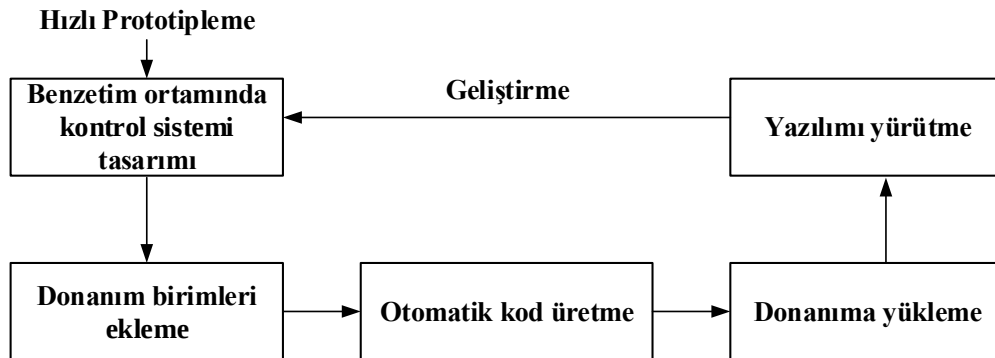
Texas Instruments (TI) marka mikrodenetleyici ve gömülü işlemciler için TI'nin geliştirdiği Code Composer Studio (CCS) IDE'si C2000 serisi TMS320F28379D model DSP'yi programlamak için kullanılabilir. Fakat güç elektroniği uygulamaların çeşitliliğinden dolayı hızlı prototipleme imkânı veren, benzetim, kod üretme ve gerçek zamanlı güç elektroniği uygulamasını bir ekosistemde barındıran yazılımlar kullanmak önem kazanmaktadır [87]. Matlab/SIMULINK programı bu anlamda esnek, işlevsel ve grafik tabanlı bir modelleme programı olarak bilinmektedir. Matlab/SIMULINK'in C2000 DSP araç kutusu gömülü kontrol sistemlerinin tasarım, benzetim uygulanması için bütünleşmiş bir ortam sağlamaktadır Matlab/SIMULINK'te TI C2000 serisi DSP'ler için gömülü yazılım oluşturmak için gömülü kodlayıcı destek paketi (*Embedded Coder® Support Package for Texas Instruments C2000*) ile motor kontrol blok seti (*Motor Control Blockset*) kullanılmaktadır. Bu özel bloklarla beraber uygulamaya göre kullanıcı tanımlı fonksiyon ve bloklar oluşturulabilir. Genel anlamda model tabanlı tasarım diye tanımlanan bu yöntem ar-ge laboratuvarları, start-up teknoloji şirketleri, endüstriyel üretim yapan şirketler tarafından benimsenmiş ve bu alanda başarılı projeler geliştirilmiştir. Model tabanlı tasarımda güç elektroniği uygulaması için tüm olası çalışma ve hata koşullarının benzetimi yapıldıktan sonra DSP için kod oluşturabilir ve DSP'ye yüklenebilir [88], [89]. Matlab/SIMULINK'ten ayrı olarak DSP'ler için grafiksel arayüzler aracılığıyla kod üretmek için Altair Embed ve PSIM gibi programlar yaygın

olarak kullanılmaktadır. Geliştirilen model için C/C++ kodları üretildikten sonra derlenip DSP'ye yüklenebilir. Şekil 3.8'de hızlı prototipleme amacıyla kullanılan Matlab/SIMULINK programı benzetim ve kod üretme blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.8. Matlab/SIMULINK hızlı prototipleme blok diyagramı

TMS320F28379D DSP motor kontrol uygulamalarında kolaylık sağlayan özelleştirilmiş ePWM (genişletilmiş DGM), QEP (enkoder), 12-16 bit ADC modüllerine sahiptir. Bu modüller Matlab/SIMULINK ortamında SIMULINK blokları şeklinde oluşturulmuştur.



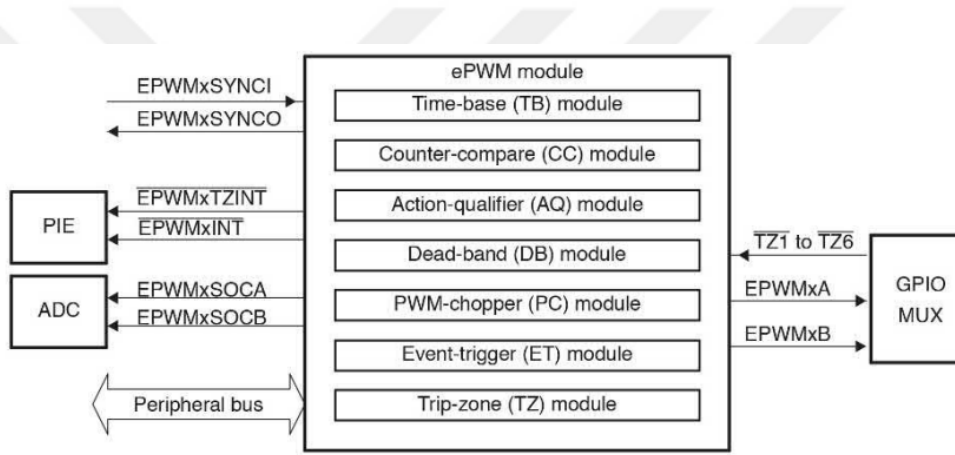
Şekil 3.9. Donanım için yazılım oluşturma akış şeması

Şekil 3.9'da Simulink ortamında kontrol sistemi tasarımı ve kod üretme akış şeması verilmiştir. Akış şeması incelendiğinde ilk olarak benzetim ortamında kontrol sistem tasarımı yapılmaktadır. Kontrol sistem tasarımı tamamlandıktan sonra, donanım blokları benzetim modeline eklenir ve

gerekli ölçekleme işlemleri ile veri tipi seçimi yapılır. Ardından, kod üretme ve donanım yükleme işlemleri gerçekleştirilir.

PWM Modülü

Dalga genişlik modülasyonu (DGM) tekniği birçok güç elektroniği uygulamasında, güç anahtarlarının uygun bir şekilde kontrol edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Matlab/SIMULINK'te TI C2000 serisi DSP'ler için dalga genişlik modülasyonu (ePWM) modül ayarlarının yapılacağı ePWM blokları mevcuttur. Her bir ePWM bloğu EPWMA ve EPWMB olmak üzere iki çıkış şeklinde yapılandırılabilir. Bu ayrı çıkışlar iki seviyeli evirici topolojisinde düşük ve yüksek taraf güç anahtarlarının kontrolünü kolaylaştırır [87]. ePWM modülü içinde çeşitli yardımcı modüller yer alır. Şekil 3.10'da bu yardımcı modüller verilmiştir.



Şekil 3.10. ePWM alt modülleri [87]

Zaman tabanı (TB) alt modülü ayrık zamanlı taşıyıcı (carrier) sinyalin genliğini belirleyen ayrık zamanlı sayıcı zaman tabanlı sayıcı (TMCTR) ve taşıyıcı sinyalin tepe değerini belirleyen zaman tabanlı sayıcı periyodu (TBPRD) alt biriminden oluşmaktadır. Sayıcı karşılaştırma (CC) alt modülü TMCTR ile karşılaştırma registerleri (CMPA, CMPB)'nin karşılaştırmasının yapıldığı ve anahtar konumlarının belirlendiği alt modül olarak tanımlanmaktadır. Ölü zaman (DT) alt modülü yüksek ve düşük taraftaki güç anahtarları arasındaki ölü zamanı ayarlamak için kullanılmaktadır. Ölü zaman ayarı yapılırken güç devresinde kullanılan anahtarlama elemanların veri sayfaları incelenerek anahtarların iletme zamanı (t_{on}) ve kesime girme zamanı (t_{off}) dikkate alınabilir. Simulink bloklarında bu süre saniye cinsinden belirlenebileceği gibi saat döngüsü cinsinden de belirlenebilmektedir. Bunların haricinde karşılaştırma sonucunu çıkış pinlerine aktaran olay niteleyici (AQ) koruma fonksiyonlarından sorumlu hata bölgesi (TZ) alt modülü, tetikleyici kaynağının seçildiği olay tetikleyici (ET) alt modülü şeklinde yapılandırılmıştır [90]. Bu alt modüllerin tamamının ayarlanması Matlab/SIMULINK'te ePWM bloğu altında yapılabilmektedir.

TBPRD' nin farklı sayma modları mevcuttur. Bunlar simetrik sayma modu (üçgen taşıyıcı sinyal) ve asimetrik sayma modu (testere dişi taşıyıcı sinyal) şeklindedir. Simetrik sayma modu periyodu Denklem 3.3'teki gibi ifade edilmektedir. TMCTR sinyali CPU'nun her bir clock sinyalinde artarak $TBPRD = PWM_{counter_period}$ değerine geldikten sonra azalarak sıfır değerine düşmektedir [87].

$$TBPRD = PWM_{counter_period} = \frac{CPU_{frekans}}{2 \times PWM_{frekans}} \quad (3.3)$$

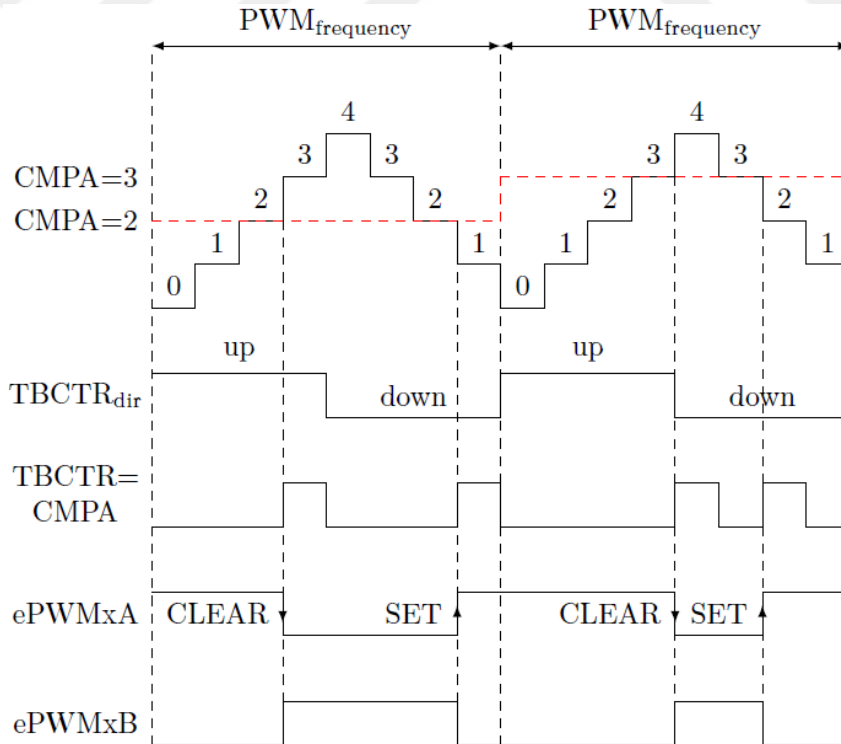
Asimetrik sayma modunda ise TBPRD değerine ulaşan taşıyıcı sinyal genliği sıfıra düşmektedir. TBCNT, TBPRD değeri Denklem 3.4'teki gibi hesaplanır.

$$TBPRD = PWM_{counter_period} = \frac{CPU_{frekans}}{PWM_{frekans}} \quad (3.4)$$

Anahtarlama frekansının 20 kHz seçilmesi durumunda TBPRD değeri Denklem 3.5'teki hesaplanabilir.

$$PWM_{counter_period} = \frac{200 \text{ MHz}}{2 \times 20 \text{ kHz}} = 5000 \quad (3.5)$$

TBPRD değeri olarak bulunur. Şekil 3.11'de TMS320F28379D geliştirme kartının DGM üretme sinyal biçimi verilmiştir.



Şekil 3.11. ePWM modülü modülasyon sinyali ve anahtarlama sinyali üretme [87]

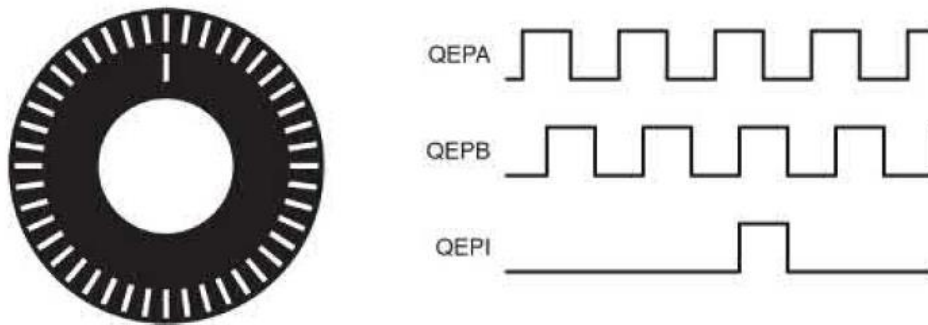
Enkoder Modülü (eQEP)

Artımlı tip enkoderler bir disk üzerine açılmış olukların bir tarafına yerleştirilmiş foto elemanından yansıyan ışığın, diskin diğer tarafındaki optik sensörler vasıtası ile algılanması ve çıkışında dijital sinyal üretmesi mantığı ile çalışmaktadır. Disk üzerindeki oluk sayısı enkoderin çözünürlüğünü hesaplamak için kullanılmaktadır. Uygulama türüne göre disk üzerindeki oluk sayısı yani enkoder çözünürlüğü değişebilmektedir. TMS320F28379D model DSP'nin enkoder bağlantı pinleri QEPA (A), QEPB (B) ve QEPI(I) şeklindedir. Artımlı tip enkoderler A, B pinlerine bağlı enkoder sinyalleri arasında 90 derecelik açı farkı olacak şekilde tasarlanmışlardır [86]. Şekil 3.12'de artımlı tip bir enkoder verilmiştir.



Şekil 3.12. Döner artımlı enkoder [91]

Dönüş yönü bilgisini tespit etmek amacıyla kullanılan bu yöntemde saat yönü genellikle A sinyalinin B'den önce pozitif olmasına göre tespit edilmektedir. Referans yöne göre sinyallerin gelme sırası değiştiğinde mil yönünün değiştiği anlaşılmaktadır. İndeks sinyali yarığı (QEPI) ise milin her turunda bir adet darbe üretecek şekilde konumlandırılmıştır. Şekil 3.13'de artımlı tip enkoder çıkış sinyalleri verilmiştir. Farklı sayma modlarına sahip eQEP bloğu artımlı enkoder için karesel sayma moduna ayarlanmalıdır.



Şekil 3.13. Rotasyonel artımlı enkoder çıkış sinyalleri [87]

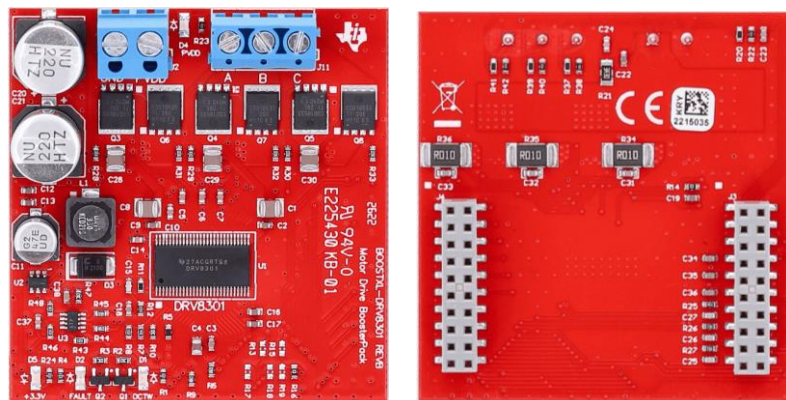
Artımlı enkoderler mutlak enkoderlerin aksine direkt hız ve açı bilgisi verememektedirler. Bir turdaki üretilen darbelerin sayılması, zamana göre hesaplanması yoluyla mil hızı ve konumu belirlenmektedir.

Analog Dijital Konvertör (ADC) Modülü

C2000 serisi TMS320F28379D Launchpad 12 bit tek uçlu ve 16 bit iki girişli analog dijital konvertör (ADC) giriş pinlerine sahiptir. ADC giriş pinlerinden alınan analog bilgi ADC modüllerine aktarılmaktadır. Bu ADC modülleri analog çoklayıcı (*MUX*) ve örnekleme ve tutma (*S&H*) devrelerinden oluşmaktadır. TMS320F28379D Launchpad' in 12 bitlik ADC girişlerine uygulanabilecek gerilim tek uçlu sinyal için 0-3.3 V aralığındadır. Bu sebeple, ADC girişine uygulanacak sinyalin bu aralıklarda ölçeklenmesi gerekmektedir. Ayrıca, giriş sinyali AC olduğunda, DA gerilimle ofsetlenerek akım değerinin negatif değerlere düşmesi önlenmektedir. DSP'de ADC dönüşümünü başlatmak için uygulama çeşidine bağlı olarak farklı tetikleme kaynakları seçilebilmektedir. Harici bir pin veya yazılımsal bir tetikleme sinyali ADC dönüşümünü başlatmak için kullanılabilir. Motor kontrol uygulamalarında genel yaklaşım ADC'nin DGM sinyali tarafından tetiklenmesi şeklinde gerçekleştirilmektedir. ADC modülünün kanal seçimi, tetikleme başlatıcısı, kesmeler, örnekleme zamanı tek girişli veya çift girişli dönüşüm seçeneği Matlab/SIMULINK'te yer alan ADC blok özelliklerinden ayarlanabilmektedir [87].

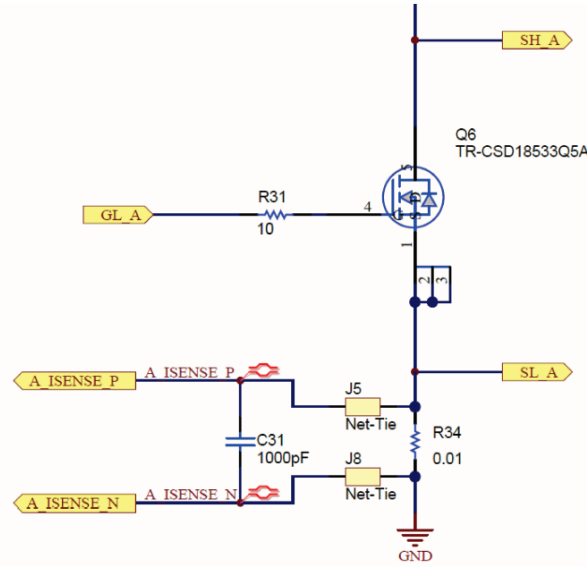
3.2.3. Motor Sürücü Sistemi

Bu çalışmada Şekil 3.14'de verilen Texas Instruments marka DRV8301 Booster Pack üç fazlı motor sürücü tercih edilmiştir. DRV8301 Booster Pack temelde, her bir faz bacağına iki adet mosfet ile oluşturulmuş, üç fazlı evirici devresi ve DRV8301 kapı sürme devresinden oluşmaktadır. DRV8301 Booster Pack sürücü, üzerinde barındırdığı gerilim bölücü devre vasıtası ile DA bara gerilimini ve faz gerilimlerini ayrı ayrı ölçme imkânını vermektedir.



Şekil 3.14. DRV8301 Booster Pack üç fazlı motor sürücü [92]

Sürücü üzerinde her faz bacağına akımını algılamak için 0.01Ω değerinde dirençler kullanılmaktadır. Motor akımını DSP'ye uygulayabilmek için akım algılama dirençleri üzerine düşen gerilime, diferansiyel op-amp devresi vasıtasıyla ofset gerilimi eklenmektedir. Böylece ölçülen akımın DSP'nin ADC girişine uygun hale getirilmesi sağlanmış olur. Yaklaşık 10 A sürekli, 16,5 A tepe akıma kadar destekleyen bu sürücü aşırı akım, aşırı gerilim, aşırı sıcaklık gibi koruma fonksiyonlarına sahip olup düşük gerilimli AA ve DA motorların kontrolünde kullanılmaktadır [92].



Şekil 3.15. DRV8301 motor sürücü akım ölçme devresi [92]

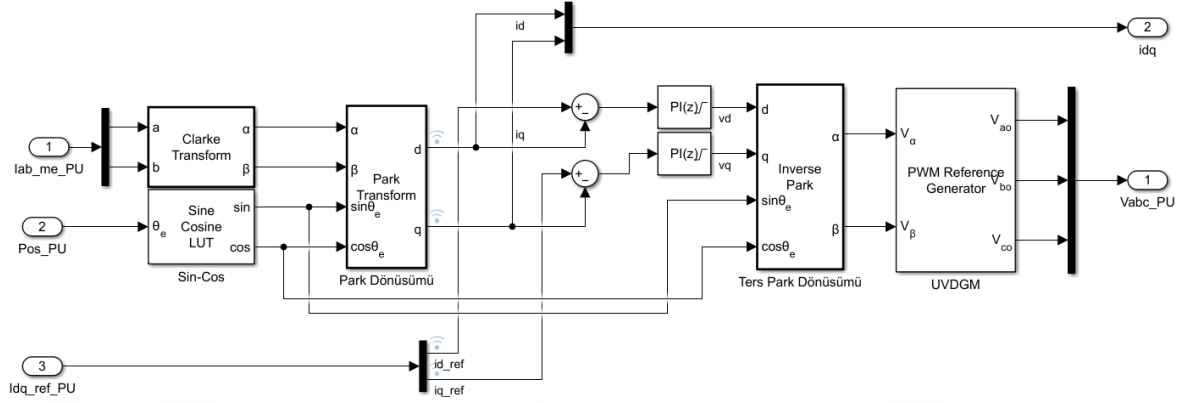
Şekil 3.15'te motor sürücüsünün akım ölçme devresi verilmiştir. Akım ölçümü yapılacak motor bir AA motor olduğundan motorun çektiği akımı DSP'nin ADC pinleri üzerinden ölçebilmek için negatif sinyalin 0-3,3V aralığında ofsetlenmesi gerekmektedir. Şekil 3.16'da verilen op-amp devresi bu işlevi sağlamaktadır. Devrenin referans gerilimi 1,65 V değerindedir. Sürücü akım algılayıcı direnç değeri 0.01Ω , sürücü maximum akımının 16,5 A olduğu ve yükseltici devre kazancının 10 olduğu göz önüne alınarak amper başına okunan gerilim değeri Denklem 3.6 vasıtası ile hesaplanabilir.

$$\frac{V_{\max} - V_{\text{ref}}}{i_{\max}} = \frac{3,3 - 1,65}{16,5} = 100 \frac{\text{mV}}{\text{A}} \quad (3.6)$$

Amper başına düşen gerilim değeri 100 mV/A şeklinde bulunur. ADC sinyal ölçme hassasiyeti ise Denklem 3.7'deki gibi hesaplanmaktadır.

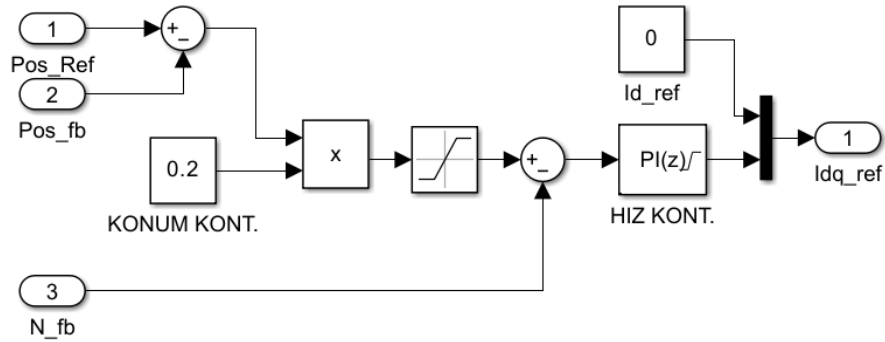
$$\text{ADC çöz.} = \frac{V_{\max}}{2^{12} - 1} \approx 0,81 \frac{\text{mV}}{\text{bit}} \quad (3.7)$$

dönüşümüne tabi tutulan akım kontrolör çıkışları UVDGM bloğuna gönderilerek sinüzoidal modülasyon sinyallerinin üretilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.18. Akım kontrolör bloğu Matlab/SIMULINK benzetim modeli

Şekil 3.19'da SMSM'nin konum kontrolü için MATLAB/Simulink blok şeması verilmiştir. Motorların konum kontrolünde, yük torkunun bozucu etkisinin en aza indirmek amacıyla dıştaki konum kontrol çevrimi ile birlikte içte hız kontrol çevrimi kullanılır. Hız kontrol çevriminde geleneksel olarak oransal-integral (PI) kontrolör, konum kontrol çevriminde ise oransal (P) ya da PI kontrolör kullanılabilir. Konum kontrol çevriminde PI kullanılırsa yüksek kazançlı integral bileşen, osilasyon ve kararsızlığa neden olabilir. Düşük kazançlı bir integral bileşen kullanılması durumunda sistemin kontrol performansı kötüleşecektir.



Şekil 3.19. P konum ve PI hız kontrolörü Matlab/SIMULINK benzetim modeli

3.2.5. PI Akım Kontrolör Tasarımı

Motorlarda hız/konum kontrolü yapılırken içteki akım kontrol çevriminin bant genişliği, dıştaki hız kontrol çevriminin bant genişliğinden oldukça büyük seçilirse ($\omega_i > 10\omega_\Omega$ veya $\tau_\Omega > 10\tau_i$) motorların elektrik ve mekanik kısımları ayrıştırılarak kontrolörler tasarlanabilir. Bu durumda akım kontrol çevrimi çok hızlı olacağından, dıştaki hız kontrol çevrimi içteki akım kontrol

dinamiklerinden etkilenmeyecektir. Böylece motorun ortaya çıkan birinci dereceden elektriksel ve mekanik kısımları için ayrı ayrı olmak üzere kontrolörler daha kolay tasarlanabilir [87]. Denklem 3.8’de motorun elektriksel devresinin transfer fonksiyonu verilmiştir. Burada R stator direnci L ise stator endüktansdır.

$$G_i(s) = \frac{1}{sL+R} \quad (3.8)$$

İçteki PI akım kontrolörünün transfer fonksiyonu Denklem 3.9’daki gibidir.

$$G_c(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (3.9)$$

Buradan açık çevrim transfer fonksiyonu Denklem 3.10’daki gibi olur.

$$G_c(s)G_i(s) = \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) \frac{1}{sL+R} \quad (3.10)$$

Kutup-sıfır iptali yapılarak kontrollü sistemin bant genişliği (ω_c), sistemin bant genişliğinin (ω_i) en az 10 katı ($\omega_c > 10\omega_i$) olacak şekilde kontrolör parametreleri bulunabilir. Zaman sabitleri açısından ise kontrollü sistemin zaman sabitesinin, sistemin zaman sabitesinin 1/10’u kadar seçilmesi anlamına gelmektedir. Elektriksel devrenin zaman sabitesi ve bant genişliği Denklem 3.11’deki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\tau_i = \frac{L}{R} \rightarrow \omega_i = \frac{1}{\tau_i} = \frac{R}{L} \quad (3.11)$$

Elektriksel devrenin zaman sabitesi ve bant genişliği Denklem 3.11’deki gibi olduğuna göre kontrollü sistemin zaman sabitesi ve bant genişliği Denklem 3.12’deki gibi ifade edilebilir.

$$\tau_c = \frac{\tau_i}{10} \rightarrow \omega_c = \frac{1}{\tau_c} \quad (3.12)$$

Denklem 3.13’de verilen kontrollü sistemin açık çevrim transfer fonksiyonu, zaman sabitesi τ_c olan standart birinci dereceden sisteme eşit olacak şekilde kontrolör parametreleri belirlenebilir.

$$G_c(s)G_i(s) = \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) \frac{1}{sL+R} = \frac{1}{\tau_c s} \quad (3.13)$$

Denklem 3.13’ün çözümünden,

$$k_p = \omega_c L \quad (3.14a)$$

$$k_i = \omega_c R \quad (3.14b)$$

Denklem (3.14a) ve Denklem (3.14b) kullanılarak kontrolör parametreleri hesaplanabilir. Bu kontrolör parametreleri ile kutup-sıfır iptali yapılarak kapalı çevrim transfer fonksiyonu Denklem 3.15'teki halini almaktadır.

$$T(s) = \frac{G_c(s)G_i(s)}{1+G_c(s)G_i(s)} = \frac{1}{\tau_c s + 1} \quad (3.15)$$

Böylece kontrol sistemi, bant genişliği ω_c olan birinci dereceden standart bir sistem olur. Verilen denklemler kullanılarak $k_p = 3.6$ ve $k_i = 6480$ olarak hesaplanabilir.

4. LQR TABANLI ANFIS KONUM KONTROLÖRÜ TASARIMI

Optimizasyon teorisinin kontrol sistemlerine uygulanmasıyla elde edilen kurallar bütünü optimal kontrol teorisi olarak adlandırılmaktadır [93]. Optimal kontrol yöntemlerinden lineer kvadratik regülatör (LQR), durum uzay modeli olarak ifade edilen bir kontrol sistemi için, durum geri besleme kontrol kazanç matrisi üzerinden durumların geri besleme yapıldığı ve kazanç matrisinin optimum yöntemlerle hesaplandığı kontrol yöntemi olarak tanımlanmaktadır [21], [94], [95]. Kazanç matrisinin hesaplanmasında farklı yöntemler geliştirilse de bu çalışmada optimizasyon probleminin matrisel Riccati denkleminin çözümüne indirgeyen yöntem kullanılmıştır [95]. LQR tabanlı ANFIS kontrolör tasarımına geçmeden önce yük torku ve parametre değişiminin etkisinde olan SMSM'nin LQR tabanlı konum kontrolü yaklaşımları incelenmiştir.

4.1. SMSM için LQR Tabanlı Konum Kontrolü Yaklaşımları

Tasarımı gerçekleştirilen nöbetçi robotun eksen hareketini sağlayan motorlara etki eden yük torkunun etkisini minimize edecek yöntemler kullanmak dayanıklı bir kontrol sistemi elde etmek açısından önemlidir. LQR yönteminde öncelikle Denklem 2.1-2.2 ve Denklem 2.7'de verilen eşitlikler kullanılarak kontrol edilecek sistemin durum uzay modeli Denklem 4.1 ve Denklem 4.2'deki gibi elde edilmektedir [95].

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega_r \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B}{J} & \frac{K_t}{J} \\ 0 & -\frac{P\lambda_m}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega_r \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J} \\ \frac{1}{J} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_q \\ T_L \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega_r \\ i_q \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Burada konum (θ), hız (ω_r) ve q eksen akımı (i_q), SMSM'nin durum değişkenleridir. Denklem 4.1 de durum değişkenleri $x(t)$, girişler $u(t)$ ve katsayı matrisleri A ve B ile gösterilmek üzere matrisel formatta aşağıdaki gibi yazılır.

$$\frac{d}{dt} x(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (4.3)$$

Durum geri beslemeli kontrol, sistemin durum değişkenlerinden girişlerine bir K kazancı üzerinden geri besleme yapmaktır.

$$u(t) = -Kx(t) \quad (4.4)$$

Denklem 4.3'e, Denklem 4.4 deki durum geri beslemesi yapılırsa Denklem 4.5'teki durum geri beslemeli kontrol sistemi elde edilir.

$$\frac{d}{dt}x(t) = (A - BK)x(t) \quad (4.5)$$

Denklem 4.5'deki kontrol sisteminde K geri besleme kazanç matrisinin optimum yöntemle hesaplanabilmesi için Denklem 4.6'da verilen performans kriterini minimize edecek şekilde K kazancının belirlenmesi gerekmektedir.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (4.6)$$

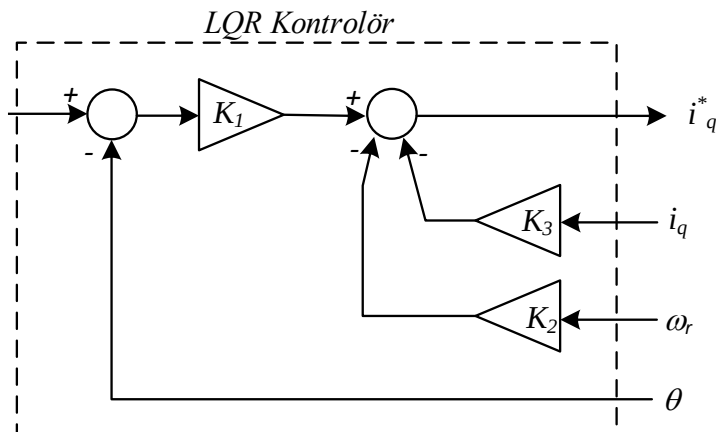
Burada, seçilecek Q ve R matrisleri pozitif tanımlı köşegen matrisleridir. Q ve R ağırlık matrislerinin seçimi, kontrol sisteminin performansını doğrudan etkilemektedir. Q ağırlık matrisi sistemin geçici rejim performansını arttıracak şekilde, R matrisi ise sistemi doyuma götürmeyecek şekilde seçilir ve denemelerle en uygun değerleri belirlenir [93].

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (4.7)$$

Denklem 4.7'nin çözümünden elde edilen P matrisi kullanılarak K kazanç matrisi Denklem 4.8'deki hesaplanabilir.

$$K = R^{-1}B^T P \quad (4.8)$$

Denklem 4.1'deki SMSM, konum çıkışı için Tip 1 sistemdir ve bu durumda LQR tabanlı konum kontrolü Şekil 4.1'deki gibi gerçekleştirilebilir.



Şekil 4.1. LQR tabanlı konum kontrolör yapısı

Şekil 4.1'de verilen LQR kontrolör motorun sabit parametrelerine göre tasarlanır. Dolayısıyla motor parametrelerindeki değişimlere ve tük torkunun bozucu etkisine karşı dayanıklı

değildir. Yukarıda açıklandığı gibi motorlarda dıştaki konum kontrol çevrimine ek olarak içte hız çevrimi kullanmak, bozulculara karşı dayanıklılığı artırmaktadır. Bu nedenle LQR uygulamaları da bu yaklaşıma göre aşağıda açıklanmış ve bozulculara karşı daha dayanıklı olan yapı belirlenmiştir.

SMSM'nin alan yönlendirmeli kontrolünde, motorun elektriksel devresinin zaman sabitesi mekanik sisteme göre oldukça küçük olduğundan ve akım kontrolörleri ideale yakın olacağından $i_q = i_q^*$ alınabilir. Böylece Denklem 4.1 ve Denklem 4.2'deki SMSM modelinin elektrik devresi ihmal edilerek motor modeli,

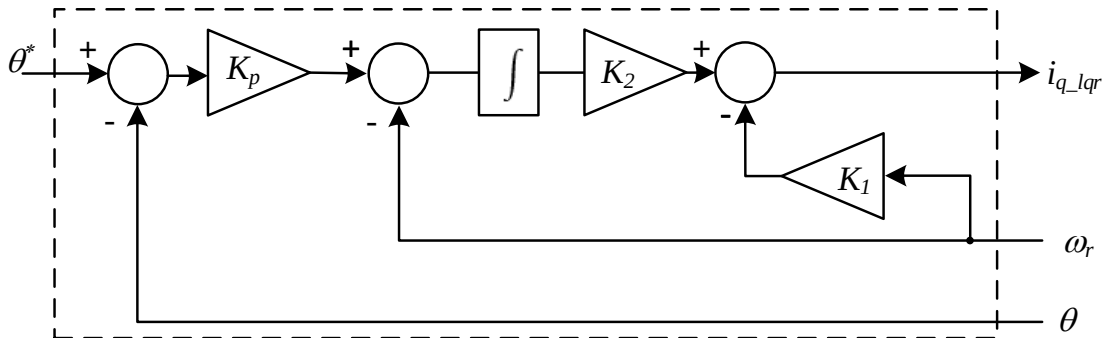
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{K_t}{J} & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q^* \\ T_L \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$\theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega_r \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Denklem 4.9 ve Denklem 4.10'daki gibi yazılabilir. Dolayısıyla vektör kontrolü yapılacak motorlarda Denklem 4.9-4.10'a göre kontrolörleri tasarlanmak mümkündür. Denklem 4.9'a göre LQR tasarlandığında Şekil 4.1'deki LQR kontrolör şemasında i_q akımı geri besleme kazanç değeri $K_3 = 0$ almak yeterli olacaktır [96].

4.1.1. LQR Hız Kontrolörü ve Oransal Konum Kontrolörü

Üçüncü kısımda açıklanan Şekil 3.19'da verilen konum kontrol yapısına uygun olarak parametre değişimleri ve yük torku etkisini minimize etmek amacıyla motorun hız kontrolü için LQR kontrolör ve konum kontrolörü olarak da oransal kontrolör tasarlamak mümkündür. Bu durumda hız çıkışı için motor Tip 0 sistem olacağından Tip 0 sistem yaklaşımı ile LQR kontrolör tasarlanmış ve buna göre kontrol yapısı Şekil 4.2'de verilmiştir [96].

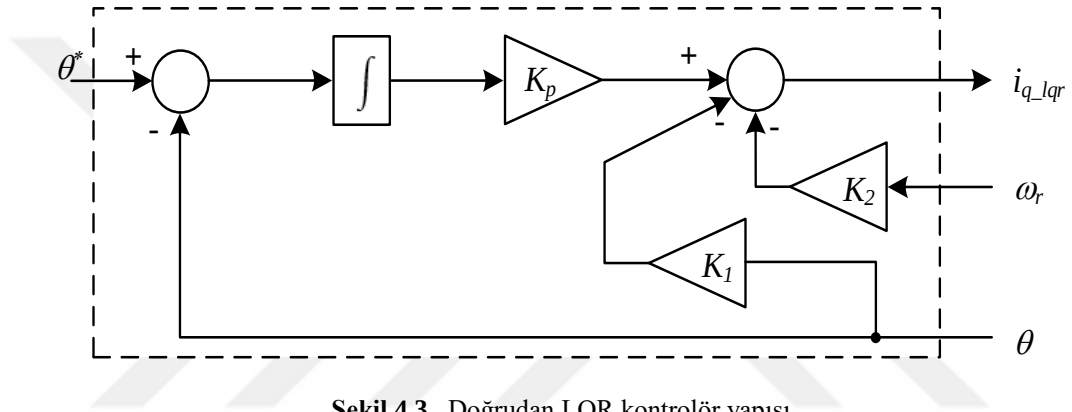


Şekil 4.2. LQR hız oransal konum kontrolör yapısı.

Bu durumda K_1 ve K_2 kazançları LQR tasarım işlemleri ile oransal konum kontrolörü K_p ise deneme-yanılmalarla ve yapılan testlerle kolayca belirlenebilir. Şekil 4.2’deki LQR kontrol yapısına göre LQR hız ve oransal konum kontrolör tasarlanmış, yapılan benzetim ve deneysel çalışmalarda motora uygulanan yük torkunun etkileri düzeltme performansı incelenmiştir.

4.1.2. Doğrudan LQR Konum Kontrolörü

Hız kontrol çevrimi kullanmaksızın Şekil 4.3’de parametre ve yük torku değişimlerinin bozucu etkisini azaltacak daha dayanıklı bir kontrol sisteminin elde edebilmek amacıyla doğrudan LQR konum kontrol yöntemi kullanılmıştır [97].



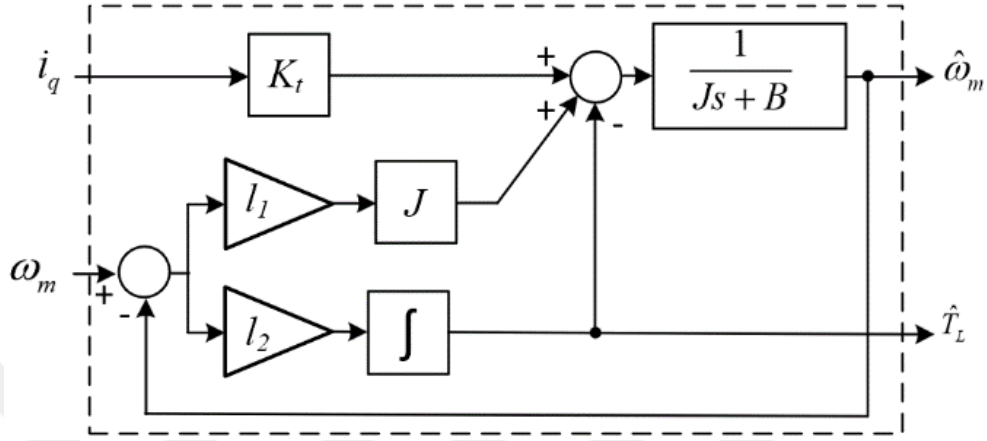
Şekil 4.3. Doğrudan LQR kontrolör yapısı

Bu tez çalışmasında, ANFIS konum kontrol sistemi tasarımına esas teşkil etmek üzere Şekil 4.3 deki yapının benzetim ve deneysel çalışmalarla kontrol performansı incelenmiştir. Bu tez çalışmasında, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’teki LQR tabanlı yapıların ANFIS ile gerçekleştirilmesi çalışılmış ve benzetim ve deneysel sonuçlarla kontrol performansları değerlendirilmiştir.

4.1.3. Tork Gözleyiciler

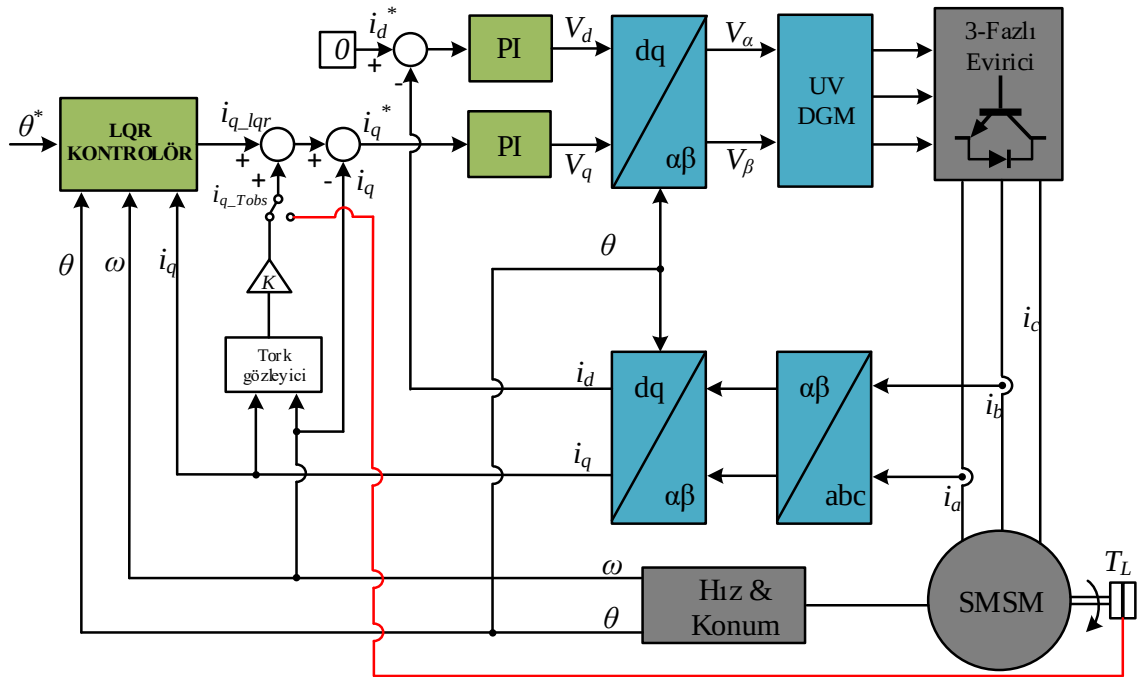
Bir sistemi süren motorlarda, sistemdeki parametre değişimleri ve motora binen yük torkunun hangi kontrol yöntemi olursa olsun az da olsa bozucu bir etkisi oluşacağından motora binen yük torkunun bilinmediği veya ölçülemediği hassas kontrol uygulamalarında yük torkunu hesaplayan gözleyiciler tasarlamak kritik öneme sahiptir [98], [99]. Motor kontrol sistemlerinde yük torkunun etkisini minimize etmek amacıyla, yük torku gözleyicilerini tasarlamak önemli bir araştırma alanını oluşturmaktadır. Yük torku gözleyicileri, motora yüklenen torkunun etkisini minimize etmek amacıyla, referans tork akımına (i_q^*) pozitif bir katkı sağlayacak şekilde tasarlanmaktadır [100], [101]. Benzetim ortamında yük torkunun bilindiği varsayılarak benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiş ve i_q^* akımına yapılan yük torku katkısının etkileri incelenmiştir.

Bununla birlikte yük torkundan kaynaklanan bozulmaların minimize edilebilmesi için motorun yük torkunun doğru şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 4.4'te motor modelinden yararlanarak tasarlanan tork gözleyici blok şeması verilmiştir.



Şekil 4.4. Motor modelinden oluşturulmuş tork gözleyici yapısı

Şekil 4.5'te SMSM'nin tork gözleyicili LQR konum kontrol şeması verilmiştir. Benzetim çalışmalarında motora uygulanan yük torku sinyali aynı zamanda LQR kontrolör çıkışı ileri yoluna eklenmiş ve yük torkundan kaynaklanan bozulmaların kontrol sistemi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

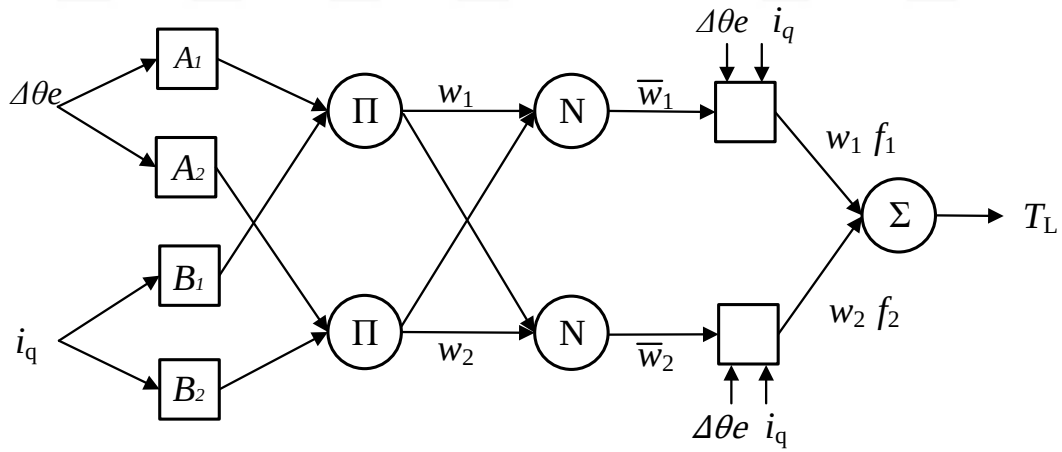


Şekil 4.5. SMSM'nin LQR tabanlı konum kontrolü blok şeması

4.2. ANFIS Tork Gözleyici Tasarımı

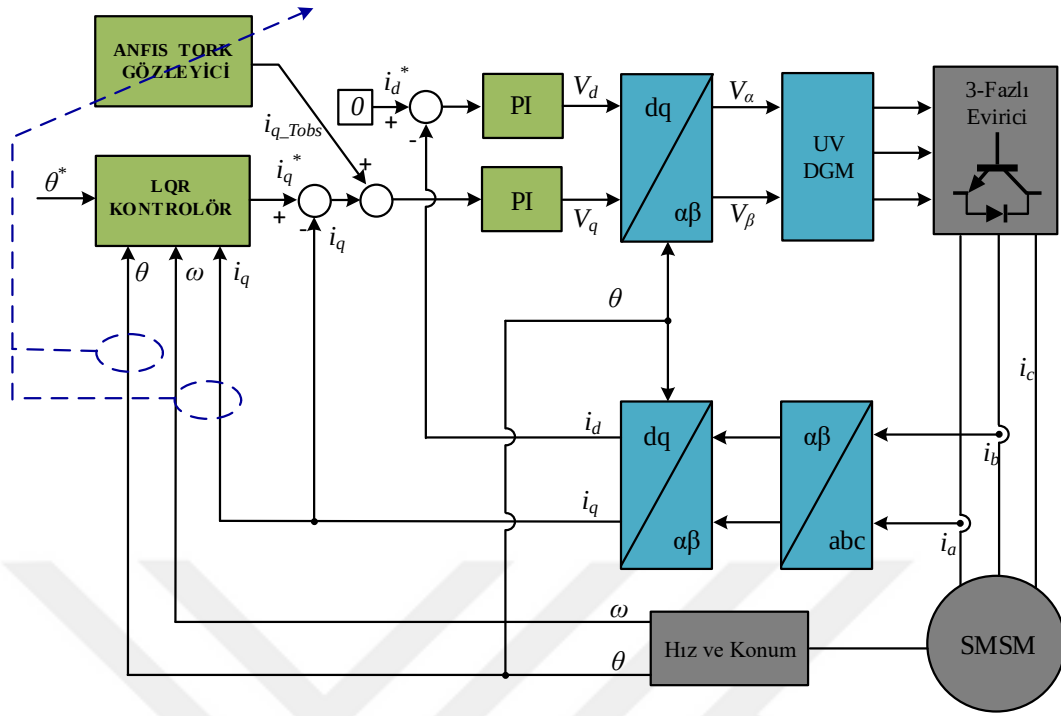
Motorun gerçek yük torkunu doğru bir şekilde tahmin edebilen bir tork gözleyicisi geliştirildiğinde, kontrol sistemlerinin dayanıklılığı ve performansı önemli ölçüde artmaktadır. Tork gözleyiciler matematiksel olarak tasarlanabileceği gibi matematiksel modelden bağımsız olarak da tasarlanabilirler. Matematiksel model tabanlı gözleyiciler motor parametreleri ve motor akımı kullanılarak tasarlanmaktadır. Uygulama kolaylığı açısından Luenberger gözleyiciler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, ölçme gürültülerine ve parametre değişimlerine karşı yeterli dayanıklılık sağlayamamaktadır [38]. Luenberger dışında Kalman filtresi, kayma mod gözleyici gibi çeşitli gözleyici yöntemleri literatürde çalışılmıştır. SMSM'lerin doğrusal olmayan karakteristiğe sahip olması nedeniyle model tabanlı tork gözleyici tasarımları zor olabilmektedir [28], [37]. Bu gözleyici algoritmalarının yanında modelden bağımsız olarak geliştirilen YSA, BM ve bulanık sinir ağları tabanlı tork gözleyiciler önem kazanmaktadır [102].

Bu çalışmada ANFIS tabanlı bir tork gözleyici tasarlanmış, tork gözleyici çıkışından elde edilen telafi edici sinyal LQR konum kontrolörü ileri yoluna eklenerek yük torku kompanzasyonu yapılmıştır. ANFIS tork gözleyici girişleri olarak konum hatasının değişimi ($\Delta\theta e$) ile motorun q eksen akımı (i_q), ağ çıkışı ise yük torku T_L alınmıştır. Şekil 4.6'da ANFIS tork gözleyici ağ yapısı verilmiştir.



Şekil 4.6. ANFIS tabanlı tork gözleyici yapısı

LQR kontrolör çıkışı olan q eksen referans akımı i_q^* 'ya, ANFIS tork gözleyici çıkış sinyali eklenerek parametre değişimlerinden ve yük torkundan kaynaklanan bozulmaların minimize edilmesi amaçlanmıştır. Şekil 4.7'de verilen SMSM'nin LQR+ANFIS tork gözleyicili konum kontrol blok şeması elde edilmiştir.

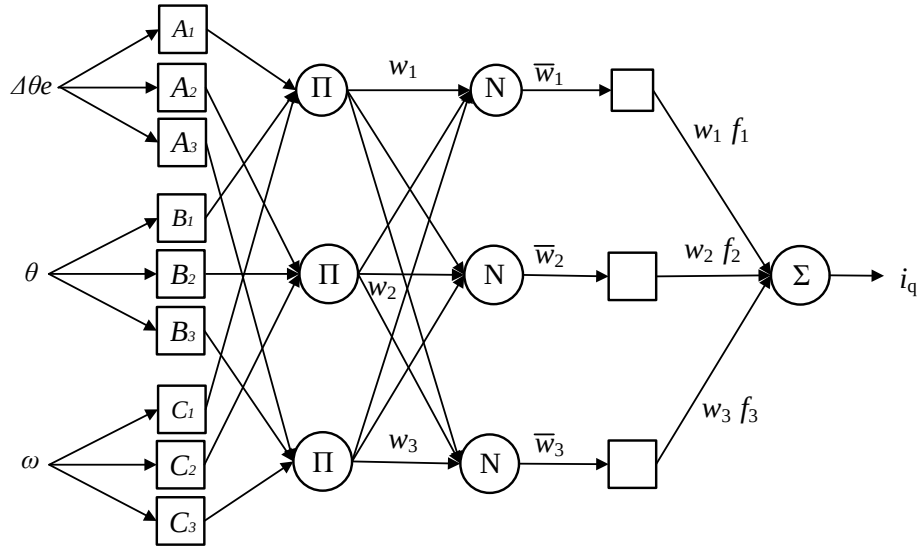


Şekil 4.7. SMSM'nin LQR+ANFIS tork gözleyici tabanlı konum kontrolü

ANFIS tork gözleyicinin eğitimi için kullanılan veriler benzetim ortamından alınmıştır. Farklı yük koşullarından elde edilen veriler kullanılarak, Matlab/SIMULINK Fuzzy Logic Designer araç kutusu vasıtasıyla eğitim gerçekleştirilmiştir. Farklı sayılarda üyelik fonksiyonu ile yapılan denemelerde üyelik fonksiyonu sayısının belli bir değerden sonra arttırmanın yük torku tahminine ciddi bir katkı yapmadığı, dolayısıyla üyelik fonksiyonlarının sayısının belirli bir değerden sonra arttırmanın kontrol sistemi açısından çok anlamlı olmadığı belirlenmiştir. Bu durum göz önüne alınarak 7x7 üyelik fonksiyonu seçilmiştir. Üyelik fonksiyonu tipi olarak üçgen üyelik fonksiyonu tercih edilmiştir. ANFIS tork gözleyici eğitimi için hibrit eğitim yöntemi kullanılmıştır.

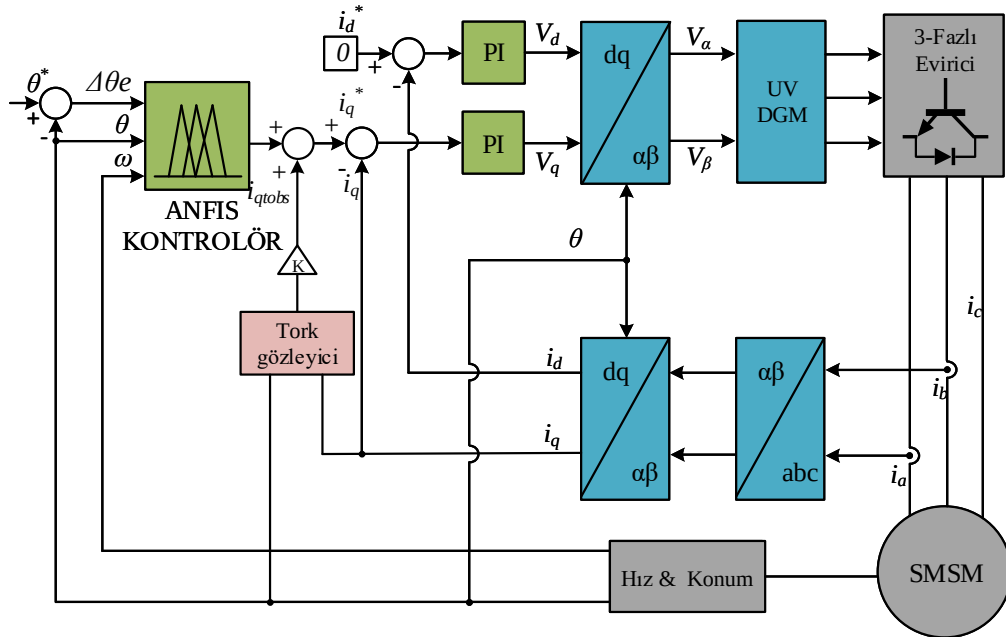
4.3. LQR Tabanlı ANFIS konum Kontrolör Tasarımı

Yukarıda verilen LQR yaklaşımları için SMSM'nin konum kontrolü denemeleri gerçekleştirilmiştir. ANFIS konum kontrolörü eğitimi doğrudan LQR kontrolör ile gerçekleştirilen benzetim sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak yapılmıştır. ANFIS konum kontrolörünün girişleri olarak konum hatasının değişimi ($\Delta\theta e$), motorun konum bilgisi (θ) ve motor hızı (ω) seçilmiş, ağ çıkışı ise q eksen referans akımı (i_q^*) olarak belirlenmiştir. Doğrudan LQR kontrolör, kontrol sisteminden çıkarılarak eğitimi yapılan ANFIS kontrolör, doğrudan LQR kontrolör yerine kullanılmıştır. Üç giriş bir çıkışlı ANFIS konum kontrolörü ağ yapısı Şekil 4.8'de verildiği gibidir.



Şekil 4.8. Üç girişli tek çıkışlı ANFIS konum kontrolörü ağ yapısı

ANFIS eğitimi için Matlab/anfisedit fonksiyonu ve Fuzzy Logic Designer (NFD) araç kutusundan yararlanılmıştır. Yapılan eğitimlerde her bir giriş için üyelik fonksiyonu sayısının 3 seçilmesi, dolayısıyla ANFIS kontrolörün 3^3 (27) kurallı olması durumunda ağı öğrenmesinin yeterli olduğu belirlenmiştir. ANFIS'in eğitimi için hibrit eğitim yöntemi kullanılmış, üyelik fonksiyonu tipi olarak gauss tercih edilmiştir. Hatanın karelerinin ortalaması değeri (RMSE) 0.000223057 olarak elde edilmiştir. Şekil 4.9'da ANFIS kontrolöre sahip SMSM'nin AYK tabanlı konum kontrolü blok diyagramı verilmiştir.

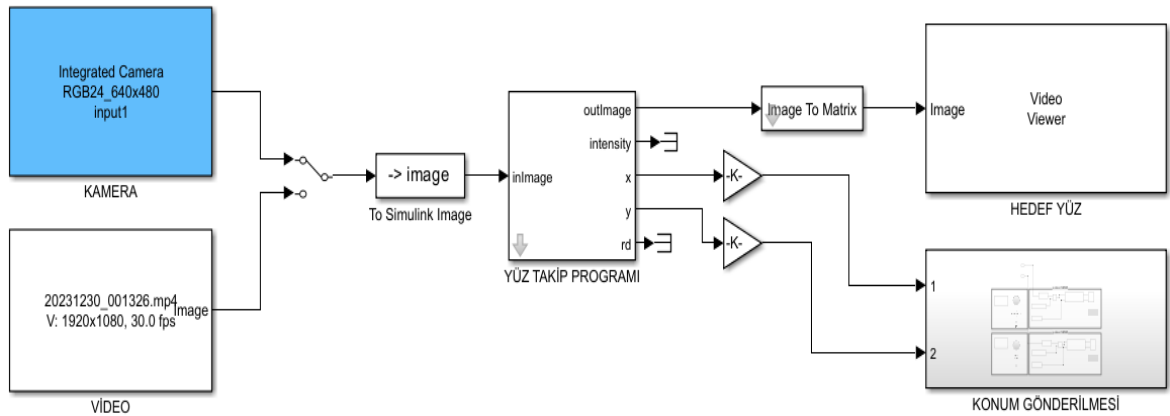


Şekil 4.9. SMSM'nin ANFIS+Tork gözleyici tabanlı konum kontrolü blok şeması

4.4. Hedef Tespit ve Takip Sistemi

Kamera tabanlı hedef tespiti ve takibi amacıyla literatürde çeşitli yöntemler önerilmiştir. Bilgisayar kullanılarak görüntü işleme programları ve algoritmaları yardımıyla hedefin konumu belirlenmektedir. [103], [104]. Bu çalışmada da nöbetçi robotun görüş alanındaki hedefi tespit ve takip etmek için kamera kullanılmıştır. Belirlenen hedefin konum bilgileri gerçek zamanlı olarak iki eksenli açı bilgisine dönüştürülerek bir sonraki birim olan DSP'ye aktarılır. Referans konum bilgileri ve motorların konum bilgilerini karşılaştırılarak elde edilen, hata sinyali önerilen konum kontrol yöntemi vasıtasıyla en kısa sürede sıfırlanması robotun hedefe hızlı bir şekilde yönelmesi ve hatasız hedef takibi yapabilmesi için önemlidir.

OpenCV açık kaynak kodlu bir bilgisayarlı görme ve makine yazılımı kütüphanesidir. Bu kütüphanede yüz algılama ve tanıma, nesneleri tanımlamak, eylem sınıflandırma, hareketli nesne takibi vb. birçok işlem için çok sayıda optimize edilmiş algoritmalar yer almaktadır [105], [106]. Bununla birlikte C, Matlab/SIMULINK nesne tanıma yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada hedef takip sistemi için Matlab/SIMULINK 2023a OpenCV eklentisi tercih edilmiştir. Open CV Matlab/SIMULINK eklentisinde bulunan yüz takip algoritmasından yararlanılarak oluşturulan model Şekil 4.10'da verilmiştir [106]. Yüz tespit algoritması çıkışından elde edilen . hedef tespit ve takip modelinde görüntüde hareket eden hedefin iki eksenli konum bilgileri eksen hareketini sağlayan SMSM'lerin referans konum bilgisi olarak kullanılmıştır. Deneysel çalışmada hedefin konum bilgileri Matlab/SIMULINK'te yer alan seri haberleşme blokları vasıtasıyla DSP'ye aktarılmış ve hedefe yönelecek şekilde nöbetçi robotun eksen hareketleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.10. Matlab/SIMULINK OpenCV yüz takip modeli

5. BENZETİM VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

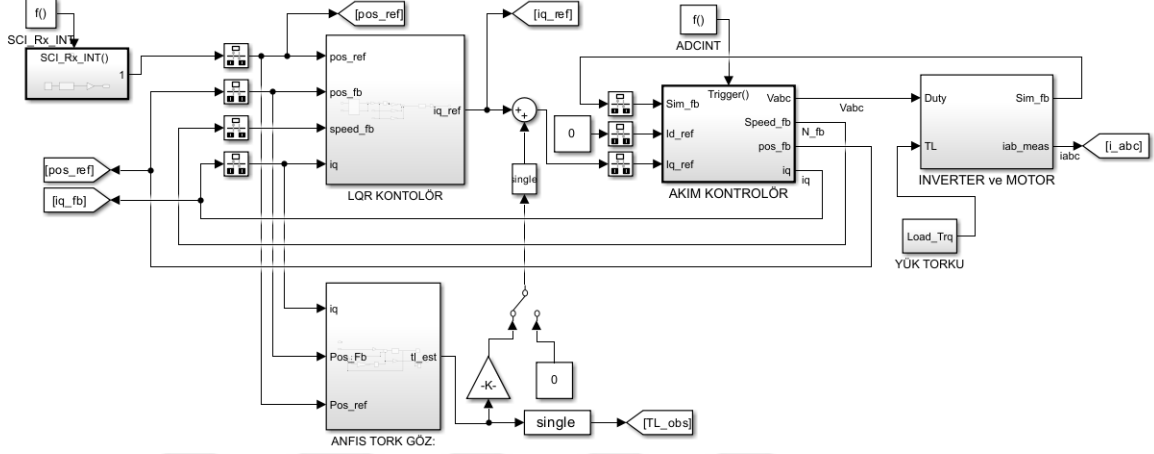
LQR kontrolör tasarımı kullanılarak Q , matrisi pozitif tanımlı köşegen matris olup, R matrisi ise girişlerin boyutuna karşılık gelmektedir. Yapılan benzetim çalışmalarında geri besleme kazanç matrisini en uygun yapacak Q ve R matrisi Şekil 4.1'deki kontrol yapısına uygun olarak $Q = \text{diag}[350 \ 0,25 \ 1]$ ve $R=1$ olarak belirlenmiştir. Bu değerlerle hesaplanan kazanç matrisi $K = [18,7 \ 0,48 \ 0,77]$ 'dir. Şekil 4.2'deki yapıda bu kazanç matrisi değeri $K = [18,7 \ 0,48]$ ve Şekil 4.3'teki yapıda ise bu kazanç matrisi değeri $K = [18 \ 1,5 \ 1]$ olarak elde edilmiştir. Şekil 4.1'de verilen LQR denetleyici blok şeması incelendiğinde sistemin durum değişkenleri akım, hız ve konum, LQR ile belirlenmiş kazanç matrisi $K = [K_1 \ K_2 \ K_3]$ üzerinden geri beslemeli olacak şekilde sisteme uygulanmıştır. Denklem 4.1'de durum uzay gösterimi verilen SMSM'nin çıkışı konum alındığında sistem Tip 1'dir. Tip 1 sistemin LQR ile konum kontrol blok şeması Şekil 4.1'deki şemaya uygun olarak Matlab/SIMULINK'te oluşturulmuştur.

Benzetim ve deneysel çalışmalar LQR kontrolör yapıları, LQR tabanlı ANFIS kontrolör ve ANFIS tork gözleyici kullanılarak yapılmış dayanıklı ve hassas kontrol yapısı elde edilmeye çalışılmıştır. Deneysel çalışma yapılırken, Matlab/SIMULINK ortamında oluşturulan benzetim modeline ek olarak Texas Instruments C2000 serisi işlemcilerin programlanması için oluşturulmuş Embedded Coder destek paketi kullanılmıştır. C2000 destek paketi ADC, DAC, enkoder, PWM, giriş/çıkış pinlerinin tanımlanabildiği bloklar ile haberleşme bloklarını içermektedir. Embedded Coder ve Embedded Coder destek paketi SIMULINK modelinden C/C++ kodları üretmek amacıyla kullanılmaktadır. Matlab/SIMULINK'te oluşturulan C/C++ kodları direkt olarak geliştirme kartına yüklenebildiği gibi TI CCS programı vasıtası ile de yüklenebilir. Matlab ve PC arasında haberleşme USB kablosu vasıtasıyla sağlanmıştır. Geliştirme kartı üzerinde bulunan izolasyonlu JTAG bağlantısı sayesinde PC ve güç sistemi arasında izolasyon sağlanmıştır. Buda güç elektroniği sistemi ile bilgisayar arasında elektriksel yalıtım sağlamıştır.

5.1. SMSM'nin LQR Hız ve Oransal Konum Kontrolü

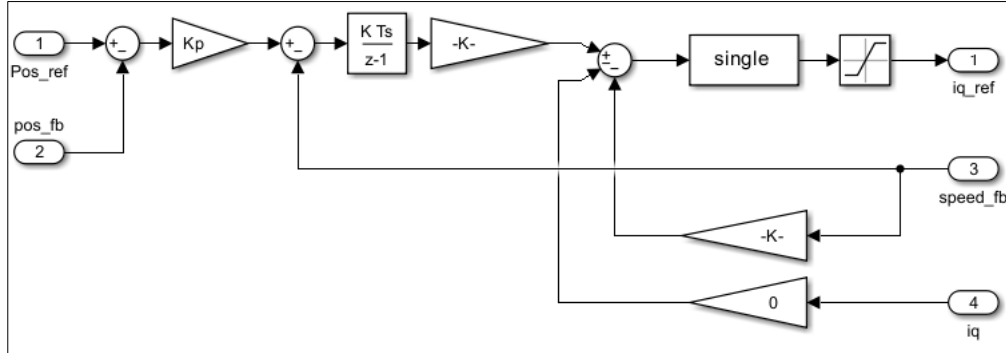
Benzetim ve deneysel çalışmalar ilk olarak LQR hız ve oransal konum kontrolör kullanılarak yük torku gözlemcisi devrede değilken yapılmıştır. Konum kontrolörüne, kazancı oldukça düşük seçilse bile integral bileşen eklemek osilasyon ve kararsızlığa neden olmuştur. Sonrasında LQR kontrolöre ek olarak kontrol sistemine ANFIS tabanlı yük torku gözleyici eklenmiştir. ANFIS yük tork gözleyici çıkışındaki telafi sinyali, LQR kontrolör çıkışı olan i_q^* akımı ileri yoluna eklenerek yük torku kompanzasyonu yapılmıştır. Benzetim yapılırken başlangıçta motora yük olarak SMSM'nin nominal torkunun % 10'u uygulanmıştır. Motor konum referansı 0,5. sn'de 1 PU (360°)'ye arttırılmış ve 1.sn'de motora uygulanan yük torku motorun nominal torkunun %40'ı

oranına çıkarılmıştır. Aynı yük torku ve konum şartları için benzetimler 1,5 sn'lik periyotlar için tekrarlanmıştır. Deneysel çalışmada motorun konum referansı değiştirilerek LQR, LQR+ANFIS_{TOBS} kontrolör yapıları için deneyler gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1'de SMSM'nin LQR+ANFIS_{OBS} konum kontrol Matlab/SIMULINK benzetim modeli benzetim verilmiştir.



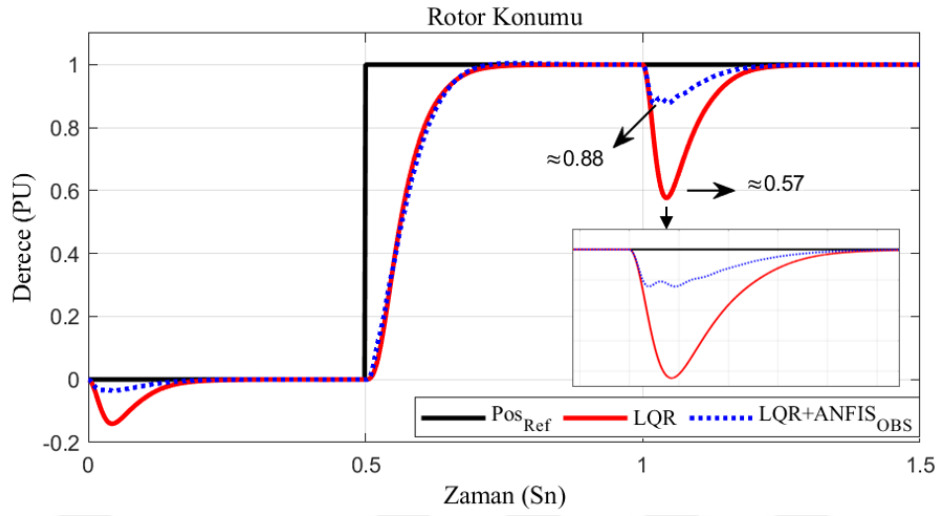
Şekil 5.1. SMSM'nin LQR+ANFIS_{OBS} konum kontrol Matlab/SIMULINK benzetim modeli

Şekil 5.2'de SMSM'nin konum kontrolörü olarak oransal hız kontrolörü olarak ise LQR kontrolörün kullanıldığı Matlab/SIMULINK modeli verilmiştir.



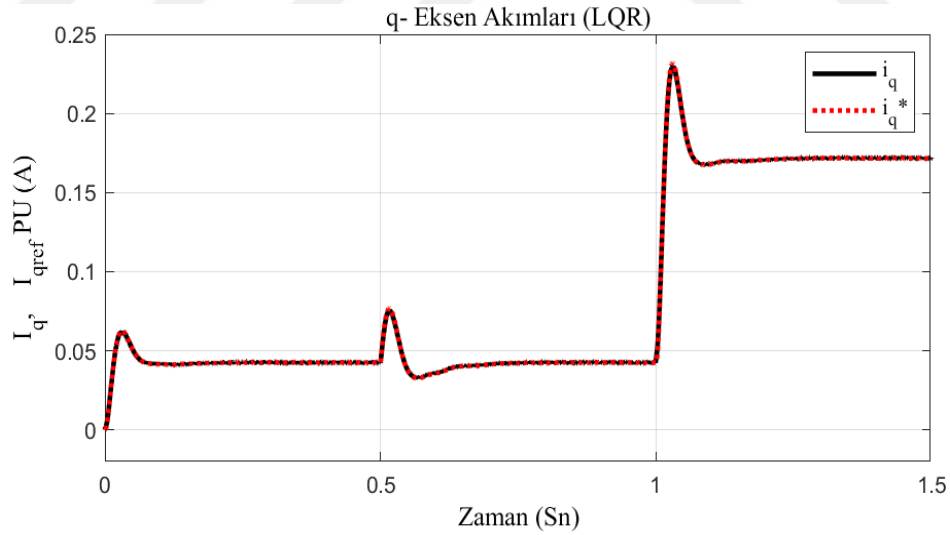
Şekil 5.2. Konum kontrolörü oransal-hız kontrolörü LQR Matlab/SIMULINK modeli

Şekil 5.3'te SMSM'nin LQR kontrolör ve LQR+ANFIS_{OBS} tabanlı kontrolörlerin referans konumu takip performansı benzetim sonucu verilmiştir. LQR kontrolör motorun nominal parametreleri için tasarlandığı için 1. sn'de arttırılan yük torkundan dolayı referans sinyalden yaklaşık %33'lük bir sapma yapmış ve referans konum sinyalini yakalaması daha yavaş olmuştur. ANFIS tabanlı yük torku gözlemcisi devreye alındığında, yük torkunun etkisi azalmış ve referans sinyalden sapma yaklaşık olarak %12 seviyelerine düşmüş ve motorun referans sinyali tekrar yakalaması daha hızlı olmuştur.



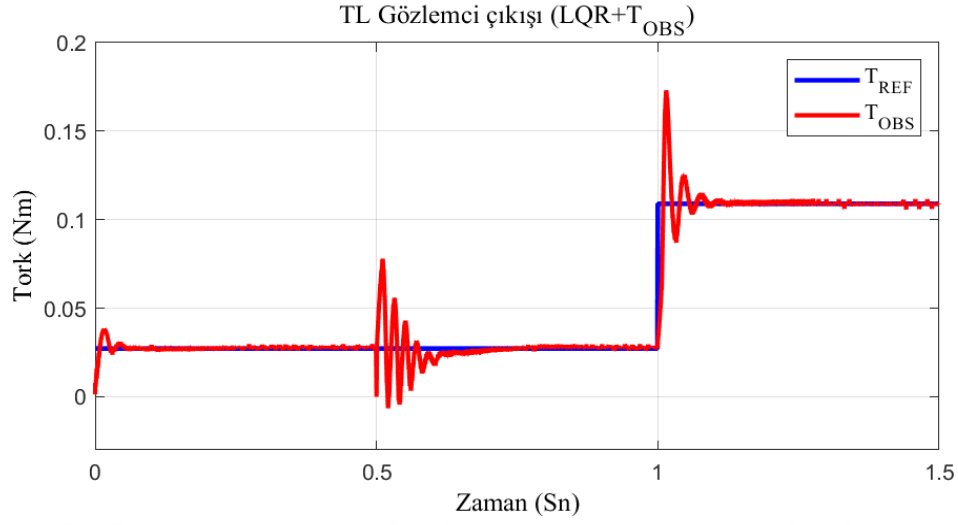
Şekil 5.3. LQR ve LQR+ANFIS_{TLOBS} kontrolörlerin referans konumu takip performansı benzetim grafiği

ANFIS tork gözleyici devrede değilken LQR tabanlı kontrolörün q eksen akımları Şekil 5.4’te verilmiştir. Grafik incelendiğinde i_q akımının, i_q^* akımını başarılı bir şekilde takip ettiği dolayısıyla akım kontrolörlerinin parametrelerinin uygun olduğu belirlenebilir.



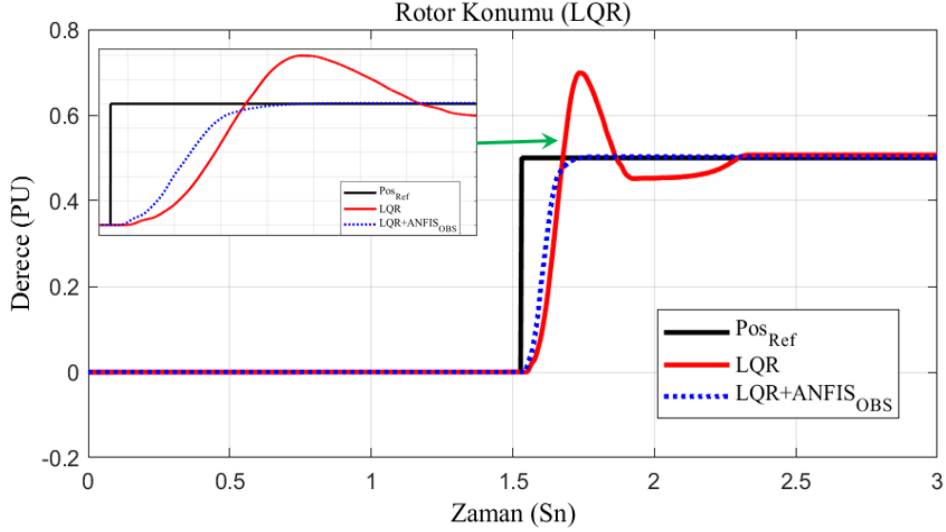
Şekil 5.4. LQR kontrolör q eksen akımlarının benzetim grafiği

Şekil 5.5’te ANFIS tork gözleyicinin motora uygulanan yük torkunu tahmin performansı benzetim grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde konum referansı ve yük torku değişimlerinde, ANFIS tork gözleyici çıkışının belli oranda osilasyon yaptığı ve devamında referans torku takip ettiği görülmüştür.



Şekil 5.5. ANFIS tork gözleyici çıkış benzetim sinyali

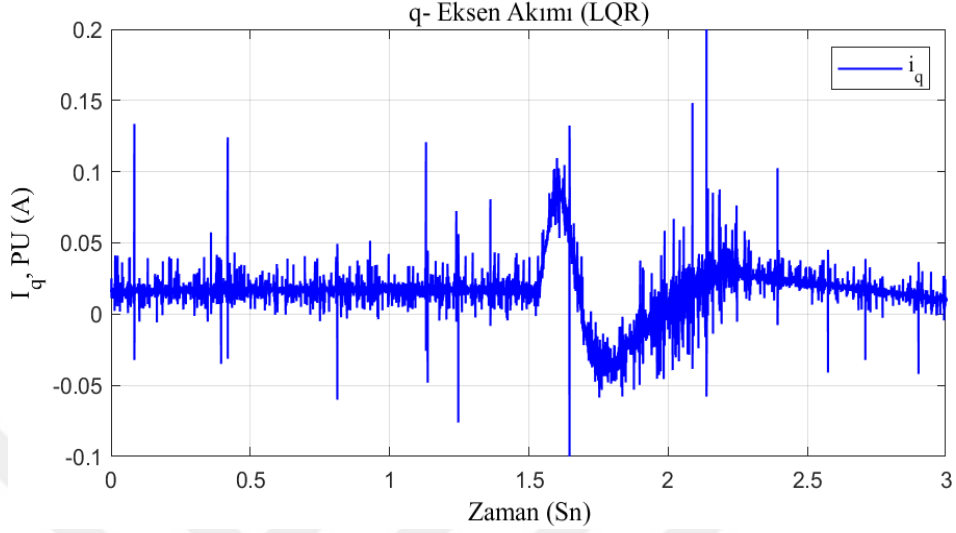
Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar ile ANFIS tork gözleyicisinin eğitimleri gerçekleştirilerek tasarım yapılmıştır. Şekil 3.2’de verilen deney düzeneği kullanılarak tork gözleyici devrede ve devrede değil iken deneyler yapılmıştır.



Şekil 5.6. LQR ve LQR+ANFIS_{OBS} referans sinyali takip performansı deneysel grafiği

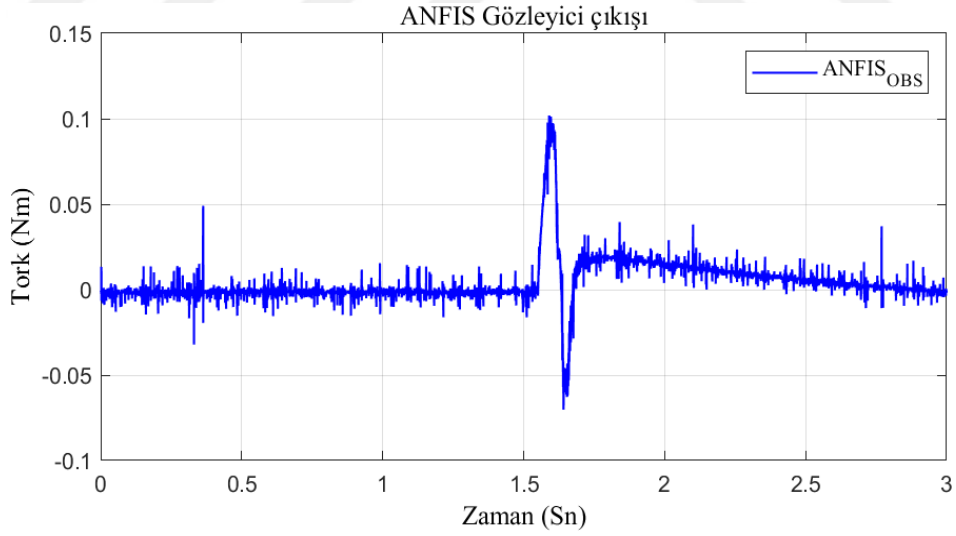
Şekil 5.6’da SMSM’nin LQR ve LQR+ANFIS_{OBS} için konum referansını takip performansı deneysel çıkış grafiği verilmiştir. LQR kontrolör tek başına kullanıldığında motor referans sinyal değişimi esnasında yük torkunun etkisi ile aşma yapmış ve referans konumdan sapma yaparak tekrar referans konumu yakalaması uzun sürmüştür. ANFIS tork gözleyici devreye alındıktan sonra

tekrarlanan deneyde, motor konum referansından sapma yapmadan referans konumu başarılı bir şekilde takip etmiştir.



Şekil 5.7. LQR kontrol q eksen akımı deneysel çıkış sinyali

Şekil 5.7’de verilen SMSM’nin q eksen akımı deneysel çıkış grafiği verilmiştir.

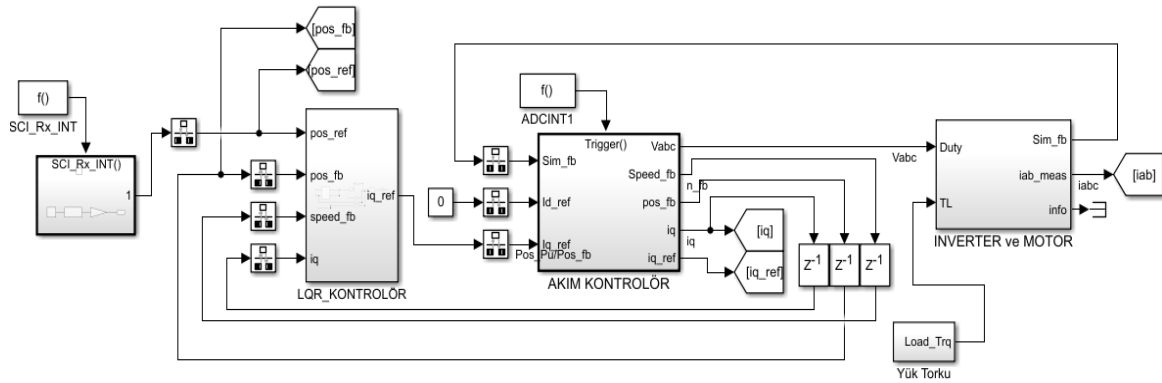


Şekil 5.8. ANFIS tork gözleyicisi deneysel çıkış sinyali

Şekil 5.8’de ANFIS tork gözleyicisi deneysel çıkış sinyali verilmiştir. 0-1,5.sn arası tork gözleyici çıkışı sıfırdır. 1,5. sn’de konum referansı değişimi sonrası tork gözleyicinin tahmin ettiği motorun yük torku grafikteki gibidir. Şekil 5.8 de verilen tork grafiği, alt tabla motorunun torkudur. Motor yatay dönüş hareketinde istenen konuma ulaştığında motora ters yönde etki eden eksenel bir tork olmadığından sıfıra yaklaşmaktadır.

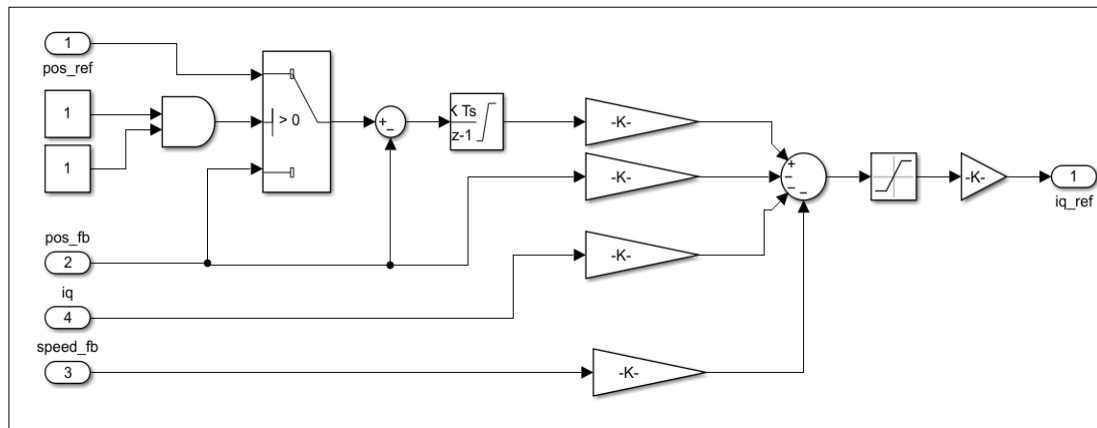
5.2. SMSM'nin Doğrudan LQR Konum Kontrolü

Doğrudan LQR kontrol yapısı, Matlab/SIMULINK'te oluşturulmuş ve SMSM'nin AYK esaslı konum kontrol modeline uygulanarak benzetim ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.9'da SMSM'nin doğrudan LQR konum kontrol Matlab/SIMULINK benzetim modeli verilmiştir.

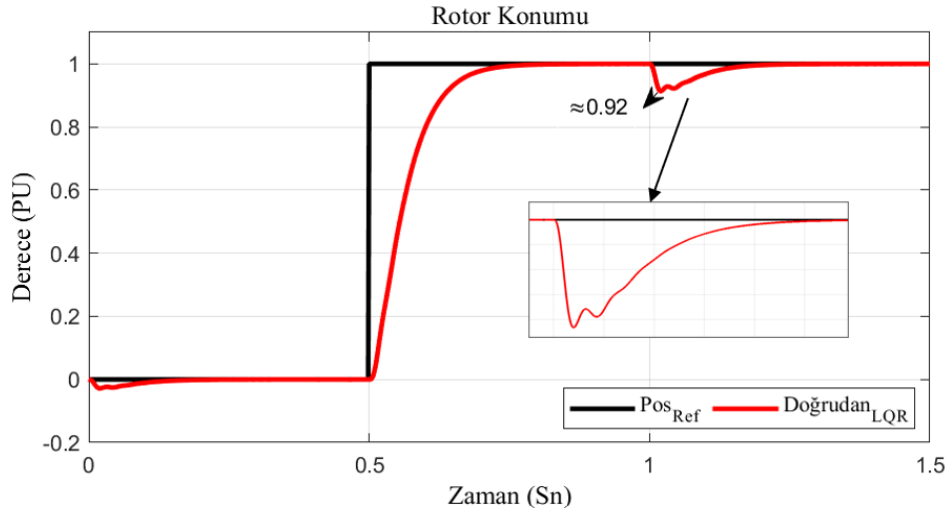


Şekil 5.9. SMSM'nin doğrudan LQR ile konum kontrolü Matlab/SIMULINK benzetim modeli

Doğrudan LQR kontrolör yapısı incelendiğinde durum değişkenleri geri besleme kazanç matrisi ile çarpılarak sisteme geri beslenmiştir. Şekil 5.10'da SMSM'nin doğrudan LQR kontrolör ile konum kontrolörü Matlab/SIMULINK modeli verilmiştir. Diğer benzetim ve deneysel çalışmalarda olduğu gibi doğrudan LQR konum kontrolü yapısında da tork gözleyici kullanılmıştır.

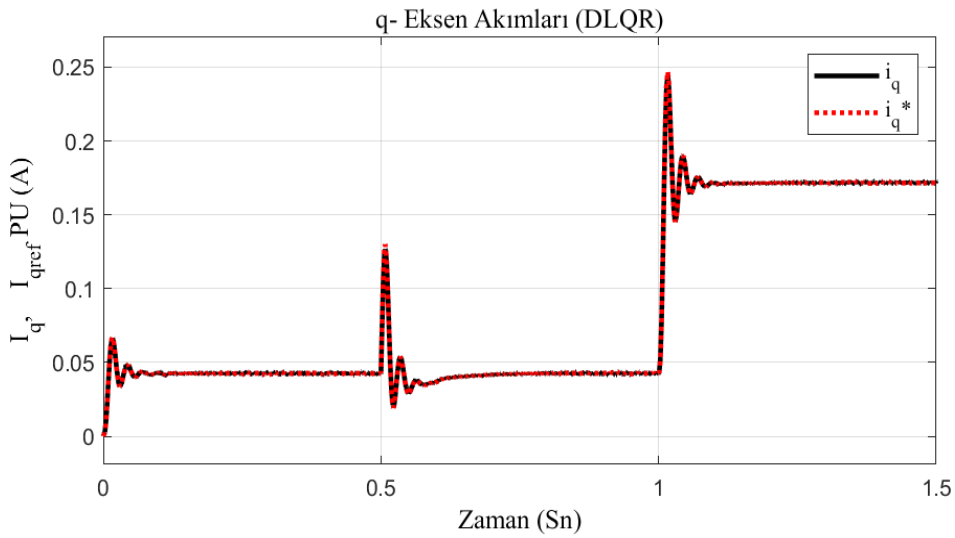


Şekil 5.10. Doğrudan LQR konum kontrolörü Matlab/SIMULINK modeli



Şekil 5.11. Doğrudan LQR ile referans sinyali takip performansı benzetim çıkış grafiği

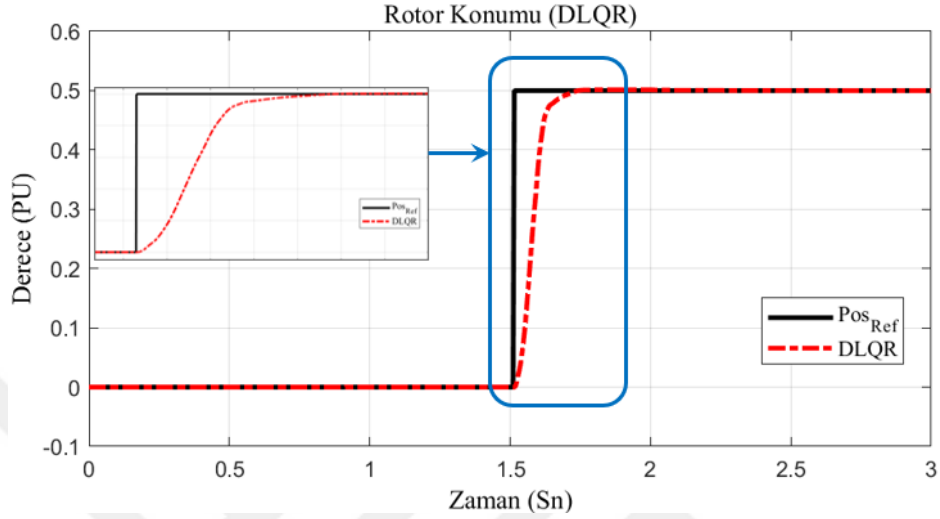
Şekil 5.11’de SMSM’nin doğrudan LQR kontrolör yapısına göre konum referansı izleme performansı benzetim grafiği verilmiştir. Bir önceki benzetim çalışmasında olduğu gibi yük torku başlangıçta %10’da tutulmuş ve 1. sn’de motorun nominal torkunun %40’ına yükseltilmiştir. Önceki LQR yapısında konum referansından sapma yaklaşık %12 civarında olmuştur. Doğrudan LQR kontrolörde yapılan deneyde ise bu oran yaklaşık %8’ler seviyesine düşmüştür.



Şekil 5.12. Doğrudan LQR kontrolör q eksen akımları benzetim grafiği

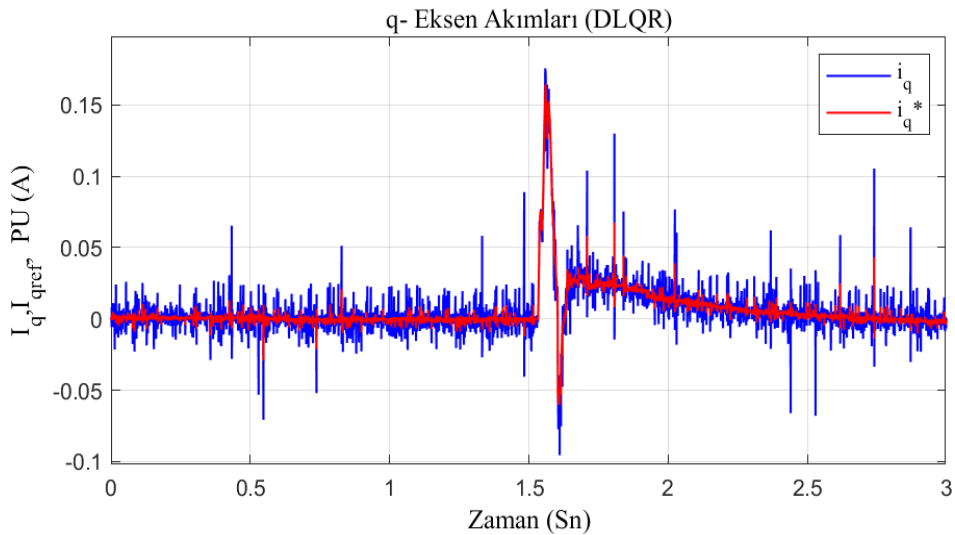
Şekil 5.12’de SMSM’nin doğrudan LQR kontrolörlü q eksen çıkış akımlarının benzetim sonucu verilmiştir. Daha önceki benzetimde olduğu gibi bu benzetimde de PI akım kontrolörleri için üçüncü kısımda hesaplanan parametreler kullanılmıştır.

SMSM'nin doğrudan LQR konum kontrolü referans sinyali takip performansı deneysel çıkış grafiği Şekil 5.13'de verilmiştir. Konum kontrol performansına bakıldığında SMSM konum referansını osilasyon ve aşma yapmadan başarılı bir şekilde izlemiştir.



Şekil 5.13. Doğrudan LQR referans sinyali izleme performansı deneysel çıkış grafiği

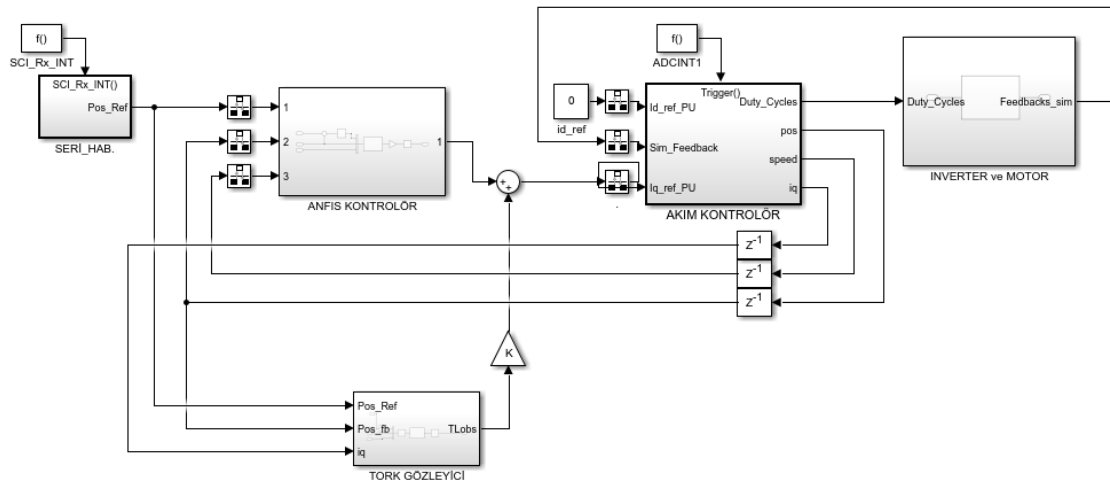
Şekil 5.14'teki grafik incelendiğinde doğrudan LQR denetim yapısında q eksen akım kontrol parametrelerinin uygun olduğu ve q eksen akımındaki bozulmaların daha az olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.14. Doğrudan LQR q eksen akımları deneysel çıkış sinyali

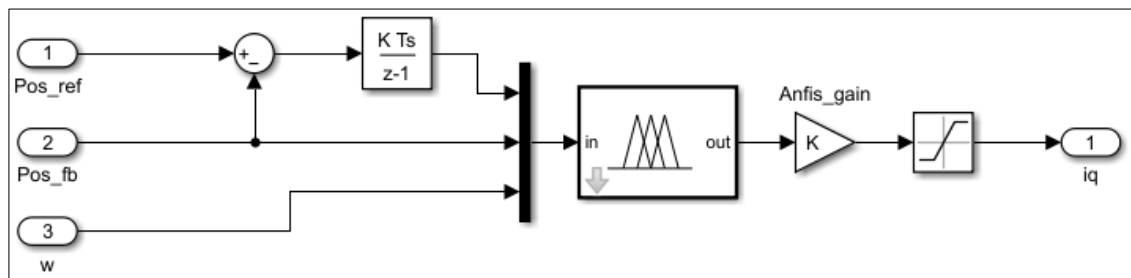
5.3. SMSM'nin ANFIS Tabanlı Konum Kontrolü

Farklı LQR yaklaşımları için SMSM'nin konum kontrolü benzetim ve deneysel çalışmalarında en iyi sonucun doğrudan LQR kontrol yapısı ile alındığı belirlenmiştir. Bundan dolayı SMSM'nin doğrudan LQR konum kontrolü benzetim modelinden çeşitli konum ve yük şartları için elde edilen giriş çıkış veri setleri ANFIS konum kontrolörün eğitimi için kullanılmıştır. Devamında SMSM'nin doğrudan LQR konum kontrolörü modelinden, LQR kontrolör çıkarılarak yerine ANFIS konum kontrolör yerleştirilmiştir. Şekil 5.15'teki ANFIS konum kontrolörü kullanılarak oluşturulmuş model verilmiştir. Önceki deneysel ve benzetim çalışmalarında verilen aynı şartlar için benzetim ve deneysel çalışmalar tekrarlanmıştır.



Şekil 5.15. SMSM'nin ANFIS tabanlı konum kontrolü Matlab/SIMULINK modeli

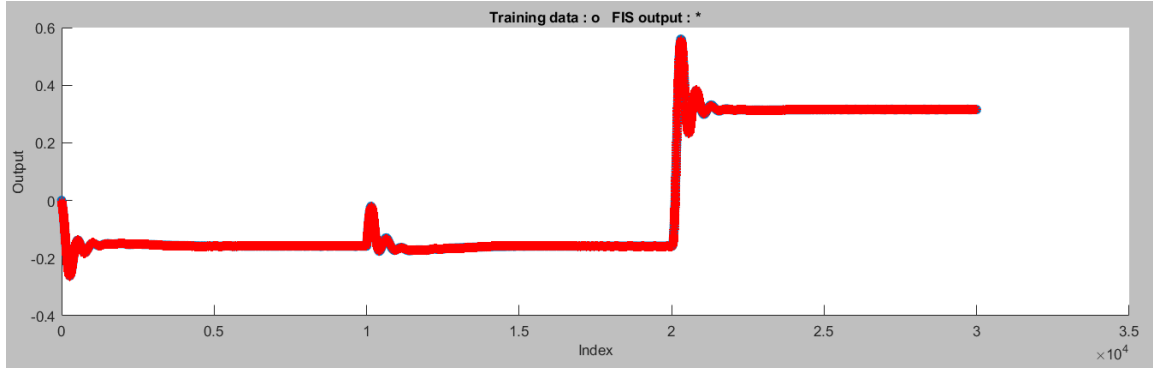
Şekil 5.16’da ANFIS konum kontrolör Matlab/SIMULINK modeli verilmiştir.



Şekil 5.16. ANFIS konum kontrolör Matlab/SIMULINK modeli

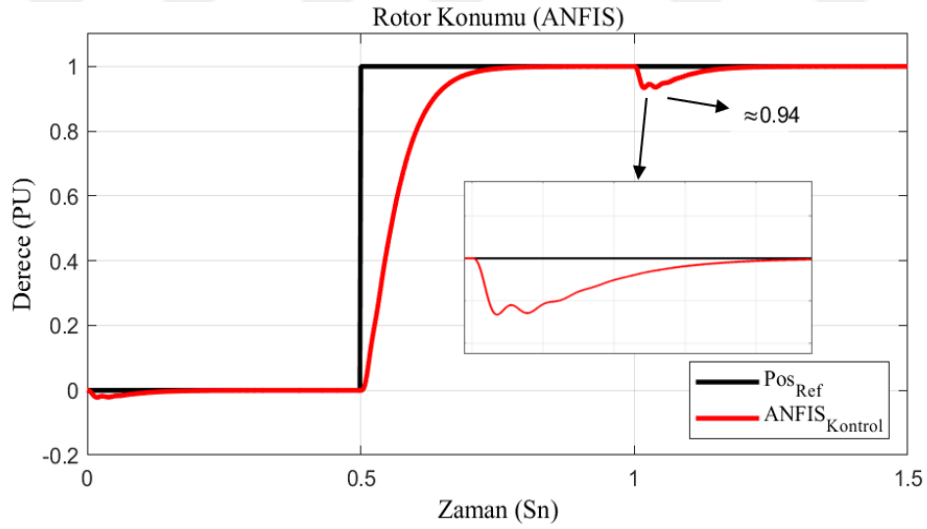
ANFIS kontrolörün eğitimi gerçekleştirildikten sonra NFD araç kutusu vasıtasıyla ağa uygulanan eğitim verilerine göre ağın çıkış sinyalinin hedef sinyali hangi oranda öğrendiğinin testi yapılmıştır

Şekil 5.17’de ağ çıkışı ile hedef çıkış arasındaki bir fark oluşmadığı dolayısıyla ağın hedef çıkışı öğrenmesinin yeterli olduğu belirlenebilir.



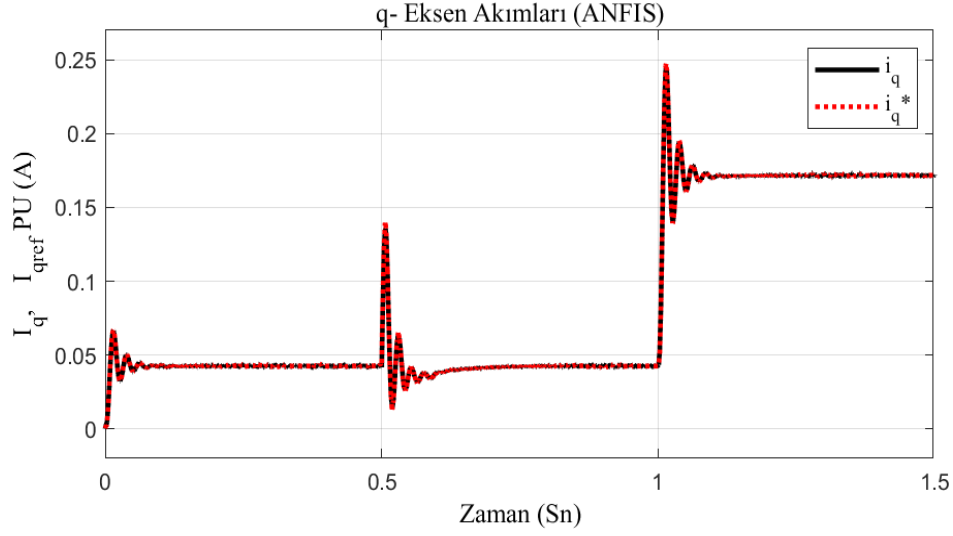
Şekil 5.17. Hedef çıkış ve ANFIS ağ çıkışı

SMSM’nin ANFIS esaslı konum kontrolü referans sinyali takip performansı benzetim çıkış grafiği Şekil 5.18’de verilmiştir. SMSM’nin referans sinyali izleme grafiği incelendiğinde referans konum değiştiğinde motorun referans konum sinyalini başarılı şekilde izlemiştir. 1. sn’de yük torku artırıldığında ise referans konumdan sapma yaklaşık % 6 civarında gerçekleşmiştir.



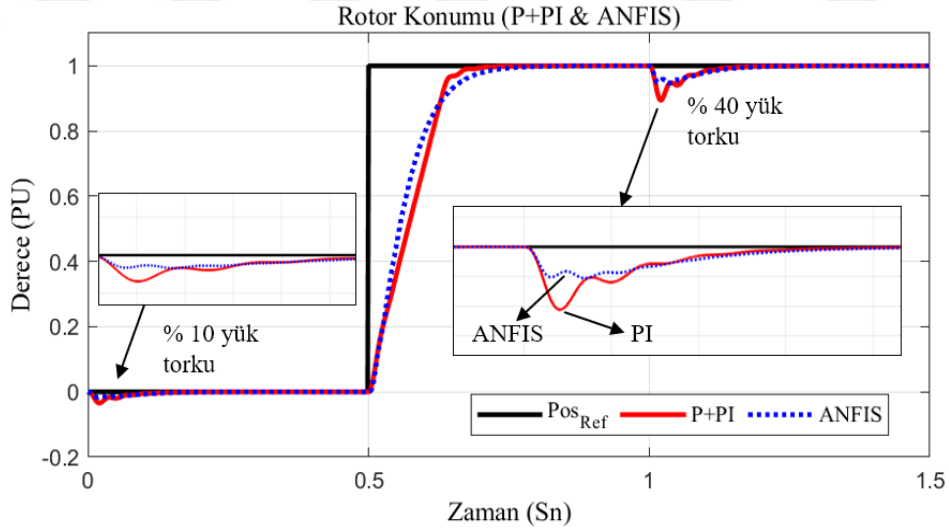
Şekil 5.18. ANFIS esaslı konum kontrolü referans sinyali takip performansı benzetim grafiği

SMSM’nin q eksen akımları çıkış benzetim sinyali Şekil 5.19’daki gibidir.



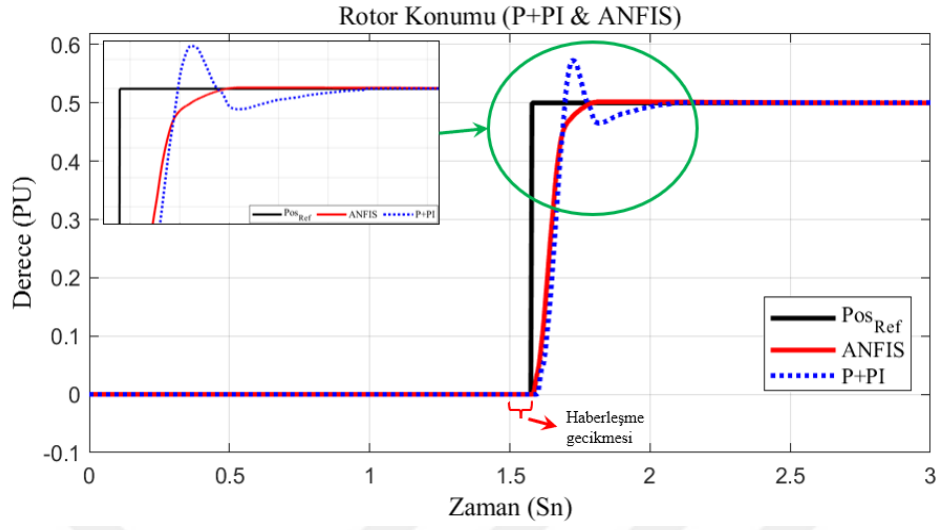
Şekil 5.19. ANFIS esaslı konum kontrolü q eksen akımları benzetim grafiği

Şekil 5.20’de sırasıyla P+PI kontrolör ile ANFIS kontrolörle SMSM’nin referans sinyali izleme performansı benzetim grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde P+PI kontrolöre sahip sistem düşük miktarda bir osilasyon yaparak referans sinyali izlemiştir. ANFIS kontrolörün kullanıldığı yapının yük torkundan daha az etkilendiği ve daha hızlı referans konumu yakaladığı belirlenebilir.



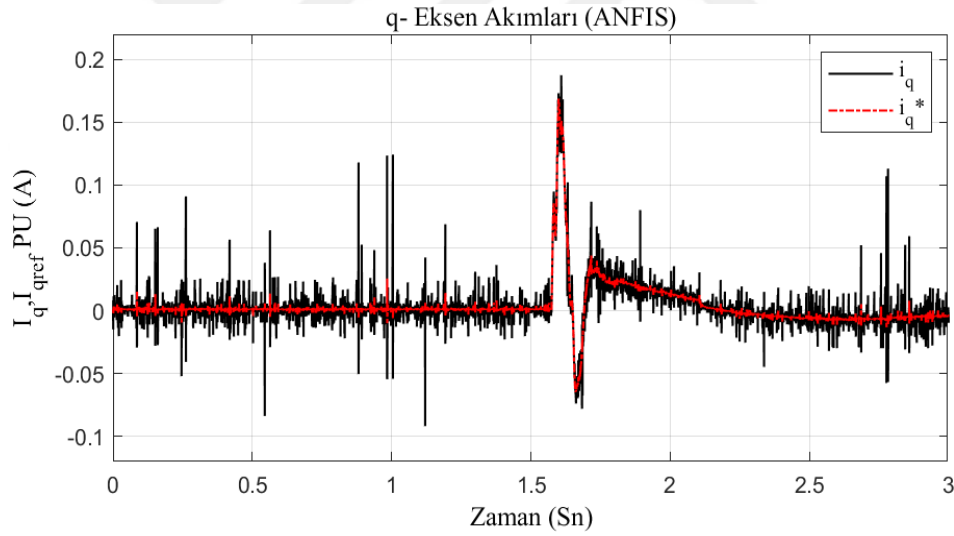
Şekil 5.20. ANFIS ve P+PI esaslı konum kontrolör referans sinyali takip performansı benzetim grafiği

ANFIS tabanlı kontrolör kullanılarak SMSM’nin konum kontrolü benzetimi yapılmış devamında deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.21’de verilen grafikte ANFIS kontrolöre sahip sistemle P+PI kontrolörlü sistemin karşılaştırmalı grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde P+PI tabanlı kontrol sisteminde aşmanın olduğu, ANFIS kontrolörlü sistemin ise herhangi bir aşma yapmadan referans konumu izlediği gözlemlenmiştir.



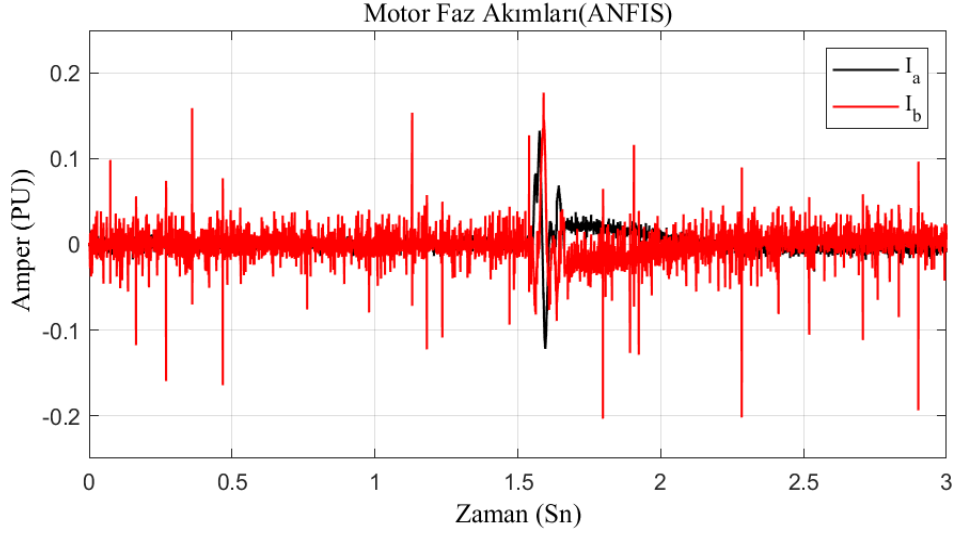
Şekil 5.21. ANFIS konum kontrolör ile referans sinyali takip performansı deneysel grafiği

Şekil 5.22’de verilen ANFIS kontrolörlü yapının q eksen akımları deneysel çıkış grafiği verilmiştir.



Şekil 5.22. ANFIS esaslı konum kontrolörü q eksen akımları deneysel çıkış grafiği

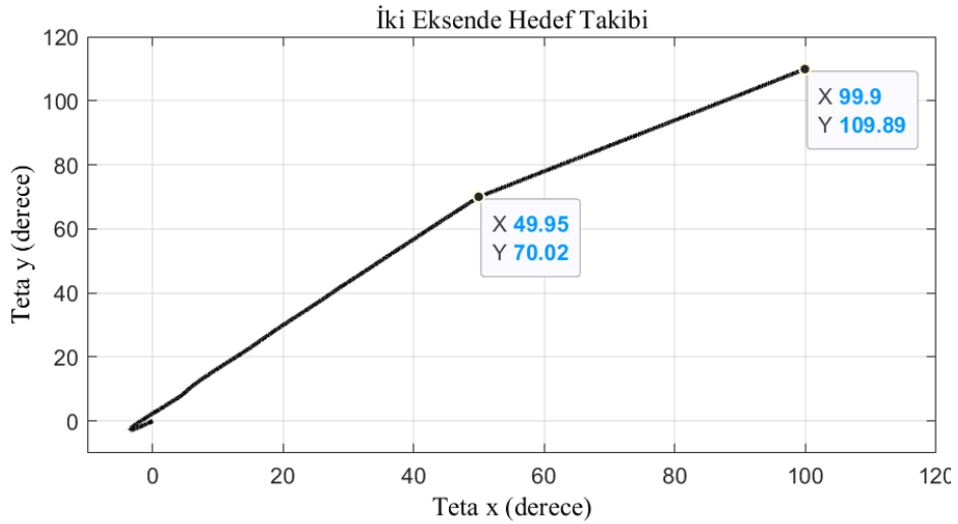
Şekil 5.23’de SMSM’nin ANFIS esaslı konum kontrolörü i_a ve i_b faz akımları deneysel çıkış grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde konum referansı değişiminde motorun çektiği akımlarda yükselme olduğu, motor referans konuma ulaştıktan sonra motor üzerinde eksenel yönde bir yük torku olmadığından motor akımlarının da azaldığı (sıfıra yaklaştığı) belirlenebilir.



Şekil 5.23. ANFIS esaslı konum kontrolörü i_a ve i_b faz akımları deneysel çıkış grafiği

5.4. Nöbetçi Robotun Hedef Takip Performansı

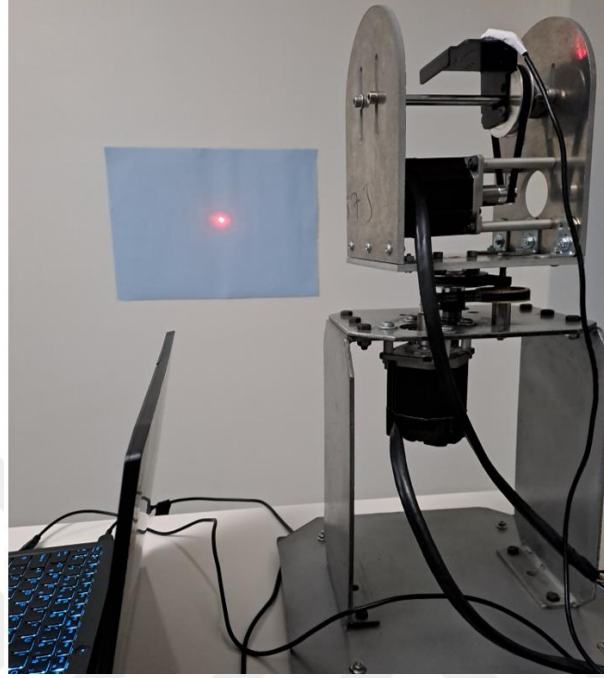
Nöbetçi robot eksen motorlarının aynı anda hedef takibi performansını test etmek için benzetim modelinde aynı anda çalıştırılarak, alt tabla eksen motoru başlangıç referansı 50° , üst tabla eksen motoru için ise 70° olarak uygulanmıştır. 0,5. sn'den sonra alt tabla eksen motoru referansı 100° 'ye, üst tabla eksen motor referansı ise 110° 'ye çıkarılmıştır. Nöbetçi robotun hedef konumu izleme performansı Şekil 5.24'te verilmiştir.



Şekil 5.24. ANFIS konum kontrolörlü nöbetçi robot hedef izleme performansı benzetim grafiği.

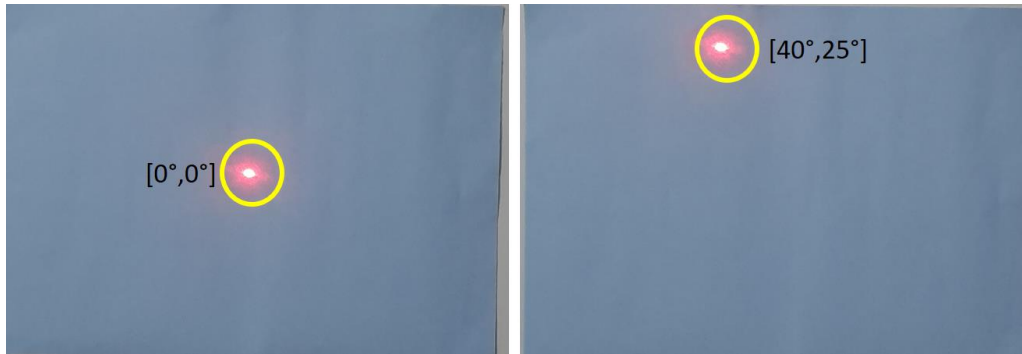
Nöbetçi robotun hedef izleme performansının deneysel olarak gerçekleştirilmesi amacıyla nöbetçi robota bir lazer yerleştirilmiştir. Lazer ile rastgele bir konum işaretlenerek bu konum 0,0 noktası kabul edilmiştir. Sonrasında her iki eksen için işaretleme alanının dışına taşmayacak şekilde alt

tabla 40° 'ye, üst tabla motoru referans konum sinyali ise 25° olacak şekilde konum referansı değiştirilmiştir. Şekil 5.25'teki gibi belirlenen alan içinde lazer işaretleyicinin hareketi sağlanmıştır.



Şekil 5.25. İki eksenli konum kontrolü deney düzeneği

Lazer işaretleyici ile yapılan deneyden elde edilen konum değişimleri Şekil 5.26'da verilmiştir.

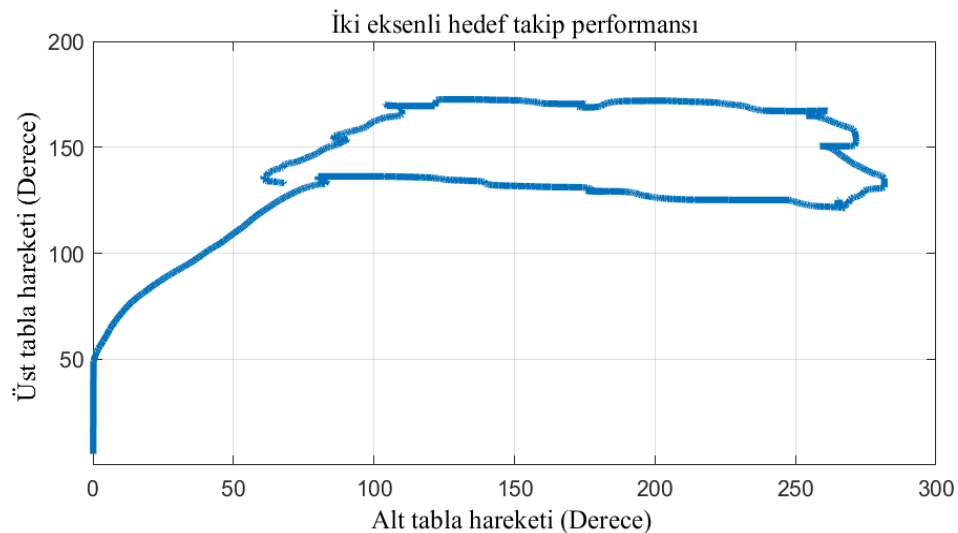


Şekil 5.26. ANFIS kontrolörlü nöbetçi robotun lazer işaretleyicisi konum değişimi deneysel sonucu

Nöbetçi robotun hedef takip performansı deneylerinde manuel olarak verilen referans açılar ile deneyler yapıldıktan sonra, Matlab/SIMULINK OpenCV yüz takip algoritması kullanılarak hedefin otomatik izlenmesi sağlanmıştır. Belli bir yörünge belirlenip o yönlerde hareket edilmiş ve bu hareket kayıt altına alınmıştır. Kaydedilmiş videodaki hareketli hedef konum bilgileri geliştirme kartına gönderilmiş ve nöbetçi robotun görüntüdeki hedefi takip etmesi amaçlanmıştır.

Şekil 5.27’de belli yörünge planı dahilinde hareket eden hedefin hareketinden elde edilen resimler verilmiştir.

Şekil 5.27. Belirli yörüngede hareket eden hedefin konum değişimi



6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada eksenlerinin tahrikinde SMSM kullanan, iki eksenle hedef takibi yapabilen nöbetçi bir robot prototipi tasarlanarak, LQR tabanlı ANFIS kontrolör ile hassas konum kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Deney düzeneğinin mekanik tasarımı için SolidWorks programı kullanılmıştır. Üç boyutlu tasarımı yapılan modelin gerekli mekanik parçaları alt tablası çelik, üst tabla ise alüminyumdan olacak şekilde imal ettirilmiş ve montajı yapılarak robotun şasesi oluşturulmuştur. Motor olarak üç fazlı düşük gerilimli Teknic marka SMSM, SMSM'lerin sürülmesi için ise DRV8301 Booster Pack model üç fazlı sürücü kullanılmıştır. Üç fazlı sürücülerin kontrolü amacıyla TI C2000 Delfino serisi TMS320F28379D model geliştirme kartı tercih edilmiştir. Kullanılan geliştirme kartı motor kontrol algoritmaları için özelleştirilmiş fonksiyonlara sahiptir. Bu da motor kontrolünde avantajlı bir durum sağlamaktadır.

TMS320F28379D geliştirme kartının programlanması için Matlab/SIMULINK 2023a' programı kullanılmıştır. Deneysel çalışmalara yapılmadan önce SMSM'nin alan yönlendirmeli konum kontrolü benzetim ortamında çeşitli kontrolör yapıları için gerçekleştirilmiştir. Devamında Matlab/SIMULINK'te TI C2000 serisi DSP'ler için gömülü yazılım oluşturmak için kullanılan koder destek paketi ile motor kontrol blok seti ile oluşturulmuş modelden C/C++ kodları üretilerek geliştirme kartına yüklenmiştir. Benzetimi yapılan kontrolör yapılarının doğrulanması için deney düzeneği kullanılmıştır.

İlk olarak SMSM'nin nominal parametrelerine göre LQR konum kontrolör tasarımı yapılmış, akım kontrolörleri olarak ise PI kontrolörler kullanılmıştır. Motorun nominal parametrelerine göre tasarlanan LQR kontrolör ile yapılan denemelerde SMSM'nin nominal şartlardaki konum kontrolü iyi performans göstermesine rağmen değişken yük torku ve parametre değişimlerine karşı bu kontrolör yapısının oldukça duyarlı olduğu gözlemlenmiştir. Devamında LQR hız, oransal konum tabanlı bir kontrolör tasarlanarak yük torku ve parametre değişimlerinin etkisinin azaltılması amaçlanmıştır. Bu yaklaşımda sistem çıkışı hız olup sistem Tip 0'dır. Bu kontrolör yapısında yük torkunun etkisi belli oranda azalmış fakat istenen performansı gösterememiştir. Sistemin konum çıkışı için sistem Tip 1 olup Tip 1 sistemler için doğrudan LQR konum kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde bu kontrolör yapısına sahip sistemin yük torku ve parametre değişimlerine karşı daha dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir. Bu kontrolör tasarımlarıyla birlikte motorun yük torkunun bilindiği varsayılarak i_q referans akımına yük torkundan kaynaklanan telafi sinyali eklenerek yapılan denemelerde yük torkundan kaynaklanan bozulmaların büyük oranda minimize edildiği gözlemlenmiştir. Böylece yük torkunu doğru bir şekilde tahmin edebilecek bir gözleyici tasarlanması ile yük torkundan kaynaklanan bozulmaların büyük oranda önüne geçilebileceği belirlenmiştir. Matematiksel model tabanlı yük

torku gözleyiciler tasarlanabileceği gibi, modelden bağımsız yük torku gözleyicilerde tasarlanabilir. Bu çalışmada matematiksel modelden bağımsız ANFIS tabanlı bir yük torku gözleyicisi tasarlanmış ve i_q^* akımı ileri yoluna bu yük torku gözleyici çıkışı olan telafi sinyali eklenerek yük torku kompanzasyonu gerçekleştirilmiştir. Böylece yük torkundan kaynaklanan bozulmalar minimize edilmiştir. Farklı LQR kontrol yapıları karşılaştırıldığında en iyi performansın doğrudan LQR kontrol yapısına sahip sistemden alındığı belirlenmiştir. Bu yüzden ANFIS kontrolör tasarımı yapılırken doğrudan LQR kontrolörlü yapı referans alınmıştır. Doğrudan LQR kontrolörlü benzetim modelinden elde edilen veriler kullanılarak ANFIS'in eğitimi gerçekleştirilmiştir. Üç girişli olarak seçilen ANFIS konum kontrolörüne giriş olarak konum hatasının değişimi ($\Delta\theta e$), motorun konum bilgisi θ ve motor hızı ω ağ çıkışı olarak ise q eksen referans akımı (i_q^*) seçilmiştir. Hedef ile gerçek çıktı arasındaki farkın bir ölçütü olan RMSE değeri 0.000223057 olarak elde edilmiştir. Bu değer modelin hedef çıkışı yüksek doğruluk ile öğrendiğini göstermektedir. ANFIS konum kontrolör ve tork gözleyici ile yapılan benzetim ve deneysel çalışmalar bu kontrol yapısının yük torku ve parametre değişimlerinden en az etkilendiği dolayısıyla dayanıklı bir kontrol sisteminin elde edildiği belirlenmiştir.

SMSM'lerin konum kontrolör tasarımını gerçekleştirildikten sonra nöbetçi robotun hedef izleme performansını değerlendirmek için deneyler yapılmıştır. Bu amaçla eksen motorlarının aynı anda konum referansları değiştirilerek nöbetçi robotun izlediği yol grafiksel olarak elde edilmiştir. Nöbetçi robota yerleştirilen bir lazer işaretleyici ile benzetime benzer senaryo için denemeler yapılmış ve lazer işaretleyicinin hedef referansa yüksek doğrulukla ulaştığı gözlemlenmiştir. Deneyin devamında Matlab/SIMULINK OpenCV eklentisinden yararlanılmıştır. OpenCV yüz takip algoritması kullanılarak, önceden çekilmiş video görüntüsünde, belirli bir hareket planı dahilinde hareket eden hedefin nöbetçi robot tarafından takip edilmesi sağlanmış ve konum bilgisi grafiksel olarak elde edilmiştir. Son olarak gerçekleştirilen deneyde gerçek zamanlı olarak rastgele hareket eden hedefin nöbetçi robot üzerindeki kamera vasıtasıyla algılanması ve nöbetçi robot tarafından hedefin hassas bir şekilde takip edilmesi sağlanmıştır.

ÖNERİLER

Benzetim ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar incelendiğinde tasarımı yapılan nöbetçi robot prototipinin önerilen konum kontrol yöntemleri ile hedef izleme kontrolünü hassas bir şekilde gerçekleştirdiği belirlenmiştir.

Bununla birlikte aşağıdaki öneriler sunulabilir.

Donanımsal olarak;

- Mevcut durumda bilgisayardan kontrol edilen nöbetçi robota kullanımını kolaylaştırmak amacıyla harici bir kontrol paneli eklenebilir.
- Görüntü takibi için bilgisayar yerine tek kart bilgisayar (örn: raspberry pi vs.) kullanılarak bilgisayardan bağımsız hale getirilebilir.
- Derinlik özellikli kamera kullanılarak hedefin mesafe tespiti yapılabilir.

Yazılımsal olarak

- Makine öğrenme algoritmaları kullanılarak hedef tespit ve takibi sağlanabilir.
- Farklı kontrol yöntemleri ile sistemin konum kontrol performansı değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] N. J. Nilsson, *The quest for artificial intelligence: A history of ideas and achievements*. Cambridge University Press, 2011. doi: 10.1017/CBO9780511819346.
- [2] Ç. Elmas, *Yapay zeka uygulamaları*. Ankara: Seçkin Yayıncılık, 2016.
- [3] M. Tekeli, “Askeri Sahada Yapay Zekâ Kullanımının Gelişimi: Etik Ve Hukuki Sorunlar,” Ankara Üniversitesi, 2021.
- [4] D. Directive, “Autonomy in Weapon Systems.” US Department of Defense, 2012.
- [5] J. Thurnher, “The Law That Applies to Autonomous Weapon Systems,” 2013.
- [6] M. Atlıg, “Otonom Sistemlerin Savaş ve Savaş Hukukuna Etkisi,” *Akad. Düşünce Derg.*, no. 6, pp. 3–21, 2022.
- [7] P. Fitzpatrick, “A novel behaviour-based robot architecture and its application to building an autonomous robot sentry,” 1997.
- [8] P. Scharre, *İnsansız Ordular ;Katil Robotlar, Otonom Silahlar ve Makine Savaşları*. Kronik Kitap, 2020.
- [9] M. Verbruggen and V. Boulanin, “Mapping the development of autonomy in weapon systems,” 2017.
- [10] J. Kumagai, “A Robotic Sentry For Korea’s Demilitarized Zone,” *IEEE Spectr.*, vol. 44, no. 3, pp. 16–17, Mar. 2007, doi: 10.1109/mspec.2007.323429.
- [11] “DoDaam Systems.” Accessed: Aug. 24, 2023. [Online]. Available: <http://www.dodaam.com/eng/sub2/menu2.php>
- [12] R. Güreşci, “Uluslararası insancıl hukukun otonom özellikli silah sistemlerine uygulanmasına ilişkin temel sorunlar,” 2022.
- [13] “Sentry Tech Long Distance Stationary Remote Controlled Weapon Station”, Accessed: Aug. 09, 2023. [Online]. Available: www.rafael.co.il
- [14] H. Ahmad, S. M. Ali, U. A. Sheikh, Z. Murtaza, and M. Rizwan, “Design and manufacturing of a low-cost 2-DOF autonomous sentry gun,” in *2016 2nd International Conference on Robotics and Artificial Intelligence (ICRAI)*, IEEE, 2016, pp. 196–201. doi: 10.1109/ICRAI.2016.7791253.
- [15] S. Kuswadi, M. N. Tamara, D. N. HW, and H. W. Dwi Nugroho, “Gun turret automatic weapon control system design and realization,” IEEE, pp. 30–34. doi: 10.1109/ISESD.2016.7886687.
- [16] E. S. Samuel *et al.*, “A Neuro-Fuzzy Based Approach to Object Tracking and Motion Prediction,” *Int. J. Sci. Eng. Appl.*, vol. 6, no. 10, pp. 307–321, 2017, doi: 10.7753/ijsea0610.1003.
- [17] E. A. Z. Hamidi, M. R. Effendi, and F. Asmoro, “Design and Implementation of Model

- Autonomous Sentry Gun Using Image Processing and Motion Tracking,” in *Proceeding of 2019 5th International Conference on Wireless and Telematics, ICWT 2019*, 2019. doi: 10.1109/ICWT47785.2019.8978245.
- [18] J. Iqbal, A. Ul Haq, and S. Wali, “Moving Target Detection and Tracking Algorithms and Hardware System Real-time Implementation”.
- [19] M. S. Rahmat, K. Hudha, A. M. Idris, and N. H. Amer, “Sliding mode control of target tracking system for two degrees of freedom gun turret model,” *Adv. Mil. Technol.*, vol. 11, no. 1, pp. 13–28, Jun. 2016.
- [20] M. K. Anwar, A. Risnumawan, A. Darmawan, M. N. Tamara, and D. S. Purnomo, “Deep multilayer network for automatic targeting system of gun turret,” in *Proceedings IES-ETA 2017 - International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2017, pp. 134–139. doi: 10.1109/ELECSYM.2017.8240392.
- [21] C. Xia, N. Liu, Z. Zhou, Y. Yan, and T. Shi, “Steady-State Performance Improvement for LQR-Based PMSM Drives,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 12, pp. 10622–10632, Dec. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2018.2803760.
- [22] B. Guo, S. Bacha, and M. Alamir, “A review on ADRC based PMSM control designs,” in *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE, Oct. 2017, pp. 1747–1753. doi: 10.1109/IECON.2017.8216296.
- [23] G. Zhu, X. Wu, Q. Yan, and J. Cai, “Robust Learning Control for Tank Gun Control Servo Systems under Alignment Condition,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 145524–145531, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2938814.
- [24] S. Khorashadizadeh and M. Sadeghijaleh, “Adaptive fuzzy tracking control of robot manipulators actuated by permanent magnet synchronous motors,” *Comput. Electr. Eng.*, vol. 72, pp. 100–111, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.compeleceng.2018.09.010.
- [25] G. Qiang, H. Junfeng, and P. Wei, “PMSM servo control system design based on fuzzy PID,” *Proc. - 2017 2nd Int. Conf. Cybern. Robot. Control. CRC 2017*, vol. 2018-January, pp. 85–88, Mar. 2018, doi: 10.1109/CRC.2017.28.
- [26] Z. Ziyue and W. Zheng, “Robust H_∞ Position servo control for PMSM,” *Proc. 2022 IEEE 5th Int. Electr. Energy Conf. CIEEC 2022*, pp. 3996–4000, 2022, doi: 10.1109/CIEEC54735.2022.9846261.
- [27] F. F. M. El-Sousy, “Intelligent optimal recurrent wavelet elman neural network control system for permanent-magnet synchronous motor servo drive,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 9, no. 4, pp. 1986–2003, 2013, doi: 10.1109/TII.2012.2230638.
- [28] Q. Yang, H. Yu, X. Meng, and Y. Shang, “Neural network dynamic surface position control of n-joint robot driven by PMSM with unknown load observer,” *IET Control Theory Appl.*,

- vol. 16, no. 12, pp. 1208–1226, Aug. 2022, doi: 10.1049/cth2.12297.
- [29] T. H. Nguyen, T. T. Nguyen, K. Minh Le, H. N. Tran, and J. W. Jeon, “An Adaptive Backstepping Sliding-Mode Control for Improving Position Tracking of a Permanent-Magnet Synchronous Motor With a Nonlinear Disturbance Observer,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 19173–19185, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3248604.
 - [30] V. Q. Leu, H. H. Choi, and J.-W. Jung, “Fuzzy Sliding Mode Speed Controller for PM Synchronous Motors With a Load Torque Observer,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 3, pp. 1530–1539, Mar. 2012, doi: 10.1109/TPEL.2011.2161488.
 - [31] L. Qi and H. Shi, “Adaptive position tracking control of permanent magnet synchronous motor based on RBF fast terminal sliding mode control,” *Neurocomputing*, vol. 115, pp. 23–30, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.neucom.2012.11.018.
 - [32] Y. Zhang, K. Liu, J. Zhou, P. Sang, H. Wu, and Y. Chen, “Linear Extended State Observer based Anti-Interference Robust Position Tracking Control for Two-Inertia Systems with Uncertain Load Disturbance,” *2022 Int. Conf. Electr. Mach. Syst. ICEMS 2022*, 2022, doi: 10.1109/ICEMS56177.2022.9982939.
 - [33] I. Kuvvetli, A. Tap, and L. T. Ergene, “PI Based ANFIS Controller Design for PMSM Drives,” in *2021 13th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ELECO 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 383–387. doi: 10.23919/ELECO54474.2021.9677784.
 - [34] M. Jain, M. Singh, A. Chandra, and S. S. Williamson, “Sensorless control of permanent magnet synchronous motor using ANFIS based MRAS,” in *2011 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2011*, 2011, pp. 599–606. doi: 10.1109/IEMDC.2011.5994877.
 - [35] T. Pajchrowski and K. Zawirski, “Robust speed and position control based on neural and fuzzy techniques,” *2007 Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE*, 2007, doi: 10.1109/EPE.2007.4417557.
 - [36] Y. Gong and Y. Qu, “Adaptive inverse control based on MPSO-ANFIS for permanent magnet synchronous motor servo system,” in *Proceedings - 2011 3rd International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, IHMSC 2011*, 2011, pp. 173–176. doi: 10.1109/IHMSC.2011.48.
 - [37] Z. Zedong, L. Yongdong, M. Fadel, and X. Xi, “A Rotor Speed and Load Torque Observer for PMSM Based on Extended Kalman Filter,” in *2006 IEEE International Conference on Industrial Technology*, IEEE, 2006, pp. 233–238. doi: 10.1109/ICIT.2006.372295.
 - [38] Y. Liu, B. Song, X. Zhou, Y. Gao, and T. Chen, “An Adaptive Torque Observer Based on Fuzzy Inference for Flexible Joint Application,” *Machines*, vol. 11, no. 8, p. 794, Aug. 2023, doi: 10.3390/machines11080794.

- [39] Z. Ping, T. Wang, Y. Huang, H. Wang, J.-G. Lu, and Y. Li, "Internal Model Control of PMSM Position Servo System: Theory and Experimental Results," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 16, no. 4, pp. 2202–2211, Apr. 2020, doi: 10.1109/TII.2019.2935248.
- [40] W. Lu *et al.*, "A New Load Torque Identification Sliding Mode Observer for Permanent Magnet Synchronous Machine Drive System," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 8, pp. 7852–7862, Aug. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2881217.
- [41] J. Ko and B. Han, "Precision Position Control of PMSM Using Neural Network Disturbance Observer on Forced Nominal Plant," in *2006 IEEE International Conference on Mechatronics*, IEEE, Jul. 2006, pp. 316–320. doi: 10.1109/ICMECH.2006.252546.
- [42] Y. Zhao, Z. Deng, and S. Ge, "Position Sensorless Fuzzy Active Disturbance Rejection Control of PMSM Based on Model Predictive Control," in *2023 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, IEEE, May 2023, pp. 1–7. doi: 10.1109/IEMDC55163.2023.10239001.
- [43] C. Zhong, L. Wang, and C. Xu, "Fuzzy PI λ Position Control Method for Permanent Magnet Synchronous," no. November, 2019.
- [44] A. Williams, "Defining autonomy in systems: Challenges and solutions," *Issues Def. Policymakers*, vol. 27, 2015.
- [45] U. N. I. for D. Research, *The Weaponization of Increasingly Autonomous Technologies: Considering how Meaningful Human Control Might Move the Discussion Forward*. UNIDIR, 2014.
- [46] J. M. Anderson *et al.*, "Autonomous systems: Issues for defence policymakers," *Nato Supreme Allied Command Transform. Norfolk Va Norfolk*, 2015.
- [47] P. D. Scharre, "The opportunity and challenge of autonomous systems," *Auton. Syst. Issues Def. policymakers*, pp. 3–26, 2015.
- [48] M. Verbruggen, "Mapping the development of autonomy in weapon systems Article 36 reviews and Emerging Technologies View project Mapping autonomy in weapon systems View project," Nov. 2017.
- [49] A. Özer, "Savaşlarda Üçüncü Devrim Otonom Silah Sistemleri ve İnsancıl Hukuk," 2019.
- [50] P. Scharre and M. C. Horowitz, "Autonomy in Weapon Systems," *Cent. a New Am. Secur. Work. Pap.*, 2015.
- [51] N. Mohan, *Advanced electric drives: analysis, control, and modeling using MATLAB/Simulink*. John Wiley & sons, 2014.
- [52] H. Abu-Rub, A. Iqbal, and J. Guzinski, *High performance control of AC drives with Matlab/Simulink*. John Wiley & Sons, 2021.
- [53] S. J. Chapman, "Elektrik Makinelerinin Temelleri," *Çağlayan Kitapevi*, 2007.
- [54] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power electronics: converters*,

- applications, and design.* John Wiley & Sons, 2003.
- [55] M. K. Sarioğlu, *Elektrik makinalarının temelleri Cilt III: Asenkron makinalar.* Çağlayan, 1983.
- [56] M. H. Rashid, *Güç elektroniği: yarıiletken elemanlar, devreler ve uygulamaları.* Nobel Akademik Yayıncılık, 2015.
- [57] H. Çelik, “Sabit mıknatıslı senkron motorun DSP tabanlı doğrudan moment kontrolü/Direct torque control based on DSP of permanent magnet synchronous motor,” 2012.
- [58] M. N. Uddin, T. S. Radwan, M. A. Rahman, and G. H. George, “Fuzzy logic based position control of permanent magnet synchronous motor,” in *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2000, pp. 93–97. doi: 10.1109/ccece.2000.849677.
- [59] E. Sariyildiz and K. Ohnishi, “Stability and robustness of disturbance-observer-based motion control systems,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 1, pp. 414–422, Jan. 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2327009.
- [60] “Brushless DC & AC servo motors, drives and controls.” Accessed: Dec. 28, 2023. [Online]. Available: <https://teknik.com/>
- [61] H. Y. Kürüm and A. Erhan, “Sabit mıknatıslı senkron motorun parametre tespiti,” *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*, vol. 30, no. 1, pp. 183–191, 2018.
- [62] P. Pillay and R. Krishnan, “Modeling Of Permanent Magnet Motor Drives,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 35, no. 4, pp. 537–541, 1988, doi: 10.1109/41.9176.
- [63] M. K. Sarioğlu, M. Gökaşan, and S. Boğosyan, *Asenkron makinalar ve kontrolü.* Birsan Yayınevi., 2003.
- [64] P. Pillay and R. Krishnan, “Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives, Part I: The Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 25, no. 2, pp. 265–273, 1989, doi: 10.1109/28.25541.
- [65] L. Yu, C. Wang, H. Shi, R. Xin, and L. Wang, “Simulation of PMSM field-oriented control based on SVPWM,” in *Proceedings of the 29th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2017*, 2017, pp. 7407–7411. doi: 10.1109/CCDC.2017.7978524.
- [66] Cui Bowen, Zhou Jihua, and Ren Zhang, “Modeling and simulation of permanent magnet synchronous motor drives,” in *ICEMS’2001. Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems (IEEE Cat. No.01EX501)*, Int. Acad. Publishers, 2006, pp. 905–908. doi: 10.1109/ICEMS.2001.971825.
- [67] B. K. Bose, *Modern power electronics & AC drives.* Prentice hall, 2002.
- [68] H. Bodur, *Güç elektroniği.* Birsan Yayınevi, 2012.
- [69] C. H. H. Limei Zhao, “A DSP-based super high-speed PMSM controller development and optimization,” in *3rd IEEE Signal Processing Education Workshop. 2004 IEEE 11th Digital Signal Processing Workshop*, 2004., IEEE, 2004, pp. 187–190. doi:

10.1109/DSPWS.2004.1437939.

- [70] D. Swierczynski, M. P. Kazmierkowski, and F. Blaabjerg, “DSP based direct torque control of permanent magnet synchronous motor (PMSM) using space vector modulation (DTC-SVM),” in *Industrial Electronics, 2002. ISIE 2002. Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on*, IEEE, 2002, pp. 723–727 vol.3. doi: 10.1109/ISIE.2002.1025821.
- [71] E. Öztemel, “Yapay sinir ağları,” *PapatyaYayincilik, Istanbul*, 2003.
- [72] A. Albostan and M. Gökbulut, “Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların Katlı Yapay Sinir Ağları İle Modellemesi Ve Uyarlamalı Denetim,” *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimar. Fakültesi Derg.*, vol. 11, no. 2, 1996.
- [73] M. T. Hagan, H. B. Demuth, and M. Beale, “Neural network design. PWS,” *Publ. Co., Bost.*, 1996.
- [74] V. V. Nابیev, *Yapay zeka: problemler-yöntemler-algoritmalar*. Seçkin Yayıncılık, 2005.
- [75] J. A. Goguen, “LA Zadeh. Fuzzy sets. Information and control, vol. 8 (1965), pp. 338–353.- LA Zadeh. Similarity relations and fuzzy orderings. Information sciences, vol. 3 (1971), pp. 177–200.,” *J. Symb. Log.*, vol. 38, no. 4, pp. 656–657, 1973.
- [76] E. O. Voit, “Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller-part i,” *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.*, vol. 20, no. 2, pp. 404–418, 1990.
- [77] W. Zeng, Y. Zhao, and Q. Yin, “Sugeno fuzzy inference algorithm and its application in epicentral intensity prediction,” *Appl. Math. Model.*, vol. 40, no. 13–14, pp. 6501–6508, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.apm.2016.01.065.
- [78] J. S. R. Jang, “ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System,” *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. 23, no. 3, pp. 665–685, 1993, doi: 10.1109/21.256541.
- [79] A. Abraham, “Neuro fuzzy systems: State-of-the-art modeling techniques,” in *Connectionist Models of Neurons, Learning Processes, and Artificial Intelligence: 6th International Work-Conference on Artificial and Natural Neural Networks, IWANN 2001 Granada, Spain, June 13–15, 2001 Proceedings, Part 1* 6, Springer, 2001, pp. 269–276.
- [80] J. S. R. Jang, “Input selection for ANFIS learning,” *IEEE Int. Conf. Fuzzy Syst.*, vol. 2, pp. 1493–1499, 1996, doi: 10.1109/FUZZY.1996.552396.
- [81] “LVSERVOMTR Evaluation board | TI.com.” Accessed: Dec. 11, 2023. [Online]. Available: <https://www.ti.com/tool/LVSERVOMTR>
- [82] A. Kirubakaran, S. Jain, and R. K. Nema, “DSP-Controlled Power Electronic Interface for Fuel-Cell-Based Distributed Generation,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 12, pp. 3853–3864, Dec. 2011, doi: 10.1109/TPEL.2011.2138162.
- [83] C. Morkoc, Y. Onal, and M. Kesler, “DSP based embedded code generation for PMSM using sliding mode controller,” in *2014 16th International Power Electronics and Motion*

- Control Conference and Exposition*, IEEE, Sep. 2014, pp. 472–476. doi: 10.1109/EPEPEMC.2014.6980537.
- [84] Y. S. Kung and P. G. Huang, “High performance position controller for PMSM drives based on TMS320F2812 DSP,” *Proc. IEEE Int. Conf. Control Appl.*, vol. 1, pp. 290–295, 2004, doi: 10.1109/CCA.2004.1387226.
- [85] A. Y. E. Lesan, M. L. Doumbia, and P. Sicard, “DSP-based sinusoidal PWM signal generation algorithm for three phase inverters,” in *2009 IEEE Electrical Power and Energy Conference, EPEC 2009*, IEEE, Oct. 2009, pp. 1–6. doi: 10.1109/EPEC.2009.5420781.
- [86] “LAUNCHXL-F28379D Development kit | TI.com.” Accessed: Sep. 25, 2023. [Online]. Available: <https://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28379D>
- [87] M. Rossi, N. Toscani, M. Mauri, and F. C. Dezza, *Introduction to Microcontroller Programming for Power Electronics Control Applications: Coding with MATLAB® and Simulink®*. CRC Press, 2021.
- [88] R. Duma, P. Dobra, M. Abrudean, and M. Dobra, “Rapid prototyping of control systems using embedded target for TI C2000 DSP,” *2007 Mediterr. Conf. Control Autom. MED*, 2007, doi: 10.1109/MED.2007.4433860.
- [89] V. G. Mangali, S. K. P, V. K. Awaar, and P. Jugge, “DSP based Voltage Source Inverter for an application of Induction Motor control,” *E3S Web Conf.*, vol. 184, p. 01057, Aug. 2020, doi: 10.1051/e3sconf/202018401057.
- [90] Q. Cheng and L. Yuan, “Vector Control of an Induction Motor based on a DSP,” 2011.
- [91] “E6C2-C / E6C3-C | OMRON, Türkiye.” Accessed: Jan. 08, 2024. [Online]. Available: <https://industrial.omron.com.tr/tr/products/e6c2-c-e6c3-c>
- [92] “BOOSTXL-DRV8301 Evaluation board | TI.com.” Accessed: Jan. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.ti.com/tool/BOOSTXL-DRV8301>
- [93] K. Ogata *et al.*, *Modern control engineering fifth edition*. 2010.
- [94] W. J. Xu, “Permanent magnet synchronous motor with linear quadratic speed controller,” in *Energy Procedia*, 2012, pp. 364–369. doi: 10.1016/j.egypro.2011.12.943.
- [95] R. Molavi and D. A. Khaburi, “Optimal Control Strategies for Speed Control of Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives,” *Int. J. Comput. Electr. Autom. Control Inf. Eng. Vol2*, vol. 2, no. 8, pp. 428–432, 2008.
- [96] B. Coşkun and M. Gökbulut, “SMSM’ nin LQR ve Tork Gözleyici Tabanlı Konum Kontrolü,” in *International Ankara Congress On Multidisciplinary Studies-VI*, 2023, pp. 434–445.
- [97] T. Tarczewski and L. M. Grzesiak, “Application of artificial bee colony algorithm to auto-tuning of linear-quadratic regulator for PMSM position control,” *Prz. Elektrotechniczny (Electical Rev.)*, vol. 92, no. 6, pp. 57–62, 2016.

- [98] S. K. Kommuri, S. Han, and S. Lee, "External Torque Estimation Using Higher Order Sliding-Mode Observer for Robot Manipulators," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 27, no. 1, pp. 513–523, Feb. 2022, doi: 10.1109/TMECH.2021.3067443.
- [99] J. Yang, W.-H. Chen, S. Li, L. Guo, and Y. Yan, "Disturbance/Uncertainty Estimation and Attenuation Techniques in PMSM Drives—A Survey," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 4, pp. 3273–3285, Apr. 2017, doi: 10.1109/TIE.2016.2583412.
- [100] T. Ding, S. Jin, P. Sun, and B. Wang, "Design of Torque Observer Based on Improved Elman Neural Network for Permanent Magnet Synchronous Motor," in *2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*, IEEE, May 2023, pp. 40–43. doi: 10.1109/CIEEC58067.2023.10167288.
- [101] J. Gil, S. You, Y. Lee, and W. Kim, "Nonlinear sliding mode controller using disturbance observer for permanent magnet synchronous motors under disturbance," *Expert Syst. Appl.*, vol. 214, p. 119085, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.eswa.2022.119085.
- [102] M. Sreejeth and M. Singh, "Improved ANFIS based MRAC observer for sensorless control of PMSM," *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 42, no. 2, pp. 1061–1073, 2022.
- [103] L. S. Alandkar and S. R. Gengaje, "Study of Object Detection Implementation using Matlab," *JRET Int. J. Res. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 08, pp. 109–114, 2016.
- [104] G. Chandan, A. Jain, H. Jain, and Mohana, "Real Time Object Detection and Tracking Using Deep Learning and OpenCV," in *2018 International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, 2018, pp. 1305–1308. doi: 10.1109/ICIRCA.2018.8597266.
- [105] "What Is MATLAB OpenCV? - MATLAB & Simulink." Accessed: Dec. 28, 2023. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/discovery/matlab-opencv.html>
- [106] "OpenCV - Open Computer Vision Library." Accessed: Dec. 28, 2023. [Online]. Available: <https://opencv.org/>

ÖZGEÇMİŞ

Bilal COŞKUN

Category	Value
Category 1	Value 1
Category 2	Value 2
Category 3	Value 3
Category 4	Value 4
Category 5	Value 5
Category 6	Value 6
Category 7	Value 7

[REDACTED] | [REDACTED]
[REDACTED] | [REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED] [REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]

[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]

[REDACTED] [REDACTED]

- [REDACTED]
- [REDACTED]

[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]

AKADEMİK FAALİYETLER

Bildiriler:

1. B.Coşkun., M.Gökbulut,“SMSM’nin LQR ve Tork Gözleyici Tabanlı Konum Kontrolü,” in *International Ankara Congress On Multidisciplinary Studies-VI*, 2023, pp. 434–445
2. B.Coşkun, M.Gökbulut, “SMSM’nin ANFIS Tork Gözleyici ile LQR Tabanlı Konum Kontrolü,” in *V. International Cappadocia Scientific Research Congress*, 2023,pp.1368-1379
3. B.Coşkun, M.Gökbulut,“Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun Dijital Sinyal Kontrolör Tabanlı Açık Çevrim Hız Kontrolü in *Hodja Akhmet Yassawi 5th. International Conference on Scientific Research Congress*, 2021, pp. 273–282.