

T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RÜZGÂR TÜRBİNİ DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİNİN ESNEK
HESAPLAMA YÖNTEMİ İLE DENETİMİ**

Tezi Hazırlayan
İzzet YAVUZ

Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Altan GENCER

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Temmuz 2021
NEVŞEHİR

Dr. Öğr. Üyesi Altan GENCER danışmanlığında **İzzet YAVUZ** tarafından hazırlanan “**Rüzgâr Türbini Dönüştürücülerinin Esnek Hesaplama Yöntemi İle Denetimi**” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

../../20..

JÜRİ

Başkan :

Üye :

Üye :

Üye :

Üye :

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun.....tarih ve..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

../../20..

.....

Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİM SAYFASI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada yer alan bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



İzzet YAVUZ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam süresince tüm bilgilerimi benimle paylaşmaktan kaçınmayan, her türlü konuda desteğini benden esirgemeyen ve tezimde büyük emeği olan Sayın Hocam Dr. Öğr. Üyesi Altan GENCER' e,

Aralarında olduğum günden beri beni yetiştirmek için emek veren ve beni asla yalnız bırakmayan, desteğini her zaman yanımda hissettiğim annem Fidan'a, babam Suphi'ye, kardeşlerime ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi ve sevgimi sunuyorum.

RÜZGÂR TÜRBİNİ DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİNİN ESNEK HESAPLAMA YÖNTEMİ İLE DENETİMİ

(Yüksek Lisans Tezi)

İzzet YAVUZ

NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2021

ÖZET

Son yıllarda, dünya üzerinde elektrik enerjisine olan talep günden güne artmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olan rüzgâr enerjisi, elektrik üretiminde en yüksek büyüme oranına sahiptir. Rüzgâr türbini, rüzgâr enerjisinde var olan kinetik enerjiyi, elektrik enerjisine dönüştürür. Rüzgâr türbinleri sabit ve değişken hızlı olmak üzere iki çeşittir. Bu kinetik enerjinin rüzgâr enerjisinde daha verimli kullanılabilmesi için değişken hızlı rüzgâr türbinleri daha çok tercih edilmektedir. Çift Beslemeli Asenkron Generatörlerin (ÇBAG), değişken hızlı ve büyük güçlü rüzgâr türbinlerinde kullanımı yaygındır. Bu tez çalışmasında ÇBAG tabanlı rüzgâr türbin sisteminin yapısı ve kontrolü incelenmiştir. ÇBAG tabanlı rüzgâr türbin sistemi çift yönlü enerji akışına olanak sağlayabilmesinden dolayı arka arkaya bağlı iki adet dönüştürücüden oluşmaktadır. Dönüştürücünün kontrolü için Oransal- İntegral (PI) kullanılarak Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) için veri seti elde edilmiştir. Elde edilen veri seti ile YSA ve ANFIS' in eğitimi gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda, elde edilen en iyi değerler ile sistem modellenmiş ve rüzgâr türbin sistemine entegrasyonu yapılmıştır. ÇBAG tabanlı rüzgâr türbin sistemi MATLAB/ Simulink ortamında modellenmiştir. YSA ve ANFIS kullanılarak, ÇBAG

tabanlı rüzgâr türbin sisteminin sırasıyla aktif güç, reaktif güç ve DA bara gerilim değerleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda YSA kullanılarak tasarlanan sistemin daha iyi bir performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Yenilenebilir enerji kaynakları, Rüzgâr türbini.

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi. Altan GENCER

Sayfa âdeti: 143



THE CONTROL OF WIND TURBINE CONVERTERS WITH SOFT COMPUTING METHOD

(M. Sc. Thesis)

İzzet YAVUZ

NEVSEHIR HACI BEKTAS VELI UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2021

ABSTRACT

In recent years, the demand for electrical energy in the world has increased day by day. Wind energy, one of the renewable energy sources, has the highest growth rate in electricity production. The wind turbine converts from the kinetic energy of the wind energy to electrical energy. There are two types of wind turbines, fixed and variable speed. Variable speed wind turbines are more preferred in order to use this kinetic energy in wind energy more efficiently. Double Feed Induction Generators (DFIGs) are widely used in variable speed and large power wind turbines. In this thesis, the control and the structure of the wind turbine system based on DFIG are examined. The wind turbine system based on DFIG consists of two converters connected back-to-back because it allows bidirectional energy flow. The data set for Artificial Neural Networks (ANN) and Adaptive Network Based Fuzzy Inference System (ANFIS) are obtained by using Proportional-Integral (PI) for the control of the converter. The training of ANN and ANFIS are carried out with the obtained data set. At the same time, the system is modeled with the best values obtained and integrated into the wind turbine system. The wind turbine system based on DFIG is modeled in MATLAB/Simulink environment. Different membership functions were simulated for ANN and ANFIS, and the

membership function with the best error value was used in system modeling. The active power, reactive power and DC bus voltage values of the wind turbine system based on DFIG are compared by using ANN and ANFIS, respectively. As a result of the comparison, it is observed that the system designed using ANN performed better.

Key words: Renewable energy sources, Wind turbine

Thesis Supervisor: Assist. Prof. Dr. Altan GENCER

Page Number: 143



İÇİNDEKİLER

TEZ BİLDİRİM SAYFASI	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
İÇİNDEKİLER	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xvii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1.Literatür çalışması.....	3
BÖLÜM 2	5
RÜZGÂR TÜRBİNLERİ.....	5
2.1. Rüzgâr Türbini Çeşitleri.....	6
2.1.1. Kurulum yerine göre rüzgâr türbinleri	6
2.1.2. Kurulum gücüne göre rüzgâr türbinleri.....	7
2.1.3. Devir sayısına göre rüzgâr türbinleri.....	7
2.1.4. Dişli kutusuna göre rüzgâr türbinleri	8
2.1.5. Rüzgâr etkisine göre rüzgâr türbinleri.....	8
2.1.6. Kanat sayısına göre rüzgâr türbinleri	9
2.1.7. Dönme eksenine göre rüzgâr türbinleri.....	11
BÖLÜM 3	15
RÜZGÂR SANTRALLERİNDE KULLANILAN GENERATÖR ÇEŞİTLERİ.....	15
3.1. DA Generatör.....	15

3.2. Senkron Generatör	16
3.2.1. Rotoru sargılı senkron generatör (RSSG)	17
3.2.2. Sabit mıknatıslı senkron generatör (SMSG)	18
3.3. Asenkron Generatör	20
3.3.1. Sincap kafesli asenkron generatör (SKAG)	21
3.3.2. Rotoru sargılı asenkron generatör (RSAG).....	22
BÖLÜM 4	26
RÜZGÂR TÜRBİN SİSTEMLERİNDE KULLANILAN KONTROL YÖNTEMLERİ.....	26
4.1. PID kontrol yöntemi.....	26
4.1.1. Oransal (P) Kontrolcü	28
4.1.2. İntegral (I) kontrolcü	29
4.1.3. Türevsel (D) Kontrolcü	29
4.1.4. Oransal integral (PI) Kontrolcü.....	30
4.1.5. Oransal türevsel (PD) kontrolcü	30
4.1.6. Oransal integral türevsel (PID) kontrolcü	30
4.2. Yapay Sinir Ağları (YSA).....	31
4.2.1. YSA'nın avantajları ve dezavantajları	32
4.2.2. YSA'nın genel yapısı	33
4.2.3. YSA'nın yapısı.....	36
4.2.4. YSA'nın sınıflandırılması	37
4.2.5. YSA'nın öğrenme algoritması	39
4.2.6. YSA'nın eğitilmesi	42
4.3. Bulanık Mantık (BM).....	43
4.3.1. Genel BM kontrolcüler	46
4.3.2. BMD'nin avantajları ve dezavantajları	50
4.3.3. Adaptif sinir ağına dayalı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS)	51

4.3.4. BMD'nin uygulama alanları	53
BÖLÜM 5	55
RÜZGÂR TÜRBİN SİSTEMİNDE KULLANILAN DÖNÜŞTÜRÜCÜLER.....	55
5.1. Matris Dönüştürücüler	55
5.2. Tandem Dönüştürücüler.....	56
5.3. Rezonans Dönüştürücüler	57
5.4. Çok Seviyeli Dönüştürücüler	58
5.5. Ardışık Dönüştürücüler.....	59
5.6. Gerilim Kaynaklı Evirici.....	60
5.6.1. Sinüzoidal DGM	62
5.6.2. Uzay Vektör DGM.....	64
5.6.3. Sigma Delta Modülasyonu.....	68
5.6.4. Üçüncü Harmonik İlaveli DGM	68
BÖLÜM 6	70
ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖRÜN MATEMATİKSEL MODELİ VE KONTROLÜ.....	70
6.1. Clarke (abc- $\alpha\beta$) Dönüşüm Matrisleri	71
6.2. Park ($\alpha\beta$ -dq) Dönüşüm Matrisleri.....	71
6.3. Çift Beslemeli Asenkron Generatörün Dinamik Eşitliği	72
6.4. ÇBAG Kontrol Yöntemleri.....	76
6.4.1. Şebeke tarafı dönüştürücü kontrolü	77
6.4.2. Rotor tarafı dönüştürücü kontrolü.....	79
BÖLÜM 7	84
BENZETİM ÇALIŞMASI.....	84
7.1. PI kontrolör ile rüzgâr türbini dönüştürücü kontrolü	85
7.1.1. PI ile ŞTD kontrolü	86

7.1.2. PI ile RTD kontrolü.....	86
7.2. ANFIS ile Rüzgâr türbini dönüştürücü kontrolü.....	90
7.2.1. ANFIS ile ŞTD kontrolü.....	91
7.2.2. ANFIS ile RTD kontrolü.....	93
7.3.YSA ile rüzgâr türbini dönüştürücü kontrolü.....	99
7.3.1. YSA ile ŞTD kontrolü.....	102
7.3.2. YSA ile RTD kontrolü.....	104
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	112
KAYNAKLAR.....	114
ÖZGEÇMİŞ.....	124

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 4.1. Biyolojik sinir ağı ile yapay sinir ağının karşılaştırılması	34
Tablo 4.2. Yaygın olarak kullanılan aktivasyon fonksiyonları	36
Tablo 4.3. Bulanık mantık ile klasik mantık arasındaki temel farklılıklar.....	44
Tablo 4.4. Üyelik fonksiyonlarına ait grafik ve formüller	45
Tablo 4.5. Matlab’da tanımlı üyelik fonksiyonları	46
Tablo 4.6. Bulanık mantık kontrolcünün uygulama alanları.....	54
Tablo 6.1. ÇBAG eş değer devresinde kullanılmış parametreler.....	73
Tablo 7.1. ŞTD için üyelik fonksiyonlara ait hata değeri	92
Tablo 7.2. RTD için üyelik fonksiyonlara ait hata değeri.....	94

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. 2009-2019 yılları arasında birincil enerji kaynaklarının değişimi.....	2
Şekil 2.1. Rüzgâr Türbinin İç Yapısı	6
Şekil 2.2. Rüzgâr Türbini Sınıflandırılması.....	6
Şekil 2.3. Kurulum yerine göre rüzgâr türbinleri (a) onshore rüzgâr türbini, (b) offshore rüzgâr türbini.....	7
Şekil 2.4. Rüzgâr etkisine göre rüzgâr türbinleri (a) rüzgârı önden alan türbin sistemi, (b) rüzgârı arkadan alan türbin sistemi.....	9
Şekil 2.5. Kanat sayısına göre rüzgâr türbinleri (a) tek kanatlı rüzgâr türbini, (b) çift kanatlı rüzgâr türbini	10
Şekil 2.6. Kanat sayısına göre rüzgâr türbinleri (a) üç kanatlı rüzgâr türbini, (b) çok kanatlı rüzgâr türbini	11
Şekil 2.7. Yatay eksenli rüzgâr türbini.....	12
Şekil 2.8. Dikey eksenli göre rüzgâr türbinleri (a) darrieus tipi rüzgâr türbini, (b) savonius tipi rüzgâr türbini	13
Şekil 2.9. Eğik eksenli rüzgâr türbini.....	14
Şekil 3.1. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatör çeşitleri.....	15
Şekil 3.2. DA generatör tabanlı rüzgâr türbini genel yapısı.....	16
Şekil 3.3. RSSG tabanlı rüzgâr türbini genel yapısı.....	18
Şekil 3.4. SMSG tabanlı rüzgâr türbini genel yapısı.....	19
Şekil 3.5. Asenkron generatör tabanlı rüzgâr türbini genel yapısı.....	21
Şekil 3.6. SKAG tabanlı rüzgâr türbini genel yapısı.....	22
Şekil 3.7. RSAG tabanlı rüzgâr türbini genel yapısı.....	23
Şekil 3.8. ÇBAG tabanlı rüzgâr türbini genel yapısı	25
Şekil 4.1. Bir giriş ve bir çıkışlı basit kontrol sistemi diyagramı.....	27
Şekil 4.2. Açık çevrim kontrol sistemi diyagramı	27
Şekil 4.3. Kapalı çevrim kontrol sistemi blok diyagramı.....	28
Şekil 4.4. PID kontrol	31
Şekil 4.5. Biyolojik Sinir Hücresi	33
Şekil 4.6. Yapay sinir hücresi yapısı.....	34
Şekil 4.7. YSA Yapısı	37
Şekil 4.8. Geri Beslemeli Yapay Sinir Ağı	38

Şekil 4.9. İleri beslemeli yapay sinir ağı	39
Şekil 4.10. Danışmanlı öğrenme	41
Şekil 4.11. Danışmansız öğrenme	42
Şekil 4.12. Takviyeli öğrenme	42
Şekil 4.13. Klasik üyelik fonksiyonu	44
Şekil 4.14. Bulanık üyelik fonksiyonu	45
Şekil 4.15. Bulanık Mantık Kontrolcünün Genel Yapısı	46
Şekil 4.16. İnsan kilosunun bulanık üyelik fonksiyonlarla ifade edilmesi	47
Şekil 4.17. İki girişli ve iki kurallı olan ANFIS mimarisi.....	52
Şekil 5.1. Matris Dönüştürücü Devre Yapısı	56
Şekil 5.2. Tandem Dönüştürücü Devre Yapısı.....	57
Şekil 5.3. Rezonans Dönüştürücü Devre Yapısı	58
Şekil 5.4. Çok seviyeli dönüştürücünün bir evirici ayağının devreleri(a) Üç seviye diyot kenetlemeli, (b) İki yönlü ara anahtarlamalı, (c) Kondansatörlü, (d) Üç fazlı iki katlı gerilim kaynaklı eviricilerden oluşan, (e) H köprü eviricili.....	59
Şekil 5.5. Ardışık Dönüştürücü Devre Yapısı.....	59
Şekil 5.6. Üç fazlı iki seviyeli evirici devresi	61
Şekil 5.7. İki Seviyeli Sinüzoidal DGM	62
Şekil 5.8. Aşırı Modülasyon Bölgesinde oluşan Kare Dalga Sekli.....	63
Şekil 5.9. Sinüzoidal DGM'in Aşırı Modülasyon Bölgesindeki Çıkış Transfer Karakteristiği.....	64
Şekil 5.10. Uzay Vektör DGM Devre Yapısı	65
Şekil 5.11. Sekiz Anahtarın Çalışma Durumu	66
Şekil 5.12. Bir periyotluk çalışma durumu	66
Şekil 5.13. Durağan Çatıdaki Anahtarların Gösterimi	67
Şekil 5.14. Üçüncü harmonik eklemeli DGM.....	69
Şekil 6.1. Gerilim vektörünün abc- dq ve abc- $\alpha\beta$ dönüşümleri ile vektörel gösterimi ..	71
Şekil 6.2. ÇBAG eşdeğer devresi.....	73
Şekil 6.3. ÇBAG şebeke bağlantısı	77
Şekil 6.4. Şebeke Tarafı dönüştürücü kontrol sistemi	79
Şekil 6.5. Rotor ve stator akılarının vektörel gösterimi	80
Şekil 6.6. Rotor tarafı dönüştürücü kontrol sistemi	80

Şekil 6.7. Reaktif güç kontrolü	82
Şekil 6.8. Aktif güç, hız ve moment kontrolü	82
Şekil 7.1. Tasarlanan ÇBAG rüzgâr türbini sistemi.....	84
Şekil 7.2. Rüzgâr türbin sistemi	85
Şekil 7.3. Şebeke tarafı dönüştürücünün PI ile kontrolü.....	86
Şekil 7.4. Rotor tarafı dönüştürücünün PI ile kontrolü	86
Şekil 7.5. PI ile kontrol edilen sistemin aktif güç cevabı.....	87
Şekil 7.6. PI ile kontrol edilen sistemin reaktif güç cevabı.....	87
Şekil 7.7. PI ile kontrol edilen sistemin DA bara gerilim cevabı.....	88
Şekil 7.8. PI ile kontrol edilen sistemin generatör çıkışı hat gerilimleri.....	88
Şekil 7.9. PI ile kontrol edilen sistemin generatör çıkışı yakınlaştırılmış ve hat gerilimleri.....	89
Şekil 7.10. PI ile kontrol edilen sistemin generatör çıkışı hat akımları	89
Şekil 7.11. PI ile kontrol edilen sistemin generatör çıkışı yakınlaştırılmış hat akımları	90
Şekil 7.12. ANFİS editörü işlem arayüzü	90
Şekil 7.13. ŞTD için (a) modelin öğrenme eğrisi, (b) tahmin verisi ile gerçek değer kıyaslanması.....	92
Şekil 7.14. Şebeke tarafı dönüştürücünün ANFİS ile kontrolü.....	93
Şekil 7.15. RTD için (a) modelin öğrenme eğrisi, (b) tahmin verisi ile gerçek değer kıyaslanması.....	94
Şekil 7.16. RTD ve ŞTD için ANFİS ağ yapısı	95
Şekil 7.17. Rotor tarafı dönüştürücünün ANFİS ile kontrolü	95
Şekil 7.18. ANFİS ile kontrol edilen sistemin aktif güç değişimi	96
Şekil 7.19. ANFİS ile kontrol edilen sistemin reaktif güç değişimi	96
Şekil 7.20. ANFİS ile kontrol edilen sistemin DA bara gerilim değişimi	97
Şekil 7.21. ANFİS ile kontrol edilen sistemin generatör çıkışı hat gerilimleri.....	97
Şekil 7.22. ANFİS ile kontrol edilen sistemin generatör çıkışı yakınlaştırılmış hat gerilimleri.....	98
Şekil 7.23. ANFİS ile kontrol edilen sistemin generatör çıkışı hat akımları	98
Şekil 7.24. ANFİS ile kontrol edilen sistemin generatör çıkışı yakınlaştırılmış hat akımları	99
Şekil 7.25. Neural Network Fitting Tool Ön İzleme Ekranı	99

Şekil 7.26. Veri setinin tanıtımı yapıldığı arayüz	100
Şekil 7.27. YSA veri bölümlendirme ara yüzü	100
Şekil 7.28. Oluşturulan ağın genel yapısı.....	101
Şekil 7.29. Ağ eğitiminin başlatılacağı arayüz.....	101
Şekil 7.30. ŞTD için eğitim sonucu	102
Şekil 7.31. YSA öğrenme arayüzü sonuçları	103
Şekil 7.32. ŞTD için YSA öğrenme performans verileri	103
Şekil 7.33. ŞTD'nin YSA ile kontrolü	104
Şekil 7.34. RTD için eğitim sonucu	104
Şekil 7.35. RTD İçin YSA öğrenme performans verileri	105
Şekil 7.36. RTD'nin YSA ile kontrolü	105
Şekil 7.37. YSA ile kontrol edilen sistemin aktif güç değişimi	106
Şekil 7.38. YSA ile kontrol edilen sistemin reaktif güç değişimi.....	106
Şekil 7.39. YSA ile kontrol edilen sistemin DA bara gerilim değişimi.....	107
Şekil 7.40. YSA ile kontrol edilen sistemin generatör çıkışı hat gerilimleri	107
Şekil 7.41. YSA ile kontrol edilen sistemin generatör çıkışı yakınlaştırılmış hat gerilimleri.....	108
Şekil 7.42. YSA ile kontrol edilen sistemin generatör çıkışı hat akımları.....	108
Şekil 7.43. YSA ile kontrol edilen sistemin generatör çıkışı yakınlaştırılmış, hat akımları	109
Şekil 7.44. YSA ve ANFIS aktif güç değişimleri	110
Şekil 7.45. YSA ve ANFIS reaktif güç değişimleri.....	110
Şekil 7.46. YSA ve ANFIS DA bara gerilimi değişimleri.....	111

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AA	Alternatif Akım
ASSG	Alan Sargılı Senkron Generatör
BMK	Bulanık Mantık Kontrolcüsü
ÇBAG	Çift Beslemeli Asenkron Generatör
DA	Doğru Akım
ŞTK	Şebeke Tarafı Kontrol
RTK	Rotor Tarafı Kontrol
KABMD	Kendinden Ayarlamalı Bulanık Mantık Kontrolcü
ŞTD	Şebeke Tarafı Dönüştürücü
RTD	Rotor Tarafı Dönüştürücü
DERT	Düşey Eksenli Rüzgâr Türbinleri
DHRT	Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinleri
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu
SKAG	Sincap Kafesli Asenkron Generatör
EESG	Elektriksel Uyartımlı Senkron Generatör
RSSG	Rotoru Sargılı Senkron Generatör
OSIG	Optislip Asenkron Generatör
MSE	Hata Kareleri Ortalaması
BM	Bulanık Mantık
BMD	Bulanık Mantık Kontrolcü
ANFIS	Adaptif Sinir Ağına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi
CSI	Akım Kaynaklı Dönüştürücü
VSI	Gerilim Kaynaklı Dönüştürücü
GTD	Generatör Tarafı Dönüştürücü
DGM	Darbe Genişlik Modülasyonu
M_A	Modülasyon İndeksi
THD	Toplam Harmonik Bozulma
IGBT	İzole Edilmiş Kapılı İki Kutuplu Transistör
MOSFET	Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör

GA	Genetik Algoritma
PI	Oransal-İntegral
RES	Rüzgâr Enerji Santrali
RSAG	Rotoru Sargılı Asenkron Generatör
SHRT	Sabit Hızlı Rüzgâr Türbinleri
SMSG	Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör
YEK	Yenilenebilir Enerji Kaynakları
YERT	Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinleri
YSA	Yapay Sinir Ağları
f_s	Frekans
I_C	Kondansatör Akımı
I_D	Diyot Akımı
I_L	İndüktans Akımı
P	Güç
P_M	Mekanik Çıkış Gücü
P_{MAX}	Maksimum Güç
t_{off}	Anahtarın Kesim Süresi
t_{on}	Anahtarın İletim Süresi
T_S	Periyot
V_{AA}	AA Gerilimi
V_{DA}	DA Gerilimi
V_{MAX}	Maksimum Gerilim
V_{nom}	Nominal Gerilim
V_o	Çıkış Gerilimi
V_{REF}	Referans Gerilim
ω	Açısal Dönme Hızı
ρ	Hava Yoğunluğu
λ	Rüzgâr Hızı
Δ	Görev Periyodu (Duty Cycl)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Değişen ve gelişen dünyamızda enerjiye olan ihtiyaç sürekli olarak artmaktadır. Artan bu enerji talebi, kullanmakta olduğumuz enerjinin büyük bir kısmını karşılayan fosil yakıtların kullanımını arttırmaktadır ve fosil yakıtlar yenilenmediği için tükenmektedir. Fosil yakıtlı enerji kaynakları, enerjiye dönüşüm aşamasında çevreye birtakım zararlar vermektedir. Fosil yakıt kullanımı sonucunda ortaya çıkan sera gazı çevreye verilen en büyük zararlardandır [1].

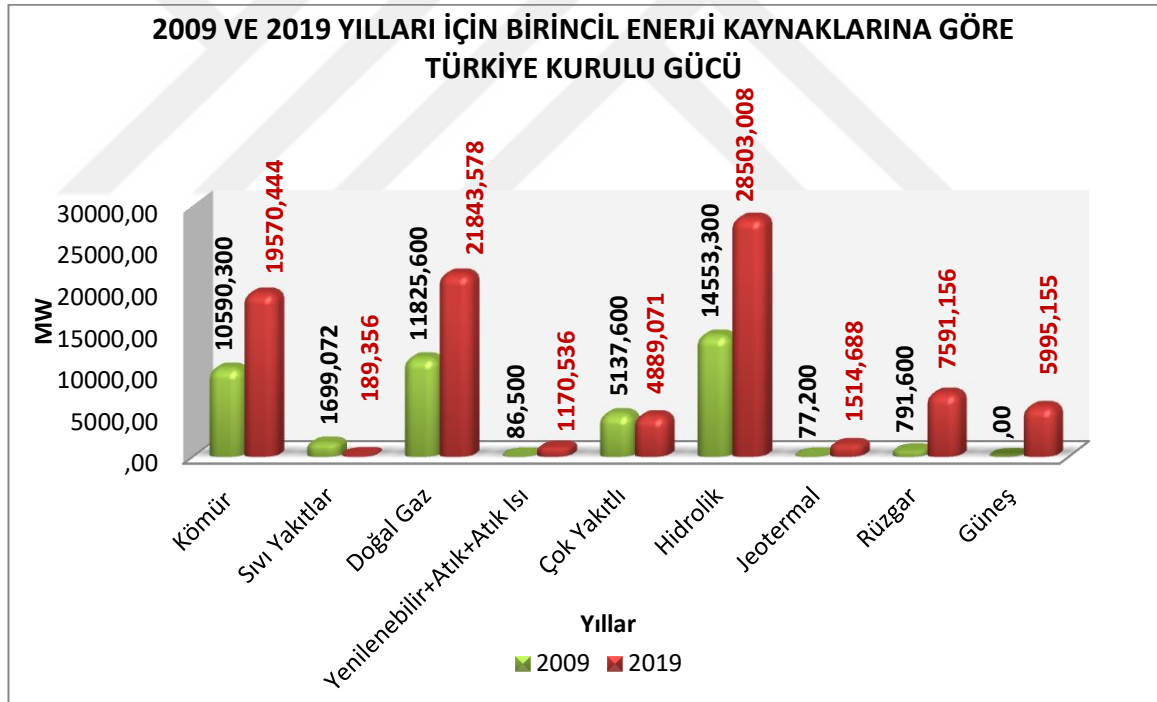
Sanayi inkılabından sonra makine kullanımının artmasıyla birlikte elektriğe olan talep de artmıştır. Bu talep doğrultusunda enerji ihtiyaçları için farklı kaynaklar bulunması arayışına girilmiştir. Bu arz ve talep doğrultusunda fosil yakıtlar yenilenmediği için tükenmeye başlamış ve yenilenebilir enerjiye olan ihtiyaç artmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları; güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, hidrolik enerji, biyokütle enerjisi, hidrojen enerjisi olarak sıralanabilir.

Dünya var olduğu sürece yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgâr enerjisinden söz edilebilir. Son zamanlarda yapılan yatırımlar, rüzgâr enerjisinin en hızlı gelişen ve en çok büyüyen yenilenebilir enerji kaynağı olduğunu göstermiştir [2]. Rüzgâr enerjisi, insanlığın başlangıcından beri var olan bir enerji kaynağıdır. Her ne kadar son zamanlarda enerji üretimi için kullanılmış olsa da eski çağlarda kuyulardan su çekmek, tahıl öğütmek, değirmenlerde ve deniz taşımacılığında mekanik güç olarak kullanılmıştır. Rüzgâr enerjisinden ilk kez elektrik enerjisi üreten ülke Danimarka'dır [3].

Rüzgâr enerjisi, diğer elektrik enerjisi üretim türlerine göre birçok üstünlükleri vardır. Bu üstünlüklerinden biri çok az yer kaplamasıdır. Toprağın üzerinde olmasına rağmen tarım arazilerini işgal etmez. Rüzgâr enerjisi, kendini sürekli yenileyen bir enerji kaynağı olduğu için fosil yakıtlı enerji kaynaklarına göre uzun yıllar sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır. Rüzgâr türbinlerini fosil yakıtlarından ayıran en büyük özelliklerinden bir tanesi sera gazı üretmemesidir. Bundan dolayı rüzgâr enerjisi, çevre dostu bir enerji kaynağıdır.

Rüzgâr enerjisi sadece kurulurken maliyet gerektiren bir enerji kaynağıdır. Kurulduktan sonra ham madde ihtiyacı yoktur. Doğada bazı bakımlar dışında maliyeti yoktur. Fosil yakıtlar, genelde dışa bağımlı bir şekilde enerji üretimi yapmaktadır. Bu dışa bağımlılıktan dolayı siyasi olaylar fosil yakıtların fiyatının belirlenmesinde önemli bir yere sahiptir. Rüzgâr enerjisi, dışa bağımlı olmadığı için herhangi bir siyasal çatışmanın etkisinde kalmamaktadır. Yerel yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgâr enerjisi, bu anlamda güvenilir bir enerji kaynağıdır. Rüzgâr enerjisinin avantajları olduğu gibi birtakım dezavantajları vardır. Yüzlerce metreden duyulan ses ve montaj esnasında parçaların büyük olmasından dolayı taşınma işleminde zorluklar yaşatması dezavantajlarından birkaç tanesidir.

Ülkemizde 2009-2019 yılları arasında rüzgâr santralleri hızla gelişmiştir. Şekil 1.1’de görüldüğü gibi 2019 sonu ile kurulu güç 7.591,2 MW seviyesine çıkmıştır [4].



Şekil 1.1. 2009-2019 yılları arasında birincil enerji kaynaklarının değişimi

Rüzgâr enerjisi kadar bu türbin sistemini kontrol eden sistemler de önem arz etmektedir. Bu kontrol sistemlerin güvenliğinde ise güç elektroniği teknolojisi kullanılmıştır [5]. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte güç elektroniği alanında yapılan çalışmalar da

artmıştır. Bu çalışmalar sayesinde, yarı iletken güç elemanlarının maliyetleri azalmış ve boyutları küçülmüştür [6,7].

Bu gelişmeler neticesinde, son yıllarda rüzgâr türbin sistemleri ile ilgili çok fazla çalışma yapılmıştır. Bu tez çalışmasında, rüzgâr türbin sistemi MATLAB/simulink benzetim programı vasıtasıyla tasarlanmıştır ve Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) tabanlı bir rüzgâr santralinde kullanılan dönüştürücünün farklı denetim (ANFIS, PI, YSA) sistemleri ile kontrolü gerçekleştirilmiştir ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

1.1. Literatür çalışması

Rüzgâr enerjisinden elde edilen enerji son yıllarda artmıştır. Rüzgâr enerji sektöründe farklı generatör çeşitleri kullanılmaktadır. ÇBAG literatürde oldukça geniş bir yere sahiptir. Yapılan literatür çalışmasında, Şebeke tarafı kontrol (ŞTK) ve Rotor tarafı kontrol (RTK) incelenmiştir. Ayrıca rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerine ait farklı kontrol yöntemleri incelenmiştir.

Çalgan[8], ÇBAG'nin Adaptif Kayan Kip Kontrol ve oransal integral (PI) kontrol ile güç denetimi gerçekleştirmiştir. Sistemin dinamik davranışına göre matematiksel modeli elde edilmiştir ve sistemin eşdeğer devre modeli verilmiştir. Eşdeğer devreye göre d-q eksen takımındaki reaktif-aktif güç eşitlikleri, hız eşitlikleri, elektromanyetik tork eşitlikleri elde edilmiştir. Benzetim çalışmasında elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır ve Adaptif Kayan Kip Kontrol 'ün PI'dan daha iyi etkin sonuç verdiği elde edilmiştir [8].

Bayhan[9] yaptığı çalışmada, ÇBAG'nin farklı hız ve yük koşullarında aktif güç kontrolünü gerçekleştirmiştir. Rotor tarafındaki denetim sistemi, aktif ve reaktif gücü kontrol etmek için uygulanmıştır. Generatör'ün çıkış geriliminin değeri, PI kontrolcu ile ayarlanmıştır. Frekans ve faz açısı ise faz kilitli döngü ile belirlenmiştir. Kendinden ayarlamalı bulanık mantık kontrolcü (KABMD) kullanılarak, ÇBAG'nin aktif güç değeri kontrol edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, KABMD'nin farklı hız ve yük altında daha verimli olduğu gözlenmiştir [9].

Ghennam ve arkadaşları[10], ÇBAG tabanlı rüzgâr türbini sisteminin genel bir modellemesini gerçekleştirmiştir. Bu çalışma'da, dq denetim sistemi şebeke tarafı dönüştürücünün denetim sistemine uygulanmıştır. Ayrıca, aktif ve reaktif güç kontrolü ayrıştırılmış şekilde verilmiştir. ÇBAG'nin rotor akımlarının d bileşeni reaktif gücü kontrol ederken, q bileşeni aktif gücü kontrol ettiği belirtilmektedir. Şebeke tarafı dönüştürücü (ŞTD) ve rotor tarafı dönüştürücü (RTD) kontrol algoritmaları ve ÇBAG kontrolünün performansı DSpace kartı kullanılarak deneysel olarak da doğrulanmıştır [10].

Kaiorus ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ÇBAG ile değişken hızlı rüzgâr enerjisi dönüştürme sistemini kontrol etmek amacıyla bulanık kontrol ile kullanılan kayan modlu kontrol tekniği kullanılmıştır. Önerilen ÇBAG tabanlı rüzgâr enerjisi dönüştürme sistemi kontrol yaklaşımının Volan enerji depolama sistemi ile birlikte etkinliği bilgisayar benzetim sonuçlarıyla gösterilmiştir [11].

Akyazı [12], yaptığı çalışmada değişken hızlı rüzgâr türbin sistemlerinde güç kalitesi sorunlarını azaltmak, enerji kullanımının iyileştirilmesi ile ilgili çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, kontrolcü olarak (PI) ve Bulanık mantık kontrolcü kullanılmıştır. Kontrolcünün performansını artırmak için, kontrolcü parametrelerinin performans kriterine göre parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve genetik algoritma (GA) teknikleri kullanılarak iyileştirme yapılmıştır. Farklı koşullarda benzetim yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır [12].

BÖLÜM 2

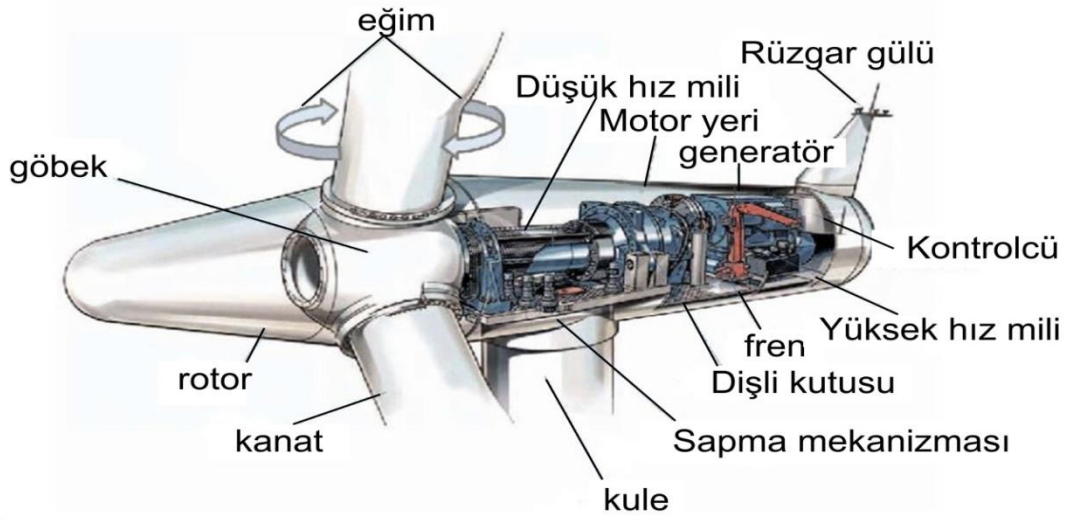
RÜZGÂR TÜRBİNLERİ

Nüfusun artması ve aynı zamanda sanayinin gelişmesi ile enerjiye olan talep artmıştır. Artan bu enerji talebinin büyük bir kısmını ise fosil yakıtlar karşılamaktadır. Fosil yakıtları şu şekilde sıralayabiliriz: kömür, doğalgaz, petrol, nükleer enerji. Nüfus artışı ve sanayinin gelişmesi bu kaynakların daha hızlı tükenmesine neden olmuştur. Fosil yakıtların en büyük dezavantajı ise sera gazı üretmesi ve kendini yenilememesidir. Sera gazlarının oluşmasında en büyük pay elektrik üretimidir [1].

Fosil yakıtların neden olduğu çevresel etkiler ve tükenmesinden dolayı yenilenebilir enerjiye olan talep artmıştır [2]. Enerjiye olan talebi karşılamak için son yıllarda yenilenebilir enerjiye olan yatırımlar hız kazanmıştır. Yenilenebilir enerji kısaca, kendini sürekli yenileyen ve kullandıkça tükenmeyen enerji olarak ifade edilebilir. Yenilenebilir enerji kaynakları; hidroelektrik, rüzgâr, jeotermal, güneş, dalga, gelgit, hidrojen ve biyokütle enerjisi olarak sınıflandırılabilir.

Rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi yapan ilk kişi 1897 yılında Poul La Cour Askov'dur. Askov'un ilk öğrencilerinden olan J.Juule 1957 yılında 200 kW üretimle modern rüzgâr enerjisinin öncülüğünü yapmıştır [13].

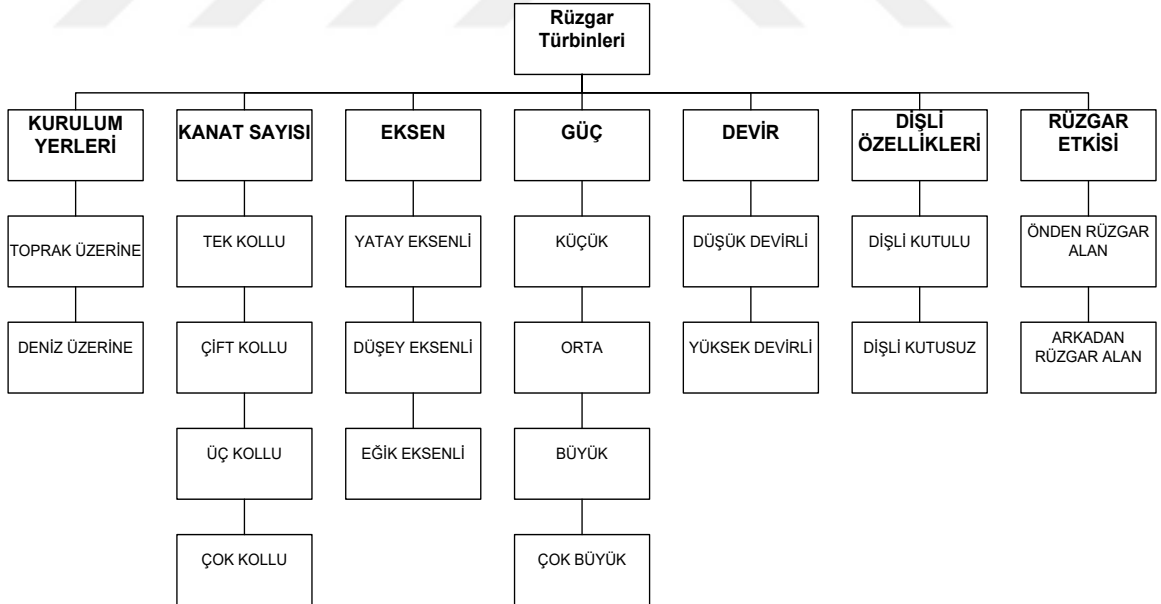
Günümüzde rüzgâr enerjisine olan yatırımlar artmaktadır. Rüzgâr enerjisinin sadece kurulum aşamasında maliyeti vardır. Sonrasında ise kısmen maliyet gerektirmeyen bir enerji kaynağıdır. Rüzgâr enerjisinde oluşan kinetik enerjiyi, elektrik enerjisine dönüştüren sistem rüzgâr türbinidir. Rüzgâr türbinleri rüzgârdan gelen kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye çevirir. Daha sonra o mekanik enerjiyi uygun sistemler vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürür [14]. Rüzgâr türbinleri, genel olarak elektrik elektronik ekipmanlardan, kule, kanat ve bir gövdeden oluşur [15]. Şekil 2.1'de rüzgar türbini ekipmanları gösterilmiştir [16].



Şekil 2.1. Rüzgâr Türbinin İç Yapısı

2.1. Rüzgâr Türbini Çeşitleri

Rüzgâr türbinlerini; dişli özelliklerine, dönüş eksenine, devir sayısına, güç büyüklüğüne, kanat sayısına, kurulum yerlerine ve rüzgâr etkisine göre sınıflandırılabilir. Şekil 2.2’de rüzgar türbininin sınıflandırılması verilmiştir [14].



Şekil 2.2. Rüzgâr Türbini Sınıflandırılması

2.1.1. Kurulum yerine göre rüzgâr türbinleri

Rüzgâr türbinleri toprak üstünde ve deniz üstünde olmak üzere iki şekilde kurulabilir. Şekil 2.3’de onshore ve offshore türbin tipleri verilmiştir [17].

Onshore: Toprak üstüne kurulan rüzgâr türbinlerine onshore denir. Offshore: Deniz üstüne yapılan rüzgâr türbinlerine offshore denir.



(a)

(b)

Şekil 2.3. Kurulum yerine göre rüzgâr türbinleri (a) onshore rüzgâr türbini, (b) offshore rüzgâr türbini

2.1.2. Kurulum gücüne göre rüzgâr türbinleri

Rüzgâr türbinleri, bazen bölgenin ihtiyacına göre kurulabilir. Örnek olarak, elektrik iletim hatlarının olmadığı ve enerjinin gerekli olduğu yerlerde, ihtiyaç duyulan elektrik enerjisini karşılamak için küçük rüzgâr türbinleri kurulmaktadır. Rüzgâr türbinleri ürettiği güç değerlerine göre şu şekilde sınıflandırılır. Küçük rüzgâr türbinleri çıkış gücü 0-30 kW arası üretim yapan türbin çeşididir. Orta güçlü rüzgâr türbinleri ise 30-100 kW arasında çıkış gücüne sahip olan rüzgâr türbinleridir. Büyük güçlü rüzgâr türbinleri 100-1000 kW arası kurulu gücüne sahip olan rüzgâr türbinleridir. 1 MW ve üstünde kurulu güce sahip olan rüzgâr türbinlerine ise çok büyük rüzgâr türbinleri denilmektedir [18].

2.1.3. Devir sayısına göre rüzgâr türbinleri

Rüzgâr türbinleri, devir sayısına göre düşük devirli ve yüksek devirli olmak üzere iki şekilde sınıflandırılır [14].

2.1.4. Dişli kutusuna göre rüzgâr türbinleri

Rüzgâr türbini sistemlerinin ana bileşenlerinden birisi dişli kutusudur. Rüzgâr türbinleri, dişli kutusu olan ve dişli kutusu olmayan rüzgâr türbinleri olarak iki sınıfa ayrılır.

2.1.4.1. Dişli kutusu kullanılan rüzgâr türbinleri

Yüksek devirli generatörler, az kutuplu olduğu için dişli kutusuna ihtiyaç duymaktadırlar. Türbin kanatlarının devir sayısı ile generatör devir sayısını denkleştirmek için 1/50, 1/70 oranlarında dişli kullanılmaktadır [18]. Dişli kutulu, türbin-generatör sistemleri ikiye ayrılmaktadır [19].

- Sabit Hızlı – Sincap Kafesli Asenkron Generatör (SKAG)
- Değişken Hızlı- Çift Beslemeli Asenkron Generatör(ÇBAG)

2.1.4.2. Dişli kutusuz rüzgâr türbinleri

Düşük devirli generatörler, çok kutuplu yapıya sahip olduklarından dolayı, dişli kutusuna gereksinim duymamaktadır [18]. Dişli kutusuz türbin-generatör sistemleri ikiye ayrılmaktadır [19].;

- Doğrudan Sürümlü- Elektriksel Uyarımlı Senkron Generatör (EESG)
- Direkt Sürümlü- Sabit Mıknatıslı Senkron Generatör (SMSG)

2.1.5. Rüzgâr etkisine göre rüzgâr türbinleri

Rüzgâr alış yönüne göre rüzgâr türbinleri, arkadan rüzgâr alan ve önden rüzgâr alan türbin olarak ikiye ayrılmaktadır. Şekil 2.4'te rüzgarı önden alan ve rüzgarı arkadan alan türbin tipleri verilmiştir[14].

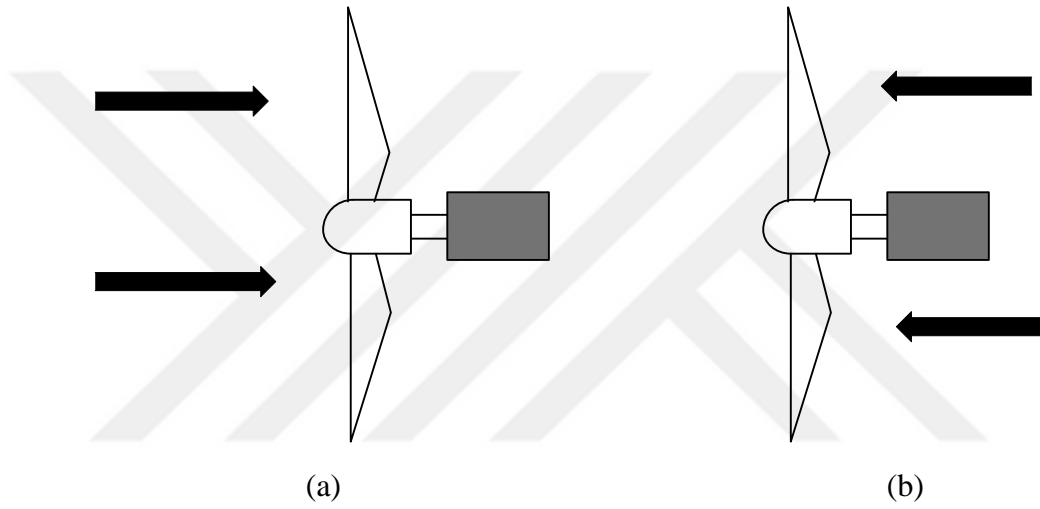
2.1.5.1. Rüzgârı önden alan türbin

Rüzgârı önden alan türbinde, rüzgâr önce türbin kanatlarına gelir daha sonra gövdeye geçer. Bu türbin sisteminde rotoru rüzgâra çevirmek için yaw mekanizması kullanılmaktadır [20]. Bu türbinin en büyük avantajlarından bir tanesi, kule tarafından

yapılan gölgelemeye maruz kalmamasıdır. Uzun bir süredir kullanılan rüzgâr türbin sistemidir.

2.1.5.2. Rüzgârı arkadan alan türbin

Bu türbin çeşidinde rüzgâr önce gövdeye, daha sonra türbin kanatlarına gelir. Bu türbinin en büyük avantajlarından bir tanesi yaw mekanizması gereksinimi duymamasıdır. Bir diğer avantajı ise türbin kanatlarının esnek yapılmasıdır. Şekil 2.4'te rüzgar etkisine göre rüzgar türbinleri verilmiştir [21].



Şekil 2.4. Rüzgâr etkisine göre rüzgâr türbinleri (a) rüzgârı önden alan türbin sistemi, (b) rüzgârı arkadan alan türbin sistemi

2.1.6. Kanat sayısına göre rüzgâr türbinleri

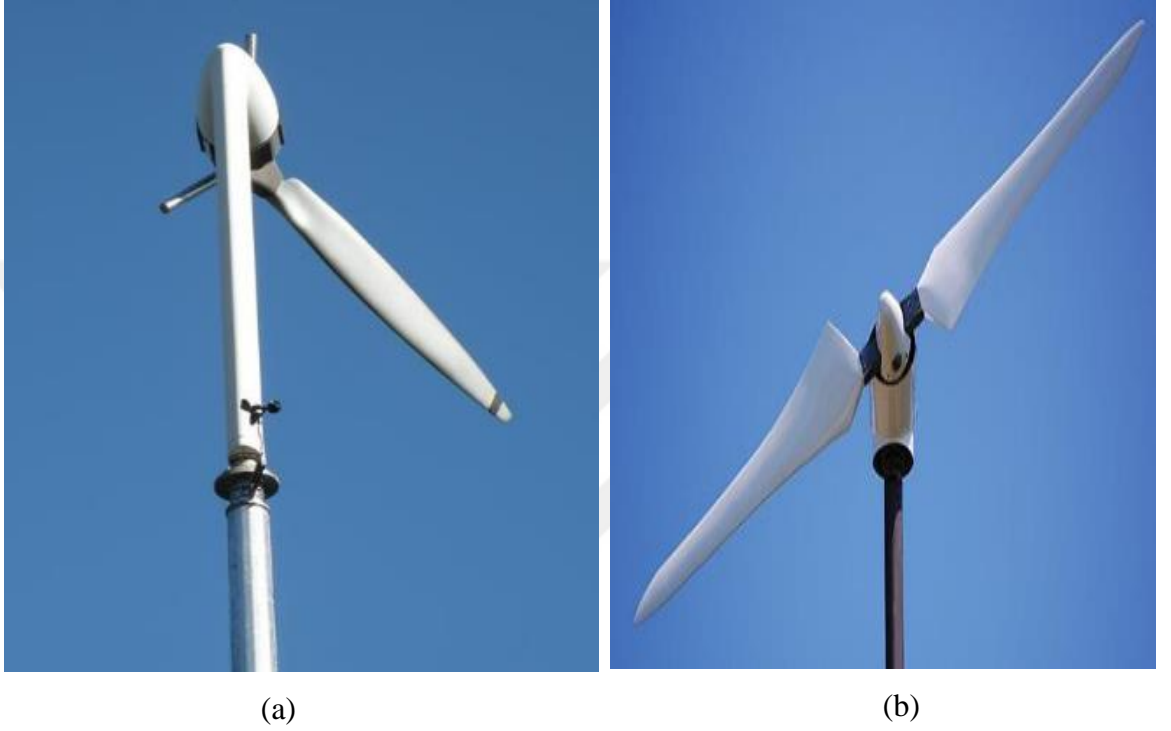
Bir rüzgâr türbini sisteminde, farklı sayılarda kanatlar bulunmaktadır. Bulundurduğu kanat sayısına göre rüzgâr türbinleri bir kanatlı, iki kanatlı, üç kanatlı ve çok kanatlı olmak üzere 4 gruptan oluşmaktadır. Şekil 2.5'te tek kanatlı ve çift kanatlı türbin tipleri verilmiştir [21].

2.1.6.1. Bir kanatlı rüzgâr türbinleri

Tek kanatlı olmasından dolayı iki ve üç kanatlı rüzgâr türbinlerine göre uç hızı daha yüksektir. Bu türbinin, uç hızının yüksek olması en büyük avantajıdır. Bu sayede makine kütlesini azaltarak rotor döndürme momentini düşürmektedir [20]. En büyük dezavantajı ise çok fazla ses çıkarmasıdır. Fazla ses çıkarması ve görsel olarak da güzel durmaması nedeniyle günümüzde pek kullanılmamaktadır [22].

2.1.6.2. İki kanatlı rüzgâr türbinleri

10 metre ile 100 metre rotor çaplarında kurulumu olan rüzgâr türbinleridir. Bu türbinin rotor çapı büyük olmasından dolayı, sadece birkaç ülkede model olarak yapılan çalışmalar seri üretime geçebilmiştir.



Şekil 2.5. Kanat sayısına göre rüzgâr türbinleri (a) tek kanatlı rüzgâr türbini, (b) çift kanatlı rüzgâr türbini

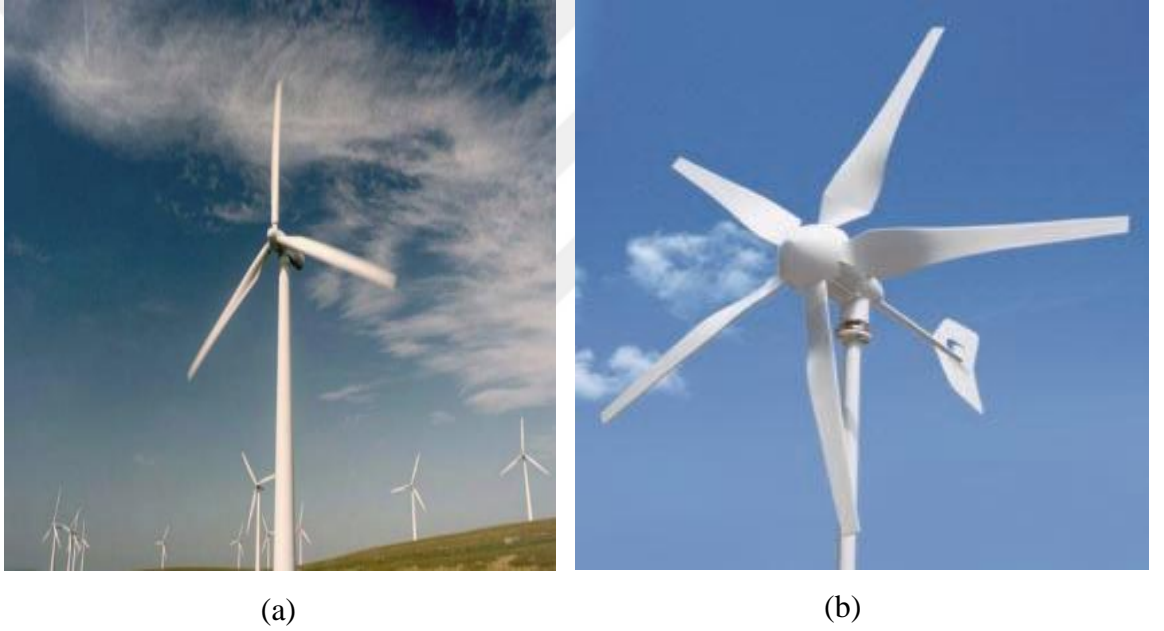
Bu türbin sisteminin, rotor balansı tek kanatlı rüzgâr türbinine göre daha düzgündür. Üç kanatlı rüzgâr türbinine göre rotor maliyetinin az olması, bu türbinin yapılması için başlıca sebeplerden birisi olmuştur. Üç kanatlı rüzgâr türbinlerine göre ise en büyük avantajı, kanat uç hızının daha yüksek olmasıdır. En büyük dezavantajı ise sesinin yüksek olması, aynı zamanda düşük hızlarda devreye girememesidir [23,14].

2.1.6.3. Üç kanatlı rüzgâr türbinleri

Günümüzde en çok kullanılan rüzgâr türbini tipidir. Kullanılmasındaki en büyük sebeplerden bir tanesi dönme momentinin düzgün olmasıdır. Momentin düzgün olmasından dolayı hub içinde titreşimi engelleyecek ek bir ekipman gerekmemesi, maliyet olarak bir avantajdır. Üç kanatlı rüzgâr türbinlerinin, uç hızı 70 m/sn altında olduğu için gürültüsü oldukça azdır [22,23].

2.1.6.4. Çok kanatlı rüzgâr türbinleri

Çok kanatlı rüzgâr türbini çeşidi, rüzgâr türbin sistemlerinin gelişmemiş ilk halidir. İlk zamanlarda, yel değirmenlerin de rüzgâr enerjisini dönme kuvvetini dönüştürmede kullanılırken, daha sonraki zamanlarda su pompalamak için kullanılmıştır [23]. Su pompalama işleminde moment ihtiyacını karşılayabilmek amacıyla rüzgâr türbini, çok kanatlı yapılmıştır. Bu rüzgâr türbinleri, kanat milleri dişli kutusuna bağlanarak generatör milindeki devir sayısı artırılır. Çok kanatlı rüzgâr türbinlerinin hızları ve gürültü seviyesi düşüktür [23,14]. Şekil 2.6'da üç kanatlı ve çok kanatlı rüzgar tipleri verilmiştir [20].



Şekil 2.6. Kanat sayısına göre rüzgâr türbinleri (a) üç kanatlı rüzgar türbini, (b) çok kanatlı rüzgar türbini

2.1.7. Dönme eksenine göre rüzgâr türbinleri

Rüzgâr türbin sistemleri dönme eksenine göre düşey eksenli rüzgâr türbinleri (DERT), yatay eksenli rüzgâr türbinleri (YERT), ve eğik eksenli rüzgâr türbinleri olarak sınıflandırılır [22].

2.1.7.1. Yatay eksenine göre rüzgâr türbinleri (YERT)

Günümüzde en çok kullanılan rüzgâr türbini sistemidir. Bu türbin sisteminde türbin kanatları rüzgâra diktir. Ayrıca türbindeki dönme eksenini rüzgâra paraleldir. Verimleri

yaklaşık olarak %45'tir. YERT, kurulum aşamasında yerden yükseklikleri genelde 20-30 metredir. Rotor kanatları belirlenirken rotor uç hızı ve rüzgâr hızı kullanılarak λ elde edilir [22]. λ Rüzgâr hızının, kanat uç hızına bölünmesiyle elde edilir.

Eğer;

- $\lambda > 15$ bir kanatlı rotor,
- $\lambda = 9-15$ iki kanatlı rotor,
- $\lambda = 6-8$ üç kanatlı rotor,
- $\lambda = 1-5$ çok kanatlı rotor kullanılır.



Şekil 2.7. Yatay eksenli rüzgâr türbini

YERT, genellikle ticari amaçlar için kullanılır. Bu türbin sisteminde genellikle rüzgârı ön taraftan alan türbin sistemleri tercih edilir. Arkadan rüzgâr alan türbin sisteminin tercih edilmemesinin nedeni ise yüksek akım çeken sistemler olduğu için gövdeye zarar vermesidir [20]. Şekil 2.7'de YERT verilmiştir [21].

2.1.7.2. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri (DERT)

DERT, YERT gibi bir kuleye ihtiyaç duymaz. DERT'in kanatları, yere dik olacak şekilde dikey eksenine göre döner. Generatör, dişli kutusu ve diğer ekipmanlar yere kurulduğu için daha basit tasarım olmaktadır. Bunun neticesinde türbin maliyeti düşecektir. En büyük avantajlarından birisi ise rüzgârı her yönden kabul etmesidir [15].

Bu türbin sisteminde dümen sistemine gerek yoktur. Ayrıca türbin mili hariç bakımları kolaydır.

Bu türbin sisteminin dezavantajlarından en önemlisi ilk hareket motoruna ihtiyaç duymasıdır. Verimleri düşük olduğundan ticari amaç yerine deney çalışmaları için kullanılmaktadır. Yere yakın oldukları için verimleri ve hızları düşüktür. Bu türbin sisteminin kendi içinde çeşitleri vardır [20]. Şekil 2.8’de Darrieus ve Savonius tipli rüzgar türbinleri verilmiştir[14].

Darrieus Tipi: Bu türbin sisteminde dikey yerleştirilmiş iki pervane vardır. Rüzgârın tek taraftan estiğini düşünürsek sinüs şeklinde güç grafiği elde edilir. Devir başına iki noktada maksimum tork elde edilir.



(a)



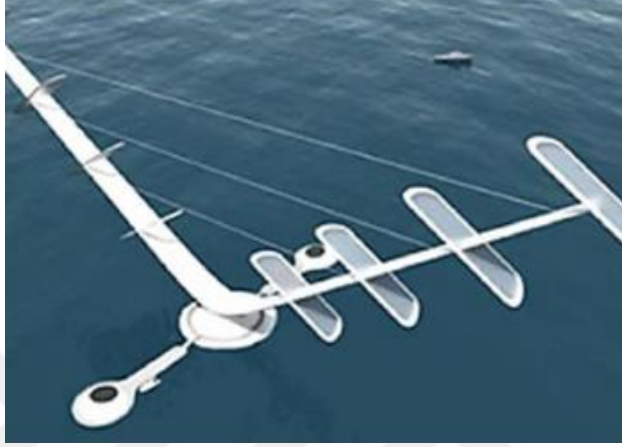
(b)

Şekil 2.8. Dikey eksenli göre rüzgâr türbinleri (a) darrieus tipi rüzgâr türbini, (b) savonius tipi rüzgâr türbini

Savonius Tipi: Bu türbin, iki veya üç kepçe tarzında kesitin birleşmesiyle “S” harfini andıran bir görüntüye sahiptir. Verimleri düşük olduğu için deneysel çalışmalar ve su pompalama amaçlı rüzgâr ölçümlerinde kullanılır [14,24].

2.1.7.3. Eğik eksenli rüzgâr türbinleri

Bu türbin sisteminde, dönme eksenini ile türbin kanatları arasında belirli bir açı olmakla birlikte dönme eksenleri ile rüzgâr arasında da belirli bir açı vardır. Kullanım alanları ise oldukça azdır [14,23]. Şekil 2.9’da eğik eksenli rüzgar türbini verilmiştir [14].



Şekil 2.9. Eğik eksenli rüzgâr türbini

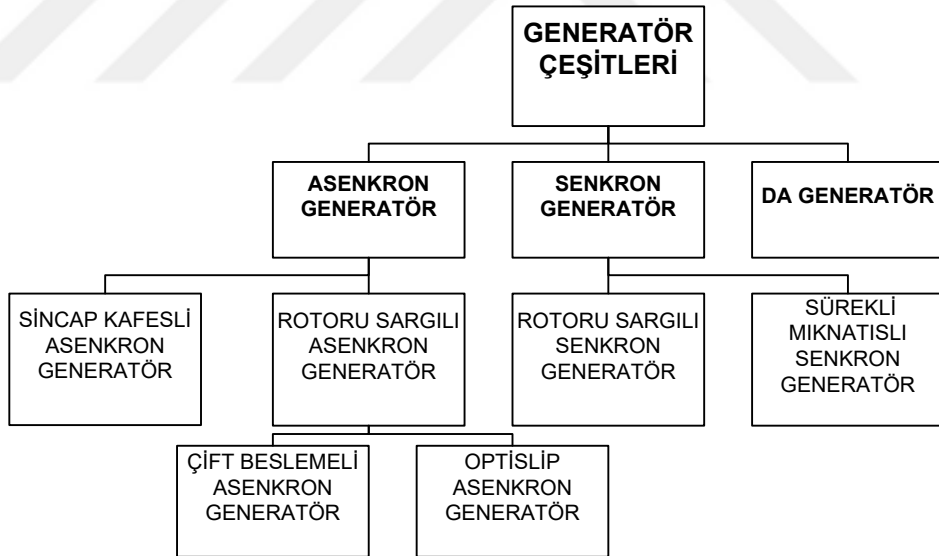
Bu tez çalışmasında; yatay eksenli, önden rüzgâr alan, toprak üzerinde kurulu, 3 kanatlı rüzgâr türbin modeli kullanılmıştır.

BÖLÜM 3

RÜZGÂR SANTRALLERİNDE KULLANILAN GENERATÖR ÇEŞİTLERİ

Rüzgârın hızı ve oluşan hava yoğunluğu rüzgârda bir kinetik enerji meydana getirir. Oluşan bu kinetik enerji, önce mekanik enerjiye daha sonra uygun sistemler vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülür [25]. Mekanik enerjiyi, elektrik enerjisine dönüştüren sisteme generatör denir. Elektrik enerjisini, mekanik enerjiye dönüştüren sisteme motor denir [26].

Rüzgâr santrallerinde enerji dönüşümü için en önemli bileşenler, rüzgâr türbini ve generatördür. Bunlara ek olarak çevirici, yağlama ünitesi, soğutma ünitesi, şanzıman, transformatör gibi ek donanımlar kullanılarak rüzgâr santralleri kurulur [25]. Rüzgâr santrallerinde genellikle doğru akım generatörü, asenkron generatör, senkron generatör olmak üzere üç tip generatör çeşidi kullanılır. Şekil 3.1’de rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatör çeşitleri verilmiştir.

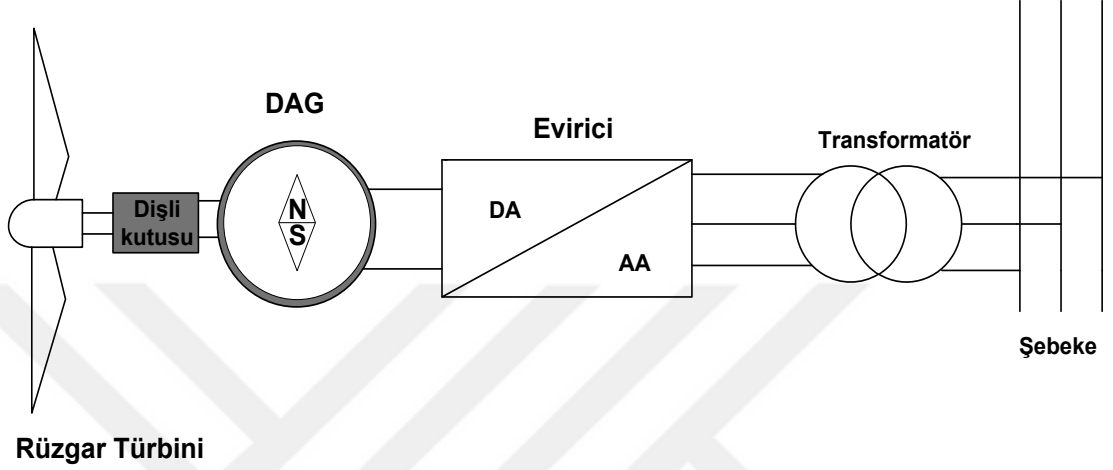


Şekil 3.1. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatör çeşitleri

3.1. DA Generatör

Generatörler, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. DA generatör ve DA motor üretimleri benzerdir, aralarındaki en büyük fark endüvi gerilimidir [27]. DA generatörler sürekli bakım istemesi, daimî mıknatısların ve güçlerinin sınırlı olması gibi dezavantajlardan dolayı şebeke bağlantısı olmayan düşük güçlü rüzgâr

türbinlerinde kullanılır. DA generatörler, büyük güçlü rüzgâr türbinlerinde elektrik üretmek için fazla kullanılmamaktadır. Bunun en temel sebebi, ürettiği gücün senkron ve asenkron generatörlere göre düşük olmasıdır [29,30]. Şekil 3.2’de DA generatörün rüzgar türbin yapısı verilmiştir.



Şekil 3.2. DA generatör tabanlı rüzgâr türbini genel yapısı

3.2. Senkron Generatör

Senkron generatör, güç üretimi bakımından uzun süredir incelenmiş ve kabul görmüş bir generatör çeşididir. Senkron generatörler stator ve rotor olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Senkron generatörün dönen kısmına rotor, sabit olan kısmına ise stator denir. Senkron generatörlerde, rotor ve statorun devir sayıları birbirine eşittir [30].

Rüzgâr türbini sisteminde yer alan türbin kanatları, rotor milini döndürür. Rotor sargıları uçlarına bir doğru gerilim uygulandığında, rotor sargılarında bir manyetik alan oluşur. Stator sargıları, bu manyetik alanın içinde hareket ettirildiğinde stator sargı uçlarında üç fazlı bir gerilim meydana gelir [29,30]. Senkron generatörler, genellikle sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde kullanılmaktadır. Reaktif güç gerekmediği için diğer generatör tiplerine göre daha kaliteli bir çıkış gerilimi üretir [28].

Senkron generatörler uyartım şekline göre ikiye ayrılır:

- Rotoru sargılı senkron generatör (RSSG)
- Sürekli mıknatıslı senkron generatör (SMSG)

3.2.1. Rotoru sargılı senkron generatör (RSSG)

Rotoru sargılı senkron generatörlerin rotor sargı uçlarına DA uyarım gerilimi uygulanır. Stator, bir endüksiyon makinesine benzer ve 3 fazlı sargılardan oluşur. Rotor, silindirik veya çıkıntılı kutuplara sahip olabilir. Çıkıntılı kutuplar, düşük hızlarda gerilim üretme özelliğine sahip olduğundan dolayı doğrudan tahrikli rüzgâr türbinleri için en uygun generatör tipidir [32,33].

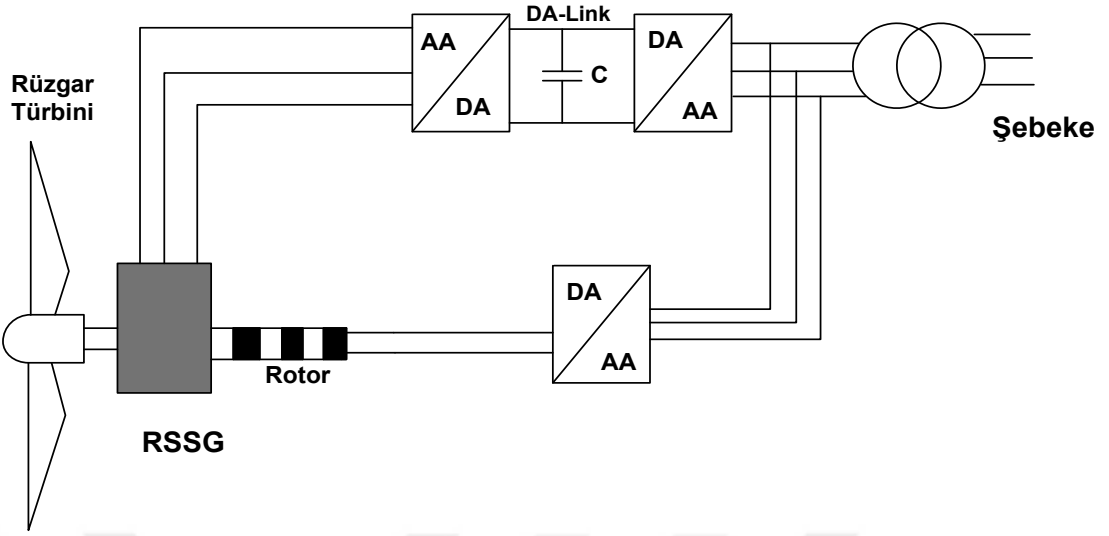
Generatör tarafında bulunan güç elektroniği dönüştürücüleri tarafından, frekans ve gerilimin genliği tamamen kontrol edilmektedir. Böylece, generatör çok geniş bir aralıkta çalışmaktadır. RSSG, farklı güç aralıklarında minimum kayıp için akıyı kontrol etme olanağına sahiptir; çünkü uyarma akımı, rotor tarafındaki güç dönüştürücü vasıtasıyla kontrol edilebilir. Kalıcı mıknatıs kullanılmadığı için maliyet olarak düşüktür. Maliyet olarak uygun olduğu için piyasada en çok kullanılan doğrudan tahrikli generatördür. Şekil 3.3'te RSSG tabanlı rüzgâr türbin yapısı verilmiştir.

RSSG'nin avantajları [32,33]:

- Yüksek güç üretim için uygundur.
- Şanzımana ihtiyaç yoktur.
- Gerçek ve aktif gücün bağımsız kontrolü sağlanır.
- Kendinden ikazlı olduğu için iyileştirilmiş güç faktörüne sahiptir.

RSSG'nin Dezavantajları [32,33,34]:

- İndüksiyon generatöre göre bakımı maliyetlidir.
- Rotor sargılarını harekete geçirmek için ek konvertör gereklidir.
- Kalıcı mıknatıslı senkron generatör ile kıyaslandığında, rotorunda sargı bulması dezavantajdır.
- Harici bir uyarım gereklidir.
- SMSG'ler ile karşılaştırıldığında verimleri düşüktür.



Şekil 3.3. RSSG tabanlı rüzgâr türbini genel yapısı

3.2.2. Sabit mıknatıslı senkron generatör (SMSG)

SMSG, uyarma alanının bobin yerine kalıcı bir mıknatısla sağlandığı generatör çeşididir. SMSG’de, statorda sargılar bulunur ve rotor kalıcı bir mıknatıs içerir. Dışarıdan harici bir uyarıma gerek duymadıkları için rotor bakır kayıpları yoktur. Fırça ve kolektör sistemde olmadığı için bakım ihtiyaçları kısmen azdır. Bakım gereksinimlerinin ve maliyetlerinin düşük olması, SMSG’lerin değişken hızlı rüzgâr sistemleri için önerilmesinin ana nedenlerindedir. Dişli kutusu gerekmediği için doğrudan rüzgâr türbinine bağlanabilir. En büyük avantajlarından bir tanesi de herhangi bir hızda güç üretmesidir [33].

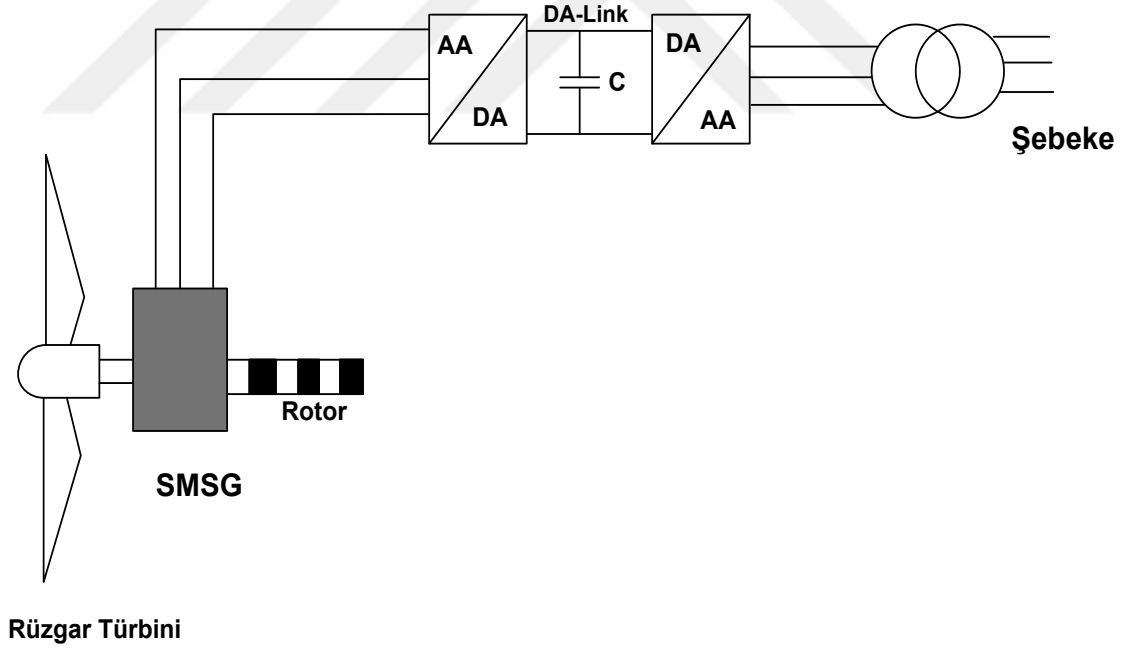
Sıcaklık artışından dolayı rotordaki mıknatısların manyetik özelliğini kaybetmesi bu generatörün dezavantajlarından biridir. Mıknatıslar, kısmen veya tamamen manyetik özelliğini kaybedebilir. Mıknatısların, kısmen manyetik özelliğinin azalması durumunda, rotorda oluşması gereken manyetik alan zayıflamasına neden olur. Tam manyetik özelliğinin kaybolması durumunda ise, rotorda manyetik alan oluşturulamaz. Bu nedenlerden dolayı, generatör çıkış gerilimi üretmez. Bu bağlamda mıknatıs çalışma sıcaklığının, her koşulda düşük tutulmasını garanti etmek için bir termal çalışma önerilmektedir [35,36,37]. Şekil 3.4’te SMSG tabanlı rüzgâr türbin yapısı verilmiştir.

SMSG'lerin avantajları [34,37]:

- DA uyartım gereksinimi yoktur.
- Fırça ve kolektör kullanılmaz.
- RSSG'lere göre daha verimlidirler.
- Kutuplarda sürekli mıknatıs olduğu için çok kutuplu imal edilebilirler.
- Dişli kutusu gereksinimi yoktur.
- Yüksek verimli ve düşük maliyetlidir.

SMSG'lerin dezavantajları [35,37]:

- Küçük rüzgâr türbinleri için kullanışlıdır ancak büyük rüzgâr türbinleri için mıknatısın boyutunun artırılması gerekmektedir.
- Atmosferik koşullarından dolayı kalıcı mıknatıslar aşınması problemidir.
- Sürekli mıknatısların fiyatları yüksektir.



Şekil 3.4. SMSG tabanlı rüzgâr türbini genel yapısı

3.3. Asenkron Generatör

Asenkron generatörler, günümüzde rüzgâr türbin sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Asenkron generatörlerin, maliyetlerinin düşük ve sistemlerinin basit olması tercih edilme nedenlerindedir.

Asenkron generatörler, küçük ölçekli hidroelektrik santrallerinde ve rüzgâr türbin endüstrisi dışında fazla kullanılmamaktadır. Diğer generatör tiplerine göre daha güvenlidir. Ayrıca rüzgârın çok sık değiştiği bölgelerde asenkron generatör kullanıldığında elde edilen güç yüksek olmaktadır. Şebekeye bağlandıkları zaman salınım oluşturmazlar [21,35,38].

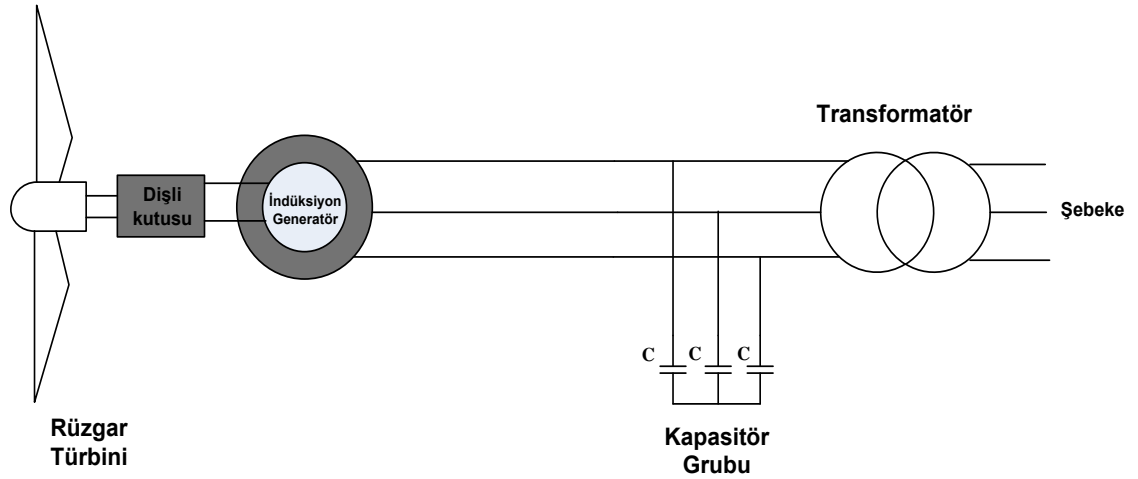
Asenkron generatörlerde stator sargıları üçgen veya yıldız olarak yerleştirilir. Bu sargılara şebekeden alternatif akım verilerek rotor çevresinde bir manyetik alan oluşturulur. Bunun neticesinde stator akısı ile rotor akımı arasındaki etkileşim momente neden olur. Senkron generatörden en ayırıcı farkı ise şebekeye bağlı olarak çalışmasıdır. İlk kalkınma anında, statorda bir mıknatıslanma gereklidir. Bundan dolayı şebekeden bir güç çekerler. Bu mıknatıslanmanın sağlanması için yapılan çözüm yollarından bir tanesi de kapasitör grupları kullanarak şebekedeki reaktif gücü düşürüp aktif gücü yükseltmektir. Bu kapasitör grubunun kullanılması, maliyet hem de sistem karmaşıklığı açısından bir dezavantajdır [21,35,38]. Şekil 3.5'te asenkron generatör tabanlı rüzgar türbin yapısı verilmiştir.

Asenkron generatörün avantajları [35]:

- Maliyetleri düşüktür.
- Karmaşık bir sistem değildir.
- Sağlamdır.
- Şebeke bağlantısı kolaydır.

Asenkron generatörün dezavantajları [35]:

- Kompanzasyon ihtiyacı vardır.
- Şebekeden reaktif güç çeker
- Statorun reaktif mıknatıslanma ihtiyacı vardır.



Şekil 3.5. Asenkron generatör tabanlı rüzgâr türbini genel yapısı

Asenkron generatörler iki gruba ayrılır, sincap kafesli asenkron generatör (SKAG) ve rotoru sargılı asenkron generatör (RSAG).

3.3.1. Sincap kafesli asenkron generatör (SKAG)

SKAG, rotoru kafes şeklinde olduğu için bu adı almıştır. Sabit ve değişken hızlı rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılmaktadır. Ekonomik ve güvenilir yapıda olmasından dolayı çok tercih edilir. Diğer generatör gruplarına göre sağlam bir yapısı vardır. Bu generatör sistemi fırçasız olması da bir avantajdır [36,38,39].

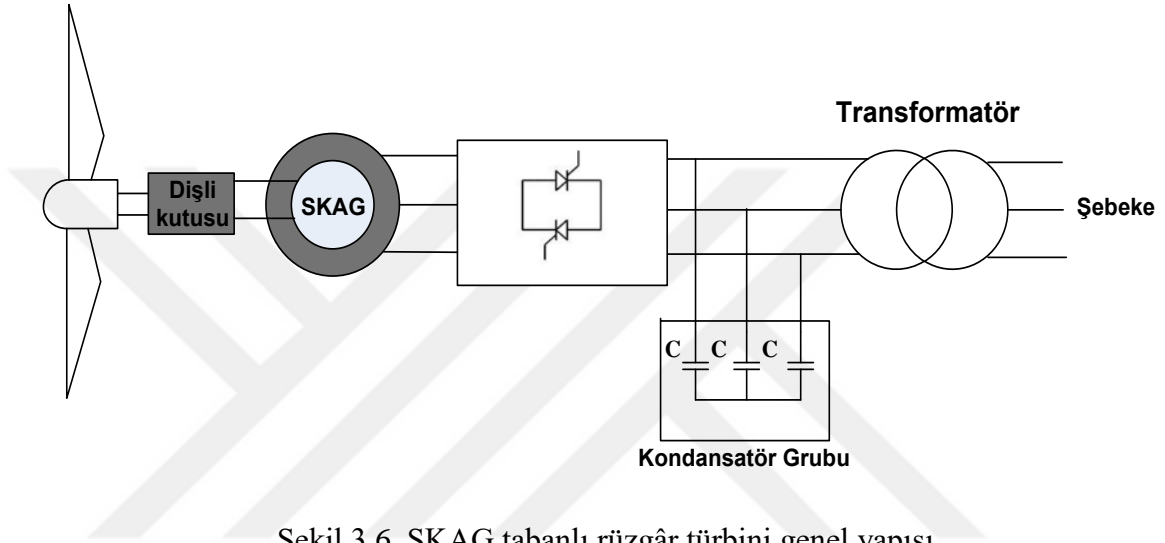
Rotor, rotor yuvalarına yerleştirilmiş ve her iki taraftaki uç halkalardan kısa devre yapılmış katı iletken malzeme çubuklarına sahip benzersiz bir yapıya sahiptir. Rotor devresi temperlenemez ve makine düşük bir başlangıç torkuna sahipken, mükemmel bir çalışma performansı gösterir. SKAG, mıknatıslanma akımını korumak için bir güç dönüştürücü ve bir kapasitör bankı kullanır. SKAG, bir transformator aracılığıyla doğrudan şebekeye bağlanır [32]. Şekil 3.6'da SKAG tabanlı rüzgâr türbin yapısı verilmiştir.

SKAG'ın avantajları [32]:

- Basit ve sağlamdır.
- Seri üretim için kolay ve ucuzdur.
- Frekans dönüşümü olmadığı için akım harmoniklerine sahip değildir.

SKAG'ın dezavantajları [32]:

- Çok gürültülüdür.
- Dişli kutusunun olması büyük bir problemdir.
- Düşük verimlidir.
- Çok dar bir aralıkta değişkenlik gösteren hız, kontrol edilemez. Generatörün çalışabilmesi için yalnızca senkron hızdan daha yüksek hızda dönmelidir.



Şekil 3.6. SKAG tabanlı rüzgâr türbini genel yapısı

3.3.2. Rotoru sargılı asenkron generatör (RSAG)

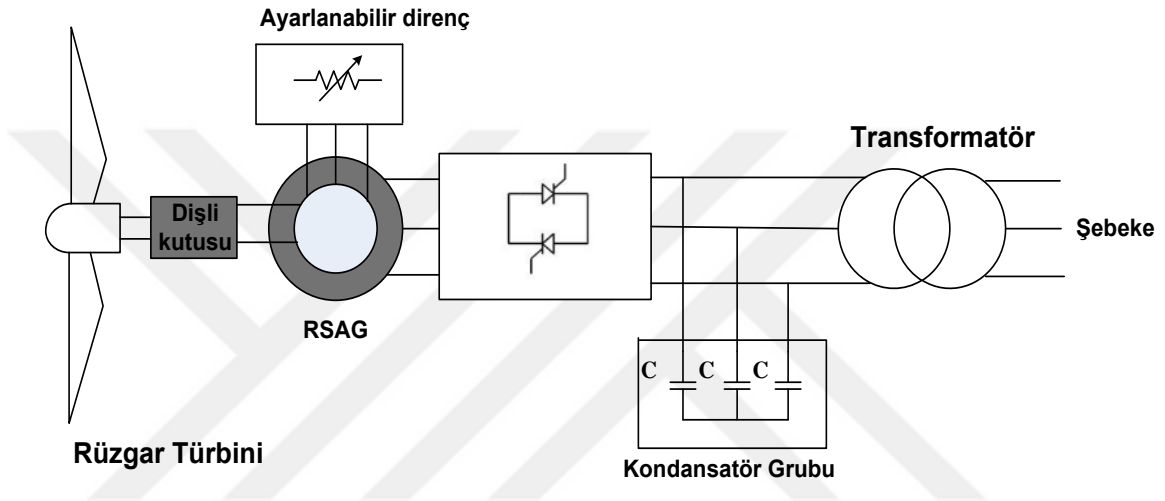
RSAG'nin diğer adı bilezikli asenkron generatördür. SKAG ile stator yapıları aynıdır. SKAG'den farkı, rotor yapısındaki tasarımıdır. Rotor sargılarında bakır sargılar bulunur. Rotor sargı uçları, rotorla beraber dönen bilezikler üzerinde sabit duran fırçalar yardımı ile dışarı çıkarılır. Böylece rotor dışarıdan kontrol edilebilir duruma gelir. Rotorun dışarıdan kontrol edilmesinden dolayı elektriksel değişimler yapılabilir. Yol alma akımını düşürmek için rotor devresine harici bir yol verici direnç dâhil edilebilir. RSAG'ın esnek bir rotor devresine sahip olması, dinamik hız kontrolü için rüzgâr türbini uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılmasına olanak sağlamaktadır [32], [34]. Şekil 3.7'de RSAG tabanlı rüzgâr türbin yapısı verilmiştir.

RSAG'ın avantajları[32]:

- SKAG'e kıyasla bu konfigürasyonun senkron hız üzerinde daha geniş bir hız aralığına sahip olması onu daha uygun hale getirmektedir.

RSAG'ın dezavantajları [35]:

- SKAG kadar sağlam değildir.
- Maliyeti yüksektir.
- Reaktif güç kompanzasyonu için ayrı bir kapasitör bankı düzenlemesi gereklidir.
- Hız aralığı, SKAG ile karşılaştırıldığında nispeten daha geniş olsa da rüzgâr hızı uygulamaları, daha geniş hız aralıkları gerektirdiğinden yeterli değildir.



Şekil 3.7. RSAG tabanlı rüzgâr türbini genel yapısı

Şekil 3.7’de şebeke bağlantılı RSAG modeli verilmiştir. RSAG, ÇBAG ve Optislip generatör olmak üzere iki gruba ayrılır.

3.3.2.1. OptiSlip asenkron generatör

Optislip asenkron generatör (OSIG), rotor bobinlerine bağlı dış rotor direncine sahip, RSAG’dır. Bu özellik, generatörün değişken bir kaymaya (dar aralık) sahip olmasına ve en uygun kaymayı seçmesine izin verir. Generatörün kayması, rotor şaftına monte edilmiş bir güç elektroniği cihazı ile rotor devre direnci değiştirilerek yapılır [40,41].

Vestas tarafından 1990'larda geliştirilen OptiSlip® teknolojisi, kontrolcüyü rotor şaftına yerleştirir. Makinenin geri kalanıyla, bilgileri hava boşluğundan bakım yoğun kayma halkaları olmadan iletebilen bir optik verici ve alıcı aracılığıyla iletişim kurar. Bilezik kullanımına ihtiyaç yoktur. Geliştirilen bu teknoloji, kaymanın anlık değişimine izin verir. Yaklaşık olarak rotorun hızında %10'luk değişime izin verir [32,41].

OSIG'in avantajları [42]:

- SKAG ile karşılaştırıldığında iyileştirilmiş bir çalışma aralığına sahiptir.
- OSIG, rüzgârların neden olduğu mekanik yükleri ve güç dalgalanmalarını azaltabilir. Ancak yine de reaktif güç kompanzasyon sistemi gerektirir.
- Basit bir devre topolojisi vardır.

OSIG'in dezavantajları [42]:

- Hız Aralığı %0-10 ile sınırlıdır.
- Aktif ve reaktif gücün zayıf kontrolü vardır.
- Kayma gücü, değişken dirençte kayıp olarak dağıtılır.

3.3.2.2. Çift beslemeli asenkron generatör

ÇBAG, rüzgâr türbin sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [28]. Bu sistemde, stator doğrudan şebekeye bağlanırken rotor bir güç elektroniği dönüştürücüsü vasıtasıyla şebekeye bağlanır. Dönüştürücü, çift yönlü ve arka arkaya bağlı iki adet dönüştürücüden oluşur. Rotor tarafında bulunan dönüştürücü, elektromanyetik torku kontrol ederken, şebeke tarafı dönüştürücüde doğru akımı düzenler. Bu sayede statordan hem de rotordan enerji alınıp verilebilir [8].

Bu generatör sistemi iki şekilde çalışır, senkron üstü ve senkron altı. Generatör, senkron üstü çalıştığı zaman rotordan şebekeye doğru güç geçişi olur. Senkron altı çalışmada ise şebekeden rotora güç çekilir. Bu generatör sisteminde kullanılan dişli kutusu, rüzgâr kanatlarından gelen düşük devir sayısını yükselterek generatör sistemini tahrik eder [28]. Bu tahrik sisteminin olması ÇBAG için bir dezavantajdır [21].

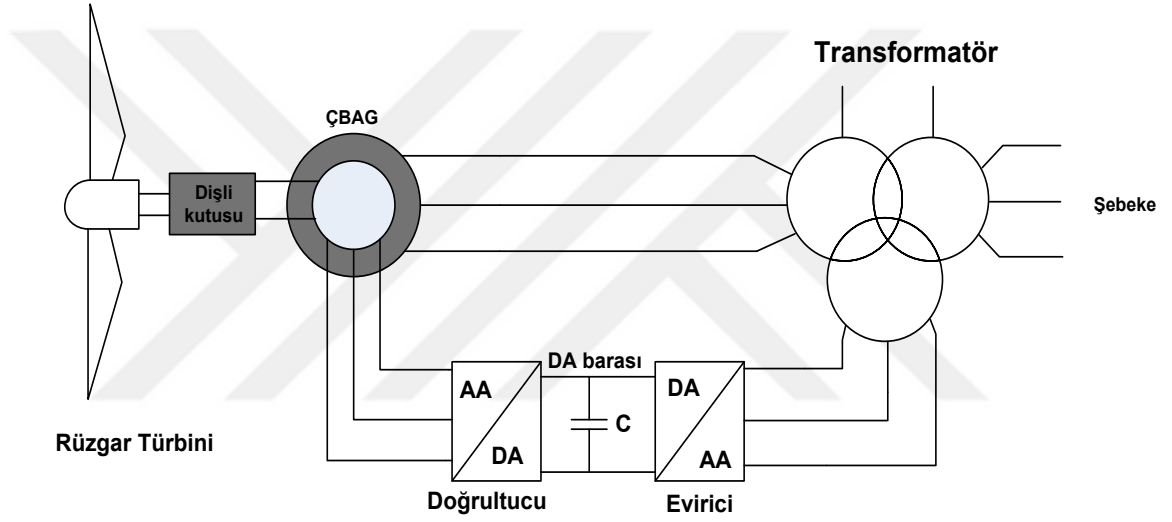
ÇBAG'nin rüzgâr türbin sistemlerinde yaygın olarak kullanılmasının en büyük nedenlerinden biri, rotor tarafında bulunan güç elektroniği elemanın aktif ve reaktif gücü birbirinden bağımsız şekilde kontrol etmesidir [43]. Son yıllarda yaygın olarak kullanılmasındaki en büyük sebep, şebekeye bağlı olmadan da çalışabilmesidir. [8]. Şekil 3.8'de ÇBAG tabanlı rüzgar türbin yapısı verilmiştir.

ÇBAG'ın avantajları [44,45]:

- Kullanılan güç dönüştürücülerinin gücü, generatör gücünün %30'u kadardır.
- Aktif ve reaktif güç birbirinden bağımsız şekilde kontrol edilebilmektedir.
- Maliyetleri düşüktür.
- Kararlı ve dayanıklıdır.

ÇBAG'ın dezavantajları [29]:

- Bilezik sisteminin bulunmasından dolayı sürekli olarak bakım ister.



Bu tez çalışmasında değişken hızlı rüzgâr türbinlerden en üst seviyede verim almak için ÇBAG modeli kullanılmıştır.

BÖLÜM 4

RÜZGÂR TÜRBİN SİSTEMLERİNDE KULLANILAN KONTROL YÖNTEMLERİ

İnsanoğlunun var olmasından bu yana teknoloji sürekli olarak gelişmektedir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte hayatımızda birçok olay, otomatik kontroller sayesinde gerçekleşmeye başlamıştır. Bu bağlamda oda sıcaklığını sabit tutmak, arabalarda hızı belirli bir seviyede tutmak, robotlar ve onların kontrolünü sağlamak kontrol sistemlerine örnek olarak gösterilebilir.

Otomatik kontrol sistemini, sadece bir mühendislik dalı ile sınırlamak yanlış olur. Otomatik kontrol, birçok mühendislik dalında aktif olarak kullanılmaktadır. Kontrol sistemleri, rüzgâr türbin sistemlerinde gerilim ayarlama, kanat açılarını ayarlama, devreye girme, devreden çıkma gibi birçok yerde kullanılmaktadır.

Bu bölümde bulanık mantık, YSA ve PID kontrol yöntemleri detaylı olarak açıklanmıştır.

4.1. PID kontrol yöntemi

Otomatik kontrol sistemleri, günümüzde işlerin kolaylığını sağlayan sistemlerdir. Kontrol sisteminde yer alan bazı terimleri açıklamak gerekirse:

Sistem: Bir bütünü oluşturan, belirli bir amaç için bir araya getirilmiş olan elemanlar topluluğuna veya kümesine denir.

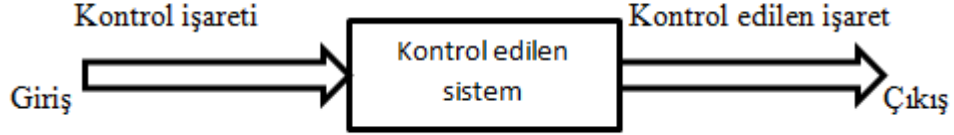
Kontrol Sistemi: Bir sistemi istenilen şekilde düzenlemek, uygun değerlerde ayarlamak ve bu sistemi yönetecek şekilde bir araya gelmiş fiziksel elemanlar topluluğudur.

Giriş: Sistemi veya kontrol edilecek düzeni, istenilen şekilde kontrol etmek için uygulanan işarettir.

Çıkış: Girişte uygulanan giriş işaretlerinden sonra çıkışta alınan çıkış işaretidir.

Kullandığımız sistem, bir giriş ve bir çıkışlı ise bir girişli bir çıkışlı sistem denir. Girişte birden fazla giriş işareti ve çıkışta birden fazla çıkış işareti var ise bu sisteme de çok

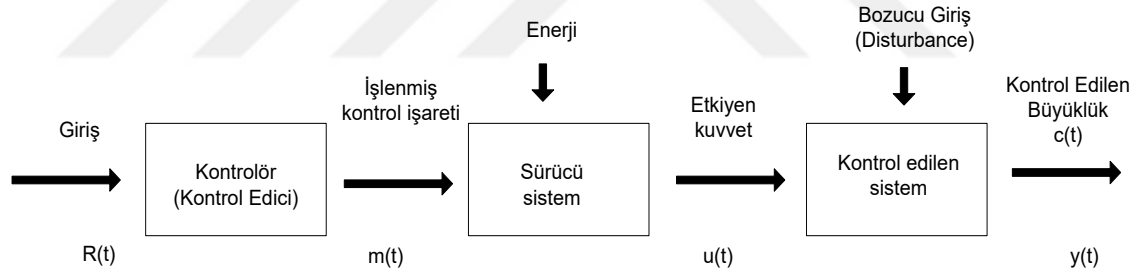
girişli çok çıkışlı sistem denir. En basit haliyle şekil 4.1’de bir giriş ve bir çıkışlı kontrol sistemine ait blok diyagram verilmiştir.



Şekil 4.1. Bir giriş ve bir çıkışlı basit kontrol sistemi diyagramı

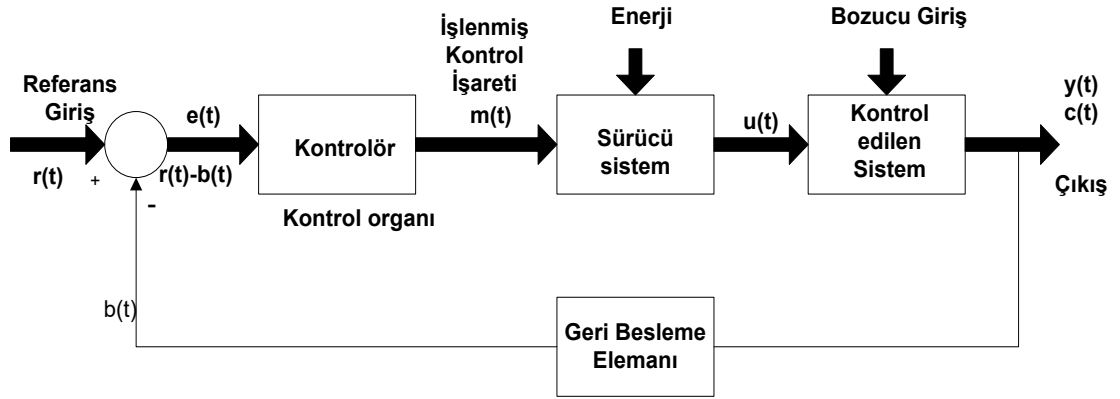
Kontrol sistemlerinde çıkışın kumanda edilmesine göre iki şekilde incelenir. Bunlar; açık çevrim kontrol sistemi ve kapalı çevrim kontrol sistemidir.

Açık Çevrim Kontrol Sistemi: Giriş işaretinin çıkış işaretinden bağımsız olmasından dolayı açık çevrim kontrol sistemi denir. Şekil 4.2’de açık çevrim kontrol sistemine ait blok diyagram verilmiştir.



Şekil 4.2. Açık çevrim kontrol sistemi diyagramı

Kapalı Çevrim Kontrol Sistemi: Geri beslemeli kontrol sistemi olarak da isimlendirilen kapalı çevrim kontrol sistemlerinde, çıkışta yer alan sinyal bir ölçme elemanı ile ölçülür ve bu ölçülen değer girişe geri beslenir. Daha sonra bu değer, referans değer ile karşılaştırılıp yeni bir hata sinyali elde edilir. Elde edilen hata sinyalinin yapısına ve kontrolcünün çıkış değişkenine göre yeni bir kontrol sinyali üretilir. Açık çevrim sisteminden en büyük farkı geri beslemedir. Şekil 4.3’de kapalı çevrim kontrol sistemine ait blok diyagram verilmiştir.



Şekil 4.3. Kapalı çevrim kontrol sistemi blok diyagramı

4.1.1. Oransal (P) Kontrolcü

Oransal (P) kontrolcü, kontrol algoritmasının basit olmasından dolayı endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Oransal denmesinin nedeni ise çıkıştaki kontrolör işaretinin, girişindeki işarete sabit bir oran ile bağlantılı olmasıdır. Oransal kontrolcü, hata değerinin (e) oransal kazanç (K) ile çarpılması sonucu elde edilen çıkış (u) ifadesidir [45].

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (4.1)$$

Hata değerinin düşmesi, kontrolcünün daha düşük etki etmesine neden olur. Bundan dolayı kazanç büyüdükçe, kontrolcünün tepki vermesi artar. Bu kontrolcüde, hata değeri azaldıkça düşük denetleme etkisi gösterip çıkışın referans noktasına, yumuşak bir şekilde yaklaşması sağlanır ve böylece salınım etkisi görülmez. Buna rağmen hata değerinin azalması durumunda ise kontrolcü, istenilen değerde sinyal üretemez ve oransal kontrolcü sistem, kalıcı durum hatası verir. Yani hata değerinin azalması sonucunda sistem, referans değere asla tam olarak ulaşamayacaktır. Bu hatayı engellemek için kontrolcünün çıkışına sabit bir değer koyulur. Sisteme koyulan sabit değer belirli giriş ve çıkış için bir çözümdür [47,48,46].

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + u_0 \quad (4.2)$$

Kazancın artırılmasıyla kalıcı durum hatasını düşürmek mümkündür. Fakat bu durum kazancın artmasından dolayı sistemi kararsız yapabilir.

4.1.2. İntegral (I) kontrolcü

İntegral kontrolcü, oransal kontrolcü sistemine benzer şekilde hesaplanır. Aralarındaki en büyük fark, oransal kontrolcüde hata değeri anlık alınırken integral kontrolcüde, sistemin çalışmaya başladıktan sonra tüm anlardaki hata değerinin toplanıp kazançla çarpılması sonucu bulunur. Ki katsayısı ve integral kontrolcü hata miktarına göre çıkış üretir. [47].

$$u(k) = K_i \sum_1^k e(k) \quad (4.3)$$

Eşitlik 4.3'de verilen toplam, sürekli sistemler için integral ifadesini verir. İntegral ifadesine ait denklem eşitlik 4.4'de verilmiştir. Sistem cevabının referans noktasına ulaşırken gecikmesi durumunda, integral kontrolcünün etkisi artacaktır [47].

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (4.4)$$

4.1.3. Türevsel (D) Kontrolcü

Türevsel kontrolcüde, sistemde oluşan hatanın zamana bağlı değişimi hesaplanır. Bu sistemde, geçmişte veriler üretilerek gelecekteki değişimler için öngöründe bulunulur. KD türevsel kontrolcü, katsayısı ve hatanın değişimine göre çıkış üretir. [47].

$$u(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (4.5)$$

Türevsel kontrolcünün etkisi, sistemde oluşan hatanın zamana bağlı olarak değişimi ile orantılı bir şekilde belirlenir. Türevsel kontrolcü, sistemin hata hızı yüksek ise sisteme daha fazla etki eder. Eğer hatada değişim olmaz ise sistem etkilenmez. Türevsel kontrolcü, hata değişimine göre kontrolcünün çıkışını etkiler. Bu kontrolcü tek başına fazla kullanılmaz, daha çok oransal türevsel (PD) kullanılır [47].

4.1.4. Oransal integral (PI) Kontrolcü

Oransal kontrol ve integral kontrol etkisinin birleşmesiyle elde edilen kontrolcüdür. Oransal etkili kontrolcülerde, kalıcı hal hatasını gidermek için integral etkili kontrolcü ile birlikte kullanılır [47].

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (4.6)$$

PI kontrolcü, oransal kontrolcünün tek başına kullanılmasıyla ortaya çıkan kalıcı hal hatasını kaldırır ve yavaş da olsa sistemi referans değerine taşır [46].

4.1.5. Oransal türevsel (PD) kontrolcü

Türevsel kontrol etkisi ve oransal kontrol etkisinin birleşmesiyle elde edilen kontrolcüdür. Türevsel etkinin, hatada öngöründe bulunma gibi bir avantajı vardır. Hata oluşur oluşmaz harekete geçer ve hatayı çok hızlı bir şekilde düzeltir [46].

$$u(t) = K_p e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (4.7)$$

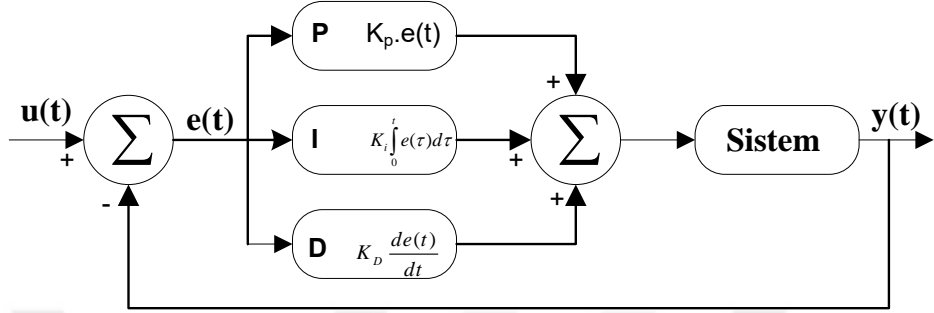
Türev etkisinin en büyük avantajı, sistemde çıkacak büyük hataları öngörmesi ve düzeltmesidir. Aynı zamanda oransal kontrolörün aşımını azaltıp sistemin tepki verme hızını artırır [47]

4.1.6. Oransal integral türevsel (PID) kontrolcü

Oransal kontrol etkisi, türev ve integral kontrol etkisinin birleşiminden oluşan kontrol sistemidir. Kullanılan en yaygın kontrol yöntemidir. Lineer ve non lineer sistemlerde uygulanması mümkün kontrol yöntemidir. PI kontrol etkisinde ortaya çıkan kalıcı hal hatasını sıfırlarken, türev kontrol etkisi sistemin cevap hızını ve kararlılığını yükseltir. Buna göre PID kontrol, sistemde sıfır kalıcı hal hatası olan hızlı bir cevap sağlar [47,48].

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (4.8)$$

Oransal, türevsel ve integral kontrol etkisinin bir arada kullanılmasıyla sistemin hem geçici hem de düzenli rejim davranışı, olumlu yönde etkilenir. Şekil 4.4’de PID kontrole ait blok diyagram verilmiştir.



Şekil 4.4. PID kontrol

4.2. Yapay Sinir Ağları (YSA)

YSA, insan beyninin en önemli özelliği olan öğrenme fonksiyonun oluşumunu sağlayan sistemlerdir. YSA, karmaşık problemleri çözmeye geniş bir kullanım alanı olan hesaplama araçlarıdır. Bu ağlar, birbirine bağlı yapay sinir hücrelerinden oluşmaktadır. Yapay sinir hücreleri biyolojik hücreye benzer olarak çalışır. Girilen bilgileri toplar ve fonksiyonlardan geçirerek çıktı üretir. Sonra da ağın bağlantılarını diğer hücrelere gönderir.

YSA, günümüzde birçok alanda kullanılmaktadır. Mühendislik, matematik, fizik vb. YSA'nın mühendislikte kullanılmasının ana sebebi, klasik tekniklerle çözülemeyen problemlerin bu yöntemle başarılı bir şekilde çözülebilmesidir [48]. YSA, günümüzde farklı alanlarda kullanılmıştır. YSA'nın kullanıldığı bazı alanları şu şekilde sıralayabiliriz:

- Parmak izi tanıma
- Kontrol
- Ses tanıma
- Sistem modelleme
- Otomatik araç denetimi
- Hava durumu tahmini
- Bankalarda kredi notunun hesaplanması

- Veri madenciliği
- Kanser teŖhisi ve tedavisi

4.2.1. YSA'nın avantajları ve dezavantajları

YSA'nın avantaj ve dezavantajları, uygulanan sistemler için farklılık göstermektedir. En temel avantaj ve dezavantajlar aŖađıda sıralanmıŖtır.

YSA'nın ortak avantajları:

- Matematiksel modele ihtiyaç duymazlar.
- Öğrenme kabiliyetleri vardır ve farklı öğrenme algoritmaları kullanırlar.
- Belli bir kural tabanları yoktur.
- Tam bilgi gerektirmeden alıŖabilirler.
- Yapılan sistemin güvenliği için test edilebilirler.
- alıŖma mantığı olarak klasik yöntemlerden farklıdır.
- Kendi kendini organize etme kabiliyetine sahiptir.
- Ŗekil sınıflandırma ve ilişkilendirme yapabilirler.
- Hiç görmediği örnekler hakkında bilgi üretebilirler.
- Makine öğrenmesi gerçekleştirirler.

YSA'nın ortak dezavantajları:

- Sistem içinde ne olduğu bilinemez.
- Veri miktarı yüksektir.
- Problemlere özgü modeller yoktur bundan dolayı deneme yanılma yolu ile alıŖır.
- Bir problemde kullanılan metot, baŖka bir problemde çok olumsuz sonuçlar verebilir.
- Problemin ağa gösterimden sonra ne kadar süreceğine dair bir bilgi yoktur.
- Bazı ağlar hariç kararlılık analizi yapılamaz.

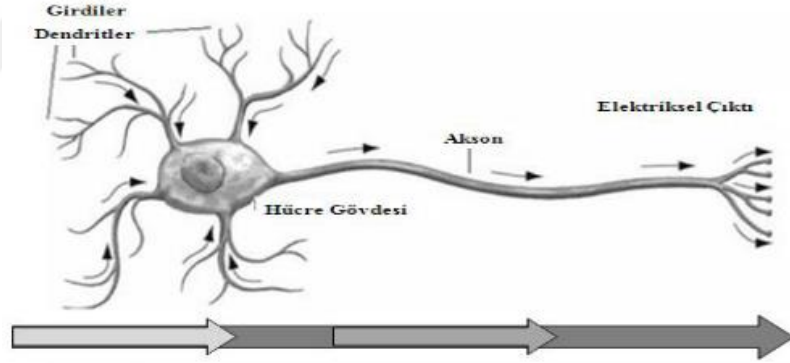
4.2.2. YSA'nın genel yapısı

4.2.2.1. Biyolojik sinir hücresi

YSA'nın anlaşılır olması için biyolojik sinir ağlarının çalışma ilkeleri ve yapısının incelenmesi gerekmektedir.

İnsan beyni üzerinde yapılan çalışmalar hala devam ediyor olsa da insan beyninin kendini nasıl eğittiğine dair somut bir yaklaşım yoktur. Bu konuyla alakalı birden fazla teori söz konusudur. Bu teorilerin ortak yaklaşımı şu şekildedir:

İnsan beyninin önceki davranışlarından ders çıkarma, olayları hatırlama, olaylar karşısında hızlı düşünme vb. kendine özgü sinir hücreleri vardır. İnsan beyninde 10^{11} nöron vardır. Her nöronun yaklaşık 10^4 bağlantılı olduğu komşuları vardır ve bu bağlantılı olduğu sinirlerden uyarı alır [49]. Şekil 4.5'de biyolojik sinir hücresi verilmiştir [49].



Şekil 4.5. Biyolojik Sinir Hücresi

Nöronların 4 temel bileşeni vardır. Bunlar; dendrit, hücre gövdesi, akson ve sinapslardır. Dendrit ve aksonların birleştiği noktaya sinaps denir. Sinapsın görevi, başka bir sinir hücresinin aksonundan aldığı elektrik akımını, dendrite elektro-kimyasal yolla iletmektir. Dendrit ise gelen elektrik akımını hücre gövdesine iletir. Hücre gövdesinin görevi, gelen elektrik akımlarını toplamaktır.

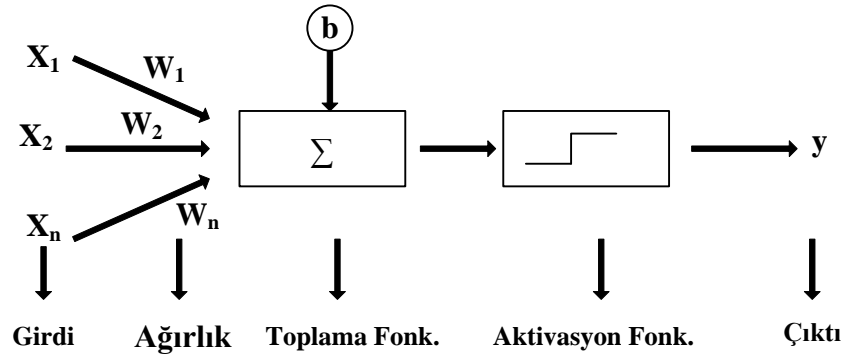
4.2.2.2 Yapay sinir hücresi

YSA'da biyolojik sinir ağları gibi nöronlara sahiptir. YSA, biyolojik sinir ağlarından esinlenerek geliştirildiği için birçok benzer yanı bulunmaktadır. YSA ve biyolojik sinir ağının arasındaki benzerlik Tablo 4.1'teki gibi gösterilebilir.

Tablo 4.1. Biyolojik sinir ağı ile yapay sinir ağının karşılaştırılması

Biyolojik Sinir Ağı	Yapay Sinir Ağı
Sinaps	Sinirler arası bağlantı ağırlıkları
Sinir	Düğüm (Sinir, işlem elemanı)
Sinir Sistemi	Sinirsel Hesaplama Sistemi
Dendrit	Toplama işlevi
Akson	Sinir Çıkışı
Hücre gövdesi	Etkinlik İşlevi

Yapay sinir hücresinin 5 temel unsuru vardır. Bunlar; girdiler, ağırlıklar, toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve hücre çıkışıdır. Şekil 4.6'da yapay sinir hücresi yapısı verilmiştir [50]



Şekil 4.6. Yapay sinir hücresi yapısı

Girdiler: Yapay sinir hücresine dışarıdan gelen verilerdir. Bu veriler, direkt olarak gelebileceği gibi başka hücrelerden de gelebilmektedir. Aldığı veriyi çıktı olarak aktarmaktan başka bir işlevi yoktur. Girişinden birden fazla veriyi algılayacak kapasiteye sahip olsa da sadece bir çıktı çıkışı sağlamaktadır.

Ağırlıklar: YSA’da öğrenme, ağırlıkların değişmesi ile gerçekleşmektedir. Ağırlık değeri, yapay sinir hücresinden gelen verinin önemini belirler. Ağırlık değeri eğer küçük ise o verinin yapay sinire zayıf bağlandığını gösterir. Ağırlık değeri büyük ise yapay sinir için önemli olduğunu gösterir. Öğrenme bu aşamada gerçekleştirildiği için ağırlık değeri bazen sabit bile kalabilir [51].

Toplama Fonksiyonu: Biyolojik sinir hücresinde dendritin yaptığı işlevi yapar. Bu fonksiyon, hücreye giren net girdiyi hesaplar. Toplama fonksiyonu, fonksiyonların arasından en uygun olanı bulup bu işlemi gerçekleştirir. Sıklıkla kullanılan ağırlıklı toplam fonksiyonudur. Toplama fonksiyonu Eşitlik 4.9’de verilmiştir [49].

$$NET = \sum_i^n (G_i A_i) \quad (4.9)$$

Eşitlik 4.9’da A ağırlıkları, G girdileri ve n hücreye giren girdi sayısını ifade etmektedir. Eşitlik 4.10-4.14’de toplama fonksiyonları verilmiştir.

$$\text{Çarpım} : Net = \prod G_i . A_i \quad (4.10)$$

$$\text{Maksimum} : Net = Max(G_i . A_i) \quad (4.11)$$

$$\text{Minumum} : Net = Min(G_i . A_i) \quad (4.12)$$

$$\text{Çoğunluk} : Net : \sum \text{sgn}(G_i . A_i) \quad (4.13)$$

$$\text{Kamülatif Toplam} : Net = Net_{(eski)} \sum (G_i . A_i) \quad (4.14)$$

Aktivasyon Fonksiyonu:

Transfer fonksiyonu olarak da bilinmektedir. Yapay sinir hücresinden gelen net girdiyi, bazı işlemlerden geçirerek sinir ağının çıktısını belirler. Aktivasyon fonksiyonu da, toplama fonksiyonu gibi farklı algoritmalar kullanılmaktadır. En çok kullanılan aktivasyon fonksiyonu sigmoid fonksiyonudur [52]. Sigmoid fonksiyonu eşitlik 4.15’de verilmiştir.

$$\text{Sigmoid Fonksiyonu: } F(NET) = \frac{1}{1 + e^{-NET}} \quad (4.15)$$

Sigmoid aktivasyon fonksiyonu, türevi alınabilir olması, sürekli ve doğrusal olmayan bir yapıda olmasından dolayı en çok tercih edilen aktivasyon fonksiyonudur. Yaygın olarak kullanılan aktivasyon fonksiyonları Tablo 4.2’de verilmiştir [49].

Tablo 4.2. Yaygın olarak kullanılan aktivasyon fonksiyonları

Lineer Fonksiyon	$F(NET) = NET$	Gelen girdiler hücrenin çıktısı olarak kabul edilir.
Hiperbolik Tanjant Fonksiyonu	$F(NET) = \frac{e^{net} - e^{-net}}{e^{net} + e^{-net}}$	Gelen net girdi değerinin tanjant fonksiyonundan geçirilmesi ile hesaplanır.
Eşik Değer Fonksiyonu	$F(NET) = 0 \quad NET \leq 0$ $F(NET) = NET \quad 0 < NET < 1$ $F(NET) = 1 \quad NET > 1$	Gelen bilgilerin 0 veya 1'den büyük olmasına göre bir değer alır.
Step Fonksiyonu	$F(NET) = 1 \quad Net > \text{eşik değeri}$ $F(NET) = 0 \quad NET \leq \text{eşik değeri}$	Gelen net girdi değerinin belirlenen bir eşik değeri altında veya üstünde olmasına göre hücrenin çıktısı 1 veya 0 değerlerini alır.

Hücrenin Çıktısı: Aktivasyon fonksiyonun belirlediği çıktı değeri, problemin çözümüdür. Birden fazla veri girişi olsa da sadece bir çıkış vardır. Yani bir çıktı, birden fazla hücreye bağlanabilmektedir [51].

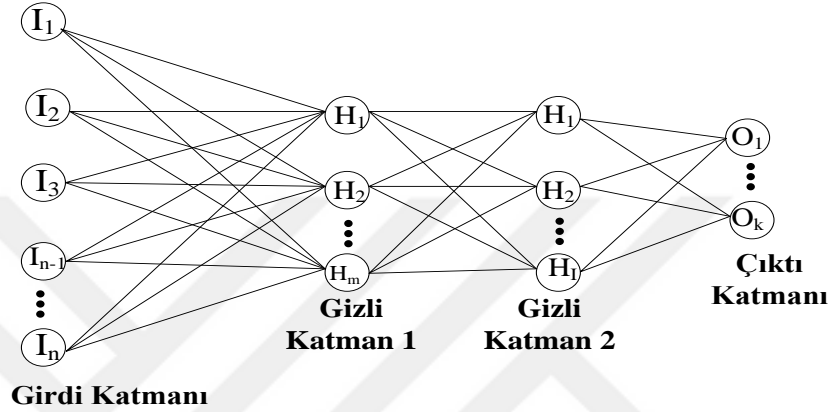
4.2.3. YSA'nın yapısı

YSA 3 ana temel bileşeni vardır. Bunlar girdi katmanı, gizli katman ve çıktı katmanıdır. Şekil 4.7’de YSA yapısı verilmiştir.

Girdi Katmanı: Diğer katmanlara göre kısmen daha işlevi az olan girdi katmanı, gelen bilgileri olduğu gibi çıkışa vererek aracı rolü üstlenir. En az bir girdi faktörünün bulunduğu bölümdür [52].

Gizli Katman: Girdi katmanından gelen bilgileri burada işleyerek çıkışa veren katmandır. Problemin yapısına göre sayısı, katman sayısı, fonksiyonu değişebilmektedir [52].

Çıktı Katmanı: Ağın, çıkış verilerinin üretildiği yerdir. Gizli katmandan gelen bilgiler, burada işlenerek problemin çözümü dış dünyaya çıkış olarak gönderilmektedir[52].



Şekil 4.7. YSA Yapısı

YSA öğrenme işlemi yapılırken kesin bir çözüm söz konusu değildir. Çünkü YSA'lara "kara kutu" denilmektedir. Kara kutu denilmesinin nedeni, kesin bir çözüm olacağı garantisinin olmamasıdır. YSA'da öğrenme iki aşamalı gerçekleşir. Birinci aşamada, örnek veriler sisteme öğretilerek sistemi o verilere adapte etmektir. Daha sonra sistemin öğrenip öğrenmediği test edilerek sonuçlar alınır. Eğer olumlu sonuçlar alınmışsa sistem iyi bir öğrenme yapmıştır denilmektedir. Eğitim esnasında kullanılan verilere "eğitim seti", test için kullanılan verilere "test seti" denilmektedir [52].

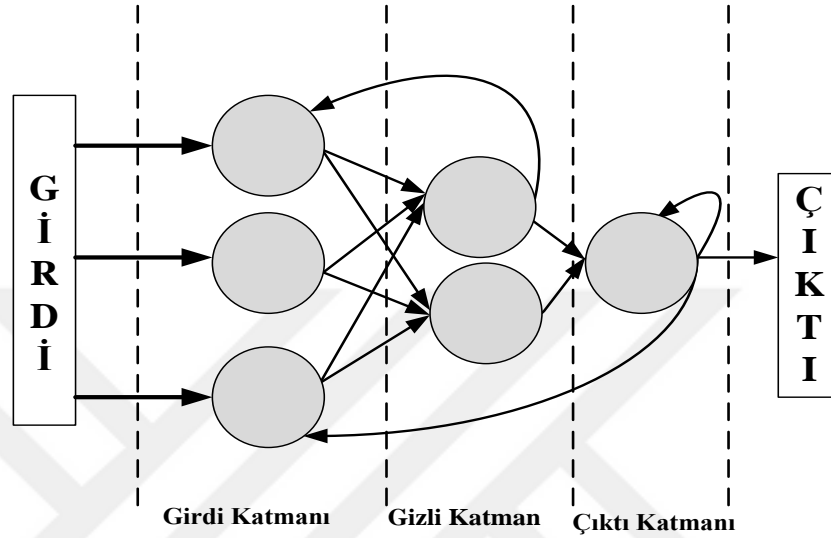
4.2.4. YSA'nın sınıflandırılması

YSA iki temel ağ mimarisine sahiptir. Geri beslemeli (feedback/reccurent) ve ileri beslemeli (feedforward) YSA olarak iki şekilde sınıflandırılır.

4.2.4.1. Geri beslemeli yapay sinir ağları

İsminden de anlaşılacağı gibi bu sistemlerde bir geri dönüt işlemi vardır. Geri beslemeli yapay sinir ağlarında, bir hücrenin çıktısı, geri besleme sayesinde başka bir hücrenin

girdisi olabilmektedir. Geri beslemeli yapay sinir ağında, ileri beslemeliye ek olarak kendinden önceki katmanlar geri beslenir böylelikle veriler ileri ve geri yönlü aktarılmasına olanak sağlanmış olur. Şekil 4.8’de geri beslemeli yapay sinir ağı verilmiştir [49].



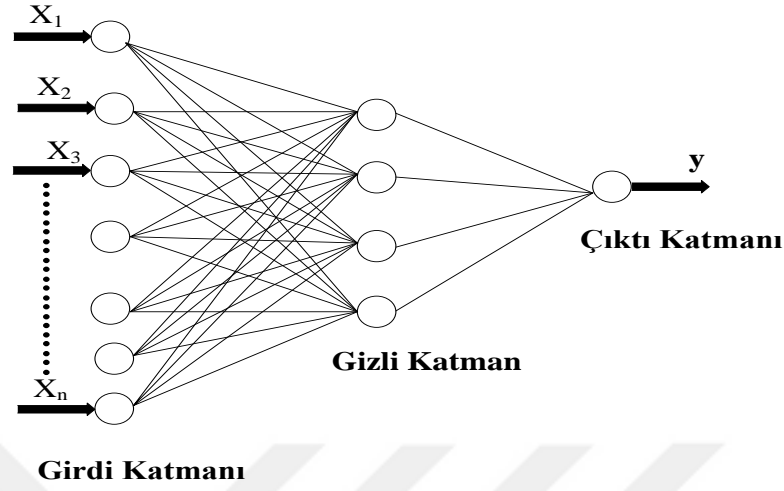
Şekil 4.8. Geri Beslemeli Yapay Sinir Ağı

Geri beslemeli yapay sinir ağları, ileri beslemeli yapay sinir ağının aksine dinamik bir yapıya sahiptir. Bu dinamik yapı sayesinde her girişi tekrar düzenleyip ağda yeni bir çıktıya dönüştürülebilmektedir. Bu tip YSA’lar, genelde danışmansız öğrenme kurallarının uygulandığı sistemlerde kullanılır [49].

4.2.4.2. İleri beslemeli yapay sinir ağları

İleri beslemeli yapay sinir ağları, giriş katmanından çıkış katmanına doğru tek doğrultuda hareket eden nöron yapısından oluşur. İleri beslemeli yapay sinir ağında geri dönüt yoktur. Şekil 4.9’da ileri beslemeli yapay sinir ağı yapısı verilmiştir [49].

Şekil 4.9’da görüldüğü gibi ileri beslemeli yapay sinir ağlarında veriler, girdi katmanından alınır ve hiçbir değişiklik yapılmaz. Gelen veriler, kendisinden sonraki katman olan gizli katmana direkt olarak iletilir. Gizli katmanda veriler, belirlenmiş olan bazı kurallarda işlemlerden geçerek çıktı katmanına iletilir. Ayrıca ileri beslemeli yapay sinir ağlarında var olan ara katmanların çıktıları, bir sonraki katmanın girişi olarak isimlendirilir [49].



Şekil 4.9. İleri beslemeli yapay sinir ağı

4.2.5. YSA'nın öğrenme algoritması

YSA'da öğrenme, önceden sisteme verilen örneklerden öğrenme yoluyla gerçekleşir. Bu öğrenme gerçekleşirken sistem, algoritmadaki ağırlıkları değiştirerek en iyi performansa ulaşmasını sağlar. Öğrenmenin temeli, problemin geçmişteki girdi ve çıktılarının sisteme tanıtılarak gelecekte oluşturulacak olan sistemin çıktısını örnekler üzerinden öğrenmesi ile sağlanır.

Günümüze kadar farklı yapılarla sahip YSA modelleri gerçekleştirilmiştir. YSA'da tıpkı insanlar gibi farklı öğrenme tiplerine sahiptir. YSA, matematiksel denklemlerle belirlenmiş öğrenme kuralına ve modelin öğrenme sürecine göre işlem yapmaktadır.

YSA öğrenme algoritmalarına göre takviyeli, danışmansız ve danışmalı öğrenme yöntemleri vardır. Ayrıca örneklerle öğrenme gerçekleşene kadar çevrimdışı ve çevrimiçi öğrenme kurallarını kullanır [49]

4.2.5.1. YSA'nın Öğrenme kuralları

4.2.5.1.1. Çevrimiçi öğrenme kuralı

Gerçek zamanlı çalışan bu öğrenme kuralı, öğrenme işlemine devam ederken aynı zamanda fonksiyonları yerine getirir. Çevrimiçi öğrenme kuralına, Kohonen öğrenme kuralı örnek verilebilir [53].

- *Kohonen öğrenme kuralı*: 1982 yılında Teuvo Kohonen tarafından ortaya atılmış öğrenme kuralıdır. Kohone'ye göre sinir hücresi ağırlıkları, en iyi çıktıyı verebilmek için kendi aralarında yarışır. Yarışmacı öğrenme kuralı denmesinin nedeni bundan dolayıdır. En uygun çıktıyı çıkaran sinir hücresi yarışmayı kazanır [53].

4.2.5.1.2. Çevrimdışı öğrenme kuralı

Test verisiyle eğitime, çevrimdışı öğrenmenin temelidir. Bu öğrenme kuralında sistem eğitildikten sonra gerçek hayatta uygulamaya koyulur. Uygulama esnasında eğitim yapılamaz. Değiştirmek istenilen bir bilgi veya yeni bilgiler eklemek istenildiğinde sistem öğrenimden çıkartılıp çevrimdışı olarak eğitim yapılır. Eğitim tamamlandıktan sonra sistem hazır hale gelmektedir [49].

Delta, Hebb ve Hopfield YSA'da en sık kullanılan çevrimdışı öğrenme kurallarıdır.

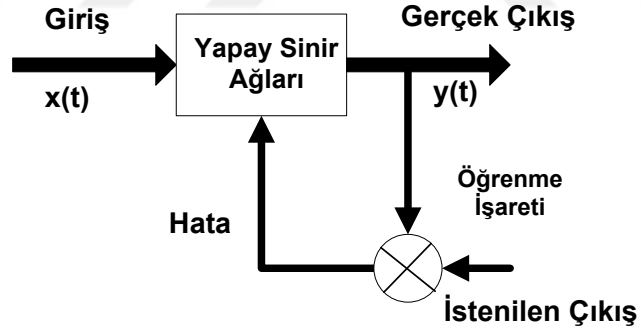
- *Delta Öğrenme Kuralı*: Widrow ve Hoff tarafından geliştirilmiştir. Amacı, gerçek çıktı ile tahminlenen çıktı arasındaki hata seviyesini en düşük değere çekmektir. Kurala göre ağ elemanlarının ağırlık değerleri sürekli olarak yeniden hesaplanır. Sürekli olarak hesaplanmasının sonucunda gerçek çıktı ile tahminlenen çıktı arasında fark azalır. Günümüzde en çok kullanılan öğrenme kuralıdır [54]
- *Hebb Öğrenme kuralı*: 1949 yılında Donald Hebb tarafından geliştirilmiştir. Şu an için bilinen en eski öğrenme kuralıdır. Hebb kuralı şöyle ifade etmiştir: "Eğer sinyal alan ile gönderen nöronlar arasındaki sinaptik ağırlıkların ikisi de matematiksel olarak aynı işarete sahip ise, bu iki nöron arasındaki bağ kuvvetlendirilmelidir. Aksi halde bağ kuvveti azaltılmalıdır." (HEBB 1949) Bu tanımlama Hebb'in "The Organization of Behaviour" kitabında yazılmıştır. Bu tanımlamadan çıkarılacak sonuç şu şekildedir: Bir hücre pasif ise bağlı olduğu hücreyi de pasif, aktif ise aktif olduğu hücreyi de aktif yapmaya meyillidir [49].
- *Hopfield Öğrenme Kuralı*: Bu öğrenme kuralı, Hebb kuralına kısmen denk bir kuraldır. Hebb kuralından farkı ise ağ bağlantı ağırlıklarının derecesini de ayarlar. Ağırlıkları, istenilen şekilde zayıflatma veya güçlendirme yapılır.

Sisteme verilen girdiler ve çıktıların değerlerine göre öğrenme katsayısı kadar değerler azaltılır veya artırılır. Bu katsayı genellikle kullanıcı tarafından belirlenir ve 0 ile 1 arasında bir değerden oluşur [52,56].

4.2.5.2. YSA öğrenme yöntemleri

4.2.5.2.1. Danışmanlı öğrenme

YSA'da genellikle tercih edilen öğrenme yöntemlerinden olan danışmanlı öğrenme, beklenen çıkış değeri ile gerçek çıkış değerini karşılaştırır. Bu öğrenme yönteminde, ağın eğitimi için bir öğretmen veya danışman gereklidir. Bu eğitmen, ağa bir veri seti verir. Bu veri setinde ağın öğrenilmesi istenilen durum ile ilgili girdi değerleri ve gerçek çıktı değerleri verilir. Ağ, bu veri setini işleyerek çıktı oluşturur. Bu çıktı değeri ile gerçek çıktı değeri karşılaştırılarak hata oranı tespit edilir. Bu hatayı en düşük seviyeye getirene kadar bağlantıların ağırlıkları sürekli olarak düzenlenir. Hata değeri istenilen seviyeye gelince eğitim bitmiş olur [51]. Şekil 4.10'da danışmanlı öğrenme yapısı verilmiştir [56].



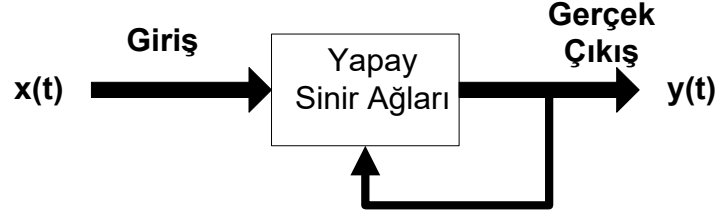
Şekil 4.10. Danışmanlı öğrenme

Hata oranı tespitinde Hata Kareleri Ortalaması (MSE: Mean Square Error) ve Ortalama Mutlak Hata (MAE: Mean Absolute Error) performans kriterleri olarak kullanılır.

4.2.5.2.2. Danışmansız öğrenme

Danışmanlı öğrenmede, bir eğitmene ihtiyaç varken danışmansız öğrenmede, eğitmene ihtiyaç yoktur. Danışmansız öğrenmede, sisteme verilen veri setinde sadece girdi değerleri verilirken çıktı değerleri verilmez. Danışmansız öğrenmede, sistem parametreleri arasında bir ilişki kurarak çıktı alması beklenir. Bu sistemde çıktıları

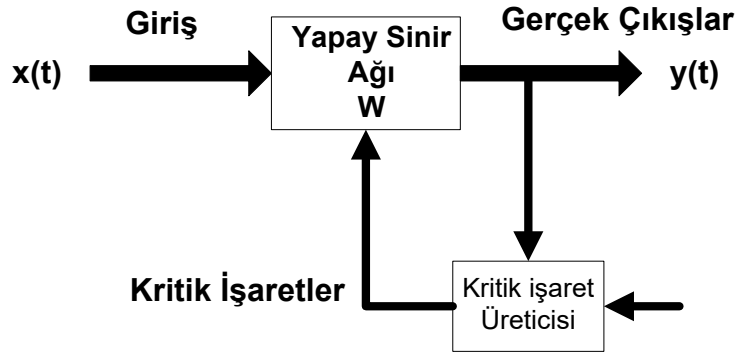
karşılaştıracak bir eğitmen yoktur. Danışmanlı öğrenmeye göre çok hızlıdır. Bu öğrenme yöntemine Kahonen, Hebb ve Hopfield öğrenme algoritmaları örnek verilebilir [57]. Şekil 4.11’de danışmansız öğrenme yapısı verilmiştir [56].



Şekil 4.11. Danışmansız öğrenme

4.2.5.2.3. Takviyeli öğrenme

Takviyeli öğrenme yöntemi, danışmanlı ve danışmansız öğrenme yöntemlerinin beraber kullanılmasıyla ortaya çıkmıştır. Bu öğrenme yöntemi, danışmanlı öğrenmeye benzese de çıktı setini öğretmek yerine, üretilen çıktının doğruluk veya yanlışlık değerlerine göre sinyal üretir. Sistem de danışmandan gelen bu sinyal doğrultusunda öğrenmeye devam eder. Örnek olarak Doğrusal Vektör Parçalama Modeli (Linear Vector Quantization, LVQ) verilebilir [57]. Şekil 4.12’de takviyeli öğrenme yapısı verilmiştir [56].



Şekil 4.12. Takviyeli öğrenme

4.2.6. YSA’nın eğitilmesi

YSA eğitilirken iki aşamadan geçer. Ağa, öğrenilmesi istenilen girdiler ve çıktılar veri seti şeklinde verilir. İkinci aşama da ise doğruluk değerine göre ağın bağlantılarının ağırlık değerleri değiştirilir [53].

Kullanıcı YSA'yı eğitim ve test etmek için bazı veriler toplar. Toplanan bu verilerin çok olması eğitim ve sağlama sürecinde fayda sağlayacaktır. Oluşturulan veri setinin yaklaşık %70'i eğitim için, %15'i test için, geri kalan %15'de doğrulama için kullanılır. Verilen bu oranlar, kullanıcı tarafından istenilen değerde değişebilmektedir.

YSA, eğitilirken aşağıda verilen aşamalardan geçer. YSA öğrenme aşamaları şu şekildedir [50,59,60]:

- Sistemin girdi parametreleri tanımlanır.
- Sistem performansını ölçen çıktı parametreleri (sistem güvenilirliği, kullanılabilirliği ve sürdürülebilirliği) tanımlanır.
- Bu parametreler bir sistem çıktısı ölçüsünde birleştirilir.
- Eğitim ve doğrulama için çok sayıda girdi ve çıktı sisteme verilmelidir.
- Sistemde olan gizli katman ve gizli hücrenin doğruluğu, deneme yanılma yoluyla belirlenir. En iyi sonucu alana kadar gizli hücre ve gizli katman sayısı artırılır.
- Eğitim ve sağlama yapıldıktan sonra yapay sinir ağı modelinin benzetimi yapılır.

En iyi sonucu alabilmek için yukarıda sıralanmış adımlar gerçekleştirilir. Eğer istenilen gibi değilse sonuçlar, yukarıdaki adımlar tekrar edilerek en düşük hata seviyesine gelene kadar devam edilir.

4.3. Bulanık Mantık (BM)

1956 yılında temeli atılan bulanık mantık (BM) kavramının, ABD'de yapılan bir konferansta bahsi geçmiştir. Fakat ilk bilimsel kaynak 1965 yılında Dr. Lütü Zadeh tarafından yazılan bir makalede ortaya atılmıştır [60]. BM, klasik mantığın (Aristoteles mantığı, ikili mantık, siyah beyaz mantık) eksikliğinden veya yetersizliğinden dolayı ortaya çıkmıştır.

Klasik mantıkta bir önerme 0 veya 1 değer almaktadır. Yani hava sıcak veya soğuktur. Arada bir değer yoktur [61]. Klasik mantıkta uzunluk-kısalık, büyüklük-küçüklük gibi kesin yargılar vardır.

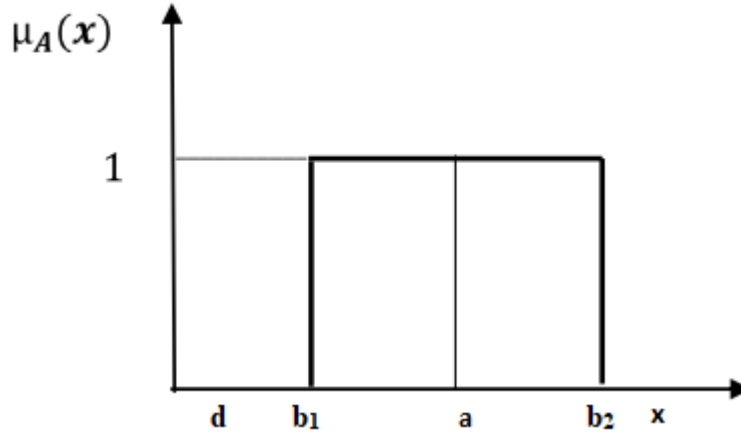
Her sistemin sınırları olduğu gibi BM'ninde sınırları vardır. Bu sınırlar şartlara göre değişmektedir. Klasik mantık ile BM arasındaki en temel fark ise bulanık mantığın

daha esnek sınırları olmasıdır. Tablo 4.3’de klasik mantık ile BM arasındaki temel farklılıklar verilmiştir.

Tablo 4.3. Bulanık mantık ile klasik mantık arasındaki temel farklılıklar

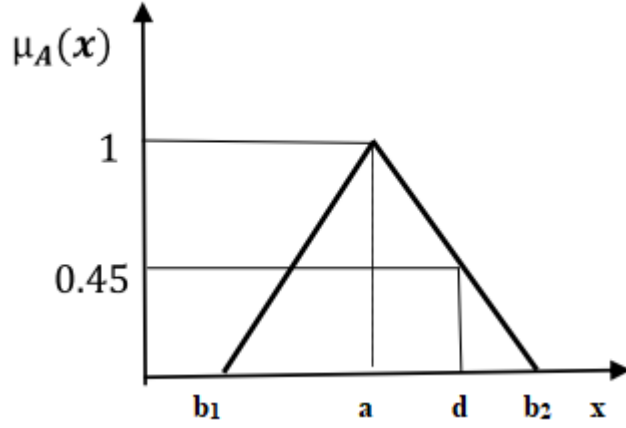
BULANIK MANTIK	KLASİK MANTIK
Beyin	Dijital Bilgisayar
Bulanık birimler	İkili Birimler
0 ile 1 Arasında Süreklilik	0 veya 1
Kısmi	Kesin
X ve X Değil	X veya X Değil
Belirli Derecelerde	Hepsi veya Hiçbiri

Klasik mantığa örnek olarak şekil 4.13 verilebilir. Burada “a” değeri “A” bulanık kümesinin kesin elemanıdır. Üyelik derecesi 1 olarak ifade edilir. “d” değeri ise bulanık kümesine ait olmadığı görülmektedir. Bundan dolayı üyelik derecesi 0 olarak kabul edilir.



Şekil 4.13. Klasik üyelik fonksiyonu

Şekil 4.14’de bulanık üyelik fonksiyonu verilmiştir. Burada “a” üyesi “A” bulanık kümesinin kesin elemanıdır. “a” üyesinin üyelik derecesi 1’dir. “d” üyesi ise “A” bulanık kümesinin belirli bir ölçüde üyesidir. Bulanık mantık gösteriminde ise 0.45 üyelik derecesine sahiptir.



Şekil 4.14. Bulanık üyelik fonksiyonu

Bulanık üyelik fonksiyonları, genellikle üçgen üyelik fonksiyonu, yamuk üyelik fonksiyonu olarak tercih edilmektedir. Bu üyelik fonksiyonlarına ait formüller ve üyelik fonksiyon grafikleri Tablo 4.4’de verilmiştir.

Tablo 4.4. Üyelik fonksiyonlarına ait grafik ve formüller

Üyelik Fonksiyonun Adı ve Grafiği	Üyelik fonksiyonuna ait Formül
<p>Yamuk üyelik fonksiyonu</p>	$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ 1, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ \frac{a_4 - x}{a_4 - a_3}, & a_3 \leq x \leq a_4 \\ 0, & x > a_4 \end{cases}$
<p>Üçgen üyelik fonksiyonu</p>	$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2}, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0, & x > a_3 \end{cases}$

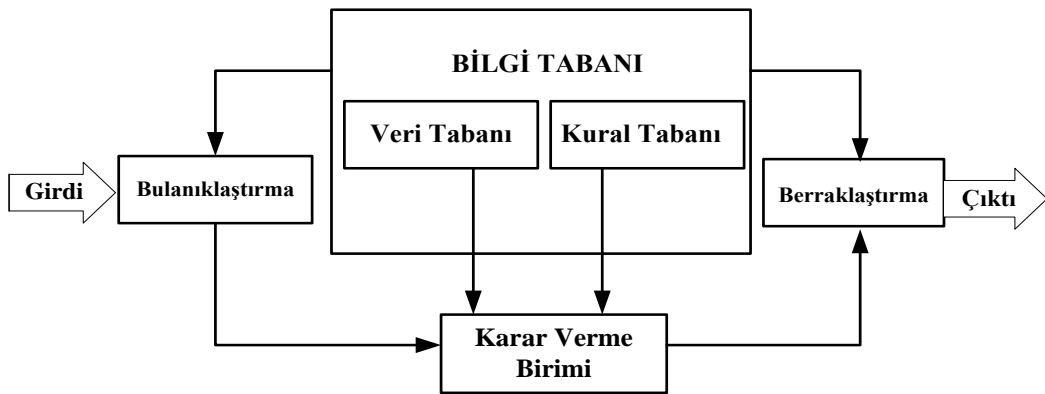
Tablo 4.4’de verilen üyelik fonksiyonları benzetim programı olan MATLAB’de tanımlıdır. Tablo 4.5’de Matlab’da tanımlı üyelik fonksiyonları ve matlab isim kodlaması verilmiştir [61].

Tablo 4.5. Matlab’da tanımlı üyelik fonksiyonları

Üyelik Fonksiyonu	Matlab İsim Kodlaması
Üçgen Üyelik Fonksiyonu	trimf
Yamuk Üyelik Fonksiyonu	trapmf
Çan Şekilli Üyelik Fonksiyonu	gbellmf
Gauss Üyelik Fonksiyonu (tam simetrik)	gaussmf
Gauss Üyelik Fonksiyonu	gauss2mf
Π Üyelik Fonksiyonu	pimf
Sigmoidal Üyelik Fonksiyonu (tam simetrik)	dsigmf
Sigmoidal Üyelik Fonksiyonu	psigmf

4.3.1. Genel BM kontrolcüler

BMD’ler genel olarak 4 temel işlemde geçer. Bunlar; bulandırma, bilgi tabanı, karar verme ve netleştirme işlemleridir. Şekil 4.15’de genel bir bulanık mantık kontrolcü şeması verilmiştir [61].

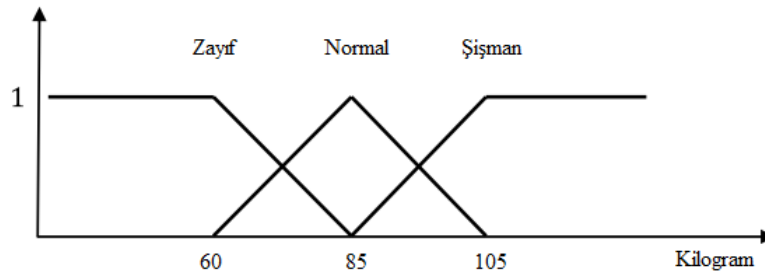


Şekil 4.15. Bulanık Mantık Kontrolcünün Genel Yapısı

Şekil 4.15’de bulanık bilgi tabanının iki bileşeni olduğu görülmektedir. Bu bileşenlerden ilki veri tabanıdır. Veri tabanı, sistemde kullanılacak olan üyelik işlevlerini tanımlar. İkinci bileşen ise kural tabanıdır. Kural tabanı, sistemde olan bulanık giriş değerleri ile bulanık çıkış değerlerini birbirine eşlenmesini sağlar. BM kontrolcünün temeli olarak ise karar verme birimi kabul edilir. Karar verme birimi, insan tarzı karar verebilme becerisine sahiptir. Karar verme birimi böyle bir beceriye sahip olduğu için istenilen denetim stratejisine ulaşabilmek amacıyla yaklaşık çıkarımlarda bulunur. Son olarak berraklaştırma birimi ise gelen bulanık bilgileri berraklaştırarak sistemin tanıyabileceği bir değerde çıkış vermesine olanak sağlar [62].

4.3.1.1. Bulanıklaştırma (Fuzzification)

Bulanıklaştırma, BM kontrolcünün ilk aşamasıdır. Bulanıklaştırma işleminde, sistemden kesin olan giriş değişkenlerinin $[0,1]$ Aralığında üyelik derecesine dönüştürülerek bulanıklaştırma yapılır. Bulanıklaştırma işleminin verimli çalışması için farklı şekillerde (üçgen, yamuk, sigmoidal, vs.) bulanık küme fonksiyonları seçilmektedir. Örnek olarak şekil 4.16’da grafiğin altında olan kilolar ile bulanıklaştırma yapılmıştır. Şekil 4.16’da gösterildiği gibi zayıf, normal, şişman olmak üzere bulanıklaştırma işlemi yapılabilmektedir [61,63].



Şekil 4.16. İnsan kilosunun bulanık üyelik fonksiyonlarla ifade edilmesi

85 kg normal kilo olarak kabul edilmiştir. 70 kg ise hem zayıf üyelik fonksiyonu hem de normal üyelik fonksiyonu içinde yer almaktadır. Tüm sisteme bakıldığı zaman, tüm değerler eşit ve 1 ile ifade edilmektedir.

4.3.1.2. Bilgi tabanı

Bilgi tabanı, kural tabanı ve veri tabanı olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Kural tabanı, dilsel denetim kurallarının yer aldığı bölümdür. Veri tabanı ise kural tabanının giriş ve çıkış değerlerini birbirine eşleyen bölümdür. Denetim hedeflerini ve denetim stratejisini kurallar kümesi belirlemektedir. Bulandırma, durulama yapılan bir sistemin gerekli olan üyelik işlevleri ve kuralları veri tabanından alınır. Giriş ve çıkış arasındaki bağıntı, kurallar tabanındaki kurallar vasıtasıyla yapılır [62].

M ve N girişler, L ise çıktı olan bir sistemde:

$$\text{EĞER } M = x \text{ ve } N=y \text{ ise O HALDE } L=z$$

Şeklinde ifade edilen kuralda, M ve N değişkenlerine bağlı olarak L bulanık değer çıktı olarak çıkacaktır.

4.3.1.3. Karar verme birimi

Karar verme birimi BM kontrolcünün merkezi kısmıdır. Bu kısımda taklit edilen sistem, insan beynidir. Kısaca ifade etmek gerekirse insan beyninin bir benzetimi yapılmaya çalışılmıştır [63,64].

Birden fazla bulanık içerme işlevi vardır. “EĞER $x=M$ O HALDE $y=N$ ” şeklinde ifade edilen M ve N sırasıyla U, V uzaylarında tanımlanmış bulanık kümedir. μ_M ve μ_N üyelik işlevleridir. Aşağıda 5 farklı bulanık içerme işlevi verilmiştir.

1. $M \rightarrow N = (M \text{ değil}) + N$
2. $M \rightarrow N = (M \text{ değil}) + (M * N)$
3. $M \rightarrow N = (M \text{ değil} * N \text{ DEĞİL}) + N$
4. $M \rightarrow N = \sup \{c \in [0,1], M * D \leq N\}$ ileri veri sürümü çıkarım
5. $M \rightarrow N = \inf \{t \in [0,1], N+1 \leq M\}$ geri çıkarım

En çok kullanılan metodlar Mamdani, Takagi-Sugeno-Kang, Larsen ve Tsukamoto yöntemleridir [64].

Mamdani için uygulanacak olan bağıntı işlemi “ve” (\wedge) bağıntı formülü eşitlik 4.16’da verilmiştir.

$$R_c = MXN = \int_{UXV}^+ \mu_M(U) \cap \mu_N(U) / (U, V) \quad (4.16)$$

Larsen modeli için uygulanacak olan bağıntı işlemi çarpma (.) işlemidir. Bağıntı formülü 4.17'de verilmiştir.

$$R_p = MXN = \int_{UXV} \mu_M(U) \cdot \mu_N(U) / (U, V) \quad (4.17)$$

Takagi-Sugeno-Kang modelinin özel hali, ANFIS yapısının temelini oluşturmaktadır. Tez çalışmasında kullanılan bu model ilerleyen bölümlerde detaylıca açıklanacaktır.

Tsukamoto modelinde üyelik işlevleri, tek yönlü yükselen bir işlev olarak seçilir. Her kuralın keskin çıkış değerinin ağırlık ortalaması bulunarak çıkış değeri bulunur [64].

4.3.1.4. Berraklaştırma (Defuzzification)

Berraklaştırma, literatürde durulama, netleştirme gibi farklı isimlerde kullanılmaktadır. Berraklaştırma, bulandırma işleminin tersi olarak da ifade edilebilir. Berraklaştırma işlemi, bulanık işlemler sonucunda çıkan bulanık çıkarım sonuçlarını, fiziksel bir sistemde kullanmak için kesin bir değere dönüştürme işlemidir [63].

Farklı berraklaştırma yöntemleri uygulamada kullanılmaktadır. Tasarlanan sistemin performansı iyi olabilmesi için berraklaştırma yöntemini uygun seçmek gerekmektedir.

En çok kullanılan berraklaştırma yöntemleri:

- Maksimum ölçüt,
- Maksimum üyelik,
- Ağırlık ortalaması,
- Ağırlık merkezi gibi yöntemler kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında kullanılan yöntem ortalama değer yöntemidir. ANFIS, tek çıkışlı özel bir bulanık sistemi olduğundan dolayı bu yöntem kullanılır.

Maksimum üyelik yöntemi:

Literatürde yükseklik yöntemi olarak da isimlendirilmektedir. Bu yöntem de bulanık değeri en büyük olan değer alınır.

Ağırlık merkezi yöntemi:

En yaygın kullanılan yöntemdir. Bağıntı eğrisinin altında yer alan ağırlık merkezinin bulunması yöntemidir.

Ağırlık ortalaması yöntemi:

Girişlerden alınan tüm bulanık değerler ile üyelik değeri kullanılarak berraklaştırma yapılmaktadır.

Maksimum ölçüt yöntemi:

En yüksek bağıntı sonucuna ait değerler arasından rastgele bir seçim yapılması yöntemidir.

4.3.2. BMD'nin avantajları ve dezavantajları

BMD'nin, klasik mantık kontrolcülerine göre birtakım avantajları olduğu gibi dezavantajları da vardır. BMD'nin avantaj ve dezavantajları aşağıda sıralanmıştır.

Avantajları:

- Bulanık mantık kuramı, insan düşünce tarzına çok benzemektedir. Hava kısmen güneşli, biraz daha uzun, hafif şişman gibi örnekler verilebilir. Klasik mantıktan ayıran en büyük özelliği insan düşünce şekline benzemesidir.
- Bulanık mantık kontrolcü matematiksel modele ihtiyaç duymaz.
- Daha küçük bir yazılımla çok daha hızlı sonuca ulaşır.
- Bulanık mantık, kullanıcının giriş olanağı sağlayıp kullanıcının deneyiminden yararlanmaktadır.

Dezavantajları:

- Üyelik işlevleri ve bulanık mantık kuralları uzman kişi tarafından yapılması gerekmektedir.

- Kesin sonuç veren üyelik işlevleri yoktur. Bundan dolayı deneme-yanılma yolu kullanılarak en iyi sonuç elde edilmeye çalışılır. Bu sebeple sistem cevabı uzun zaman alabilir.
- Sistemlerde denetlenebilirlik, gözlemlenebilirlik ve kararlılık için ispatlanmış bir yöntem söz konusu değildir. Bu bulanık mantık için en temel sorundur.
- Her sistemin üyelik işlevi, o sisteme bağlıdır. Başka sistemlere uyarlanması oldukça zordur.
- Üyelik işlevlerinin ayarlanması, öğrenme yeteneğinin olmamasından dolayı uzun sürmektedir.

4.3.3. Adaptif sinir ağına dayalı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS)

ANFIS, özgün adı “Adaptive Neuro Fuzzy Inference System” olarak geçmektedir [65]. ANFIS, bulanık mantık kurallarının YSA ile beraber kullanıma sunulan uyarmalı bir ağ yapısıdır. Burada öğrenme, YSA öğrenme yöntemleri ile yapılır. ANFIS, 5 temel katmandan oluşmaktadır. Her katmanın kendi içinde birtakım kuralları mevcuttur. Her katmanın ortak görevi, çıkıştaki hata seviyesini en düşük hale getirmektir. Yapısal olarak bakıldığında zaman ANFIS düğümlerden oluşmaktadır. Düğümler de birbirine linkler sayesinde bağlıdır. ANFIS, temelinde Takagi-Sugeno-Kang bulanık çıkarım modeli vardır. ANFIS’in en temel üstünlükleri şunlardır:

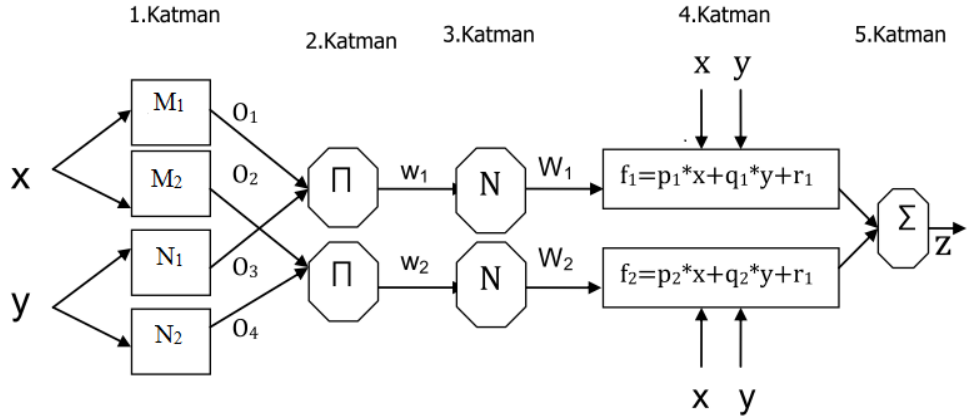
- Öğrenme yeteneği,
- Paralel işlem,
- Yapılandırılmış bilgi temsili,
- Diğer denetim tasarım yöntemleriyle daha iyi bütünleşme.

ANFIS’in çalışma prensibini daha iyi tanımlayabilmek için iki girişi olan ve iki kurala dayanan bir sistemden faydalanabilir. Giriş değerleri olarak x , y seçilmiştir. f ise çıkış olacak şekilde kabul edilmiştir. Aşağıda sisteme ait oluşturulan kurallar verilmiştir.

$$\text{KURAL 1: EĞER } x = M_1 \text{ ve } y = N_1 \text{ O HALDE } f_1 = p_1x + q_1y + r_1 \quad (4.18)$$

$$\text{KURAL 2: EĞER } x = M_2 \text{ ve } y = N_2 \text{ O HALDE } f_2 = p_2x + q_2y + r_2 \quad (4.19)$$

Şeklinde ifade edilen giriş ve kuralı olan ANFIS mimarisi şekil 4.17’de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. İki girişli ve iki kurallı olan ANFIS mimarisi

ANFIS mimarisinin çalışma prensibi, çıkış değerlerinin nasıl oluşturulduğu ve eğitimin nasıl olduğu Jang tarafından anlatılmıştır [66]. ANFIS modelinde yer alan katmanlar aşağıda detaylandırılmıştır.

Katman 1:

Eşitlik 4.20’de verilen genelleştirilmiş çan fonksiyonu gibi herhangi bir uygun parametrelerle ifade edilmiş üyelik fonksiyonunu kullanarak öncül sinyallere dayalı dil etiketlerinin üyelik derecelerini oluşturan uyarlanabilir düğümlerden oluşur.

$$O_i^1 = \mu_{M_i}(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c_i}{a_i} \right|^{2b_i}} \quad (4.20)$$

Burada O_i^1 çıktısı, birinci katmandaki i düğümünün çıktısı, x ise i düğümünün girdisidir. M_i düğümle ilişkili olan bulanık $M = (M_1, M_2, N_1, N_2)$ kümesinden bir dil etiketidir ve (M_i, N_i) üyelik işlevinin şeklini ayarlamak için kullanılan öncül, parametre kümesidir.

Katman 2:

Her kuralın ateşleme gücünü temsil eden Π ile gösterilen sabit düğümlerdir. Her düğümün çıktısı, tüm giriş sinyallerinin bulanık VE (çarpım veya MİN) değeridir.

$$O_i^2 = w_i = \mu_{M_i}(x)\mu_{N_i}(y) \quad i = 1, 2 \quad (4.21)$$

Katman 3:

Çıktılar, normalleştirilmiş ateşleme güçleridir. Her düğüm, N etiketli sabit bir kuraldır. i^{th} düğümün çıktısı, i^{th} . kuralın ateşleme gücünün tüm kuralların ateşleme kuvvetlerinin toplamına oranıdır.

$$O_i^3 = W_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i = 1, 2 \quad (4.22)$$

Katman 4:

Bu katmandaki i düğümü, aşağıdaki düğüm işlevi ile i^{th} kuralının genel çıktıya katkısını hesaplar.

$$O_i^4 = W_i f_i = W_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (4.23)$$

Burada W_i , 3'cü katmanın çıktısıdır ve $\{p_i, q_i, r_i\}$ parametre kümesidir. Bu katmandaki parametrelere, sonuçtaki parametreler adı verilir.

Katman 5:

Bu katmandaki tek düğüm, genel çıktıyı her kuralın katkısının toplamı olarak hesaplar

$$O_1^5 = \sum_i W_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (4.24)$$

Yukarda bahsedilen (1-5) katmanlar, ANFIS modelinin genel yapısıdır. Bu yapı, kullanıcı tarafından istenildiği zaman değiştirilebilir. ANFIS modelinde en çok kullanılan yapılar Sugeno ve Tsukamoto yapılarıdır [64].

Bu tez çalışmamızda Sugeno tipi ANFIS yapısı kullanılarak öğrenme işlemi gerçekleştirilmiştir.

4.3.4. BMD'nin uygulama alanları

Gelişen teknoloji ile beraber yapay zekâ üzerinde olan çalışmalar da günden güne artmaktadır. BMD'de teknolojinin gelişiminde önemli bir yere sahiptir. Öyle ki bu kontrolcüye ait ilk uygulamalar, 1980 yılında endüstriyel alanda başlamış, ardından 1983 yılında su arıtma sistemlerinde kullanılmıştır. Daha sonraki yıllarda BMD'ler;

fotoğraf makinelerinde, ev aletlerinde, hasta izleme uzman sistemlerine kadar birçok alanda kullanılmaya başlamıştır [62] Tablo 4.6’da bulanık mantık kontrolcüne ait uygulama alanları ve üretici firmalar verilmiştir.

Tablo 4.6. Bulanık mantık kontrolcünün uygulama alanları

UYGULAMA ALANI	MARKA	İŞLEVİ
Çelik Endüstrisi	Nippon-Steel	Geleneksel kontrolcünün yerini alır.
Çimento Sanayi	Mitsubishi-Chen	Değirmende ısı ve oksijen oranı denetimi yapar.
Asansör Denetimi	Fujitech, Toshiba, Mitsubishi	Yolcu trafiğini değerlendirir, böylece bekleme zamanı azalır.
SLR Fotoğraf Makinesi	Sanyo-Fisher, Canon, Minolta	Ekranında birkaç obje olması durumunda en iyi focusu ve aydınlatmayı belirler.
Çamaşır Makinesi	Matsushita	Çamaşır kirliliğini, ağırlığını kumaş cinsini sezer ve ona göre yıkama programını seçer.
Elektrik Süpürgesi	Matsushita	Yerin durumunu ve kirliliğini sezer ve motor gücünü uygun bir şekilde ayarlar.
Televizyon	Sony	Ekran kontrastını, parlaklık ve rengini ayarlar.
ABS Fren Sistemi	Nissan	Tekerleklerin kilitlemeden frenlenmesini sağlar.

BÖLÜM 5

RÜZGÂR TÜRBİN SİSTEMİNDE KULLANILAN DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

Teknolojinin gelişmesiyle beraber güç elektroniği sistemlerinde gelişmeler olmuştur. Güç elektroniğinin gelişmesi aynı zamanda maliyetleri de düşürmüştür. Maliyetlerin düşmesi ve güç elektroniğinin gelişmesi rüzgâr türbin sistemlerinde farklı tür dönüştürücüler kullanılmasına olanak sağlamıştır. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan veya kullanılabilecek dönüştürücüler:

- Matris dönüştürücüler
- Tandem dönüştürücüler
- Çok katlı dönüştürücüler
- Rezonans dönüştürücüler
- Ardışık dönüştürücüler

Olarak ifade edilmektedir.

5.1. Matris Dönüştürücüler

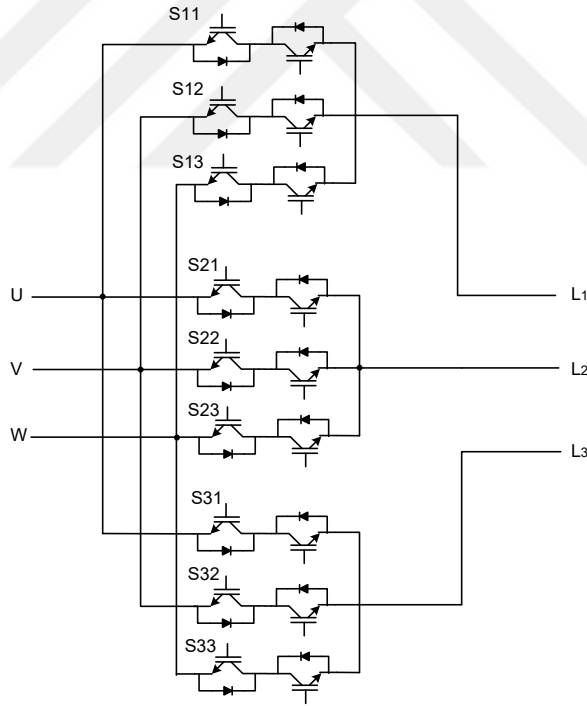
Matris dönüştürücüler Alternatif Akım (AA)'dan AA'ya doğrudan çevirim yapan bir dönüştürücüdür. Dönüştürücüde ki temel amaç, farklı anahtarlama teknikleri kullanarak kaynaktan istenen frekansta gerilim elde etmektir. Matris dönüştürücü yapısında 9 adet çift yönlü anahtar bulundurur [67]. Matris dönüştürücüde kullanılan anahtarlama teknikleri temel olarak: Uzay Vektör, Venturini, Mind-Mid-Max, Ölçekli olarak 4 farklı algoritmadan oluşmaktadır [67]. Anahtarlama yapılırken dönüştürücüyü güvende tutmak için çıkış ayağındaki iki ya da üç anahtarın aynı anda açık olmasına izin verilmemektedir. Dönüştürücünün çıkışındaki gerilim sınırlıdır [68]. Dönüştürücünün çıkış gerilimi, giriş geriliminin 0,866 katıdır. Dönüştürücünün anahtarlama kombinasyonu modülasyon izlemine bağlıdır [69,71]. DA barada kondansatör olmaması, bu dönüştürücünün güvenilirliğinin artmasına, boyutun küçülmesine ve ağırlığın azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca kondansatör olmaması dönüştürücünün de verimini artırmaktadır [69].

Sistemde kondansatör olmaması verimi, artırırken oluşan dezavantaj ise giriş ve çıkışın birleşmesidir [69]. Giriş ve çıkışın birleşmesi girişte oluşan dalgalanmaların çıkışa direkt yansımalarıdır.

Matris dönüştürücünün avantajları şu şekilde sıralanabilir [71]:

- Çift yönlü anahtar kullanıldığı için şebekeye enerji geri dönüşümü yapabilmektedir.
- Şebekeden sinüzoidal giriş akımları çekilmektedir.
- Enerji depolamak için kondansatör ve bobin kullanılmadığı için boyut olarak küçüktür.
- Herhangi bir genlik ve frekansa sahip yük gerilimi üretebilmektedir

Şekil 5.1’de matris dönüştürücü devre yapısı verilmiştir.



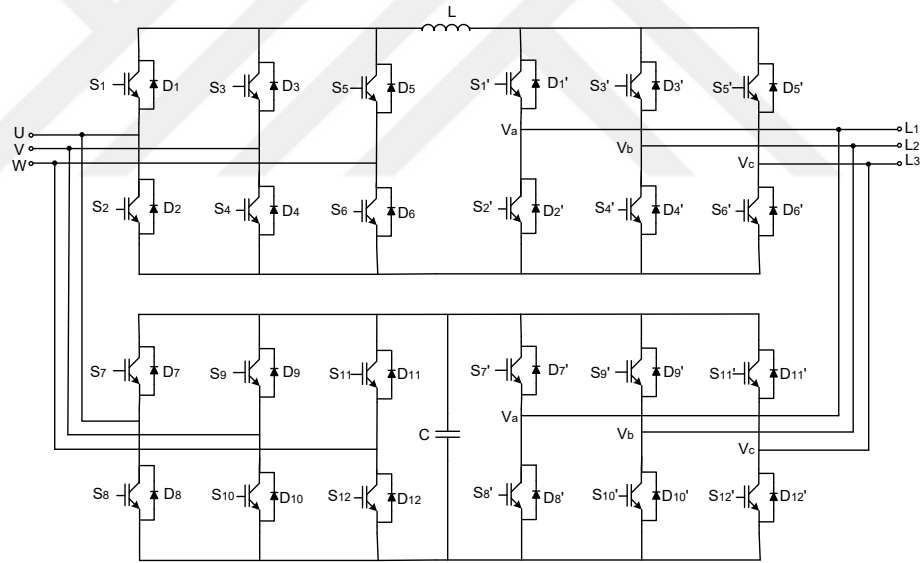
Şekil 5.1. Matris Dönüştürücü Devre Yapısı

5.2. Tandem Dönüştürücüler

Tandem dönüştürücü yeni geliştirilmiş bir frekans dönüştürücü topolojisidir [72]. Bu dönüştürücünün amacı; aktif bir filtre kullanarak iki yönlü frekans dönüştürücüsünde

meydana gelen harmonik bozulmaları telafi etmektir [69,73]. Tandem dönüştürücü; birincil dönüştürücü olarak adlandırılan bir akım kaynağı dönüştürücüsü (CSI) ve ikincil dönüştürücü olarak adlandırılan gerilim kaynaklı dönüştürücü (VSI)'den oluşur. Birincil dönüştürücü olarak CSI tercih edilmesi sonucunda şebeke geriliminin sadece %0,866'sı kullanılabilir. Tandem dönüştürücüde faz kayma akımı; CSI ile yapılırken akım büyüklüğü, VSI ile kontrol edilir [72].

Anahtarlama elemanı toplamda on iki tanedir [68]. Tandem dönüştürücülerde anahtarlama elemanı fazla olduğu için maliyet yüksek ve kontrol karmaşıktır[72]. Generatör uçları arasından elde edilen gerilim ikincil dönüştürücü tarafından ayarlanmasından dolayı dönüştürücüdeki gerilim stresleri yüksektir. Bu sebeple filtreye ihtiyaç duyulmaktadır [72]. Yeni bir topoloji olduğu için üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Şekil 5.2'de Tandem dönüştürücünün devre yapısı verilmiştir.

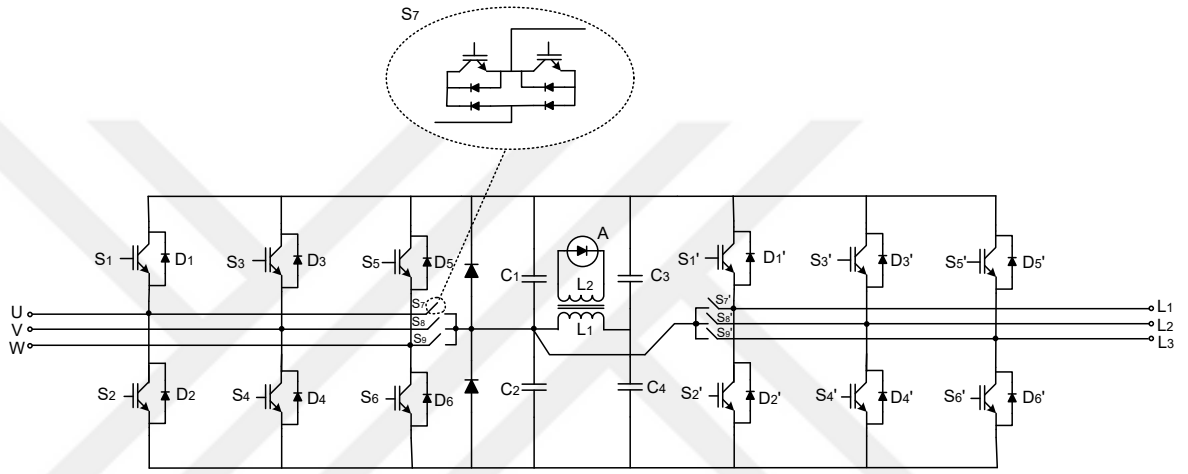


Şekil 5.2. Tandem Dönüştürücü Devre Yapısı

5.3. Rezonans Dönüştürücüler

Dönüştürücülerdeki anahtarlama kayıplarını azaltmaya yönelik yapılan çalışmalarda birkaç rezonans dönüştürücü topolojisi önerilmiştir [72]. Bu dönüştürücü topolojilerinin ortak dezavantajları; karmaşık donanım yapısı, karmaşık denetim, rezonans devresinden yüksek güç akışı ve DC bağlantısında yük boyunca yüksek tepe voltajı olmasıdır [72].

Şekil 5.3’de verilen “Doğal kenetlemeli dönüştürücü” bahsedilen dezavantajları barındırmayan bir topoloji örneğidir. Doğal kenetlemeli dönüştürücü; geleneksel ardışık dönüştürücülerden ve rezonansı elde etmek için ek bir devreden oluşur [72]. Rezonans devresinde kullanılan anahtarlar, iki yönlü anahtarlardır [72]. Dönüştürücünün verimi yüksek ve anahtarlama kayıpları düşüktür [69,73]. Dönüştürücünün en büyük avantajı ise bütün dönüştürücüde sadece bir rezonans devresi bulundurmasıdır. Şekil 5.3’de Rezonans dönüştürücü devresi verilmiştir.

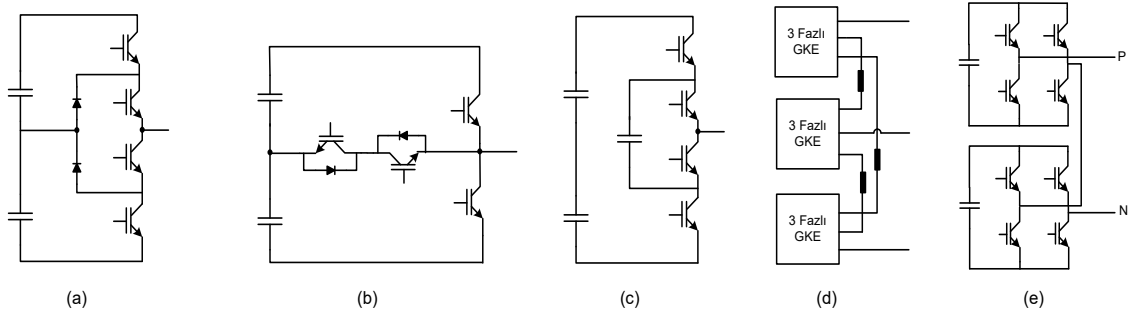


Şekil 5.3. Rezonans Dönüştürücü Devre Yapısı

5.4. Çok Seviyeli Dönüştürücüler

Çok seviyeli dönüştürücü teknolojisinin amacı; kondansatörleri farklı seviyelerde gerilim kaynağı olarak kullanıp sinüzoidal gerilim oluşturmaktır. Çok seviyeli dönüştürücüler; diğer dönüştürücülere göre yüksek gerilim sağlayabilen ve filtreler daha az ihtiyaç duyan dönüştürücülerdir [71,73].

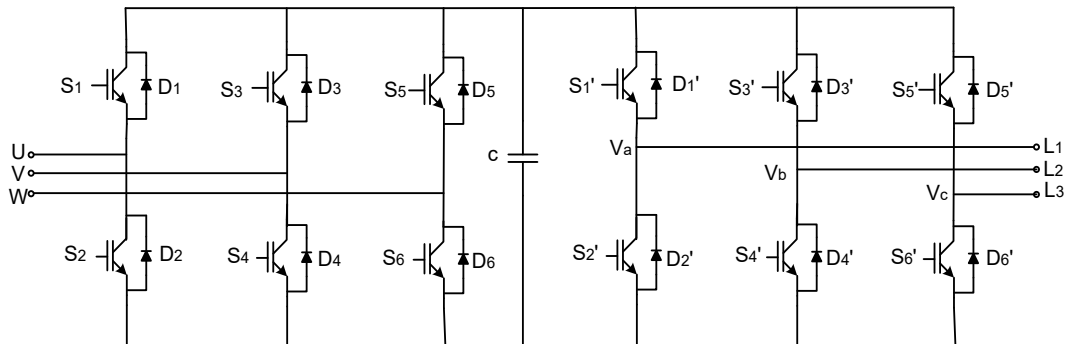
Çok seviyeli dönüştürücü; kondansatörlü, iki yönlü ara anahtarlı, diyot kenetlemeli, kaskad tek fazlı H köprü evircili ve çok sayıda iki seviye üç fazlı gerilim beslemeli dönüştürücü bağlı olmak üzere beş farklı yapıda incenebilir. Şekil 5.4’de bu topolojilerin devre yapıları, bir evirci ayağı olarak gösterilmiştir [69,73].



Şekil 5.4. Çok seviyeli dönüştürücünün bir evirici ayağının devreleri(a) Üç seviye diyot kenetlemeli, (b) İki yönlü ara anahtarlamalı, (c) Kondansatörlü, (d) Üç fazlı iki katlı gerilim kaynaklı eviricilerden oluşan, (e) H köprü eviricili

5.5. Ardışık Dönüştürücüler

Rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatörler şebekeye enerji aktarabilmesi için sabit hızda çalıştırılmaktadır. Bunun nedeni şebeke frekansı ile çıkış frekansını dengede tutmaktır [35]. Fakat değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde elde edilecek olan enerji daha büyük olacağından, generatör frekansını şebekeye senkronize etmek gerekmektedir. Bundan dolayı senkronize işlemi için ardışık dönüştürücüler kullanılır [35]. Ardışık dönüştürücüler; birbirine zıt, zorlamalı komütasyonlu iki tane 3 faz gerilim beslemeli dönüştürücülerden oluşmaktadır [35]. Şekil 5.5’de ardışık dönüştürücü devre yapısı verilmiştir [68].



Şekil 5.5. Ardışık Dönüştürücü Devre Yapısı

Ardışık dönüştürücülerin en temel özellikleri; şebekeden reaktif güç çekmemesi ve enerji akışını hızlı kontrol edebilmesidir [35]. Çıkış gerilim seviyesi genelde 380V-690V olduğundan çoğunlukla yükseltici bir transformatör kullanılır [68]. Piyasada kabul görmüş bir dönüştürücü olduğu için diğer dönüştürücü türlerine göre fiyatı

düşüktür [68]. Ardışık dönüştürücüler çift yönlü bir frekans dönüştürücüsüdür [68]. Ayrıca en çok kullanılan frekans dönüştürücüdür.

Generatör ve şebeke arasında bir kondansatör bulunur. Bu kondansatörden dolayı generatör tarafı ve şebeke tarafının ayrı ayrı kontrol edilmesi sağlanır [68]. Kullanılan kondansatörün hacmi büyük olduğundan, maliyeti arttırdığı gibi ömrünü azaltmaktadır [69,73]. Ardışık dönüştürücünün yapısını; generatör tarafı dönüştürücü ve şebeke tarafı dönüştürücü olmak üzere iki farklı grupta incelenmek mümkündür [35].

Generatör tarafındaki dönüştürücü (GTD); Generatörden aldığı AA/DA çevirerek doğrultturucu olarak çalışır. GTD; değişkenlik gösteren rüzgâr hızlarından maksimum güç elde etmek için rotorun hızını kontrol eder [36,69].

Şebeke tarafındaki dönüştürücü (ŞTD); DA barasından gelen DA/AA çevirerek evirici olarak çalışır. ŞTD'nin amacı DA bara gerilimini sabit tutmaktır. Ayrıca ŞTD, şebekeye verilen aktif ve reaktif gücü kontrol eder [36, 69]

5.6. Gerilim Kaynaklı Evirici

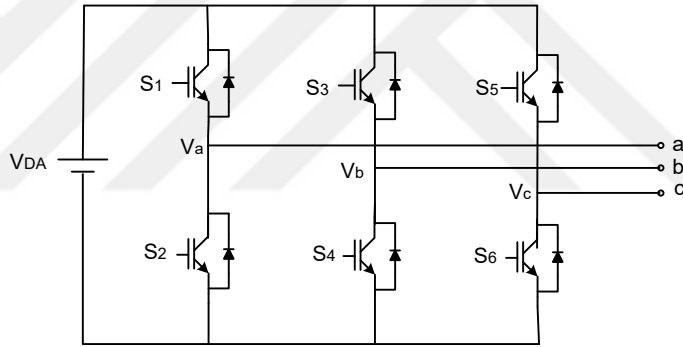
Eviriciler çıkış dalga şekillerine göre; gerilim kaynaklı evirici ve akım kaynaklı evirici olmak üzere iki gruba ayrılır [73]. Eviriciler çıkış gerilimine göre; tek fazlı ve üç fazlı evirici olarak tasarlanır. Eviriciler seviyelerine göre; iki seviyeli, üç seviyeli ve çok seviyeli olabilmektedir.

Eviricileri kullanmaktaki temel amaç çıkışından az seviyeli harmonikler elde etmektir. Çünkü güç kalitesi için en büyük problem, elektrik sistemlerindeki harmonik içeriklerdir. Gerilim ve akım kaynaklı evirici harmonikleri; güç kaybına, EMI' ye ve AA motor sürücülerinde darbeleri torkun oluşmasına sebep olmaktadır.

Eviricilerler de, IGBT (izole edilmiş kapılı, iki kutuplu transistör), MOSFET (metal oksit yarı iletken alan etkili transistör), Transistör, Tristör, GTO (kapıdan kesmeli tristör) gibi anahtarlar kullanılır. Ayrıca Mosfet; anahtarlamasının hızlı olmasından dolayı yüksek frekans uygulamalarında kullanılmaktadır. Transistör ve Mosfet daha çok düşük ve orta güç çalışmalarında kullanılır. GTO ve Tristör ise anahtarlama hızları düşük olmasından dolayı büyük güçlerde kullanılmaktadır.

IGBT ise günümüzde en çok kullanılan devre elemanıdır. IGBT, Mosfetin iyi karakteristiklerini almış, kötü karakteristiklerini bırakmıştır; Transistörün de iyi karakteristiklerini almış kötü karakteristiklerini bırakmıştır. Gate yani giriş kısmı, Mosfete benzediği için bu devre elemanı gerilimle kontrol edilir. Dolayısıyla Mosfet için kullanılan sürücü devresi burada da kullanılmaktadır. Günümüzde neredeyse tüm eviricilerde IGBT kullanılmaktadır [74].

İki seviyeli eviriciler; Yapılarının basit olması ve sistemi dengede tutmalarından dolayı evirici devrelerinin anahtarlamasında kullanılmaktadır. Toplamda altı adet anahtarlama elemanından oluşmaktadır. Anahtarlama elemanı olarak genellikle, IGBTMOSFET kullanılır. Toplam Harmonik Bozulma (THD) değerini düşürmek için farklı anahtarlama teknikleri ve kontrol sistemleri kullanılmaktadır [73]. Şekil 5.6'da üç fazlı iki seviyeli evirici devresi verilmiştir.



Şekil 5.6. Üç fazlı iki seviyeli evirici devresi

Üç fazlı iki seviyeli gerilim kaynaklı eviricilerde darbe genişlik modülasyon (DGM) teknikleri kullanım amacına göre farklılık gösterir.. DGM tekniklerinde, eviricinin DA link gerilimi sabit ve dalgalanmanın olmadığı kabul edilmelidir. Kullanılan başlıca DGM teknikleri aşağıda verilmiştir [75].

Kullanılan başlıca DGM teknikleri;

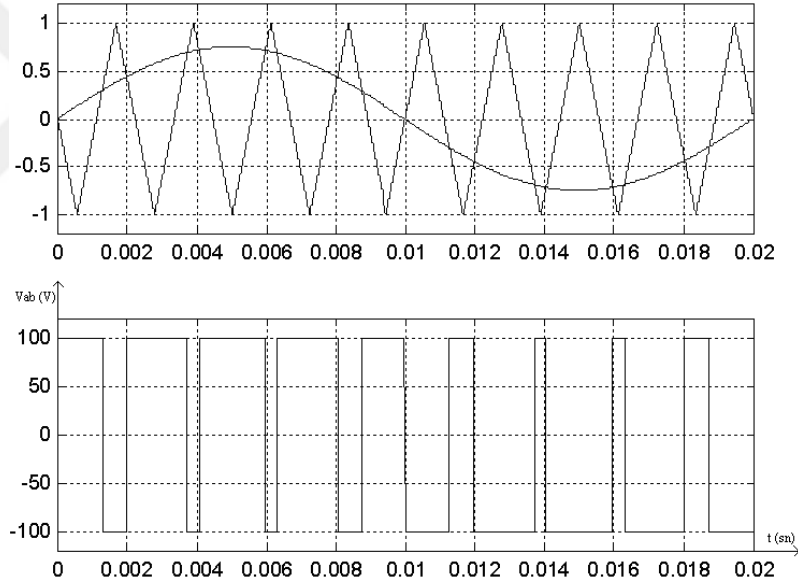
- 1-) Sinüzoidal DGM (SDGM)
- 2-) Üçüncü Harmonik İlaveli DGM(UHIDGM)
- 3-) Sigma Delta Modülasyon
- 4-) Uzay Vektör DGM (UVDGM)

5.6.1. Sinüzoidal DGM

Bu teknik endüstriyel çeviriciler için oldukça popüler bir yöntemdir. Referans ve taşıyıcı dalgalar karşılaştırılır ve anahtarlama zamanları için kesişme noktaları belirlenir.

Referans işareti, V_p genlikli ve f_m frekanslı sinüs dalgadır. Eviricinin çıkış frekansı da sinüs işaretinin frekansı olan f_m 'dir. Taşıyıcı işaret, V_{tri} genlikli ve f_c frekanslı üçgen dalgadır. Bu da aynı zamanda eviricinin anahtarlama frekansını oluşturur Şekil 5.7'de tek faz için iki seviyeli DGM gösterilmiştir.

3 fazlı bir sistemde her bir faz için aynı taşıyıcı dalga kullanılır. Referans işaretinin taşıyıcı işareten büyük olduğu durumda üst anahtarlar ilettime geçer, aksi durumda alt anahtarlar ilettime geçer.



Şekil 5.7. İki Seviyeli Sinüzoidal DGM

Sinüzoidal DGM'de; modülasyon dalgasının genliğinin taşıyıcı dalganın genliğine oranına M_a (modülasyon indeksi) denilir. Bu oran 0 ile 1 arasında değişen bir değer aralığında ise modülasyon ve çıkış dalgası arasındaki ilişki lineer olur. Modülasyon indeksi denklem 5.1'de verilmiştir.

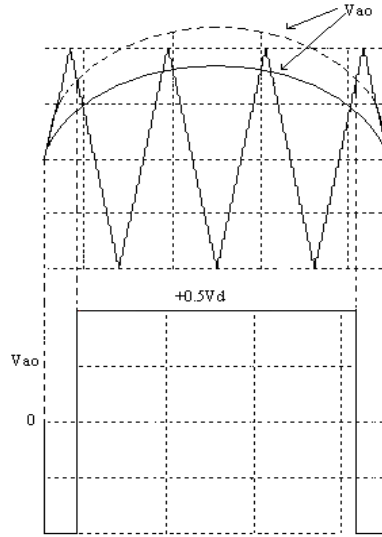
$$M_a = \frac{\hat{V}_p}{\hat{V}_{tri}} \quad (5.1)$$

$M_a=1$ olduğu durumda, ana harmoniğin maksimum tepe değeri $0.5V_d$ 'dir. Buda kare dalga çalışmadaki tepe geriliminin $(4V_d/2\pi)$ %78,55'ine karşılık gelir.

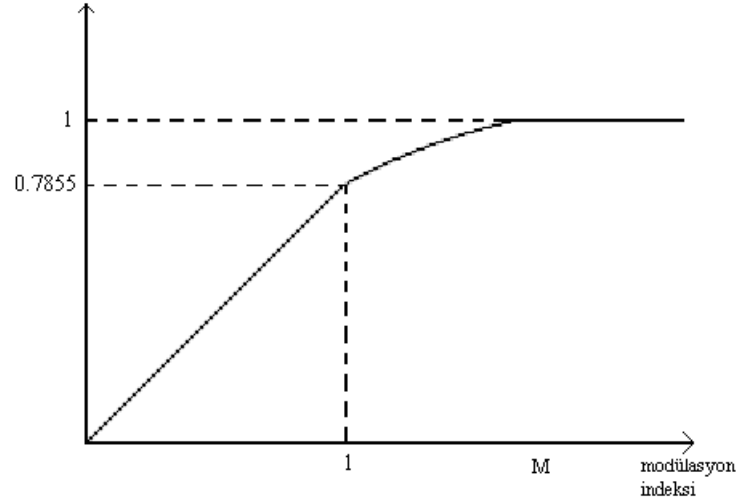
$M_a=0$ olduğu durumda, V_{a0} taşıyıcı frekansında simetrik darbeleri ve çentik genişlikli kare dalgadır.

$M_a > 1$ olduğu durumuna aşırı modülasyon denilir. M_a , 1'e yaklaştıkça çentik ve darbe genişlikleri pozitif ve negatif yarı periyotların ortasına yaklaşır ve sırayla kaybolur. Elemanların anahtarlama çalışmasını sürdürebilmesi için, minimum çentik ve darbe genişlikleri korunmalıdır. Eğer bunların sayısı azalırsa bu durumda yük akımında geçici bir yükselme olacaktır. Bu yükselme IGBT'ler için küçük olsa da GTO'ların daha küçük anahtarlama frekanslarında çalışmaları nedeniyle yüksek olacaktır.

Aşırı modülasyonda evirici çıkışında daha önce olmayan harmonikler ortaya çıkar. $M_a=1$ değerine ulaşınca kadar lineer bir değişim varken bu değerden sonra artık lineerlik ortadan kalkar ve kare dalga ortaya çıkar. Şekil 5.8 ve Şekil 5.9 bu durumu pozitif yarı periyot için göstermektedir.



Şekil 5.8. Aşırı Modülasyon Bölgesinde oluşan Kare Dalga Sekli



Şekil 5.9. Sinüzoidal DGM'in Aşırı Modülasyon Bölgesindeki Çıkış Transfer Karakteristiği

Çok seviyeli eviricilere uygulanan sinüzoidal DGM tekniği biraz daha gelişmiş bir durumdadır. Referans işareti aynı kalırken taşıyıcı işaretin sayısı gerilimin seviyesine bağlı olarak değişir. M seviyeli bir evirici için (M-1) tane taşıyıcı işaret kullanılır. Bunların genlikleri ve frekansları aynıdır. Örneğin 3 seviyeli evirici için iki taşıyıcı dalga, 4 seviyeli evirici için üç taşıyıcı dalga kullanılır. Buna göre modülasyon indeksi denklem 5.2'de verilmiştir.

$$M_a = \frac{\hat{V}_p}{(m-1)\hat{V}_{tri}} \text{ Olur.} \quad (5.2)$$

5.6.2. Uzak Vektör DGM

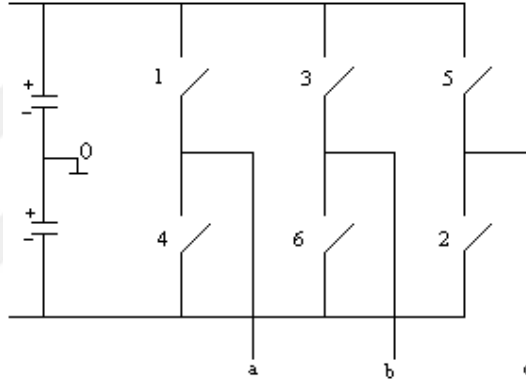
Değişken hızlı AA motor sürücülerinde bir evirici çoğunlukla, sabit bir DA gerilimden bir AA çıkış gerilimi üretmek için kullanılır. AA gerilim iki değerle tanımlanır. Bunlar genlik ve frekanstır. Bunların her ikisi üzerinde kontrolün mümkün olması temel bir çözümdür. Uzak vektörle, geleneksel analog tekniklerin dijital olarak gerçekleştirilmesi vasıtasıyla temel bir dijital modülasyon tekniği oluşturulmuştur. Uzak vektör darbe genişlik modülasyonu durağan referans çatısındaki gerilimin uzak vektörü olarak ifade edilmesine dayanır [76]. Bir uzak vektör denklem 5.3'de ifade edilmiştir.

$$V = \frac{2}{3}(V_{an} + V_{bn}\bar{a} + V_{cn}\bar{a}^2) \quad (5.3)$$

denklem 5.3'de yer alan \bar{a} ifadesinin eşiti denklem 5.4'de verilmiştir.

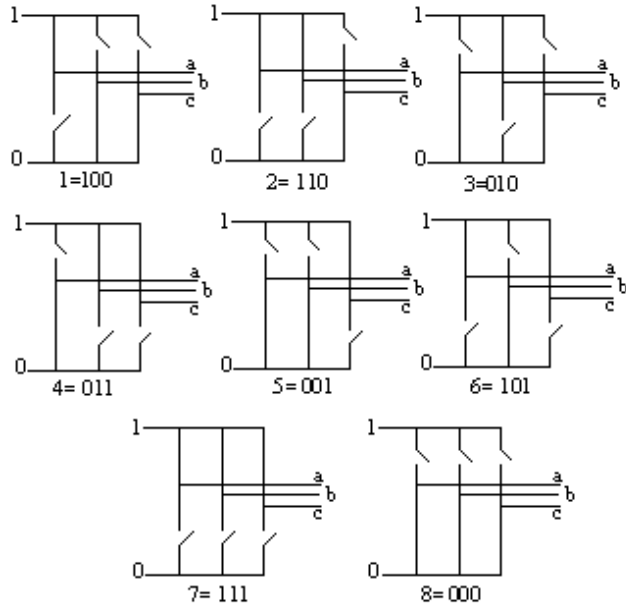
$$\bar{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (5.4)$$

V_{an} , V_{bn} , V_{cn} , 3-fazlı sistemin nötr noktasına göre faz gerilimleridir. Böylece iki boyutlu düzlem veya karmaşık sayı herhangi bir 3 fazlı gerilime benzetilebilir. Eviricinin yapısı Şekil 5.10'da gösterildiği gibidir. 3 fazlı 2 seviyeli uzay vektör DGM evirici için anahtarlama durumları şekil 5.11'de gösterilmektedir. Burada 8 anahtarlama durumu söz konusudur. Evirici çıkışı gerilimi de bu 8 anahtarlama durumunun birleşmesinden meydana gelir. 1...-6 vektörlerinin uzunlukları birim uzunlukta ve 7-8 vektörlerinin uzunlukları 0'dır. Gerilim vektör uzayı 6 bölgeye ayrılır.



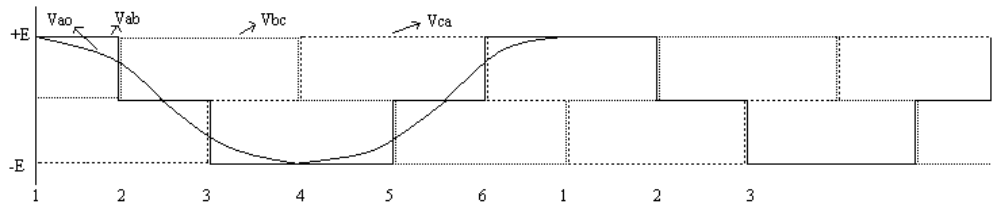
Şekil 5.10. Uzay Vektör DGM Devre Yapısı

Evirici çıkışı (a, b, c) $+E_d/2$ olduğu zaman 1 ile gösterilmekte, $-E_d/2$ olduğu zamanda 0 ile gösterilmektedir.



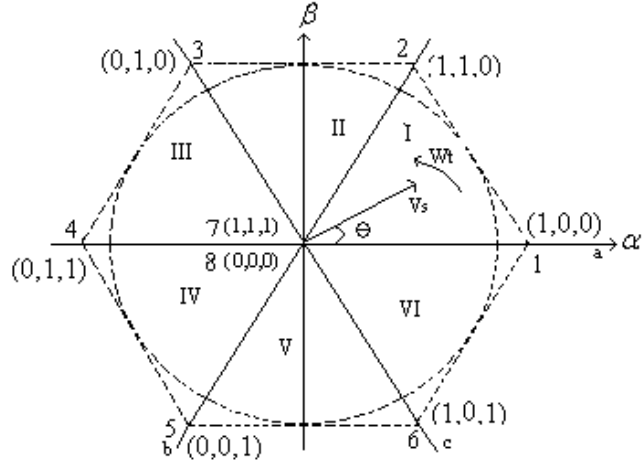
Şekil 5.11. Sekiz Anahtarın Çalışma Durumu

Şekil 5.11'den görüleceği gibi her bir bölge için hangi anahtarların iletimde olduğu verilmiştir. Örneğin 1. bölgede üst baradan 1 numaralı anahtar, alt baradan da 6 ve 2 numaralı anahtarlar iletimdedir. Buna göre 1.6.2 numaralı anahtarlar üzerindeki gerilimler sırasıyla $+E_d/2$, $-E_d/2$, $-E_d/2$ olur. Bu DGM tekniği oldukça popülerdir. Uzak vektör modülasyonunda varılan maksimum çıkış voltajı, evirici kapasitesinin %90,6'sının kullanılmasına olanak sağlar. Ayrıca bu modülasyon tekniği geliştirilerek daha verimli sonuçlar elde edilebilir [77]. Yukarıda bahsedilen anahtarlama durumları, bir periyot için çizilirse şekil 5.12 elde edilir.



Şekil 5.12. Bir periyotluk çalışma durumu

Şekil 5.13 8 durum için uzay vektör diyagramını göstermektedir. Anahtar gerilimi V_{a0}, V_{b0}, V_{c0} $+E_d/2$ olduğu zaman 1, $-E_d/2$ olduğu zamanda 0 yazılmıştır.



Şekil 5.13. Durağan Çatıdaki Anahtarların Gösterimi

Şekil 5.13'de görüldüğü gibi düzlem 6 parçaya bölünmüştür. Her bir T_s anahtarlama periyodunda ortalama uzay vektörü $V_{referans}$ tanımlanabilir. Uzay vektör modülasyon tekniğinin temeli de bu parçalardaki her bir $V_{referans}$ vektörünün 0 ve 7'sidir vektörleri ve bitişik aktif uzay vektörlerinin ağırlıklı ortalamasının bir kombinasyonu olarak ifade edilmesidir. Böylece, her bir periyoda istenilen referans vektör bu dört evirici durumu arasındaki anahtarlama ile oluşturulabilir.

Her bir bölge için anahtarlama sıralaması yazılırsa;

I. Bölge 8 1 2 7 7 2 1 8

II. Bölge 8 3 2 7 7 2 3 8

III. Bölge 8 3 4 7 7 4 3 8

IV. Bölge 8 5 4 7 7 4 5 8

V. Bölge 8 5 6 7 7 6 5 8

VI. Bölge 8 1 6 7 7 6 1 8

1.bölgede V_s 'yi elde etmek istediğimizi varsayalım, bu durumda aşağıdaki anahtarlamanın çok hızlı yapılması gerekmektedir.

8 1 2 7 7 2 1 8 8 1 2 7 gibi yapılmalıdır.

Burada 8 1 2 7 bir T_s periyodudur. Uzay vektör DGM'de modülasyon indeksi denklem 5.5'de verilmiştir.

$$M = \frac{V_{hat}}{E} \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (5.5)$$

Burada V_{hat} ; fazlar arası gerilimdir.

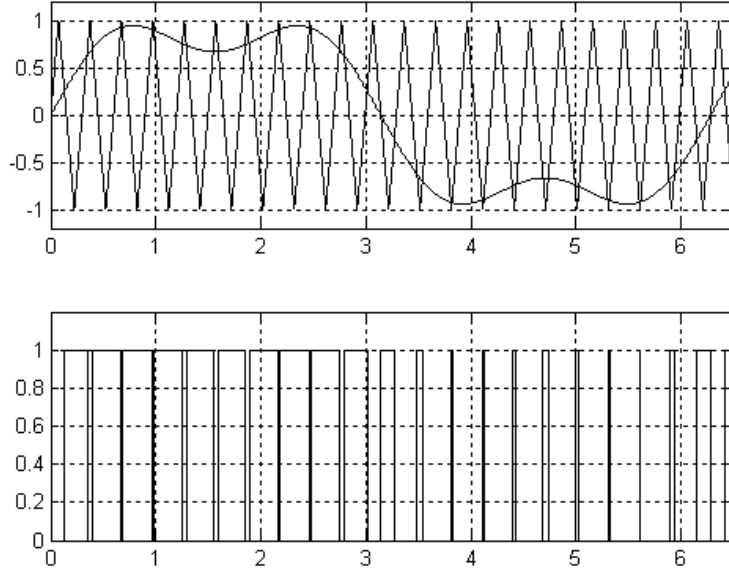
5.6.3. Sigma Delta Modülasyonu

Bu teknik idealleştirilmiş bir DGM tekniğidir. Özellikle sabit akımın istendiği motor sürücüler için uygundur. Bir integratör ve bir schmitt trigger devresinden oluşur. Delta modülasyonlu bir eviricinin performansı düşüktür. Çünkü düşük hızlarda stator gerilim düşümü kompanzasyonu mümkün değildir ve ayrıca DA linkin dengesiz değişimi kompanze edilemez. Anahtarlama frekansı histeresiz bandı tarafından belirlendiğinden bağımsız olarak kontrol edilemez ve integratör zaman sabitinden dolayı yüksek performanslı sürücülerde bu metodun kullanımı imkânsızdır [75].

Giriş bir referans sinüs etrafında dalgalanır. Böylece çıkış histeresiz bandı içinde referans sinyalini izler ve karşılaştırmalı çıkışı istenilen DGM dalga şeklini üretmeye zorlar. Çıkışın temel bileşeni doğrudan referans sinyali ile orantılıdır. Frekans artarsa, gerilim artar ve DGM dalga şekli kare dalgaya dönüşür.

5.6.4. Üçüncü Harmonik İlaveli DGM

Bu teknik SDGM'den türetilmiştir ve temelde SDGM ile aynıdır. Bunun yanında bu teknikte ek olarak 3. harmonik de bulunur. Bu nedenle tepesi basık olan modülasyon dalgası SDGM'e göre aşırı modülasyona izin verir. Bu yöntemin en önemli avantajı yüksek çıkış gerilimi elde edilebilmesidir. Dezavantajı ise faz-nötr geriliminde yüksek dereceli 3. harmonik bileşeninin bulunmasıdır [75]. Bunun yanında eğer sistem üçgen bağlıysa 3 ve 3'ün katı harmonikler fazlar arası gerilimde elimine olacaktır. Şekil 5.14'de UHIDGM verilmiştir.



Şekil 5.14. Üçüncü harmonik eklemeli DGM

BÖLÜM 6

ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖRÜN MATEMATİKSEL MODELİ VE KONTROLÜ

Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde sıklıkla kullanılan ÇBAG'nin kontrol edilebilmesi için matematiksel denklemlerin bilinmesi gerekmektedir [44,45]. Elde edilecek olan matematiksel ifadenin, asenkron generatörün geçici ve sürekli hal karakteristiğini doğru şekilde vermesi gerekmektedir. ÇBAG'nin matematiksel denklemleri senkron hızda dönen dq takımında ifade edilecektir. Modelleme ifade edilmeden önce referans alınan a fazı referanslı duran abc- $\alpha\beta$ ve senkron hızla dönen abc-dq dönüşümleri verilecektir [45,79,80].

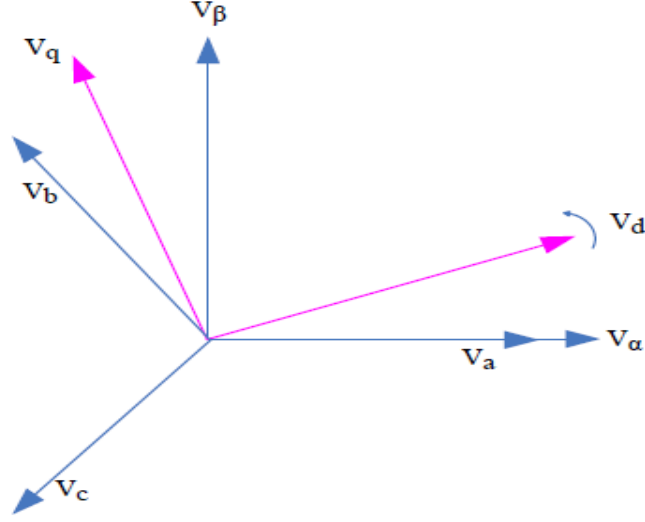
Üç fazlı dengeli sistemlerin iki faza indirgenmesi basit kontroller ve kolay teorik analizler gibi avantajlar sağladığı için uygun bir çözüm yolu olarak görülmektedir [80], [81]. İki fazlı duran sistemlerde, sinüzoidal sinyallerinde periyodik fark gerçekleştiği (fazlar arasında faz farkı gerçekleştiği için) için duran eksenden senkron hızla dönen eksene geçiş, uygun bir çözüm yolu sunar. [82]. Bu dönüşüm, kontrol tasarımını kolaylaştırmaktadır [83]. Yapılacak dönüşümler, gerilim sinyali üzerinden yapılmıştır. Diğer elektriksel parametreler içinde (akım, akı, vb.) aynı dönüşüm matrisleri geçerlidir.

$$V_a = \cos(\omega t) \quad (6.1)$$

$$V_b = \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (6.2)$$

$$V_c = \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (6.3)$$

Denklem 6.1-6.3'te üç fazlı dengeli gerilim denklemleri verilmiştir. Bu eşitliklere göre Şekil 6.1'de gerilim vektörlerinin dönüşümleri verilmiştir.



Şekil 6.1. Gerilim vektörünün abc- dq ve abc- $\alpha\beta$ dönüşümleri ile vektörel gösterimi

6.1. Clarke (abc- $\alpha\beta$) Dönüşüm Matrisleri

Clarke dönüşüm matrisleri, ilk defa Edith Clarke tarafından kullanılmıştır [44]. Bu dönüşüm matrislerinin temel amacı, aralarında 120 derece faz farkı olan 3 fazlı makine modellerini, aralarında 90 derece faz farkı olan iki faza indirmektir. abc- $\alpha\beta$ dönüşüm ve ters dönüşüm matrisleri denklem 6.4 ve 6.5’de ifade edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1 \\ 0.5 & -\sqrt{3}/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

Denklemlerde yer alan $2/3$ ise üç faz dengeleyici sistemlerde eşdeğer genlik üretme ilkelerine göre belirlenen dönüşüm katsayısıdır [84].

6.2. Park ($\alpha\beta$ -dq) Dönüşüm Matrisleri

Paul C. Krause, geliştirdiği Park Dönüşüm Matrisleri yardımıyla 3 fazlı makine modeli, dq eksen modeline doğrudan çevirmiştir [85]. abc-dq dönüşüm matrisleri ve dq-abc ters dönüşüm matrisleri denklem 6.6 ve 6.7’de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

θ açısı ise denklem 6.8'de ifade edilmiştir.

$$\theta = \int 2\pi f dt \quad (6.8)$$

Denklem 6.8'de yer alan ifade göz önüne alındığında, θ 'nın döner alan hız bilgisinin integral formundan çıktığı görülmektedir.

İki fazlı duran sistemlerde, sinüzoidal sinyallerinde periyodik fark gerçekleştiği için duran eksenden senkron hızla dönen eksene geçiş uygun bir çözümdür. Duran eksende var olan $\alpha\beta$ eksen takımının, dönen dq eksen takımına dönüşümü gerçekleştirilmiştir. $\alpha\beta$ -dq dönüşüm matrisi ve dq- $\alpha\beta$ ters dönüşüm matrisleri denklem 6.9 ve 6.10'da verilmiştir.

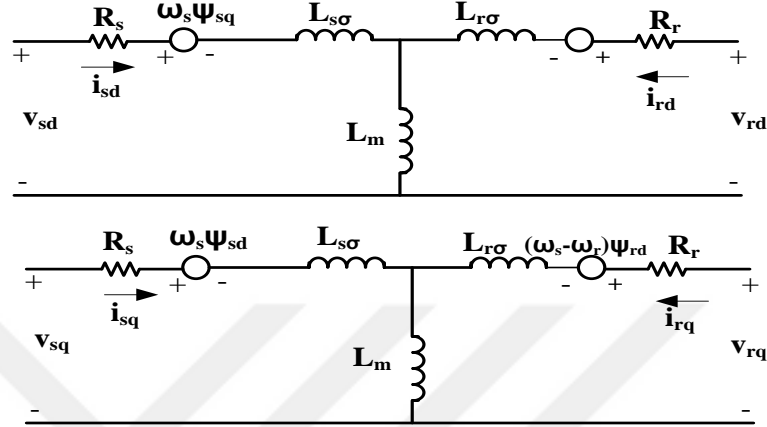
$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

6.3. Çift Beslemeli Asenkron Generatörün Dinamik Eşitliği

ÇBAG dinamik modeli elde edilirken bazı değişkenler ihmal edilmiş, bazı ifadeler de varsayım olarak kabul edilmiştir. Stator sargıları arasındaki açı, 120 derece olarak kabul edilmiştir [87,88]. Sıcaklık ve frekansa bağlı olarak değişiklik gösteren direnç ve endüktanslar ihmal edilmiştir [89,90]. Akımın düzgün dağıldığı ve magnetik bölümlerin geçirgenliği sonsuz sayılmıştır. Demir kayıpları ihmal edilmiştir. Son olarak stator

sargıları stator etrafına iyi bir şekilde döşenmiş olup hava aralığındaki akı değişiminin sinüzoidal olduğu kabul edilmiştir [45,84]. Şekil 6.2’de ÇBAG eşdeğer devresi verilmiştir.



Şekil 6.2. ÇBAG eşdeğer devresi

Tablo 6.1. ÇBAG eş değ er devresinde kullanılmış parametreler

V_{sd}, V_{sq}	dq eksen takımındaki stator gerilimleri
V_{rd}, V_{rq}	dq eksen takımındaki rotor gerilimleri
i_{sd}, i_{sq}	dq eksen takımındaki stator akımları
i_{rd}, i_{rq}	dq eksen takımındaki rotor akımları
R_s, R_r	dq eksen takımındaki stator ve rotor dirençleri
ω_s, ω_r	dq eksen takımındaki stator ve rotor elektriksel hızları
$L_{s\sigma}, L_{r\sigma}, L_m$	dq eksen takımındaki stator, rotor kaçak endüktansı ve mıknatıslanma değerlerini
$\Psi_{sd}, \Psi_{sq}, \Psi_{rd}, \Psi_{rq}$	dq eksen takımındaki stator ve rotor akı ifadeleri

Eşdeğer devredeki tüm parametreler, statora indirgenmiştir. Ayrıca ÇBAG dinamik eşitlikleri yazılırken ‘s’ indisi statorü temsil ederken, ‘r’ indisi rotoru temsil etmektedir. Tablo 6.1’de eşdeğer devre parametrelerinin neyi temsil ettiği verilmiştir.

Stator ve rotor faz endüktansları L_s, L_r denklem 6.11 ve 6.12’de ifade edilmiştir.

$$L_s = L_m + L_{s\sigma} \quad (6.11)$$

$$L_r = L_m + L_{r\sigma} \quad (6.12)$$

Denklem 6.11 ve 6.12’de elde edilen stator, rotor endüktans ifadeleri kullanılarak elektromagnetik akı ifadeleri elde edilmiş ve bu eşitlikler denklem 6.13-6.16’da verilmiştir.

$$\psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \quad (6.13)$$

$$\psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \quad (6.14)$$

$$\psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \quad (6.15)$$

$$\psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \quad (6.16)$$

Elde edilen elektromagnetik akı eşitlikleri, stator ve rotor gerilim eşitliklerinde kullanılmıştır. Şekil 6.2’de verilen ÇBAG eşdeğer devresine, Kirchoff gerilim yasası uygulanarak dq eksen takımındaki stator ve rotor gerilim eşitlikleri elde edilmiştir [90 ,91].

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_s \psi_{sq} + L_m \frac{di_{rd}}{dt} \quad (6.17)$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_s \psi_{sd} + L_m \frac{di_{rd}}{dt} \quad (6.18)$$

$$V_{rd} = R_r i_{rd} + L_r \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_r \psi_{rq} + L_m \frac{di_{sd}}{dt} \quad (6.19)$$

$$V_{rq} = R_r i_{rq} + L_r \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_r \psi_{rd} + L_m \frac{di_{sq}}{dt} \quad (6.20)$$

Denklem 6.13-6.16’da elde edilen büyüklükler, denklem 6.17-6.20 denklemlerinde yazılarak ÇBAG dinamik modelinde yer alan stator ve rotorun dq eksenindeki gerilim eşitlikleri elde edilmiştir. Generatöre ait mekaniksel eşitlik denklem 6.21’de verilmiştir.

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (T_m - T_e) + b\omega_m \quad (6.21)$$

Denklem 6.21’de b sürtünme katsayısını, T_e ve T_m elektromagnetik moment ve mekanik moment, ω_m mekanik hızı, J ise eylemsizlik momentini ifade etmektedir. Rotor ve statora ait akım değerleri, doğrudan ölçülebildiğinden T_e elektromagnetik moment eşitliği denklem 6.22’de verilmiştir.

$$T_e = \frac{3}{2} p L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad (6.22)$$

Denklem 6.22’de yer alan p , ÇBAG kutup sayısını ifade etmektedir. Elektriksel hız ile mekanik hız arasındaki ifade ise denklem 6.23’de verilmiştir.

$$\omega_r = \omega_s - p \omega_m \quad (6.23)$$

Statordan alınan aktif ve reaktif güç denklemleri 6.24 ve 6.25’de ifade edilmiştir.

$$P_s = \frac{3}{2} (v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq}) \quad (6.24)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (v_{sq} i_{sd} - v_{sd} i_{sq}) \quad (6.25)$$

Rotordaki aktif ve reaktif güç denklemleri 6.26 ve 6.27’de verilmiştir.

$$P_r = \frac{3}{2} (v_{rd} i_{rd} + v_{rq} i_{rq}) \quad (6.26)$$

$$Q_r = \frac{3}{2} (v_{rq} i_{rd} - v_{rd} i_{rq}) \quad (6.27)$$

Denklem 6.17-6.20’de bulunan dinamik ifadelerin, durum uzay vektör matrisleri elde edilerek yapılacak benzetim çalışması için kolaylık sağlanmıştır. Kontrol girişi olarak stator ve rotor akımlarını, gerilimleri ve durum değişkenlerini varsayan durum uzay modeli denklem 6.28’de verilmiştir [84,93].

$$\frac{dx}{dt} = A(\omega_m)x(t) + Bu(t) \quad (6.28)$$

Denklem 6.28’de yer alan ifadelerin matris formu denklem 6.29- 6.32’de verilmiştir.

$$u = \begin{bmatrix} v_{sd} & v_{sq} & v_{rd} & v_{rq} \end{bmatrix}^T \quad (6.29)$$

$$x = \begin{bmatrix} i_{sd} & i_{sq} & i_{rd} & i_{rq} \end{bmatrix}^T \quad (6.30)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \\ -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix} \quad (6.31)$$

$$A(\omega_m) = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{\sigma L_s} & \omega_s + \frac{p\omega_m L_m^2}{\sigma L_s L_r} & \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r} & \frac{p\omega_m L_m}{\sigma L_s} \\ -(\omega_s + \frac{p\omega_m L_m^2}{\sigma L_s L_r}) & -\frac{R_s}{\sigma L_s} & \frac{p\omega_m L_m}{\sigma L_s} & \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r} \\ \frac{L_m R_s}{\sigma L_s L_r} & -\frac{p\omega_m L_m}{\sigma L_r} & -\frac{R_r}{\sigma L_r} & \omega_s - \frac{p\omega_m}{\sigma} \\ \frac{p\omega_m L_m}{\sigma L_r} & \frac{L_m R_s}{\sigma L_s L_r} & \frac{p\omega_m}{\sigma} - \omega_s & -\frac{R_r}{\sigma L_r} \end{bmatrix} \quad (6.32)$$

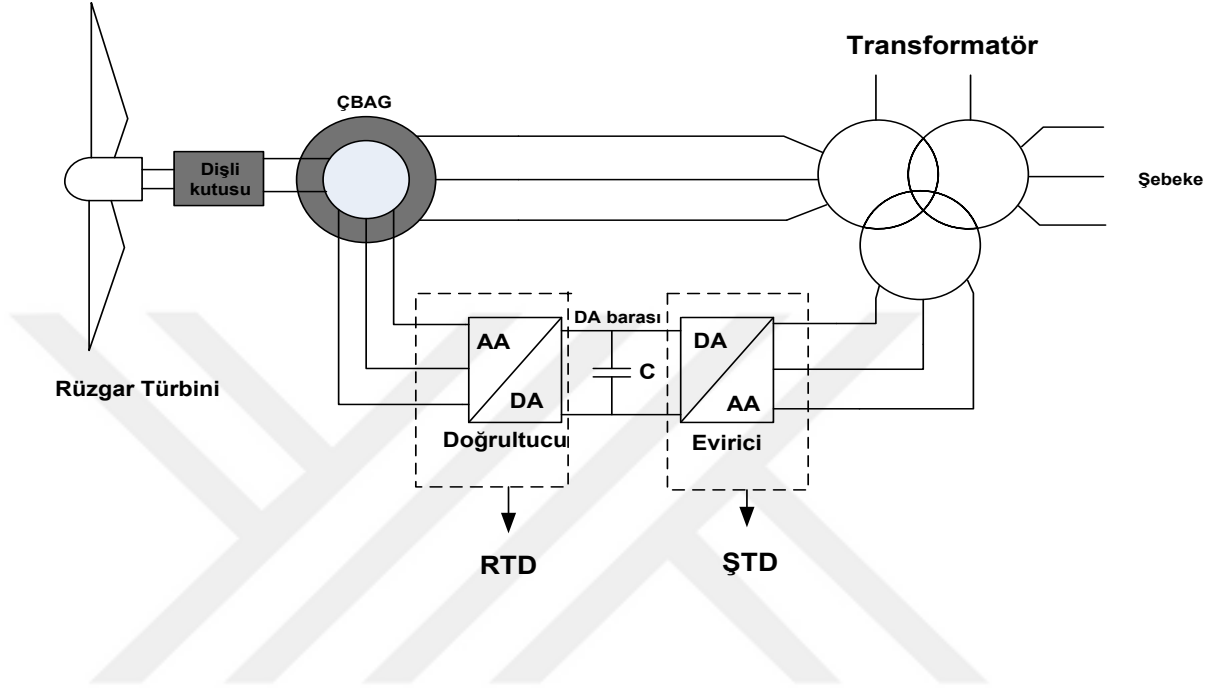
Denklemlerde yer alan σ kaçak faktörüdür. σ ifadesinin eşitliği denklem 6.33'de tanımlanmıştır.

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad (6.33)$$

6.4. ÇBAG Kontrol Yöntemleri

ÇBAG tabanlı rüzgâr türbinlerinde iki adet gerilim kaynaklı eviricinin ardışık olarak birbirine bağlanmasıyla aktif güç, reaktif güç ve DA bara gerilimi gibi parametreler kontrol edilebilmektedir. Şekil 6.3'de ÇBAG tabanlı rüzgâr türbin modelinin şebeke bağlantısı gösterilmiştir.

Şekil 6.3’de görüldüğü gibi rotor tarafı dönüştürücü (RTD) ile şebeke tarafı dönüştürücü (ŞTD) birbirine bir kondansatör aracılığı ile bağlanmıştır. ŞTD ve RTD arasında yer alan DA bara, ŞTD ve RTD’nin birbirlerinden bağımsız olarak kontrol edilebilmelerine olanak sağlamaktadır.



Şekil 6.3. ÇBAG şebeke bağlantısı

6.4.1. Şebeke tarafı dönüştürücü kontrolü

ŞTD’nin asıl amacı, DA-bara voltajını sabit tutmaktır. Ayrıca gücün rotordan şebekeye veya şebekeden rotora akışında da rol almaktadır [93]. Bu görevler gerçekleştirilirken sistem vektör kontrol tekniği yardımıyla kontrol edilmektedir. ŞTD kontrol blok diyagramı şekil 6.4’te verilmiştir. PLL bloğu, sistem frekansını ölçmek için kullanılır ve d-q dönüşüm bloğu için faz senkron açısını θ sağlar. DGM dönüştürücü, doğru eksen akımı ile regüle edilen DA bağlantı gerilimini düzenlemek için kullanılmaktadır. Reaktif güç talebi, birim güç faktörünün çalışmasını sağlamak için sıfır olarak ayarlanmıştır.

ŞTD için matematiksel denklemler aşağıda verilmiştir.

$$V_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega_e Li_d + v_{q1} \quad (6.34)$$

$$V_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega_e Li_q + v_{d1} \quad (6.35)$$

Denklem 6.34 ve 6.35’de kullanılan V_{d1} ve V_{q1} , d-q eksen teoremi kullanılarak V_a , V_b ve V_c ’den elde edilen iki faz gerilimlerdir. DA bağlantı voltajının sabit tutulması ve genel sistemin güç faktörünün birlik olması gerektiğinden, sistem referans değerleri buna göre ayarlanmalıdır. Denklem 6.36 ve 6.37’de d-q eksen referans gerilimleri verilmiştir.

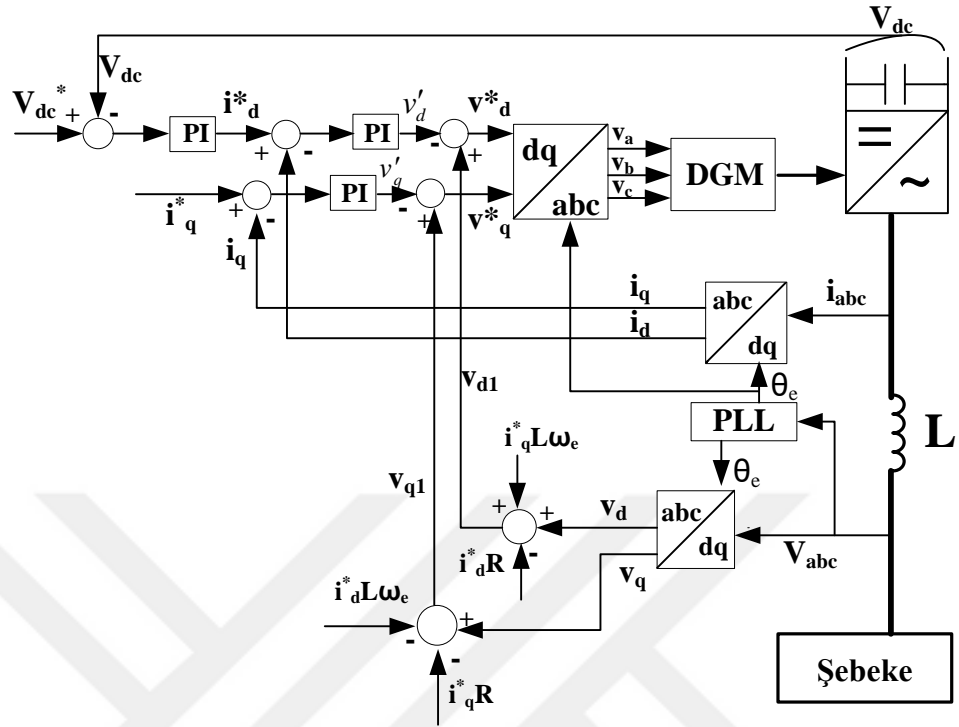
$$v_d^* = v_d - i_d^* R + i_q^* \omega_e L - v_{d1} \quad (6.36)$$

$$v_q^* = v_q - i_q^* R - i_d^* \omega_e L - v_{q1} \quad (6.37)$$

Şekil 6.4’de görüldüğü gibi standart PI kontrolcü ile DA-bara voltaj hatasından elde edilen I_d ve I_q için akım kontrol döngüsü kullanılmaktadır. Birim güç faktörü sağlamak için I_q sıfır olarak ayarlanır ve I_q ’nin sıfır olmasıyla reaktif güç referans olarak seçilen sıfır değerinde olmaktadır [94]. Kontrol tasarımı, gerekli kontrol eylemini sağlamak için iki döngü kullanır. İç akım döngüsü ve dış gerilim döngüsü kontrol tasarımı için kullanılan döngülerdir. DA kontrolü, dış döngüde kullanılan DA gerilim kontrolü ile kontrol edilmektedir [95].

$$\tan \theta_e = \frac{v_q^s}{v_d^s} \quad (6.38)$$

Aktif ve reaktif güç, vektör kontrol yöntemi kullanılarak birbirinden bağımsız şekilde kontrol edilmektedir. Denklem 6.38’de şebeke geriliminin konumu belirlenmektedir. $V_q = 0$ eşitliğinde, besleme geriliminin genliği sabit olduğundan dolayı, aktif ve reaktif güç denklemleri sırasıyla I_d ve I_q vasıtasıyla birbirilerinden bağımsız olarak kontrol edilirler. Aktif ve reaktif güç değişimleri denklem 6.39 ve 6.40’da verilmiştir [95].



Şekil 6.4. Şebeke Tarafı dönüştürücü kontrol sistemi

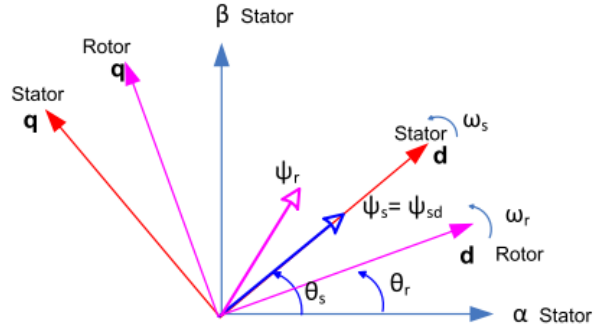
$$P_s = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \quad (6.39)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (v_d i_q - v_q i_d) \quad (6.40)$$

6.4.2. Rotor tarafı dönüştürücü kontrolü

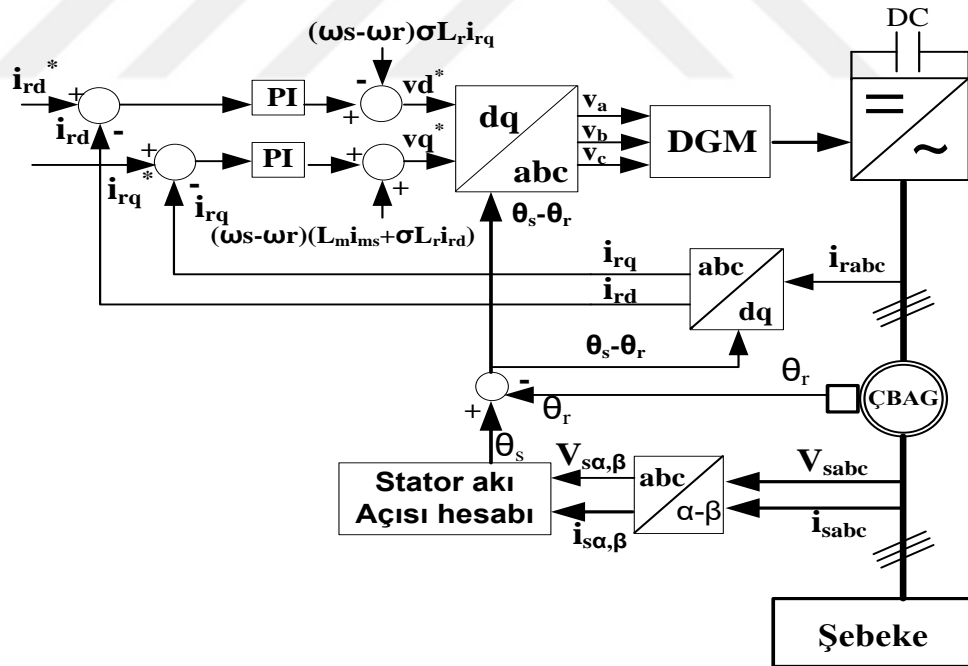
RTD'nin ana amacı, rotor hızını rüzgâr hızından bağımsız olarak sabit tutmaktır. Ayrıca RTD, aktif ve reaktif gücü kontrol etmek için de kullanılır [93].

Vektör kontrol yönteminin asıl amacı, kontrolü basit hale indirmektedir. dq eksen dönüşümleri, bu kontrol yönteminin temelini oluşturmaktadır. Üç fazlı generatör modelinde yer alan parametreler, iki faz ve aralarında 90 derece açılı bulunan parametrelere dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm için dq eksen dönüşüm tekniği kullanılmaktadır [96].



Şekil 6.5. Rotor ve stator akılarının vektörel gösterimi

Stator akısından oryantasyonlu yöntemlerde şekil 6.5’de görüldüğü gibi stator akısı, senkron hızda dönmekte olan dq eksen takımının d eksenine yerleştirilmiştir. Stator akısının dq eksen takımındaki d eksenine yerleştirilmesiyle, $\psi_s = \psi_{sd}$ eşitliği sağlanmış olur. Şekil 6.6’da RTD için kontrol bloğu verilmiştir.



Şekil 6.6. Rotor tarafı dönüştürücü kontrol sistemi

Şekil 6.6’da yer alan kontrol bloğunun anlaşılabilmesi için bazı parametrelerin eşitlikleri verilmiştir. Denklem 6.41 ve 6.42’de stator akı hesabının $\alpha\beta$ duran eksen takımındaki eşitliği verilmiştir.

$$\psi_{s\alpha} = \int (v_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt \quad (6.41)$$

$$\psi_{s\beta} = \int (v_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt \quad (6.42)$$

Stator akı değerlerinden faydalanılarak elde edilen açı bilgisi denklem 6.43'de verilmiştir.

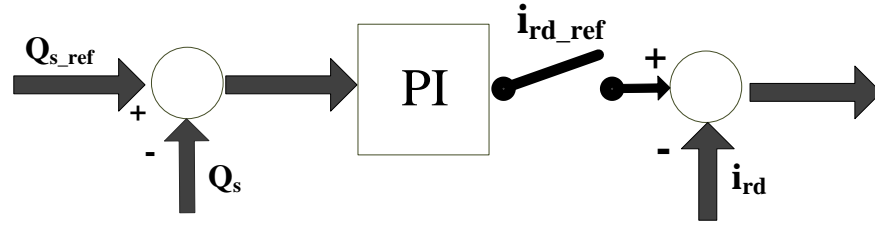
$$\theta_s = \arctan \frac{\psi_{s\beta}}{\psi_{s\alpha}} \quad (6.43)$$

Bu eşitliklerden sonra elde edilen stator akısı ve generatörün rotor açısından alınan konum bilgisi ile istenilen dönüşümler yapılmıştır. Bu dönüşümler neticesinde ayrıştırılmış rotor akımları, PI kontrolör ve sonrasında eklenen Kompanzasyon terimleri ile kontrol edilmektedir. Bu Kompanzasyon terimlerinin önemi oldukça yüksektir. Çünkü Kompanzasyon terimleri; ayrıştırma, kontrolörün sürekli hal hatası ve performans açısından oldukça önemlidir [97]. Denklem 6.44 ve 6.45'de ayrıştırılmış gerilim referans değerleri verilmiştir.

$$v_{rd}^{ref} = (i_{rd}^{ref} - i_{rd}) PI + \overbrace{(\omega_s - \omega_r) \sigma L_r i_{rq}}^{kompanzasyon} \quad (6.44)$$

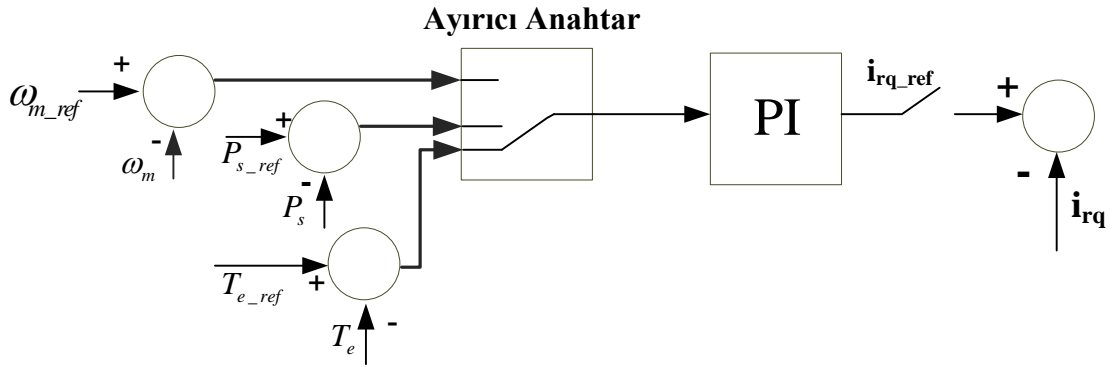
$$v_{rq}^{ref} = (i_{rq}^{ref} - i_{rq}) PI + \overbrace{(\omega_s - \omega_r) L_m I_{ms} + \sigma L_r i_{rd}}^{kompanzasyon} \quad (6.45)$$

Senkron referans üzerine oturtulmuş rotor akımlarının d bileşeni, reaktif gücü kontrol ederken q bileşeni, aktif gücü kontrol etmektedir. i_{rd} , reaktif güç değişiminde önemli bir etkidir. Bundan dolayı i_{rd} 'den önce sisteme PI kontrolör koyularak reaktif güç kontrol edilebilmektedir. Şekil 6.7'de reaktif güç kontrolü için gerekli blok diyagram verilmiştir.



Şekil 6.7. Reaktif güç kontrolü

Şekil 6.7’de verilen Q_{s_ref} değeri ile ölçülen Q_s değerinin farkı PI kontrolöre girmektedir. PI kontrolör, iki güç arasındaki hataya göre i_{rd_ref} akımını üretmektedir. Üretilen referans akımı, şebekede okunan ve q-d dönüşümüne uğrayan gerçek i_{rd} ile karşılaştırılır. Bu karşılaştırma sonucundaki akım kontrolcüsünden geçerek v_d' değerini oluşturmaktadır. Oluşan bu değer, denklem 6.44’de verilen kompanpasyon terimi ile çarpılarak v_d^* gerilimi oluşturmaktadır. Bu gerilim değeri, dq-abc dönüşümünden geçirilerek V_a, V_b, V_c gerilim değerleri elde edilmiştir. Bu değerler, DGM’nin giriş değerleri olmaktadır. Bu giriş değerlerine göre de anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. Reaktif güç dışında hız, güç ve moment kontrolü de şekil 6.8’de gösterildiği gibi yapılabilmektedir.



Şekil 6.8. Aktif güç, hız ve moment kontrolü

Reaktif güç gibi aktif gücü, hızı ve momenti kontrol etmek için devrede i_{rq} akımı bir kontrolörden geçirilir. Şekil 6.8’de görüldüğü gibi gerçek hız değeri ile ölçülen hız değerinin farkı, referans aktif güç ile sistemde okunan aktif gücün farkı ve referans tork

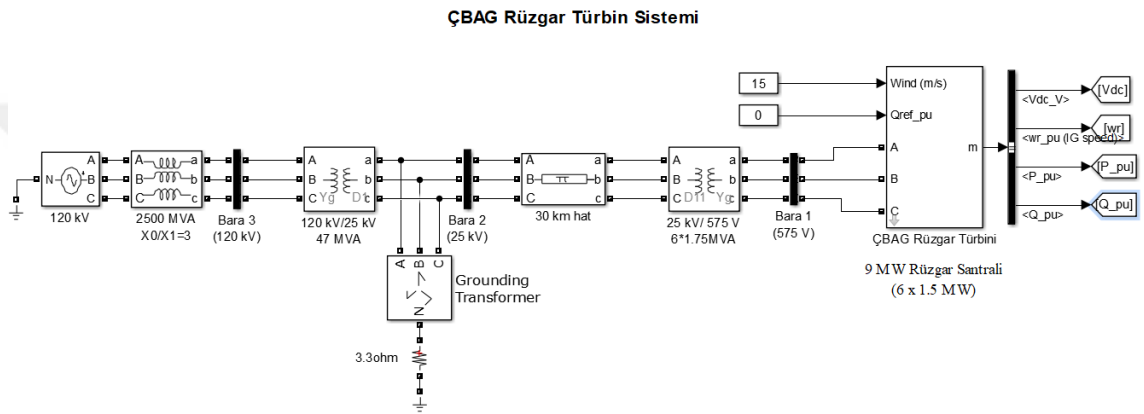
ile okunan tork değeri karşılaştırılarak PI kontrolöre girmektedir. PI kontrolör çıkışında oluşan hata sinyali sonucunda i_{rq_ref} değeri oluşacaktır. Reaktif güce benzer şekilde bu değer de aynı işlemlerden geçirilerek RTD'ye aktarılmaktadır.



BÖLÜM 7

BENZETİM ÇALIŞMASI

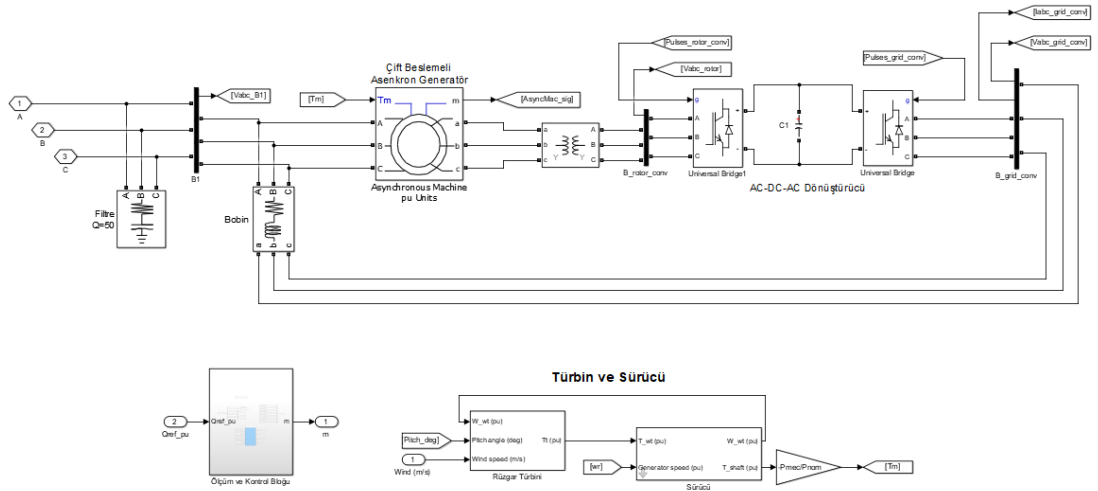
Bu tez çalışmasında, ÇBAG tabanlı rüzgâr türbini santralının tasarımı ve kontrolü gerçekleştirilmiştir. ÇBAG’de kullanılan dönüştürücünün farklı kontrol yöntemleri kullanılarak benzetim çalışması yapılmıştır. Şekil 7.1’de rüzgâr santralının MATLAB/Simulinkte benzetimi gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Tasarlanan ÇBAG rüzgâr türbini sistemi

Tasarlanan bu rüzgâr santral sistemi, 25kV’luk bir dağıtım sistemine bağlı, altı adet 1.5 MW rüzgâr türbininden oluşmaktadır. Toplam 9MW’lık bu rüzgâr santrali, 30 km’lik, 25 kV’luk bir besleyici aracılığı ile 120 kV’luk bir şebekeye güç sağlamaktadır.

Rüzgâr santralinde generatör olarak ÇBAG kullanılmıştır. ÇBAG kullanılmasının en temel sebeplerinden bir tanesi de değişken rüzgâr hızlarında maksimum kazanç sağlamasıdır. Şekil 7.2’de rüzgâr türbininin MATLAB/Simulinkte tasarlanan kontrol ve dönüştürücü blokları ile generatör modellemesi verilmiştir.



Şekil 7.2. Rüzgâr türbin sistemi

Bu tez çalışmasında 1.5 MW'lık bir rüzgâr türbinin modellenmesi ve kontrolü yapılmıştır. ÇBAG tabanlı rüzgâr santrallerinde, ÇBAG'nin statoru direkt şebekeye bağlıken rotoru dönüştürücü üzerinden şebekeye bağlanmıştır. Yapılan benzetim çalışmasında ardışık dönüştürücü kullanılmıştır. Bu dönüştürücü, arka arkaya bağlı iki adet gerilim kaynaklı eviriciden oluşmaktadır. Gerilim kaynaklı eviricilerin arasında yer alan bir kondansatör vasıtasıyla RTD ve ŞTD'nin ayrı ayrı kontrol edilmesine olanak sağlanmaktadır. Benzetim çalışmasında AA/DA ve DA/AA dönüştürücülerde anahtarlama elemanı olarak IGBT kullanılmıştır. Bu AA/DA ve DA/AA dönüştürücülerinin anahtarlama kontrolü için DGM yöntemi kullanılmıştır.

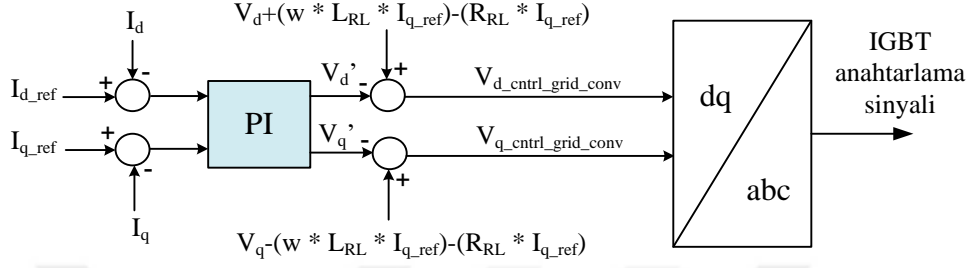
Bu tez çalışmasında, rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan dönüştürücülerin kontrolü yapılmıştır. Rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan dönüştürücü için farklı kontrol yöntemleri ile benzetim çalışması yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Öncelikle RTD ve ŞTD için PI kontrol tasarımı yapılmış ve PI kontrolör ile elde edilen uygun parametreler ile ANFIS ve YSA eğitilerek karşılaştırılması yapılmıştır.

7.1. PI kontrolör ile rüzgâr türbinini dönüştürücü kontrolü

PI kontrol, rüzgâr türbin sistemlerinde en çok kullanılan kontrol yöntemidir. ŞTD ve RTD için yapılan benzetim çalışması aşağıda verilmiştir.

7.1.1. PI ile ŞTD kontrolü

Şebeke tarafı dönüştürücünün kontrol bloğunun MATLAB/Simulink benzetimi Şekil 7.3'te verilmiştir.

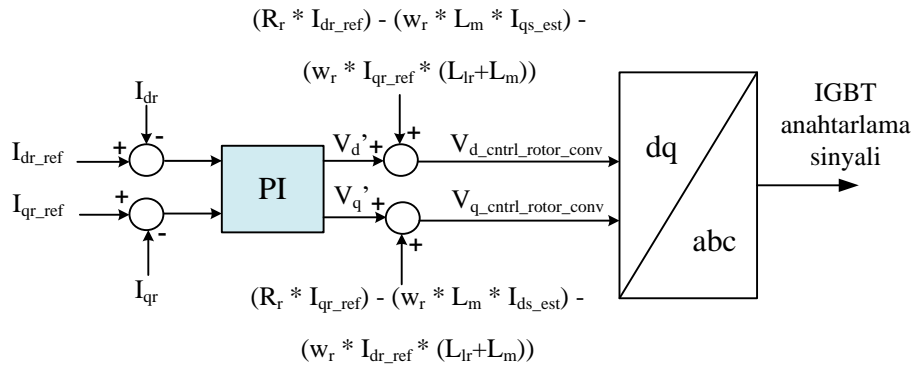


Şekil 7.3. Şebeke tarafı dönüştürücünün PI ile kontrolü

DA baradan gelen akım değeri ile referans akım değerinin karşılaştırılması sonucu elde edilen fark, PI kontrolöre girerek burada oluşan hata sinyali sonucunda vd ve vq değerlerini vermektedir. Bu değerler, dq-abc dönüşüm bloğuna girerek 3 faz gerilim değerlerini oluşturmaktadır. Bu gerilim değerleri, DGM kontrol bloğuna uygulanarak burada dönüştürücü için anahtarlama sinyalleri oluşturulmaktadır.

7.1.2. PI ile RTD kontrolü

Şekil 7.4'de RTD için MATLAB/Simulink ara yüzünde benzetimi verilmiştir

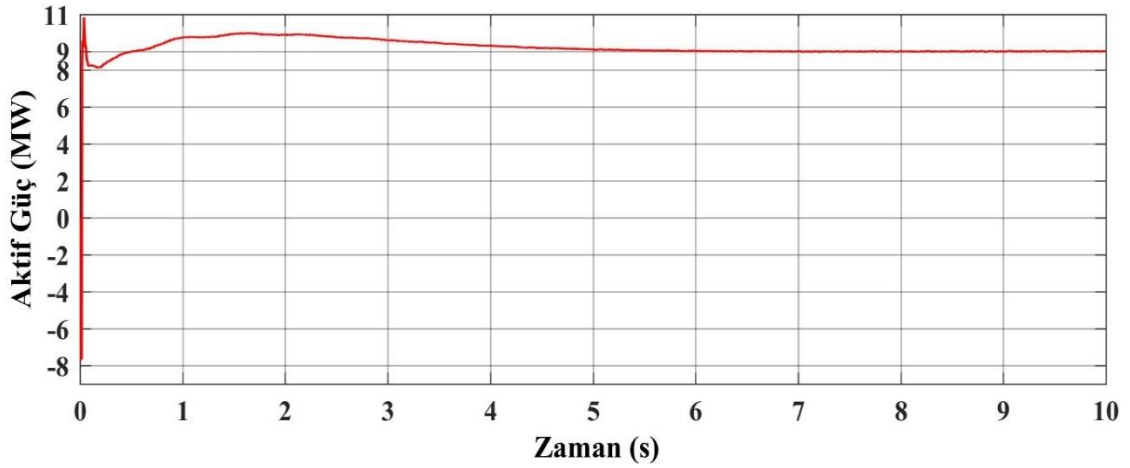


Şekil 7.4. Rotor tarafı dönüştürücünün PI ile kontrolü

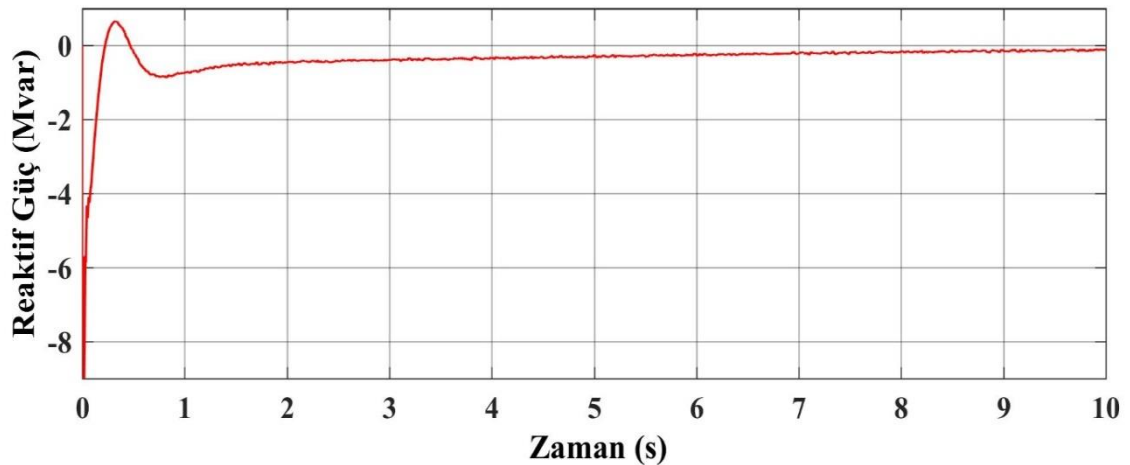
RTD'nin görevi, rüzgâr hızını sabit tutmak ve aktif ile reaktif gücün kontrolünü sağlamaktadır. RTD, referans akım ile üretilen akım değerleri PI kontrolöre girer ve

burada oluşan hata sinyali sonucunda v_d ve v_q değerleri elde edilmektedir. ŞTD’de olduğu gibi bu sistem de dq-abc dönüşümünden geçerek DGM kontrol bloğuna girer ve buradan RTD için anahtarlama sinyalleri üretilir.

Şekil 7.5’de MATLAB/Simulink’de yapılan benzetim sonucunda elde edilen aktif güç değişimi verilmektedir. Aktif güç, $t=0$ anında yaklaşık olarak 11 MW değerine sıçrama yapmış ve çok kısa süre içerisinde 9 MW değerinde sabitlenmiştir. Elde edilen bu 9 MW aktif güç değeri tasarlanan sistem için uygun bir değerdir. Şekil 7.6’de ise reaktif güç değişimi verilmektedir. Reaktif güç değeri simülasyon süresince 0 MVAR seviyesine yaklaşarak referans değere çok yakın bir sonuç elde edilmiştir.



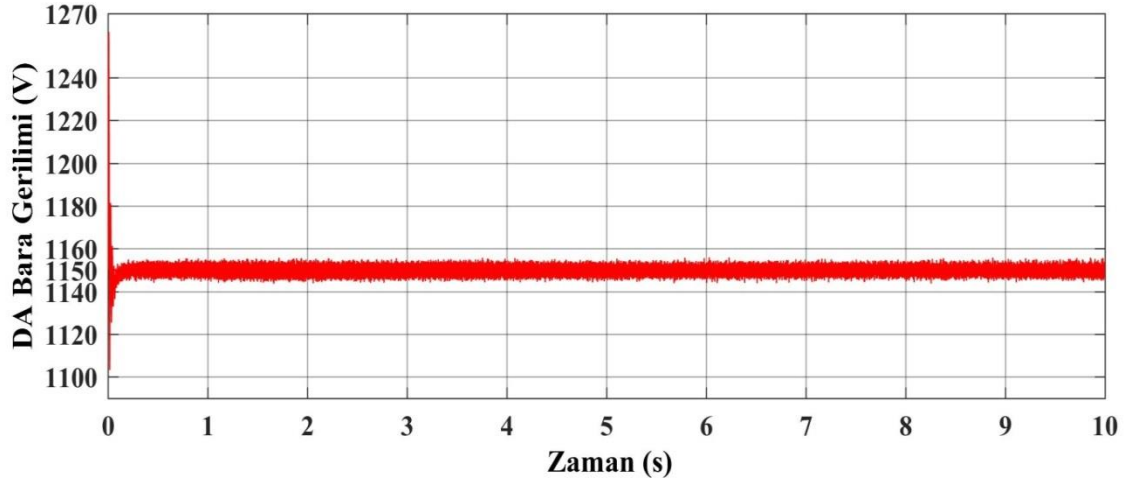
Şekil 7.5. PI ile kontrol edilen sistemin aktif güç cevabı



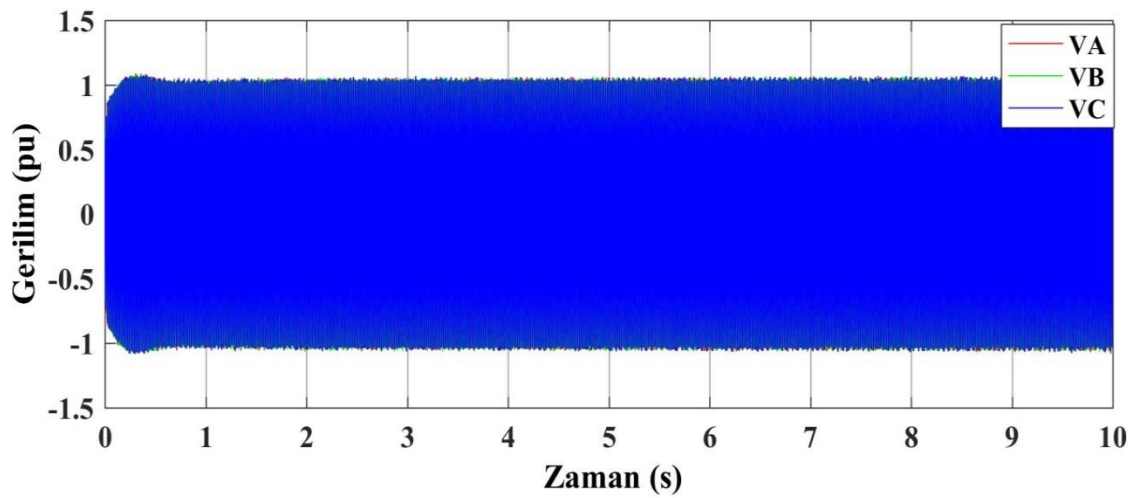
Şekil 7.6. PI ile kontrol edilen sistemin reaktif güç cevabı

Şekil 7.7’de DA bara gerilimi verilmiştir. DA bara gerilimi, ŞTD ile kontrol edilen parametredir. DA bara geriliminin, 1150 V referans değerinde sabitlendiği görülmektedir. Generatör çıkışındaki hat gerilimleri Şekil 7.8’de, yakınlaştırılmış görüntüsü ise Şekil 7.9’da verilmektedir. Hat gerilimlerinin tepe değeri 1, -1 pu arasında değişmekte olup şekillerde verilen değerlerin düzgün sinüzoidal forma sahip olduğu görülmektedir.

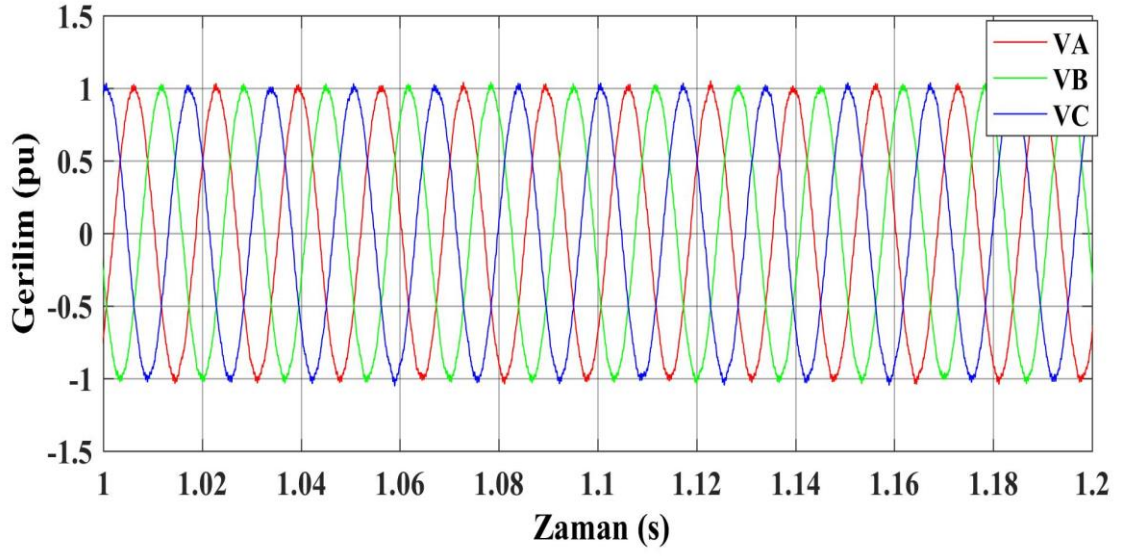
Şekil 7.10’de PI kontrolör ile kontrol edilen sistemin üç fazlı sinüzoidal akım değerleri verilmiştir. Verilen akım değerlerine ait yakınlaştırılmış görüntü ise Şekil 7.11’de verilmektedir. Şekil 7.11’de hat akımlarının tepe değeri 1, -1 pu arasında değişmekte olduğu görülmektedir.



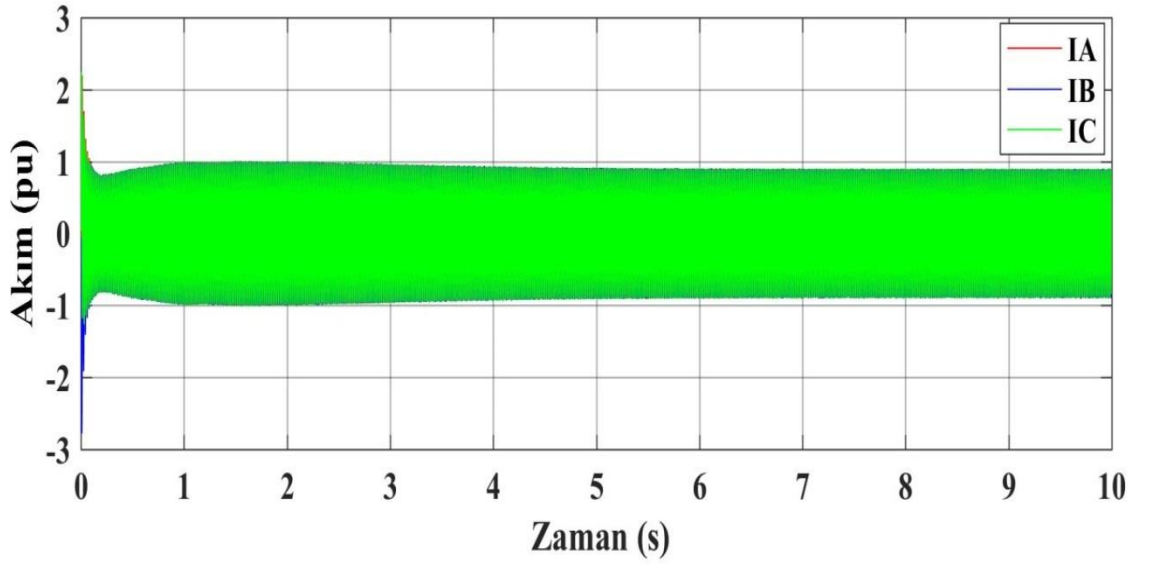
Şekil 7.7. PI ile kontrol edilen sistemin DA bara gerilim cevabı



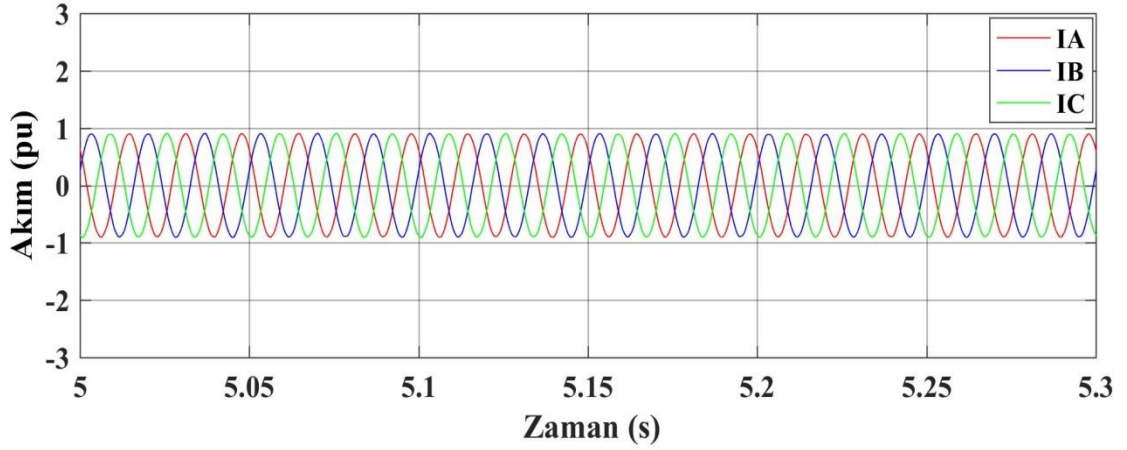
Şekil 7.8. PI ile kontrol edilen sistemin generatör çıkışı hat gerilimleri



Şekil 7.9. PI ile kontrol edilen sistemin generator çıkışı yakınlaştırılmış ve hat gerilimleri



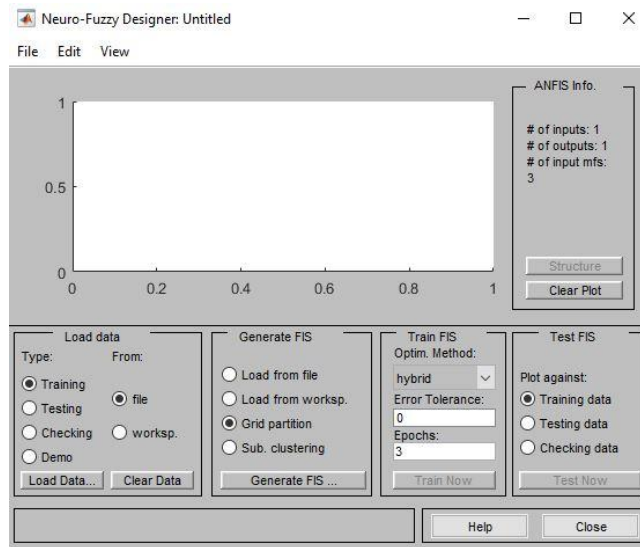
Şekil 7.10. PI ile kontrol edilen sistemin generator çıkışı hat akımları



Şekil 7.11. PI ile kontrol edilen sistemin generatör çıkışı yakınlştırılmış hat akımları

7.2. ANFİS ile Rüzgâr türbini dönüştürücü kontrolü

ANFİS, bulanık mantık kurallarının YSA ile beraber kullanıma sunulan uyarmalı bir ağ yapısıdır. ANFİS'te öğrenme, YSA aracılığı ile yapılmaktadır. ANFİS tasarımı için PI kontrolcünün optimum parametreleri alınmıştır. 100001 veri seti kullanılarak ANFİS eğitilmiştir. ANFİS sistemine ait detaylı bilgi, Bölüm 4.3'te verilmiştir. Tasarlanan sistem benzetimi için MATLAB/Simulink veri tabanında yer alan “anfisedit” modülü kullanılmaktadır. MATLAB arayüzünde yer alan Command Window sekmesine “anfisedit” yazılarak kullanılan ara yüz açılabilir.



Şekil 7.12. ANFİS editörü işlem arayüzü

Şekil 7.12'de verilen ANFİS editörle aşağıda işlemler yapılmaktadır.

Load Data:

Verilerin arayüze aktarıldığı bölümdür. Bu bölümde, verilerin nereden alınacağı (bilgisayardan, matlab işlem penceresi) veya hangi veri türünün (test, eğitim) alınacağı seçilerek işlem yapılmaktadır.

Generate FIS:

Verilerin hangi üyelik fonksiyonu ile eğitim yapılacağına karar verilen kısımdır.

Train FIS:

Optimizasyon metodunun (hybrid, geri yayılım) seçildiği yerdir. Eppoch ile sistemde kaç çevrim yapılacağına, Error Tolarence ile hata tolerans değerine karar verilir.

Test FIS:

Eğitim yapılan modelin testi yapılır. Test verisi ile tahmin verilerinin karşılaştırıldığı bölümdür.

Elde ettiğimiz 100001 veri setinin 70000 verisi ile eğitim, 30001 veri ile test eğitimi yapılmıştır. Bu veri setinin eğitim aşamalarında en iyi kazanç sağlayan üyelik fonksiyonu belirlenmiş, ardından optimizasyon metodu seçilmiştir.

7.2.1. ANFIS ile ŞTD kontrolü

ŞTD için verilerin, tüm üyelik fonksiyonlarında öğrenmesi gerçekleştirilmiş ve en az hata değerine sahip olan üyelik fonksiyonu ile eğitim yapılmıştır. ŞTD'de yer alan referans I_{dr} ve I_{dr_ref} farkından oluşan değer giriş değeri, $v_{d'}$ ise çıkış değeridir.

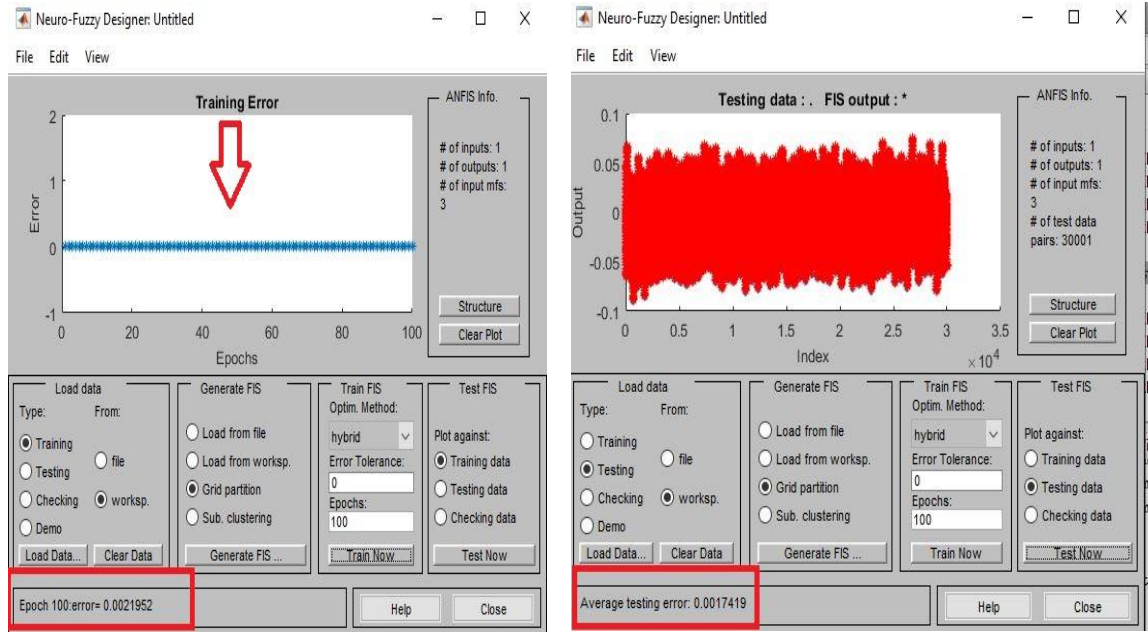
Tablo 7.1'de 50 çevrim ve 100 çevrim için yapıldığında ŞTD için eğitim sonucunda ortaya çıkan üyelik fonksiyonlarına ait hata değerleri verilmiştir. Tablo 7.1'de hata çevrim sayısı 100 olarak seçilmesi durumunda daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 7.1 incelendiğinde hata değeri en düşük üyelik fonksiyonu trimf çıkmıştır. Bundan dolayı modelde trimf üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Optimizasyon metodu olarak hybrid ve hata çevrim sayısı ise 100 olarak belirlenmiştir. Şekil 7.13 (a)'da

kurulan modele ait öğrenme eğrisi ve (b)'de ise test eğitim verisinin karşılaştırılmış sonucu verilmiştir.

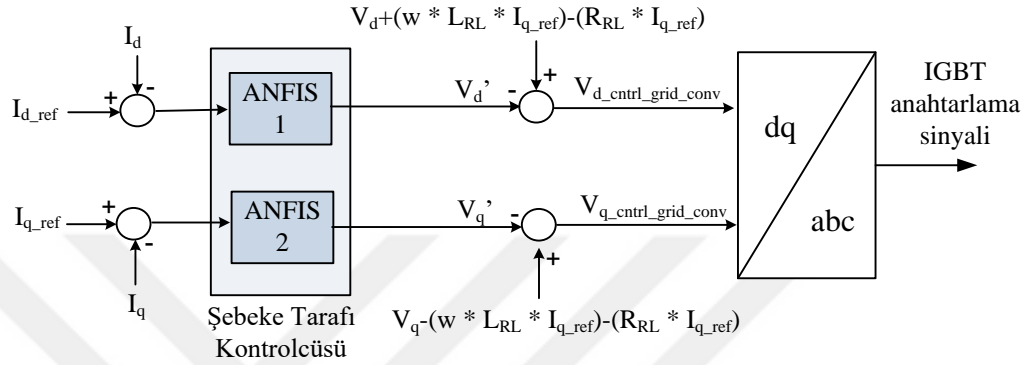
Tablo 7.1. ŞTD için üyelik fonksiyonlara ait hata değeri

MATLAB İsim Kodlaması	Hata Değeri(50 Çevrim)	Hata Değeri (100 Çevrim)
trimf	0,00746127	0,00219516
trapmf	0,01287462	0,00366258
gbellmf	0,00864697	0,00232966
gaussmf	0,00812534	0,00229672
gauss2mf	0,00945262	0,00275659
pimf	0,00988645	0,00298267
dsigmf	0,01418662	0,00386715
psigmf	0,01418662	0,00386715



Şekil 7.13. ŞTD için (a) modelin öğrenme eğrisi, (b) tahmin verisi ile gerçek değer kıyaslanması

Elde edilen sonuçlara bakıldığında, öğrenme hata değeri 0,00219516, test öğrenme hata değeri ise 0,0017419 olarak çıkmıştır. Sistem, öğrenmeyi başarılı bir şekilde tamamlamıştır. Aynı işlem döngüleri I_{qr} , I_{qr_ref} ve $v_{q'}$ değerleri için de yapılmıştır. Daha sonra Şekil 7.14'te, ŞTD'nin MATLAB/Simulink ortamında benzetimi yapılmıştır.



Şekil 7.14. Şebeke tarafı dönüştürücünün ANFIS ile kontrolü

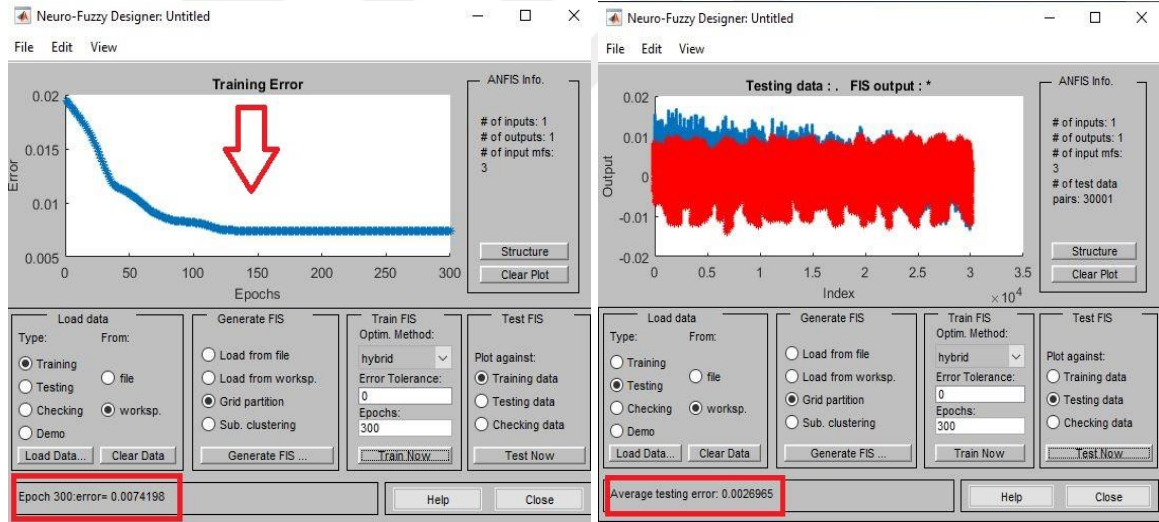
7.2.2. ANFIS ile RTD kontrolü

RTD ile sistem tasarlanırken ŞTD için yapılan tüm işlemler RTD içinde yapılmıştır. Yapılan öğrenme sonucunda en az hata değerine sahip üyelik fonksiyonu belirlenmiştir. Belirlenen üyelik fonksiyonu ile sistem tasarlanmıştır. RTD'de yer alan referans I_{dr} ve I_{dr_ref} farkından oluşan değer giriş değeri, $v_{d'}$ ise çıkış değeridir. Tablo 7.2'de RTD için 200 ve 300 hata çevrim sayısı ile analiz yapılmış 300 çevrim sistem tasarımında kullanılmıştır.

Tablo 7.2'de görüldüğü gibi en düşük hataya ait dsigmf üyelik fonksiyonu, RTD eğitimi için kullanılmıştır. Hata çevrim sayısı 300, hata tolerans değeri 0 olarak girilmiştir. Ayrıca RTD gibi bu sistemde de optimizasyon metodu olarak hybrid seçilmiştir. Şekil 7.16 (a)'da kurulan modele ait öğrenme eğrisi ve (b)'de ise test eğitim verisinin karşılaştırılmış sonucu verilmiştir.

Tablo 7.2. RTD için üyelik fonksiyonlara ait hata değeri

MATLAB İsim Kodlaması	Hata Değeri (200 Çevrim)	Hata Değeri (300 Çevrim)
trimf	0,00987465	0,00778592
trapmf	0,00916642	0,00743871
gbellmf	0,01149874	0,00867384
gaussmf	0,01274611	0,00893705
gauss2mf	0,01064712	0,00856851
pimf	0,00944325	0,00756641
dsigmf	0,00911242	0,00741976
psigmf	0,00911242	0,00741976

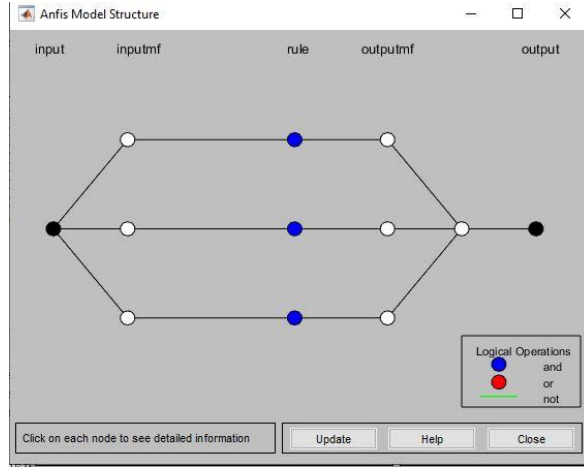


(a)

(b)

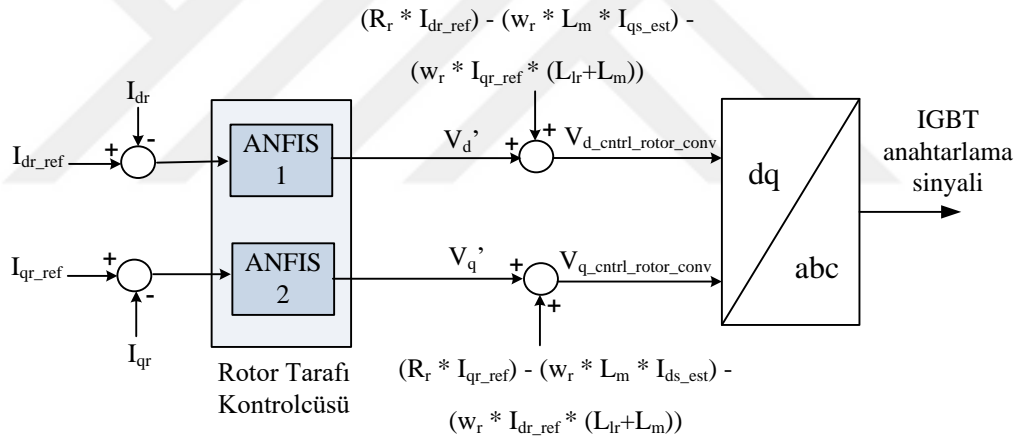
Şekil 7.15. RTD için (a) modelin öğrenme eğrisi, (b) tahmin verisi ile gerçek değer kıyaslanması

Elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde, öğrenme hata değeri 0,00741976, test öğrenme hata değeri 0,0026965 olarak çıkmıştır. Sistem, öğrenmeyi başarılı bir şekilde tamamlamıştır. Aynı işlem döngüleri, I_{qr} , I_{qr_ref} ve v_q değerleri içinde yapılmıştır. Şekil 7.16'de ŞTD ve RTD için ANFIS ağ yapısı verilmiştir.



Şekil 7.16. RTD ve ŞTD için ANFIS ağ yapısı

Şekil 7.16 için detaylı bilgi bölüm 4.3’de verilmiştir. RTD için MATLAB/Simulink ortamında yapılan benzetim şeması Şekil 7.17’de verilmiştir.

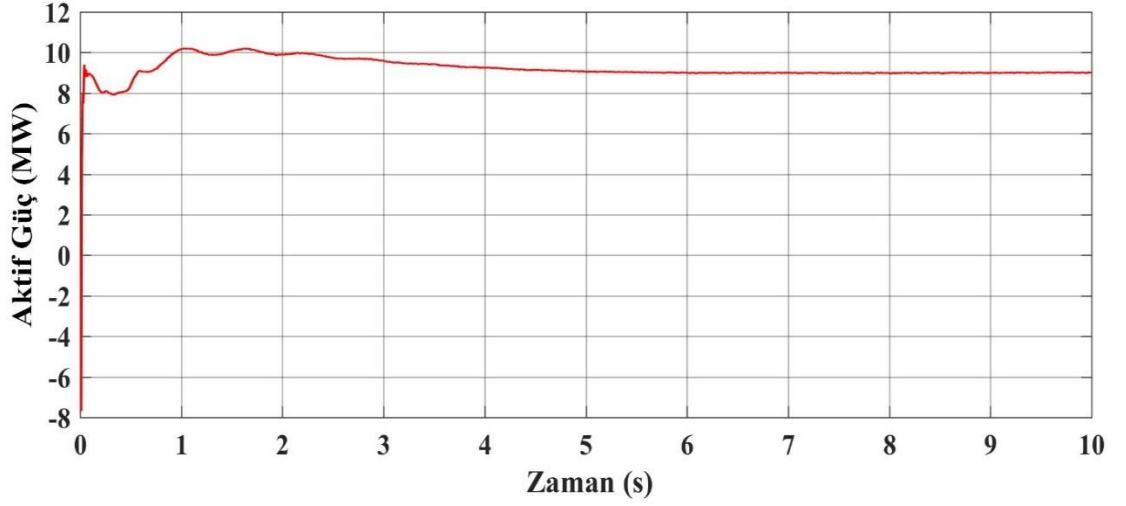


Şekil 7.17. Rotor tarafı dönüştürücünün ANFIS ile kontrolü

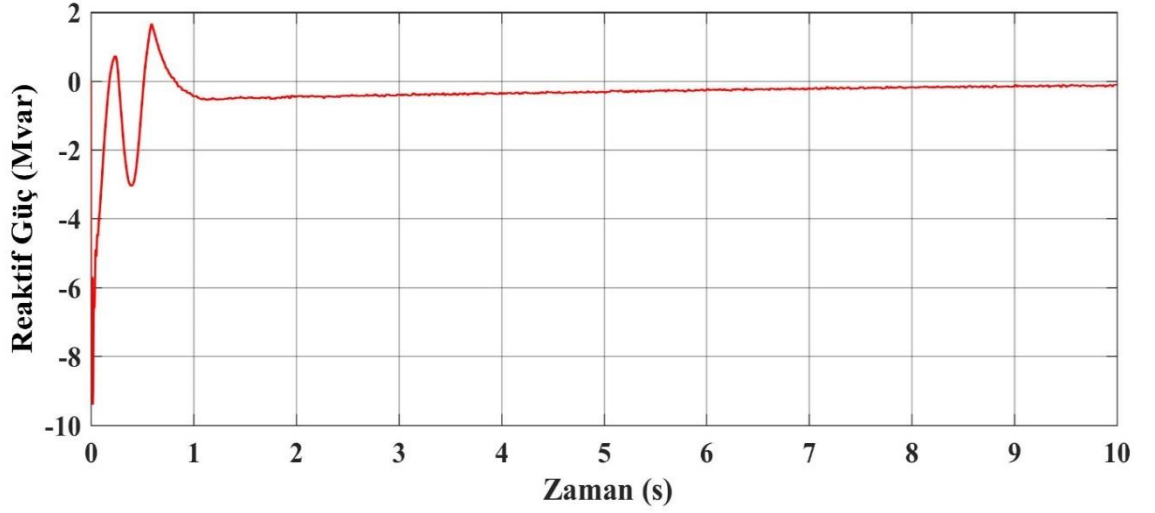
ŞTD ve RTD için tasarlanan ANFIS yapısı sonucunda elde edilen grafikler aşağıda gösterilmektedir. Şekil 7.18’de, ANFIS ile kontrol edilen sistemin aktif güç değişimi verilmiştir. Tasarlanan sistemde aktif güç, 9 MW değerinde sabit tutulmuştur. Şekil 7.19’de ise ANFIS ile kontrol edilen sistemin reaktif güç değişimi verilmiştir. Reaktif güç değişiminde sistem, 0-1 saniye arasında kararsız, 1. saniyeden sonra 0 MVAR olan referans değere yaklaşmıştır.

Şekil 7.20’de ANFIS ile kontrol edilen sisteme ait DA bara gerilim grafiği verilmiştir. DA bara geriliminin 1150 V değerinde sabit tutulduğu görülmektedir. Şekil 7.21 ve

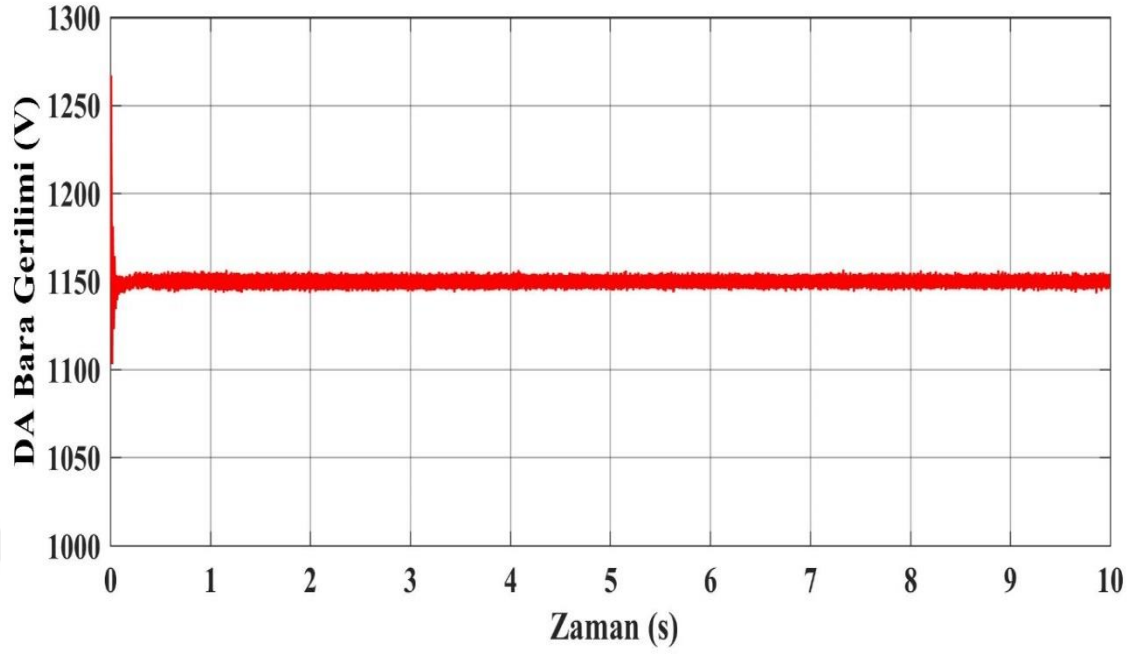
7.23'te yük akımı ve gerilim eğrileri, Şekil 7.22 ve 7.24'te ise yakınlaştırılmış görüntüleri verilmiştir. Yük akımı ve geriliminin tepe tepe değerleri 1, -1 pu arasında değişmektedir.



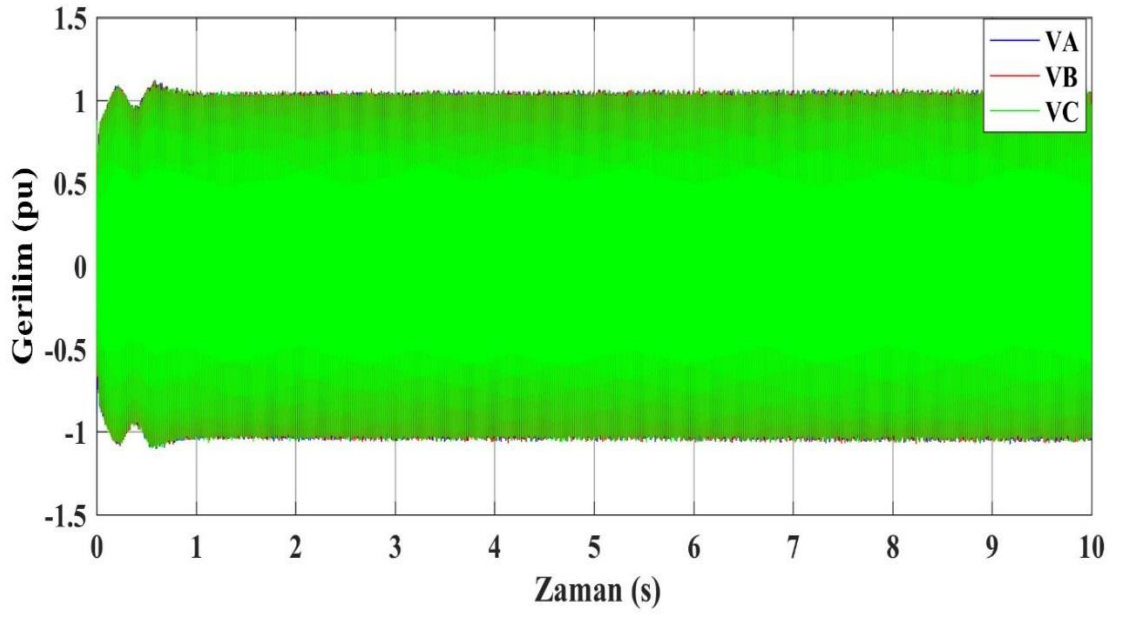
Şekil 7.18. ANFIS ile kontrol edilen sistemin aktif güç değişimi



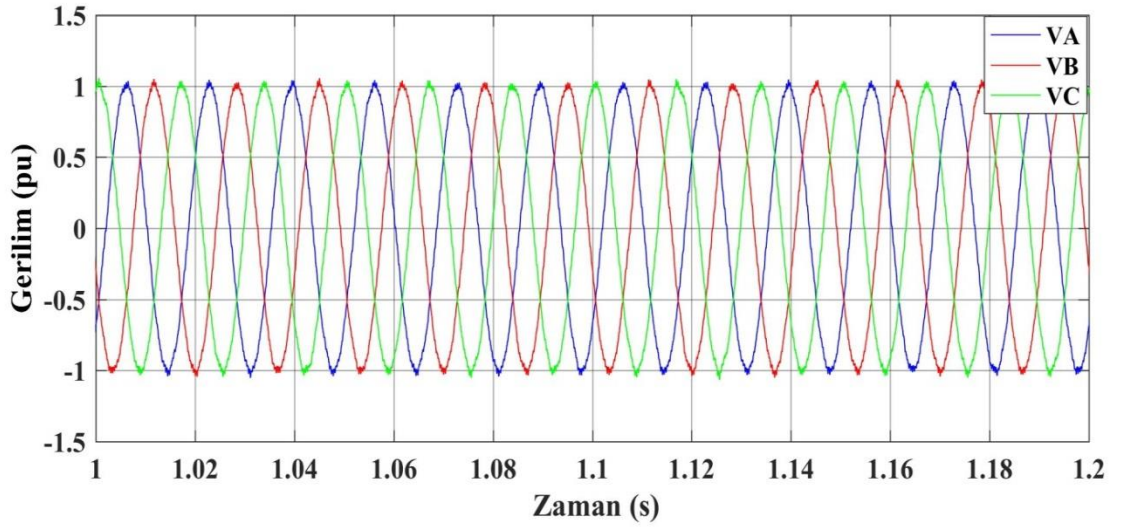
Şekil 7.19. ANFIS ile kontrol edilen sistemin reaktif güç değişimi



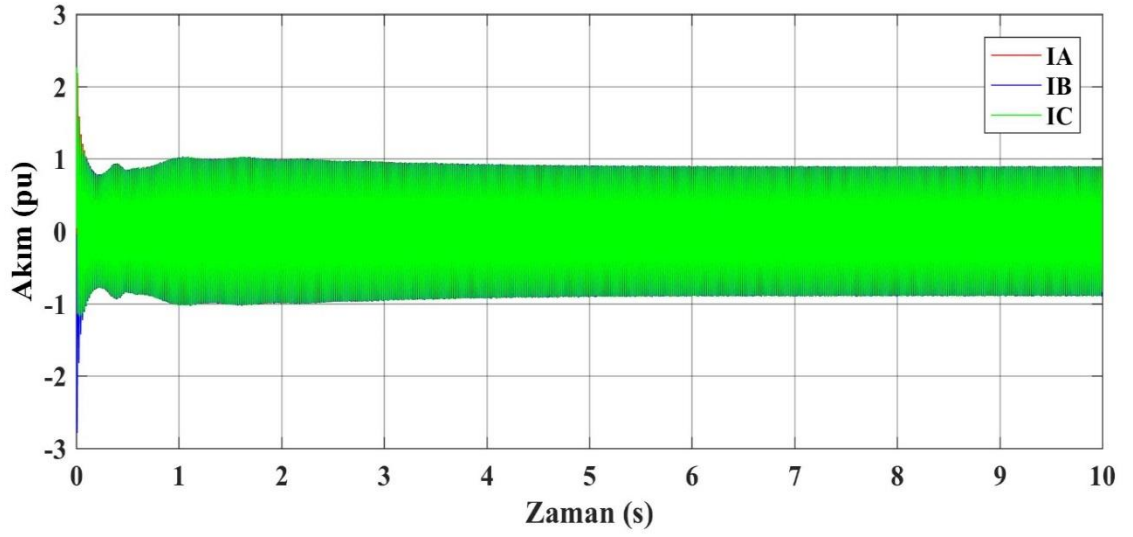
Şekil 7.20. ANFIS ile kontrol edilen sistemin DA bara gerilim değişimi



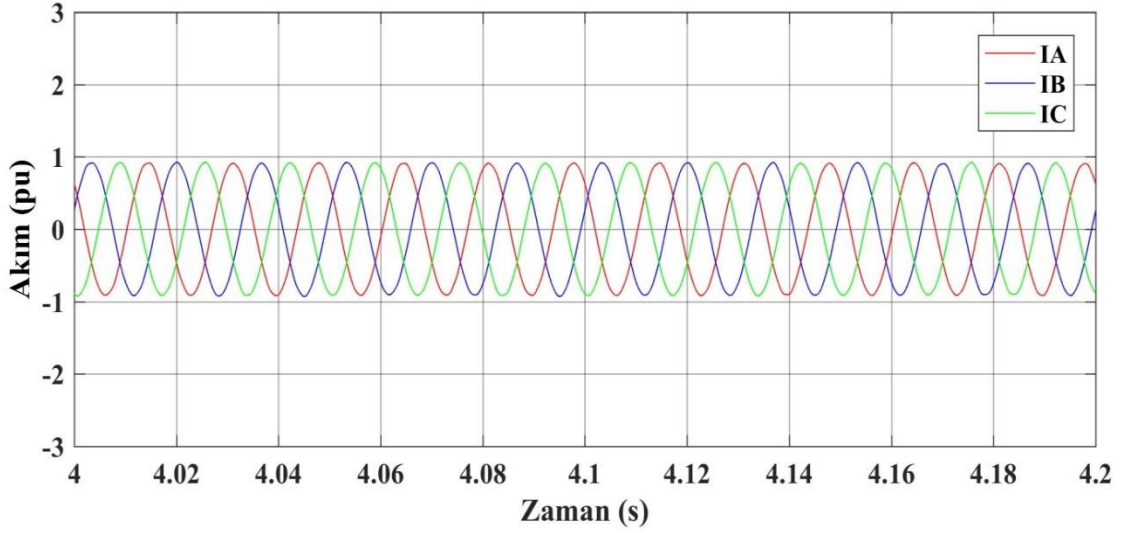
Şekil 7.21. ANFIS ile kontrol edilen sistemin generatör çıkışı hat gerilimleri



Şekil 7.22. ANFIS ile kontrol edilen sistemin generatör çıkışı yakınlaştırılmış hat gerilimleri



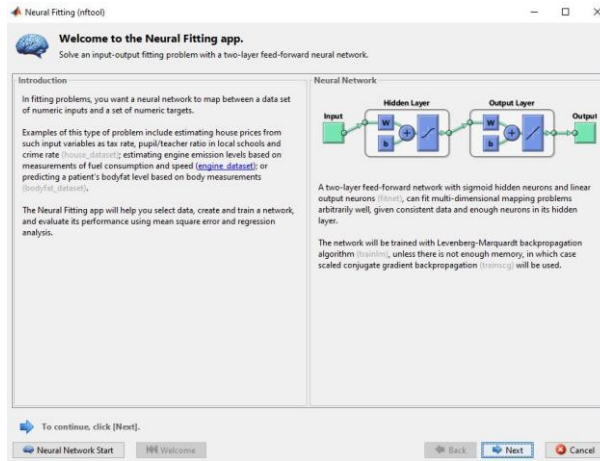
Şekil 7.23. ANFIS ile kontrol edilen sistemin generatör çıkışı hat akımları



Şekil 7.24. ANFIS ile kontrol edilen sistemin generatör çıkışı yakınlaştırılmış hat akımları

7.3.YSA ile rüzgâr türbini dönüştürücü kontrolü

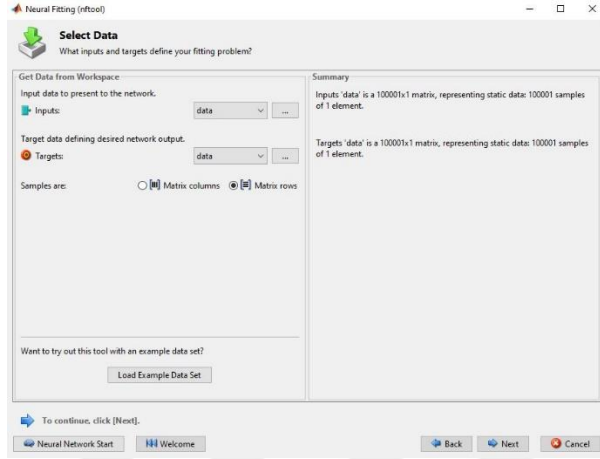
YSA ile ilgili teorik bilgi ve detaylar bölüm 4.2’de verilmiştir. Elde edilen 100001 veri setinin YSA ile eğitimi yapılarak ŞTD ve RTD için MATLAB/Simulink ortamında benzetimi yapılmıştır. MATLAB command window bölümünden “nftool” yazılarak Şekil 7.25’de yer alan sistemin toolbox ekranı açılabilir. Bu sekme de herhangi bir işlem yapılmadan, sadece ön izleme yapılan bir bölümdür. Buradan next tuşuna basıldıktan sonra şekil 7.26’de yer alan arayüz çıkacaktır.



Şekil 7.25. Neural Network Fitting Tool Ön İzleme Ekranı

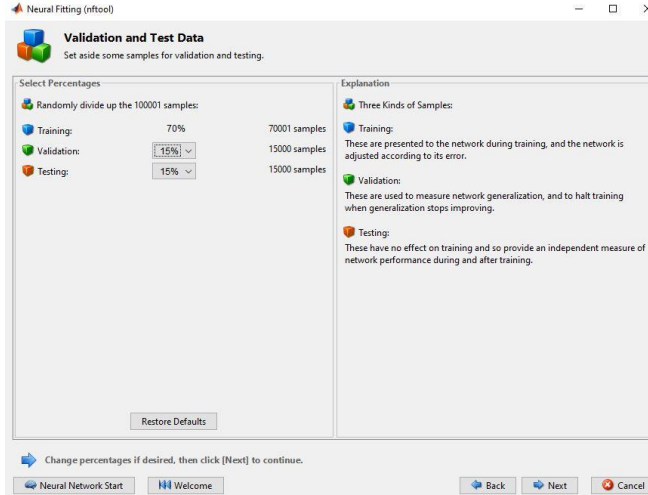
Şekil 7.26’de yer alan ara yüzde, input (bağımlı değişken) ve output (bağımlı değişken) verileri sisteme tanıtılmaktadır. Veri seti tanımlandıktan sonra sağ tarafta yer alan

“summary” bölümünde oluşan matrisler gözükmemektedir. Elde edilen 100001 verinin sisteme tanıtımı yapılmıştır. “Summary” bölümünde görüldüğü gibi 1 değişkenli 100001 veri seti aktarılmıştır.



Şekil 7.26. Veri setinin tanıtımı yapıldığı arayüz

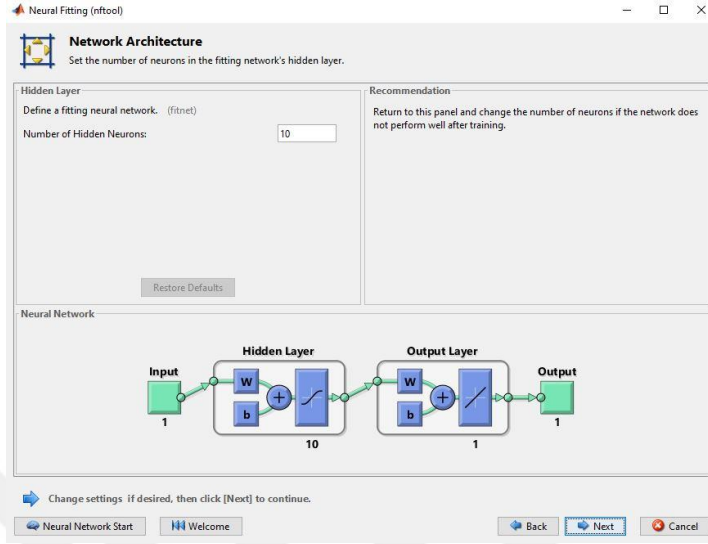
Şekil 7.27’de yer alan arayüzde, YSA veri bölümlendirme ekranı verilmiştir. Bu arayüz de verilerin yüzde kaçınının test (testing), yüzde kaçının doğrulama (validation) ve yüzde kaçının eğitim (train) olarak seçileceği ara yüzdür. Toplamda 100001 adet veri bulunmaktadır. Bu verilerin %70’i eğitim, %15’i test ve %15’i doğrulama için seçilmiştir. Bu oranlar farklı veri setleri için değiştirilebilmektedir.



Şekil 7.27. YSA veri bölümlendirme ara yüzü

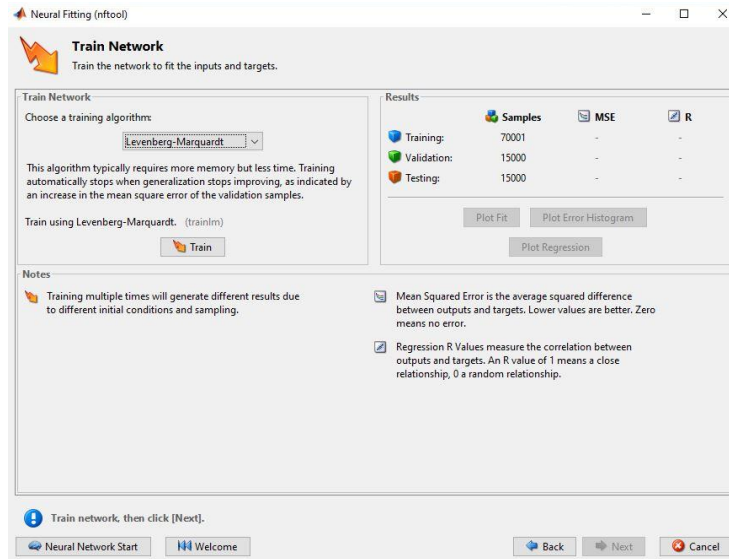
Şekil 7.28’de açılan ara yüzdeki “Number of Hidden Neurons” kısmında gizli nöron sayısı değiştirilebilmektedir. YSA ekranında görüldüğü gibi sistem 1 girdisi olan, 10 gizli nöron ve 1 çıktıdan oluşmaktadır. Transfer fonksiyonu olarak Output Layer’da

Doğrusal (pürelin), Hidden Layer'de Sigmoid kullanılmıştır. Her iki katman içinde birleştirme fonksiyonu toplamadır.



Şekil 7.28. Oluşturulan ağın genel yapısı

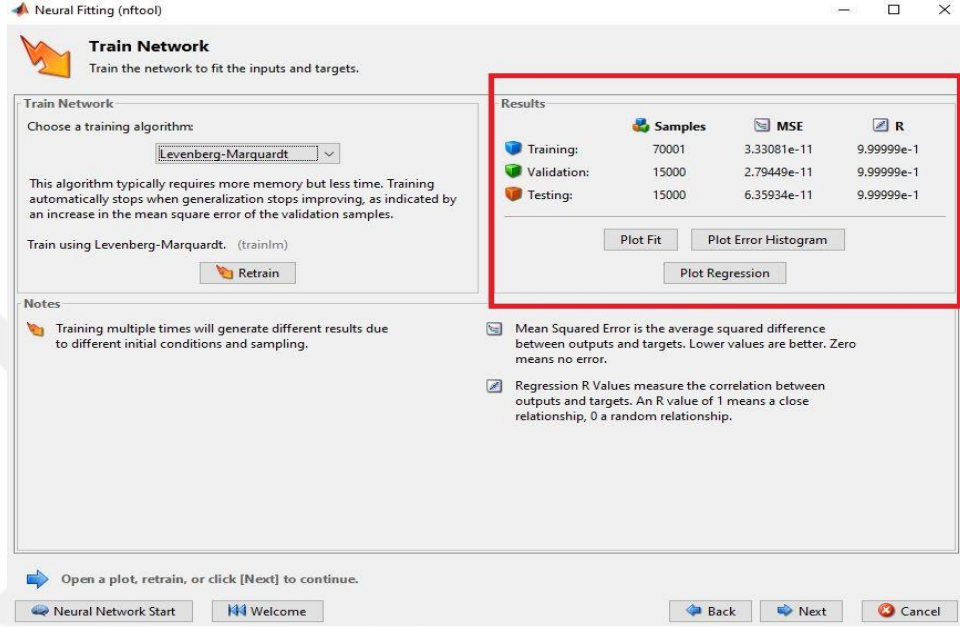
Şekil 7.29'da ağ eğitim ara yüzü verilmiştir. Öğrenme algoritması olarak en iyi olan Levenberg-Marquard (trainlm) seçilmiştir. Başka problemlerde problem türüne göre farklı öğrenme algoritmaları seçilebilmektedir. Train ile öğrenme işlemi başlatıldıktan sonra sistemin ağ yapısı, test ve eğitim sonucu çıkmaktadır. Tasarlanan ağ yapısı, ŞTD ve RTD için ayrı ayrı uygulanarak en iyi eğitim sonuçlarına göre sisteme eklenmiştir.



Şekil 7.29. Ağ eğitiminin başlatılacağı arayüz

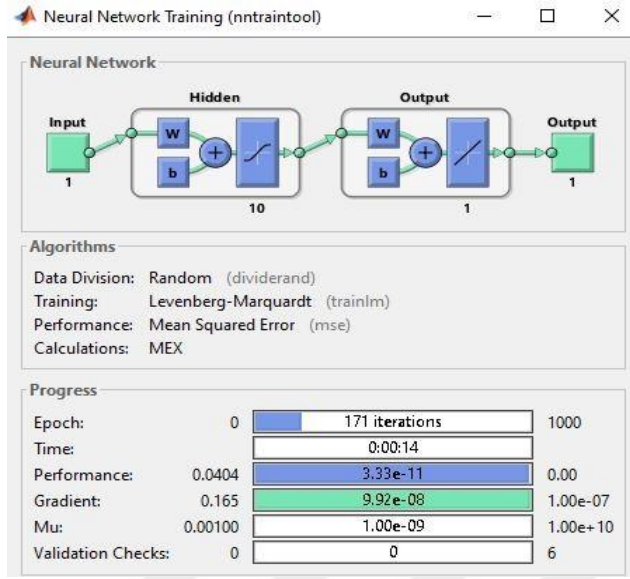
7.3.1. YSA ile ŞTD kontrolü

Önceki başlıkta anlatılan tüm ağ öğrenme süreçleri gerçekleştirilmiş ve ağ öğrenme sonuçları aşağıda verilmiştir. Şekil 7.30'de, ŞTD için oluşturulan ağ yapısının eğitim sonucu verilmiştir.

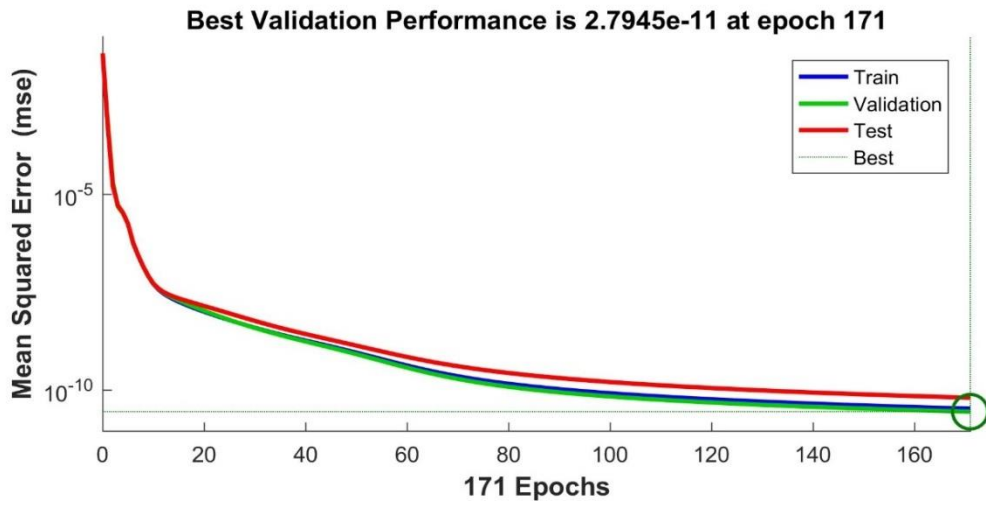


Şekil 7.30. ŞTD için eğitim sonucu

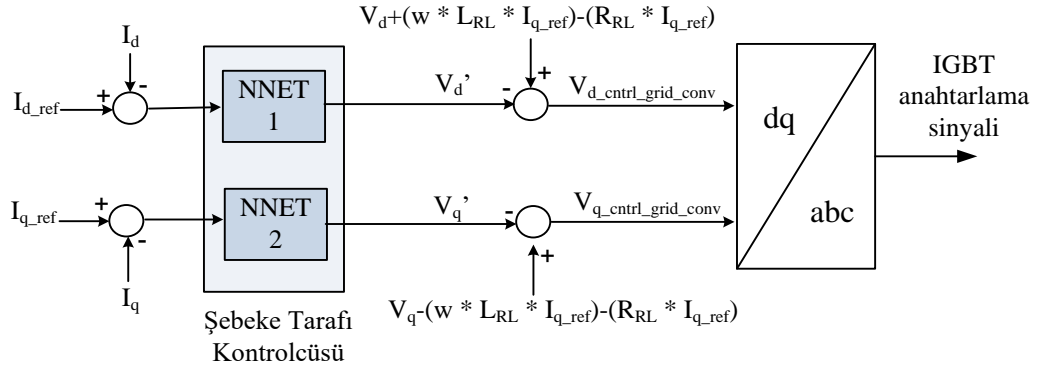
Elde edilen ara yüzde MSE ve R değeri sistem öğrenmesinin sonucunu, öğrenme, test ve doğrulama için ayrı ayrı hesaplamıştır. Şekil 7.31'de ağ öğrenme ara yüzü verilmiştir. Verilen ara yüzde kaçınıcı çevrimde öğrenmenin gerçekleştiği, sistemin öğrenme zamanı ve performansı gösterilmektedir. Şekil 7.32'te performans grafiği verilmiştir. Elde edilen sonuçlarda YSA eğitiminin başarılı olduğu görülmektedir. ŞTD için MATLAB/Simulink ortamında tasarlanan sistem benzetimi Şekil 7.33'te verilmiştir.



Şekil 7.31. YSA öğrenme arayüzü sonuçları



Şekil 7.32. ŞTD için YSA öğrenme performans verileri

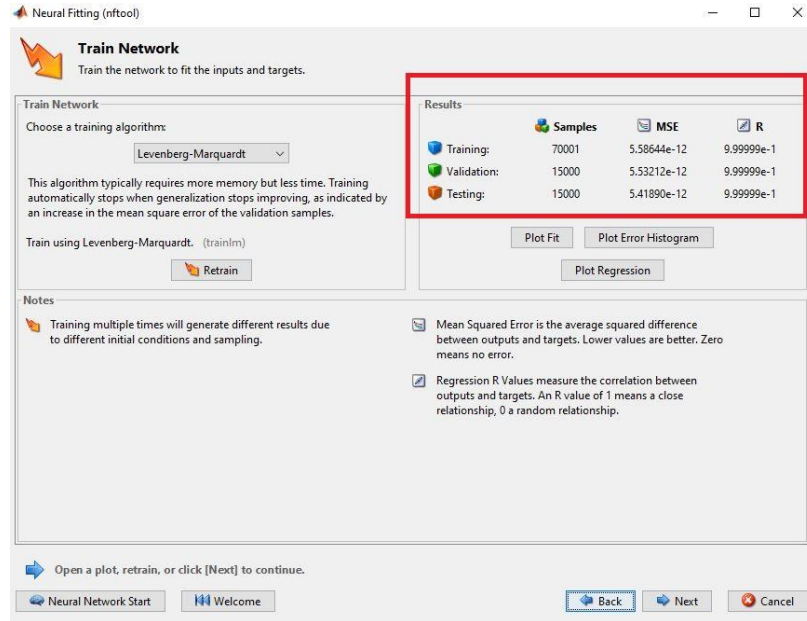


Şekil 7.33. ŞTD'nin YSA ile kontrolü

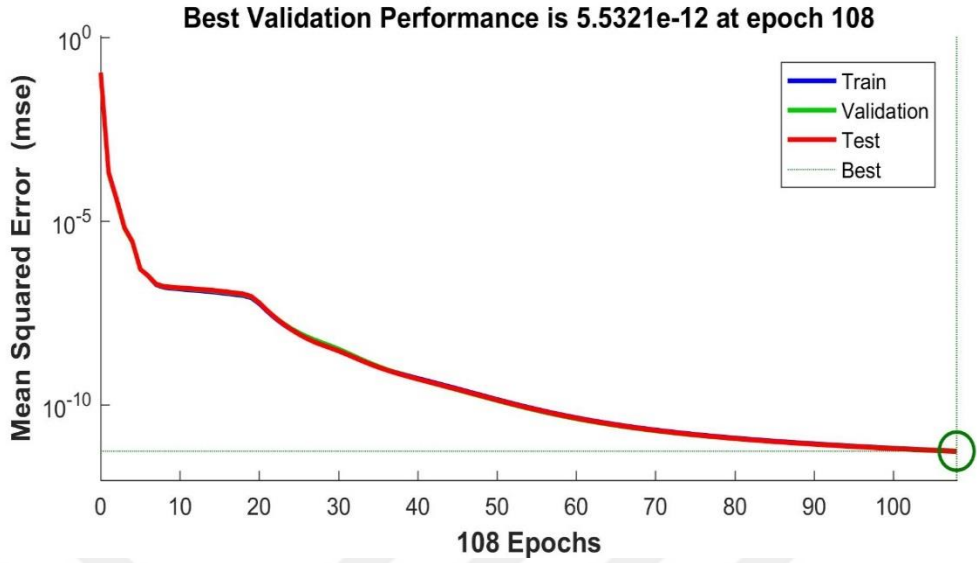
7.3.2. YSA ile RTD kontrolü

RTD için YSA ile tasarlanan sisteme ait eğitim sonuçları Şekil 7.34'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde, öğrenmenin yaklaşık 1 değerinde olduğu ve eğitimin de başarılı olduğu görülmüştür.

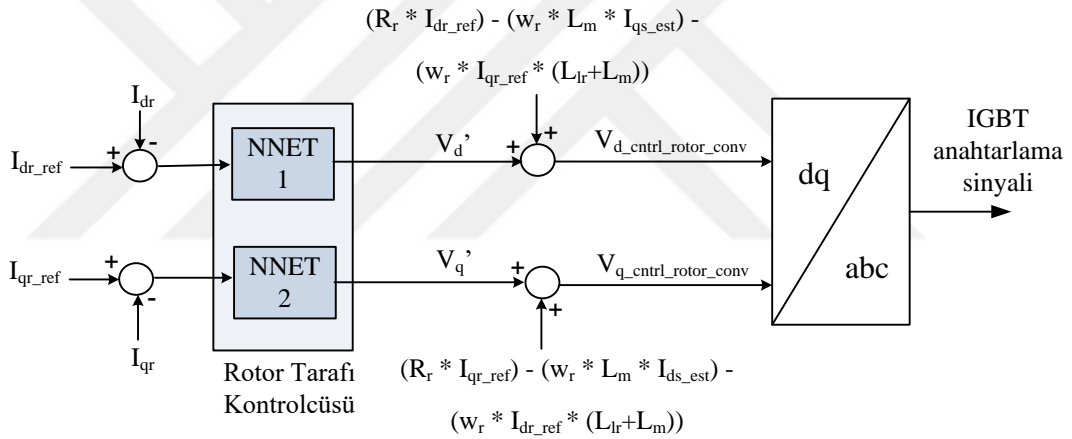
Şekil 7.35'de yer alan grafikten yaklaşık olarak %99'luk bir öğrenme gerçekleştirildiği ve dolayısıyla eğitimin başarılı olduğu görülmektedir. RTD için tasarlanan sistemin MATLAB/Simulink ortamında benzetimi Şekil 7.36'da verilmiştir.



Şekil 7.34. RTD için eğitim sonucu



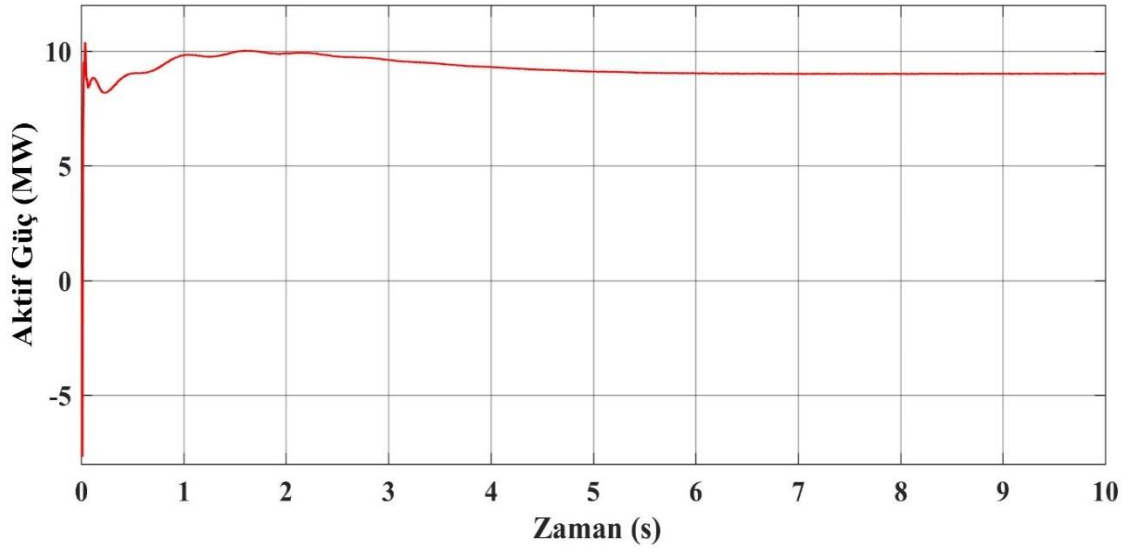
Şekil 7.35. RTD İçin YSA öğrenme performans verileri



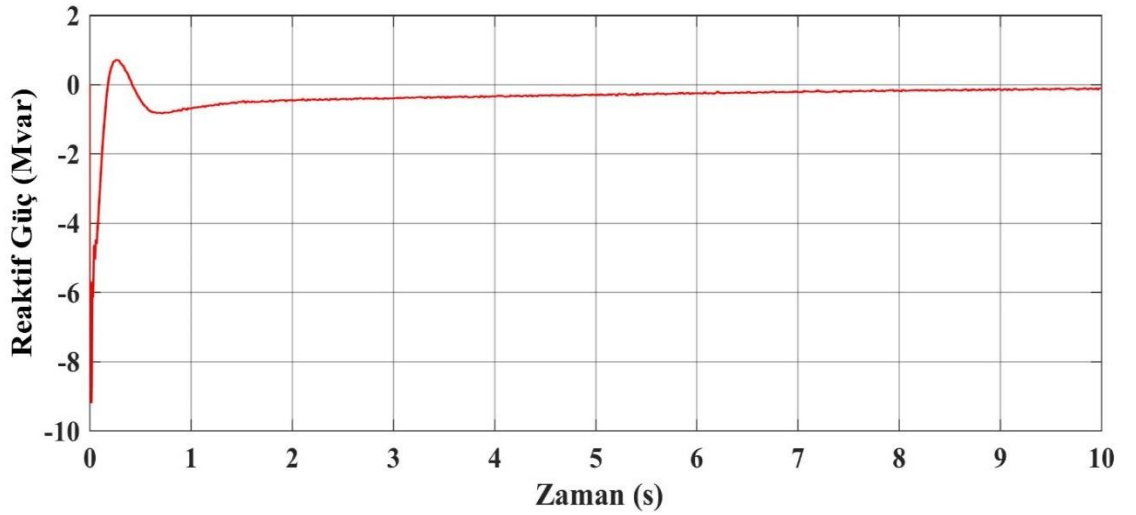
Şekil 7.36. RTD'nin YSA ile kontrolü

MATLAB/Simulink ortamında benzetimi yapılan YSA'ya ait sonuçlar aşağıda verilmiştir. Şekil 7.37'de YSA ile tasarlanan sisteme ait aktif güç değişimi verilmiştir. Aktif gücün zamana göre değişimi incelendiğinde generatör, şebeke sisteminin gereksinimi olan 9MW'lık maksimum güç değerini sağlamaktadır. Şekil 7.38'de ise YSA ile tasarlanan sisteme ait reaktif güç değişimi verilmiştir. Tasarlanan sistemde reaktif güç rotor tarafı dönüştürücü denetim sistemi vasıtası ile 0 MVAR değerinde sabit tutulmuştur. Şekil 7.39'da YSA ile tasarlanan sisteme ait DA bara gerilim değişimi verilmiştir. DA bara gerilim değeri 1150 V değerinde sabit tutulmuştur.

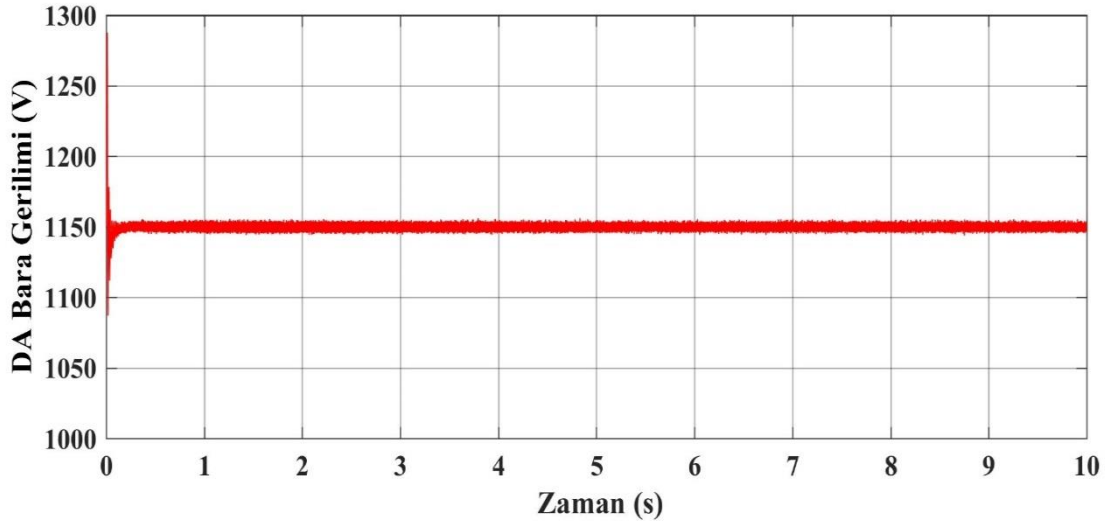
Şekil 7.40 ve Şekil 7.42’te YSA ile tasarlanan sisteme ait hat gerilim ve hat akımı eğrisi, Şekil 7.41 ve Şekil 7.43’te ise yakınlaştırılmış görüntüleri verilmiştir. YSA ile yapılan öğrenme sonucunda yük akımı ve geriliminin tepe tepe değeri ± 1 pu arasında değişmektedir.



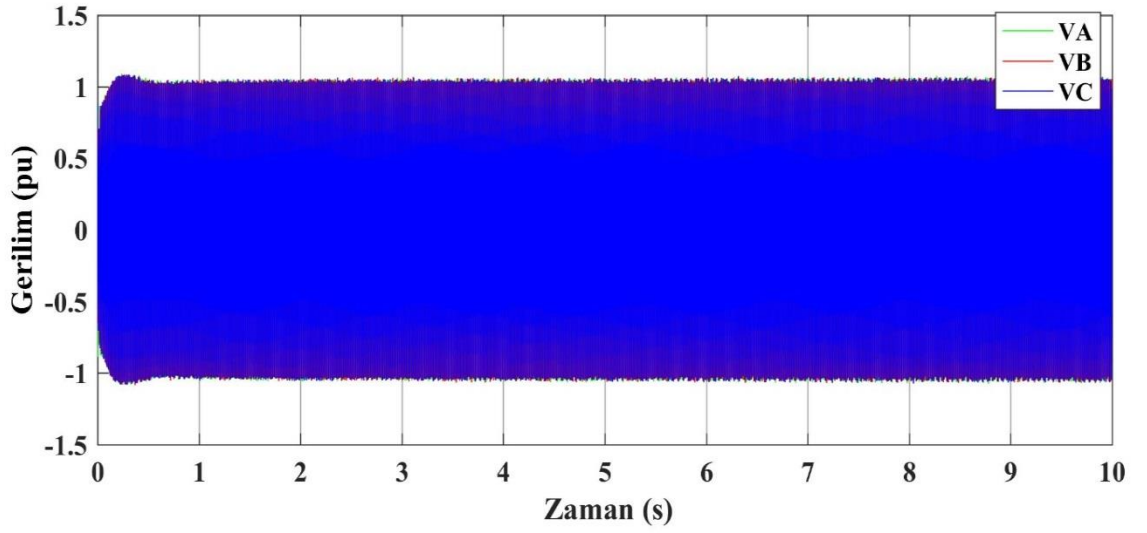
Şekil 7.37. YSA ile kontrol edilen sistemin aktif güç değişimi



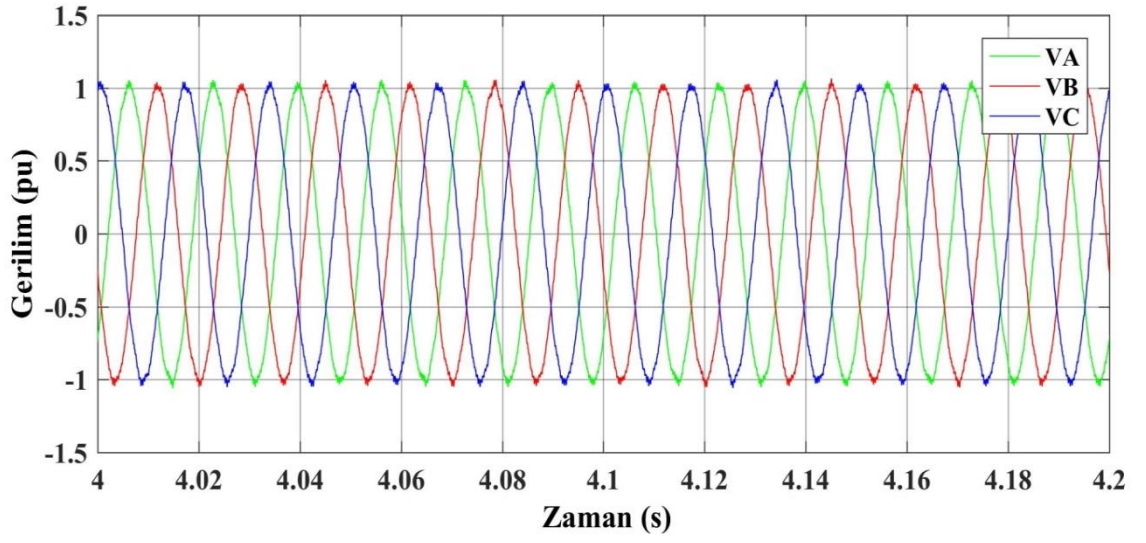
Şekil 7.38. YSA ile kontrol edilen sistemin reaktif güç değişimi



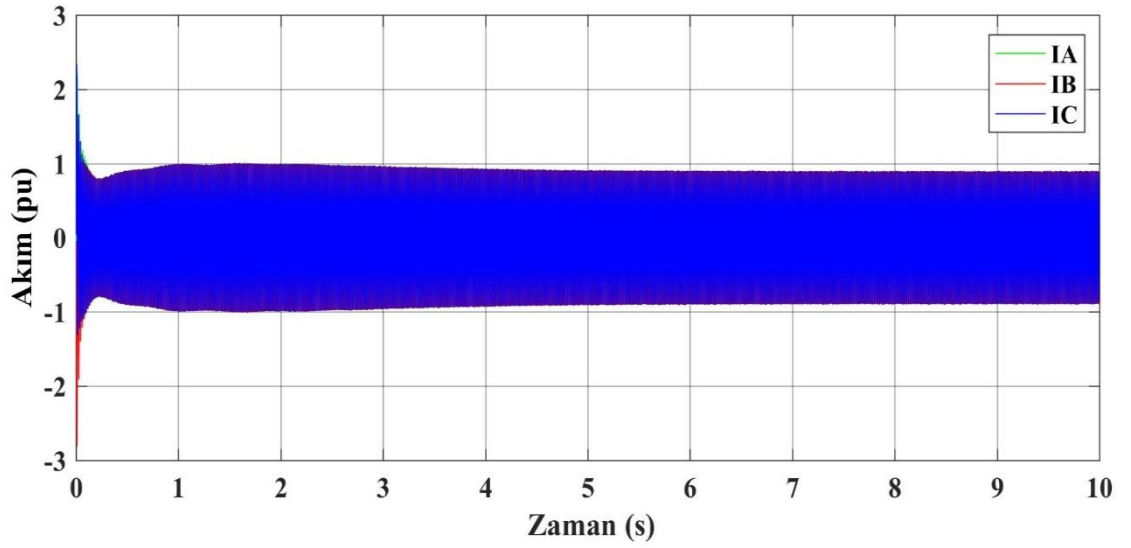
Şekil 7.39. YSA ile kontrol edilen sistemin DA bara gerilim değışimi



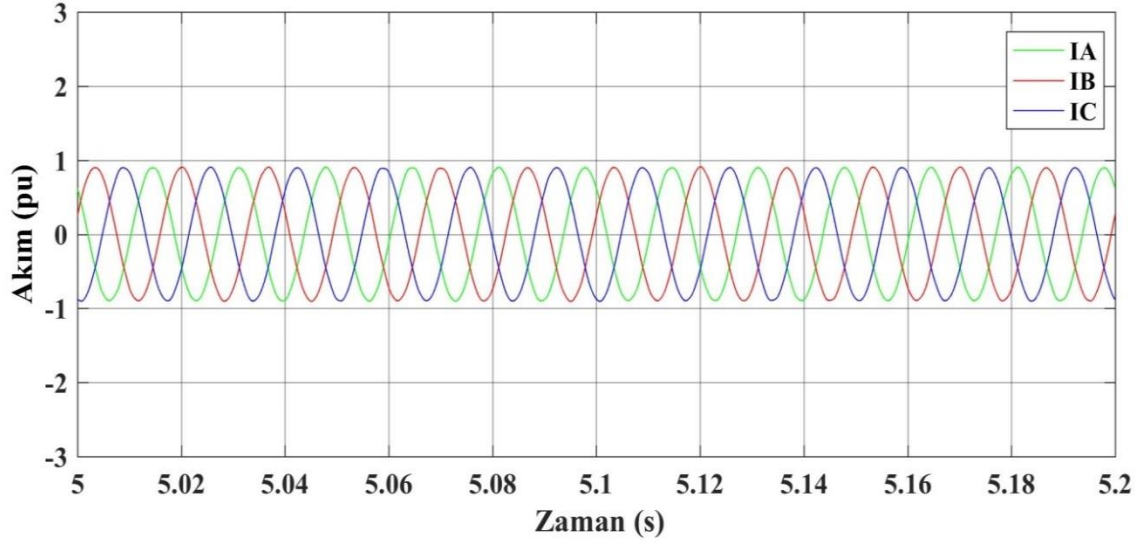
Şekil 7.40. YSA ile kontrol edilen sistemin generatör çıkışı hat gerilimleri



Şekil 7.41. YSA ile kontrol edilen sistemin generatör çıkışı yakınlaştırılmış hat gerilimleri



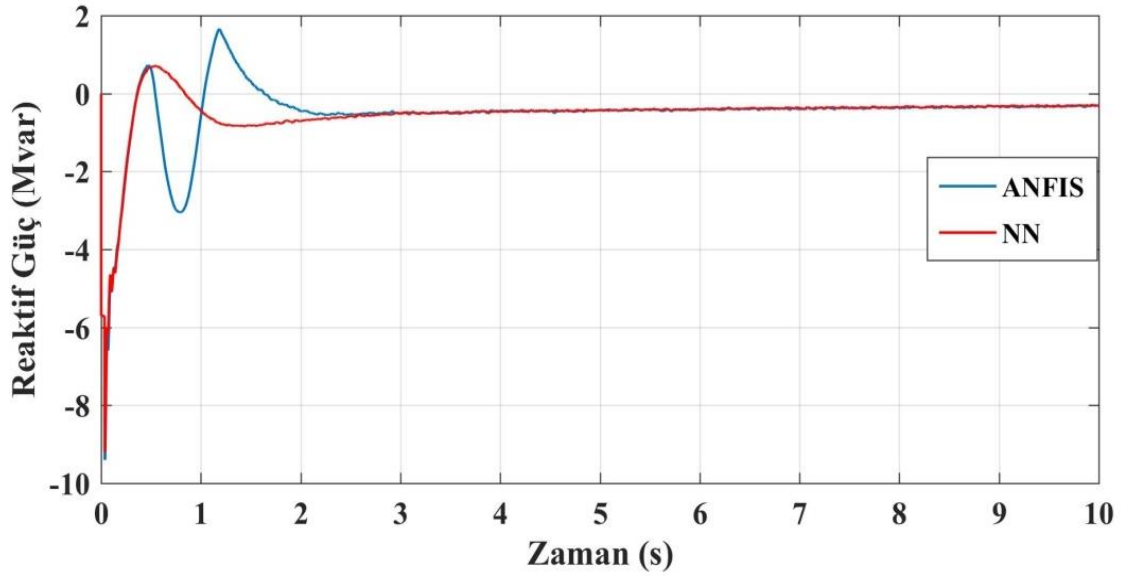
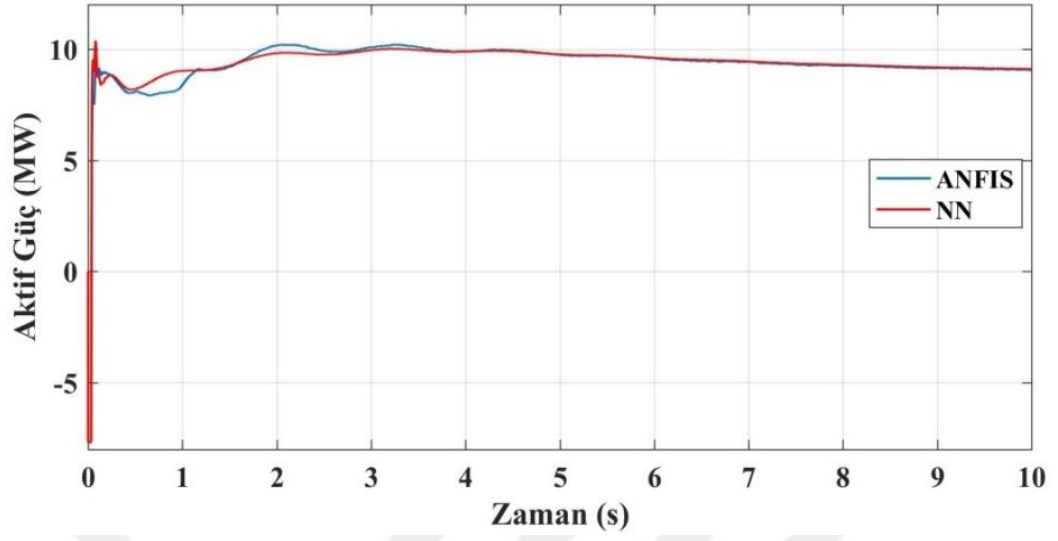
Şekil 7.42. YSA ile kontrol edilen sistemin generatör çıkışı hat akımları

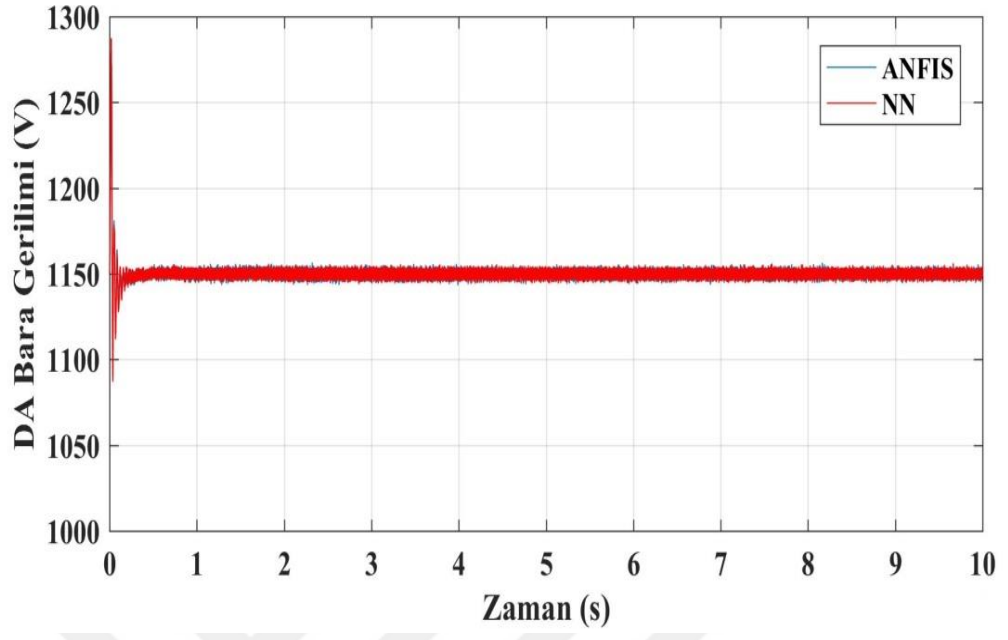


Şekil 7.43. YSA ile kontrol edilen sistemin generatör çıkışı yakınlaştırılmış, hat akımları

Yapılan öğrenmeler sonucunda, YSA ve ANFIS'in karşılaştırılmış grafikleri aşağıda verilmiştir. Şekil 7.44'te YSA, ANFIS'e göre daha az salınım yaparak 9 MW aktif güç seviyesine ulaşmıştır. Şekil 7.45'de reaktif güç karşılaştırılması verilmiştir. 0-2,5 saniye aralığında ANFIS kararsız davranmakta iken, YSA ise daha az salınım yaparak 0 MVAR reaktif güç seviyesine yaklaşmıştır.

Şekil 7.46'da, DA bara gerilimi değişimi verilmiştir. DA bara gerilimi, her iki kontrol sistemi ile yaklaşık olarak aynı değere ulaşmış olup, 1150 V gerilim seviyesinde sabitlenmiştir.





Şekil 7.46. YSA ve ANFIS DA bara gerilimi değişimleri

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada, değişken hızlı rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan ÇBAG ve Rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan kontrol yöntemleri ele alınmıştır. ÇBAG'nin matematiksel modeli çıkartılarak d-q eksen takımındaki eşitlikleri elde edilmiştir.

ÇBAG'nin kontrolü için kullanılan yöntemler verilerek YSA, ANFIS ve PI hakkında bilgi verilmiştir. ÇBAG'nin tasarımı ve analizi Matlab/Simulink ortamında modellenmesi yapılmıştır. Tasarlanan bu rüzgâr santral sistemi, 25kV'luk bir dağıtım sistemine bağlı, altı adet 1.5 MW rüzgâr türbininden oluşmaktadır. Toplam 9MW 'lık bu rüzgâr santrali, 30 km'lik, 25 kV'luk bir besleyici aracılığı ile 120 kV'luk bir şebekeye güç sağlamaktadır.

Tasarlanan bu rüzgâr santral sisteminde şebeke ve rotor tarafı dönüştürücüyü ayrı ayrı kontrol edilmesine olanak sağlayan ardışık dönüştürücü kullanılmıştır. Dönüştürücünün kontrolü için PI kontrol kullanılmıştır. PI kontrolcüden elde edilen en iyi giriş ve çıkış değerleri, YSA ve ANFIS eğitiminde veri seti olarak kullanılmıştır.

YSA ve ANFIS'in öğrenmesi sonucunda elde edilen toolbox tasarlanan rüzgâr santral sistemine eklenmiştir. YSA ve ANFIS ile tasarlanan rüzgâr türbin sisteminin aktif güç, reaktif güç ve DA bara gerilim değerleri karşılaştırılmıştır.

Aktif güç grafiği incelendiğinde her iki kontrolcü pik yapmıştır. 0-1 saniye aralığında beklenen 9 MW seviyesine YSA yaklaşmıştır. 2-5 saniye aralığında YSA sistem tarafından beklenen 9 MW seviyesine oturduğu gözlemlenmiş ANFIS'in kararsızlığı devam etmiştir. 5.saniye'den sonra her iki sistemde 9 MW seviyesinde devam etmiştir. Reaktif güç grafiği incelendiğinde 0-2,5 saniye aralığında ANFIS kararsız davranmakta iken, YSA ise daha az salınım yaparak 0 MVAR reaktif güç seviyesine yaklaşmıştır. DA bara gerilim değişimi her iki kontrolcü içinde yaklaşık olarak aynı değer olan 1150 V seviyesinde devam etmiştir.

Yapılan analizler sonucunda, ANFIS ve YSA yapılan benzetim sonuçları karşılaştırıldığında, YSA ile kontrolüne dayalı ÇBAG için bir şebeke tarafı dönüştürücü ve rotor tarafı dönüştürücü önerilmiştir. Yapılan benzetim sonuçlarında YSA'nın daha

verimli sonuçlar verdiği görülmüştür. Önerilen sistemin değişen yük koşulları altında istikrarlı bir şekilde çalıştırılabileceği gerçekleştirilen analizlerle doğrulanmıştır.



KAYNAKLAR

- 1- Dulkadiroğlu, H., “Türkiye’de Elektrik Üretiminin Sera Gazı Emisyonları Açısından İncelenmesi”, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1), s.67-74, 2017.
- 2- Yaylacı, E. K., “Otonom bir Rüzgâr Enerji Sistemi için Örnek Test Düzenine Gerçekleşmesi”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknoloji*, 7(1), s.175-183, 2019.
- 3- Yağcı, E., “Rüzgâr Hızı Yükseltmelerinde Kullanılan Farklı Yöntemlerin Karşılaştırılması ve Hata Analizleri, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü*”, *yüksek lisans tezi*, s. 69, İstanbul, 2013
- 4- İnternet: “Teiaş” <https://www.teias.gov.tr/>
- 5- Dicle, M., “Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri ve Özel Güç Cihazlarında Kullanılan Evirici Yapılarının İncelenmesi, *Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *yüksek lisans tezi*, s. 107, Düzce, 2019
- 6- Ertay, M. M., Aydoğmuş, Z., “Güç Sistemlerinde Facts Uygulamaları”, *SDU International Technologic Science*, 4(2), s.40-58, 2012.
- 7- Hingorani, G. N., Gyugyi, L. “Understanding FACTS: Concepte and Technology of Flexible AC Transmission Systems”. s. 425-429, *Wiley-IEEE Press*, 2000.
- 8- Çalgan, H., “Çift Beslemeli Asenkron Generatörün PI ve Adaptif Kayan Kip Güç Kontrolü, *Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *yüksek lisans tezi*, s. 79, Balıkesir, 2016
- 9- Bayhan, S., “Çift Beslemeli Asenkron Generatör için Etkin bir Kontrolcü Tasarımı, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *doktora tezi*, s. 132, Ankara, 2012
- 10- T. Ghennam, E. M. Berkouk, and B. François, “Modeling and control of a doubly fed induction generator (dfig) based wind conversion system,” *POWERENG 2009, 2nd Int. Conf. Power Eng. Energy Electr. Drives Proc.*, s.507-512, Lisbon, Portugal, 2009
- 11- D. Kairous and R. Wamkeue, “DFIG-based fuzzy sliding-mode control of WECS with a flywheel energy storage,” *Electr. Power Syst. Res.* 93, s.16-23, 2012.

- 12- Akyazı, Ö., “Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinleri İçin Tasarlanan Güç Elektroniği Sisteminin Akıllı Kontrolü, *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Doktora tezi*, s. 133, Trabzon, 2015
- 13- Toklu, M. “Rüzgâr Enerjisi Ve Elazığ Şartlarında Bir Rüzgâr Santrali Tasarımı, *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *yüksek lisans tezi*, s. 98, Elazığ, 2002
- 14- Elibüyük, U., Üçgül, İ., “Rüzgar Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgar Enerjisi Depolama yöntemleri”, *Süleyman Demirel Üniversitesi YEKARUM e-Dergi*, 2(3), s.1-14, 2014.
- 15- Ayan, S., “Sezgisel Optimizasyon Algoritması Kullanılarak Hibrit(Fotovoltaik-Rüzgâr) Enerji Sistemi İçin Boyut Optimizasyonu, *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 123, Nevşehir, 2019
- 16- İrgan, H., “Enerji Hattı İletimiyle Akıllı Şebekeler İçin Uzaktan İzleme Sistemi Tasarımı, *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *yüksek lisans tezi*, s. 98, Elazığ, 2002
- 17- Güler, B., “Dikey Eksenli Örnek Rüzgâr Türbini Tasarımı, *Eskişehir Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 75, Eskişehir, 2019
- 18- Canpolat, Ş., “Rüzgâr Enerjisi ve Isparta Şartlarında Prototip Bir Rüzgâr Türbini Tasarımı, *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 66, Isparta, 2013
- 19- Kurt, G., “Dişli Kutulu ve Dişli Kutusuz Rüzgar Türbini-Generatör Sistemlerinin Karşılaştırılması”, *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, s. 112-115, Elazığ, Türkiye, 2011.
- 20- Emniyetli, G., “Evsel Elektrik İhtiyacının Karşılınması İçin Rüzgâr Türbini Tasarımı, *Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 134, Edirne, 2007
- 21- Bildirçin, H. B., “Rüzgâr Türbin Teknolojileri ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi Kaynağının Genel Durumu, *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 56, Osmaniye, 2018
- 22- Nurbay, N., Çınar, A., “Rüzgar Türbinlerinin Çeşitleri ve Birbirleriyle Karşılaştırılması”, *III. Yenilenebilir Enerji Sempozyumu*, s. 1976-1980, Mersin, Türkiye, 2005

- 23- Afroz, Z., Islam, Q., Ali, M., “ Aerodynamic studies on multi-bladed S-shaped vane type rotor” *Proc. 2nd Int. Conf. Dev. Renew. Energy Technol. ICDRET 2012*, s. 134-136, 2012.
- 24- Kısar, O. A., “Rüzgardan Enerji Üretimi ve Rüzgar Türbinlerinin Evrimi”, *V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, s. 17-19, Diyarbakır, Türkiye, 2009
- 25- Ulutaş, A., Duru, H.T., “Variable-Speed Direct-Drive Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Turbine Modeling and Simulation”, *Kocaeli Journal of Science and Enineering*, 2(1), s.21-27, 2019.
- 26- Chapman, J. S.,”Elektrik Makinalarının Temelleri”, *Çağlayan Kitabevi Ltd. Şti.*, s.746, İstanbul, 2007
- 27- Küçük, B. “Pnömatik Motor İle Tahrik Edilen DA Generatörü Çıkış Geriliminin Kontrolü, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 92, Ankara, 2007
- 28- Ayaz, M. S. “Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Generatör Tiplerinin Akıllı Şebekeler Üzerinde Etkileri, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 95, Ankara, 2016
- 29- Uyar, M., Yıldırım, S., Gençoğlu, M. T. “Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri İçin Generatör Sistemleri”, *III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, s. 173-178, Mersin, Türkiye, 2005
- 30- Varan, M., Öylek, İ., Dereli, S., “Üç Fazlı Senkron Bir Makinenin Değişken Yük Durumları İçin Geçici Hal Sonlu Eleman Analizi”, *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi* 6(1), s.59-72, 2017.
- 31- Li, H., Chen, Z., “Overview of Different Wind Generator Systems and Their Comparisons”, *IET Renewable Power Generation*, 2(2), s.123-138, 2008.
- 32- Shailesh, T., “A Case Study of Different Generator Topologies Used in Wind Turbine Applications, *National Institute of Technology Roukela*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 27, 2014
- 33- Madanı, N., “Design of a Permanent Magnet Synchronous Generator for a Vertical Axis Wind Turbine, *KTH Royal Institute of Technology*,”, *Yüksek lisans tezi*, s. 84, Stockholm, 2011

- 34- Kütük, O., “Rüzgar Türbinleri İçin Doğrudan Sürürlü Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör Tasarımı, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 89, İstanbul, 2011
- 35- Tınç, N. S. “Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Sabit Mıknatıslı Senkron Generatörün Back-to- Back Dönüştürücü ile Hız Kontrolü, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 97, İstanbul, 2013
- 36- Karabacak, M., Kılıç, F., “Sabit Mıknatıslı Senkron Generatörlü Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinin Dayanıklı Hibrit Sensörsüz Denetimi”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 23(2), s.126-132, 2017.
- 37- Ak, M. A., “Rüzgar Santrallerinin Şebekeye Entegrasyonu ve Şebeke Üzerine Etkileri, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 85, İstanbul, 2011
- 38- Atazhanov, B., “Rüzgar Türbini Sistemlerinde Anlık Değişen Rüzgar Verilerine Göre Güç-Enerji Kalitesinin İncelenmesi, *Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 100, Kayseri, 2019
- 39- Dursun, E., Kakilli, A., “Türkiyede Kurulu Rüzgar Santrallerinde Kurulan Generatörlerin Karşılaştırılması”, *Türkiye 11. Enerji Kongresi ve Sergisi*, s. 21-23, İzmir, Türkiye, 2009
- 40- Desena, G., “Summary of Simulation Studies of Variable Slip Induction Generators, *Uppsala Universitet, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 21, Uppsala, 2016
- 41- Apaydın, M., Üstün, A. K., Kurban, M., Başaran. F., “Rüzgar Enerjisinde Kullanılan Asenkron Jeneratörler”, *RÜGES 2009 II. Rüzgar Enerjisi sempozyumu*, s. 1-5, Samsun, Türkiye, 2009
- 42- Sandhya. T., Chandan, K. S., “Control and operation of opti-slip induction generator in wind farms,” *2011 Int. Conf. Comput. Commun. Electr. Technol. ICCET 2011*, s. 450-454, 2011.
- 43- Gürleyen, H., “Şebekeye Bağlı Çift Beslemeli Asenkron Generatörlerde Güç Kontrolünün İncelenmesi, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 102, İstanbul, 2012

- 44- Erdem, İ. “Çift Beslemeli Asenkron Generatör Tabanlı Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinlerinin Kontrolü, Tasarımı ve Analizi, *Munzur Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 97, Tunceli, 2019
- 45- Hurma, H. N., “PID Kontrolör ve PLC Uygulaması, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 71, Tunceli, 1998
- 46- Çelikel, H. K. “Taşıt Süspansiyon Sistemlerinin Bulanık Mantık Ayarlı PID Kontrolü, *İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 97, İstanbul, 2019
- 47- Cengiz, H., “Ters Cevaplı Sistemler İçin Optimal PI/PID Tasarımı, *Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 93, Diyarbakır, 2019
- 48- Altınsoy, M., “Uzun Dönem Rüzgar Hızı Tahmininde Yapay Sinir Ağlarının Kullanımı ve Performans İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 69, Ankara, 2019
- 49- Özaydın, G., “Türkiye Elektrik Enerjisi Talebinin Yapay Sinir Ağları Modeli İle Tahmini, *İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 106, İzmir, 2019
- 50- Demir, C., “Doğrusal Olmayan Temel Bileşenler Analizi İçin Yapay Sinir Ağları Yaklaşımı, *Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü*”, *Doktora tezi*, s. 74, Van, 2019
- 51- Yanık, E., “İş Makineleri Sektöründe Yapay Sinir Ağları Talep Tahmini Uygulaması, *Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 100, Kırıkkale, 2019
- 52- Doğruyol, M. B., “Endüstri 4.0 Perspektifinde Yapay Sinir Ağları Kontrollü Reaktif Güç Kompanzasyonu, *Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 76, Şanlıurfa, 2020
- 53- Öztemel. E., “Yapay Sinir Ağları”, *Papatya Bilim Yayınevi Ltd. Şti.*, s.232, İstanbul, 2016
- 54- Karahan, M., “İstatiksel Tahmin Yöntemleri: Yapay Sinir Ağları Metodu İle Ürün Talep Tahmini Uygulaması, *Selçuk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü*”, *Doktora tezi*, s. 79, Konya, 2011
- 55- Tebelskis, J., “Speech Recognition Using Neural Networks , *Carnegie Mellon University, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 180, Pittsburgh, 1995

- 56- Adıyaman, F., “Talep Tahmininde Yapay Sinir Ağlarının Kullanılması, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 98, İstanbul, 2007
- 57- Talay, T., “Eksenel Akıllı Kalıcı Mıknatıslı Motor Tasarımı Ve Yapay Sinir Ağlarıyla Optimizasyonu, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 91, İstanbul, 2019
- 58- Rajpal. P. S., Shishodia, K. S., Sekhon G, S., “An artificial neural network for modeling reliability, availability and maintainability of a repairable system”, *Reliab. Eng. Syst. Saf*, 91(7), s. 809-819, 2006.
- 59- Güngör, E., “Yapay Sinir Ağları Yardımı İle Makine Arızalarının Önceden Tahmin Edilmesi, *Kocaeli Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 74, Kocaeli, 2007
- 60- Tepecik, C., “DC-DC Çeviriciler İçin Adaptif Ağ Yapısına Dayalı Bulanık Mantık Kontrolcü Tasarımı, *İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 74, Malatya, 2008
- 61- Doğan, O., “Talep Tahmininde Sinirsel Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Yöntemleri (ANFIS) Kullanımı Ve Yalın Yapay Sinir Ağı Metodu İle Karşılaştırılmalı Bir Uygulama, *Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü*”, *Doktora tezi*, s. 108, İzmir, 2012
- 62- Elmas. Ç., “Bulanık Mantık Denetleyiciler”, *Seçkin Yayıncılık Ltd. Şti.*, s.230, İstanbul, 2003
- 63- Boyraz, D., Hibrid Elektrikli Araçlarda Bulanık Mantık Tabanlı Enerji Yönetimi “, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 103, Sakarya, 2019
- 64- Çakan, İ., “Adaptif Ağ Yapısına Dayalı Bulanık Çıkarım Sisteminin (ANFIS) Ultrasonik Motor Üzerinde Uygulaması, *İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 78, Malatya, 2013
- 65- Öter, A., Aydoğan, O., Tuncel, D., “Tıkayıcı Uyku Apnesinin Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi İle Sınıflamasında Üyelik Fonksiyonlarının Etkisinin İncelenmesi”, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(2), s.74-80, 2017.
- 66- Jang, J. S. R., “ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System”, *IEEE Transactions on Systems*, 23(3), s. 665-685, 1993.

- 67- Çoşkun, İ., Saygın, A., Dursun, M., “Matris Konverter Uygulaması”, *Politeknik Dergisi*, 11(3), s. 193-198, 2008.
- 68- Ulutaş, A., “Değişken Hızlı Doğrudan Tahrikli Miknatıs Uyarmalı Senkron Generatörlü Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sisteminin Modellenmesi Ve Benzetimi, *Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek lisans tezi*, s. 99, Kocaeli, 2019
- 69- Garces, A., Molinas, M., “Comparative investigation of losses in a reduced matrix converter for off-shore wind turbines”, 5th. *IET international Conference on power electronics, Machines And Publications*, s. 1-6, 2010.
- 70- Melicio, R., Mendes, V. M. F., Catalao, J. P. S., “Power converter topologies for wind energy conversion systems: Integrated modeling, control strategy and performance simulation”, *Renewable Energy*, 35(10), s. 2165-2174, 2010.
- 71- Karaca, H., Akkaya, R., “Doğrudan Transfer Fonksiyonu İle Matris Dönüştürücülerin Modellesnmesi Ve Simülasyonu”, 6. *Uluslararası Elektrik Mühendisliği Konferansı*, s.1-11, 2008.
- 72- Hansen, L. H., Helle, L., Blaabjerg, F., Ritchie, E., Munk-Nielsen, S., Binder, H. W., Sorensen, P. E., Bak-Jensen, B., “Conceptual Survey Of Generators And Power Electronics For Wind Turbines”, *Forskningscenter Risoe Risoe-R No:1205(EN)*, s. 109, 2001.
- 73- Gül, O., “Üç Fazlı Gerilim Kaynaklı DA/AA Eviriciler İçin Kesir Dereceli Kontrol Sistemi Tasarımı, *İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Doktora tezi*, s. 114, Malatya, 2020
- 74- Kocalmış Bilhan, A., Sünter, S., “3 Fazlı Evirici Devresi İçin SDGM, SHEDGM, HIDGM ve UVDGM Tekniklerinin Karşılaştırılması”, *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(1), s.100-110, 2018.
- 75- Kocalmış Bilhan, A., “Bölge ve Sektör Tespitinde Yapay Sinir Ağları Kullanan Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyon Kontrollü Kaskat Bağlı Üç Seviyeli Evirici Tasarımı, *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Doktora tezi*, s. 88, Elazığ, 2012
- 76- Siğergök, B., “Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyon Denetimli Aktif Filtre Devrelerinin Modellenmesi ve Benzetimi, *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek Lisans tezi*, s. 69, Elazığ, 2009

- 77- Göktaş, T., Murat, E., Sünter, S., “DSC Tabanlı Uzay Vektör Darbe Modülasyon Tekniğini Kullanan Kompakt Asenkron Motor Sürücüsünün Geliştirilmesi”, *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, s.19-23, 2011.
- 78- A. Barkia, N. Bouchiba, S. Sallem, L. Chrifi-Alaoui, S. Drid, M. B. A. Kammoun, “A Comparative Study Of PI And Sliding Mode Controllers For Autonomous Wind Energy Conversion System Based On DFIG”, *2016 17th Int. Conf. Sci. Tech. Autom. Control Comput. Eng. STA 2016 - Proc.*, s. 612-617, 2017
- 79- H. A. Aroussi, E. Ziani, B. Bossoufi., “Contribution To The Enhancement Of Dual DTC”, *International Conf. Adv. Technol. Signal& Image Process.*, s. 1-5, 2017
- 80- M. Firouzi, G. B. Gharehpetian, B. Mozafari, “Power-Flow Control and Short-Circuit Current Limitation of Wind Farms Using Unified Interphase Power Controller”, *IEEE Trans. Power Deliv*, 32(1), s. 62-71, 2017
- 81- Y. Chang, J. Hu, W. Tang, G. Song, “Fault Current Analysis Of Type-3 Wts Considering Sequential Switching Of Internal Control And Protection Circuits İn Multi Time Scales During LVRT”, *IEEE Trans. Power Syst.*, 33(6), s. 6894-6903, 2018
- 82- P. C. Krause, O. Wasynczuk, and S. D. Sudhoff, “Analysis of electric machina and drive systems” *Wiley Interscience*, s. 632, 2002.
- 83- Özsoy, E. E., “Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinde Kullanıma Yönelik Dayanıklı Çift Beslemeli Asenkron Generatör Kontrol Yöntemi Tasarımı ve Uygulaması, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek Lisans tezi*, s. 132, İstanbul , 2014
- 84- İnal, T. T., “Üç Faz İgbt Köprü Doğrultucunun Tasarımı Ve Çift Beslemeli Asenkron Generatör Tabanlı Rüzgar Türbin Sistemlerindeki Kontrolü, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*”, *Yüksek Lisans tezi*, s. 75, İstanbul , 2012
- 85- X. Kong, Z. Zhang, X. Yin, M. Wen, “Study Of Fault Current Characteristics Of The DFIG Considering Dynamic Response Of The RSC”, *IEEE Trans. Energy Convers.*, 29(2), s. 278-287, 2014
- 86- A. Moualdia, D. Boudana, O. Bouchhida, P. Wira, “Direct Torque Control Based Multi-Level İnverter And Artificial Neural Networks Of Wind Energy Conversion System”, *Proc. 2016 8th Int. Conf. Model. Identif. Control. ICMIC 2016*, s. 49-54, 2017

- 87- J. Mohammadi, S. Vaez-Zadeh, E. Ebrahimzadeh, F. Blaabjerg, “Combined control method for grid-side converter of doubly fed induction generator based wind energy conversion systems”, *IET Renew. Power Gener.*, 12(8), s. 943-952, 2018
- 88- A. L. L. F. Murari, J. A. T. Altuna, R. V. Jacomini, C. M. R. Osorio, J. S. S. Chaves, A. J. Filho, “A Proposal Of Project Of PI Controller Gains Used On The Control Of Doubly-Fed Induction Generators”, *IEEE Lat. Am. Trans.*, 15(2), s. 173-180, 2017
- 89- S. Müller, M. Deicke, R. W. De Doncker, “Doubly Fed Induction Generator Systems For Wind Turbines”, *IEEE Ind. Appl. Mag.*, 8(3), s. 26-33, 2002
- 90- Y. Song, F. Blaabjerg, “Analysis of Middle Frequency Resonance in DFIG System Considering Phase-Locked Loop”, *IEEE Trans. Power Electron.*, 33(1), s. 343-356, 2018
- 91- S. E. Da Silveira, S. M. Silva, B. J. Cardoso Filho, “Fault Ride-Through Enhancement In DFIG With Control Of Stator Flux Using Minimised Series Voltage Compensator”, *IET Renew. Power Gener.*, 12(11), s.1234-1240, 2018
- 92- W. Tang, J. Hu, Y. Chang, F. Liu, “Modeling Of DFIG-Based Wind Turbine For Power System Transient Response Analysis In Rotor Speed Control Timescale”, *IEEE Trans. Power Syst.*, 33(6), s. 6795-6805, 2018
- 93- D. Zhu, X. Zou, S. Zhou, W. Dong, Y. Kang, J. Hu, “Feedforward Current References Control for DFIG-Based Wind Turbine to Improve Transient Control Performance During Grid Faults”, *IEEE Trans. Energy Convers.*, 33(2), s. 670-681, 2018
- 94- B. Qin, H. Sun, “State Dependent Riccati Equation Based Rotor-Side Converter Control for Doubly Fed Wind Generator”, *IEEE Access*, 6(c), s. 27853-27863, 2018
- 95- S. C. Siksha, “Performance Analysis of Doubly-fed Induction Generator in Wind Energy Conversion System Performance Analysis of Doubly-fed Induction Generator in Wind Energy Conversion System”, *National Institute of Technology Rourkela, Master of technology, s.72, Odisha, 2011*
- 96- X. Bian, Y. Ding, Q. Jia, L. Shi, X. P. Zhang, K. L. Lo, “Mitigation Of Sub-Synchronous Control Interaction Of A Power System With DFIG-Based Wind Farm Under Multi-Operating Points”, *IET Gener. Transm. Distrib.*, 12(21), s. 5834-5842, 2018

97- X. Tian, W. Wang, Y. Chi, Y. Li, and C. Liu, “Virtual Inertia Optimisation Control Of DFIG And Assessment Of Equivalent Inertia Time Constant Of Power Grid”, *IET Renew. Power Gener.*, 12(15), s. 1733-1740, 2018

