



T.C.

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**YAPAY SİNİR AĞI İLE MODELLENMİŞ BULANIK MANTIK
DENETLEYİCİ TABANLI SSM KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ertuğrul YILDIRAY

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Serhat CAN

TOKAT- 2022

ETİK SÖZLEŞME



JÜRİ KABUL VE ONAY



ÖZET

YAPAY SİNİR AĞI İLE MODELLENMİŞ BULANIK MANTIK DENETLEYİCİ TABANLI SMSM KONTROLÜ

YILDIRAY Ertuğrul

Yüksek Lisans, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Serhat Can

Aralık 2022, xiii + 79 sayfa

Sabit Mıknatıslı Senkron Motor (SMSM) mıknatıs teknolojisindeki yenilerle beraber daha düşük maliyetlerle üretilebilir duruma gelmiş ve düşük enerji tüketimi nedeniyle de bir çok endüstriyel uygulamada yaygın kullanılabilir hale gelmiştir. SMSM'nin kullanımının yaygınlaşması yüksek seviyeli doğruluğa sahip kontrol performansı ihtiyacını da beraberinde getirmiştir. Modern kontrol yöntemlerinin geleneksel kontrol yöntemlerine göre daha etkili bir kontrol performansı sergilemesi modern kontrol yöntemlerinin kullanılmasını yaygınlaştırmış modern kontrol yöntemleri üzerinde yapılan çalışmalar yoğunluk kazanmıştır. Modern kontrol yöntemlerinden olan Bulanık Mantık Denetleyici (BMD) insan düşünce yapısında benzerliği ve sistem tasarımcısının uzmanlığını kontrol sistemine daha etkili bir şekilde yansıtabilmesine olanak sağlayan etkili bir kontrol yöntemidir. BMD etkili bir kontrol performansı sunmasına rağmen yapısının karmaşıklığı ve içerdiği yoğun matematiksel işlemlerden dolayı tepki süresi yavaş olabilmektedir. Yapay Sinir Ağları (YSA) sistem modelleme için oldukça uygun bir yöntemdir ve paralel işlem yapabilme özelliği sayesinde oldukça hızlı tepki süresine sahiptirler. Bu tez çalışmasında etkili bir kontrol performansına sahip olan BMD'nin YSA ile modellenerek daha hızlı bir tepki süresine sahip bir YSA modelinin oluşturulması ve elde edilen modelin SMSM'nin Alan Yönlendirmeli Kontrolü (AYK) üzerinde uygulanması amaçlanmıştır. BMD'nin giriş ve çıkışlarından alınan verilerle YSA'nın eğitiminde kullanılacak bir veri seti oluşturulmuştur. Oluşturan veri setleri ile eğitilen YSA modeli BMD'yi oldukça yüksek bir doğrulukla modellemiştir ve aynı girişlere karşılık çıkışında BMD ile aynı çıkışı üretmiştir. SMSM tasarımı ve AYK kontrol için gerekli birimler MATLAB programının Simulink eklentisinde tasarlanmıştır. BMD MATLAB programının Fuzzy Logic Toolbox eklentisinde tasarlanmış ve YSA'da Neural Network Toolbox eklentisinde tasarlanarak Simulink ortamına aktarılarak simülasyon çalışmalarında performansları karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçlarında BMD'nin geleneksel kontrol yöntemi olan Oransal-İntegral (PI) kontrolden daha başarılı bir kontrol performansı sergilediği görülmüştür. YSA ile oluşturulan BMD modelinin ise BMD'den daha hızlı tepki süresine sahip olduğu görülmüştür. Önerilen bu yöntem daha etkili ve yüksek hızlı bir kontrol performansı istenen SMSM kontrolü için kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Sabit Mıknatıslı Senkron Motor, Bulanık Mantık Denetleyici, Yapay Sinir Ağları, Alan Yönlendirmeli Kontrol

ABSTRACT

PMSM CONTROL BASED ON FUZZY LOGIC CONTROLLER MODELLED WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

YILDIRAY Ertuğrul

Master's Thesis, Electrical-Electronic Engineering

Advisor: Assit. Prof. Dr. Mehmet Serhat Can

December 2022, xiii + 79 pages

The Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) has been produced at lower costs with the innovations in magnet technology and has become widely used in many industrial applications due to its low energy consumption. The widespread use of PMSM has brought along the need for control performance with high level of accuracy. The fact that modern control methods exhibit a more effective control performance than traditional control methods has made the use of modern control methods widespread and studies on modern control methods have intensified. Fuzzy Logic Controller (FLC), which is one of the modern control methods, is an effective control method that allows the system designer to reflect the similarity in human thought structure and the expertise of the system designer to the control system more effectively. Although FLC offers an effective control performance, its response time can be slow due to the complexity of its structure and the intensive mathematical operations it contains. Artificial Neural Networks (ANN) is a very suitable method for system modelling and has a very fast response time thanks to its parallel processing capability. In this thesis, it is aimed to create an ANN model with a faster response time by modelling the FLC, which has an effective control performance, with ANN and to apply the obtained model on the Field Oriented Control (FOC) of PMSM. A data set to be used in the training of the ANN was created with the data taken from the inputs and outputs of the FLC. The ANN model trained with the generated data sets modelled the BMD with a very high accuracy and produced the same output as the FLC for the same inputs. The units required for the PMSM design and the FOC control were designed in the Simulink plug-in of the MATLAB programme. The FLC was designed in the Fuzzy Logic Toolbox plugin of MATLAB and the ANN was designed in the Neural Network Toolbox plugin of MATLAB and transferred to Simulink environment and their performances were compared in simulation studies. In the simulation results, it was observed that FLC exhibited a more successful control performance than the traditional control method, Proportional-Integral (PI) control. It is also observed that the FLC model created with ANN has a faster response time than FLC. This proposed method can be used for PMSM control where a more effective and high speed control performance is required.

Keywords: Permanent Magnet Synchronous Motor, Fuzzy Logic Controller, Artificial Neural Networks, Field Oriented Control

TEŞEKKÜR

Tez alıőmamın baőlangıcından sonuna kadar her aşamasında bilgi, deneyim ve emekleri ile bana yardımcı olan ve destekleyen değerli danıőmanım Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Serhat CAN hocama ve bütün bölüm hocalarıma sonsuz kez teşekkür ederim. Ayrıca őimdiye kadar beni hep destekleyen kıymetli aileme de teőekkürü borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

ETİK SÖZLEŞME.....	i
JÜRİ KABUL VE ONAY	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	4
3. KURAMSAL TEMELLER.....	8
3.1. Sabit Mıknatıslı Senkron Motor.....	8
3.1.1. Sabit mıknatıslı motorlarda kullanılan mıknatıs malzemeler	8
3.1.2. Mıknatısların manyetik karakteristikleri	8
3.1.3.Mıknatıslar Üzerinde Sıcaklığın Etkileri.....	9
3.1.4.Sabit mıknatısların sınıflandırılması ve özellikleri.....	10
3.1.5. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların Sınıflandırılması.....	12
3.1.6. Sabit mıknatıslı senkron motorun yapısı	13
3.1.7. Sabit mıknatıslı senkron motorun avantaj ve dezavantajları.....	16
3.1.8. Sabit mıknatıslı senkron motorun kullanım alanları	17
3.2. Bulanık Mantık Denetleyiciler	18
3.2.1. Bulanık mantık.....	18
3.2.2. Bulanıklık kavramı	18
3.2.3. Bulanık kümeler.....	19
3.2.4. Bulanık Kümelerdeki Temel İşlemler.....	21
3.2.5. Üyelik Fonksiyonları	22
3.2.6. Bulanıklaştırma	25
3.2.7. Kural tabanı.....	26
3.2.8. Bulanık Çıkarım (Bulanık Karar Verme)	27
3.2.9. Durulaştırma	31
3.2.10. Bulanık Mantık Denetleyici Avantajları ve Dezavantajları.....	34
3.3. Yapay Sinir Ağları	35
3.3.1. Aktivasyon Fonksiyonları.....	38
3.3.2. Yapay Sinir Ağlarının Sınıflandırılması	39

3.3.3.	Yapay Sinir Ağlarının Avantaj ve Dezavantajları	42
3.4.	Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Alan Yönlendirmeli Kontrolü	42
3.4.1.	Eksen Dönüşümleri	44
3.4.2.	SMSM dq model	46
3.4.3.	SMSM abc model	48
3.4.4.	Eviriciler ve DGM Teknikleri	49
4.	MATERYAL VE YÖNTEM	54
4.1.	Matlab/Simulink	54
4.1.1.	SMSM AYK Modeli MATLAB/SİMULİNK Benzetimi	54
4.2.	Bulanık Mantık Denetleyici Tasarımı	59
4.3.	BMD'nin YSA ile Modellenmesi	62
5.	BULGULAR VE TARTIŞMA	66
6.	SONUÇ	74
7.	KAYNAKÇA	75
8.	ÖZGEÇMİŞ	79

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler	Açıklamalar
L_q	q eksen endüktansı
L_d	d eksen endüktansı
$\mu_A(x)$	Üyelik Derecesi
$\alpha - \beta$	Alfa-Beta Eksen Takımı
$d - q$	d - q Eksen Takımı
θ_r	Rotor Pozisyonu
T_e	Elektriksel Tork
p	Kutup Sayısı
λ_m	Mıknatıslanma Akısı
i_d	d eksen akımı
i_q	q eksen akımı
R_s	Stator Sargı Direnci
v_d	d eksen gerilimi
v_q	q eksen gerilimi
λ_d	d eksen akısı
λ_q	q eksen akısı
ω_r	Rotor Hızı
T_L	Yük Momenti
J	Atalet Momenti
B	Sürtünme Katsayısı
i_a	a fazı akımı
i_b	b fazı akımı
i_c	c fazı akımı
λ_a	a fazı akısı
λ_b	b fazı akısı
λ_c	c fazı akısı

L_s	Toplam Faz Sargısı Endüktansı
E_a	a fazı zıt emk'si
E_b	b fazı zıt emk'si
E_c	c fazı zıt emk'si
v_{Ref}	Referans Vektörün Genliği
T_s	Evirici Anahtarlama Periyodunun Yarısı

Kısaltmalar

Açıklamalar

AC	Alternatif Akım
Al-Ni-Co	Alüminyum-Nikel-Kobalt
AYK	Alan Yönlendirmeli Kontrol
BHmax	Maximum Enerji Çarpımı
Bias	Eşik Değeri
Br	Artık Miknatısiyet
BLDC	Fırçasız Doğru Akım Motoru
BMD	Bulanık Mantık Denetleyici
DC	Doğru Akım
DTC	Doğrudan Tork Kontrol
Hc	Koersif Kuvvet
Nd	Neodimiyum
NdFeB	Neodimiyum Demir Bor
PID	Oransal İntegral Türev Kontrolör
Min	Minimum
Max	Maximum
IGBT	İzole Edilmiş Kapılı İki Kutuplu Transistör
Tc	Curie Sıcaklığı
UVDGM	Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu
SmCo	Samaryum Kobalt
SDGM	Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu
SMSM	Sabit Miknatıslı Senkron Motor

UVDGM

Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu

YSA

Yapay Sinir Ağı



ŞEKİLLER LİSTESİ

sayfa

Şekil 3. 1.Mıknatıslarda histerisiz döngüsü	9
Şekil 3. 2. Sabit mıknatısların sınıflandırılması.....	10
Şekil 3. 3.Çeşitli mıknatısların mıknatıslığı yok etme karakteristikleri	11
Şekil 3. 4.Sabit mıknatıslı motorların sınıflandırılması	13
Şekil 3. 5.Yüzey mıknatıslı SMSM	14
Şekil 3. 6.Radyal mıknatıslı SMSM	14
Şekil 3. 7.Dairesel mıknatıslı SMSM	15
Şekil 3. 8.Bulanık renk kümeleri	19
Şekil 3. 9. Klasik küme ve bulanık küme	20
Şekil 3. 10. Klasik küme	21
Şekil 3. 11. Üçgen üyelik fonksiyonu.....	23
Şekil 3. 12. Yamuk üyelik fonksiyonu	23
Şekil 3. 13. Gauss üyelik fonksiyonu	24
Şekil 3. 14. Sigmoid üyelik fonksiyonu.....	24
Şekil 3. 15. Çan eğrisi üyelik fonksiyonu.....	25
Şekil 3. 16. Bulanıklaştırma işlemi	26
Şekil 3. 17. (a) Hata ve hatanın değişimi üyelik fonksiyonları (b) Çıkış üyelik fonksiyonları	27
Şekil 3. 18. Mamdani Bulanık Çıkarım Yöntemi(max-min)	29
Şekil 3. 19. Mamdani bulanık çıkarım yöntemi(max-product)	29
Şekil 3. 20. Takagi-sugeno bulanık çıkarım yöntemi	30
Şekil 3. 21. Ağırlık merkezi durulaştırma yöntemi	32
Şekil 3. 22. Maximum üyelik durulaştırma yöntemi	33
Şekil 3. 23. Ortalama maksimum üyelik durulaştırma yöntemi	33
Şekil 3. 24. Ağırlıklı ortalama durulaştırma yöntemi	34
Şekil 3. 25. Biyolojik sinir hücresi	36
Şekil 3. 26. Yapay sinir hücresi	37
Şekil 3. 27. Çok katmanlı yapay sinir ağı	38
Şekil 3. 28. a) Doğrusal fonksiyon b) Basamak fonksiyonu c) Sigmoid fonksiyon.....	39
Şekil 3. 29. Öğrenme yöntemleri a) Denetimli öğrenme b) Denetimsiz öğrenme c) Takviyeli öğrenme	40
Şekil 3. 30. Ağ yapıları a) İleri beslemeli ağ b) Geri beslemeli ağ	41
Şekil 3. 31. SMSM Alan Yönlendirmeli Kontrol Genel Blok Diyagramı.....	43
Şekil 3. 32. d ve q kuvvetleri	44
Şekil 3. 33. Clark Dönüşümü.....	45
Şekil 3. 34. Park Dönüşümü	46
Şekil 3. 35. a) SMSM'nin d eksenine eşdeğer devresi b) SMSM'nin q eksenine eşdeğer devresi.....	46
Şekil 3. 36. SMSM abc model	48
Şekil 3. 37. 3 Fazlı Evirici	50
Şekil 3. 38. UVDGM diyagram	51
Şekil 3. 39. Her sektördeki anahtarlama düzenleri	53
Şekil 4. 1. SMSM AYK matlab simulink benzetimi	54
Şekil 4. 2. Clark dönüşümü blok diyagramı	55

Şekil 4. 3. Park dönüşümü blok diyagramı	55
Şekil 4. 4. Ters park dönüşümü blok diyagramı	55
Şekil 4. 5. PI kontrolör Yapısı	56
Şekil 4. 6. UVDGM blok diyagramı	56
Şekil 4. 7. Sektör belirleme blok diyagramı	57
Şekil 4. 8. Anahtarlama süresi hesaplanması blok diyagramı	58
Şekil 4. 9. IGBT Evirici Yapısı.....	58
Şekil 4. 10. a) Hata b) Hatanın değişimi c) Çıkış üyelik fonksiyonları	61
Şekil 4. 11. BMD yüzey görünümü	61
Şekil 4. 12. BMD-PI AYK Diyagramı	62
Şekil 4. 13. YSA yapısı.....	63
Şekil 4. 14. YSA hata grafiği.....	64
Şekil 4. 15. YSA regresyon grafiği.....	64
Şekil 4. 16. YSA AYK blok diyagramı	65
Şekil 5. 1. BMD-PI ve PI kontrolör ani yük girişi durumunda hız karşılaştırması	66
Şekil 5. 2. BMD-PI ve PI kontrolör ani yük girişi durumunda hız karşılaştırması	67
Şekil 5. 3. SMSM ani yük girişi durumunda stator akımları	67
Şekil 5. 4. SMSM ani yük girişi durumunda tork cevabı	68
Şekil 5. 5. SMSM ani yük çıkışı durumunda stator akımları.....	68
Şekil 5. 6. SMSM ani yük çıkışı durumunda tork cevabı	69
Şekil 5. 7. BMD-PI-YSA ani yük girişi hız karşılaştırması.....	69
Şekil 5. 8. BMD-PI ve YSA ani yük girişi farkı.....	70
Şekil 5. 9. BMD-PI-YSA ani yük çıkışı hız karşılaştırması	71
Şekil 5. 10 BMD-PI ve YSA Ani Yük Çıkışı Fark.....	71
Şekil 5. 11 SMSM ani yük girişi durumunda stator akımları	72
Şekil 5. 12. SMSM ani yük girişi durumunda tork cevabı	72
Şekil 5. 13. SMSM ani yük çıkışı durumunda stator akımları.....	73
Şekil 5. 14. SMSM ani yük çıkışı durumunda tork cevabı	73

ÇİZELGE LİSTESİ

sayfa

Çizelge 3. 1. Çeşitli Mıknatıslara Ait Isıl Değerler	10
Çizelge 3. 2. SMSM'nin Yüzey Mıknatıslı ve Gömülü Mıknatıslı Olmasının Karşılaştırılması	15
Çizelge 3. 3. Kural Tablosu	27
Çizelge 3. 4. Her Sektör İçin Üst Güç Anahtarlarının Anahtarlama Süreleri.....	52
Çizelge 4. 1. PI Katsayıları	56
Çizelge 4. 2. Motor Parametreleri.....	59
Çizelge 4. 3. BMD Kural Tablosu	62

1. GİRİŞ

Büyük bir hızla gelişmekte olan teknoloji ve bilim beraberinde farklı yenilikleri de beraberinde getirmiştir. Bu yenilikler sonucunda farklı ve daha üstün özelliklere sahip elektrik motorları tasarlanabilmiş ve endüstrideki kullanım alanları giderek artmıştır. Öte yandan günümüzde artan enerji talebi ve kaynakların sınırlı olmasından dolayı elektrik motorlarının daha yüksek verimlilik ve daha az enerji harcayarak tasarlanmaları gereksinimi oluşmuştur. Mıknatıs teknolojisindeki yeniliklerle beraber daha düşük maliyetli ve yüksek kaliteli mıknatıslar üretilmeye başlanmış ve bu gelişmeler sabit mıknatıslı motorların yaygınlaşmasına olanak sağlamıştır.

Sabit mıknatıslı motorların daha geniş bir hız aralığında daha yüksek tork sağlaması ve mıknatıslanma akımına ihtiyaç duymaması, indüksiyon motorlarına göre bakım maliyetlerinin düşük olması ve bakım periyotlarının daha uzun olması, daha az enerji harcamaları, daha yüksek verimli olmaları ve boyutlarının küçük olması endüstriyel uygulamalarda giderek daha fazla tercih edilmelerine neden olmaktadır (Çelik, 2012).

Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar (SMSM) stator kısmında sargılar ve rotorunda sabit mıknatıslar içerir. Rotorunda sargılar yerine mıknatıs kullanılması SMSM'nin bakır kayıplarını azaltır ve motor boyutlarında önemli bir küçülme sağlar (Bhardwaj, 2013).

Elektrik motorlarının gelişimi ve endüstrideki kullanım alanlarının yaygınlaşması daha yüksek verimlilik ve daha yüksek kararlılığa sahip kontrol yöntemleri ihtiyacını da beraberinde getirmiştir. Sayısal sinyal işlemciler ve güç elektroniği alanında meydana gelen ilerlemeler sayesinde farklı kontrol yöntemleri ortaya çıkmış ve yaygın kullanılır hale gelmiştir. Bu konudaki çalışmalar günümüzde halen büyük bir hızda devam etmektedir.

Sabit mıknatıslı senkron motor kontrol yöntemleri Scaler kontrol (v/f), Doğrudan Tork Kontrol (DTK) ve Alan Yönlendirmeli Kontrol (AYK) başlıkları altında toplanabilir. V/f kontrol çok basit ve kolay bir tasarım gerektirir. Ayrıca maliyet açısından da en uygun kontrol yöntemidir. Gerilim ve frekans arasındaki oran istenilen hız aralığına göre ayarlanır. Açık çevrim olarak kullanılan bu kontrol yöntemi herhangi bir geri beslemeye ihtiyaç duymadığı için motor parametreleri ve çeşitli sensörlerde gerektirmez. Yüksek

performans gerektirmeyen pompa ve fan benzeri sistemleri kontrol etmek için daha çok tercih edilir.

DTK 1980'li yıllarda M. Depenbrock tarafından Alan Yönlendirmeli Kontrole alternatif olarak sunulmuş bir kontrol yöntemidir.

Bu kontrol yöntemi motor akım ve gerilimlerinden motorun manyetik akı ve torkunun tahmin edilmesine bağlı olarak gerçekleştirilir. Bu kontrol yöntemi alan yönlendirmeli kontrole göre daha az parametre gerektirmektedir (Özçira, 2013). Ancak düşük hızlarda sistemin kontrolünün zorlukları ve düşük hızlarda oluşan tork ve akım dalgalanmaları önemli bir sorun teşkil etmektedir.

Alan yönlendirmeli kontrol 1970 li yıllarda F. Blaschke tarafından ortaya çıkarılmıştır. SMSM için en etkili kontrol yöntemidir. Bu yöntemde motorun d - q ekseninde ki modeline ve pozisyon bilgisine ihtiyaç vardır. Bu kontrol yönteminde amaç motordan istenilen torku elde etmek için i_d ve i_q akım bileşenlerini kontrol etmektir. Manyetik akı ve tork i_d ve i_q akımları tarafından kontrol edilir. SMSM'de manyetik akı sabittir. i_q akım bileşeni kontrol edilerek motorun torku kontrol edilebilir. i_d ve i_q bağımsız olarak kontrol edilerek istenilen tork değeri için gereken akım en aza indirilerek maksimum verimlilik sağlanır.

Bulanık mantık 1960'lı yıllarda Lotfi A. Zadeh tarafından ortaya atılmıştır. Bulanık kümeler klasik kümelerden farklı olarak 0 ya 1 değerlerini değil bunların arasındaki sonsuz değerleri de kapsamaktadır. Bu durum Bulanık kümelerin günlük hayatta sıklıkla kullandığımız hava sıcak ya da soğuk yerine hava biraz sıcak veya soğuk gibi ifadelerin matematiksel olarak oluşturulmasına olanak sağlamıştır. Mamdani ve arkadaşlarının çalışmalarında Bulanık mantık ilk kez bir denetim sisteminde kullanılmış ve bu alanda ki çalışmalar büyük bir ivme kazanmıştır.

Oransal-İntegral-Türev (PID) kontrolörler en bilinen ve en yaygın olarak kullanılan kontrolörlerdir. Basit algoritmaları ve kararlı yapıları sebebiyle büyük avantaja sahiptirler. Ancak PID kontrolörler sistemde bir bozucu giriş meydana geldiğinde kararlılıkları kolaylıkla bozulabilmektedir. Ayrıca sabit PID parametreleri sebebiyle motor kontrol uygulamalarında motorun dinamik performansını özellikle tepki hızını sınırlandırmaktadır (Liu ve ark., 2017). Ayrıca PID kontrolörler doğrusal sistemler için daha iyi sonuçlar vermektedirler. Doğrusal olmayan sistemlerin ve matematiksel modeli

tam olarak oluşturulamayan sistemler için farklı kontrol yöntemlerine ihtiyaç vardır. Burada bulanık mantık denetleyiciler ön plana çıkmaktadır. Geleneksel kontrol yöntemlerine göre doğrusal olmayan sistemler için daha etkili bir kontrol performansı sunmaktadırlar. Bu iki kontrol yönteminin birlikte BMD-PID olarak kullanılması performansı çok daha yüksek bir kontrol yöntemi olmaktadır (Al-Odienat ve Al-Lawama, 2008).

Yapay sinir ağları (YSA) insanın öğrenme fonksiyonundan esinlenilerek oluşturulmuş bir bilgisayar sistemidir. Yapay sinir ağları örnekler yardımıyla eğitilir. Yapay sinir ağları birbirine bağlı hücrelerden oluşmuştur. Hücrelerin oluşturduğu her bağlantı noktasında bir ağırlık merkezi vardır ve üretilen bilgi bu ağırlık merkezinde saklanır. Yapay sinir ağları paralel yapısı sebebiyle hızlı işlem yapabilmektedir. Ayrıca öğrenilen bilgiyle farklı bir durum için çıkarımlar yapabilmek, eksik bilgiyle çalışabilmek, hata oluşması durumunda yüksek toleranslı bir sistemdir (Öztemel, 2003).

Bu tez çalışmasında Sabit miktatsız senkron motorun alan yönlendirmeli kontrolü geleneksel kontrol yöntemi olan pi kontrolör kullanılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar BMD-PI ile oluşturulan kontrolör ile kıyaslanmış ve BMD-PI kontrolörün daha etkili bir kontrol sonucu verdiği gözlemlenmiştir. Ancak BMD yoğun matematiksel işlemler içermesinden dolayı yavaş çalışmaktadır. Bu yüzden BMD paralel işlem yapabilmesinden dolayı hızlı çalışan ve hem yazılım hem de donanım olarak uygulaması BMD'den daha kolay olan YSA ile modellenilebilir. Bu çalışmanın literatüre kazandıracağı yenilik BMD'nin YSA ile modeli oluşturulup SMSM'nin alan yönlendirmeli kontrolünde kullanılmasıdır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar günümüzde giderek yaygınlaşan bir kullanım alanına sahiptir. Bu yaygın kullanım SMSM'nin kontrolü üzerinde yapılan çalışmalara da büyük bir ivme kazandırmıştır. Bu çalışmalarda daha etkin kontrol performansı sergilemesi nedeniyle modern kontrol teknikleri ön plana çıkmaktadır. Tezin bu bölümünde SMSM'nin modern kontrol teknikleri olan Bulanık Mantık Denetleyiciler ve Yapay Sinir Ağları ile yapılan kontrolü ile ilgili son 10 yılda yapılmış çalışmalar ve bu alana öncülük etmiş olan temel çalışmalara yer verilmiştir.

(Zadeh L. A., 1965) yaptığı çalışmada Bulanık Mantık Teorisini geliştirmiştir. Zadeh daha sonraki çalışmalarında ise bulanık mantığın karmaşık ve belirsiz sistemler için kullanılabileceğini göstermiştir (Zadeh L. A., 1973 ; Zadeh L. A., 1975).

(Mamdani, 1974;Mamdani ve Assilian, 1975) yaptıkları çalışmalarında bulanık mantık denetleyici kullanarak ilk defa gerçek zamanlı bir sistemin kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmaları bulanık mantık için bir dönüm noktası olmuş ve bu alandaki çalışmalar giderek artmıştır

(Blaschke, 1971;Blaschke, 1972) yıllarında yaptığı çalışmada alan yönlendirmeli kontrol veya vektör kontrol olarak da bilinen kontrol teorisini önermiştir. Buna göre tork ve akı birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilir.

(Rahman ve Hoque, 1998) yaptıkları çalışmada çevrimiçi kendi kendini ayarlayan yapay sinir ağı kullanan SMSM için hız kontrolüne yönelik yeni bir yaklaşım ortaya koymuşlardır. Motor dinamiği ve doğrusal olmayan yük özelliklerine dayalı olarak, bir YSA hız denetleyicisi geliştirmişler ve SMSM sürücüsünün vektör kontrol şemasına entegre etmişlerdir.

(Cao ve Fan, 2006) yaptıkları çalışmada Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun (SMSM) vektör kontrolü için Uyarlanabilir Bulanık Sinir Ağı Denetleyicisinin (FNNC) uygulanmasını gerçekleştirmişlerdir. YSA ve BMD'yi yapısında bulunduran FNNC bulanık mantığın belirsiz bilgileri ele alma kabiliyetini ve sinir ağının süreçlerden öğrenme kabiliyetini birleştirir. BMD'nin çıktılarını kullanarak çevrimiçi olarak YSA

ağırlıklarını değiştirmişler simülasyon ve deneysel olarak etkili bir kontrol performansı ortaya koymuşlardır. Önerdikleri FNNC'nin parametre değişimleri ve dış bozucu etkilerin oluşumu altındaki etkinliğini göstermek için çeşitli simülasyon ve deney sonuçları vermişlerdir.

(Albostan ve Gökbulut, 2013) yaptıkları çalışmada, SMSM modellemesini ve uyarlamalı kontrolünü gerçekleştirmek için Katlı Yapay Sinir Ağları (KYSA) kullanmışlardır. Araştırmalarının amacı, endüstriyel tahrik sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan doğrusal olmayan ve bilinmeyen motor yük dinamiklerini belirlemek ve motoru, seçilen bir referans hızı veya konumu takip edecek şekilde KYSA aracılığıyla kontrol etmektir. Bu nedenle, Sabit Mıknatıslı Senkron Motorları modellemek ve kontrol etmek için KYSA kullanmışlardır. Ele alınan kontrol algoritmasını MATLAB programında simüle etmişler ve yapay sinir ağlarının doğrusal olmayan sistemleri modelleme ve kontrol etmede bilinen uyarlamalı kontrol yöntemlerine göre daha etkili olduğunu göstermişlerdir.

(Kumar ve ark., 2014) yaptıkları çalışmada Geleneksel PID denetleyicinin sağlamlığını ve uyarlanabilir özelliklerini genişletmek amacıyla, SMSM yüksek performanslı konum kontrolü için denetleyici çevrimiçi modda çalışırken ayarlanan sinir ağı tabanlı PID kontrolör benzeri bir kontrolör geliştirmişlerdir. YSA tabanlı PID benzeri kontrolör, tekrarlayan bir sinir ağından oluşur ve PID benzeri bir yapı oluşturan bir yapıya sahiptir. Önerilen kontrolörün performansı, parametrik belirsizlikler ve yük bozulmaları varlığında değerlendirilmiş ve sonuç sonuçları, Cuckoo arama tabanlı optimizasyon yöntemi kullanılarak optimize edilmiş geleneksel PID denetleyici ile karşılaştırılmıştır. YSA tabanlı kontrolörün daha iyi performans sergilediği görülmüştür.

(Essalmi ve ark., 2014) yaptıkları çalışmada Yapay Sinir Ağı ve Bulanık Mantık Denetleyici tekniğine dayanan Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun geliştirilmiş bir Doğrudan Tork Kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Genellikle DTK en büyük sorun olan tork dalgalanmasını azaltmak ve sistemin tepki süresini artırmak için gerilim invertörünün geleneksel seçici anahtar ifadelerini YSA'ya dayalı bir seçici ile değiştirmeyi PI kontrolörünü BMD ile değiştirmişlerdir. Matlab Simulink ortamında yaptıkları simülasyon sonuçlarında YSA ve BMD'nin daha iyi olduğunu göstermişlerdir.

(Na ve Wang, 2014) yaptıkları çalışmada, geliştirilmiş akım ve hız denetleyicisi ile SMSM'nin kapalı döngü vektör kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Kontrol yöntemi olarak PI ve BMD-PI kontrolör kullanmışlar ve bu iki kontrol yöntemini karşılaştırmışlardır. Simülasyon ve deneysel sonuçlar üzerindeki karşılaştırmalarda, BMD-PI kontrolörün tahrik sistemi için hem akım hem de hız açısından daha iyi dinamik tepkiler gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

(Sakunthala ve ark., 2017) Yaptıkları çalışmada SMSM hız kontrolü için BMD ve YSA kullanmışlardır. BMD ve YSA'nın hibrit kullanımı olan ANFİS yöntemi ile karşılaştırdıklarında daha etkili bir kontrol sonucu elde edildiğini görmüşlerdir

(Liu ve Chang, 2018) Yaptıkları çalışmada, SMSM servo kontrol sisteminin rotor konum kontrolörünü gerçekleştirmeyi amaçlamışlardır. parametre değişimleri ve harici yük torku bozulmalarında iyi konum izleme performansı sağlamak için, bulanık mantığın belirsiz bilgileri ele alma kabiliyetini ve sinir ağının süreçten öğrenme kabiliyetini birleştirerek çalışan bir Bulanık Sinir Ağı (FNN) konum denetleyicisi tasarlamışlardır. Tasarlanan FNN kontrolör kontrol performansını büyük ölçüde iyileştirmiş ve hatayı azaltmıştır.

(Sam ve Can, 2019) yaptıkları çalışmada bir pendulum sistemin kontrolünü BMD kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Sonrasında daha hızlı bir kontrolcü elde etmek için BMD'yi YSA ile modelleyerek BMD ve YSA'nın kontrol performansını karşılaştırmışlardır. Matlab Simulink ortamında gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarında BMD'nin YSA modelinin daha hızlı bir tepki süresine sahip olduğunu belirlemişlerdir.

(Güney ve ark., 2019) yaptıkları çalışmada SMSM'nin sabit yük altında BMD ve tekrarlayan Yapay Sinir Ağı denetleyicisi kullanılarak gerçek zamanlı hız kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Matlab Simulink ortamında SMSM'nin matematiksel modeli kullanılarak kapalı döngü bir SMSM sürücü sistemi geliştirmişlerdir. Tüm tahrik sistemleri Matlab Simulink programında simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçlarında, YSA denetleyicisinin, hız referans varyasyonlarını kontrol etmede BMD'ye kıyasla daha üstün bir kontrol performansı sergilediğini göstermişlerdir.

(Gu ve ark., 2020) yaptıkları çalışmada SMSM'nin Alan Yönlendirmeli Kontrolünde PID kontrolünün dezavantajlarından dolayı bulanık kontrol uygulamışlardır. BMD hata ve hatadaki değişime dayalı olarak PI denetleyicisinin iki parametresini otomatik olarak ayarlar . Simülasyon sonucunda, BMD-PI kontrolü kullanılarak daha dinamik ve kararlı durum elde edilebileceğini göstermişlerdir.

(Ding, 2021) yaptığı çalışmada Geleneksel PID denetleyicisinin düşük kontrol hassasiyeti, zayıf anti-parazit yeteneği ve zayıf kararlılığı problemlerini hedefleyerek, SMSM'nin kapalı döngü kontrolünde BMD ve YSA'nın iyileştirme etkisi karşılaştırmışlardır. Değişken hız ve değişken yük durumunda, geleneksel PID denetleyici, bulanık kendi kendini ayarlayan PID denetleyici ve hız regülatörü olarak YSA-PID denetleyicisi ile SMSM kontrol sisteminin kararlılığını analiz etmişlerdir. Simülasyon sonuçları, bulanık kendi kendini ayarlayan PID denetleyicinin sistemin ani bir değişiklik durumunda sistemin hızlı bir şekilde başlangıç durumuna geri dönmesini sağlayabildiğini YSA -PID denetleyicisinin ise sistemin göreceli kararlılığının daha iyi olmasını sağladığı ve ani dalgalanmayı sınırlayabildiğini göstermişlerdir.

(Djelamda ve Bouchareb, 2022) yaptıkları çalışmada PI , Bulanık Mantık Denetleyici ve Uyarlanabilir Nöro-Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) kullanarak bir SMSM'nin Alan Yönlendirmeli kontrolünü gerçekleştirmişler ve bu kontrolörlerin kontrol performanslarını karşılaştırmışlardır. Bulanık mantık ve sinir ağlarının hibrit kombinasyonunu kullanarak oluşturulan ANFIS'in 0,5 kW bir SMSM üzerinde gerçekleştirilen kontrol performansının daha iyi olduğunu göstermişlerdir.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Sabit Mıknatıslı Senkron Motor

3.1.1. Sabit mıknatıslı motorlarda kullanılan mıknatıs malzemeler

Kalıcı bir mıknatıs, güçlü bir manyetik alan oluşturan ve harici olarak etkileyen alan kaldırıldıktan sonra bile manyetizasyonunu koruyan bir nesnelere. Manyetik malzemelerdeki ilerlemeler son yıllarda büyük bir hızla arttı. Her adım daha yeni ve gelişmiş bir manyetik malzemenin doğmasına yol açtı. Bu durum mıknatıs malzemelerin birçok farklı alanda yaygın bir şekilde kullanılmasına olanak sağladı.

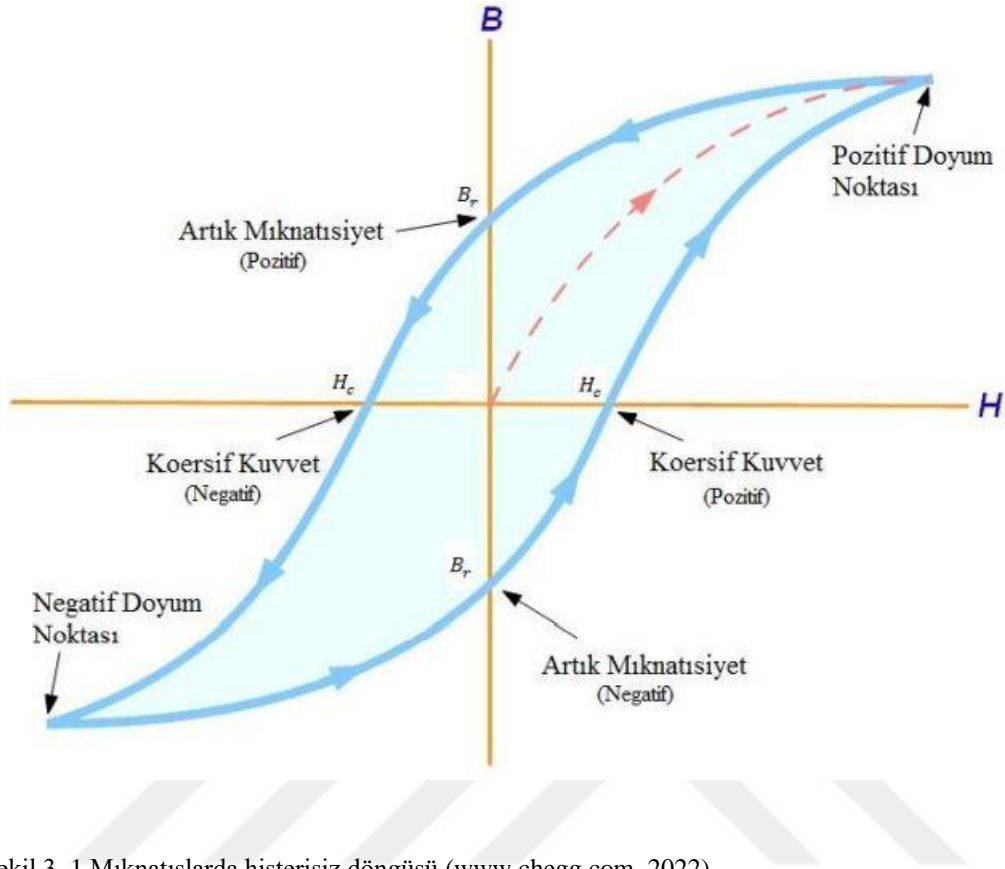
1930'larda Al-Ni-Co alaşımlarından oluşan mıknatısların geliştirilmesiyle uyartım alanının sabit mıknatıslarla oluşturulduğu elektrik makineleri yapılmaya başlamıştır (Özçira, 2007).

1980'lerde nadir toprak elementlerinin alaşımlarından olan Samaryum Kobalt (SaCo) ve Nd-Fe-B mıknatıslarının geliştirilmesiyle elektrik motorlarında kullanılma düşüncesi artmıştır (Rahman ve Slemaon, 1985). Mıknatısların elektrik motorlarında kullanılmasıyla sargılardan akım geçirilerek oluşturulan manyetik akı mıknatıslarla sağlanmış ve bu durum bakır kayıplarını ortadan kaldırarak verimliliği artırmış ve motor boyutlarının küçülmesini sağlamıştır (Duru ve Demiröz).

3.1.2. Mıknatısların manyetik karakteristikleri

Kalıcı bir mıknatısın manyetik özellikleri, manyetik indüksiyon (B) ve manyetik alan şiddeti (H) arasındaki ilişkiyi gösteren histerezis döngülerine dayanarak değerlendirilir. Histerezis döngüsü, uygulanan manyetik alanın sabit büyüklükteki pozitif ve negatif değerler arasında döngüsel olarak değişmesiyle elde edilir. Histerezis döngüsünün ikinci çeyreği, kalıcı mıknatısın çalıştığı demanyetizasyon eğrisi olarak adlandırılır. Artık Mıknatısiet (Br) (manyetize edildikten sonra kalıcı bir mıknatısta kalan manyetik indüksiyon), Koersif Kuvvet (Hc) (kalıcı bir mıknatısı tamamen demanyetize etmek için gerekli manyetik alan) ve Maksimum Enerji Çarpımı (BHmax) (depolanan maksimum

manyetik enerji miktarı) dahil olmak üzere histerezis döngüsünden çeşitli manyetik özellikler elde edilebilir (Krishnan, 2010).



Şekil 3. 1.Mıknatıslarda histerezis döngüsü (www.chegg.com, 2022)

BHmax, histerezis döngüsünün ikinci çeyreğine sığabilecek karenin maksimum alanı olarak tanımlanır. Kalıcı bir mıknatısın kalitesi, BHmax değeri ile ifade edilir. Kalıcı mıknatıslar en verimli şekilde BHmax değerindedir. BHmax ne kadar yüksek olursa, belirli bir manyetik alan üretmek için gereken malzemenin hacmi o kadar küçük olur. Bir mıknatıs yüksek Curie sıcaklığı (T_c) ve manyetik anizotropi ile birlikte büyük B_r ve H_c 'ye sahipse, kalıcı bir mıknatıs için iyi bir aday olarak kabul edilir (Genç ve Ünalın, 2017).

3.1.3.Mıknatıslar üzerinde sıcaklığın etkileri

Sıcaklık manyetik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sıcaklığın yükselmesi atomların termal titreşimini artırır ve manyetik özelliklerin bozulmasına yol açar. Bir malzemenin manyetizasyonu, atomların termal hareketinin minimum olduğu $-273 K^0$ 'de maksimumdur. Bununla birlikte, artan sıcaklık, karşılıklı spin kuplaj kuvvetlerinin

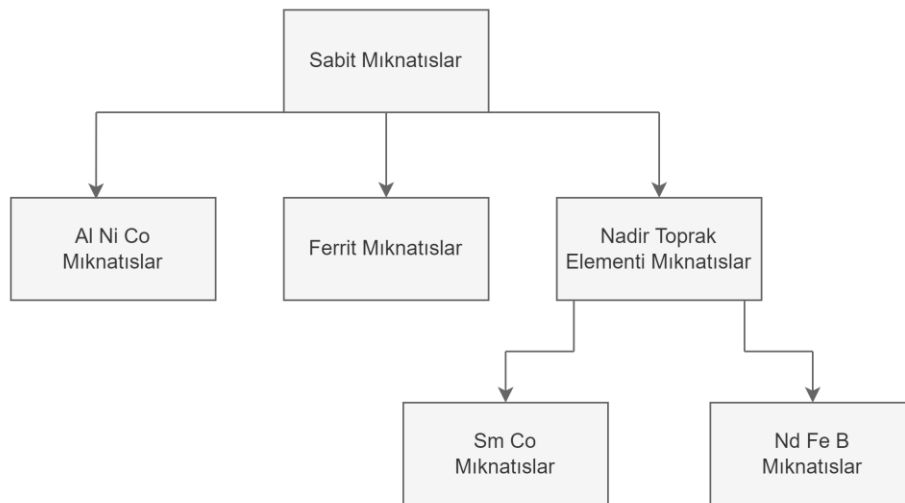
tamamen yok olduğu Curie sıcaklığında (T_c) yada kritik sıcaklık sıfır manyetizasyona düştüğü noktaya kadar mıknatıslanmayı yavaş yavaş bozar (Sara , 2016).

Çizelge 3. 1. Çeşitli mıknatıslara ait ısıl değerler (Özçira ,2007)

Mıknatıs Cinsi	Curie Sıcaklığı °C (T_c)	Isıl Değişim (H_c) % / Kelvin	Çalışma Sıcaklığı °C	Isıl Değişim B_r % / Kelvin
Al-Ni-Co	800	-0.03	500	0.02
Ferrit	450	-0.2	300	-0.4
SmCo	720	-0.02	250	-0.045
Nd-Fe-B	310	-0.6	120	-0.13

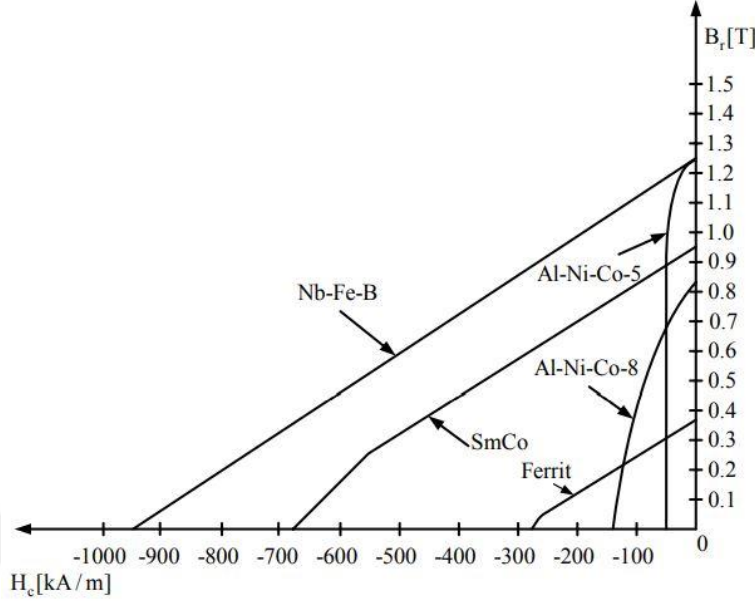
3.1.4.Sabit mıknatısların sınıflandırılması ve özellikleri

Günümüze kadar birçok farklı özellikte ve tipte mıknatıslar üretilmiştir. Genel olarak histerezis özelliklerine göre yumuşak ve sert manyetik malzemeler olmak üzere iki ana kategoriye ayrılırlar. Zorlayıcılık değerleri ile ayırt edilirler. Yumuşak manyetik malzemeler 1 kA/m'nin altında zorlayıcılığa sahipken, sert manyetik malzemeler 10 kA/m'den fazla zorlayıcılık sergiler (Sara , 2016).



Şekil 3. 2. Sabit mıknatısların sınıflandırılması

Sert manyetik malzemeler Aluminium Nikel Cobalt(AlNiCo) mıknatıslar, Ferrit Mıknatıslar ve Nadir toprak elementi mıknatıslarından oluşur.



Şekil 3. 3.Çeşitli mıknatısların mıknatıslığı yok etme karakteristikleri (Özçira, 2007)

AlNiCo mıknatıslar

Kobaltın keşfi ile AlNiCo olarak isimlendirilen alüminyum-nikel-kobalt alaşımları ailesinin gelişmesine yol açtı. Keşfedilen ilk kalıcı mıknatıslardandır. Alnico mıknatıslar yüksek Curie sıcaklıkları sayesinde yüksek sıcaklık uygulamalarında çok kullanışlıdır. Ana dezavantajlarından biri, onları demanyetizasyona eğilimli kılan düşük koersif kuvvettir. Alnico mıknatıslar döküm veya sinterleme yoluyla üretilebilirler. (Rao A. S., 1993) Yüksek sıcaklık için uygun olsalar da günümüzde modern elektrik motorlarında düşük demanyetize olma dirençlerinden dolayı tercih edilmezler.

Ferrit Mıknatıslar

Barium ve strontium ferritler 1950'lerde keşfedildi. Ferritler toz metalurjisi ile üretilir. Kimyasal olarak yapılarında, Barium ve strontium yanı sıra kurşun ve manganez de bulunabilir.

Ferritlerin koersif kuvvetleri AlNiCo malzemelere göre çok daha yüksektir ancak AlNiCo'lardan daha düşük kalıcı akı yoğunluğuna sahiptirler. Sıcaklık katsayıları nispeten yüksektir. Maximum Curie sıcaklığı 450 derece civarındadır. Ferritlerin başlıca avantajları yapısında ki malzemelerin kolay bulunabilir olmasından dolayı maliyetlerinin düşük olması çok yüksek elektriksel dirençleridir. Kesirli beygir gücü motorlarında 7.5

kW'a kadar AlNiCo mıknatıslara göre avantaj sağlarlar. Baryum ferritler genellikle küçük dc motorlarda kullanılırlar. Stronsiyum ferrit, baryum ferritten daha yüksek bir zorlayıcı kuvvete sahiptir. Kurşun ferrit, çevresel sorunları açısından bir üretim dezavantajına sahiptir (Krishnan, 2010).

Nadir Toprak Elementi Mıknatısları

1980'lerden sonra nadir toprak elementi mıknatıslarının geliştirilmesiyle maximum enerji çarpımı(BHmax) alanında büyük ilerlemeler oldu. Nadir toprak elementleri genel olarak çokta nadir değildir, ancak doğal mineralleri geniş çapta karışık bileşiklerdir.

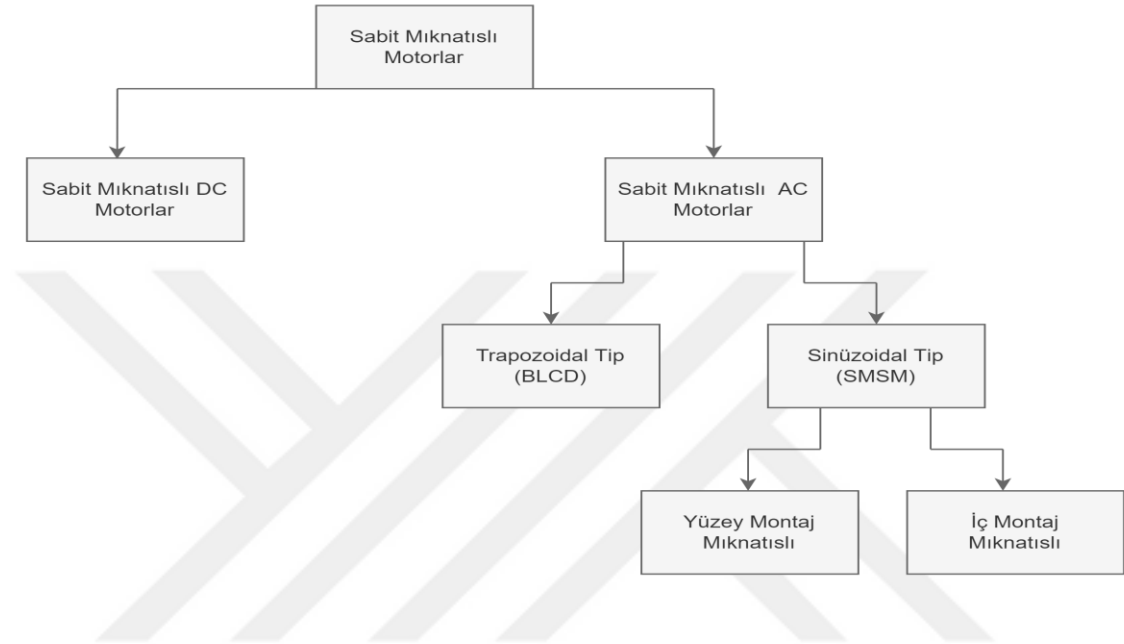
Günümüzde önemli ölçüde geliştirilmiş sert manyetik malzemedir. SmCo5, yüksek kalıcı akı yoğunluğu, yüksek zorlayıcı kuvvet, yüksek maksimum enerji çarpımı ve lineer demanyetizasyon eğrisi avantajına sahiptir. Düşük hacimli, yüksek güç yoğunluğuna sahip motorlar yapmak için çok uygundur. En büyük dezavantajı maliyetidir. Hem Sm hem de Co, tedarik kısıtlamaları nedeniyle nispeten pahalıdır. Genel olarak, SmCo mıknatıslar işlendikten sonra herhangi bir kaplamaya veya kaplamaya ihtiyaç duymazlar. Eğer temizlik bir sorunsal, bazen fenolik reçine gibi gelişmiş kaplamalar tercih edilir. Bazen SmCo mıknatısları Nikel ile de kaplanırlar. Ucuz neodimiyum (Nd) bazlı ikinci nesil nadir toprak mıknatıslarının keşfiyle, hammadde maliyetlerini düşürme konusunda kayda değer ilerleme kaydedilmiştir. Nd, Sm'den çok daha bol bulunan bir nadir toprak elementidir. Artık artan miktarlarda üretilen NdFeB mıknatıslar, SmCo'dan daha iyi manyetik özelliklere sahiptir, ancak demanyetizasyon eğrileri, özellikle zorlayıcı kuvvet, büyük ölçüde sıcaklığa bağlıdır. NdFeB ayrıca korozyona karşı hassastır. Ancak NdFeB mıknatıslar, birçok uygulama için performans-maliyet oranını önemli ölçüde iyileştirme potansiyeline sahiptir (Krishnan, 2010).

3.1.5. Sabit mıknatıslı senkron motorların sınıflandırılması

Bir elektrik motorunun yapısında kalıcı mıknatıslar varsa bu motorlar sabit mıknatıslı motorlar olarak isimlendirilirler. Bu motorlar besledikleri gerilimin tipine göre AC ya da DC olabilirler. Sabit mıknatıslı DC motorlarda manyetik alan statora yerleştirilen mıknatıslarla sağlanır ve yapılarında fırça ve kolektör bulundurulur. Genellikle güçleri düşük motorlardır. Sabit mıknatıslı AC motorlar yapılarında fırça ve kolektör içermezler ve bu yüzden bakım maliyetleri az ve bakım periyotları dc motorlara göre daha uzundur. Üretilen back emk nın dalga şeklinin sinüzoidal ya da trapezoidal olmasına göre iki gruba

ayrılır. Dalga şekli trapezoidal olanlar Fırçasız Doğru Akım (BLDC) motoru olarak isimlendirilirken dalga şekli sinüzoidal olanlar sabit mıknatıslı senkron motor(SMSM) olarak isimlendirilirler. SMSM'ler rotorunda bulunan mıknatısların yerleşim şekline göre yüzey montajlı ya da dahili montajlı olabilirler (Özçira, 2013;Çelik, 2012).

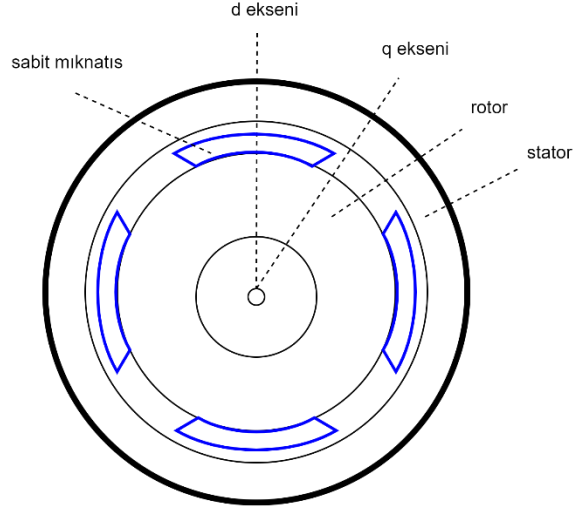
Şekil 3.4'de sabit mıknatıslı motorların sınıflandırılması verilmiştir.



Şekil 3. 4.Sabit mıknatıslı motorların sınıflandırılması

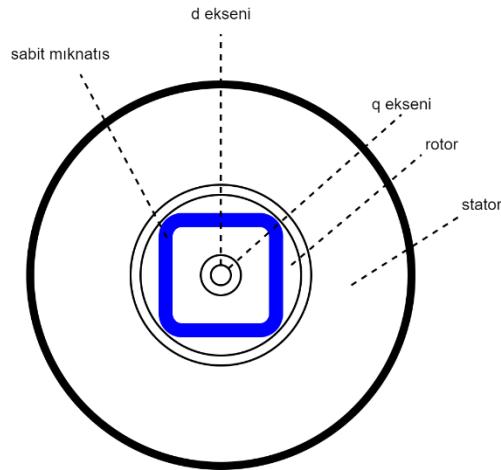
3.1.6. Sabit mıknatıslı senkron motorun yapısı

Sabit mıknatıslı senkron motorlar stator olarak isimlendirilen hareketsiz kısım ve rotor olarak isimlendirilen hareketli kısım olmak üzere 2 kısımdan oluşur. Stator kısmında sargılar bulunurken rotor kısmında manyetik alan oluşturmak için sabit mıknatıslar kullanılır. Sabit mıknatıslar sayesinde harici bir uyarma akımına ihtiyaç duymaz Bu mıknatısların rotor yüzeyine güçlü yapıştırıcılarla yapıştırılarak yüzey montajlı ya da rotorun içinde oyuklar açılarak, bu oyuklara yerleştirilmesiyle gömülü tip olarak iki temel şekilde yerleştirilmesi mümkündür. Şekil 3.5'de yüzey montajlı tip mıknatıs yerleşimleri verilmiştir.



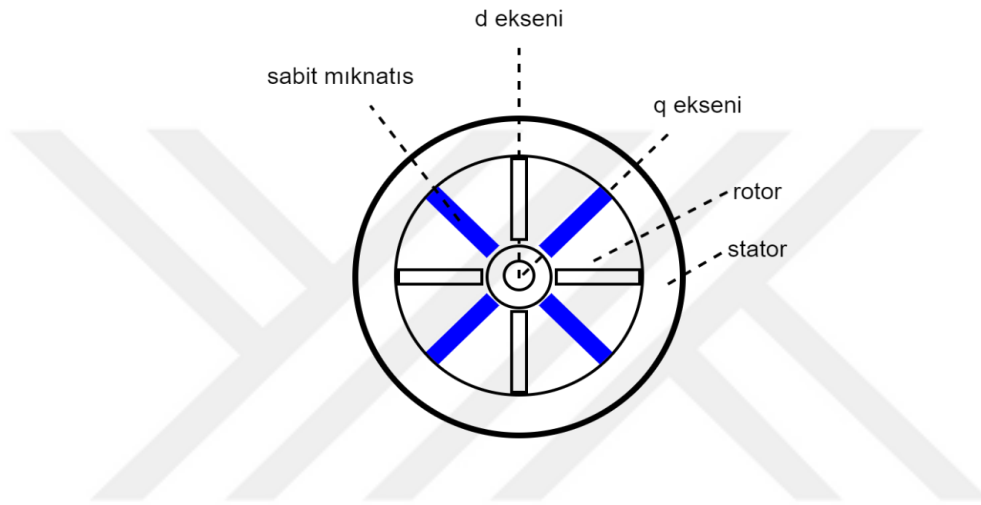
Şekil 3. 5.Yüzey mıknatıslı SMSM

Yüzey mıknatıslı SMSM’lerde mıknatıslar rotor yüzeyine simetrik olarak yerleştirilirler. Bu yerleşim tipinde daha geniş bir hava boşluğu mevcuttur. Mıknatısların geçirgenliği havanın geçirgenliği ile hemen hemen eşittir. Bu yüzden q eksenı endüktansı (L_d) d eksenı endüktansı (L_q) ile eşittir. Rotor yüzeyine yerleştirilen mıknatısların merkezkaç kuvvetine karşı maruziyeti daha fazladır. Bu yüzden motorun nominal hız değerinin üzerinde çevrilmesine uygun değildir bu dolayısıyla yüksek hızlı uygulamalarda tercih edilmez. Ancak yapı itibari ile basit olup üretim maliyeti gömülü mıknatıslı SMSM’lere göre daha azdır.



Şekil 3. 6.Radyal mıknatıslı SMSM

Gömülü mıknatıslı SMSM'lerde mıknatıslar arasındaki demir nedeniyle q eksenini endüktansı d eksenini endüktansından düşüktür. Mıknatıslar rotorun içine gömülü olduğundan merkezkaç kuvvetine maruziyetleri azdır. Bu yüzden yüksek hızlı uygulamalarda daha çok tercih edilebilirler. Mıknatısların rotorun içine gömülü olması daha yüksek bir teknoloji ve daha zorlu bir üretim süreci gerektirdiğinden maliyetleri yüzey montajlı SMSM'lere göre daha fazladır. Mıknatısların rotorun içine birçok farklı şekilde yerleştirilebilseler de en yaygın yerleştirme şekli Şekil 3.6'da ki gibi radyal yerleştirme ve Şekil 3.7'de ki gibi aksel yerleştirmedir.



Şekil 3. 7.Dairesel mıknatıslı SMSM

Çizelge 3. 2. SMSM'nin Yüzey Mıknatıslı ve Gömülü Mıknatıslı Olmasının Karşılaştırılması

Yüzey Montaj Mıknatıslı SMSM	Gömülü Montaj Mıknatıslı SMSM
Basit bir motor yapısına sahiptir.	Karmaşık bir motor yapısına sahiptir
Daha yüksek armatür akısı oluşur.	Daha düşük armatür akısı oluşur.
Düşük ve orta hızlı uygulamalar için daha uygundur.	Yüksek hızlı uygulamalar için daha uygundur.
Maliyetleri daha düşüktür.	Maliyetleri daha fazladır.
Daha büyük hava boşluğu vardır.	Daha küçük hava boşluğu vardır.

3.1.7. Sabit mıknatıslı senkron motorun avantaj ve dezavantajları

Sabit mıknatıslı senkron motorlar diğer motor türlerine göre önemli birçok avantaja sahiptirler.

Avantajları;

- Sabit mıknatıslı senkron motorlar rotorlarında bulunan sargıların mıknatıslarla değiştirilmesi sebebiyle dış kaynaktan bir uyarma akısına ihtiyaç duymazlar bu sebeple verimlilikleri artar.
- Sabit mıknatıslı senkron motorların rotorlarında sargı yerine mıknatıs kullanılması sonucu hacim olarak daha küçük boyutlarda olması ve ağırlıklarının daha küçük olması.
- Sadece statorunda sargı vardır. Rotorunda sargı yerine mıknatıs kullanılmasından dolayı ısınma problemleri daha azdır ve soğutma işlemi daha basittir.
- Rotorunda sargı yerine mıknatıs olmasından dolayı bakır kayıplarının olmaması ve bu yüzden verimliliğinin artması.
- Yapılarında fırça ve kolektör kullanılmamasından dolayı motor yapısının daha az karmaşık olması ve bakım periyotlarının daha uzun olması ve bakım maliyetlerinin düşük olması.
- Tasarımları itibariyle endüstride tozlu çamurlu vs. ortamlarda kullanılmaya daha uygun olması.
- Hem yüksek hem de düşük hızlarda daha iyi motor performansı sergilemesi.
- Daha düşük gürültülü çalışması.
- Atalet momentinin düşük olması, daha kısa sürede hızlanma ve dinamik performansının daha yüksek olması.
- İndüksiyon motorlarına göre daha geniş bir hız aralığı sağlaması.
- Tork dalgalanmalarının daha düşük olması
- Motorun kullanım ömrü daha uzundur.

Dezavantajları;

- Sabit mıknatıslı senkron motorlarda kullanılan mıknatısların üretim zorluğu ve maliyetinin fazla olması nedeniyle sabit mıknatıslı senkron motorlar indüksiyon motorlarına göre daha pahalıdır.

- Sabit mıknatıslı senkron motorlardaki mıknatısların çeşitli koşullarda demanyetize olma riski bulunmaktadır. Bu da sabit mıknatıslı senkron motorların güvenilirliğini azaltmaktadır.
- Sabit mıknatıslı senkron motorlarda mıknatısların motor yüzeyine yerleştirme işlemi motorun yüksek hızlarda çalışmasını engeller. Mıknatısların rotor içine gömülmesi ise hem üretim zorluğunu hem de motorun maliyetini artırır.
- Sabit mıknatıslı motorun verimli bir kontrolü için pozisyon bilgisine mutlaka ihtiyaç duyulmaktadır.

3.1.8. Sabit mıknatıslı senkron motorun kullanım alanları

Sabit mıknatıslı senkron motorlar yüksek verimlilikleri sayesinde önemli bir avantaja sahiptirler. Ayrıca yapılarında fırça ve kolektör bulundurmamaları sebebiyle daha uzun bir bakım periyodu gerektirirler ve bakım maliyetleri daha düşüktür. Bu avantajlarından dolayı birçok alanda giderek yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar.

Endüstride ki kullanım alanları;

- Endüstriyel sürücülerde
- Servo sistemlerde
- Pompa fan kompresör vb. sistemlerde
- Robotik sistemlerde

Enerji alanında kullanım alanları

- Elektrik üretim tesislerinde
- Rüzgar enerjisinde
- Güneş enerjisinde

Medikal alanındaki kullanım alanları

- Diş hekimliği alanındaki cihazlarda
- Tıp alanındaki cihazlarda
- Elektrik sandalyelerde

Savunma sanayindeki kullanım alanları

- Askeri araçlarda
- Füze roket sistemlerinde
- Radar sistemlerinde
- Çeşitli silahlarda

Ulaşım ve taşımacılıktaki kullanım alanları

- Asansörlerde
- Elektrikle çalışan araçlarda
- Gemilerde, trenlerde

3.2.Bulanık Mantık Denetleyiciler

3.2.1. Bulanık mantık

Bulanık mantık kavramı ilk olarak 1965 yılında Lotfi A. Zadeh tarafından ortaya koyulmuştur. Bulanık mantık kavramının ortaya çıkmasıyla günlük hayatta kullandığımız kesin olmayan söylemlerin ifadesi mümkün olmuştur.

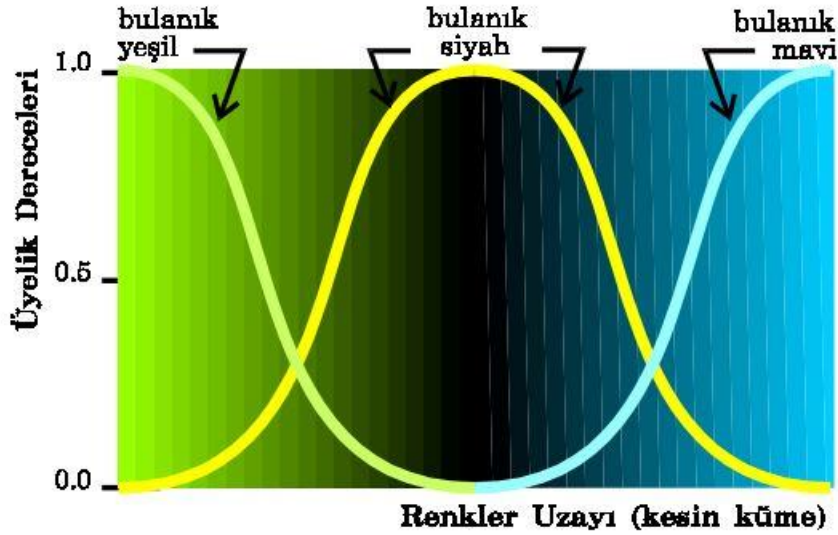
İnsan beyni, algı organları tarafından sağlanan kesin olmayan ve eksik bilgileri yorumlayabilir. Bulanık mantığın geliştirilmesinin temeli insan beyni tarafından algılanan bu bilgilerin tamamının sayı olmamasıdır. Yani dilsel terimlerin matematiksel olarak tam anlamıyla tanımlanamamasıdır. Bir bulanık çıkarım sistemi doğru seçildiğinde, belirli bir uygulamada insan uzmanlığını etkin bir şekilde taklit edebilir. Klasik mantıksal sistemler genellikle Boolean iki değerli mantığa dayanır. Herhangi bir teklif doğru veya yanlış olabilir. Zayıf, uzun veya gürültülü gibi belirsiz anlamların analizi sırasında dezavantajları olduğunu varsayabiliriz.

Klasik mantıkta bir önerme sadece 0 ya da 1 değerini alabilir. Yani sadece doğru ya da yanlıştır. Bulanık mantıkta ise klasik mantıktan farklı olarak sadece 0 veya bir değerlerini değil bu değerlerin arasındaki sonsuz değeri alabilir. Örneğin klasik mantıkta bir miktar suyun sıcaklığını ifade etmek için sıcak ya da soğuk olarak tanımlarız. Ancak bulanık mantıkta bu durumu biraz sıcak, biraz soğuk, çok sıcak veya çok soğuk gibi günlük hayatta kullandığımız terimlerle ifade edebiliriz.

3.2.2. Bulanıklık kavramı

Bulanık mantığın daha iyi anlaşılabilmesi için öncelikli olarak bulanıklık kavramının iyi anlaşılması gerekmektedir. Şekil 3.8’de verilen yeşil, siyah ve mavi renklerinin birbiri arasındaki geçişlerde kesin olarak bir renk değişimi olmamaktadır. Ayrıca renklerin diğer

renge geçmeden önce tonu da değişmektedir. Renkler arasında tam olarak bir ayırım yapabilmek klasik mantıkla tam olarak mümkün olmamaktadır ancak bulanık mantık sayesinde renkler kümelerine ve üyelik derecelerine göre tanımlanarak daha doğru bir ayırım yapmak mümkün olmaktadır (Altaş, 1999).



Şekil 3. 8. Bulanık renk kümeleri (Altaş, 1999)

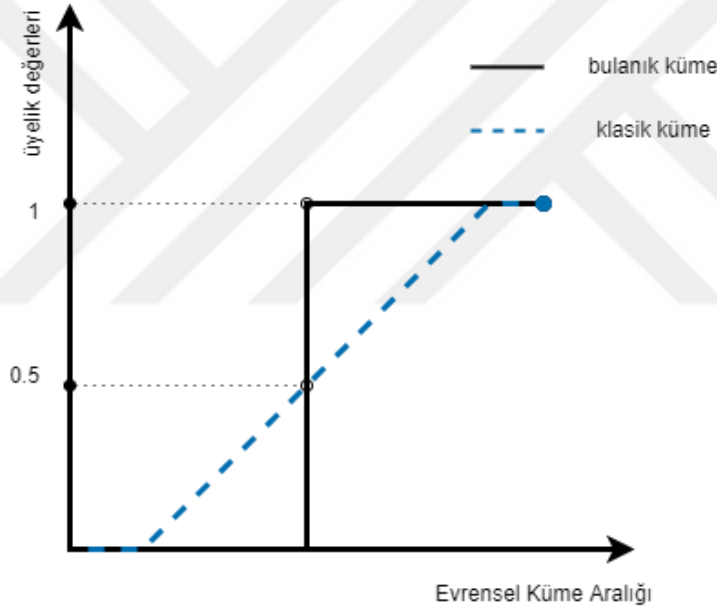
Şekil de en soldan başlayarak sağa doğru ilerlendikçe yeşil rengin tonu koyulaşmakta ve siyaha yaklaşmaktadır. Tam siyah olmadan önce farklı tonlardaki yeşil rengi sınıflandırmak için yeşil renge ait bir bulanık küme tanımlamak gerekir. Yeşil rengin bulanık kümesinde soldan sağa doğru ilerlendikçe yeşil rengin üyelik derecesi değişmektedir. Aynı şekilde siyah renkte de soldan sağa doğru ilerlendikçe siyah rengin koyuluğu azalmakta ve mavi renge dönmektedir. Bu durumda siyah rengin bulanık kümesindeki üyelik değerleri de değişmektedir (Altaş, 1999).

3.2.3. Bulanık kümeler

Herhangi bir durumda ortaya çıkan ara üyelik derecelerini modellemek için bir araç olarak bulanık küme kavramı, özellikle matematiksel olarak tam ifade edemediğimiz ya da ifade etmesi güç olan değerleri sınıflandırmak için oldukça önemlidir. Bulanık kümeler çerçevesine dahil edilen çeşitli değerlerin, gerçek hayatta ki uygulamalarında daha etkili olarak kullanılmasına uygun bir kavramın bulunmasını sağlar.

Sınıflandırmak istediğimiz kümeler ikili sınıflandırmaya uygun olduğunda, bu sınıflandırma işlemi kolaylıkla gerçekleştirilebilir. Örneğin, tek ve çift olmak üzere iki doğal sayı kategorisiyle, herhangi bir doğal sayıyı tam olarak bir sınıfa ait olarak sınıflandırabiliriz.

Bununla birlikte, birçok sınıflandırma işleminde sınıflandırma ayrımını tam olarak yapamadığımız durumlarla karşı karşıya kalmaktayız. Örneğin, uzun boylu adam, yüksek hız vb. kategorileri düşündüğümüzde bunların tümü, günlük yaşamımızda sıklıkla kullanırız ve bize anlam taşır. Ancak, belirli bir nesnenin böyle bir sınıfa ait olup olmaması arasındaki sınır belirgin değildir. Burada, bu durum sınıflarını belirlerken kullanılan iki değerli mantık tam olarak uygun değildir. Şekil 3.9’da klasik küme ve bulanık kümenin karşılaştırması gösterilmiştir.

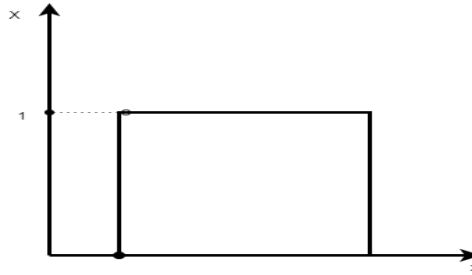


Şekil 3. 9. Klasik küme ve bulanık küme

Klasik kümede elemanın bir elemanın sadece belirlenen küme içerisinde olup olmadığı değerlendirilir. Örneğin bir x elemanı A kümesi içerisinde ise $x \in A$ A kümesi içerisinde değilse $x \notin A$ şeklinde ifade edilir. Denklem 3.1 de verilen şekilde tanımlanır. (Ross, 2010)

$$x_A = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \quad (3.1)$$

Burada x_A elemanın üyelik derecesini ifade eder. Klasik ikili mantığa göre üyelik derecesi 1 ise x A kümesinin elemanıdır ve 0 ise x A kümesinin elemanı değildir (Ross, 2010). Şekil 3. 10' klasik küme gösterilmiştir.



Şekil 3. 10. Klasik küme

Bulanık küme ise bir eleman küme içerisinde tamamen bulunabilir, hiç bulunmayabilir veya bir kısmı bulunabilir. Klasik kümeden farklı olarak üyelik dereceleri sadece 0 ya da 1 olmak zorunda değildir. Üyelik dereceleri $[0,1]$ aralığındaki sonsuz reel sayıdan oluşabilir. Bulanık kümelerde bir x elemanı A kümesinde hiç bulunmuyorsa üyelik derecesi $\mu_A(X) = 0$ ile tamamen bulunuyorsa $\mu_A(X) = 1$ ile ifade edilir. Eğer x elemanı A kümesinde kısmen bulunuyorsa üyelik derecesi $[0,1]$ aralığında bir değerle ifade edilir. Eğer bulanık küme ayrık zamanlı ise denklem 3.2'de verilen şekilde ifade edilir. (Ross, 2010)

$$A = \left\{ \frac{\mu_A(X_1)}{X_1} + \frac{\mu_A(X_2)}{X_2} + \dots \right\} = \left\{ \sum_i \frac{\mu_A(X_i)}{X_i} \right\} \quad (3.2)$$

Eğer bulanık küme sürekli zamanlı ise denklem 3.3'de verilen şekilde ifade edilir (Ross, 2010).

$$A = \left\{ \int \frac{\mu_A(X_i)}{X_i} \right\} \quad (3.3)$$

3.2.4. Bulanık kümelerdeki temel işlemler

Kesişim İşlemi

$$\mu_{A \cap B}(u) = \min(\mu_A(u), \mu_B(u)) \quad (3.4)$$

Birleşim İşlemi

$$\mu_{A \cup B}(u) = \max(\mu_A(u), \mu_B(u)) \quad (3.5)$$

Komplement İşlemi

$$\mu_A(u)^{-1} = 1 - \mu_A(u) \quad (3.6)$$

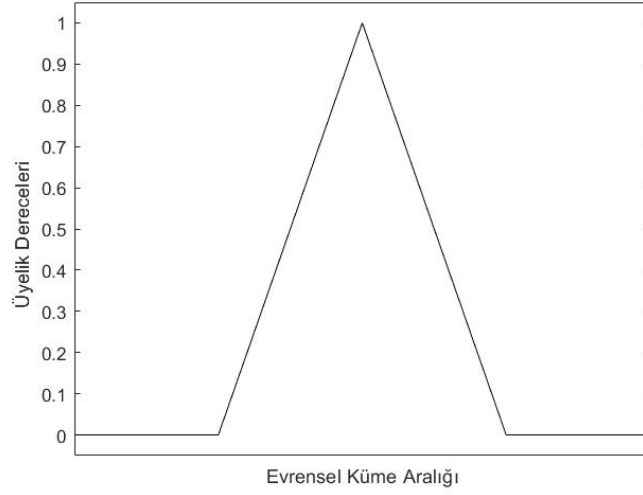
3.2.5. Üyelik fonksiyonları

Bulanık mantık denetleyicilerde giriş değerleri üyelik fonksiyonları tarafından işlenerek bölgelerin sınırlarının belirlenmesine ve üyelik derecelerine karar verilir. Bulanık mantık denetleyicilerde kullanılan üyelik fonksiyonları tek bir şekle sahip değildir. Tasarımcı tarafından birçok şekilde tercih edilebilirler. En yaygın kullanılan üyelik fonksiyonları: üçgen üyelik fonksiyonu, yamuk üyelik fonksiyonu, gauss üyelik fonksiyonu, sigmoid üyelik fonksiyonu ve çan eğrisi üyelik fonksiyonudur.

Üçgen üyelik fonksiyonu

Eşitlik 3.7 de üçgen üyelik fonksiyonuna ait eşitlik Şekil 3.11’de üçgen üyelik fonksiyonu gösterilmiştir.

$$\mu_A(x) = \mu_A(x; a_1, a_2, a_3) = \begin{cases} 0 & , & x < a_1 \text{ ve } x > a_3 \\ \frac{x-a_1}{a_2-a_1} & , & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3-x}{a_3-a_2} & , & a_2 \leq x \leq a_3 \end{cases} \quad (3.7)$$

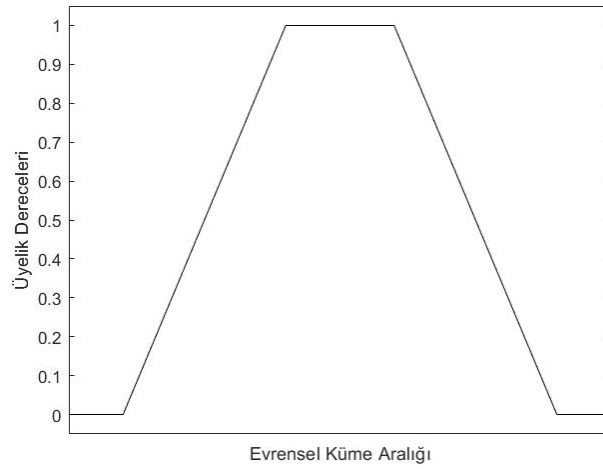


Şekil 3. 11. Üçgen üyelik fonksiyonu

Yamuk Üyelik Fonksiyonu

Yamuk fonksiyonuna ait eşitlik denklem 3.8’de ve yamuk üyelik fonksiyonu Şekil 3.12’de gösterilmiştir.

$$\mu_A(x; a_1, a_2, a_3, a_4) = \begin{cases} 0 & , \quad x < a_1 \text{ ve } x > a_4 \\ \frac{x-a_1}{a_2-a_1} & , \quad a_1 \leq x \leq a_2 \\ 1 & , \quad a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3-x}{a_3-a_2} & , \quad a_2 \leq x \leq a_3 \end{cases} \quad (3.8)$$

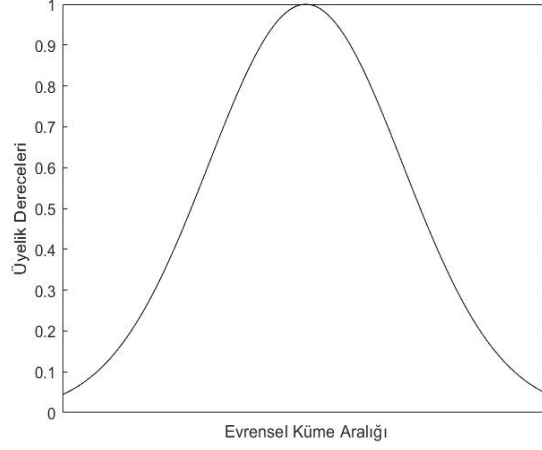


Şekil 3. 12. Yamuk üyelik fonksiyonu

Gauss Üyelik Fonksiyonu

Gauss üyelik fonksiyonuna ait eşitlik denklem 3.9'da ve gauss üyelik fonksiyonu Şekil 3.13'de gösterilmiştir.

$$\mu_A(x; m, \sigma) = e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.9)$$

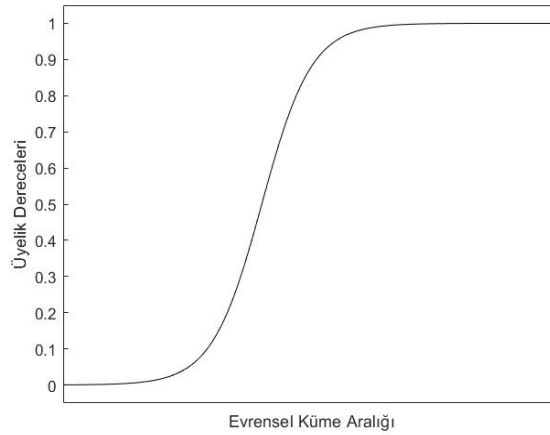


Şekil 3. 13. Gauss üyelik fonksiyonu

Sigmoid Üyelik Fonksiyonu

Sigmoid üyelik fonksiyonuna ait eşitlik denklem 3.10'da ve sigmoid üyelik fonksiyonu Şekil 3.14'de gösterilmiştir.

$$\mu_A(x; a_1, a_2) = \frac{1}{1+e^{-a_1(a_2-x)}} \quad (3.10)$$

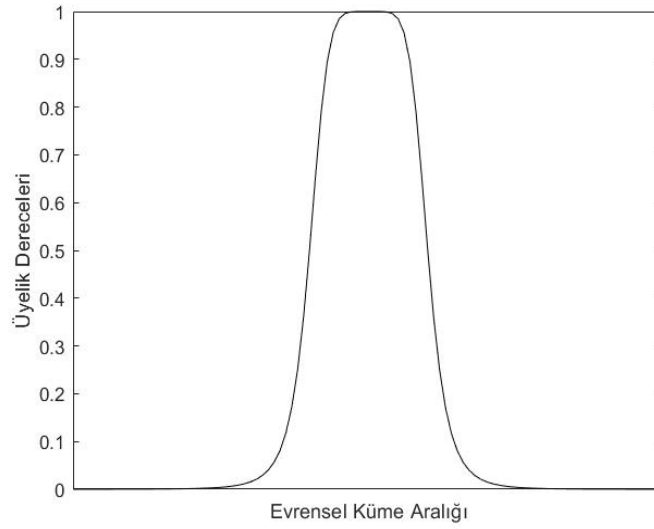


Şekil 3. 14. Sigmoid üyelik fonksiyonu

Çan Eğrisi Üyelik Fonksiyonu

Çan eğrisi üyelik fonksiyonuna ait eşitlik denklem 3.11'de ve çan eğrisi üyelik fonksiyonu Şekil 3.15'de gösterilmiştir.

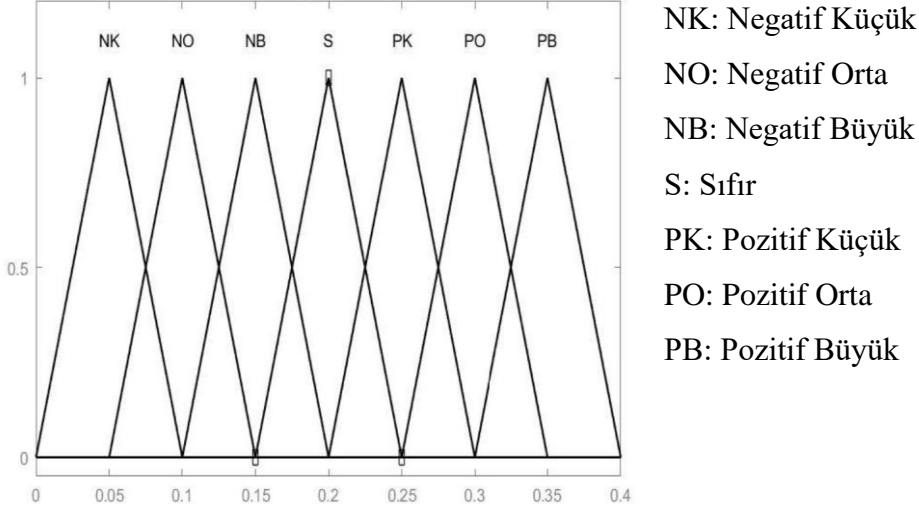
$$\mu_A(x; a_1, a_2, a_3) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-a_3}{a} \right|^{2a_2}} \quad (3.11)$$



Şekil 3. 15. Çan eğrisi üyelik fonksiyonu

3.2.6. Bulanıklaştırma

Bulanıklaştırma Bulanık Mantık Denetleyiciye giriş olarak uygulanan değişkenlerin dilsel değişkenlere dönüştürüldüğü birimdir. Burada giriş olarak uygulanan sayısal değişkenler tasarımcı tarafından seçilen bir üyelik fonksiyonu ile sınırlanarak üyelik dereceleri belirlenir. Örneğin Şekil 3.16'da giriş olarak 0.28 sayısal değeri verildiğinde bu değerın bulanıklaştırma işleminde bulanık kümedeki karşılığı PK (Pozitif Küçük)'de ki üyelik derecesi 0.2 olurken PO (Pozitif Orta)'da ki üyelik derecesi 0.8 olur. Bu şekilde sayısal girişler dilsel terimlere dönüştürülerek üyelik dereceleri belirlenir.

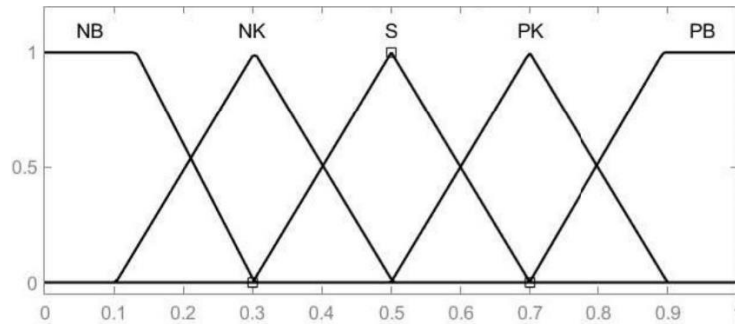


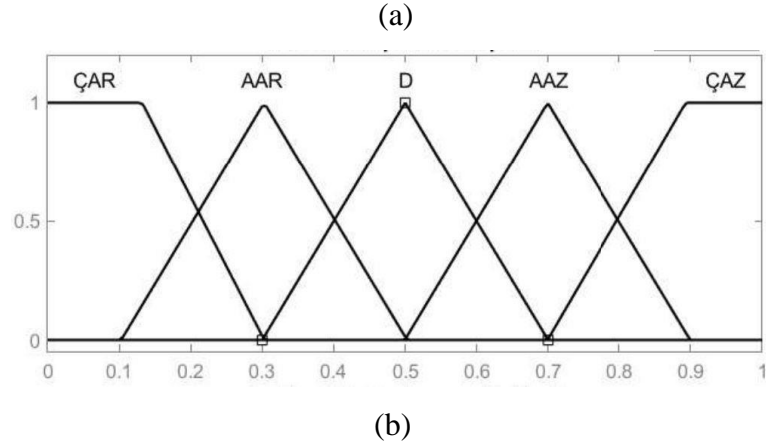
Şekil 3. 16. Bulanıklaştırma işlemi

3.2.7. Kural tabanı

Bir değişkenin herhangi bir bulanık kümeye ait olması durumu ve üyelik derecesi belirlendikten sonra nasıl bir yol izleneceği kurallarla belirlenir. Örneğin bir elektrik motorunun hız kontrolü uygulamasında motorun dönüş hızı hızlı, çok hızlı, yavaş, çok yavaş gibi bir bulanık kümeye ait olabilir. Bu durumda elektrik motorunun hızını arttır, azalt, çok arttır, gibi tasarımcının tecrübe ve konu hakkındaki uzmanlığına dayanan kurallar oluşturulur. Bu oluşturulan kurallar ile motorun dönüş hızı insanın düşünme sistemine benzer şekilde kontrol edilmeye çalışılır. Örneğin motor çok hızlı dönüyorsa çok azalt veya çok yavaş dönüyorsa çok arttır şeklinde kurallar uygulanır.

Şekil 3.17'de hata ve hatanın değişimine ait üyelik fonksiyonları ve çıkış üyelik fonksiyonları gösterilmiştir. Çizelge 3.3'de hata, hatanın değişimi ve çıkış üyelik fonksiyonlarına göre kurallar oluşturulmuştur.





Şekil 3. 17. (a) Hata ve hatanın değişimi üyelik fonksiyonları (b) Çıkış üyelik fonksiyonları

Çizelge 3. 3. Kural tablosu

e / de	NB	NK	S	PK	PB
NB	ÇAZ	ÇAZ	AAZ	AAZ	D
NK	ÇAZ	AAZ	AAZ	D	AAR
S	AAZ	AAZ	D	AAR	AAR
PK	AAZ	D	AAR	AAR	ÇAR
PB	D	AAR	AAR	ÇAR	ÇAR

Hata ve hatanın değişimi üyelik fonksiyonlarında NB (negatif büyük), NK (negatif küçük), D (sıfır), PK (pozitif küçük), PB (pozitif büyük) kavramlarını ifade ederken çıkış üyelik fonksiyonunda ise ÇAR (çok artır), AAR (az artır), D (değiştirme), AAZ (az azalt), ÇAZ (çok azalt) kavramlarını ifade etmektedir.

3.2.8. Bulanık çıkarım (bulanık karar verme)

Bulanık çıkarım işlemi bulanıklaştırma işlemi sonucunda bulanık değerlere dönüştürülen giriş değerlerinin kural tabanından gelen kurallara göre bulanık operatörler yardımıyla işlenerek çıkarım yapılması işlemidir. Literatürde birçok farklı bulanık çıkarım yöntemi bulunmaktadır. Bunlardan bazıları Mamdani, Takagi-Sugeno, Larsen ve Tsukamoto bulanık çıkarım yöntemleridir.

Ancak en yaygın olarak kullanılan Mamdani ve Takagi-Sugeno bulanık çıkarım yöntemleridir.

Mamdani Bulanık Çıkarım Yöntemi

En çok tercih edilen bulanık çıkarım yöntemlerinden birisidir. Bunun ana nedeni insanın düşünce sistemine daha uygun olması ve diğer yöntemlere göre daha kolay tasarlanabilmesidir. Mamdani yönteminde eğer-ise (if-then) şeklinde kurallar oluşturularak bu kurallara göre çıkarım yapılır. Tasarımcı tarafından oluşturulan bu kurallar dizisi en kritik role sahiptir. Bu yöntemde giriş ve çıkış değişkenleri bulanık değerlerdir. Bu yüzden hem bulanıklaştırma hem de durulama aşamalarına da ihtiyaç duyulmaktadır (Mamdani ve Assilian, 1975).

Mamdani yönteminde max-min ve max-product operatörleri kullanılmaktadır. Bu yöntemde öncelikli olarak giriş değerleri bulanıklaştırılır ve üyelik dereceleri belirlenir. Mamdani yöntemi 3 aşamadan oluşur. 1. aşama da giriş değişkenleri bulanıklaştırılarak üyelik dereceleri belirlenir. 2. aşama da elde edilen değişkenler min operatörüne tabi tutulur ve daha sonra elde edilen bulanık değerlerin max operatörü ile birleşimi alınır. 3. aşama da durulaştırma işlemi yapılır (Mamdani ve Assilian 1975 ; Babuška, 2012).

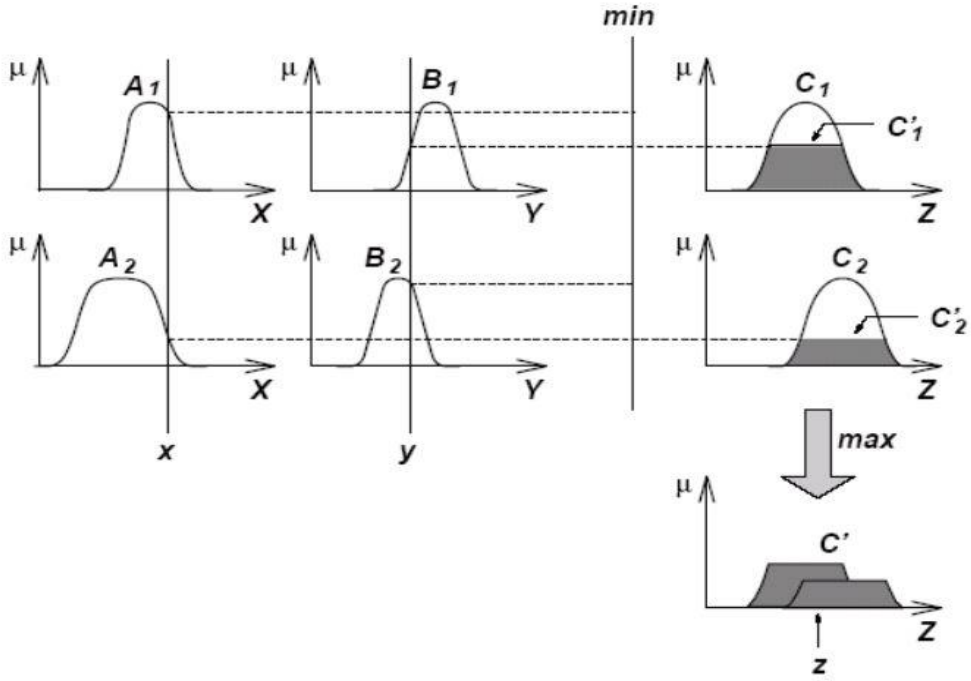
Şekil 3.18 ve Şekil 1.19'da Mamdani bulanık çıkarım yöntemi grafiksel olarak gösterilmiştir.

Bu işlemden sonra elde edilen bulanık giriş değerleri denklem 3.12'de verildiği gibi min (minimum) operatöründen geçirilirler. Burada i kural sayısını ifade etmektedir.

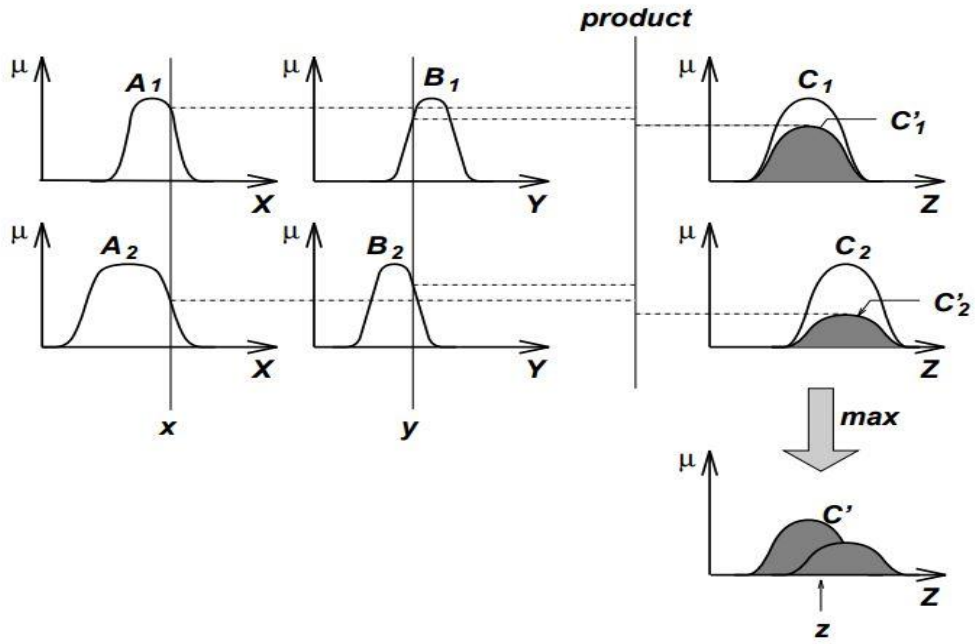
$$\mu_{C_i} = \min\{\mu_{A_i}, \mu_{B_i}\} \quad i:1,2,\dots,n \quad (3.12)$$

Bu işlem her kural için tek tek uygulanır. Daha sonra min operatöründen geçirilerek elde edilen bulanık değerler denklem 3.13'de ki gibi max (maksimum) operatöründen geçirilerek birleşimlerinin alınması işlemi yapılır.

$$\mu_C = \max\{\mu_{C_i}\} \quad (3.13)$$



Şekil 3. 18. Mamdani Bulanık Çıkarım Yöntemi(max-min) (Jang ve Sun, 1995)



Şekil 3. 19. Mamdani bulanık çıkarım yöntemi(max-product) (Jang ve Sun, 1995)

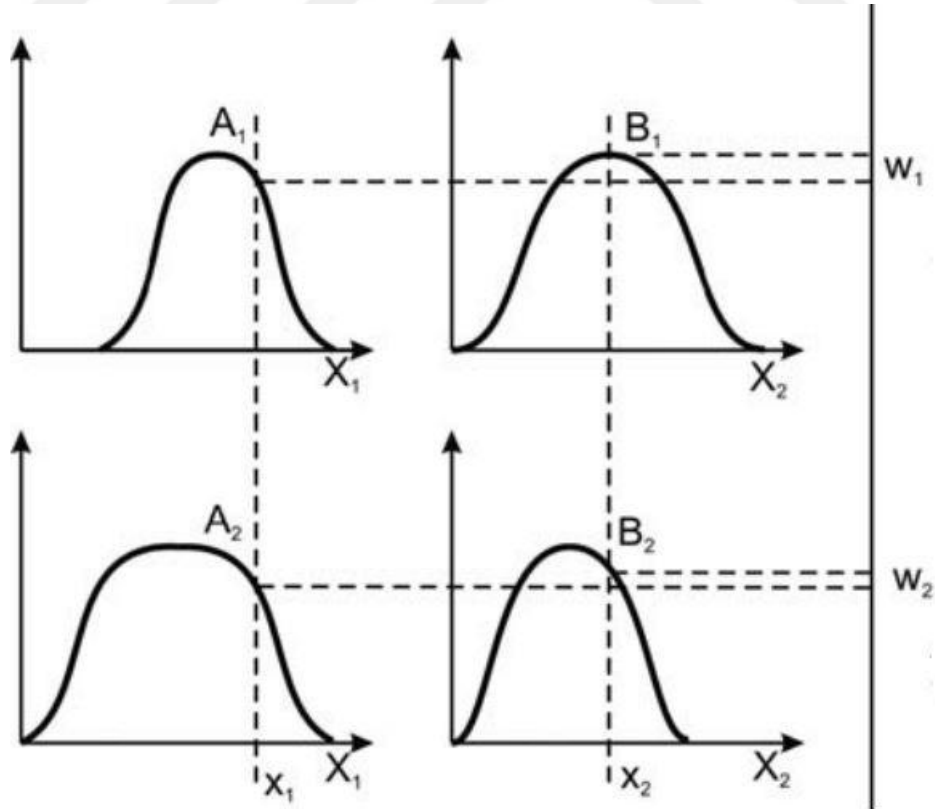
Daha sonra max operatöründen geçilerek elde edilen değerler bulanık değerler olduğu için durulaştırma(netleştirme) işlemi uygulanır.

Takagi-Sugeno Bulanık Çıkarım Yöntemi

Takagi-Sugeno bulanık çıkarım yöntemi ilk olarak 1985 yılında ortaya koyulmuş bir yöntemdir. Mamdani bulanık çıkarım yönteminin bir türevi olarak adlandırılabilir. Bulanıklaştırma ve bulanık işlemlerin uygulanması Mamdani yöntemi ile aynıdır. Mamdani bulanık çıkarım yönteminden farklı olarak Takagi-Sugeno bulanık çıkarım yönteminin çıkışı bulanık sayılar değil bir polinomdur. Genel ifadesi denklem 3.14'de ki gibi gösterilir. Burada x_1 ve x_2 giriş değişkenlerini x_3 ise çıkış değişkenlerini ifade etmektedir. A ve B ise giriş için tanımlanan bulanık kümelerdir. Çıkış fonksiyonu sabit sayı olması durumunda 0. Derece ve 1. derece doğru denklemi olması durumunda ise 1. Derece Takagi-Sugeno bulanık çıkarım yöntemi olarak isimlendirilir (Takagi ve Sugeno, 1985).

$$\text{Eğer } x_1 = A \text{ ve } x_2 = B \text{ ise } f = f(x, y) \quad (3.14)$$

Takagi-Sugeno bulanık çıkarım yöntemi Şekil 3.20'de gösterilmiştir. Denklem 3.15, 3.16 ve denklem 3.17' çıkış değişkeninin hesaplanması verilmiştir.



Şekil 3. 20. Takagi-sugeno bulanık çıkarım yöntemi (Kovac ve Bauk, 2006)

$$f_1 = p_1x_1 + q_1x_2 + r_1 \quad (3.15)$$

$$f_2 = p_2x_1 + q_2x_2 + r_2 \quad (3.16)$$

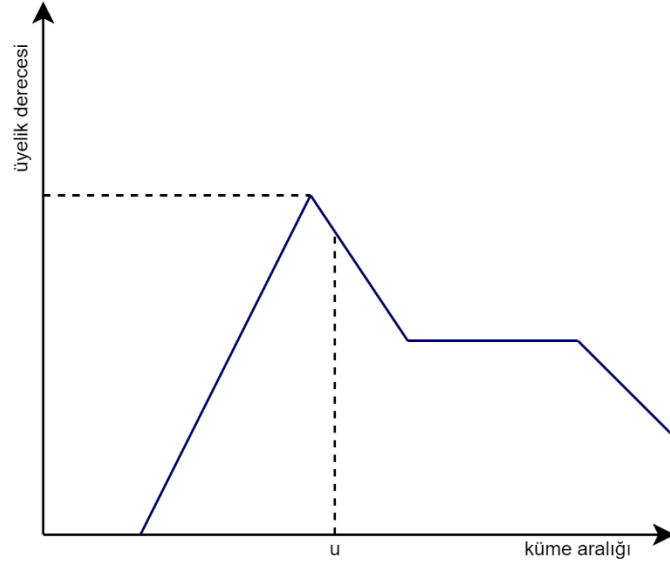
$$f = \frac{w_1f_1 + w_2f_2}{w_1 + w_2} \quad (3.17)$$

3.2.9. Durulaştırma

Durulaştırma işlemi BMD'ye giriş olarak gelen keskin giriş değerlerinin bulanıklaştırılıp bulanık küme operatörleri ve kurallar tarafından işenerek bir çıkarım yapılmasıdır. Yapılan bu çıkarımın sonuçlarının kontrol sinyali olarak kullanılabilmesi için yapılan işleme durulaştırma (netleştirme) denir. Farklı çıkarım yöntemlerine göre farklı durulaştırma yöntemleri uygulanabilir. Literatürde en çok kullanılan durulaştırma yöntemleri ise Ağırlık merkezi, maximum üyelik, ortalama maximum üyelik ve ağırlıklı ortalama durulaştırma yöntemleridir.

Ağırlık Merkezi Durulaştırma Yöntemi

Üyelik fonksiyonundaki üyelik derecelerinin ortalamasına denk gelen üyelik değerini veren yöntemdir. Şekil 3.21'de ağırlık merkezi durulaştırma yöntemi grafiksel olarak gösterilmiştir. Keskin çıkış değeri u denklem 3.18'de verildiği gibi ayrık zamanlı olarak ve denklem 3.19'da verildiği gibi sürekli zamanlı olarak ifade edilir.



Şekil 3. 21. Ağırlık merkezi durulaştırma yöntemi

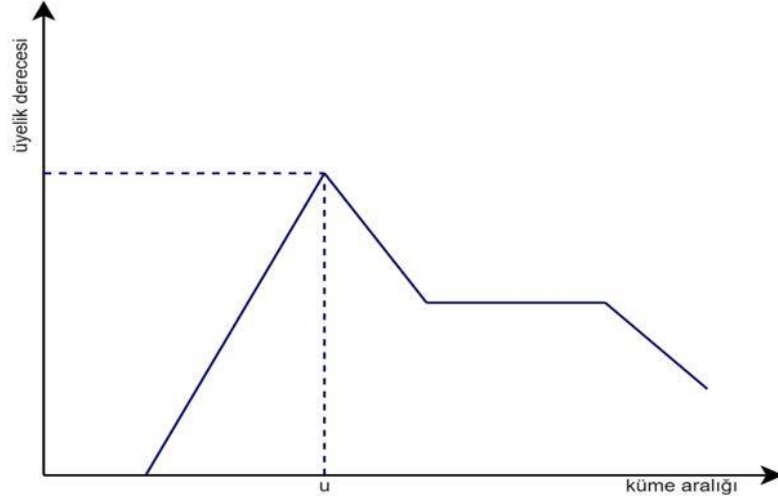
$$u = \frac{\sum_i \mu(x_i)x_i}{\sum_i \mu(x_i)} \quad (3.18)$$

$$u = \frac{\int_a^b \mu(x_i)x_i du}{\int_a^b \mu(x_i) du} \quad (3.19)$$

Burada $\mu(x_i)$ üyelik derecesi ve u çıkış değeridir.

Maximum Üyelik Durulaştırma Yöntemi

Üyelik fonksiyonundaki maksimum üyelik derecesine sahip üyelik değerini veren yöntemdir. Şekil 3.22'de maksimum üyelik durulaştırma yöntemi grafiksel olarak gösterilmiştir. Denklem 3.20'de ki gibi ifade edilir.



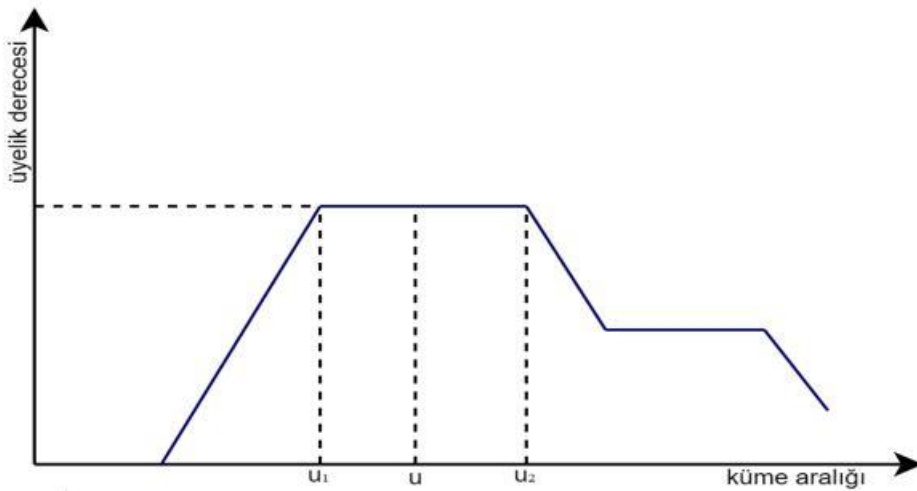
Şekil 3. 22. Maximum üyelik durulaştırma yöntemi

$$u = \max (\mu(x) \quad , \quad x \in Z \quad \quad \quad (3.20)$$

Burada $\mu(x)$ üyelik derecesi ve u çıkış değeridir.

Ortalama Maximum Üyelik Durulaştırma Yöntemi

Üyelik fonksiyonunda birden fazla maksimum üye olması durumunda maksimum üyelik derecelerinin ortalamasını alarak sonuç üreten yöntemdir. Şekil 3.23’de ortalama maksimum üyelik durulaştırma yöntemi grafiksel olarak gösterilmiştir. Denklem 3.21’de gösterilen şekilde ifade edilir.



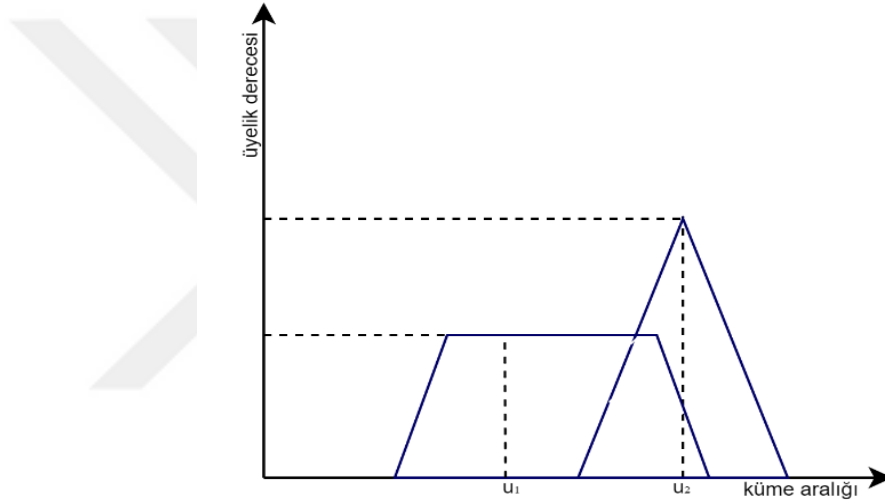
Şekil 3. 23. Ortalama maksimum üyelik durulaştırma yöntemi

$$u = \frac{\mu(x_1)+\mu(x_2).....+\mu(x_n)}{n} \quad \quad \quad (3.21)$$

Burada $\mu(x_n)$ üyelik fonksiyonlarını, u çıkış değerini ve n maksimum değere sahip üyelik fonksiyonlarının sayısını ifade etmektedir.

Ağırlıklı Ortalama Durulaştırma Yöntemi

Üyelik fonksiyonları simetrik olduğunda kullanılabilen bu yöntemde maximum üyelik dereceleri ve o üyelik derecelerine karşılık gelen değerlerin çarpımlarının toplamının üyelik değerlerinin toplamına bölümü ile bulunur. Şekil 3.24’de ağırlıklı ortalama durulaştırma yöntemi grafiksel olarak gösterilmiştir. Denklem 3.22’de verildiği gibi ifade edilir.



Şekil 3. 24. Ağırlıklı ortalama durulaştırma yöntemi

$$u = \frac{\sum_i \mu(x_i)x_i}{\sum_i \mu(x_i)} \quad (3.22)$$

Burada $\mu(x_i)$ üyelik derecesi x_i üyelik derecesine karşılık gelen değer ve u çıkış değeridir.

3.2.10. Bulanık mantık denetleyici avantajları ve dezavantajları

Bulanık mantık denetleyiciler günümüzde artan teknolojik gelişmeler ve daha yüksek doğruluğa sahip kontrol ihtiyacından dolayı oldukça yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bunun ana nedeni olarak aşağıda gösterilen avantajları sayılabilir.

Avantajları

- Bulanık mantık denetleyiciler insanın düşünce yapısına oldukça uygun olması ve insanın karar verme sürecini kontrol edilmek istenen sisteme uygulamak için oldukça önemli bir araç olması.
- Kolay anlaşılabilir ve basit bir kontrol yapısına sahip olması.
- Kontrol edilen sisteme dışarıdan etki eden bozuculara duyarlılığının yüksek olması.
- Gürültü seviyesi yüksek girişlerde bile başarılı bir kontrol sağlaması.
- Tasarımcı tarafından giriş ve çıkışları istenilen sayılarda ayarlanabilmesi.
- BMD kural tabanlı çalıştığı için kuralları oluşturmanın pid kontrolörün parametrelerini optimize etmekten nispeten daha kolay olması.
- Çok yüksek hassasiyetli sensörler gerektirmemesi ancak bu sensörlerin sağlayacağı avantajı insan sezgilerine benzer yapısı sayesinde telafi edebilmesi.
- Doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde geleneksel kontrol yöntemlerine göre daha yüksek doğruluğa sahip olması ve tasarımlarının daha kolay yapılabilmesi.
- Kapsamlı bir şekilde kullanılacak toolbox ve entegre devrelerinin mevcut olması.
- Sistem kontrolünde eksik bilgiyle bile doğru kontrol yapabilmesi.

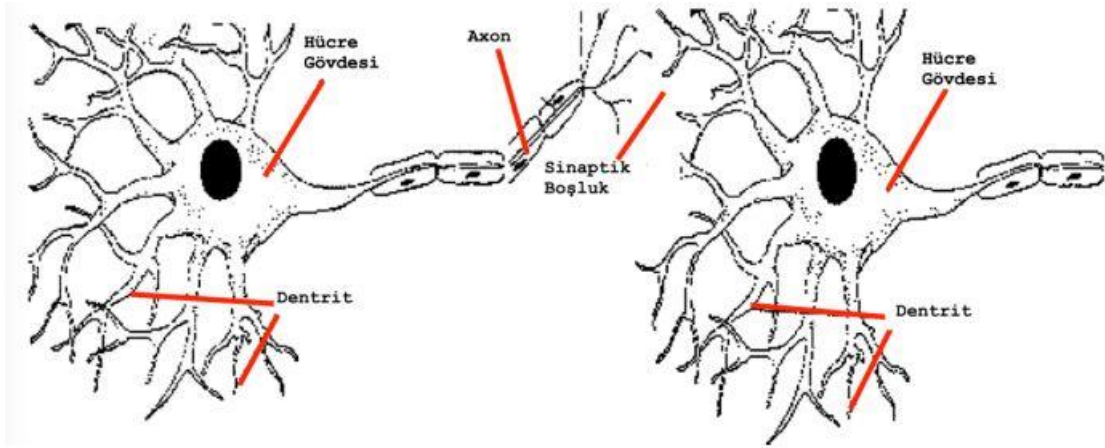
Dezavantajları

- Kontrol edilmek istenen tam olarak tanınmıyorsa sistem kararlılığını sağlamak oldukça zordur.
- Bulanık kurallar bazen tutarsız ve uyumsuz olabilmektedir.
- Karmaşık sistemlerde bulanıklaştırma ve durulaştırma uzun zaman alabilir.

3.3.Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları (YSA) insanın düşünce sistemine benzer bir sistem oluşturabilmek için insan öğrenmesini ve insan beyinde gerçekleşen nörolojik süreçleri taklit eden bir yapay zeka yaklaşımıdır (Livingstone, 2008). Yapay sinir ağlarının yapısında oluşturulan nöronlar biyolojik nöronların matematiksel olarak modellenmesiyle oluşturulmuş yapılardır. Biyolojik nöronlar insanlarda biyolojik sinir ağlarının temel yapı taşı olarak kabul edilirler (Bartheld ve ark.,2016). Biyolojik bir nöron temel olarak 3 ana bileşenden meydana gelir bunlar aksonlar, dendritler ve hücre gövdesidir. Sinir ağlarında iletim şekli

olan elektriksel sinyaller, dendrit uçlarındaki sinirler tarafından alınır ve hücre gövdesi aracılığıyla akson terminallerine iletilir. Verici nöronun akson terminali ile alıcı nöronun dendrit terminalleri arasındaki bağlantı yerlerine sinaps denir. Bu nöronların milyonlarcasının bu şekilde birbirine bağlanması ile biyolojik sinir ağları meydana gelir (Purves, 2008). Şekil 3.25’ de biyolojik sinir hücresi gösterilmiştir.



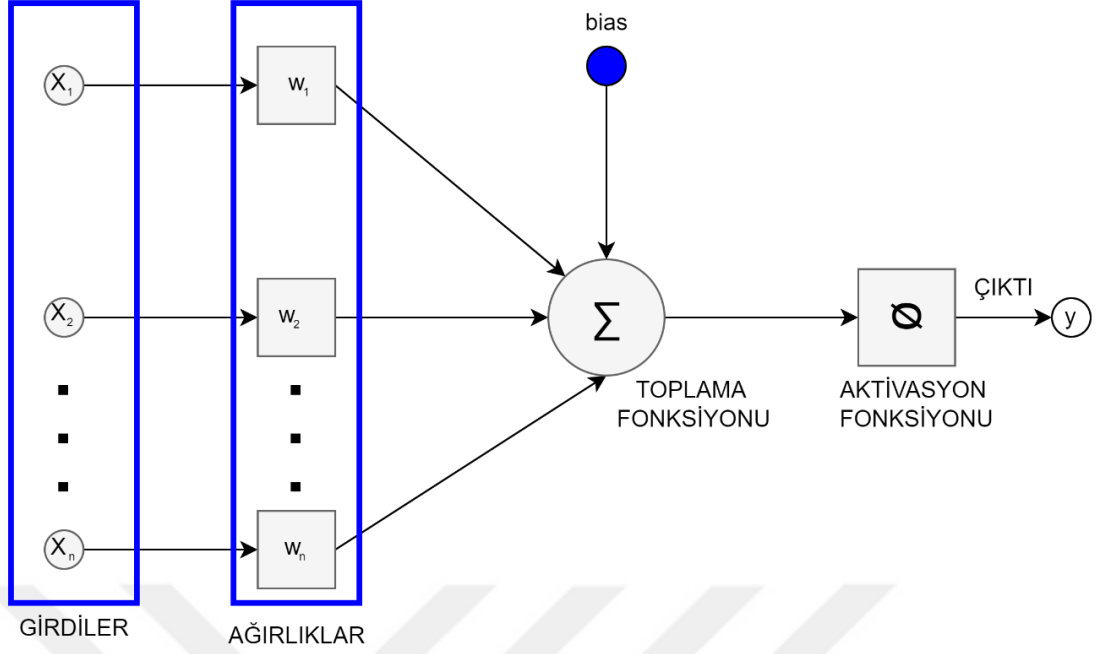
Şekil 3. 25. Biyolojik sinir hücresi (Levitan ve Kaczmarek, 2015)

Yapay bir sinir hücresi modeli ele alındığında biyolojik bir sinir hücresi ile oldukça benzerlik gösterdiği görülür. Şekil 3.26’da yapay sinir hücresinin yapısı gösterilmektedir. Yapay bir sinir hücresi girişler, çıkış, toplama ve aktivasyon fonksiyonu ile ağırlıklardan oluşmaktadır. Biyolojik sinir ağları ile karşılaştırıldığında

Dendritler —→ girişlere

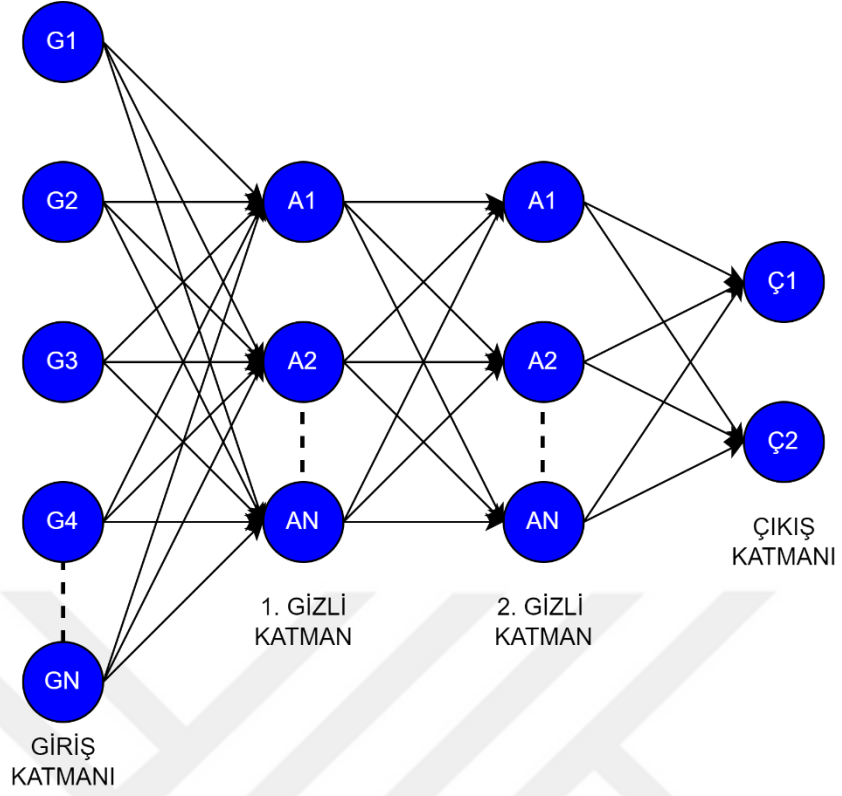
Çıkış —→ aksona

Sinapslar —→ ağırlıklara karşılık gelmektedir.



Şekil 3. 26. Yapay sinir hücresi

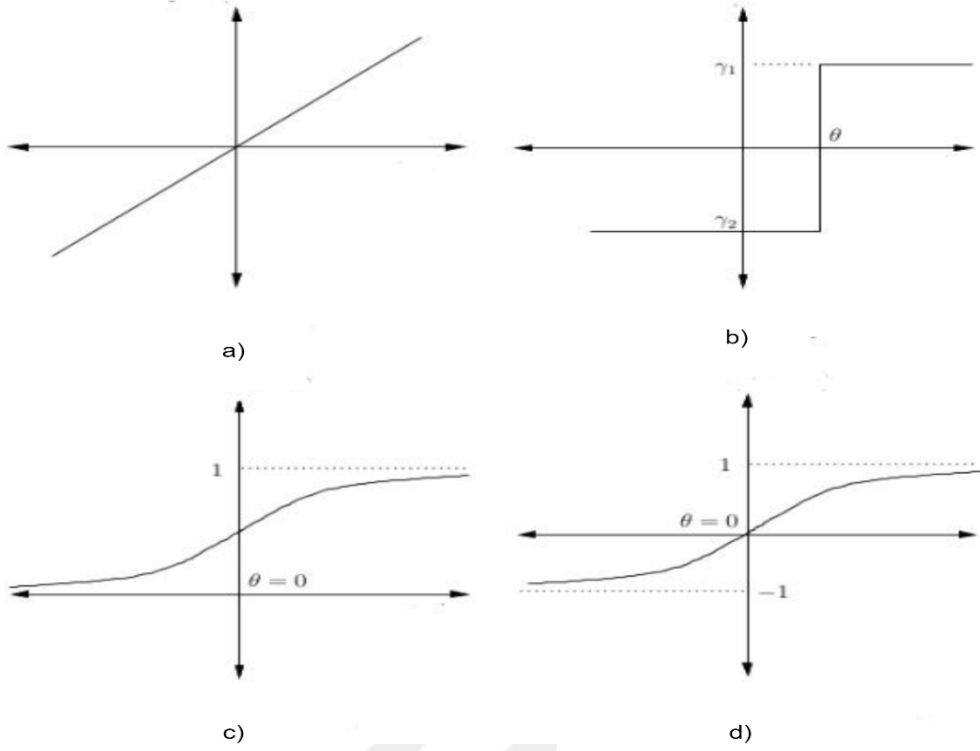
Bir YSA sisteminde, veriler sisteme girdi olarak sunulur ve her bir giriş ağırlıklar (w), eşik değeri ya da bias (b) ve aktivasyon fonksiyonu (f) ile karakterize edilir. Bir yapay sinir hücresine gelen her girdi, gücünü ve dolayısıyla sonraki sinir hücrelerine katkısını belirleyen ağırlık faktörüne sahiptir. Bu ağırlıklar, öğrenme aşamasında sürekli olarak değiştirilir. Genellikle istenilen çıkış değerine ulaşmak için tek bir yapay sinir hücresi yeterli olmamaktadır. Bu yüzden birçok hücrenin birbirine bağlanması ile çok katmanlı ağ yapıları oluşturulur (Feng ve ark.,2015). Şekil 3.27’de çok katmanlı bir yapay sinir ağı gösterilmiştir.



Şekil 3. 27. Çok katmanlı yapay sinir ağı

3.3.1. Aktivasyon fonksiyonları

Aktivasyon fonksiyonları transfer fonksiyonu olarak da isimlendirilmektedirler. Birçok farklı doğrusal veya doğrusal olmayan aktivasyon fonksiyonu vardır. Her aktivasyon fonksiyonunun kendisine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Sistemin yapısına göre uygun aktivasyon fonksiyonu tercih edilir. Aktivasyon fonksiyonu oldukça önemli çıkışı doğrudan etkileyen bir parametredir. Literatürde en çok kullanılan aktivasyon fonksiyonları Şekil 3.28’de gösterilmiştir. Denklem 3.23, 3.24, 3.25 ve 3.26 de bu transfer fonksiyonlarına ait eşitlikler verilmiştir.



Şekil 3. 28. a) Doğrusal fonksiyon b) Basamak fonksiyonu c) Sigmoid fonksiyon
d) Hiperbolik tanjant fonksiyonu

$$f(x) = x \quad (3.23)$$

$$f(x) = \begin{cases} \gamma_2, & x < \theta \\ 0 & x = \theta \\ \gamma_1, & x \geq \theta \end{cases} \quad (3.24)$$

$$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (3.25)$$

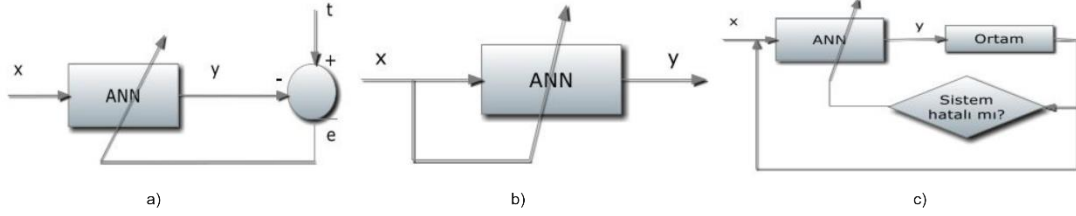
$$f(x) = \frac{1}{1 + e^x} \quad (3.26)$$

3.3.2. Yapay sinir ağlarının sınıflandırılması

Yapay sinir ağları yapıları ve öğrenme yöntemleri olarak farklılıklar göstermektedirler. Bu yüzden yapay sinir ağlarını yapılarına ve öğrenme süreçlerine göre sınıflandırmak mümkündür.

3.3.2.1.Öğrenme yöntemlerine göre YSA sınıflandırılması

Yapay sinir ağları denetimli öğrenme denetimsiz öğrenme ve takviyeli öğrenme olarak 3 sınıfta incelenebilirler. Şekil 3.29'da Öğrenme yöntemleri gösterilmiştir.



Şekil 3. 29. Öğrenme yöntemleri a) Denetimli öğrenme b) Denetimsiz öğrenme c) Takviyeli öğrenme (Koçak , 2022)

Denetimli öğrenme

Denetimli öğrenme yönteminde, YSA, giriş ve çıkışta istenilen veri setleri ile ağı eğitmek için sistem bilgisini kullanan bir tasarımcının denetimi altındadır. Böylece, yapay sinir ağları giriş olarak aldığı veri kümelerini kullanarak ve çıkışta istenilen veri kümesine ulaşmayı hedefler. Elde edilen çıktı verilerini istenilen veri kümesiyle karşılaştırarak hatayı hesaplar. Oluşan hatayı azaltmak ve performansı iyileştirmek için yapay sinir ağının yapısında bulunan ağırlıkları sürekli olarak değiştirir. Ağırlık değişimleri ihmal edilebilir seviyelerde olduğunda YSA'nın öğrenme işlemi gerçekleşmiş olur.

Denetimsiz öğrenme

Denetimsiz öğrenme yönteminde YSA çıkış veri seti gerektirmez yalnızca giriş veri seti sunulur. Bu yöntem, sistem bilgisinin olmadığı veya bu bilgiyi edinmenin maliyetinin çok yüksek olduğu durumlarda daha çok tercih edilir. Denetimsiz öğrenmede adından da anlaşılacağı gibi YSA bir tasarımcının denetimi altında değildir. YSA ya sadece giriş veri kümeleri sağlanır ve verilerdeki kalıpları keşfetmeye ve ondan yeni bir model oluşturmaya bırakılır. Bu durumda, YSA, giriş veri kümeleri arasındaki ayrımı yaparak verilerin nasıl düzenleneceğini bulur ve bir çıkış verisi üretir.

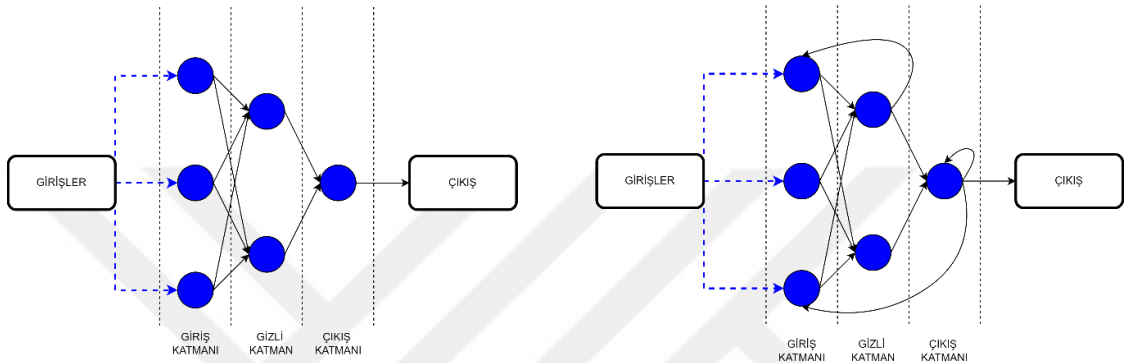
Takviyeli Öğrenme

Bu öğrenme yönteminde bir danışman bulunur ancak YSA ya danışmanlı öğrenmede olduğu kadar çok bilgi vermez yada veremez. Bunun yerine YSA bulunduğu ortamı kendisi tanımaya çalışarak kararlar alır. Danışman bu kararların doğruluğuna göre ceza ya da ödül verir. Böylece YSA aldığı kararların istenilen duruma uygun olup olmadığını

öğrenir ve bunu hatırlayarak daha sonra alacağı kararlar için kullanarak öğrenme yeteneğini geliştirir (Haykin, 2009).

3.3.2.1. Yapılarına göre yapay sinir ağlarının sınıflandırılması

Yapay sinir ağları yapılarına göre ileri beslemeli yada geri beslemeli olarak sınıflandırılabilirler. Şekil 3.30'da ileri beslemeli ve geri beslemeli ağının yapısı görülmektedir.



Şekil 3. 30. Ağ yapıları a) İleri beslemeli ağ b) Geri beslemeli ağ (Saatçioğlu ve Özçakar, 2016)

İleri beslemeli Ağlar

İleri beslemeli ağ yapısı sadece ileri yönlü olarak sinyal aktarımına izin verirler. İleri beslemeli ağlar katmanlar halinde organize edilirler ve her hücrenin oluşturduğu çıkış sinyali sonraki hücreye giriş sinyali olarak uygulanır. Giriş katmanı kendinden önceki hücreden aldığı sinyali üzerinde değişiklik yapmadan ara katmana iletir. Sinyal ara ve çıkış katmanlarında işlenerek hücrenin çıkış sinyali oluşur. Tek katmanlı algılayıcılar çok katmanlı algılayıcılar ve radyal ağlar ileri beslemeli ağlardandır.

Geri Beslemeli Ağlar

Geri beslemeli ağlar aynı zamanda tekrarlayan ağlar olarakta bilinirler. Geri beslemeli ağlarda sinyal ileri ya da geri doğru iletilebilir. En az bir tane geri besleme döngüsü olan ağlar geri beslemeli ağlar olarak adlandırılırlar (Haykin, 2009). Ağlardaki geri besleme döngüsü hücreler arasında, hücrenin kendisine ya da katmanlar arasında olabilir ve geri besleme genellikle bir geciktirme elemanı kullanılarak gerçekleştirilir. Bu geri besleme döngülerindeki farklılıklardan dolayı farklı yapılarda geri beslemeli ağlar oluşturulabilir.

3.3.3. Yapay sinir ağlarının avantaj ve dezavantajları

Avantajları

- Eksik olan bilginin önem derecesine de bağlı olarak yapay sinir ağları eksik bilgi ile çalışarak doğru kararlar verebilir.
- Yapay sinir ağları nesnelere kaotik dağılımına rağmen doğru kararlar verebilir ve nesnelere sınıflandırabilirler.
- Yapay sinir ağlarının hata toleransları yüksektir.
- Yapay sinir ağları olayları öğrenme yeteneğine sahiptir ve benzer olaylar hakkında da doğru karar verebilirler.
- Yapay sinir ağları paralel işlem yapabilme yetenekleri sayesinde aynı anda birden fazla işlem gerçekleştirerek hızlı karar verebilirler.
- Yapay sinir ağlarının sisteme dışardan gelen gürültülere karşı toleransı oldukça düşüktür.
- Yapay sinir ağının bir veya birden fazla hücrelerinde sorun oluşsa bile geri kalan ağ yapısı doğru kararlar verebilirler.

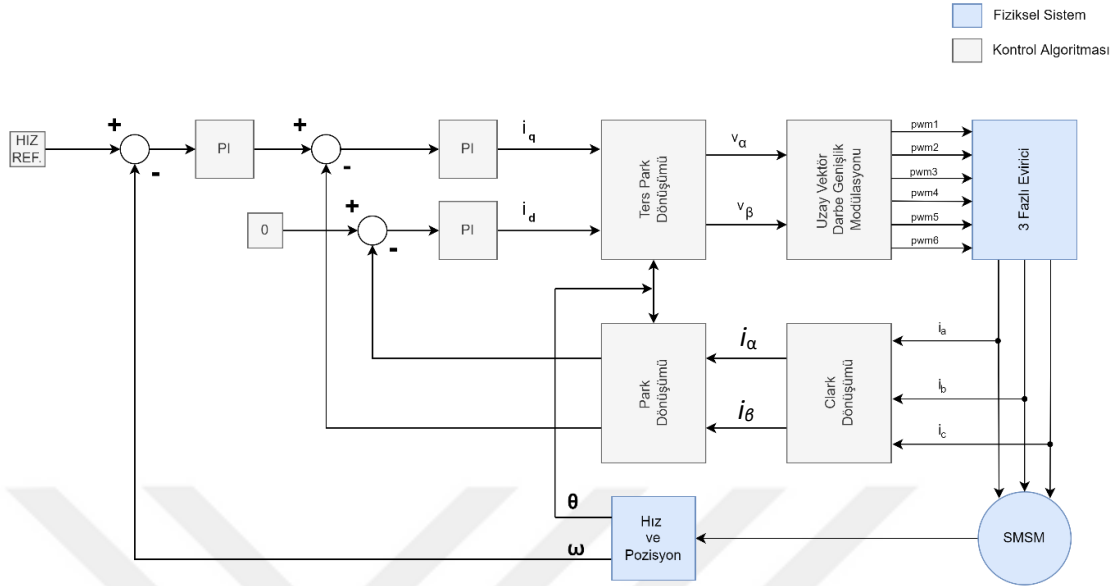
Dezavantajları

- Yapay sinir ağları paralel yapılarından dolayı yüksek işlem hızına sahiptirler ve bu işlem hızına ulaşabilecek donanımlara ihtiyaç duyarlar.
- Yapay sinir ağları bir karar verdiğinde bu kararı neden verdiğine dair bir ipucu vermez ve bu da ağa olan güveni azaltır.
- Yapay sinir ağlarının ağ yapılarını belirlemek için belirli bir kural yoktur. Uygun ağ yapısını belirlemek uzmanlık ve tecrübe gerektirir.
- Yapay sinir ağları sayısal değişkenlerle çalışmaktadırlar. Çözümü istenen problem ağa tanıtılmadan önce sayısal değişkenlere dönüştürülmelidir.

3.4.Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Alan Yönlendirmeli Kontrolü

AYK yüksek performanslı motor kontrolü, motorun geniş bir hız aralığında düzgün dönüş sağlaması, düşük hızlarda etkin tork kontrolü ve hızlı hızlanma veya yavaşlama gibi avantajlar sağlar. Çok çeşitli hızlarda değişen yük ile ayarlanabilir hızlı sürücü uygulamalarında SMSM'yi kontrol etmek için oldukça etkili bir yöntemdir (Bhardwaj,

2013). Şekil 3.31’de SMSM’nin Alan Yönlendirmeli Kontrolünün genel blok diyagramı gösterilmiştir.



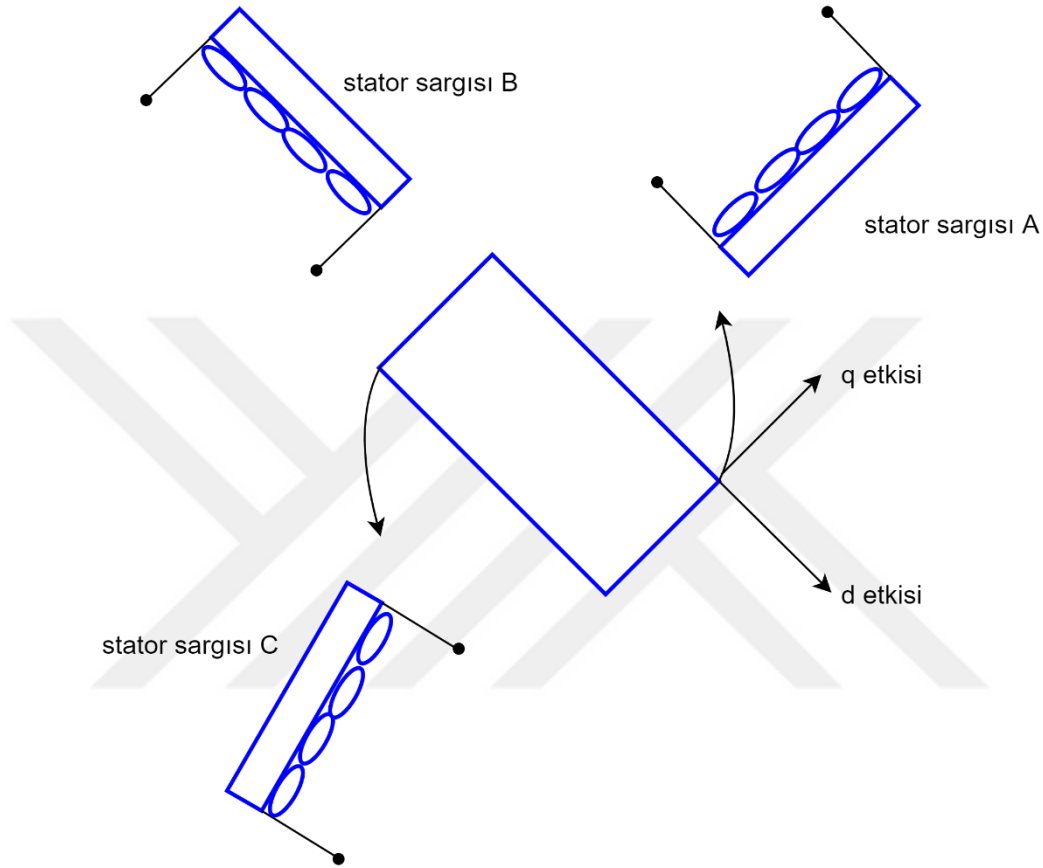
Şekil 3. 31. SMSM Alan Yönlendirmeli Kontrol Genel Blok Diyagramı

Alan yönelimli kontrol üç fazlı akımı kontrol ederek statorun manyetik alanının rotorun oluşturduğu manyetik alana dik olmasını sağlamaktır. Bu işlemi gerçekleştirmek için öncelikli olarak rotorun konum bilgisini ölçmek ve ardından istenen yönde bir alan oluşturmak için üç fazlı bir akımı indüklemek gerekir. Üç fazlı akımı Clark dönüşümü ile 2 fazlı $\alpha\beta$ eksen takımına indirmek daha sonra ise Park dönüşümü ile dq eksen takımına dönüştürmek gerekir. d eksen ile q eksen birbirlerine diktir. Burada q , maksimum tork katkısı sağlayan istenen yöndür d ise kalıcı mıknatıs tarafından oluşturulan manyetik alanla aynı yönde bir manyetik alan oluşturur ve bu nedenle bir tork katkısı sağlamaz. Bu durum denklem 3.27’de motorun tork ifadesine bakıldığında da görülür. Bu eksen değişimleri için uygulanan Clarke ve Park dönüşümleri θ açısı yardımıyla yapılır ve rotorla birlikte dönen d ve q eksenlerinde üç fazlı manyetik alanın toplamına eşittir (Amin ve ark, 2019).

$$T_e = \frac{3p}{2} [\lambda_m i_q] \quad (3.27)$$

Yönelimli Kontrol, bir DC motorun yanıt verebilirliğini elde etmek için tork üreten akımı manyetik akı üreten akımdan ayrı olarak kontrol etmek için bu bileşenleri AC makinelerde yeniden oluşturmayı hedefler. AYK kontrollü makinelerin giriş referansları

olarak iki sabite ihtiyacı vardır. Bunlar q eksenini doğrultusunda tork bileşeni ve d eksenini doğrultusunda akı bileşenidir. SMSM’de en yüksek tork değerini elde etmek için rotor alanı ile stator alanı birbirine dik olmalıdır ve q istenen torka göre ayarlanırken d sıfır olmalıdır. Bu alanların uyguladığı d ve q kuvvetleri şekil 3.32’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 32. d ve q kuvvetleri

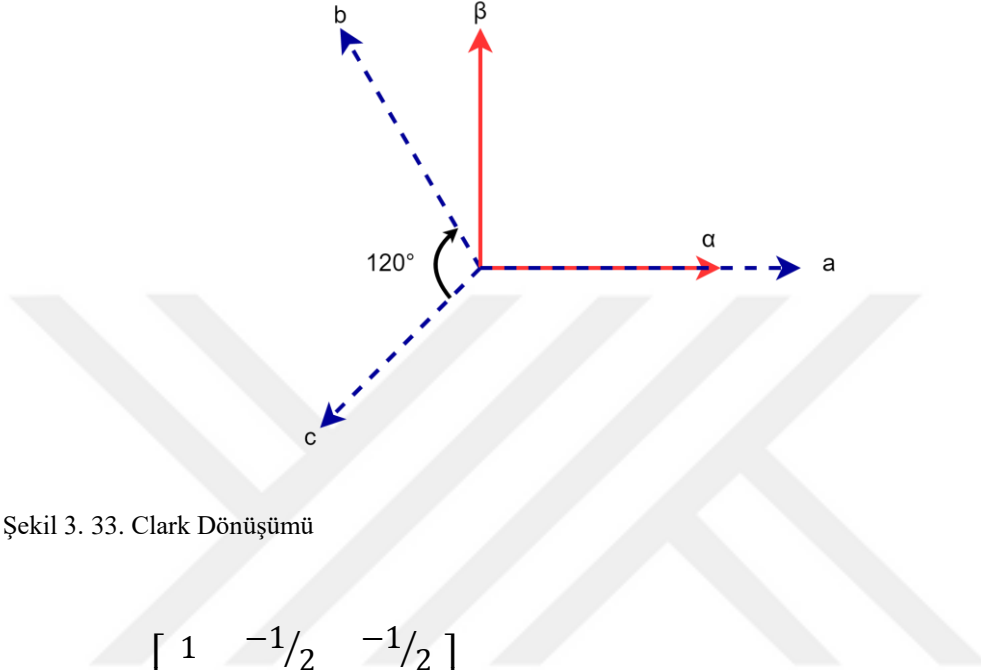
Serbest uyarımlı bir DC motorda olduğu gibi i_q akımı ile motorun torku ve i_d akımı ile motorun akısı birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilir (Akin ve ark., 2013).

3.4.1. Eksen dönüşümleri

Eksen dönüşümleri motorun kontrolünde basitlik sağlamak için kullanılan Clark ve Park dönüşümleridir. Bu dönüşümlerden Clark ve Ters Clark dönüşümü ile 3 fazlı stator sabit eksen takımları 2 fazlı rotor sabit eksen takımları arasındaki dönüşümler gerçekleştirilirken Park ve Ters Park dönüşümü ile rotor sabit eksen takımları rotor

hareketli eksen takımları arasındaki dönüşümler gerçekleştirilir. Denklem 3.28, 3.29, 3.30 ve 3.31’de bu dönüşümlere ait eşitlikler verilmiştir ve Şekil 3.33’ de Clark dönüşümü ve Şekil 3.34’de Park dönüşümü grafiksel olarak gösterilmiştir.

Clarke Dönüşümü (a, b, c → α, β)



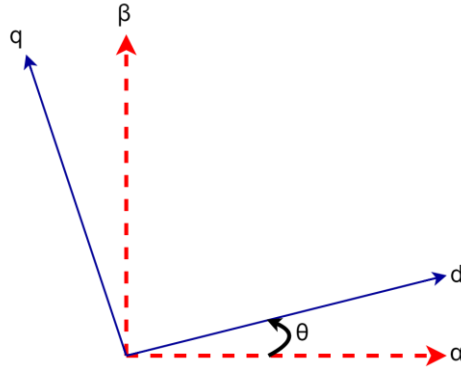
Şekil 3. 33. Clark Dönüşümü

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ 0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 2 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Ters Clark Dönüşümü (α, β → a, b, c)

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Park Dönüşümü ($\alpha, \beta \rightarrow d, q$)



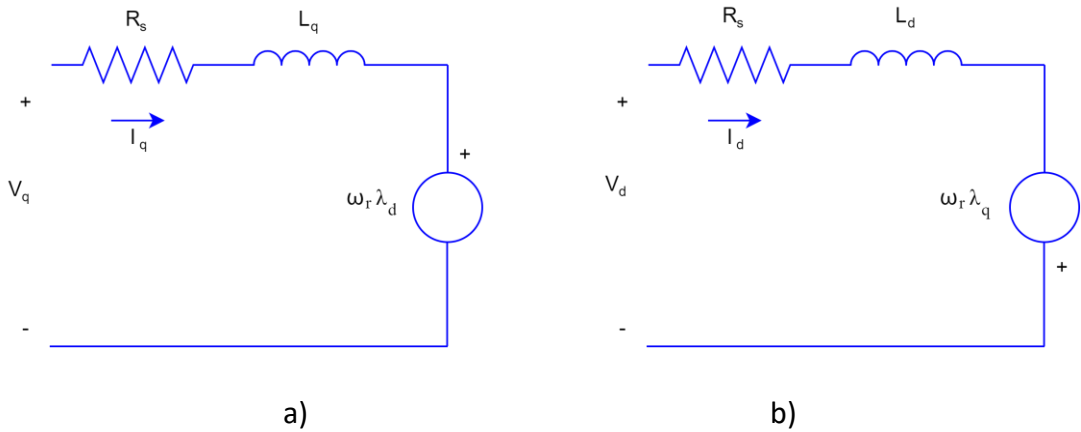
Şekil 3. 34. Park Dönüşümü

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \sin(\theta_r) \\ -\sin(\theta_r) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Ters Park Dönüşümü ($d, q \rightarrow \alpha, \beta$)

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\sin(\theta_r) \\ \sin(\theta_r) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

3.4.2. SMSM dq model



Şekil 3. 35. a) SMSM'nin d eksenine eşdeğer devresi b) SMSM'nin q eksenine eşdeğer devresi

Şekil 3.35’de verilen motorun d - q eşdeğer devrelerinden denklem 3.32 ve 3.33 de verilen v_d ve v_q gerilim ifadeleri elde edilir. Burada R_s stator sargı direnci i_d ve i_q eksen akımları ω_r rotor hızını, λ_q ve λ_d ise eksen akılarını ifade eder.

$$v_d = R_s i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_r \lambda_q \quad (3.32)$$

$$v_q = R_s i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_r \lambda_d \quad (3.33)$$

v_d ve v_q gerilim ifadelerini akım cinsinden ifade etmek için akı ifadeleri aşağıdaki gibi yazılır. Bu ifadelerde L_d ve L_q eksen endüktanslarını ifade ederken λ_m mıknatıslardan kaynaklanan karşılıklı manyetik akıyı ifade eder.

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_m \quad (3.34)$$

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (3.35)$$

Denklem 3.34 ve 3.35’de verilen akı ifadeleri eşitlik 3.32 ve 3.33’de yerine yazılarak aşağıdaki gerilim ifadeleri elde edilir.

$$v_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \quad (3.36)$$

$$v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_d i_d + \omega_r \lambda_m \quad (3.37)$$

Denklem 3.36 ve 3.37’den akım bileşenlerini çekerek yazacak olursak aşağıdaki akım denklemleri elde edilir.

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} (v_d - R_s i_d + \omega_r L_q i_q) \quad (3.38)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} (v_q - R_s i_q - \omega_r L_d i_d - \omega_r \lambda_m) \quad (3.39)$$

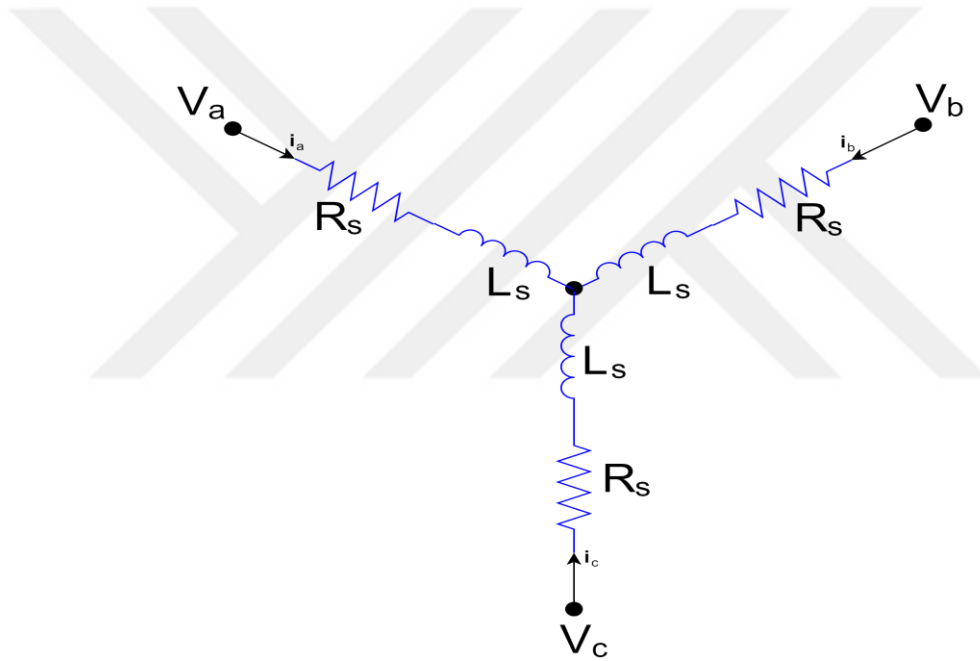
Motorun elektromanyetik moment ifadesi ise denklem 3.40’da verildiği ifade edilebilir. Burada P kutup çifti sayısıdır.

$$T_e = \frac{3}{2}P(\lambda_m i_q + (L_d - L_q)i_d i_q) \quad (3.40)$$

Motorun dinamik denklemi ise denklem 3.41’da verildiği gibi ifade edilir. Burada T_L yük momenti J atalet momenti ve B sürtünme katsayısıdır.

$$T_e = T_L + J \frac{d}{dt} \omega_r + B \omega_r \quad (3.41)$$

3.4.3. SMSM abc model



Şekil 3. 36. SMSM abc model

v_a, v_b ve v_c stator gerilimleri şekil 3.36’da verilen devreden denklem 3.42’de ki gibi ifade edilebilir. Burada R_s stator sargı direnci, i_a, i_b, i_c faz akımları, $\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$ faz akılarıdır.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

Akı ifadeleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir. Burada L_s toplam faz sargısı endüktanslarıdır.

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} = L_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \lambda_m \begin{bmatrix} \sin(\theta) \\ \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

Denklem 3.42’de verilen gerilim denklemlerinde 3.43’de verilen akı denklemleri yerine yazılarak gerilim ifadeleri v_a, v_b ve v_c aşağıda verilen 3.44, 3.45 ve 3.46 denklemlerinde olduğu ifade edilebilir. Burada E_a, E_b, E_c sabit mknatıslarının stator sargılarında meydana getirdiği zıt emk’ları ifade etmektedir.

$$v_a = R_s i_a + L \frac{di_a}{dt} + E_a ; E_a = \omega \lambda_m \quad (3.44)$$

$$v_b = R_s i_b + L \frac{di_b}{dt} + E_b ; E_b = \omega \lambda_m \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \quad (3.45)$$

$$v_c = R_s i_c + L \frac{di_c}{dt} + E_c ; E_c = \omega \lambda_m \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \quad (3.46)$$

Motorun elektriksel torku denklem 3.47’de verildiği gibi yazılabilir.

$$T_e = \frac{E_a i_a E_b i_b E_c i_c}{\omega} \quad (3.47)$$

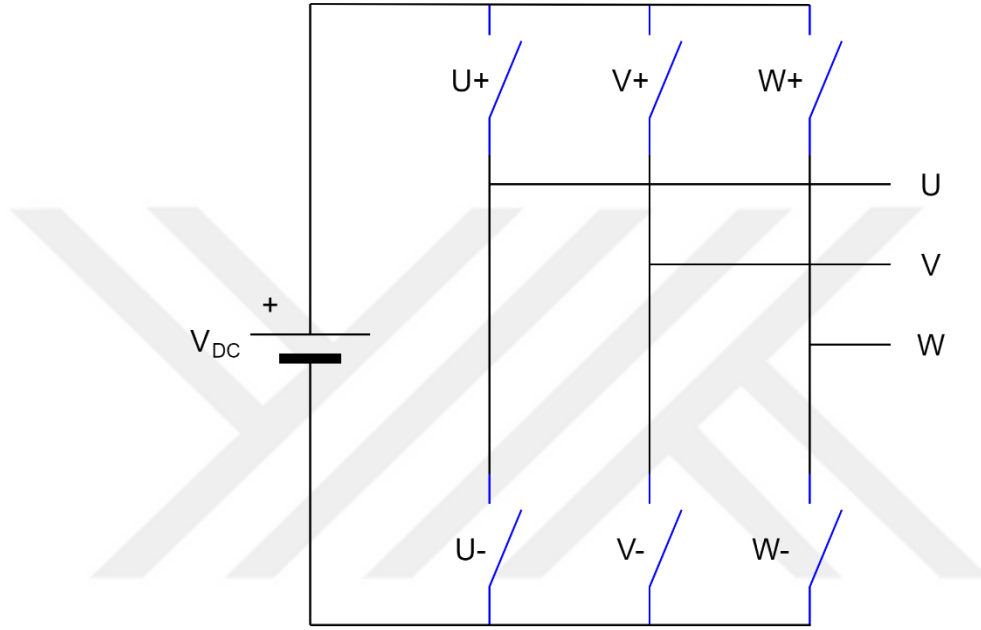
Gerekli eşitlikler yerine yazılarak denklem 3.48’de ki ifade elde edilir.

$$T_e = \frac{p}{2} \lambda_m \left[\left(i_a - \frac{1}{2} i_b - \frac{1}{2} i_c \right) \sin(\theta) - \frac{\sqrt{3}}{2} (i_b - i_c) \cos(\theta) \right] \quad (3.48)$$

3.4.4. Eviriciler ve DGM teknikleri

Farklı DGM (darbe genişlik modülasyonu) teknikleri kullanılan evirici aktif filtreler, frekans dönüştürücüler ve motor sürücüler gibi farklı alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. İnveterler sabit bir DC gerilim kaynağından beslenirler ve AC gerilim

ve frekans çıkışı sağlarlar (Gaballah, 2013). Şekil 'de 3 fazlı bir evirici gösterilmiştir. $u+$, $u-$, $v+$, $v-$, $w+$, $w-$ uygun kapı sinyalleri verilerek kontrol edilen yarı iletkenlerdir. $u+$ ve $u-$, $v+$ ve $v-$, $w+$ ve $w-$ birbirlerinin komplementi olacak şekilde anahtarlanırlar. Bu yarı iletkenler bjt, mosfet, igbt ve gto gibi farklı yarı iletkenler olabilirler. Bu yarı iletkenlerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları vardır ve kullanılacak sisteme uygun olarak tasarımcı tarafından seçilirler. $U V W$ ise değişken frekanslı ve değişken voltajlı bir AC gerilimdir.



Şekil 3. 37. 3 Fazlı evirici

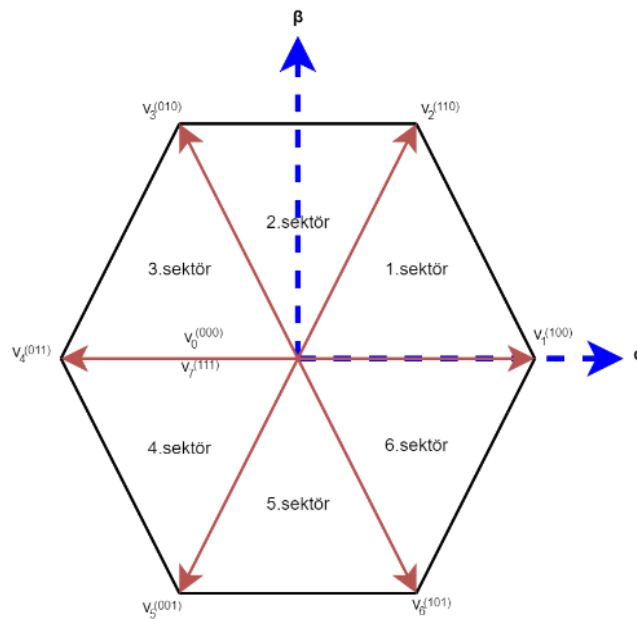
Darbe genişlik modülasyonu (DGM) anahtarlama teknikleri, güç elektroniği ve sürücü sistemleri alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. DGM, motor girişlerine verilen gerilimi kontrol etmek için kullanılır. Yaygın kullanımları nedeniyle çeşitli DGM teknikleri geliştirilmiştir ve DGM teknikleri yoğun araştırma konusu olmuştur. DGM'nin temel amacı, sürücü çıkış gerilimini kontrol etmek ve çıkış geriliminde oluşabilecek harmonikleri yok etmek veya mümkün olduğu ölçüde azaltmaktır. Sinüzoidal ve Uzay Vektör DGM teknikleri en yaygın şekilde kullanılan tekniklerdir. Çıkış gerilimini kontrol ettikleri gibi harmonikleri de azaltırlar (Rao ve ark., 2014).

SDGM (Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu)

Bu modülasyonda, modülasyon sinyali sinüzoidal bir dalgadır ve taşıyıcı dalga üçgen bir dalgadır. S_a , S_b , S_c anahtarlama sinyallerini üretmek üç fazlı sinüzoidal referans gerilimlerini ($U_{a.ref}$, $U_{b.ref}$, $U_{c.ref}$) taşıyıcı dalga ile karşılaştırmaktır. Üretilen anahtarlama sinyalleri kullanılan eviricinin anahtarlama elemanlarını tetikleyerek ve bu anahtarlama elemanlarının açılıp kapanmasıyla evirici çıkış gerilimleri üretilir (Rao ve ark., 2014).

UVDGM (Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu)

Uzay vektör darbe genişlik modülasyonu (UVDGM) sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu (SDGM) ile karşılaştırıldığında daha karmaşık bir yöntem olmasında karşın daha yüksek bir bara gerilimi ve daha düşük harmonik bozulma gibi avantajlara sahiptir. Ayrıca AC motorların vektör kontrolüne çok uygun olmasından dolayı günümüzde oldukça yaygın olarak kullanılan bir tekniktir (Adhavan ve ark.,2011). UVDGM koordinat dönüşümü kullanılarak sektör belirlenerek ve anahtarlama vektörleri uygun anahtarlama sırasında belirlenerek gerçekleştirilir. 2 tanesi sıfır vektörü ve 6 tanesi sıfırdan farklı olmak üzere toplam 8 tane anahtarlama vektörü vardır. Anahtarlama durumlarının farklı 8 kombinasyonu 000, 100, 110, 010, 011, 001, 101 ve 111 şeklindedir (Gaballah, 2013). Yapısı Şekil 3.38’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 38. UVDGM diyagram

Referans vektörün genliği ve açısı denklem 3.49 ve 3.50 de verilen eşitliklerle elde edilir.

$$|v_{ref}| = \sqrt{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \quad (3.49)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{v_{\alpha}}{v_{\beta}}\right) \quad , \quad \theta \in [0 - 2\pi] \quad (3.50)$$

Yarı iletken anahtarlama elemanlarının tetiklenmesi ve motorun sürülmesi için gerekli olan gerilim değerlerinin elde edilmesi için anahtarlama vektörlerinin her birinin uygulanma süresi elde edilir ve bu işlem sonucunda anahtarlama desenleri oluşturulur. Sektörler için anahtarlama süreleri T_1, T_2 ve T_0 denklem 3.51, 3.52 ve 3.53 da verilmiştir. Burada T_z ise evirici anahtarlama periyodunun yarısını n ise sektör numarasını ifade etmektedir.

$$T_1 = \frac{\sqrt{3}T_z v_{ref}}{v_{dc}} \left(\sin\left(\frac{n}{3}\pi - \alpha\right) \right) \quad (3.51)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3}T_z v_{ref}}{v_{dc}} \left(\sin\left(\alpha - \frac{n-1}{3}\pi\right) \right) \quad (3.52)$$

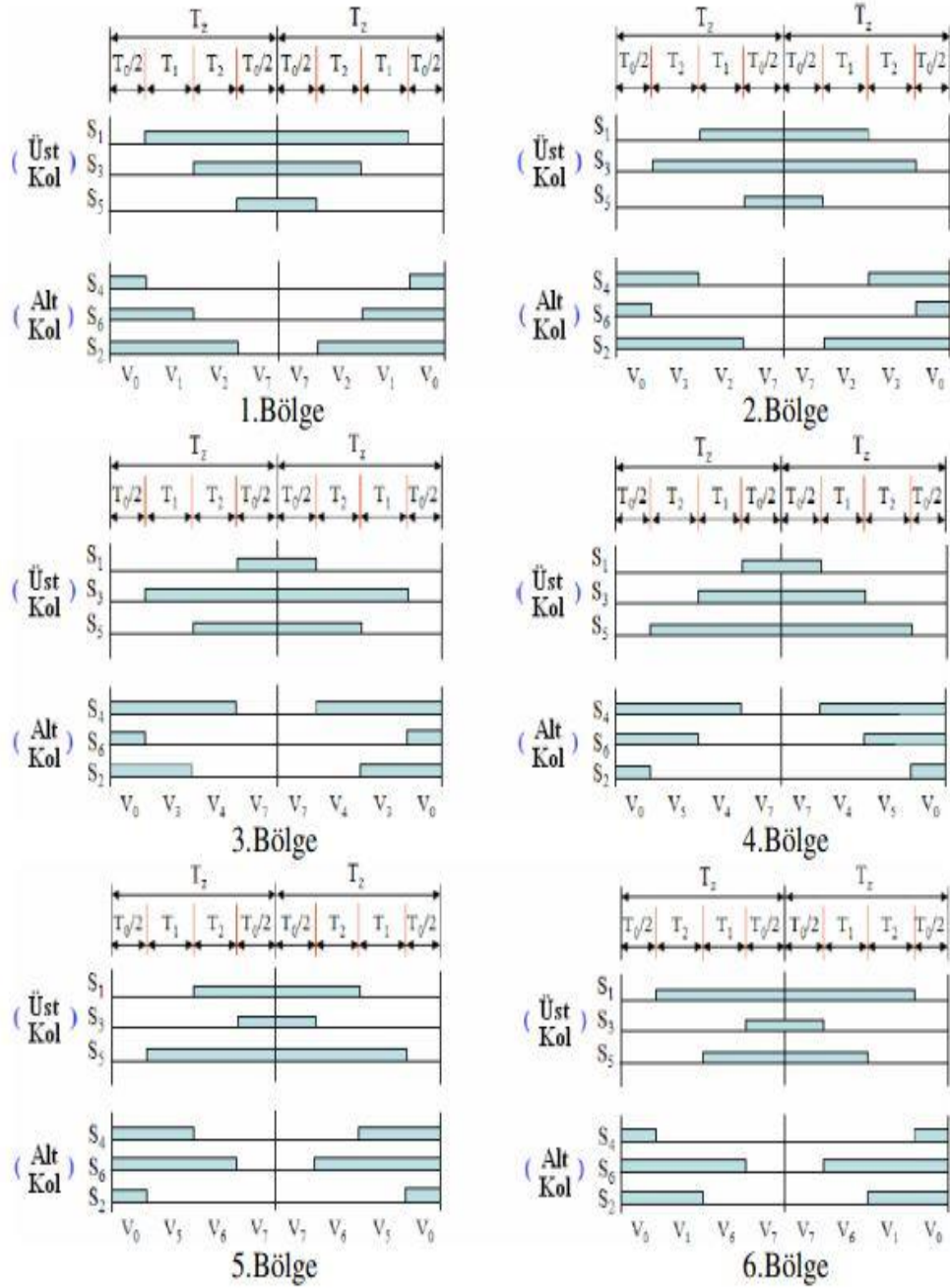
$$T_0 = T_z - T_1 - T_2 \quad (3.53)$$

Her fazın üst güç anahtarları için anahtarlama sürelerinin hesaplanması Çizelge 3.4’de gösterilmiştir. Hesaplanan bu anahtarla sürelerine göre oluşan anahtarlama düzenlemeleri ise şekil 3.39’ da gösterilmiştir.

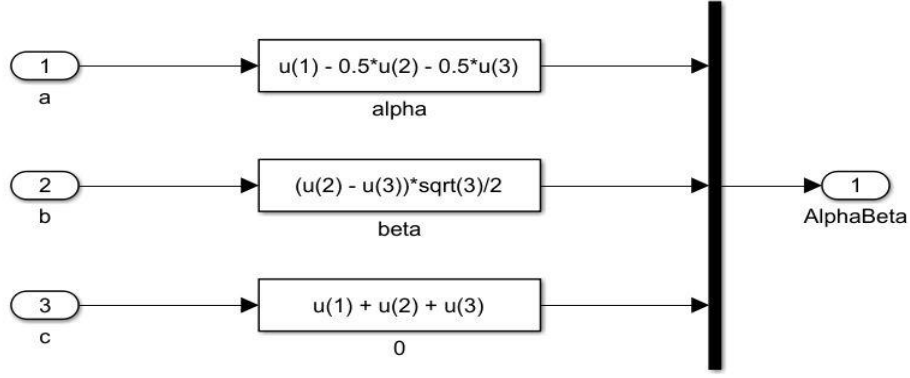
Çizelge 3. 4. Her sektör için üst güç anahtarlarının anahtarlama süreleri

SEKKTÖR NUMARASI	A FAZI	B FAZI	C FAZI
1	$T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$	$T_2 + \frac{T_0}{2}$	$\frac{T_0}{2}$
2	$T_1 + \frac{T_0}{2}$	$T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$	$\frac{T_0}{2}$
3	$\frac{T_0}{2}$	$T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$	$T_2 + \frac{T_0}{2}$

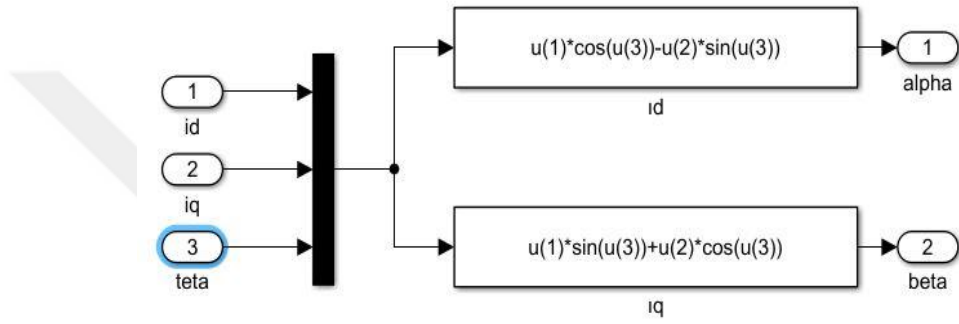
4	$\frac{T_0}{2}$	$T_1 + \frac{T_0}{2}$	$T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$
5	$T_2 + \frac{T_0}{2}$	$\frac{T_0}{2}$	$T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$
6	$T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$	$\frac{T_0}{2}$	$T_1 + \frac{T_0}{2}$



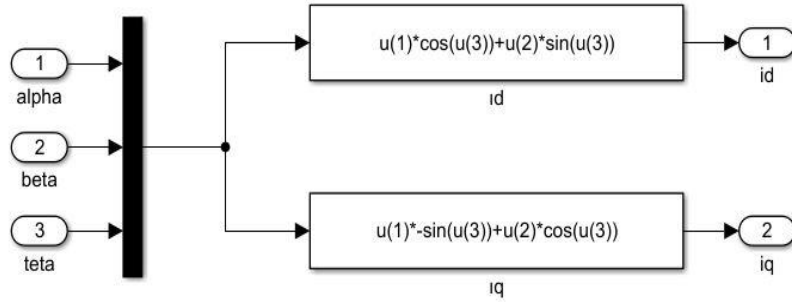
Şekil 3. 39. Her sektördeki anahtarlama düzenleri (Doğan, 2006)



Şekil 4. 2. Clark dönüşümü blok diyagramı



Şekil 4. 3. Park dönüşümü blok diyagramı

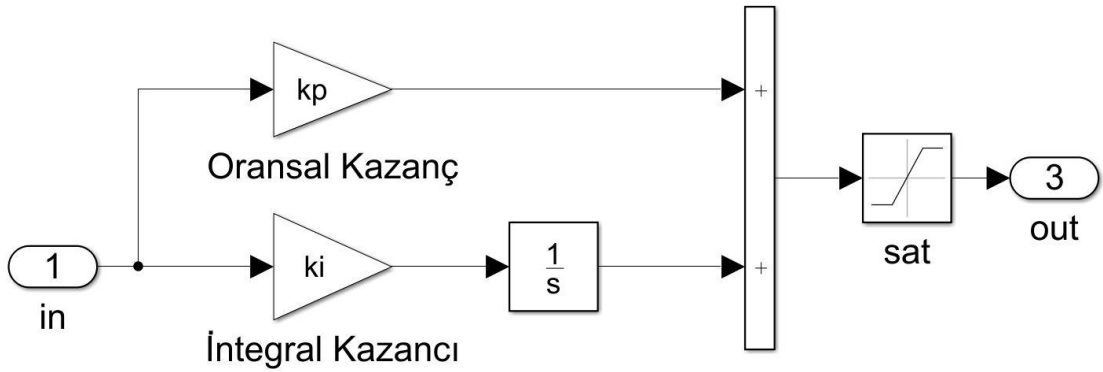


Şekil 4. 4. Ters park dönüşümü blok diyagramı

Motorun hızını, i_d ve i_q akımlarını kontrol etmek için 3 adet pi(proprtional-integral) kontrolör oluşturulmuştur. Oluşturulan PI kontrolördeki P ve I katsayıları Matlab optimization toolbox eklentisinde genetic algorithm yöntemi kullanılarak 50 iterasyon da denenerek bulunmuştur. Bulunan PI katsayıları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Oluşturulan pi kontrolör yapısı şekil 4.5’de gösterilmiştir.

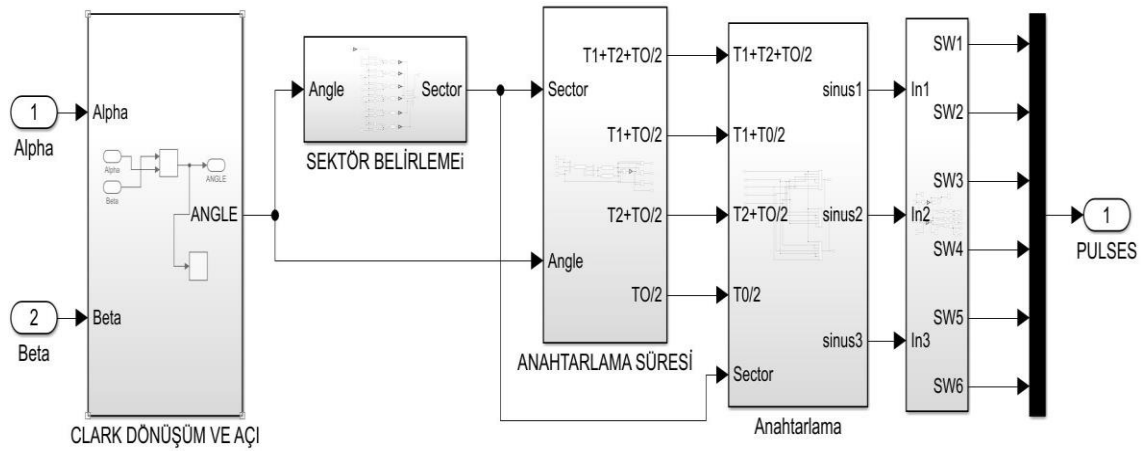
Çizelge 4. 1. PI katsayıları

	P	I
Hız	0.296	0.533
i_d	7.368	0.375
i_q	0.127	0.016

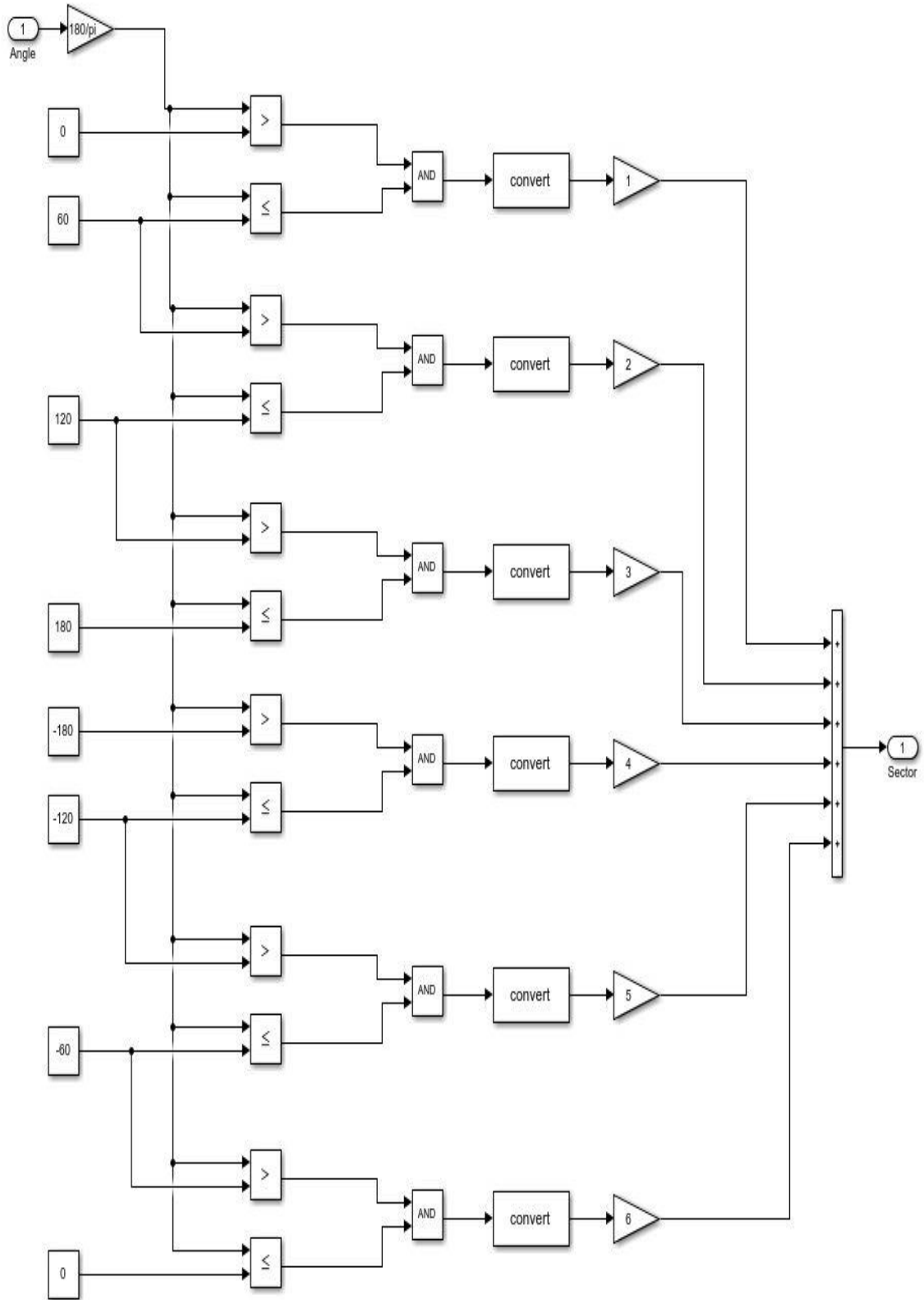


Şekil 4. 5. PI kontrolör Yapısı

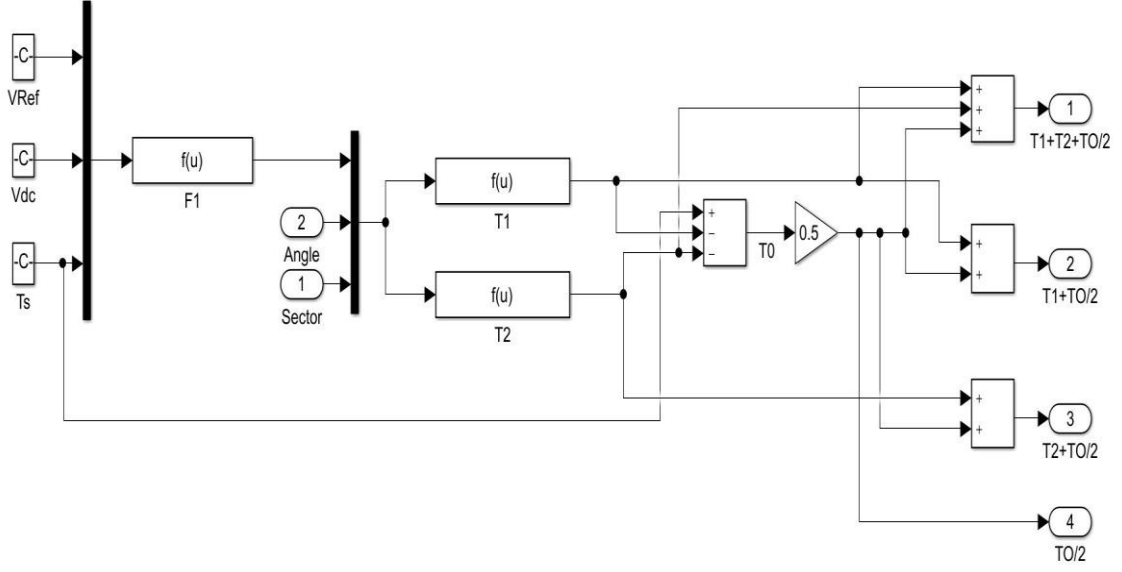
IGBT evirici ünitesinde kullanılan 6 adet IGBT'nin tetiklenmesi sağlamak için oluşturulan Uzak Darbe Genişlik Modülasyonu (UVDGM) yapısı Şekil 4.6'd gösterilmiştir. Şekil 4.7'de sektör belirlenmesi için oluşturulan blok yapısı ve Şekil 4.8'de ise anahtarlama sürelerinin hesaplanması için oluşturulan blok yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4. 6. UVDGM blok diyagramı

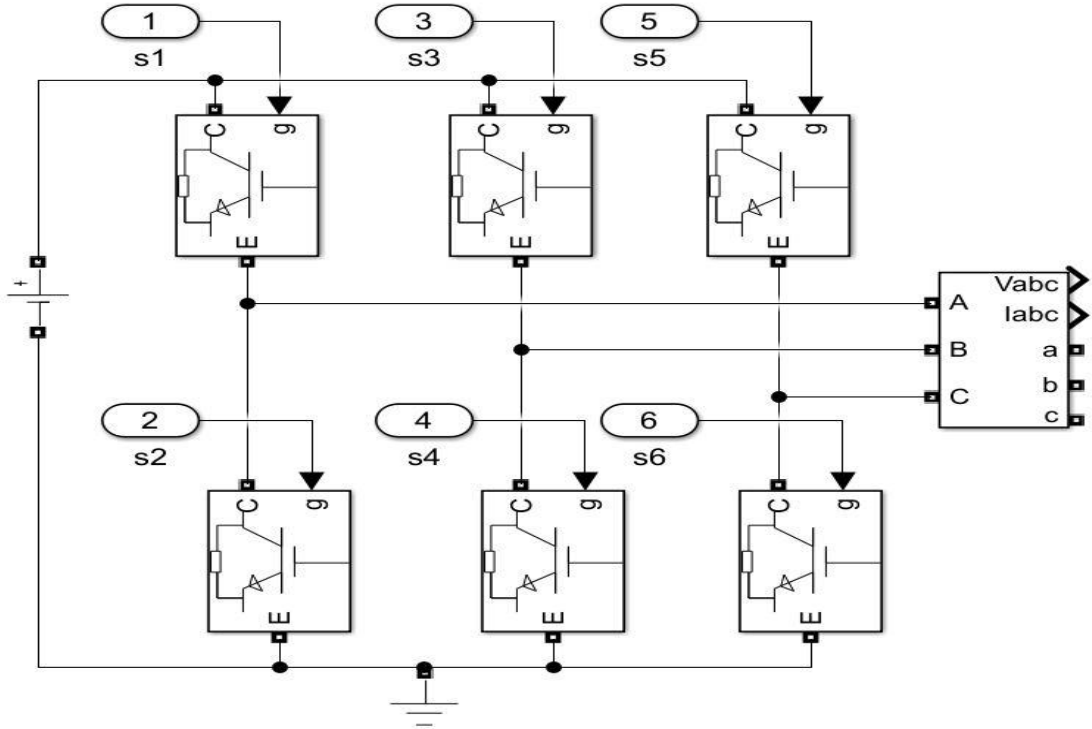


Şekil 4. 7. Sektör belirleme blok diyagramı



Şekil 4. 8. Anahtarlama süresi hesaplanması blok diyagramı

6 adet IGBT'den oluşan evirici blok diyagramı şekil 8'de gösterilmiştir. IGBT elemanları MATLAB/SİMULİNK kütüphanesinde bulunan ideal özellikteki yarı iletken elemanlardır.



Şekil 4. 9. IGBT Evirici Yapısı

Sabit mıknatıslı senkron motor modeli motorun matematiksel denklemlerinden Matlab Simulink blokları kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan motor modelinde V_A , V_B , V_C

faz girişleri ve T_m yük girişi vardır. Motorun çıkışında ise i_{abc} motor akım çıkışları, w_e motor hızı, t_e motor torku ve θ motor pozisyon bilgisi vardır. Oluşturulan motorun parametreleri ise Çizelge 4.2’de verilmiştir.

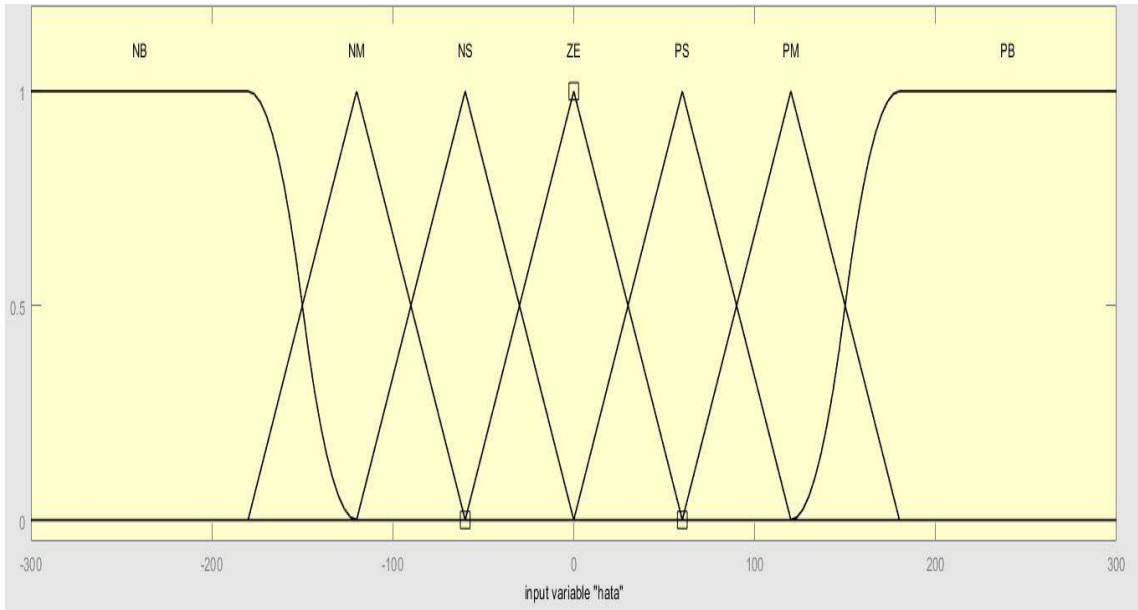
Çizelge 4. 2. Motor Parametreleri

$R_s(\Omega)$	1.2
$L_q(mH)$	$12e^{-3}$
$L_d(mH)$	$12e^{-3}$
$\lambda_m(Wb)$	0.1850
$B(Nm/(rad/s))$	0.00014
$J(kgm^2)$	2.03×10^{-4}
P	10
$T_m(N.m)$	3.2
Maksimum $T_m(N.m)$	15

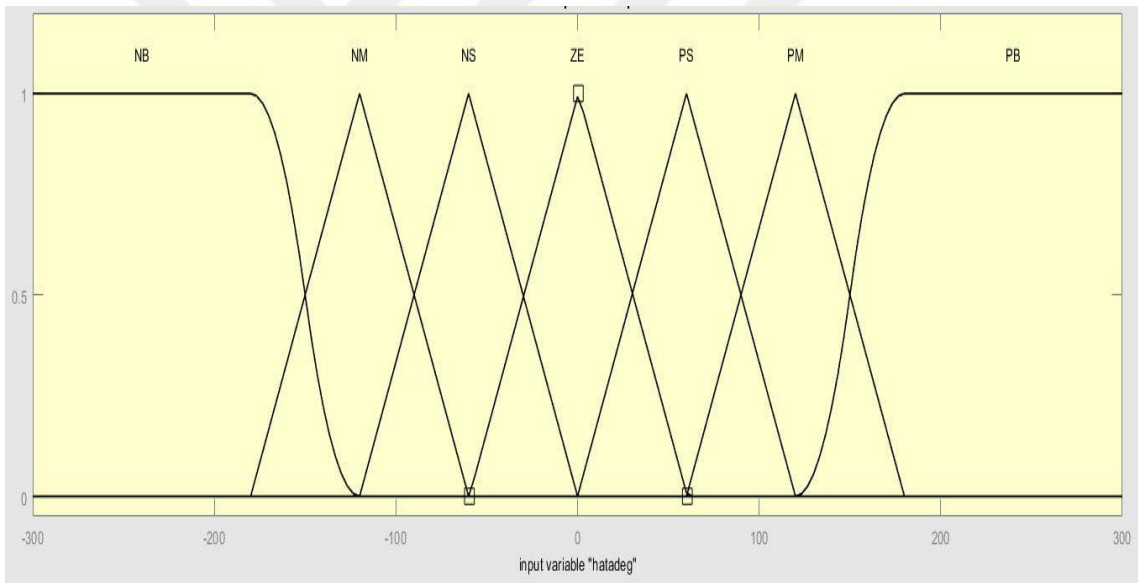
4.2.Bulanık Mantık Denetleyici Tasarımı

Bulanık Mantık Denetleyici (BMD) tasarlanırken Matlab Simulink’de Fuzzy Logic Toolbox eklentisi kullanılmıştır. Tasarlanan BMD hata(e) ve hatanın değişimi ($\frac{d}{dt}e$) olmak üzere 2 adet giriş ve 1 adet çıkış (y) kullanılmıştır. Bulanık çıkarım yöntemi olarak Mamdani Bulanık Çıkarım Yöntemi kullanılmış ve durulaştırma olarak Ortalama Maximum Üyelik Durulaştırma Yöntemi kullanılmıştır. Üyelik fonksiyonu olarak bütün giriş ve çıkışlarda 5 adet Üçgen üyelik fonksiyonu ve 2 adet Sigmoid üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Şekil 4.10 a’da hata üyelik fonksiyonları b’de hatanın değişimi üyelik fonksiyonları ve c’ çıkış üyelik fonksiyonları gösterilmiştir. Şekil 4.11’de tasarlanan BMD’nin yüzey görünümü gösterilmiştir.

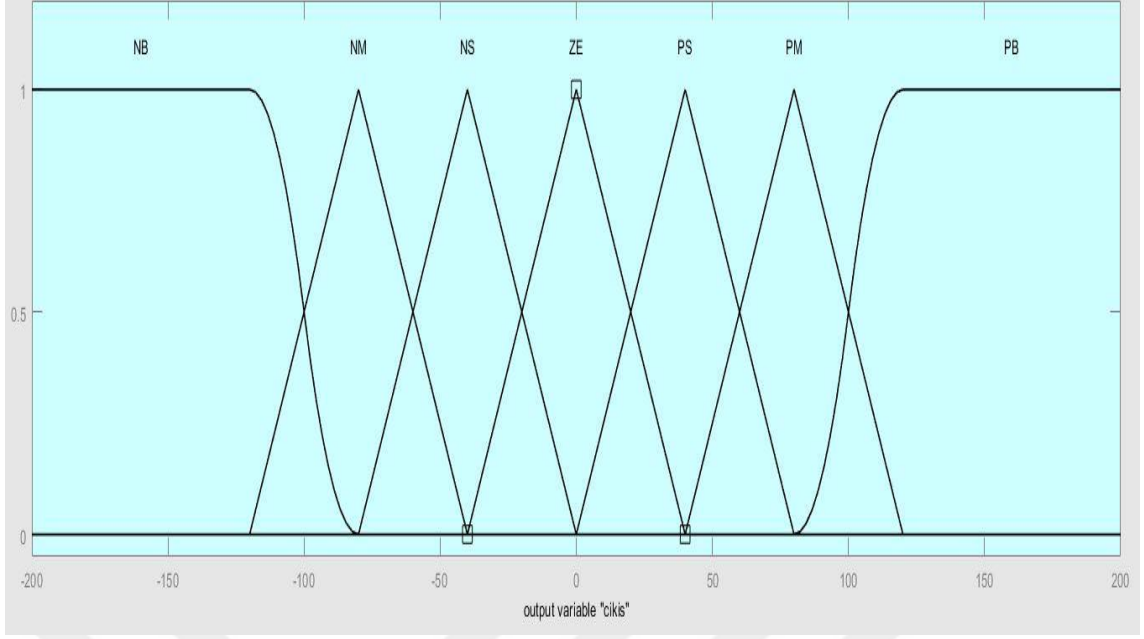
Çizelge 4.3’de de tasarlanan bulanık mantık denetleyicinin kuralları verilmiştir.



a)

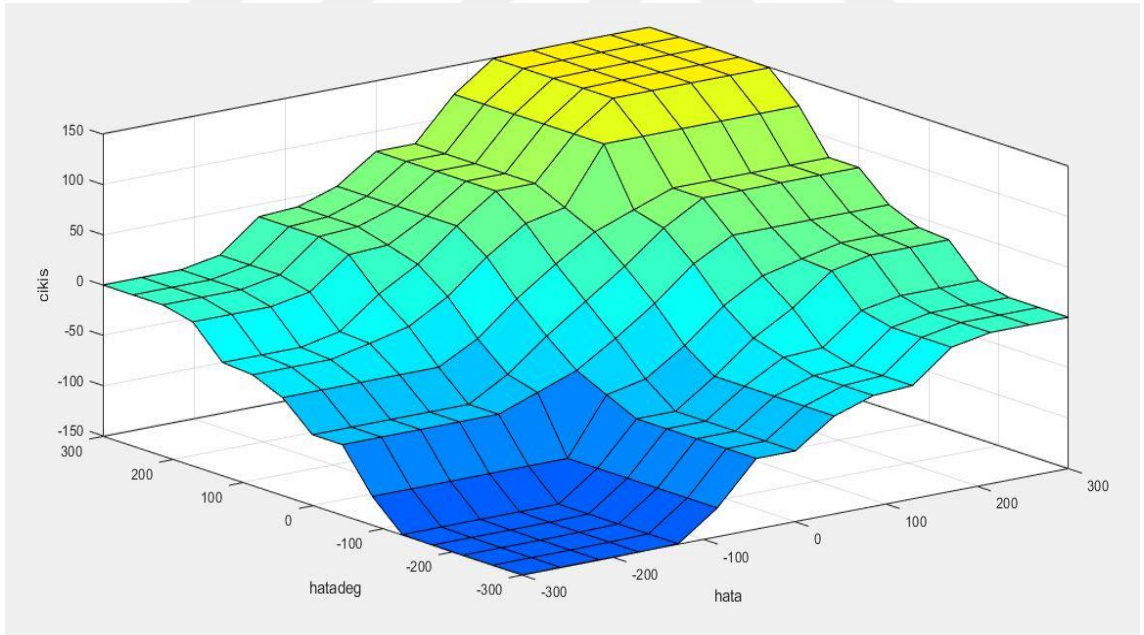


b)



c)

Şekil 4. 10. a) Hata b) Hatanın değışimi c) Çıkış üyelik fonksiyonları

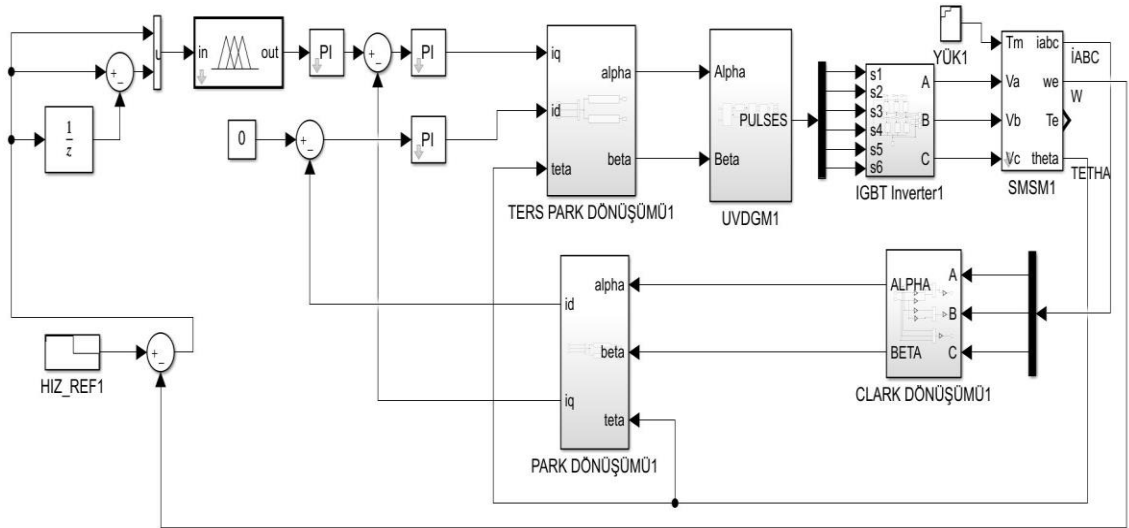


Şekil 4. 11. BMD yüzey görünümü

Çizelge 4. 3. BMD kural tablosu

$\begin{matrix} de \\ e \end{matrix}$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZE
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	PS
NS	NM	NM	NM	NS	ZE	PS	PS
ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
PS	NS	NS	ZE	PS	PM	PM	PM
PM	NS	ZE	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZE	PS	PS	PM	PM	PB	PB

Bulanık mantık denetleyici tasarlandıktan sonra daha etkin bir kontrol sağlaması amacıyla BMD-PI denetleyici olarak motorun kontrolünde kullanılır. Tasarlanan BDM ile oluşturulan SMSM'nin kontrol diyagramı Şekil 4.12'de gösterilmiştir.

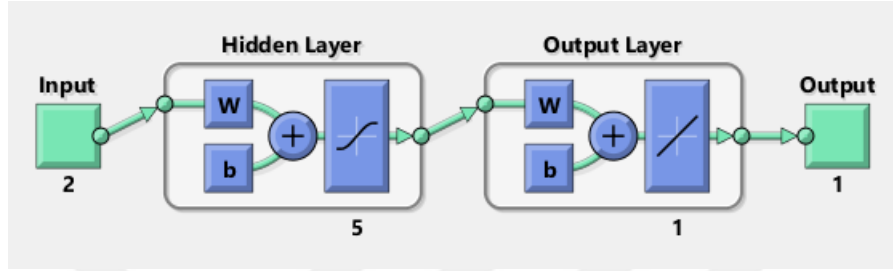


Şekil 4. 12. BMD-PI AYK Diyagramı

4.3.BMD'nin YSA ile Modellenmesi

BMD'nin YSA ile modellenmesi yapılırken öncelikli olarak YSA eğitiminde kullanılacak bir veri seti oluşturulmalıdır. BMD'nin hata ve hatanın değişimi ile çıkışından alınacak

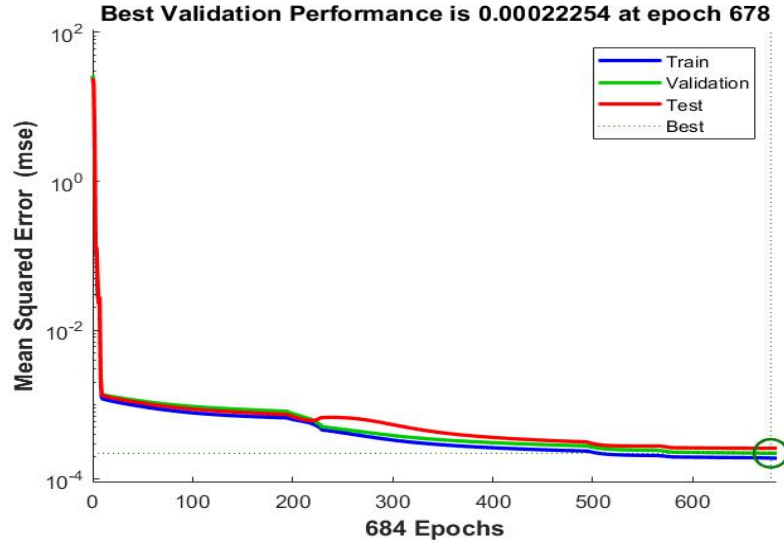
eğitim verileri Matlab Simulink kütüphanesinde bulunan *to workspace* bloğu yardımıyla *workspace* alanına aktararak eğitim veri setleri oluşturulur. Hata ve hatanın değişimi giriş veri seti ve çıkışta hedef veri seti olarak belirlenir. Daha sonra Neural Network Toolbox ile oluşturulan veri setleri ile YSA'nın eğitimine başlanır. Oluşturulan YSA' da 2 giriş 1 çıkış ve 5 hücreli bir ara katman kullanılmıştır. Oluşturulan YSA yapısı Şekil 4.13'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 13. YSA yapısı

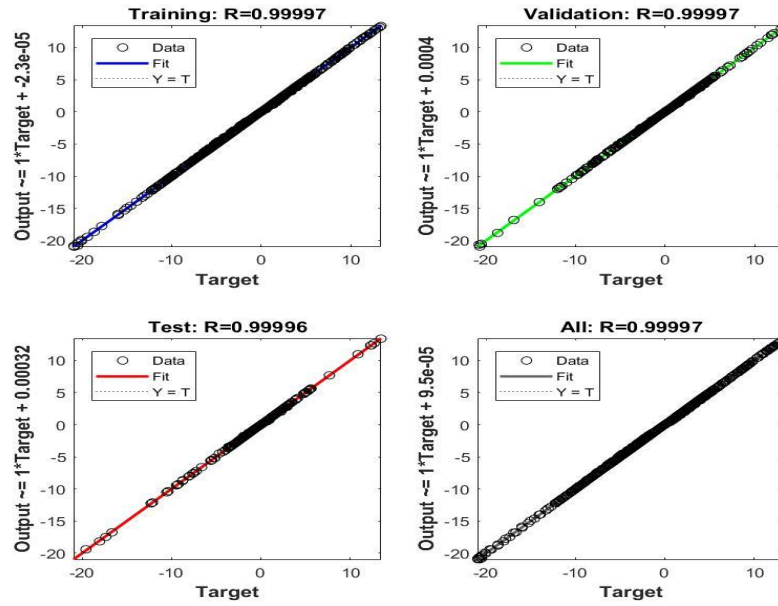
Yapay Sinir Ağının özellikleri; ağ tipi, ileri beslemeli yayılım, eğitim algoritması Levenberg-Marquardt, katman sayısı 2, gizli katman için nöron sayısı 5 ve aktivasyon fonksiyonu TANSIG olarak seçilmiştir.

YSA için yapılan eğitim sırasında 678 iterasyon yapılmıştır. Ağın sürekli eğitimi ile hatanın azaldığını ve elde edilen çıktılar ile istenen çıktılar arasındaki farkın, gösterildiği gibi 0.00022254 'a düşürüldüğu için sıfır noktasına kadar minimum olduğunu söyleyebiliriz. Bu da eğitimin son derece etkili olduğu anlamına gelmektedir. Buna ek olarak, tam ağırlıkların bilgisine ulaşana kadar her seferinde doğruluk artar. Şekil 4.14'de YSA'nın hata düşüş grafiği gösterilmiştir.



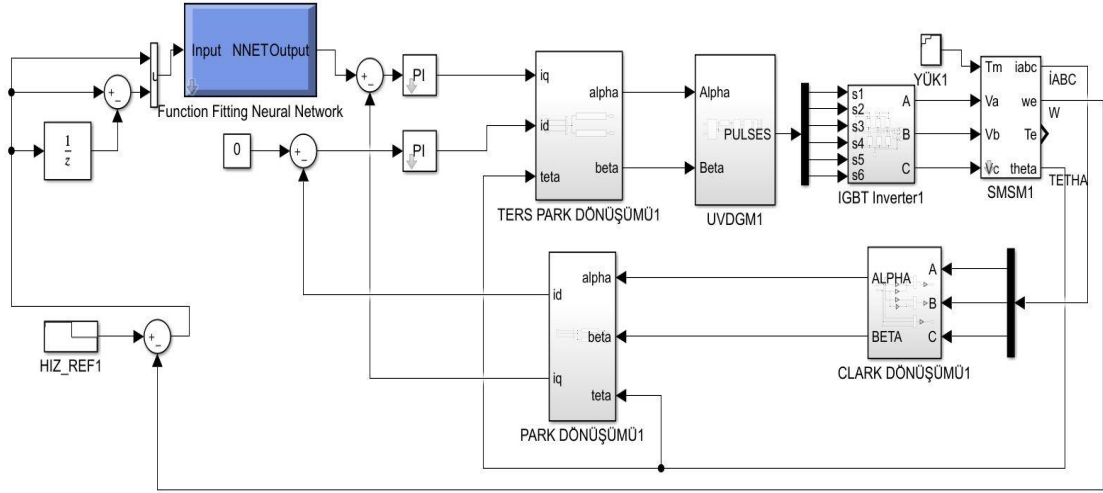
Şekil 4. 14. YSA hata grafiği

Eğitim sonucunda oluşan regresyon grafiği Şekil 4.15’de gösterilmiştir. Şekil 4.15’de Training grafiğinde, eğitim durumunda elde edilen çıktılar ile istenen çıktılar arasındaki hatanın çok küçük olduğunu, Validation grafiğinde gösterildiği gibi doğrulama durumunda ve Test grafiğinde gösterildiği gibi test durumunda All grafiğinde de üç durumun toplamını görebiliriz. Elde edilen çıktı, istenen ve gerekli olan çıktıya hemen hemen eşittir.



Şekil 4. 15. YSA regresyon grafiği

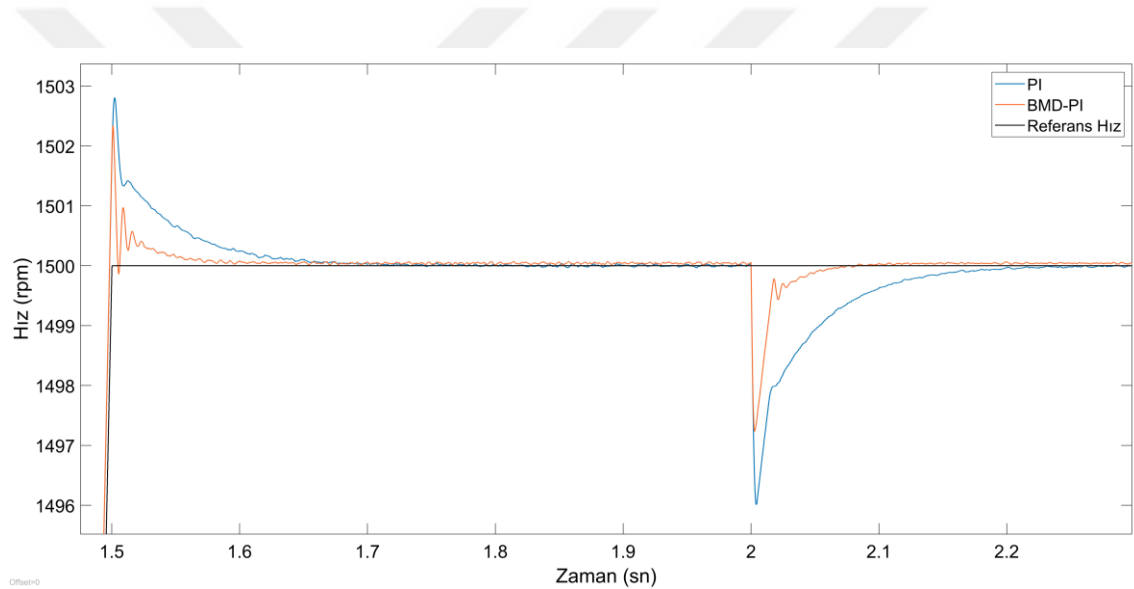
Bu grafikten YSA'nın oldukça başarılı bir eğitim gerçekleştirdiği ve BMD'yi oldukça iyi derecede modellediği görülmektedir. Elde edilen YSA blok diyagramı olarak Simulink ortamına aktarılmış ve BMD yerine koyularak SMSM'nin kontrolü gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.16'da YSA ile oluşturulan SMSM kontrol diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 4. 16. YSA AYT blok diyagramı

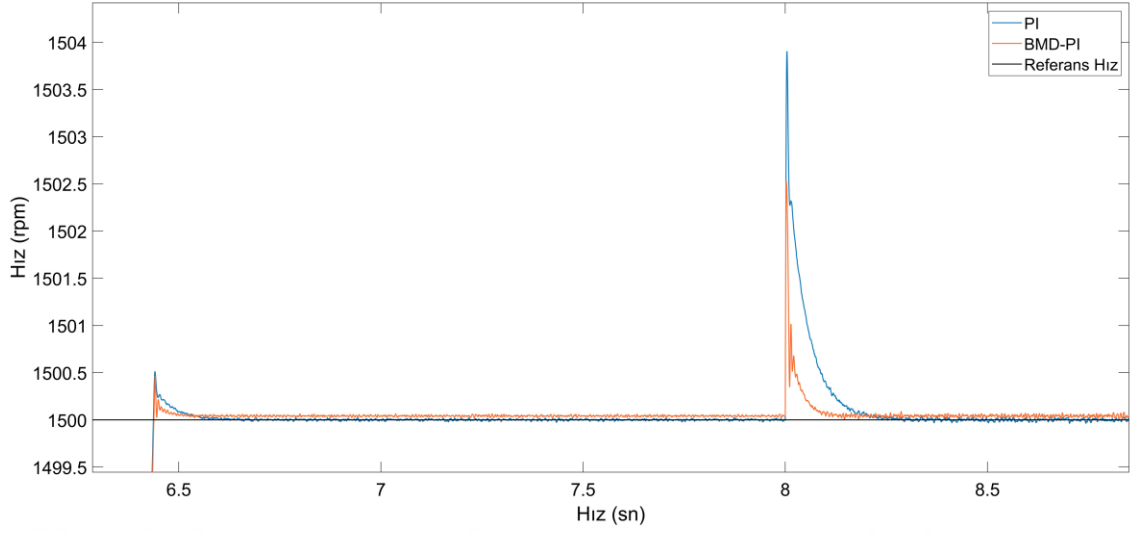
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

SMSM'nin 1500 d/dk hızının tasarlanan PI kontrolör ve BMD-PI kontrolörün ani yük girişi durumunda karşılaştırılması Şekil 5.1'de gösterilmiştir. 0'dan 1500 hızına çıktığı anda BMD-PI kontrolörün hem aşım oranı daha az olmuştur hem yerleşme zamanı daha kısadır. PI kontrolörün aşım oranı yaklaşık olarak % 0.2 iken BMD-PI kontrolörün aşım oranı yaklaşık olarak % 0.13'tür. 2. saniyede 15 Nm' lik bir yük girişi olmuş ve BMD-PI kontrolör PI kontrolöre göre ani yük girişi durumunda da hem aşım oranı hem de yerleşme zamanı göz önüne alındığında daha başarılı bir kontrol performansı sergilemiştir. Ani yük girişi durumunda PI kontrolörün aşım oranı yaklaşık olarak % 0.27 iken BMD-PI kontrolörün aşım oranı yaklaşık olarak % 0.16'dır.



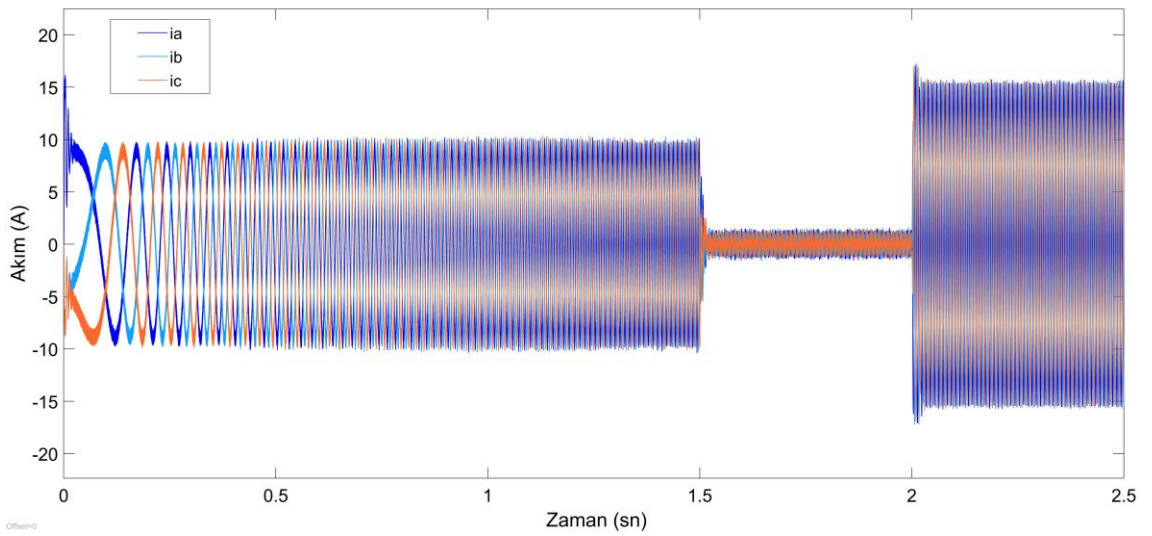
Şekil 5. 1. BMD-PI ve PI kontrolör ani yük girişi durumunda hız karşılaştırması

Ani yük çıkışı durumunda PI ve BMD-PI karşılaştırmasının yapıldığı simülasyon sonucu Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Burada motor başlangıçta 15 Nm yük ile 1500 d/dk hıza ulaşmış ve 8. saniyede motor yükten çıkmıştır. Yüklü durumdayken referans hıza ulaştığı anda motorun hem aşım oranı hem yerleşme süresi BMD-PI kontrolörde PI kontrolöre göre daha düşüktür. Ancak önemli bir farklılık yoktur. 8. saniyede yükten çıkma durumunda BMD-PI kontrolörün aşım oranı ve yerleşme zamanı PI kontrolöre göre daha düşüktür. PI kontrolörün yükten çıkma durumunda aşım oranı yaklaşık olarak % 0.26 iken BMD-PI kontrolörün aşım oranı yaklaşık olarak % 0.16'dır.

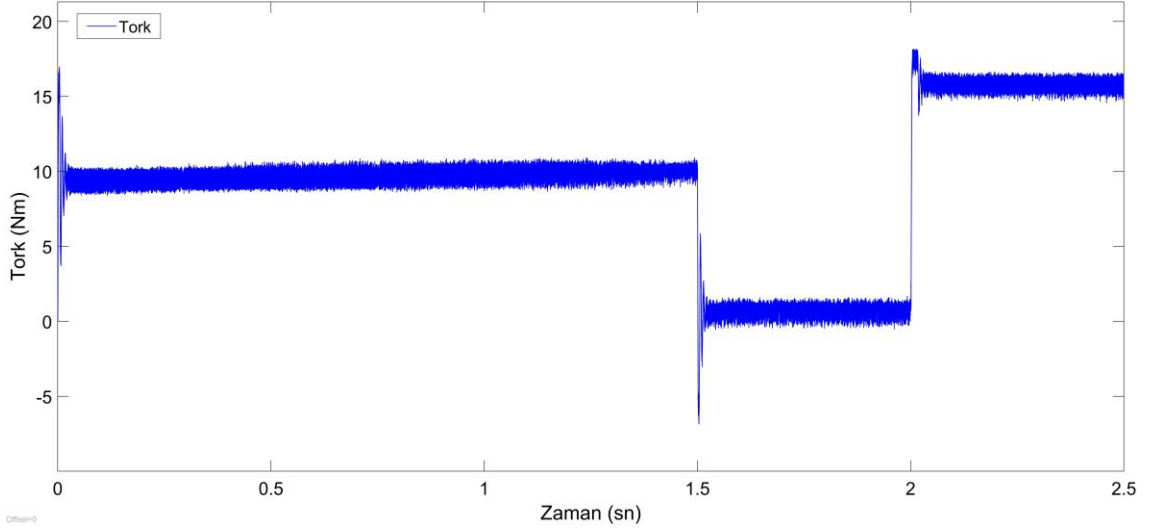


Şekil 5. 2. BMD-PI ve PI kontrolör ani yük çıkışı durumunda hız karşılaştırması

Simülasyon sonuçlarından görüldüğü üzere BMD- PI kontrolör referans hıza ulaşma, ani yük girişi ve ani yük çıkışı durumlarında hem aşım oranı hem de yerleşme zamanı bakımından PI kontrolöre üstünlük sağlamış ve daha başarılı bir kontrol performansı sergilemiştir. Simülasyon sonucunda elde edilen ani yük girişi durumundaki BMD-PI kontrolöre ait stator akımları Şekil 5.3’de ve tork cevabı Şekil 5.4’de gösterilmiştir. Ani yük çıkışı durumundaki BMD-PI kontrolöre ait stator akımları Şekil 5.5’de ve tork cevabı Şekil 5.6’da gösterilmiştir.

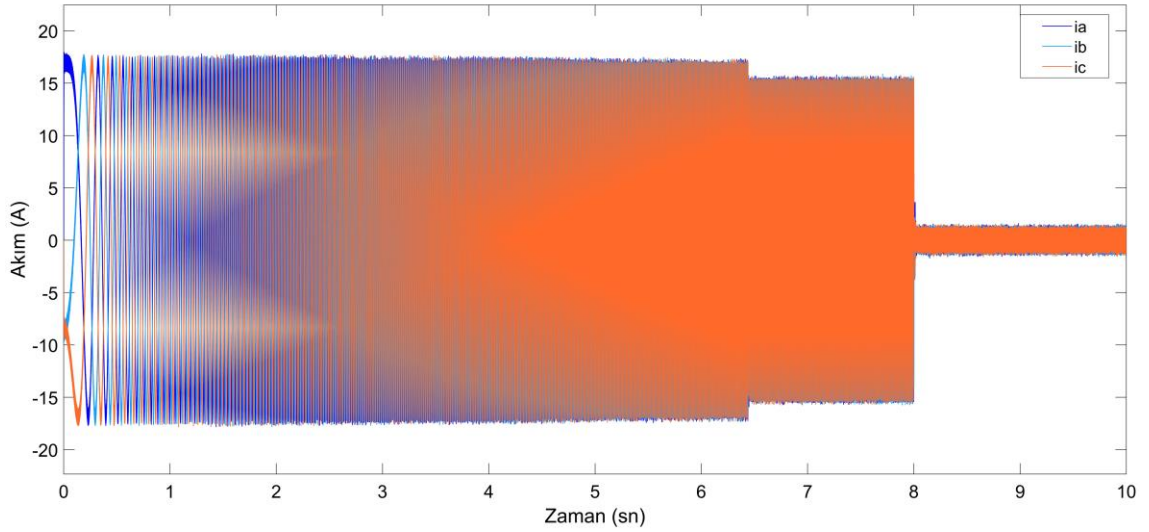


Şekil 5. 3. SSM ani yük girişi durumunda stator akımları

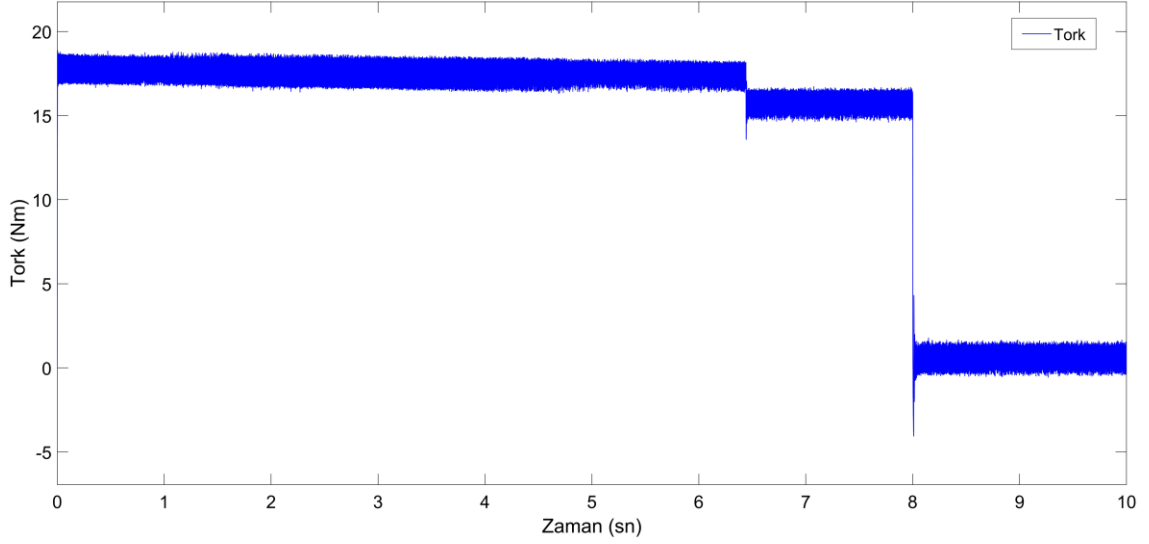


Şekil 5. 4. SMSM ani yük girişi durumunda tork cevabı

Ani yük girişi ve ani yük çıkışındaki stator akımları ve tork cevabı şekilleri incelendiğinde girilen yük ile orantılı olarak değiştikleri, sisteme zarar verecek seviyede bir aşım olmadığı ve yük giriş ve yük çıkış durumlarında sistemin kısa sürede kendisini topladığı görülmektedir.

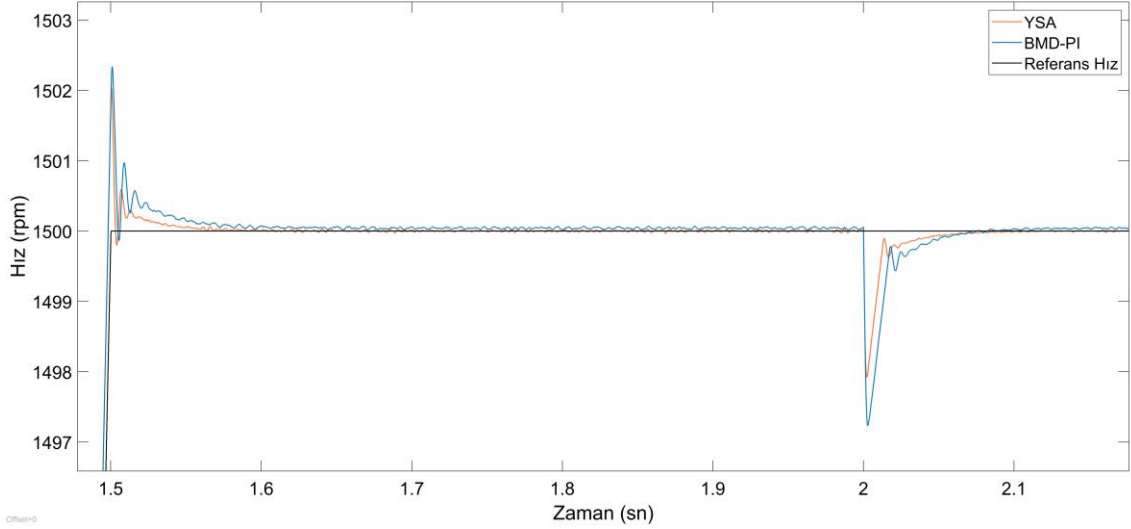


Şekil 5. 5. SMSM ani yük çıkışı durumunda stator akımları



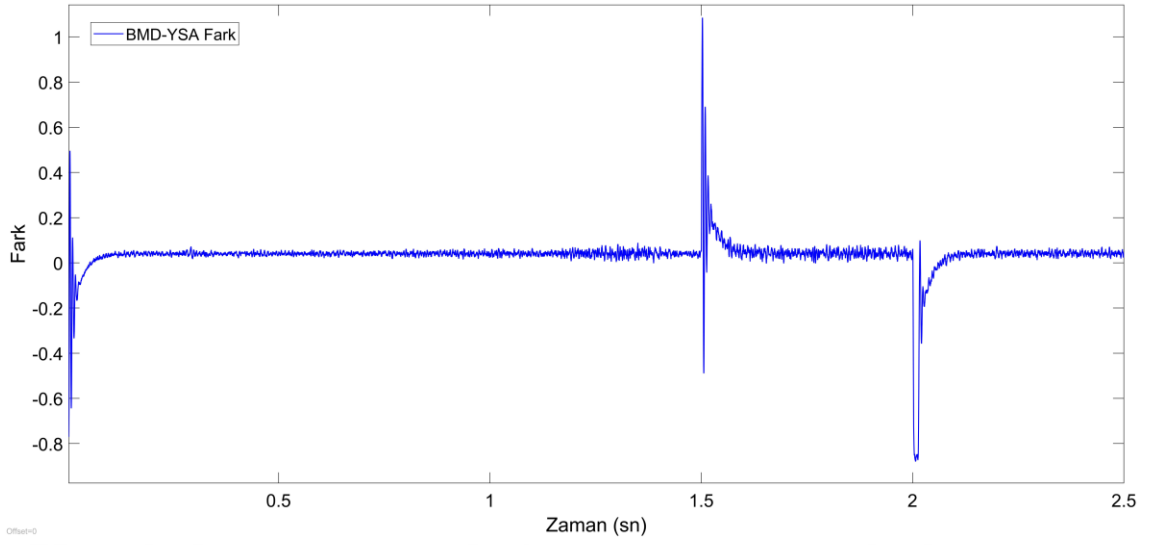
Şekil 5. 6. SMSM ani yük çıkışı durumunda tork cevabı

BMD-PI modellenerek oluşturulan YSA kontrolör ile BMD-PI kontrolörün SMSM'nin ani yük girişi durumunda 1500 d/dk hız aralığındaki karşılaştırması Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Referans hıza ulaşma ve yük girişi durumunda aşım oranı ve yerleşme süresinin YSA kontrolörde daha iyi olduğu görülmektedir. Ancak iki kontrolör arasında oldukça küçük bir fark vardır.



Şekil 5. 7. BMD-PI-YSA ani yük girişi hız karşılaştırması

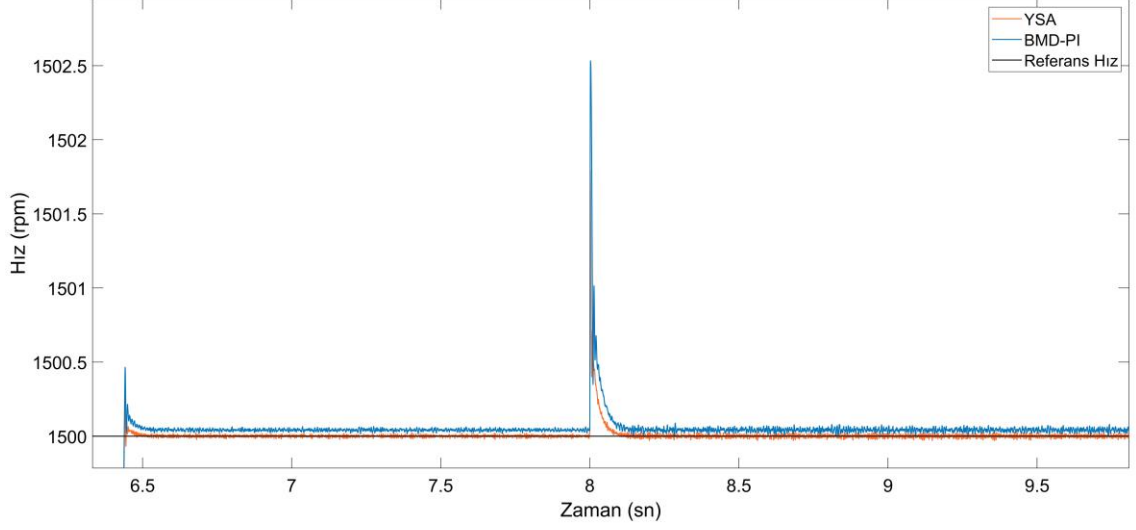
Şekil 5.8'de BMD-PI ve YSA kontrolörün motorun 1500 d/dk hıza ulaşması ve 2. Saniyede 15 Nm ani yük girişi olması durumunda meydana gelen fark gösterilmiştir.



Şekil 5. 8. BMD-PI ve YSA ani yük girişi farkı

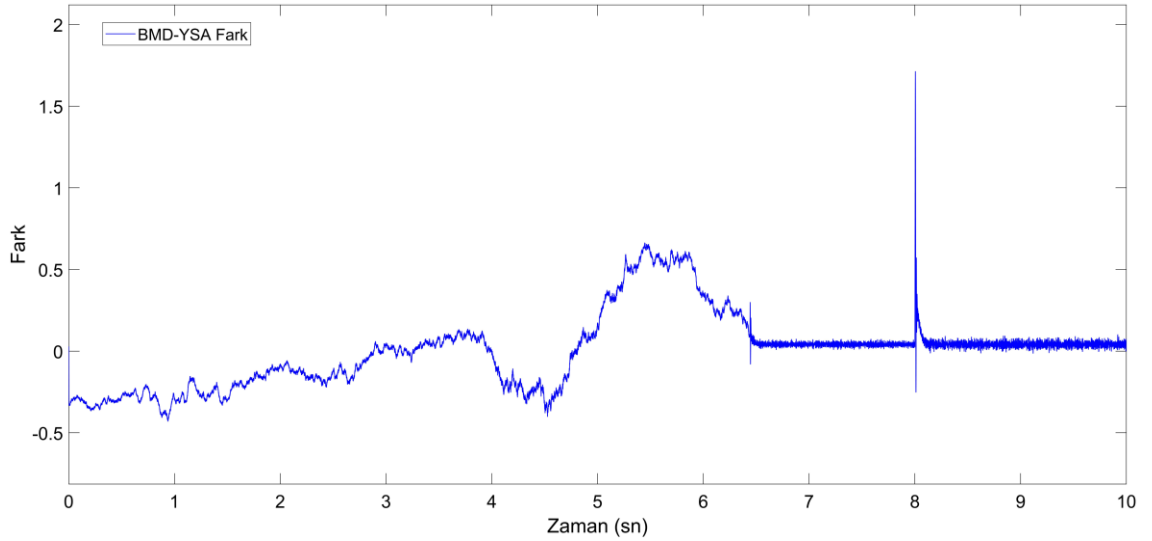
Şekil 5.8 incelendiğinde motorun ilk hareket anında 1.5'inci saniyede motor referans hıza ulaştığı anda ve 2. saniyede motora 15 Nm'lik ani yük girişi olduğunda bir fark meydana gelmektedir. Diğer durumlarda aralarındaki fark neredeyse sıfırdır. Motorun ilk kalkış anında yaklaşık olarak meydana gelen fark % 0.04 referans hıza ulaşma anında meydana gelen fark yaklaşık olarak % 0.06 ve ani yük girişi olduğunda meydana gelen fark yaklaşık olarak % 0.067'dir.

YSA kontrolör ile BMD-PI kontrolörün SMSM'nin ani yük çıkışı durumunda 1500 d/dk hız aralığındaki karşılaştırması Şekil 5.9'de gösterilmiştir. Referans hıza ulaşma ve yük girişi durumunda aşım oranı ve yerleşme süresinin YSA kontrolörde ani yük girişi durumunda olduğu gibi daha iyi olduğu görülmektedir. Ancak aralarında ki fark Şekil 5.7'de olduğundan daha fazladır. Motor başlangıçta 15 Nm'lik yük ile referans hıza ulaşmış ve 8. saniyede ani yük çıkışı olmuştur.



Şekil 5. 9. BMD-PI-YSA ani yük çıkışı hız karşılaştırması

Şekil 5.10'da BMD-PI ve YSA kontrolörün motorun 1500 d/dk hıza ulaşması ve 8. saniyede 15 Nm ani yük çıkışı olması durumunda meydana gelen fark gösterilmiştir.

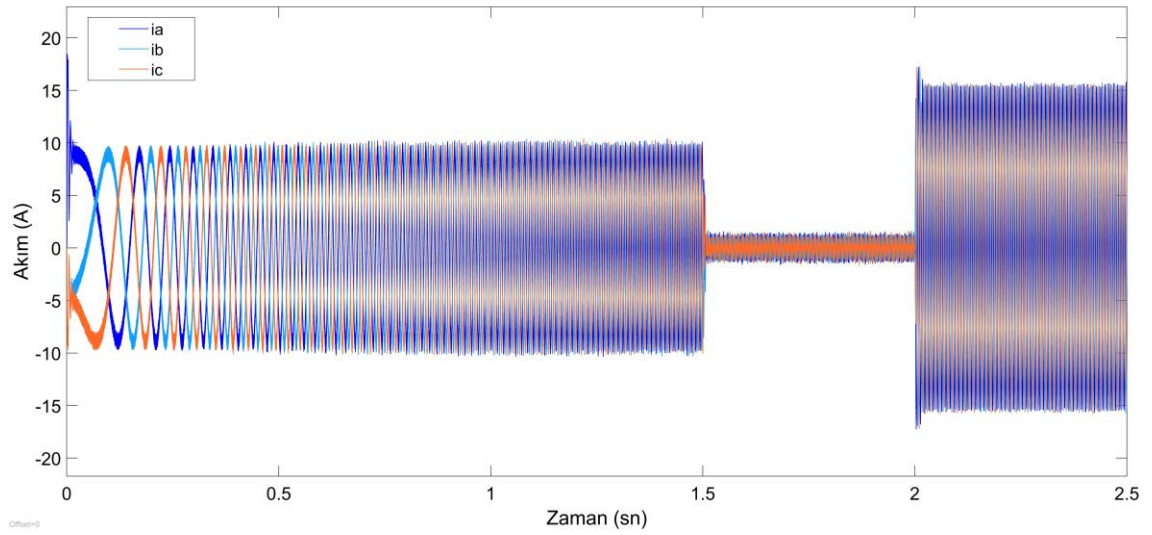


Şekil 5. 10 BMD-PI ve YSA Ani Yük Çıkışı Fark

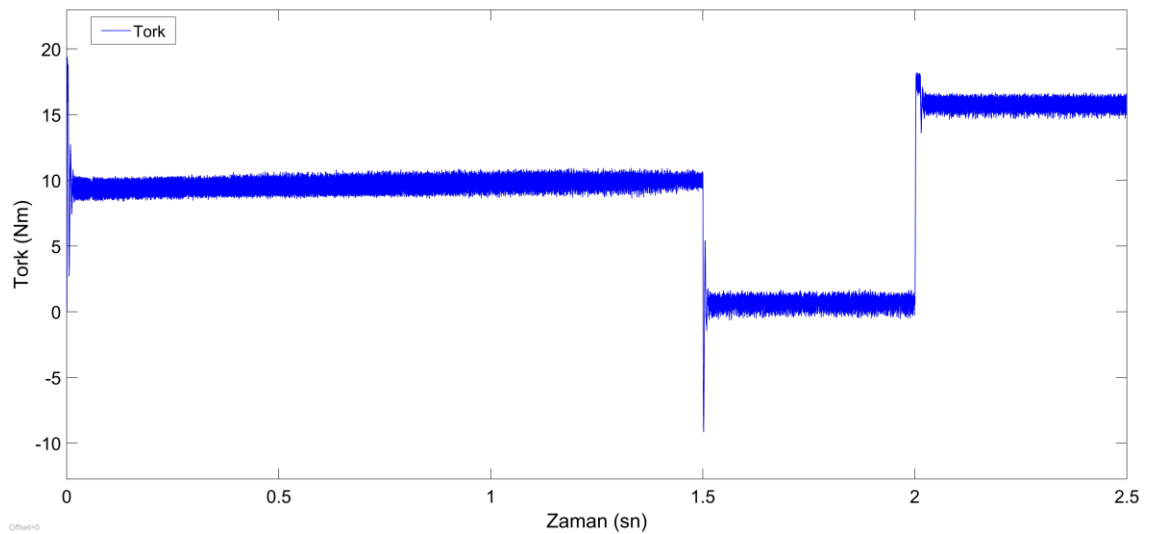
Şekil 5.10 incelendiğinde motor referans hıza ulaşmaya kadar ve 8. saniyede motordan 15 Nm'lik ani yük çıkışı olduğunda bir fark meydana gelmektedir. Diğer durumlarda aralarındaki fark neredeyse sıfırdır. Motorun referans hıza ulaşmaya kadar meydana gelen en büyük fark yaklaşık olarak % 0.04 ve 8. saniyede ani yük çıkışı olduğunda meydana gelen fark yaklaşık olarak % 0.10'dur.

Simülasyon sonuçlarında görülen BMD-PI ve YSA arasında meydana gelen farkın bu kadar küçük olması BMD-PI'nin YSA modelinin başarılı bir şekilde oluşturulduğunun ve YSA kontrolörün SMSM'nin hız kontrolünü başarılı bir şekilde gerçekleştirdiğini göstermektedir.

Simülasyon sonucunda elde edilen ani yük girişi durumundaki YSA kontrolöre ait stator akımları Şekil 5.11'de ve tork cevabı Şekil 5.12'de gösterilmiştir. Ani yük çıkışı durumundaki YSA kontrolöre ait stator akımları Şekil 5.13'de ve tork cevabı Şekil 5.14'de gösterilmiştir.

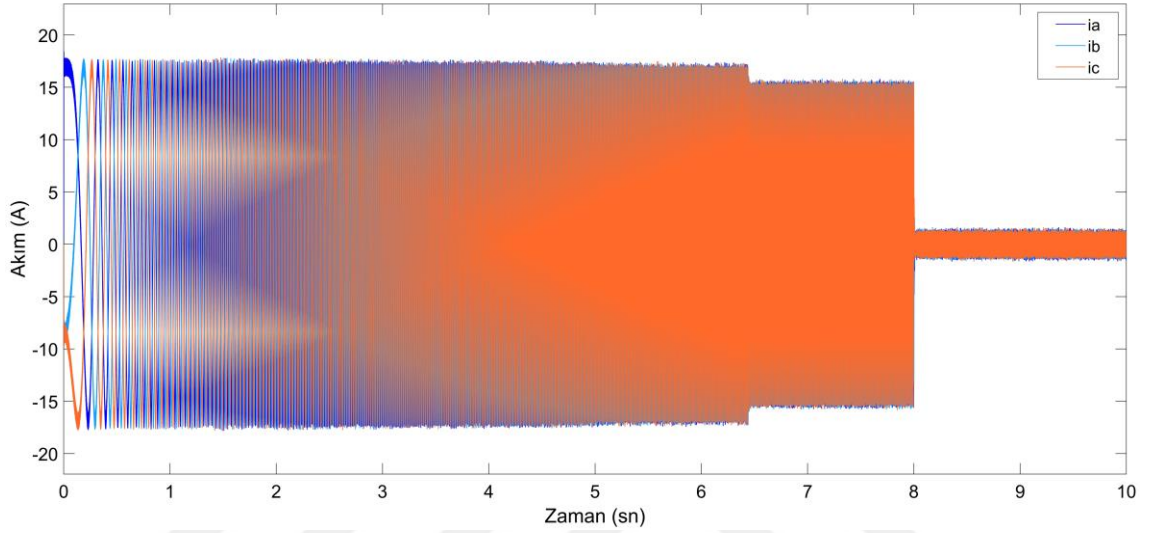


Şekil 5. 11 SMSM ani yük girişi durumunda stator akımları

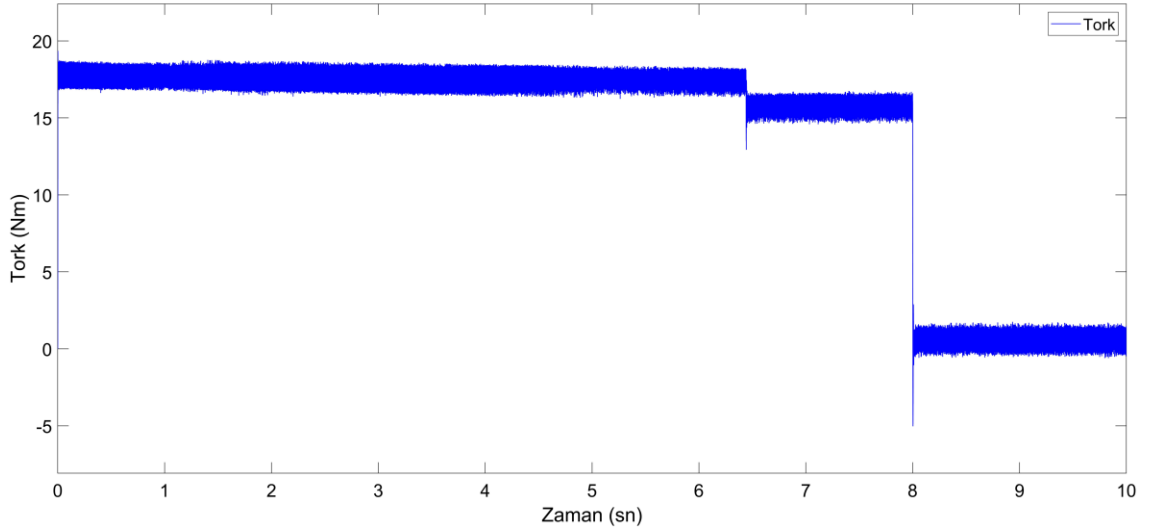


Şekil 5. 12. SMSM ani yük girişi durumunda tork cevabı

Ani yük girişi ve ani yük çıkışındaki stator akımları ve tork cevabı şekilleri incelendiğinde çok büyük oranda BMD-PI ile aynı sonuçları verdiği görülmektedir. Girilen yük ile orantılı olarak değiştikleri, sisteme zarar verecek seviyede bir aşım olmadığı ve yük giriş ve yük çıkış durumlarında sistemin kısa sürede kendisini toparladığı görülmektedir.



Şekil 5. 13. SMSM ani yük çıkışı durumunda stator akımları



Şekil 5. 14. SMSM ani yük çıkışı durumunda tork cevabı

6. SONUÇ

Sabit mıknatıslı senkron motorun alan yönlendirmeli kontrolü PI kontrolör BMD-PI kontrolör ve YSA ile gerçekleştirilmiştir. PI kontrolör ve BMD-PI kontrolör sabit mıknatıslı senkron motorun hızını kontrol etmek için kullanılmıştır. yapılan simülasyon çalışmalarında BMD-PI kontrolörün PI kontrolörden daha düşük bir aşım oranı ve yerleşme süresine sahip olduğu gözlemlenmiştir. 1500 d/dk referans hıza ulaşma anında PI kontrolörün aşım oranı yaklaşık olarak % 0.2 iken BMD-PI kontrolörün aşım oranı yaklaşık olarak % 0.13'tür. 15 Nm'lik bir yük girişi durumunda PI kontrolörün aşım oranı yaklaşık olarak % 0.27 iken BMD-PI kontrolörün aşım oranı yaklaşık olarak % 0.16'dır. 15 Nm'lik ani yük çıkış durumunda ise PI kontrolörün aşım oranı yaklaşık olarak % 0.26 iken BMD-PI kontrolörün aşım oranı yaklaşık olarak % 0.16'dır.

BMD-PI kontrolör daha sonra YSA ile modellenmiş ve SMSM'nin alan yönlendirmeli kontrolü gerçekleştirilmiştir. BMD-PI kontrolör YSA ile modellenirken YSA oldukça başarılı bir şekilde eğitilmiş ve 1 ara katman ve 5 yapay sinir hücresi kullanılarak oldukça basit hem donanımsal hem de yazılımsal olarak kolaylıkla gerçekleştirilebilecek bir YSA yapısı oluşturulmuştur. YSA ile modellenen BMD-PI kontrolör karşılaştırıldığında aralarındaki fark referans hıza ulaşma anında meydana yaklaşık olarak % 0.06, ani yük girişi olduğunda meydana gelen fark yaklaşık olarak % 0.067 ve ani yük çıkışı olduğunda meydana gelen fark yaklaşık olarak % 0.10 olmuştur. Simülasyon çalışmaları sonucunda görülmüştür ki BMD-PI kontrolör PI kontrolöre göre daha etkili bir kontrol performansı sergilemiştir. BMD-PI'nin YSA modeli başarılı bir şekilde oluşturulmuş ve SMSM'nin hız kontrolü gerçekleştirilmiştir. Ayrıca YSA modeli paralel yapıya sahiptir, bu sebeple BMD-PI'ya göre daha hızlı çalışmakta ve bu sayede özellikle yük değişimleri gibi bozucu girişleri bastırmada çok daha etkili sonuçlar üretmiştir.

Gelecek çalışmalarda önerilen kontrol yöntemi gerçek zamanlı deneysel bir platform üzerinde yapılabilir ve SMSM'nin hız kontrolünün yanı sıra pozisyon ve tork kontrolü de gerçekleştirilebilir.

7. KAYNAKÇA

- Levitan , I. B., & Kaczmarek, L. K. (2015). *The Neuron: Cell and Molecular Biology*. New York: Oxford University Press.
- Ross, T. J. (2010). *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. New Mexico: John Wiley & Sons, Ltd.
- (2022). [www.chegg.com: https://www.chegg.com/learn/physics/introduction-to-physics/permanent-magnetism](https://www.chegg.com/learn/physics/introduction-to-physics/permanent-magnetism) adresinden alındı
- Adhavan, B., Kuppuswamy , A., Jayabaskaran, G., & Jagannathan, V. (2011). Field oriented control of Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) using fuzzy logic controller. *EEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems*, 582597.
- Akin, B., Bhardwaj, M., & Warriner, J. (2013). sensorless field oriented control of 3-phase permanent magnet synchronous motors. *exas Instruments, Application Notes*, 2.
- Albostan, A., & Gökbulut, M. (2013). Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların Katlı Yapay Sinir Ağları İle Modellenmesi ve Uyarlamalı Denetim. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* , 11 (2), 1-19.
- Al-Odienat, A., & Al-Lawama, A. (2008). The Advantages of PID Fuzzy Controllers Over The Conventional Types . *American Journal of Applied Sciences*, 653-658.
- Altaş, İ. H. (1999). *Bulanık Mantık : Bulanıklılık Kavramı*. Bilesim yayıncılık A.Ş, 80-85.
- Amin , F., Sulaiman, E., & Soomro, H. A. (2019). Field Oriented Control Principles for Synchronous Motor. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research* , 284-288.
- Babuška, R. (2012). *Fuzzy modeling for control*. Springer Science & Business Media.
- Bartheld, C. V., Bahney, J., & Houzel, S. H. (2016). The search for true numbers of neurons and glial cells in the human brain: A review of 150 years of cell counting. *Computer Neurology*, 3865-3895.
- Bhardwaj, M. (2013). *Sensored Field Oriented Control of 3-Phase Permanent Magnet Synchronous Motors*. Texas: Texas Instruments.
- Blaschke, F. (1971). A new method for the structural decoupling of AC induction machines. *Rec. IFAC* , (s. 1-15).
- Blaschke, F. (1972). The principle of field orientation as applied to the new transvector closed-loop system for rotating-field machines. *Siemens review*, 217-220.
- Cao, X., & Fan, L. (2006). Vector controlled PMSM drive based on adaptive neuro-fuzzy speed controller. *n Intelligent Control and Automation*, 616-622.

- Çelik, H. (2012). Sürekli mıknatıslı senkron motorun DSP tabanlı doğrudan moment kontrolünün araştırılması. Elazığ: Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çınar, U. K. (2018, 08 13). <https://www.veribilimiokulu.com/>:
<https://www.veribilimiokulu.com/yapay-sinir-aglari/> adresinden alındı
- Depenbrock, M. (1985). DTC Leans on the Theory of Field Oriented Control of Induction Machines and the Theory of Direct Self-control. *Etz-Archive BD.7*, s. 211-218.
- Depenbrock, M. (1988, October). Direct self-control (DSC) of inverter-fed induction machine. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 420-429.
- Ding, Y. (2021). Comparative study on the control effect of Permanent magnet synchronous motor based on fuzzy PID control and BP neural network PID control. *Journal of Physics: Conference Series*.
- Djelandma, I., & Bouchareb, I. (2022). Field-oriented control based on adaptive neuro-fuzzy inference system for PMSM dedicated to electric vehicle. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 1892-1901.
- Doğan, H. (2006). Uzay Vektör Pwm Kontrollü Tek Fazlı Kesintisiz Güç Kaynağının Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi. Konya: Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Duru, H., & Demiröz, R. (2006). Asansör Makinalarında Mıknatıs Uyarmalı Senkron Motor ve Doğrudan Tahrik Sisteminin Kullanımı. 1. EVK Sempozyumu. Kocaeli.
- Essalmi, A., Mahmoudi, H., Abbou, A., & Bennassar, A. (2014). DTC of PMSM based on artificial neural networks with regulation speed using the fuzzy logic controller. *International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, (s. 879-883).
- Feng, Q., Zhang, J., Zhang, X., & Wen, S. (2015). Proximate analysis based prediction of gross calorific value of coals: a comparison of support vectormachine, alternating conditional expectation and artificial neural network. *Fuel Processing Technology*, 120-129.
- Gaballah, M. M. (2013). Design and Implementation of Space Vector PWM Inverter Based on a Low Cost Microcontroller. *Arab J Sci Eng*, 3057-3070.
- Genç Ünalın, A. M. (2017). Development of rare-earth free permanent mangnets. Ankara.
- Gu, D., Yao, Y., Zhang, D. M., Cui, Y., & Zeng, F. (2020). Matlab/Simulink Based Modeling and Simulation of Fuzzy PI Control for PMSM. *Procedia Computer Science*, 195-199.
- Güney, E., Karagöl, S., & Demir, M. (2019). A Comparative Real-Time Speed Control of PMSM with Fuzzy Logic and ANN Based Vector Controller. *Şırnak Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* , 123-143.
- Haykin, S. S. (2009). *Neural Networks and Learning Machines* (3rd ed.). New York: Prentice Hall.

- Jang, J. S., & Sun, C.-T. (1995). Neuro-fuzzy modeling and control. Proceedings of the IEEE, 378-406.
- Koçak , Y. (2022). Geleneksel Regresyon Analizi ile Yapay Sinir Ağlarının Farklı Aktivasyon Fonksiyonları Kullanılarak Karşılaştırılması. Adana: Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kovac, N., & Bauk, S. (2006). The Anfis based route preference estimation in sea navigation. Journal of Maritime Research, 69-86.
- Krishnan, R. (2010). Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives. New York: Taylor & Francis Group.
- Kumar, V., Gaur, P., & Mittal, A. P. (2014). ANN based self tuned PID like adaptive controller design for high performance PMSM position control. Expert Systems with Applications, 7995-8002.
- Liu, J., Gong, C., Han, Z., & Zhang, E. (2017). An Improved Adaptive Fuzzy PID Controller for PMSM and A Novel Stability Analysis Method. IEEE International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia, (s. 2161-2164).
- Liu, Q., & Chang, X. H. (2018). Position IP control of a permanent magnet synchronous motor based on fuzzy neural network. Chinese Control And Decision Conference (CCDC) , (s. 1081-1086).
- Livingstone, D. J. (2008). Artificial neural networks methods and applications. Sandown, UK: Springer.
- Mamdani, E. H. (1974). Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant. Proceedings of the IEEE, 1585-1588.
- Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An Experiment In Linguistic Synthesis With A Fuzzy Logic Controller. International Journal of Man-Machine Studies, 1-13.
- McCulloch, W. S., & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. The bulletin of mathematical biophysics, 115-133.
- Na , R., & Wang, X. (2014). An Improved Vector-Control System of PMSM Based on Fuzzy Logic Controller. International Symposium on Computer, Consumer and Control, (s. 326-331).
- Özçıra, S. (2007). Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Kontrol Yöntemleri ve Endüstriyel Uygulamaları. İstanbul: Yüksek Lisans Tezi.
- Özçıra, S. (2013). Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Doğrudan Moment Kontrolünün DSP Tabanlı Yeni Bir Algoritma Geliştirerek Gerçekleştirilmesi. İstanbul: Doktora Tezi.
- Öztemel, E. (2003). Yapay Sinir Ağları. istanbul: Papatya yayıncılık.
- Purves, D. (2008). Neuroscience. (Fourth edition). Sunderland, U.S.A: Sinauer Associates.
- Rahman , M. A., & Hoque, M. A. (1998). On-line Adaptive Artificial Neural Network Based Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motors. IEEE Transactions on Energy Conversion, 311-318.

- Rahman, M. A., & Slemaon, G. R. (1985). Promising Applications of NdFeB Magnets in Electrical Machines. IEEE, 1712-1717.
- Rao, A. S. (1993). Alnico permanent magnets an overview. roceedings of Electrical/Electronics Insulation Conference, (s. 373-383).
- Rao, R. K., Srinivas, P., & Kumar, M. V. (2014). Design and analysis of various inverters using different PWM techniques. The International Journal Of Engineering And Science, 41-51.
- Saatçioğlu, D., & Özçakar, N. (2016). Yapay Sinir Ağları Yöntemi ile Aralıklı Talep Tahmini. Beykoz Akademi Dergisi, 1-32.
- Sakunthala, S., Kiranmayi , R., & Mandadi, P. N. (2017). A study on fuzzy controller and neuro-fuzzy controller for speed control of PMSM motor. 2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI), (s. 1409-1413).
- Sam, M., & Can, M. S. (2019). Imitation of Fuzzy Logic Controller Based Artificial Neural Network, and Application of Inverted Pendulum System Control. European Journal of Technique, 121-136.
- Sara , H. (2016). Study of Magnetic Properties and Demagnetization Models of Permanent Magnets for Electric Vehicles Application. Canada.
- Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy Identification of Systems and its Application to Modelling and Control. IEEE Trans. Syst. Man cybernet, 116-132.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. Information and Control, 338-353.
- Zadeh, L. A. (1973). Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 28-44.
- Zadeh, L. A. (1975). The concept of linguistic variable and its application to approximate reasoning. Information Sciences, 43-80.

8. ÖZGEÇMİŞ

