

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DEĞİŞKEN HIZLI RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN TASARLANAN  
GÜÇ ELEKTRONİĞİ SİSTEMİNİN AKILLI KONTROLÜ**

**DOKTORA TEZİ**

**Elektrik Müh. Ömür AKYAZI**

**MAYIS 2015  
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /**

**Tezin Savunma Tarihi : / /**

**Tez Danışmanı :**

**Trabzon**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında  
Ömür AKYAZI Tarafından Hazırlanan**

**DEĞİŞKEN HIZLI RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN TASARLANAN GÜÇ  
ELEKTRONİĞİ SİSTEMİNİN AKILLI KONTROLÜ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 14 /04/2015 gün ve 1598 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
DOKTORA TEZİ  
olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. Adem Sefa AKPINAR**

**Üye : Prof. Dr. İbrahim ŞENOL**

**Üye : Prof. Dr. Hasan KÜRÜM**

**Üye : Doç. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ**

**Üye : Yrd. Doç. Dr. Hüseyin PEHLİVAN**

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Bu tez, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Mühendisliği Doktora Programı'nda yapılan bir çalışmadır.

Doktora tez danışmanlığımı üstlenerek, gerek konu seçimi ve gerekse çalışmaların yürütülmesi sırasında yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. A. Sefa AKPINAR'a, gösterdiği ilgi, güler yüz ve yardımlarından ötürü teşekkürlerimi saygı ve minnetle sunarım.

Lisansüstü öğrenimim süresince gerek ders gerekse tez aşamalarında, yardımlarını ve bilgilerini esirgemedi benimle paylaşan değerli hocalarım Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ ve Doç. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ'a gösterdikleri ilgi, güler yüz ve yardımlarından ötürü teşekkürlerimi saygı ile sunarım.

Tez izleme aşamalarında eleştiri ve fikirleriyle yardımlarını esirgemeyen beni yönlendiren değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Hüseyin PEHLİVAN'a teşekkürü borç bilirim.

Lisansüstü öğrenimim süresince başta Dr. Emre ÖZKOP, Dr. Gökçe HACIOĞLU, Dr. Yusuf SEVİM, Dr. Oğuzhan ÇAKIR, Mevlüt TOPALOĞLU, Hayati TÜRE olmak üzere Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünün değerli hocalarına, personeline ve tüm arkadaşlarıma gösterdikleri güler yüz ve hoş sohbetleri için teşekkür ederim.

Doktora çalışmalarım süresince ASOL laboratuvarında birlikte çalıştığım Dr. Hakan KAHVECİ, Mehmet EKİCİ, Cemalettin ŞİMŞEK, Mehmet Ali USTA'ya ve Sürmene Abdullah Kanca Meslek Yüksekokulunda mesai arkadaşlarım başta Erdinç ŞAHİN ve Erhan SESLİ olmak üzere meslek yüksekokulunun değerli hocalarına ve personeline gösterdikleri güler yüz, hoşgörü ve yardımları nedeniyle şükran borçluyum.

Tüm hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen anneme, babama, kardeşlerime, doktora çalışmalarım süresince hoşgörüyü eksik etmeyen eşime ve ailesine sonsuz minnettarım.

Ömür AKYAZI

Trabzon 2015

## **TEZ ETİK BEYANNAMESİ**

Doktora Tezi olarak sunduğum ‘‘Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinleri İçin Tasarlanan Güç Elektroniği Sisteminin Akıllı Kontrolü’’ başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Adem Sefa AKPINAR’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 07/04/2015

Ömür AKYAZI

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ .....	IV
İÇİNDEKİLER .....	V
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	IX
TABLolar DİZİNİ .....	XIV
SEMBOLLER DİZİNİ... ..	XV
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Dünya Enerji Talebi .....	1
1.2. Yenilenebilir Enerji .....	2
1.3. Tezin Amacı .....	4
1.4. Tezin Bölümleri.....	5
2. RÜZGÂR ENERJİSİ .....	6
2.1. Giriş .....	6
2.2. Rüzgâr Enerji Sistemleri .....	6
2.3. Rüzgâr Enerji Sistemlerinde Kontrol Yöntemleri .....	10
2.4. Rüzgâr Enerji Sistemlerinde Kullanılan Güç Elektronik Devreleri .....	12
3. SİSTEM MODELİ VE BENZETİMİ .....	17
3.1. Giriş .....	17
3.2. Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemi .....	18
3.2.1. Rüzgâr Türbinlerinin Aerodinamik Karakteristikleri .....	21
3.2.2. SMSG Yapısı ve Matematik Modeli .....	27
3.3. Güç Elektronik Devreleri .....	34
3.3.1. AA/DA Çevirici (Doğrultucu) .....	35
3.3.2. DA/DA Dönüştürücü .....	36

3.3.3.	Evirici (DA/AA Çevirici) .....	41
3.4.	Denetim Stratejisi .....	42
3.4.1.	Giriş .....	42
3.4.2.	Geleneksel (P, PI ve PID) Denetim.....	43
3.4.3.	Bulanık Mantık Denetim .....	44
3.4.4.	Parçacık Sürü Optimizasyonu .....	54
3.4.5.	Genetik Algoritma .....	59
3.4.6.	Denetleyicilerin Kullanımı .....	64
3.5.	Yük .....	65
4.	YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	66
4.1.	Giriş .....	66
4.2.	Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemi Emülatörü.....	68
4.3.	Güç Elektroniği Devre Tasarımı .....	71
4.3.1.	DA/DA Artıran Çevirici Devre Tasarımı .....	71
4.3.2.	DA/AA Evirici Tasarımı .....	76
4.3.3.	AA/DA Doğrultucu Devresi.....	81
4.3.4.	Ölçüm Devreleri .....	82
4.3.5.	Güç Elektroniği Devreleri İçin Doğrusal Güç Kaynağı .....	84
5.	BENZETİMSEL VE DENEYSEL SONUÇLAR .....	86
5.1.	Sistem Denetleyici Özelliklerinin Kararlaştırılması .....	86
5.1.1.	Bulanık Mantık Denetleyici Üyelik Fonksiyonu Türü .....	86
5.1.2.	PI ve Bulanık Mantık Denetleyici Parametreleri .....	89
5.2.	Deneysel Sonuçlar .....	92
5.2.1.	PI Denetimli Sistem .....	95
5.2.2.	Bulanık Mantık Denetimli Sistem.....	104
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	114
6.1.	Sonuçlar .....	114
6.2.	Öneriler.....	115
7.	KAYNAKLAR .....	116
8.	EKLER .....	132

ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

DEĞİŞKEN HIZLI RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN TASARLANAN  
GÜÇ ELEKTRONİĞİ SİSTEMİNİN AKILLI KONTROLÜ

Ömür AKYAZI

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik–Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Adem Sefa AKPINAR  
2015, 131 Sayfa, 2 Sayfa Ek

Bu tez çalışmasında, şebekeden bağımsız değişken hızlı rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinde enerji kullanımının iyileştirilmesi, üretim ve tüketim tarafında karşılaşılan güç kalite problemlerinin azaltılması, uygun güç dönüştürücülerinin tasarımı ve gerçekleştirilen sistemin gerçek zamanlı kontrolü amaçlanmaktadır.

Bu amaç kapsamında sistemde kontrolör olarak geleneksel denetleyicilerden oransal-integral (PI) ve bulanık mantık denetleyici (BMD) kullanılmıştır. Ayrıca BMD’de üyelik fonksiyonları karşılaştırılması yapılmıştır. Sistemin kontrolü amacıyla önerilen denetleyicilerin performansını iyileştirmek için denetleyicilere ait bazı parametreler, zaman ağırlıklı mutlak hatanın integrali (ITAE) performans kriterine göre parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve genetik algoritma (GA) yöntemleri kullanılarak optimize edilmiştir. Böylece sistem için daha akıllı ve verimli bir kontrol sağlanmıştır. Farklı çalışma koşulları için hem benzetimsel hem de gerçek zamanlı sistem denetimi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Rüzgâr Enerjisi, Akıllı Kontrol, PI denetleyici, Parçacık sürü optimizasyonu, Genetik algoritma, Sürekli mıknatıslı senkron generatör, Güç dönüştürücüleri



Ph.D. Thesis

SUMMARY

AN INTELLIGENT CONTROL OF POWER ELECTRONICS SYSTEMS DESIGNED FOR  
VARIABLE SPEED WIND TURBINES

Ömür AKYAZI

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Electrical and Electronics Engineering Graduate Program  
Thesis Supervisor: Prof. Dr. Adem Sefa AKPINAR  
2015, 131 Pages, 2 Pages Appendix

In this study, improvement of energy utilization, minimization of power quality problems in generation and consume sides, convenient power converters design and real time control of the system realized are aimed for the standalone variable wind turbine conversion systems.

Proportional-Integral (PI) controller, which is one of the conventional controllers, and fuzzy logic controller (FLC) are used with this aim and also the comparison of FLC membership functions is done. Some of the controller parameters are optimized with regard to integral of time-weighted absolute error (ITAE) performance criteria by using particle swarm optimization (PSO) and genetic algorithms (GA) methods to improve performance of the controller suggested in the system control so that an intelligent and effective control is ensured for the power system. Both the real time implementation and simulation of the system control are done for different operation conditions and the results obtained are compared.

**Key Words:** Wind Energy, Intelligent control, PI controller, Particle swarm optimization, Genetic algorithm, Permanent magnet synchronous generator, Power converters

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Dünya Enerji talebinin kaynaklara göre dağılımı .....	1
Şekil 2.1. Türkiye’deki rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından yıllara göre dağılımı .....	7
Şekil 2.2. Türkiye’deki rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından yıllara göre kümülatif dağılımı .....	8
Şekil 2.3. Türkiye’deki rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından bölgelere göre dağılımı .....	8
Şekil 2.4. Türkiye’deki rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından bölgelere göre yüzdesel gösterimi .....	8
Şekil 2.5. Rüzgar Türbinlerinde çalışma bölgeleri .....	10
Şekil 2.6. Rüzgâr enerji dönüşüm sisteminin genel blok yapısı .....	13
Şekil 2.7. Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi yol haritası ve güç elektroniği topolojisi ....	13
Şekil 2.8. Diyet doğrultuculu rüzgar türbinlerinde güç elektroniği topolojisi .....	15
Şekil 2.9. Back to back PWM kontrolü rüzgar enerji dönüşüm sistemi .....	16
Şekil 3.1. Rüzgar enerji dönüşüm sistemi blok diyagramı .....	17
Şekil 3.2. Rüzgar türbinini oluşturan elemanlar .....	19
Şekil 3.3. Yatay eksenli rüzgar türbinleri .....	20
Şekil 3.4. Düşey eksenli rüzgar türbini .....	20
Şekil 3.5. Betz Kanunu güç-rüzgar hızı ilişkisi .....	22
Şekil 3.6. Güç katsayısı ile hız oranı değişimi karakteristiği .....	24
Şekil 3.7. Rüzgâr türbin gücünün rotor hızıyla değişim karakteristiği .....	24
Şekil 3.8. Eğim acısı $\beta$ ’nın değişim ile $C_p - \lambda$ karakteristiği .....	25
Şekil 3.9. Rotor hızı, rüzgâr hızı ve rüzgâr türbini gücü değişimi.....	25
Şekil 3.10. Rüzgâr türbini Matlab/Simulink modeli .....	26
Şekil 3.11. Wind Turbine blokunun iç yapısı .....	26
Şekil 3.12. Yuvarlak ve Çıkık kutuplu rotor yapısı .....	27
Şekil 3.13. Alan sargılı senkron generatörün şebeke bağlantısı .....	28
Şekil 3.14. Sürekli mıknatıslı senkron generatörün şebeke bağlantısı.....	28
Şekil 3.15. SMSG’ün fazör eksenleri gösterimi .....	29

Şekil 3.16. İki fazlı durağan eksen stator referans düzlemi .....	30
Şekil 3.17. İki fazlı dönen rotor referans düzlemi .....	31
Şekil 3.18. SMSG'ün d-q eşdeğer devresi .....	32
Şekil 3.19. Sistemde kullanılan doğrultucu devre .....	35
Şekil 3.20. DA/DA artıran (Boost) çevirici genel yapısı .....	36
Şekil 3.21. Sürekli akım iletim durumu a) Anahtar "ON" konumunda b) Anahtar "OFF" konumunda.....	37
Şekil 3.22. Tasarlanan artıran DA/DA dönüştürücü devresi genel yapısı. ....	41
Şekil 3.23. Evirici (DA/AA) sistem blok yapısı .....	42
Şekil 3.24. PI denetleyici blok yapısı.....	44
Şekil 3.25. Sıcaklık uzayında tanımlı sıcak klasik kümesi .....	46
Şekil 3.26. Sıcaklık uzayında tanımlı sıcak bulanık kümesi.....	46
Şekil 3.27. Bulanık kümelerde birleşme işlemi .....	47
Şekil 3.28. Bulanık kümelerde kesişim işlemi.....	48
Şekil 3.29. Bulanık kümelerde tümlleme işlemi .....	48
Şekil 3.30. Değişik üyelik fonksiyonları: (a) Üçgen, (b) Gaussian, (c) Yamuk, (d) Çan, (e) Cauchy, (f) Sigmoid.....	49
Şekil 3.31. Üçgen üyelik fonksiyonu .....	49
Şekil 3.32. Bulanık mantık denetleyici yapısı .....	50
Şekil 3.33. Bulanıklaştırma işleminin yapılışı .....	51
Şekil 3.34. Mamdani bulanık çıkarımı.....	53
Şekil 3.35. Arama uzayında parçacığın konum değişimi .....	56
Şekil 3.36. PSO algoritmasının akış diyagramı .....	59
Şekil 3.37. GA akış diyagramı .....	61
Şekil 3.38. Rulet çemberi seçim operatörü .....	62
Şekil 3.39. Tek noktalı çaprazlama işlemi .....	63
Şekil 3.40. Tek bir kromozom için mutasyon işlemi .....	63
Şekil 3.41. PI denetleyici .....	64
Şekil 3.42. Bulanık mantık denetleyici genel blok yapısı.....	64
Şekil 4.1. Laboratuar ortamında gerçekleştirilen sistemin blok yapısı .....	67
Şekil 4.2. Laboratuar ortamında gerçekleştirilen deney düzeneği genel görünüşü .....	67
Şekil 4.3. Deneysel çalışmada kullanılan rüzgar enerji dönüştürücü emülatörü.....	68
Şekil 4.4. Sistemde kullanılan AA sürücü.....	69

Şekil 4.5. Teco N3 devre bağlantısı .....	69
Şekil 4.6. Gerilim bölücü devre .....	70
Şekil 4.7. Generatör hız ölçüm Matlab/Simulink programı arayüzü .....	70
Şekil 4.8. DA-DA artıran çevirici devre şeması .....	71
Şekil 4.9. DA-DA artıran çevirici elektronik devre diyagramı.....	72
Şekil 4.10. Tasarlanan DA-DA artıran çevirici devresi genel görünüşü .....	72
Şekil 4.11. Yalıtım devresi elektronik devre diyagramı .....	73
Şekil 4.12. Tasarlanan yalıtım devresi genel görünüşü .....	73
Şekil 4.13. TL494 çıkış işareti dalga şekli.....	75
Şekil 4.14. MIC4452 çıkış işareti dalga şekli .....	75
Şekil 4.15. DA-DA çevirici Matlab/Simulink programı blok diyagramı .....	75
Şekil 4.16. DA-DA artıran çevirici gerçek zamanlı çalışma arayüz blok diyagramı .....	76
Şekil 4.17. Tasarlanan üç fazlı DA/AA evirici blok diyagramı .....	77
Şekil 4.18. PWM işaretinin dalga şekli.....	78
Şekil 4.19. Tasarlanan DA/AA evirici elektronik devre diyagramı.....	79
Şekil 4.20. Tasarlanan DA/AA evirici devresi genel görünüşü.....	79
Şekil 4.21. DA/AA evirici gerçek zamanlı çalışma arayüz blok diyagramı .....	80
Şekil 4.22. DA/AA evirici benzetim çalışması Matlab/Simulink programı blok diyagramı .....	80
Şekil 4.23. REDE ve AA/DA doğrultucu blok yapısı .....	81
Şekil 4.24. AA/DA doğrultucu genel görünüşü.....	81
Şekil 4.25. Rüzgar enerji dönüşüm sisteminde veri alış verişini gösteren blok yapısı.....	82
Şekil 4.26. Akım-gerilim ölçüm devre şeması.....	83
Şekil 4.27. Tasarlanan akım ve gerilim ölçüm devreleri genel görünüşü.....	83
Şekil 4.28. Akım-gerilim ölçümü Matlab/Simulink programı arayüzü .....	84
Şekil 4.29. Tasarlanan güç kaynaklarının genel görünüşü .....	85
Şekil 5.1. DA-DA artıran çevirici gerilim kontrolü blok diyagramı.....	86
Şekil 5.2. Farklı BMD üyelik fonksiyon türleri için oluşturulan Matlab/Simulink blok diyagramı .....	87
Şekil 5.3. DA-DA artıran çevirici çıkış gerilimi (R yükü) .....	87
Şekil 5.4. DA-DA artıran çevirici akımı (R yükü).....	88
Şekil 5.5. DA-DA artıran çevirici gerilimi (RL yükü).....	88
Şekil 5.6. DA-DA artıran çevirici akımı (RL yükü) sonuçları .....	88

Şekil 5.7. BMD kontrollü DA-DA çevirici için oluşturulan Matlab\Simulink blok diyagramı .....	89
Şekil 5.8. BMD kontrollü DA/AA evirici için oluşturulan Matlab\Simulink blok diyagramı .....	89
Şekil 5.9. DA-DA çevirici çıkış gerilimi (PSO-PI ve PSO-BMD).....	91
Şekil 5.10. DA-DA çevirici çıkış gerilimi (GA-PI ve GA-BMD).....	91
Şekil 5.11. DA/AA evirici çıkış gerilimi (PSO-PI ve PSO-BMD).....	91
Şekil 5.12. DA/AA evirici çıkış gerilimi (GA-PI ve GA-BMD).....	92
Şekil 5.13. Deneysel düzeneğe ait şematik çizim .....	93
Şekil 5.14. Deneysel düzeneğin çalışır haldeki genel görünüşü .....	93
Şekil 5.15. Gerçek zamanlı kullanıcı arayüz blok diyagramı .....	94
Şekil 5.16. DA-DA çevirici giriş akımı ve gerilimi (GA-PI, n: sabit).....	95
Şekil 5.17. DA-DA çevirici çıkış akımı ve gerilimi (GA-PI, n: sabit) .....	95
Şekil 5.18. DA/AA evirici çıkış akımı ve gerilimi (GA-PI, n: sabit) .....	96
Şekil 5.19. Generatör hızı (GA-PI, n: sabit) .....	96
Şekil 5.20. Yük faz-faz gerilimi osiloskop görüntüsü (GA-PI, n: sabit).....	97
Şekil 5.21. DA-DA çevirici giriş akımı ve gerilimi (GA-PI, n: değişken) .....	97
Şekil 5.22. DA-DA çevirici çıkış akımı ve gerilimi (GA-PI, n: değişken).....	98
Şekil 5.23. DA/AA evirici çıkış akımı ve gerilimi (GA-PI, n: değişken).....	98
Şekil 5.24. Generatör hızı ve çıkış gerilimi (GA-PI, n: değişken).....	98
Şekil 5.25. DA-DA çevirici giriş akımı ve gerilimi (PSO-PI, n: sabit) .....	99
Şekil 5.26. DA-DA çevirici çıkış akımı ve gerilimi (PSO-PI, n: sabit).....	99
Şekil 5.27. DA/AA evirici çıkış akımı ve gerilimi (PSO-PI, n: sabit).....	100
Şekil 5.28. Generatör hızı ve çıkış gerilimi (PSO-PI, n: sabit).....	100
Şekil 5.29. DA-DA çevirici giriş akımı ve gerilimi (PSO-PI, n: değişken) .....	101
Şekil 5.30. DA-DA çevirici çıkış akımı ve gerilimi (PSO-PI, n: değişken) .....	101
Şekil 5.31. DA/AA evirici çıkış akımı ve gerilimi (PSO-PI, n: değişken) .....	101
Şekil 5.32. Generatör hızı ve çıkış gerilimi (PSO-PI, n: değişken).....	102
Şekil 5.33. DA-DA çevirici giriş akımı ve gerilimi (PSO-PI, n: değişken, Vref: değişken) .....	102
Şekil 5.34. DA-DA çevirici çıkış akımı ve gerilimi (PSO-PI, n: değişken, Vref: değişken) .....	103

Şekil 5.35. DA/AA evirici çıkış akımı ve gerilimi (PSO-PI, n: değişken, Vref: değişken) .....	103
Şekil 5.36. Generatör hızı ve çıkış gerilimi (PSO-PI, n: değişken, Vref: değişken) .....	103
Şekil 5.37. DA-DA çevirici giriş akımı ve gerilimi (GA-BMD, n: değişken).....	105
Şekil 5.38. DA-DA çevirici çıkış akımı ve gerilimi (GA-BMD, n: değişken) .....	105
Şekil 5.39. DA/AA evirici çıkış akımı ve gerilimi (GA-BMD, n: değişken) .....	105
Şekil 5.40. Generatör hızı ve çıkış gerilimi (GA-BMD, n: değişken) .....	106
Şekil 5.41. DA-DA çevirici giriş akımı ve gerilimi (PSO-BMD, n: değişken).....	106
Şekil 5.42. DA-DA çevirici çıkış akımı ve gerilimi (PSO-BMD, n: değişken).....	107
Şekil 5.43. DA/AA evirici çıkış akımı ve gerilimi (PSO-BMD, n: değişken).....	107
Şekil 5.44. Generatör hızı ve çıkış gerilimi (PSO-BMD, n: değişken).....	107
Şekil 5.45. DA-DA çevirici giriş akımı ve gerilimi (PSO-BMD, n: değişken, Vref: değişken) .....	108
Şekil 5.46. DA-DA çevirici çıkış akımı ve gerilimi (PSO-BMD, n: değişken, Vref: değişken) .....	108
Şekil 5.47. DA/AA evirici çıkış akımı ve gerilimi (PSO-BMD, n: değişken, Vref: değişken) .....	109
Şekil 5.48. Generatör hızı ve çıkış gerilimi (PSO-BMD, n: değişken, Vref: değişken)...	109
Şekil 5.49. DA-DA çevirici giriş akımı ve gerilimi (PSO-BMD, n: değişken düşük hız) .....	110
Şekil 5.50. DA-DA çevirici çıkış akımı ve gerilimi (PSO-BMD, n: değişken düşük hız) .....	110
Şekil 5.51. DA/AA evirici çıkış gerilimi ve generatör hızı (PSO-BMD, n: değişken düşük hız) .....	111
Şekil 5.52. DA-DA çevirici giriş ve çıkış gerilimleri (PSO-BMD, n: değişken, R yük)..	111
Şekil 5.53. DA/AA evirici çıkış gerilimi ve generatör hızı (PSO-BMD, n: değişken, R yük).....	112
Şekil 5.54. DA-DA çevirici giriş ve çıkış gerilimleri (PSO-PI, n: değişken, R yük) .....	112
Şekil 5.55. DA/AA evirici çıkış gerilimi ve generatör hızı (PSO-PI, n: değişken, R yük) .....	113

## TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Yenilenebilir enerji kaynaklarının maliyet yönünden karşılaştırılması.....	4
Tablo 2.1. 2011-2014 yılları arası toplam rüzgâr santrali kurulu gücü .....	6
Tablo 3.1. PI parametrelerinin sistem davranışına etkisi.....	44
Tablo 3.2. Örnek kural tablosu.....	51
Tablo 3.3. Kullanılan kontrolörlerin uygulama parçaları.....	65
Tablo 5.1. PI parametreleri (PSO ve GA).....	90
Tablo 5.2. BMD parametreleri (PSO ve GA).....	90
Tablo 5.3. BMD kural tablosu .....	94
Tablo 5.4. Denetleyici performans indeks değerleri (GA-PI, n: sabit).....	97
Tablo 5.5. Denetleyici performans indeks değerleri (GA-PI, n: değişken).....	99
Tablo 5.6. Denetleyici performans indeks değerleri (PSO-PI, n: sabit).....	100
Tablo 5.7. Denetleyici performans indeks değerleri (PSO-PI, n: değişken).....	102
Tablo 5.8. Denetleyici performans indeks değerleri (PSO-PI, n: değişken, Vref: değişken).....	104
Tablo 5.9. Denetleyici performans indeks değerleri (GA-BMD, n: değişken).....	106
Tablo 5.10. Denetleyici performans indeks değerleri (PSO-BMD, n: değişken).....	108
Tablo 5.11. Denetleyici performans indeks değerleri (PSO-BMD, n: değişken, Vref: değişken).....	109
Tablo 5.12. Denetleyici performans indeks değerleri (PSO-BMD, n:değişken, R yük).....	112
Tablo 5.13. Denetleyici performans indeks değerleri (PSO-PI, n:değişken, R yük).....	113

## SEMBOLLER DİZİNİ

PI	: Oransal-integral
BMD	: Bulanık mantık denetleyici
PSO	: Parçacık sürü optimizasyonu
GA	: Genetik algoritma
ITEA	: Zaman ağırlıklı mutlak hatanın integrali
ISE	: Hatanın karesinin integrali
IAE	: Mutlak hatanın integrali
ISTE	: Zaman ağırlıklı hatanın karesinin integrali
PID	: Oransal-integral-türev
SMSG	: Sürekli mıknatıslı senkron generatör
DA	: Doğru akım
MPPT	: Maksimum güç çıkarımı
VSI	: Gerilim kaynağı eviricisi
PWM	: Darbe genişlik modülasyonu
AA	: Alternatif akım
RES	: Rüzgâr enerji sistemi
REDE	: Rüzgâr enerji dönüştürücü emülatörü
TKG	: Tümüleşik karma güç
$V_w$	: Rüzgâr hızı
$C_p$	: Güç katsayısı
$\lambda$	: Uç-hız oranı
$\beta$	: Eğim açısı
$T$	: Türbin momenti
$P_m$	: Mekanik çıkış güç
$A$	: Rotor süpürme alanı
$\rho$	: Havanın yoğunluğu
$R$	: Türbin yarıçapı



$T_t$	: Türbin momenti
$\omega_t$	: Türbin açısal hızı
$\zeta$	: Dönüştürme oranı
$T_m$	: Generatörü süren moment
$\omega_m$	: Generatörün mil hızı
$\theta_r$	: Rotor akı pozisyonu
$i$	: Stator akımı
$R_s$	: Stator direnci
$U$	: Stator gerilimi
$\psi_m$	: Sürekli mıknatıs akısı
$\psi_{abc}$	: Makinanın toplam akısı
$V_d$	: d eksen gerilimi
$V_q$	: q eksen gerilimi
$L_d$	: d eksen endüktansı
$L_q$	: q eksen endüktansı
$P$	: Çift kutup sayısı
$P_g$	: Aktif güç
$Q_g$	: Reaktif güç
$P_{cu}$	: Kayıp güç
$V_D$	: Diyot gerilimi
$V_0$	: Çıkış gerilimi
$V_L$	: Endüktans gerilimi
$\dot{I}_L$	: Endüktans akımı
$V_i$	: Giriş gerilimi
$f_s$	: Anahtarlama frekansı
$L$	: Endüktans
$R$	: Direnç
$D$	: Doluluk oranı
$i_D$	: Diyot akımı

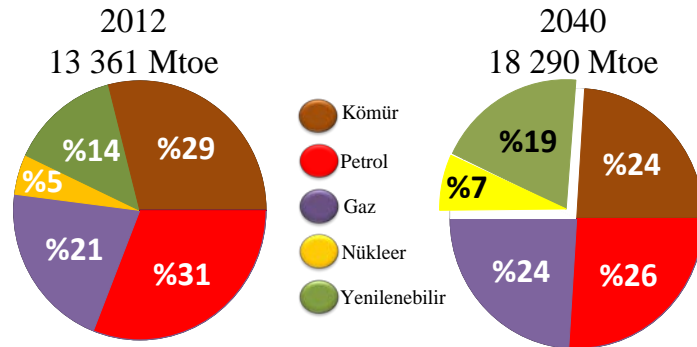
$R_{Lmin}$	: Sınır bölgesindeki yük direnci
$L_{min}$	: Minimum Endüktans değeri
$C_{min}$	: Minimum kapasite değeri
$K_p$	: Oransal denetleyici kazancı
$K_i$	: İntegral denetleyici kazancı
$K_d$	: Türev denetleyici kazancı
$u(t)$	: Kontrol işareti
$e(t)$	: Hata
$\mu$	: Üyelik derecesi
$r(k)$	: Referans işaret
$y(k)$	: Çıkış işareti
$\Delta e(k)$	: Hatadaki değişim
$pbest_i$	: i. parçacığın bireysel en iyi değeri
$gbest$	: Sürünün en iyi değeri
$V_i$	: Parçacık hızı
$x_i$	: Parçacık konumu
$c_1$ ve $c_2$	: İvmelendirme sabitleri
$r_1$ ve $r_2$	: 0 ile 1 arasında normal dağılımlı rasgele sayılar
$w$	: Atalet ağırlık katsayısı
$C_T$	: Kondansatör değeri
$R_T$	: Direnç değeri

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Dünya Enerji Talebi

Enerji ülkeler için stratejik bir öneme sahip olup, ülkelerin gelişmişlik düzeylerini, uluslararası ilişkileri ve yaşam kalitesini belirleyen en önemli parametrelerden birisidir [1]. Bu bakımdan enerji, bazı ülkeler için panzehirken birçok ülke için değildir. Ucuz fiyattaki geniş petrol kaynağına sahip Orta Doğu'da karışıklık, 1970'li yıllarda meydana gelen petrol krizinden sonra daha büyük bir hal almaktadır. Rusya ile Ukrayna arasındaki anlaşmazlığın doğurduğu doğal gaz güvenliği sorunu, yeraltı kaynaklarının dünya genelinde değil de sadece belirli bölgelerde olması, enerjinin yaklaşık %80'lik kısmının fosil yakıtlarda karşılandığı dünyamızda gelecek için bir kararsızlık ortaya çıkarmaktadır. Nükleer enerji ile ilgili endişelerin artmasına ve bunun sonucunda farklı enerji kaynaklarına yönelim için çıkarılan kanunlara rağmen gelecekte daha da fazla kullanılacağı öngörülmektedir.

Dünya'nın uzaydan çekilen resimlerine baktığımızda, Afrika ülkelerinin birçoğunda yaşayan insanların elektriğe kavuşmadığını gözlemleyebiliyoruz. Gün geçtikçe dünya nüfusu artmakta, teknoloji gelişmekte ve buna bağlı olarak enerjiye olan talep büyümektedir [2-4]. Dünya enerji talebinin 2040 yılına kadar yaklaşık %40 büyüyeceği öngörülmekte ve bundan dolayı günümüzde, enerjinin sürekliliği, güvenliği, çeşitliliği, kararlılığı daha önem kazanmaktadır. Dünya enerji talebinin ileride karşılanacağı kaynaklar ile ilgili öngörü Şekil 1.1'de gösterilmektedir [5].



Şekil 1.1. Dünya Enerji talebinin kaynaklara göre dağılımı.

Günümüz enerji piyasasında fırtına öncesi sessizlik yaşanmaktadır: 2014 Kasım ayında 75\$ olan petrol varil fiyatının 2040 yılında 132\$ olacağı ve talebin daha artacağı ve bunun yanında üretilen üç varilden ikisi Asya'da tüketileceği öngörülmektedir [5].

Son 10 senede kömür talebi %50'nin üzerinde arttı. Günümüzdeki kömür üretim seviyesinin korunması durumunda, kömürün 135 yıl yeteceği öngörülmektedir. Amerika Birleşik Devletleri ve Rusya'dan sonra dünyanın üçüncü büyük çıkartılabilir kömür rezervine sahip olan Çin, dünyanın en büyük kömür üreticisi, tüketicisi ve ithalatçılarında biridir. Dünya'da üretilen tüm kömürün yarısından fazlası Çin'de tüketilmektedir [6].

Elektrik üretiminin %95'ten fazlasının gaz ve akaryakıtın yakılması ile elde edildiği dünyamızda, elektrik talebinin 2012-2040 yılları arasında her yıl %2.1 artacağı öngörülmektedir [5]. Dünya genelinde 2013 verilerine göre, elektrik üretiminin yaklaşık %13'lük kısmını sağlayan toplam 434 tane nükleer santral aktif olarak görev yapmakta olup, 76 tanesinin yapımı sürmektedir [7, 8].

Çevresel kirlilik, aşırı nüfus, gelişmekte olan ülkelerin gelişmiş ülke standartlarına sahip olma arzusu, yenilenemeyen enerji kaynaklarının dünya üzerinde homojen olarak dağılmaması ve fiyatlarındaki dalgalanmalar, enerji krizleri, enerji kaynaklı ülkelerde meydana gelen iç karışıklıklar gibi olaylar insanların tüketimi azaltma, kaynakların daha verimli kullanılması ve yenilenemeyen kaynaklara bağlılığın azaltılması yönünde farklı stratejiler üretmesine neden olmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları (rüzgâr, güneş, su, dalga, biyokütle, vb.) yukarıda belirtilen birçok istenmeyen olayın ortadan kalkmasını sağlayacak alternatif bir yol olarak görülmektedir [3, 4, 9, 10].

## **1.2. Yenilenebilir Enerji**

Günümüzde yenilenebilir kaynaklar (güneş (fotovoltaik ve ısıtma), jeotermal, su, rüzgâr, biyokütle vb.) sadece bir enerji kaynağı olarak görülmemekte, ayrıca enerji güvenliğinin iyileştirilmesi, nükleer enerji ve fosil yakıtların oluşturmuş olduğu sağlık ve çevresel etkilerin azaltılması, sera gazı salınımının hafifletilmesi, yeni iş imkânları oluşturulması, yoksulluğun azaltılması gibi birçok konuda araç olarak kabul edilmektedir [11].

Dünya genelinde 6.5 milyon insanın doğrudan veya dolaylı olarak yenilenebilir enerji sektöründe çalıştığı bir zamanda, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı yaygınlaşmıştır [12]. Yenilenebilir enerji kaynakları, dünya genelindeki toplam enerji

tüketiminin yaklaşık %20'sini karşılamaktadır ve gün geçtikçe bu oranın artacağı öngörülmektedir [13]. Sayısı günden güne artan, şehir, eyalet ve bölgeler farklı sektörlerde enerji tüketiminin tamamını yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlamak için arayış içerisinde.

2013'ün sonunda toplam kurulu yenilenebilir enerji kapasitesi açısından Çin, Amerika Birleşik Devletleri, Brezilya, Kanada ve Almanya dünyanın en tepesindeki yerlerini korumuştur. Fotovoltaik enerjiye yapılan yatırım 2013'te, 2012'ye göre %22 azalmasına rağmen kurulu kapasitesi %32 artmıştır [12]. İlk defa 2013'te Çin'in yeni yenilenebilir enerji kapasitesi, yeni fosil yakıt ve nükleer kapasitesini geçmiştir. Yaklaşık yirmi milyon Alman vatandaşı, %100 yenilenebilir enerji bölgelerinde hayatlarını sürdürmektedir. 2014 başlarına kadar, en az 144 ülkenin yenilenebilir enerji hedefleri ve 138 ülkenin ise yenilenebilir enerjiyi destekleme politikaları vardı [14]. En az 63 ülke de taşımacılık sektöründe biyoyakıtın kullanılması için düzenleyici politikalar ortaya koymaktadır. Günümüzde 1.3 milyar insan hala elektriğe kavuşmamıştır ve 2.6 milyardan fazla insan mutfak ve ısınma için biyokütleyle bel bağlamıştır [6, 15]. Rüzgâr ve güneş, en yaygın olan yenilenebilir enerji kaynaklarından ikisidir.

Güneş fotovoltaik pazarı, toplam 139 GW değerine ulaşmıştır [16]. Çin, Japonya ve Amerika, dünyanın en büyük üç fotovoltaik kurucu ülkesidir. Özellikle Avrupa'da fotovoltaik, elektrik üretiminde önemli bir role sahip hale gelmiştir (80GW) [17]. Örneğin İtalya, Yunanistan ve Almanya sırasıyla, yıllık elektrik talebinin %7.8, %6 ve %5'lik kısmını güneş fotovoltaikten karşılamaktadır [18]. Bir taraftan fotovoltaik üretim maliyeti gittikçe düşerken bir taraftan da güneş hücresi verimi artmaktadır.

Rüzgârdan elektrik üretiminin kilowattsaat başına karbondioksit salınımının, doğal gazdan elektrik üretimine göre 40 kat, kömüre göre 80 kat daha az olması nedeniyle, ekosistem ve insanlık için daha az tehdit oluşturduğu açıktır [12]. 2013 yılında 35 GW'tan fazla rüzgar gücü kapasitesi sisteme dahil olurken, toplam miktar 318 GW değerini aşmıştır [5]. Avrupa Birliği, birikmiş rüzgâr kapasitesi bakımından en ileri bölge iken, Asya yakalamak için uğraş içerisinde ve 2018 sonunda liderliği ele geçireceği öngörülmektedir. Bazı ülkelerde, yenilenebilir enerjiden faydalanma oranı diğer ülkelere göre daha yüksektir. Örneğin, Danimarka ve İspanya, elektrik taleplerinin sırasıyla %33.2 ve %20.9'luk kısımlarını rüzgar enerjisinden karşılamaktadır. Almanya'daki 4 eyalet, yıllık elektrik talebinin %50'lik kısmını karşılayacak rüzgâr enerjisi kapasitesine sahiptir. 71 ülke 10 MW'tan, 24 ülke ise 1 GW'tan daha büyük rüzgâr enerjisi kurulu güce sahiptir.

85'ten fazla ülke, rüzgâr enerjisi ile ilgili ticari faaliyetlerde bulunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının maliyet yönünden karşılaştırılması Tablo 1.1'de verilmiştir [12].

Tablo 1.1. Yenilenebilir enerji kaynaklarının maliyet yönünden karşılaştırılması

<b>Teknoloji</b>	<b>Tipik Enerji Maliyeti (US sent / kWh)</b>
Biyogaz	6-19
Jeotermal (yoğuşmalı)	5-13
Su (şebeke bağlantılı, >20MW)	2-12
Okyanus (gelgit)	21-28
Güneş (fotovoltaik, kurumsal, OECD)	12-38
Rüzgar (kıyıda, OECD)	4-16

### 1.3. Tezin Amacı

Literatürde son yıllarda yapılan çalışmalar, rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi, güç dönüştürücüleri ve değişken değerli yük için modelleme, oluşturulan modellerin doğrulanması ve denetlenmesine odaklanmıştır. Bu doğrultuda yapılan çalışmada, şebekeden bağımsız değişken hızlı rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinde enerji kullanımının iyileştirilmesi, üretim ve tüketim tarafında karşılaşılan güç kalite problemlerinin azaltılması, uygun güç dönüştürücülerinin tasarımı ve gerçekleştirilen sistemin verimli kontrolü amaçlanmaktadır. Sistemde kontrolör olarak geleneksel denetleyicilerden oransal-integral (PI) ve bulanık mantık denetleyici (BMD) kullanılmış olup bu denetleyicilerin parametreleri optimizasyon yöntemleriyle belirlenmiştir. Önerilen kontrol yöntemlerinin performansını arttırmak ve daha iyi bir yük gerilimi elde etmek için kontrolörler parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve genetik algoritma (GA) yöntemleri ile minimum ITAE (Zaman Ağırlıklı Mutlak Hatanın İntegrali) kriterini elde etmek için optimize edilmiştir. Böylece sistem için daha akıllı ve verimli bir kontrol sağlanmıştır. Ayrıca yapılan çalışmada farklı yükler için hem denetleyici performanslarının hem de optimizasyon yöntemlerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

Bu tezdeki nihai amaç, önerilen devrelerin ve kontrol algoritmalarının verimliliğini benzetimsel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırarak doğrulamak için rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi, önerilen güç dönüştürücüleri ve denetleyicilerin deneysel

prototip modellerinin oluşturulmasıdır. Benzetimsel ve deneysel çalışmalar, aynı çalışma koşulları altında farklı hız ve yük durumları için gerçekleştirilmektedir. Sistemin başarısı farklı çalışma koşulları ve farklı denetleyici kullanılması durumları için incelenmektedir.

#### **1.4. Tezin Bölümleri**

Birinci bölümde dünya enerji talebi, yenilenebilir enerji ve tezin amacı açıklanmıştır. Rüzgâr enerjisi ile ilgili yapılmış çalışmalar 2. bölümde ele alınmıştır. Önerilen rüzgâr enerjisi sistemine ait model ve benzetim çalışması 3. bölümde verilmiştir. Sistem parçaları olan, rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi, güç elektroniği devreleri (doğrultucu, yükseltici ve evirici), denetleyiciler ve sistemde kullanılan yük modelleri bu bölümde ele alınmıştır. Önceki bölümde anlatılan tüm sistemin gerçekleştirilmesi ve deneysel tasarımı ilgili adımlar 4. bölümde anlatılmış ve 5. bölümde rüzgâr enerji dönüşüm sisteminin benzetim ve deneysel çalışma sonuçları sunulmuştur. Sonuçların değerlendirilmesi, yapılan katkılar ve öneriler 6. bölümde yer almıştır.

## 2. RÜZGÂR ENERJİSİ

### 2.1. Giriş

Bu bölümde rüzgâr enerjisi ile ilgili yapılmış çalışmalar anlatılmaktadır. Birinci bölümde, rüzgâr enerji sistemleri ve Türkiye’deki durumu hakkında bilgi verilmektedir. Sonrasında rüzgâr enerji sistemlerinde kullanılan kontrol yöntemleri ve güç elektroniği devreleri ele alınacaktır.

### 2.2. Rüzgâr Enerji Sistemleri

Rüzgâr enerjisi, temiz, bedava ve sonsuzdur. Rüzgâr gücünün kullanımı yüzyıllar öncesine dayanmaktadır [19]. İlk zamanlarda, su pompalamak ve tahıl öğütmek gibi farklı amaçlarda kullanılan rüzgâr gücü, günümüzde daha çok elektrik elde etmek için kullanılmaktadır [20, 21]. Meydana gelen enerji krizleri, olumsuz çevre etkilerine duyulan hassasiyet, son otuz yılda rüzgâr enerji teknolojisinin ilerlemesine katkı sağlamıştır. Rüzgâr gücünden elektrik üretimi gün geçtikçe artmaktadır. 2004 yılında 48 GW kurulu güce sahip olan rüzgâr enerjisi, 2012 sonunda yaklaşık 283 GW ve 2014 başında ise 318 GW değerine ulaşmıştır [12, 13]. 2011-2014 yılları arası toplam rüzgâr kurulu kapasitesinin dağılımı, Tablo 2.1’de verilmiştir [13].

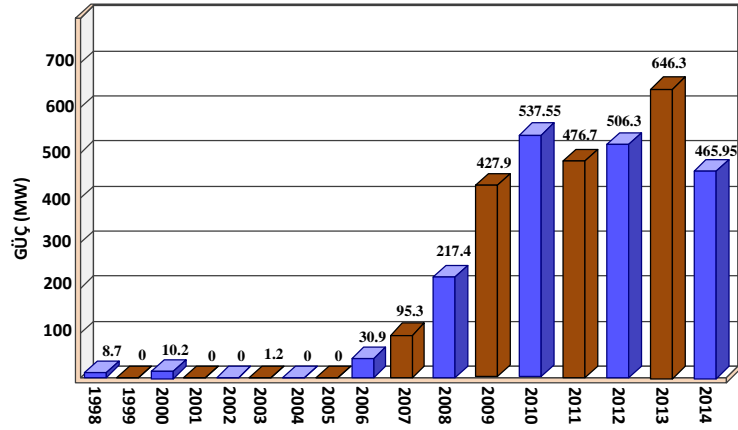
Tablo 2.1. 2011-2014 yılları arası toplam rüzgâr santrali kurulu gücü

Dönem	Değer (MW)	Büyüme (%)
2011 Sonu	236733	7.31
2012 Ortası	254041	11.1
2012 Sonu	282266	4.95
2013 Ortası	296255	7.50
2013 Sonu	318488	5.60
2014 Ortası	336327	7.00
2014 Sonu (Öngörülen)	360000	

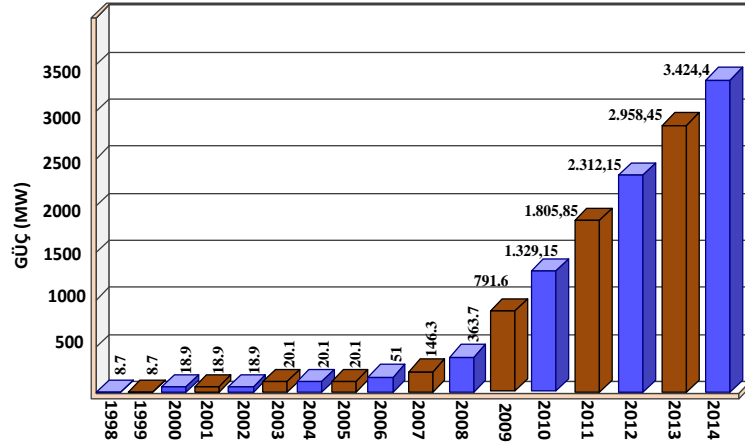


36°-42° kuzey enlemleri, 26°-45° doğu boylamları arasında yer alan Türkiye, Avrupa Birliği ülkeleri içinde en yüksek su gücü, rüzgâr ve jeotermal enerji potansiyeli, değerlerine (sırasıyla 150 TWh, 200 TWh ve 15 TWh) sahip olduğu öngörülmektedir [22, 23]. Bunun yanında Türkiye’de, yıllık 15120 TWh güneş enerji potansiyeli mevcuttur [22]. Dünya’nın 16. ve 27 Avrupa Birliği ülkesi içinde 6. en büyük ekonomisine sahip olan Türkiye’nin gün geçtikçe enerjiye olan talebi artmaktadır [24]. Talebin karşılanması için belirlenen politikalar arasında yenilenebilir enerji kaynaklarından daha fazla faydalanmak ön plana çıkmaktadır. Toplam rüzgâr potansiyelinin yaklaşık 20 GW’lık kısmı ekonomik olarak uygun olduğu öngörülen ülkemizde, 2023 yılına kadar elektrik ihtiyacının %30’luk kısmını yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılamayı hedeflemektedir [22]. Bunun için de yenilenebilir enerjiyi teşvik etmek amacıyla farklı kanunlar yürürlüğe konulmuştur. Temmuz 2014 tarihli verilere göre, Türkiye rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından yıllara göre dağılımı Şekil 2.1’de ve rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından yıllara göre kümülatif dağılımı Şekil 2.2’de görülmektedir [25, 26].

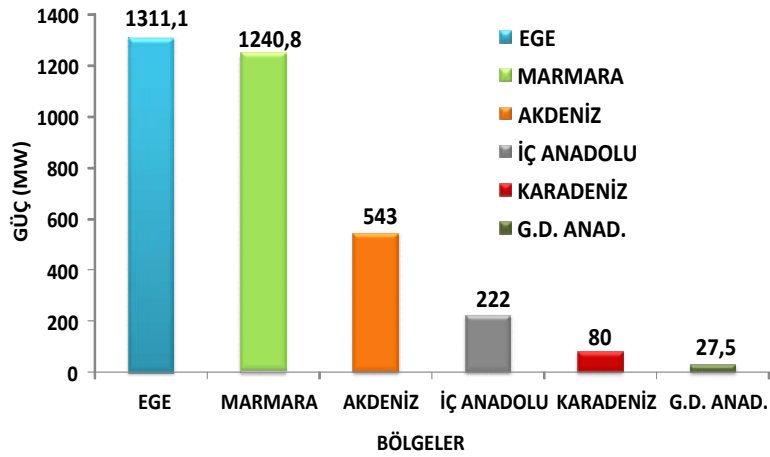
Ayrıca ülkemizde işletmede olan rüzgâr enerjisi santrallerinin kurulu güç bakımından bölgelere göre dağılımı Şekil 2.3’te ve bölgelere göre yüzdesel gösterimi Şekil 2.4’de verilmiştir [25].



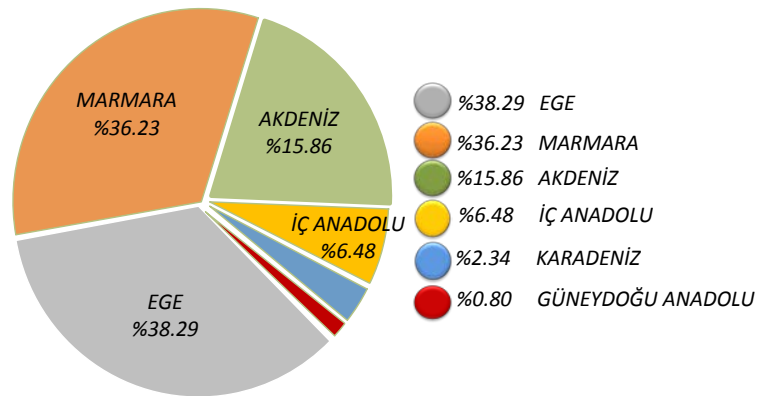
Şekil 2.1. Türkiye’deki rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından yıllara göre dağılımı



Şekil 2.2. Türkiye’deki rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından yıllara göre kümülatif dağılımı



Şekil 2.3. Türkiye’deki rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından bölgelere göre dağılımı



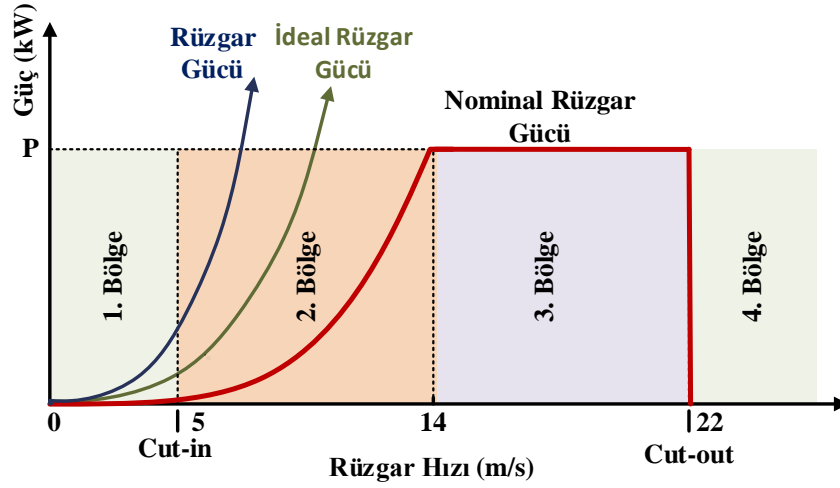
Şekil 2.4. Türkiye’deki rüzgar enerji santrallerinin kurulu güç bakımından bölgelere göre yüzdesel gösterimi

Türkiye rüzgâr enerjisi bakımından zengin sayılabilir. Bu zenginlik ve yapılan yasal düzenlemeler neticesinde özellikle 2005 yılından sonra yerli ve yabancı yatırımcıların rüzgâr enerjisine yönelik yatırımlarında hızlı bir artış söz konusudur [27]. 2005 yılında rüzgar kurulu gücü, 20.1MW iken 2011’de yaklaşık %900’lük artış ile 1799MW ve 2013’te 2312 MW değerine ulaşmıştır [22, 28, 29]. Bu değer ile Türkiye’nin toplam elektrik üretiminin %3.6’lık kısmı karşılanmaktadır. 2023 yılına kadar kurulu rüzgâr enerjisi potansiyelini 20GW değerine çıkarmaya hedefleyen Türkiye’de yapılacak çok iş vardır [30].

Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi, rüzgârdan elde edilen kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılır. Dönüşüm sisteminin temel elemanlarından biri olan rüzgâr türbini, kullanım yerine göre, yatay veya düşey eksenli olarak kullanılmaktadır. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri, düşey eksenli türbinlere göre daha karmaşık ve daha pahalıdır [31]. Ama bunun yanında yatay eksenli türbinler, daha yüksek verimli olduklarından daha yaygın kullanımına rastlanmaktadır. Rüzgar türbinleri generatörün döner kısmının, türbinin döner bölümüne bağlanma şekline göre sınıflandırılabilir: doğrudan sürüslü (dişli kutusuz) ve dişli kutulu. Doğrudan sürüslü sistemde, türbin rotoru doğrudan generatör rotoruna bağlı iken dişli kutulu sistemde de ise isminden de anlaşılacağı üzere türbin tarafında düşük hız- generatör tarafında yüksek hız elde edilmesi için mekanik dişliler kullanılmaktadır. Yapılan bu sınıflandırmanın yanında, sabit hızlı rüzgâr türbini ve değişken hızlı rüzgâr türbini olarak da sınıflandırma yapılabilir [32, 33].

Rüzgâr türbini, kontrol düzenine göre alt kısımlara ayrılabilir: pasif kontrol, aktif-pasif kontrol veya açılı kontrol [34]. Rüzgâr enerji sistemlerinde denetimin amacına ulaşması için rüzgâr türbinin aşağıda belirtilen çalışma bölgelerinin dikkate alınması gerekir [35-38]. Şekil 2.5’te bu bölgeler gösterilmiştir:

- I. Bölge: Rüzgâr, cut-in değerindedir ve rüzgâr gücü, rotoru döndürecek değer altındadır. Rüzgâr hızı, 5m/s’nin altındadır.
- II. Bölge: Rüzgâr hızındaki artışla, rüzgâr gücünde artmakta ve rotor dönmeye başlamaktadır. Rüzgâr hızı, 5m/s-14m/s değerleri arasındadır.
- III. Bölge: Rüzgar hızı, nominal değer üstündedir ve bu bölgede hızın sınırlandırılmasına gerek duyulabilir. Rüzgâr hızı, 14m/s’nin üzerindedir.
- IV. Bölge: Rüzgâr hızı, 22m/s üzerine çıktığında, sistem elemanlarının güvenliği için türbin sisteminin devre dışı bırakılması gerekmektedir.



Şekil 2.5. Rüzgar Türbinlerinde çalışma bölgeleri

Modern kontrol stratejilerindeki gelişmeler, kurulum ve bakım maliyetindeki azalmalar ve farklı türdeki enerjilerin elektriğe dönüştürme düzeneklerindeki iyileşmeler, rüzgâr enerji teknolojilerine olan ilgiyi artırmaktadır. Rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminden elde edilen enerjinin düzenlenmesi, güç kalitesinin iyileştirilmesi için kontrol üniteleri ve yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

### 2.3. Rüzgâr Enerjisi Sistemlerinde Kontrol Yöntemleri

Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinin denetiminde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Kullanılan yöntemlerin belirlenmesinde aşağıdaki hususlar farklı çalışma koşullarında ayrı ayrı veya birden fazlası aynı anda göz önünde bulundurulularak kontrol yöntemi belirlenmektedir. Bunlar [31]:

1. Kapalı çevrim sisteminin performansını etkileyen rüzgârdaki değişimler.
2. Kapalı çevrim sisteminin performansını ve kararlılığını etkileyen modellenememiş dinamikler.
3. Rüzgârdaki süreksizlikler ve buna bağlı bazı parametrelerinin değerlerinin bilinmemesi ve çalışma koşullarına bağlı değişmesi.
4. Rüzgâr türbini modeli parametrelerinin, farklı rüzgâr hızı çalışma noktalarında farklı değerlere sahip olması.
5. Kestirilen, tahmin edilen veya ölçülen rüzgâr hızının yanlış olması.
6. Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi parçalarında arızaların oluşması.

Doğrusal olmayan geribeslemeli kontrol: Rüzgâr türbininin doğrusal olmaması problemi ile baş etmek ve türbinin dinamiğinden rüzgâr bozunumlarını ayırmak için geribeslemeli doğrusallaştırma kontrol yöntemi önerilmektedir [39]. Diğer taraftan doğrusallaştırma kontrol yönteminin yerine kayan kipli doğrusal olmayan kontrol yöntemi de uygulanabilmektedir [40]. Kayan kipli kontrolün dezavantajlarından biri olan gürültüyü (chattering) azaltmak için, daha yüksek dereceli gözlemcili kayan kipli kontrol yöntemi önerilmiştir [41]. Kaynak [42]'te, generatörün hem gücünü hem de hızını denetlemek için kaskad yapıları doğrusal olmayan kontrol yöntemi kullanılmış ve elde edilen enerji miktarını iyileştirmek için doğrusal olmayan kontrol sisteminde Kalman Filtresi kullanılmıştır [43]. Doğrusal olmayan denetleyici kullanımında karşılaşılan zorluklar sebebiyle uygulama ve teoride doğrusal denetleyiciler daha çok kullanım eğilimi göstermektedir.

PID ve optimum geribeslemeli kontrol: Tasarlanan denetleyicinin, temelde belirlenmiş sınırlar içinde hızlı cevap vermesi, sıfır aşma ve sıfır kalıcı durum hatası gibi özelliklere sahip olması istenir [44]. Geleneksel denetleyici olan PID denetleyici, yüz yılı aşkın süredir kontrol dünyasında aktif olarak kullanılmakta olup; özellikle süreç kontrol uygulamalarında kullanımına çokça rastlanmaktadır [45]. Rüzgâr türbininin PID ile kontrolü kaynak [46]'da ele alınmış olup; bu çalışmada sistem modelindeki birçok doğrusal olmayan etkenler, sabit ve doğrusal karakteristiğe sahip olduğu kabulü yapılmıştır. Rüzgâr türbin modelinin, rüzgâr hızı çalışma noktasının değişmesi durumunda değişeceği öngörülerek, kazancı ayarlanabilir PID denetleyici kullanılmıştır [47, 48]. Rüzgâr türbinindeki belirsizliklerin modellenmesi göz ardı edilerek türbin kontrolünde  $H_{\infty}$  optimum denetimi kullanılmıştır [49]. Rüzgâr hızını tahmin ederek rüzgâr bozukluklarının etkisini azaltan bozukluk izleme kontrol yöntemi birçok çalışmada ele alınmıştır [50-55].

Gürbüz geribeslemeli kontrol: Modellenmemiş dinamikler, düşük performanslı rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminde kararsızlıklara sebep olmakta ve bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak için, pasif gürbüz kontrol yöntemleri kullanılmaktadır [56, 57]. Doğrusal olmayan durumların, bozulmaların etkilerinin azaltılması ve böylece istenen güç yönetiminin sağlam bir şekilde sağlanması için gürbüz kompanzatörlü model tabanlı denetleyici önerilmiştir [58]. Belirsizliklerin modellenmesinin etkisini azaltmak ve geri beslemeli sistemin arzu edilen performansa kavuşması için gürbüz tabanlı geribeslemeli kontrol, rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi kontrolünde kullanılmıştır [59]. Doğrusal parametre değişimi temelli ve çoklu model tabanlı denetleyiciler de rüzgâr türbini kontrolünde kullanılan bu sınıfa giren diğer denetleyicilerdir [60-65].

Adaptif geribeslemeli kontrol: Rüzgâr türbininin kontrolünde; kaynak [66]'da kendiliğinden ayarlanabilen düzenleyici önerilirken, kaynak [67]'de kanat açısının denetimi için geliştirilmiş model ön görümlü denetim kullanılmıştır. Rüzgâr türbinindeki kararsızlıkları ve aerodinamik belirsizlikleri ortadan kaldırmak için adaptif kontrol yöntemi kullanılmış ve sonuçta gelişme kaydedilmesine rağmen modellenmemiş dinamikler ile ilgili her zaman geçerli kararlılık garantisi verilmemiştir [68, 69]. Kaynak [70]'de gürbüz adaptif geribeslemeli ileri yönlü kanat açısı kontrol yöntemi önerilmiştir.

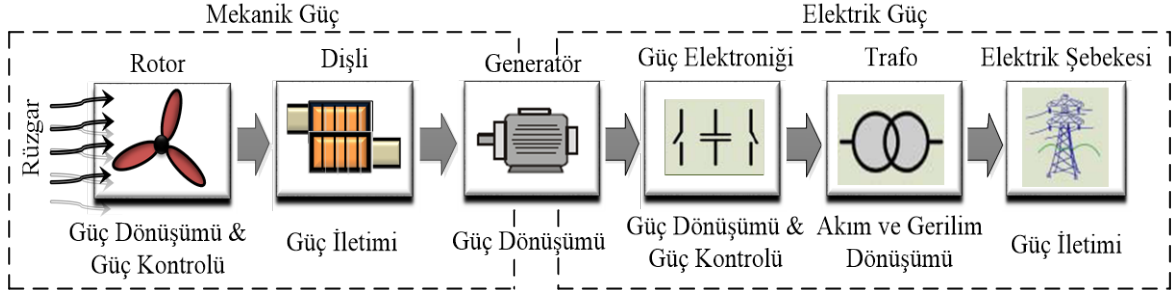
İleri Yönlü Kontrol: Rüzgâr hız bilgisinin rüzgâr türbini üzerine yerleştirilen sensörler vasıtasıyla ölçülmesi ile türbin kontrolü (ileri yönlü geribeslemeli kontrolü) birçok çalışmada kullanılmıştır [71, 72]. Işıkla algılama, mesafelendirme yöntemlerinin kullanılması ile kontrol yönteminin uygulanışında farklılığa gidilmiş [73] ve rüzgâr türbininin denetiminde iyileştirmeler elde edilmiştir [74]. Işıkla algılama ile mesafelendirme ölçümünde meydana gelecek hatalar ve modellenmeyen dinamikler, rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminin kararsızlığına sebep olabilir. Ölçüm hatalarını azaltmak için optimal filtreleme önerilmiştir [75].

Hata toleranslı kontrol: Pasif ve aktif olmak üzere iki gruba ayrılan hata toleranslı kontrol, rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinde karşılaşılan düzgünsüzlüklerin azaltılması için önerilmektedir [76, 77]. Aktif ve pasif hata toleranslı denetleyiciler farklı yapılara sahiptirler. Pasif denetleyicinin uygulama ve tasarımında basitlik avantajı olmasına rağmen, genel çözümün var olması için yerel çözümlerin kesişmesinin gerekmesi dezavantajdır. Rüzgâr türbininde hatanın algılanması ve yalıtılması ile ilgili farklı teknikler kullanılmıştır [78, 79].

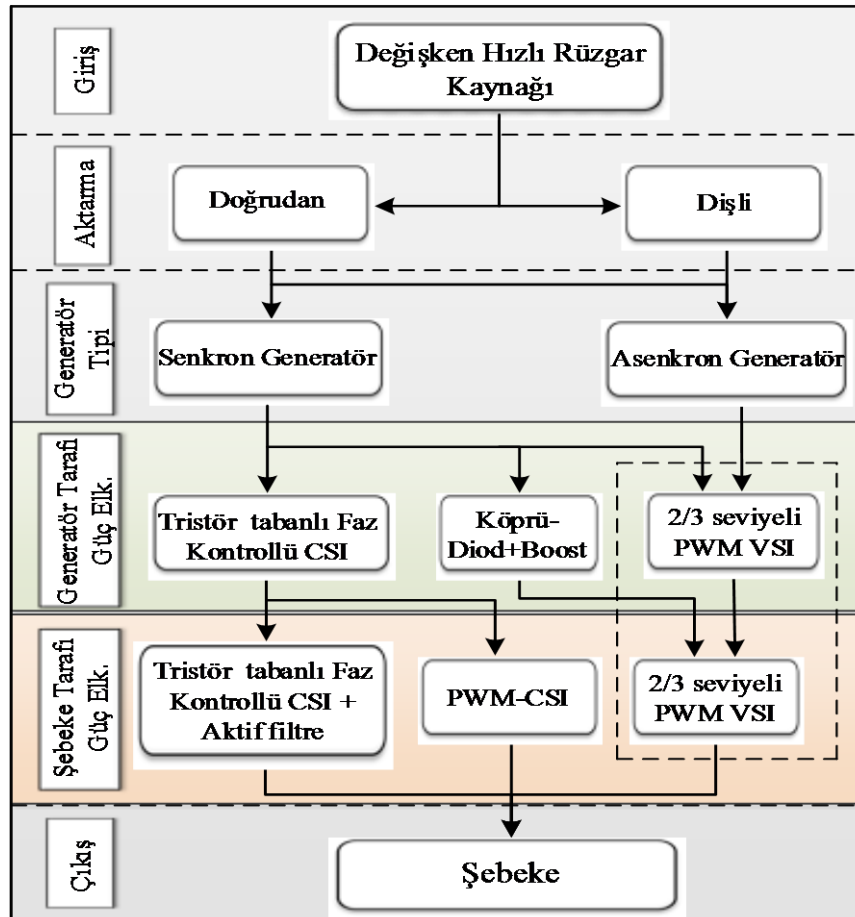
#### **2.4. Rüzgâr Enerjisi Sistemlerinde Kullanılan Güç Elektroniği Devreleri**

Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinde, rüzgâr türbininin ürettiği mekanik enerjiyi minimum kayıpla elektrik enerjisine dönüştürmek için çoğunlukla asenkron veya senkron generatörler kullanılmaktadır. Üretilen enerjinin istenilen güç kalitesinde şebekeye veya yüke aktarılması için güç elektroniği donanımına ihtiyaç vardır [80-85]. Gerçekleştirilen uygulamada sürekli mıknatıslı senkron generatör (SMSG) kullanılmış olup bu bölümde literatürde SMSG'li rüzgar türbinlerinde kullanılan güç elektroniği devre çeşitleri ve yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilecektir. Değişken hızlı bir rüzgâr enerjisi dönüşüm

sisteminin genel blok yapısı Şekil 2.6’da, rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi yol haritası ve güç elektroniği topolojisi Şekil 2.7’de verilmiştir [84, 85].



Şekil 2.6. Rüzgâr enerji dönüşüm sisteminin genel blok yapısı



Şekil 2.7. Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi yol haritası ve güç elektroniği topolojisi

Literatürde çoğunlukla Şekil 2.6’da gösterilen genel blok yapısı ve Şekil 2.7’deki güç elektroniği topolojisi üzerine araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalar, değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde maksimum güç çıkarımını sağlamak için bir kontrol yöntemi (MPPT) önermişler ve bu kontrol yöntemiyle tasarladıkları azaltan-artıran tip doğru akım-doğru akım (DA-DA) çeviriciyi kontrol etmişlerdir [86]. Değişken rüzgar hızını dikkate alan farklı çalışmalarda [87] sabit mıknatıslı senkron generatörün çıkışına bağlanan doğrultucu ile DA barası arasına azaltan-azaltan tip DA-DA çevirici bağlanmış ve tasarlanan çeviricinin geniş aralıklarda rüzgar hız değişimlerini tolere edebildiği benzetim çalışmalarıyla kanıtlanmıştır [87].

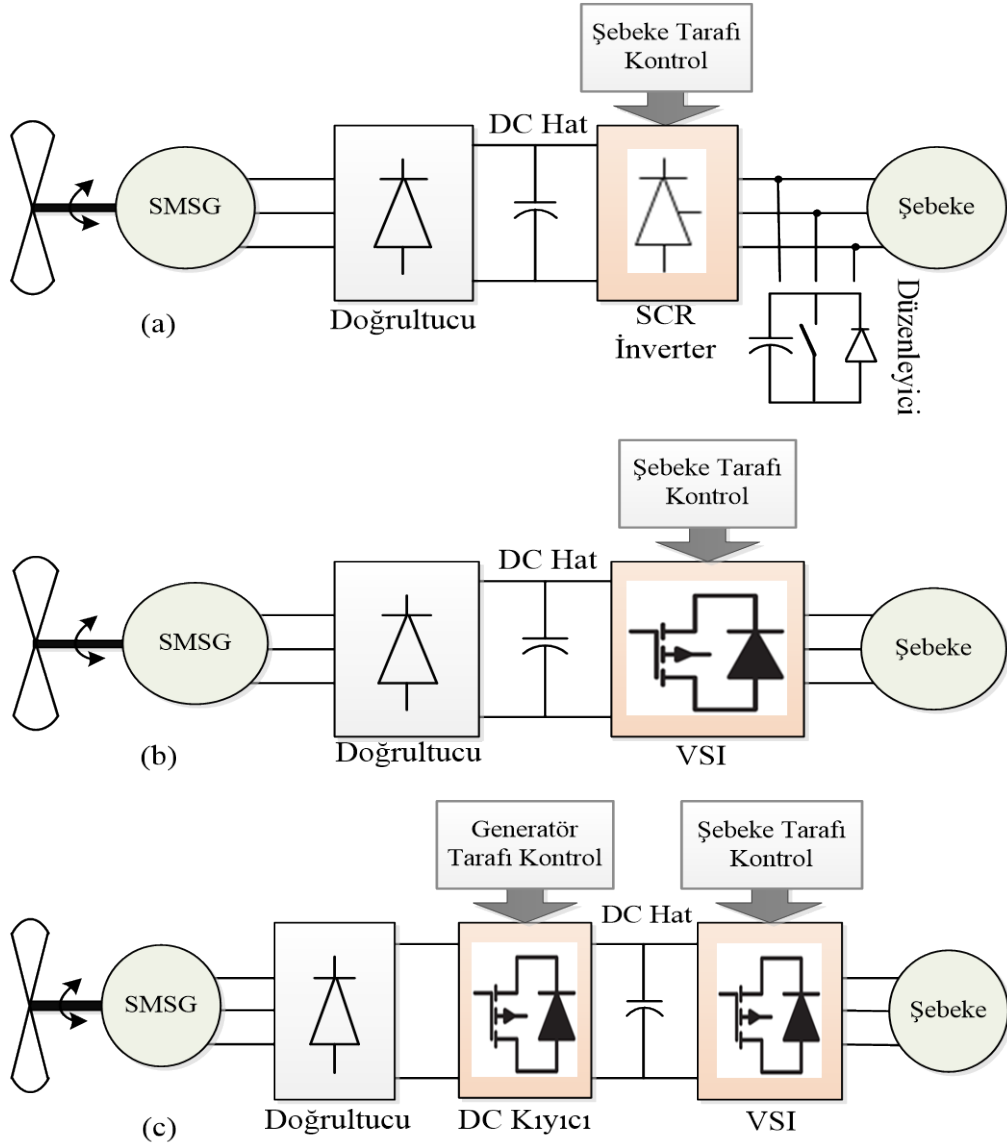
Artıran-azaltan çeviriciyi kullanan diğer bir çalışmada [88] ise değişken yük altında sabit mıknatıslı senkron generatörden oluşan küçük çaplı bir rüzgar türbininden elde edilen değişken gücün maksimum çıkarımı deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Tasarımı yapılan artıran-azaltan tip DA-DA çevirici mikro kontrolör yardımıyla kontrol edilmiştir.

Alçaltan tip çeviricinin kullanıldığı bir rüzgâr enerjisi çalışmasında [89], rüzgâr hız ölçümüne gerek kalmadan geliştirilen bir MPPT kontrol yöntemi kullanılmıştır. Yüksek verime sahip alçaltan tip çevirici sistem çıkışında yer alan aküyü, 24V sabit DA gerilimde şarj etmek için kullanılmıştır. Sistemin kontrolü bir mikro kontrolör yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Sistem güç çıkışının, önerilen kontrol yöntemi ve çevirici tipi ile %11-%50 arası arttırıldığı deneysel sonuçlar ile gözlemlenmiştir.

Şebeke bağlantılı rüzgâr enerji sistemleri ile ilgili yapılan çalışmalarda [90] SMSG’den oluşan bir rüzgâr türbini için gürbüz ve güvenilir şebeke güç ara yüzü tasarlanmıştır. Rüzgâr tribünü ve şebeke arasında köprü görevi gören şebeke güç ara yüzü, üç anahtarlı alçaltan tip doğrultucu ve eviriciden meydana gelmektedir [90-93].

Uygulamaların bazılarında kullanılan evirici çeşitlerinden bir tanesi yük tarafına bağlanan tristörlü evirici tipidir ve Şekil 2.8 (a)’da görülmektedir. Bu devre kullanımı gerekli anlarda uygulanan ateşleme açısı ile optimum enerji çıkarımı DA hat geriliminin regüle edilmesi ile sağlanmaktadır [94]. Bu tarz bir güç elektroniği ara yüzünün kullanılmasının dezavantajı ise harmoniklerin giderilmesi ve reaktif güç regülasyonu için aktif (kontrollü) bir düzenleyiciye ihtiyaç duyulmasıdır. Yapılan çalışmalarda SMSG’lü rüzgar türbinlerinde kontrolsüz doğrultucu diyotun kullanılmasıyla oluşturulan güç elektroniği devre şemaları Şekil 2.8’de gösterilmiştir [94, 95].



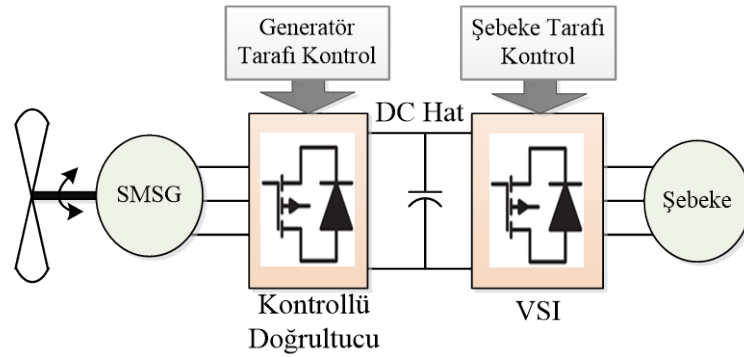


Şekil 2.8. Diyot doğrultuculu rüzgar türbinlerinde güç elektroniği topolojisi

Şekil 2.8’de verilen güç elektroniği ara yüzleri, rüzgâr enerji tribünlerinde kullanılan sistemlerdir. Şekil 2.8 (b)’de görüldüğü üzere ara yüz sistemi yük tarafında kontrol edilen gerilim kaynağı evirici (VSI), DC hatta yerleştirilen kondansatör ve pasif bir diyet doğrultucusundan meydana gelmektedir [96]. Önerilen bu sistem üzerinde birçok kontrol yöntemi test edilmiştir. Bunlardan bazıları MPPT algoritması ve stator frekans kontrolü için kullanılan türevsel kontroldür [97]. Yapılan çalışmalar ile enerji çıkarımında artış elde edilmiştir. Şekil 2.8 (c)’de verilen ara yüz incelendiğinde ise şekil 2.8. (b)’den farklı olarak eviriciden önce bir DA-DA çeviricinin kullanıldığı görülmektedir [98, 100]. DA hatta yerleştirilen DA-DA çevirici ile evirici DA hattın gerilimini kontrol etmek zorunda

kalmamakta ve buda daha esnek bir kontrol sağlamaktadır. Ayrıca çevirici kullanılarak evirici için ihtiyaç duyulan gerilim sağlanmaktadır [101, 102].

Literatürde ayrıca yukarıda verilen devrelerden farklı olarak, kullanılan generatör tipine bağlı olmaksızın hem generatör tarafı hem de şebeke tarafı güç elektroniği devreleri, darbe genişlik modülasyon (PWM) kontrollü “back to back” olarak adlandırılan devrelerde kullanılmakta olup Şekil 2.9’da gösterilmiştir. Bu topolojide aktif ve reaktif gücün kontrolü sağlanmaktadır. Ayrıca generatör tarafı çevirici generatör torkunu, şebeke tarafı çevirici DA hat gerilimini ve reaktif güç akışını kontrol eder [102-105].



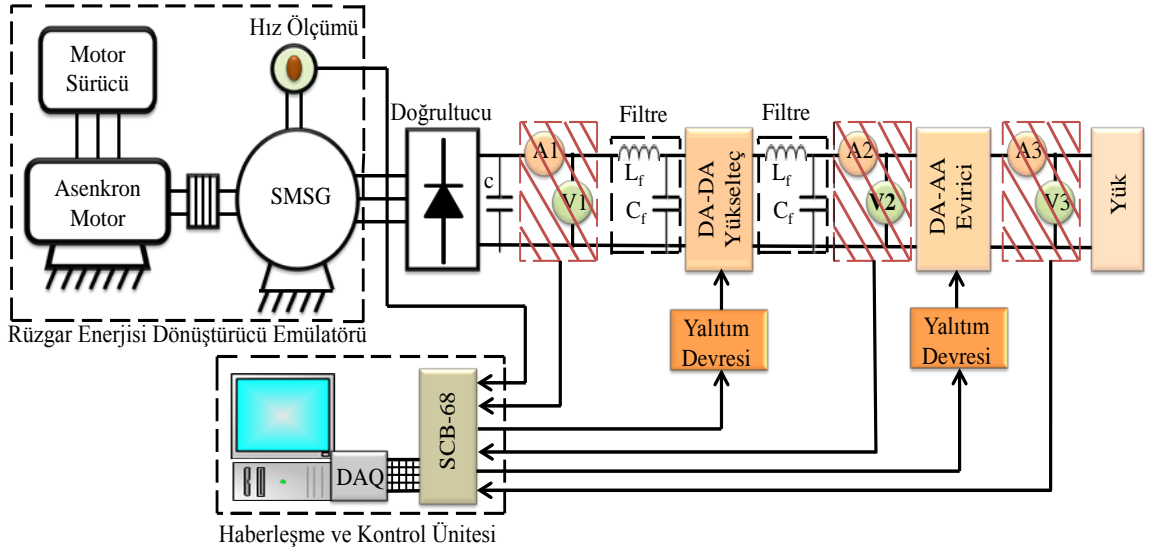
Şekil 2.9. Back to back PWM kontrollü rüzgar enerji dönüşüm sistemi

SMSG’li rüzgâr türbinlerinde kullanılan güç elektroniği çeviricilerin anahtarlanmasında Oransal-İntegral (OI), Oransal-İntegral-Türev (PID), Bulanık mantık (BM), bulanık sinir ağları, bulanık kayan kipli kontrol, adaptif bulanık, yapay sinir ağları vb. kontrol teknikleri kullanılmaktadır [106-112].

### 3. SİSTEM MODELİ VE BENZETİMİ

#### 3.1. Giriş

Bu bölümde, laboratuvar ortamında modellenmesi ve simülasyonu gerçekleştirilen rüzgâr enerji sistemi (RES) ele alınmıştır. Sistemin blok yapısı Şekil 3.1’de görülmektedir. Gerçekleştirilen uygulamada, rüzgâr hızının farklı durumları için incelemeler yapılmıştır. Laboratuvar ortamında RES sisteminin emülatör modeli oluşturularak rüzgâr enerji sisteminin bazı dezavantajları ortadan kaldırılmış ve daha verimli bir çalışma ortamı sağlanmıştır. Gerçekleştirilen RES sisteminin emülatör modelinde, pervane kısmı üç fazlı asenkron motor ve bu motorun farklı hızlarda dönmesini sağlayan sürücü düzeneğinden oluşmaktadır. Motor miline bağlanmış sürekli mıknatıslı senkron generatör (SMSG) yardımıyla elektrik üretilmekte ve sistem düzeneği üzerinde farklı koşullar altında gerekli kontrol ve ayarlamalar yapılmaktadır.



Şekil 3.1. Rüzgâr enerji dönüşüm sistemi blok diyagramı

Şekil 3.1’de gösterilen düzenek bir çok kısımdan meydana gelmektedir. Bu kısımlar;

1. Rüzgâr enerji dönüşüm emülatörü
2. Doğrultucu

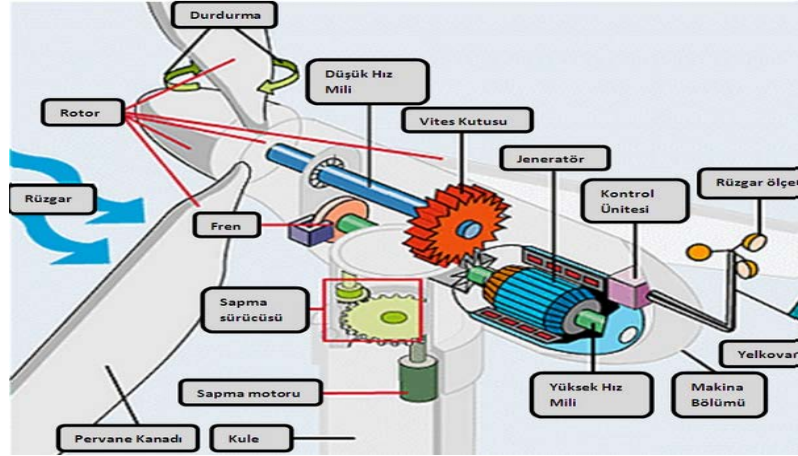
3. DA-DA yükselteç
4. DA-AA evirici
5. Yalıtım devreleri
6. Haberleşme ve kontrol ünitesi
7. Yük

başlıkları altında toplanabilir. Önerilen sistemde enerji kaynağı olarak sadece rüzgâr enerji dönüşüm sistemi kullanılmıştır. Aslında enerjinin sürekliliği açısından sisteme ek kaynaklar eklenebilir. Örneğin güneş enerji veya dalga enerji üretim sistemi, sürekliliği korumak açısından rüzgâr enerji dönüşüm sistemiyle birlikte kullanılabilir. Literatürde karma enerji üretim sistemleri olarak isimlendirilen bu tip sistemler üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. Ayrıca üretilen enerjinin depolanması için akü grupları kullanılabilir olup, gerçekleştirilen sisteme eklenmeleri kolay olacağı akılda tutularak bu çalışmada ele alınmamıştır. Şekil 3.1’de gösterilen sistemin kısımlarının modellenmesi aşağıdaki bölümlerde açıklanmaktadır.

### **3.2. Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemi**

Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinin kurulum maliyetlerinin yüksek olması, yer temini, rüzgar hızı vb. sakıncaları ortadan kaldırmak, farklı çalışma koşulları ve araştırmacılara daha rahat bir çalışma ortamı sağlamak amacıyla, laboratuvar ortamında RES emülatör modelleri kullanılmaktadır. Kurulan RES emülatör modelleri ve güç elektroniği alanındaki gelişmelere paralel olarak, bu alandaki çalışmalarda hızlı bir artış söz konusudur.

Rüzgâr türbinleri, rüzgârdaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye daha sonrada elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir [113]. Rüzgâr türbinleri genel olarak kule, jeneratör, dişli kutusu (hız dönüştürücüler), elektronik kontrol elemanları ve kanatlardan oluşur. Türbinler tasarım ve yapısına göre farklı elemanlardan oluşabilirler ancak her türbinin, özellikleri farklıda olsa, aynı fonksiyonu icra eden benzer bileşenleri vardır. Şekil 3.2’de genel olarak bir rüzgâr türbinini oluşturan elemanlar görülmektedir [114].

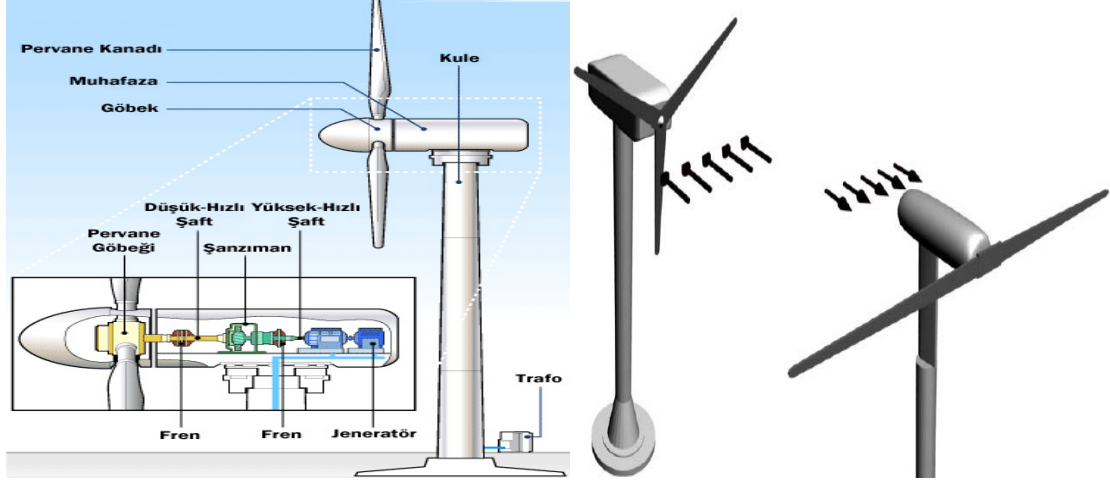


Şekil 3.2. Rüzgar türbinini oluşturan elemanlar

Rüzgâr türbin güçleri, rotor kanat yarıçapına göre kW'lardan MW'lara kadar geniş bir kapasiteye sahiptirler [115, 116]. Rüzgâr türbinlerini; güçlerine, dişli yapısına, sabit ve değişken hız durumlarına, kanat sayısına ve eksenlerine göre sınıflandırmak mümkündür. Rüzgâr türbinleri dönme eksenlerine göre üç gruba ayrılırlar.

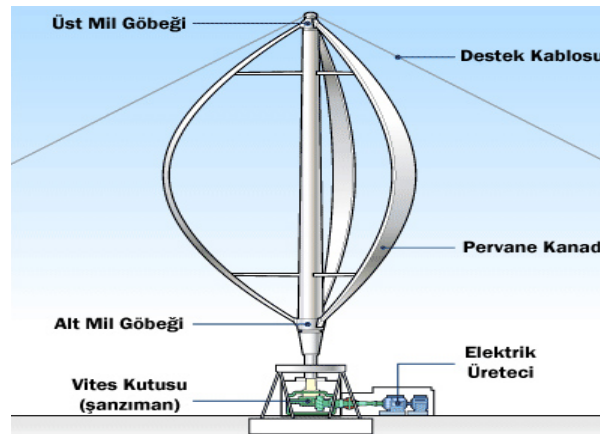
- Yatay eksenli rüzgâr türbinleri
- Düşey eksenli rüzgâr türbinleri
- Eğik eksenli rüzgâr türbinleri

Yatay eksenli rüzgâr türbinleri; rüzgâr enerjisi sistemlerinde en çok kullanılan türbinlerdir. Verimleri yaklaşık %45'dir. Kanat sayılarına göre sınıflandırılırlar. Enerji üretimi için kullanılanlar genellikle üç kanatlı olup, dönme eksenleri rüzgâr akımına paraleldir. Düşük hızlarda çalışabilme özelliğine sahiptirler. Maksimum enerji tutabilmesi için türbin kanatları rüzgâr yönüne diktir. Bu da rotorun kule üstünde dönmesiyle sağlanır. Yatay eksenli rüzgâr türbinlerinin kule üzerindeki yatay eksen yönündeki hareketi, rüzgâra yönelik birimlerde kılavuz bir kuyruk ve rüzgârı arkadan gören birimlerde ise oluşturulan konik açı ile sağlanır. Böylece sistem rüzgârı takip ederek maksimum faydayı sağlamış olur [114-118]. Şekil 3.3'te yatay eksenli rüzgâr türbini görülmektedir.



Şekil 3.3. Yatay eksenli rüzgar türbinleri

Düşey eksenli rüzgâr türbinleri; dönme eksenleri rüzgâr yönüne dik ve düşey olan bu türbinlerin kanatları da düşeydir. Bu türbinler rüzgârı her yönden kabul edebilme üstünlüğüne sahiptir. İlk harekete geçişleri güvenli değildir. Verimleri yaklaşık %35'dir. Türbinlerin üreteç, makine aksamı ve vites kutusu toprak seviyesinde kurulabildiğinden kuleye gerek duymaz. Bu yüzden düşük rüzgâr hızlarında çalışmak zorunda kalırlar ve kuyruk kısmına ihtiyaç duymazlar. Büyük güçlü düşey eksenli uygulamalarda mevcuttur [118]. Şekil 3.4'te düşey eksenli rüzgâr türbini görülmektedir.



Şekil 3.4. Düşey eksenli rüzgar türbini

Eğik eksenli rüzgâr türbinleri; dönme eksenleri düşeyle rüzgâr yönünde bir açı yapan rüzgâr türbinleridir. Bu tip türbinlerin kanatları ile dönme eksenleri arasında belirli bir açı bulunmaktadır. Verimleri düşük olup yaygın bir kullanım alanı bulunmamaktadır.

Çalışma hızlarına göre rüzgâr türbinleri:

- Sabit hızlı rüzgâr türbinleri
- Değişken hızlı rüzgâr türbinleri

olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadırlar. Şebeke açısından rüzgâr türbinlerine bakıldığında:

- Şebekeye bağlı rüzgâr türbinleri
- Şebekeden bağımsız rüzgâr türbinleri

olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadırlar. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatörler teknolojik gelişmelere paralel olarak zaman içerisinde çeşitlilik arz etmektedirler. Bu generatörler, rüzgâr türbininin ürettiği mekanik enerjiyi minimum kayıpla elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılırlar. Üretilen enerjinin şebekeye uygun hale gelmesi için çeşitli güç elektroniği düzeneklerinden faydalanırlar [119, 120].

Rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatörler;

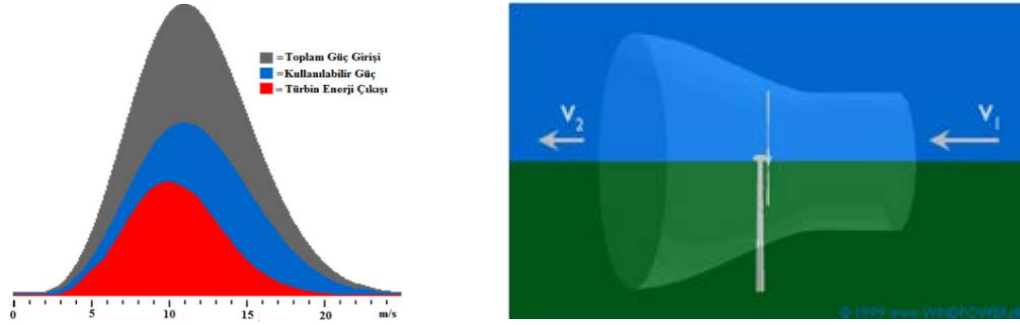
1. Doğru akım generatörü
2. Asenkron generatör:
  - a. Sincap kafesli asenkron generatör
  - b. Sargılı rotorlu asenkron generatör:
    - I. Çift beslemeli asenkron generatör
    - II. OptiSlip asenkron generatör
3. Senkron generatör:
  - a. Sargılı rotorlu senkron generatör
  - b. Sürekli mıknatıslı senkron generatör

olmak üzere üç gruba ayrılır [120-125]. Bu çalışmada şebekeden bağımsız, değişken hızlı ve sürekli mıknatıslı senkron generatörden oluşan RES modeli, deneysel düzeneği oluşturulmuş ve gerekli incelemeler yapılmıştır.

### 3.2.1 Rüzgâr Türbinlerinin Aerodinamik Karakteristikleri

Aerodinamik, hava akımı içerisindeki nesnelere hareketini ve hava akımının ürettiği kuvvetleri fiziksel yasalarla inceleyen bir bilim dalıdır. Türbin kanatlarının aerodinamik yapısı rüzgâr türbininin güç eğrisini ve gürültü seviyesini önemli ölçüde etkiler. Rüzgâr türbinlerinde rüzgârın tüm enerjisi kullanılmamakta ve ideal bir rüzgâr türbini rüzgârın hızını  $2/3$  oranında düşürmektedir. Rüzgârdan elde edilebilecek maksimum güç, rüzgâr

gücünün %59'u veya 16/27'si olduğu Betz Kanunu ile açıklanmaktadır [126]. Şekil 3.5'te Betz Kanununun daha iyi anlaşılması için, güç ile rüzgar hızı arasındaki ilişkiyi gösteren temel eğri gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Betz Kanunu güç-rüzgar hızı ilişkisi

Rüzgâr türbini enerji çevriminin doğrusal olmadığı göz önünde bulundurularak, rüzgâr türbininin sürekli durum güç karakteristiği temel alınarak türbin modeli geliştirilmiştir [116, 126, 127]. “ $V_w$ ” rüzgâr hızı ile taşınan “ $m$ ” kütleli havadaki kinetik enerji;

$$Kinetik\ enerji = \frac{1}{2} m V_w^2 (J) \quad (3.1)$$

Havadaki taşınan güç, kinetik enerjinin birim zamandaki akış oranıdır. Türbin modeli; güç katsayısı ( $C_p$ ), uç-hız oranı ( $\lambda$ ), eğim açısı ( $\beta$ ) ve türbin momenti  $T$  'nin bileşenidir. Rüzgâr türbininin mekanik çıkış gücü ( $P_m$ ); kanatın tam tur dönmesi ile oluşan rotor süpürme alanının ( $A$ ), havanın yoğunluğunun ( $\rho$ ), güç katsayısının ( $C_p$ ) ve rüzgâr hızı ( $V_w$ )'nin bir fonksiyonu olarak aşağıdaki denklemle tanımlanır.

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \rho A V_w^3 \quad (W) \quad (3.2)$$

$$A = \pi R^2 \quad (3.3)$$

$A$  rotor süpürme alanı ( $m^2$ ),  $\rho$  hava yoğunluğu ( $kg/m^3$ ),  $R$  türbin yarıçapı ( $m$ ) olmak üzere mekanik çıkış güç denklemi;



$$P_m = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V_w^3 \quad (W) \quad (3.4)$$

şeklinde ifade edilir [128, 129]. Çıkış gücünün mil hızına oranı, türbin momentini vermektedir.

$$T_t = \frac{P_m}{\omega_t} \quad (Nm) \quad (3.5)$$

$T_t$  türbin momentini (Nm),  $\omega_t$  ise türbinin açısal hızıdır (rad/sn). Türbin generatör miline, dönüştürme oranı  $\zeta$  olan bir dişli kutusu üzerinden bağlıdır. Dişli kutusu, generatör mil hızını ayarlamak için kullanılır. Mekanik güç iletimi esnasında dişli kutusu üzerinde kayıplar meydana geldiğinden dolayı rüzgâr gücünün tamamı makinaya aktarılamaz. Dişli kutusu kullanılmadığında veya kayıplar ihmal edildiğinde, rüzgâr türbininin generatör tarafına indirgenmiş momentini ve mil hızı aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir.

$$T_m = \frac{T_t}{\zeta} \quad (3.6)$$

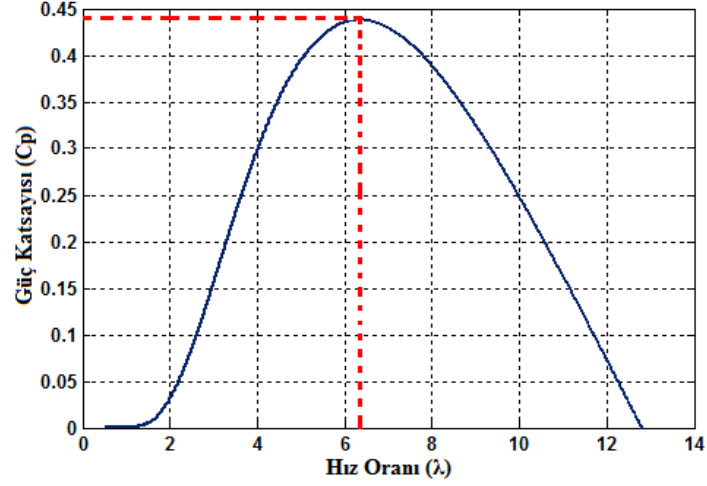
$$\omega_m = \zeta \omega_t \quad (3.7)$$

Burada  $T_m$ , generatörü süren moment ve  $\omega_m$  ise generatörün mil hızıdır. Rüzgâr hızının bir fonksiyonu olan  $C_p$ , türbinin dönme hızı ve türbin kanatlarının adım açısı ile temsil edilmektedir. Rüzgâr hızı  $V_w$  (m/sn), rotor yarıçapı  $R$  (m) ve rüzgâr türbini dönme hızı (rotor açısal hız)  $\omega_t$  (rad/sn) kullanılarak, noktasal hız (uç-hız) oranı olarak adlandırılan ( $\lambda$ ) şu şekilde ifade edilir [130, 131].

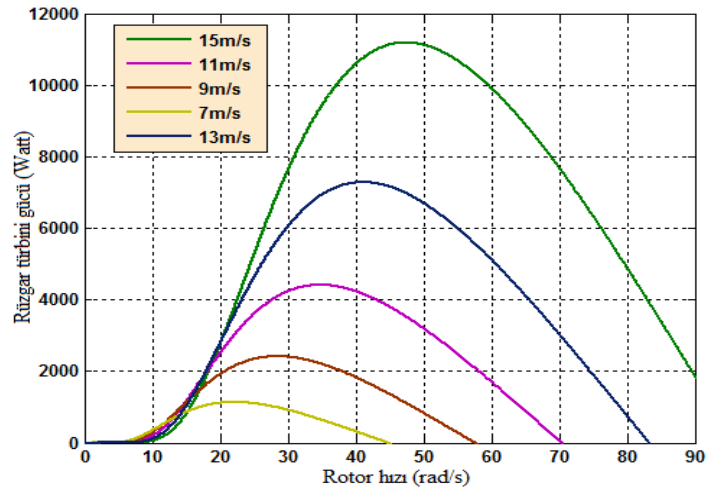
$$\lambda = R \frac{\omega_t}{V_w} \quad (3.8)$$

Rotor güç katsayısı  $C_p$ , uç-hız oranı  $\lambda$  ile değişir.  $C_p$  ile  $\lambda$  arasındaki doğrusal olmayan ilişki herhangi bir türbin için deneysel olarak belirlenebilir.  $C_p$  katsayısını bütün hızlarda maksimumda tutabilmek için, rotor açısal hızının,  $C_p$ 'yi maksimumda tutacak  $\lambda$  değerine uygun ayarlanması gerekir. Bu durum sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde rotor hız kanat eğim açısıyla, değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde ise hem kanat eğim açısıyla hem de generatör

tarafındaki inverter ile gerçekleştirilir [126]. Şekil 3.6’da  $C_p$ - $\lambda$  arasındaki ilişkiyi gösteren grafik ve Şekil 3.7’de türbin gücünün rotor hızıyla değişim karakteristiği görülmektedir.

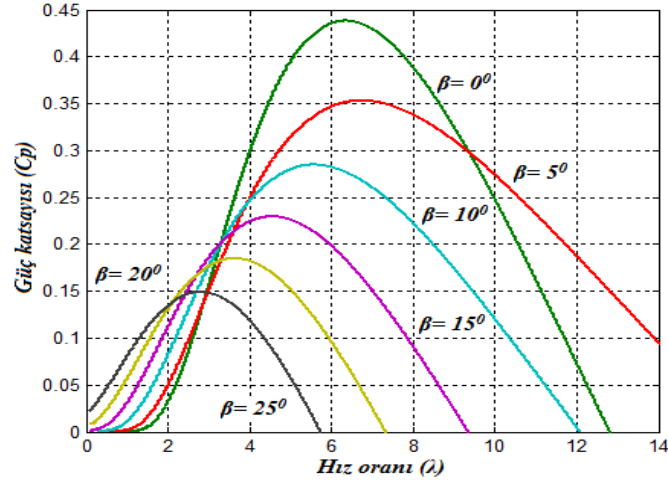


Şekil 3.6. Güç katsayısı ile hız oranı değişimi karakteristiği

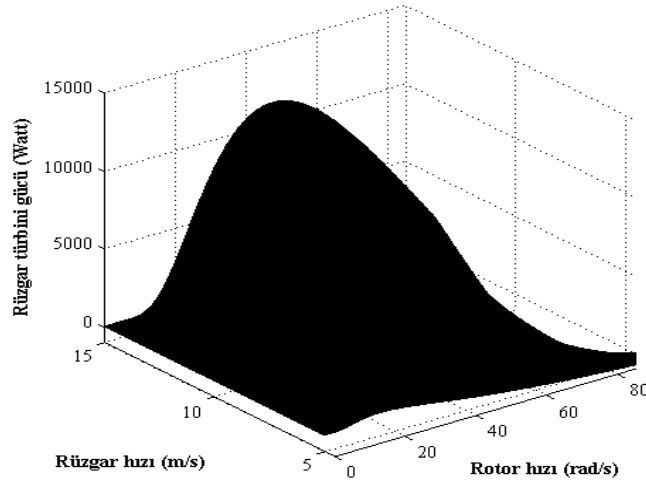


Şekil 3.7. Rüzgâr türbin gücünün rotor hızıyla değişim karakteristiği

Güç katsayısı  $C_p$ , rüzgâr türbini kanatlarının rüzgârın estiği yöne göre açılmal olarak değiştirilmesi ile ayarlanır. Değişken hızlı rüzgâr türbinleri, eğim açısını değiştirebilecek mekanizmaya sahip olup kanat uç hızını ayarlayarak daha iyi güç katsayısı elde edebilirler. Belli bir rüzgâr hızında, türbin kanatlarındaki açının değişimine göre rüzgâr türbini farklı güç karakteristikleri vermektedir. Şekil 3.8’de belli bir rüzgâr hızı için türbin kanatlarının farklı konum ( $\beta$ ) açılara göre  $C_p - \lambda$  karakteristiği, Şekil 3.9’da rüzgâr hızı, rotor hızı ve rüzgâr türbin gücü değişimlerini gösteren grafikler verilmiştir.



Şekil 3.8. Eğim açısı  $\beta$ 'nin değişim ile  $C_p - \lambda$  karakteristiği



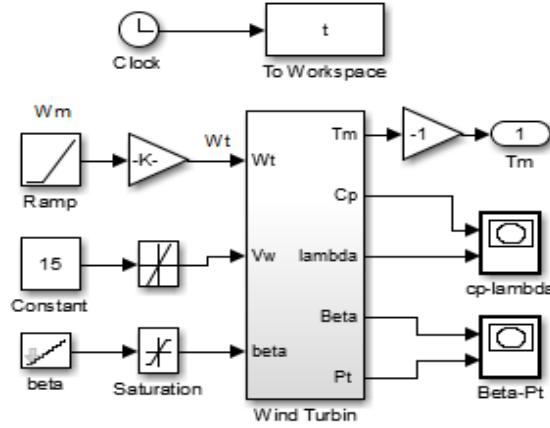
Şekil 3.9. Rotor hızı, rüzgâr hızı ve rüzgâr türbini gücü değişimi

Belli bir rüzgâr hızında rüzgâr türbininden maksimum güç alınabilmesi için, sisteme uygulanan kontrol yöntemi, rüzgâr türbininin kendi optimal güç eğrisini izlemesine müsaade etmelidir. Rüzgâr türbinlerinde güç katsayısı  $C_p$ 'nin, uç-hız oranı  $\lambda$  ve konum açısı  $\beta$  ile ilişkisini gösteren denklem (3.13)'de verilmiştir [126-132].

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (3.13)$$

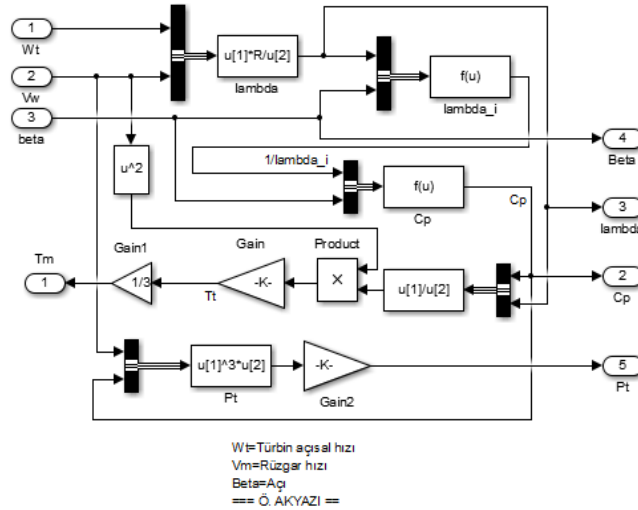
$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (3.14)$$

Yukarıdaki denklemler kullanılarak Matlab/Simulinkte oluşturulan rüzgâr türbini modeli Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Rüzgâr türbini Matlab/Simulink modeli

Matlab/Simulink programı kullanılarak oluşturulan rüzgâr türbini modelindeki “Wind Turbine” bloğunun iç yapısı, Şekil 3.11’de görülmektedir.

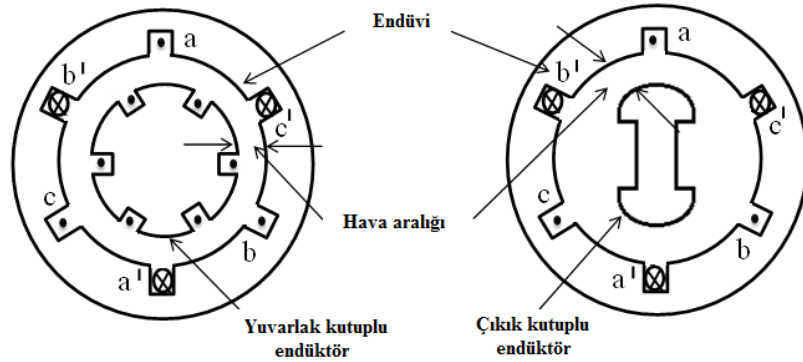


Şekil 3.11. Wind Turbine bloğunun iç yapısı

Yukarıda verilen karakteristikler Matlab/Simulink programında oluşturulan ve Şekil 3.11 ve 3.12’de gösterilen rüzgâr türbini modeli kullanılarak elde edilmiştir.

### 3.2.2 SMSG Yapısı ve Matematiksel Modeli

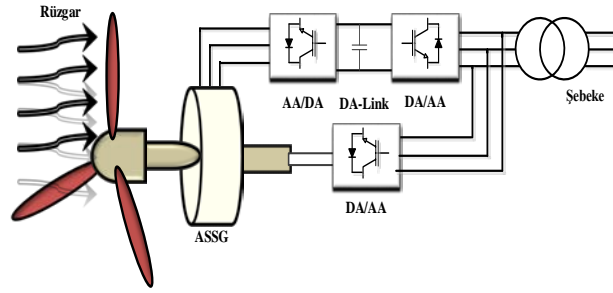
Senkron makinalar, elektromıknatıslı veya küçük güçlerde sabit mıknatıslı bir rotor ile statorunda bir veya çok fazlı alternatif akım sargısı bulunan, sabit bir senkron hızla dönen, motor veya generatör olarak çalışabilen alternatif akım makineleridir. İlk defa 1885’de Nollet ve Van Malderen tarafından generatör olarak imal edilmiştir. Güçleri bugün 1500-2000 MVA’e kadar ulaşmıştır. Gerilim değerleri 6, 15, 20, 27 kV’dur. Daha çok generatör olarak kullanılmaktadırlar. Senkron makinalar, direk olarak şebekeye bağlanmazlar, özel yol verme yöntemleriyle çalıştırılırlar [131-135]. Senkron makinaların stator ve rotor sargıları farklı kaynaklardan beslendiğinden dolayı çift uyarımlı makinalar sınıfına girerler. Senkron makinaların küçük güçlülere sabit mıknatıslı, büyük güçlülere sargılı olarak imal edilir. Bu makinelerin güçleri arttıkça birim güç başına maliyetleri azalır ve verimleri artar. Rotor yapısı bakımından çıkık kutuplu ve silindirik (yuvarlak) kutuplu olmak üzere ikiye ayrılırlar [131-135]. Şekil 3.12’te senkron makinelerin rotor yapıları görülmektedir.



Şekil 3.12. Yuvarlak ve Çıkık kutuplu rotor yapısı

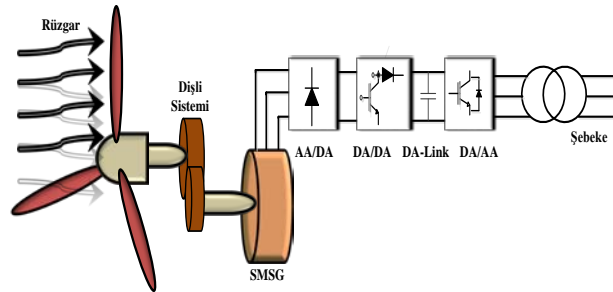
Silindirik rotorlu senkron generatörlerin hızları yüksek olup, rotor yarıçapları küçük ve rotor uzunlukları büyüktür. Genellikle kutup sayıları 2, 4, 6 olarak imal edilirler. Endüvi ve endüktör arasındaki hava aralığı sabittir. Çıkık kutuplu senkron generatörlerde ise kutup sayısı çok fazla olup, yarıçapları büyük ve rotor uzunlukları kısadır. Endüvi ve endüktör arasındaki hava aralığı değişkendir [133-136].

Rüzgar türbinlerinde, genellikle alan sargılı (rotoru sargılı) yada sürekli mıknatıslı olmak üzere iki tip senkron generatör kullanılmaktadır [119]. Şekil 3.13’te rüzgar türbini ile tahrik edilmiş alan sargılı senkron generatörün şebeke bağlantısı görülmektedir.



Şekil 3.13. Alan sargılı senkron generatörün şebeke bağlantısı

Bu generatörlerin rotorunda sargı devresinin bulunması, sürekli mıknatıslı senkron generatörlere göre bir dezavantajdır. Sürekli mıknatıslı senkron generatörlerin (SMSG) statoru sargılı olup rotorunda sürekli mıknatıslar mevcuttur. Bu generatörler, kendinden uyarımlı olup bakım maliyetleri azdır ve herhangi bir hızda güç üretebilme kabiliyetlerine sahiptirler. Bu generatörler daha çok küçük güçlü rüzgâr sistemlerinde tercih edilirler. Bu generatörlerin şebeke bağlantıları güç elektroniğindeki gelişmelere paralel olarak çeşitlilik göstermektedir [119, 137]. Şekil 3.14'te rüzgâr türbinine akuple edilmiş SMSG'nin şebeke bağlantısı verilmiştir.



Şekil 3.14. Sürekli mıknatıslı senkron generatörün şebeke bağlantısı

Sürekli mıknatıslı senkron generatörler yapısal olarak, mıknatısların rotora yerleştirilme şekline göre;

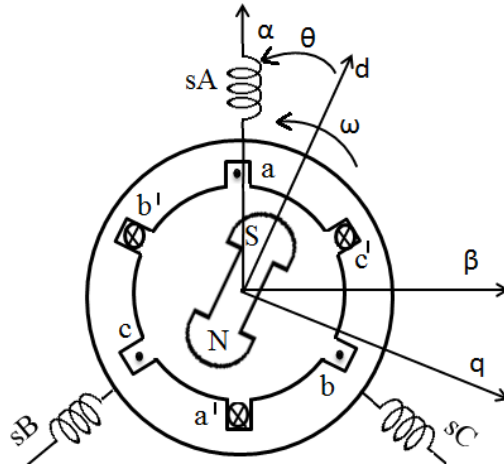
1. Yüzey yerleştirmeli
2. İçer gömülü

olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Ayrıca hava aralığı akı dağılımına göre senkron generatörler;

- a. Radyal akılı sürekli mıknatıslı senkron generatörler
- b. Eksenel akılı senkron generatörler

şeklinde sınıflandırılırlar. Gerçekleştirilen RES üretim modelinde kullanılan sürekli mıknatıslı senkron generatörün rotoru, gömülü tip mıknatıslıdır. Gömülü tip mıknatıslı rotorun, yüzey mıknatıslı rotora göre en önemli üstünlüğü mekanik sağlamlığıdır. Ayrıca bu rotorların merkezkaç kuvvetlerine karşı mukavemetleri yüksek olup hızlı uygulamalar için uygundur. Bu yapıdaki rotora sahip olan makineler, çıkık kutuplu senkron generatör davranışı gösterir [137, 138].

SMSG'ün matematiksel modeli, sistemin fiziksel davranışının benzetimini yapmak veya bir algoritmaya dayanarak gerçek zamanda denetlenmesini sağlamak açısından gereklidir. Sistemin matematiksel modeli, sistem parametrelerini etkilemeyecek, analiz amacını saptırmayacak varsayımlar ve ihmaller üzerine kurulur. Bu amaçla makineye ilişkin dinamik denklemler doğrudan yazılabildiği gibi, eksen dönüşümleri yardımıyla bu dinamik denklemlerin daha kolay çözülebilir biçimde elde edilmesi mümkündür. Bu indirgeme sırasında, üç fazlı sistemden iki fazlı sisteme geçerken manyeto-motor kuvvet (mmk) ve gücün değişmediği kabul edilir. Sistemin matematiksel modellenmesine geçmeden önce matematiksel ifadeleri farklı referans düzlemde kullanma imkânı sağlayan Clark ve Park dönüşümleri anlatılacaktır. Şekil 3.15'de SMSG'ün fazör eksenleri gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.15. SMSG'ün fazör eksenleri gösterimi

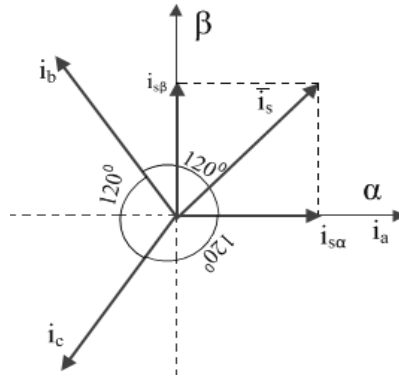
Üç fazlı sistemlerin d-q eksen dönüşümü yapılmadan önce,  $\alpha$ - $\beta$  olarak isimlendirilen durağan stator düzlemine dönüşüm yapılır. Clark dönüşümü olarak isimlendirilen bu işlemde, 3 fazlı makine denklemleri iki fazlı durağan eksenle ifade edilebilir [136, 138]. Denklem (3.15)'te Clark dönüşümünün matris formunda genel ifadesi verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (a, b, c) \rightarrow (\alpha, \beta) \quad (3.15)$$

Bu dönüşümdeki  $i_0$  bileşeni sıfır bileşeni olup dengeli sistemlerde değeri sıfırdır. Bu dönüşümün tersi olarak durağan referans düzlemindeki ifadelerin stator abc düzlemindeki ifadesi denklem (3.16)'da verilmiş olup bu işleme ters Clark dönüşümü denilmektedir.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{3}{2}} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{3}{2}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (\alpha, \beta) \rightarrow (a, b, c) \quad (3.16)$$

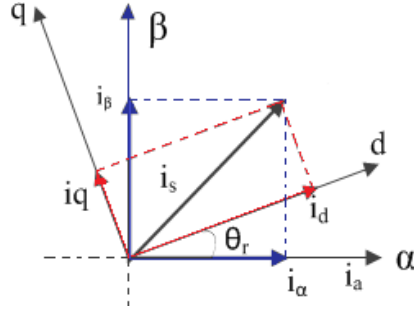
Şekil 3.16'da üç fazlı stator akımları  $i_a, i_b, i_c$  ve  $(\alpha-\beta)$  olarak isimlendirilen durağan eksenler görülmektedir.



Şekil 3.16. İki fazlı durağan eksen stator referans düzlemi

İki faz sabit düzlemden  $(\alpha-\beta)$ , iki faz rotor düzlemine  $(d-q)$  geçmek için Park dönüşümü kullanılır [136, 138]. Şekil 3.17'de  $(\alpha-\beta)$  olarak isimlendirilen durağan sistemler ile iki fazlı dönen rotor referans düzlemi görülmektedir.





Şekil 3.17. iki fazlı dönen rotor referans düzlemi

Denklem (3.17)'de Park dönüşümü ve denklem (3.18)'de Park dönüşümünün matris formunda genel ifadesi verilmiştir. Ayrıca denklem (3.19)'da ters Park dönüşümü ve denklem (3.20)'de ters Park dönüşümünün matris formunda genel ifadesi verilmiştir. Burada  $\theta_r$  rotor akı pozisyonudur.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \sin(\theta_r) \\ -\sin(\theta_r) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\alpha - \beta) \rightarrow (d - q) \quad (3.17)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\sin(\theta_r) \\ \sin(\theta_r) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (d - q) \rightarrow (\alpha - \beta) \quad (3.19)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\sin(\theta_r) & 1 \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

SMSG'ün üç faz referans sisteminde gerilim matematiksel modeli;

$$\frac{d\psi_a}{dt} = i_a R_s + U_a \quad (3.21)$$

$$\frac{d\psi_b}{dt} = i_b R_s + U_b \quad (3.22)$$

$$\frac{d\psi_c}{dt} = i_c R_s + U_c \quad (3.23)$$

$$\Psi_{abc} = -L_s i_{abc} + \Psi_m \quad (3.24)$$

Burada;

$i$  : Stator akımı

$R_s$  : Stator direnci

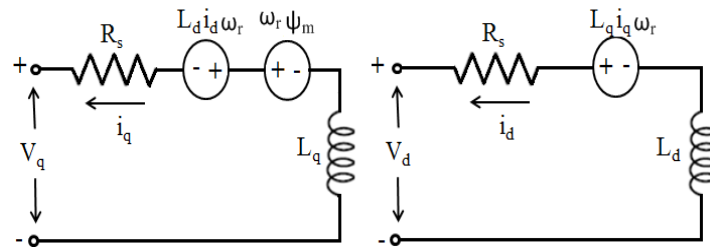
$U$  : Stator gerilimi

$\psi_m$  : Sürekli mıknatıs akısı

$\Psi_{abc}$  : Makinanın toplam akısı

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlerde mıknatısların rotordaki yerleşimine göre statordaki öz ve karşıt endüktanslar değişmektedir. Yüzeyle yerleştirilmiş mıknatıs yapısına sahip SMSG'lerde stator öz ve karşıt endüktansları birbirine eşit ve  $\theta_r$  den bağımsızdır. İçe gömülü rotora sahip SMSG'lerde stator öz ve karşıt endüktansları birbirine eşit olmayıp  $\theta_r$ 'ye bağlı olarak değişmektedir [136, 138, 139]. Çalışmada içe gömülü rotora sahip SMSG kullanılmıştır.

Yukarıda verilen dönüşümler kullanılarak Şekil 3.18'de verilen SMSG'ün d-q eşdeğer devresi elde edilir.



Şekil 3.18. SMSG'ün d-q eşdeğer devresi

Eşdeğer devreden,

$$V_q = -\dot{I}_q R_s - L_q \frac{di_q}{dt} - \omega_r L_d \dot{I}_d + \omega_r \psi_m \quad (3.25)$$

$$V_d = -\dot{I}_d R_s - L_d \frac{di_d}{dt} + \omega_r L_q \dot{I}_q \quad (3.26)$$

olur [140]. Burada  $V_d$  ve  $V_q$  d-q eksen gerilimlerini,  $\dot{I}_q$  ve  $\dot{I}_d$  d-q eksen akımlarını,  $L_d$  ve  $L_q$  d-q eksen endüktanslarını ve  $\psi_m$  mıknatıs akısını göstermektedir. Stator akı bileşenleri denklem (3.27) ve (3.28)'deki gibi ifade edilebilir.

$$\psi_d = L_d \dot{I}_d + \psi_m \quad (3.27)$$

$$\psi_q = L_q \dot{I}_q \quad (3.28)$$

d-q eksen büyüklüklerine göre moment denklemi;

$$T_e = \frac{3P}{2} [\psi_d \dot{I}_q - \psi_q \dot{I}_d] \quad (3.29)$$

olur. Burada P çift kutup sayısı olmak üzere denklem (3.27) ve (3.28)'te verilen  $\psi_d$  ve  $\psi_q$  akıları 3.29'da yerine yazılırsa moment denklemi,

$$T_e = \frac{3P}{2} [\psi_m \dot{I}_q + (L_d - L_q) \dot{I}_d \dot{I}_q] \quad (3.30)$$

olarak elde edilir [139-141]. Bu denklemde, birinci terim mıknatıs tarafından üretilen momenti ikinci terim ise relüktans momentini ifade etmektedir. Çalışmada kullanılan SMSG'de mıknatıslar rotora gömülü şekilde yerleştirildiğinden endüktanslar dolayısıyla relüktans momenti sıfır değildir. Ancak yüzey yerleştirmeli SMSG'lerde d ve q eksen endüktansları ve dolayısıyla relüktansları birbirine eşit olduğundan relüktans momenti sıfırdır. Bu durumda moment denklemi,

$$T_e = \frac{3P}{2} [\psi_m \dot{I}_q] \quad (3.31)$$

olarak elde edilir [142]. SMSG'nin aktif ve reaktif güç eşitlikleri denklem (3.32) ve (3.33)'de verilmiştir.

$$P_g = \frac{3}{2} [V_d i_d + V_q i_q] \quad (3.32)$$

$$Q_g = \frac{3}{2} [V_d i_q - V_q i_d] \quad (3.33)$$

SMSG'ün statorunda kullanılan sargılardan dolayı meydana gelen kayıp güç,

$$P_{cu} = \frac{3}{2} R_s (i_d^2 + i_q^2) \quad (3.34)$$

şeklinde yazılır. Sürekli mıknatıslı senkron makinanın motor veya generatör olarak çalışması, akımın q bileşeninin işaretine bağlıdır. Akımın q bileşeni negatif ise makine generatör olarak, akımın q bileşeni pozitif ise makine motor olarak çalışmaktadır. Akımın q bileşeninin işareti makinanın elektromanyetik momentinin işaretine bağlıdır. Elektromanyetik moment işareti negatif ise q negatiftir, pozitif ise q pozitiftir.

### 3.3. Güç Elektroniği Devreleri

Bu bölümde, Şekil 3.1'de gösterilen rüzgar enerji dönüşüm sisteminde, asenkron motorla tahrik edilen sürekli mıknatıslı senkron generatörün ürettiği enerjinin istenilen frekans ve genlikte olmasını sağlayan güç elektroniği düzenekleri ele alınacaktır. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi sistemde kullanılan güç elektroniği donanımları temel olarak alternatif akımı (AA) doğru akıma (DA) dönüştüren çevirici (doğrultucu), (DA/DA) artıran çevirici ve DA/AA çevirici (evirici) kısımlarından oluşmaktadır. Ayrıca deneysel çalışmalar kısmında sistem için tasarlanan akım gerilim algılayıcıları, yalıtım ve filtre devreleri hakkında bilgi verilecektir.

### 3.3.1. AA/DA Çevirici (Doğrultucu)

Sistemde kullanılan sürekli mıknatıslı senkron generatörün AA çıkışını doğru akıma dönüştürmek için (AA/DA) doğrultucu kullanılmıştır.

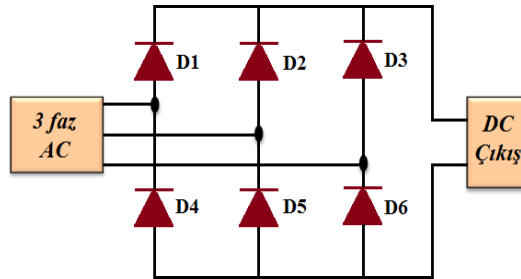
AA/DA dönüştürücülerin temel özellikleri:

- Doğal komütasyonludur.
- Diyot ve tristörler ile gerçekleştirilir.
- Faz kontrol yöntemi ile kontrol edilir.
- Ortalama olarak çıkış gerilimi ayarlanır.
- Şebeke tarafında yüksek değerli harmonikler oluşur.
- Çıkış tarafında yüksek değerli dalgalanmalar oluşur.
- En yaygın olarak kullanılan en eski dönüştürücü türüdür.

olarak sıralaya biliriz. AA/DA dönüştürücülerin farklı açılardan:

1. Faz sayısı açısından,
  - a. Tek fazlı doğrultucular
  - b. Çok fazlı doğrultucular
2. Doğrultulan dalga sayısına göre
  - a. Yarım dalga doğrultucular
  - b. Tam dalga doğrultucular
3. Kontrol açısından
  - a. Kontrolsüz doğrultucular
  - b. Kontrollü doğrultucular
  - c. Yarım kontrollü doğrultucular

sınıflandırılması yapılır [138, 143, 144]. Şekil 3.19'da sistemde kullanılan üç fazlı tam dalga kontrolsüz (diyotlu) doğrultucu devre verilmiştir.



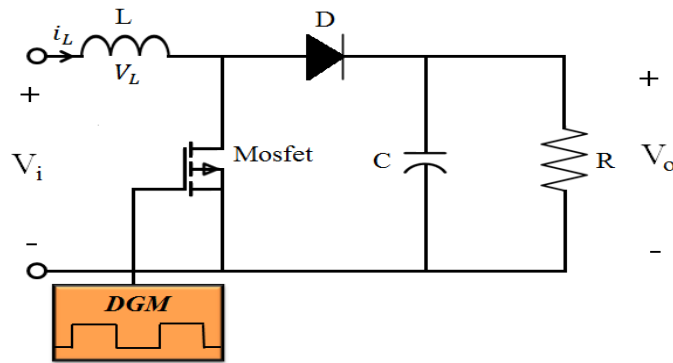
Şekil 3.19. Sistemde kullanılan doğrultucu devre

Yapılan deneysel çalışmada asenkron motor ile tahrik edilen SMSG'ün üretmiş olduğu alternatif gerilim Şekil 3.19'da gösterilen üç fazlı tam dalga denetimsiz doğrultucu ile doğrultularak DA/DA artıran çeviriciye uygulanmıştır.

### 3.3.2. DA/DA Dönüştürücü

DA/DA dönüştürücüler, Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM-PWM) vasıtasıyla çıkış gerilimini istenilen değere ayarlayan devrelerdir. Günümüz DA/DA dönüştürücüler, elektrikli araç teknolojisi, anahtarlamalı güç kaynakları, enerji üretimi, kontrol ve haberleşme devreleri, robotik uygulamalar gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. DA/DA dönüştürücülerin azaltan, artıran, azaltan-artıran, cuk ve tam köprü tipleri mevcut olup yaygın olarak azaltan, artıran ve azaltan-artıran tipleri kullanılmaktadır. Bu çeviricilerden azaltan ve artıran çeviriciler temel çeviriciler olup diğerleri bunlardan türetilmiştir [143-153]. Bu tez kapsamında kurulan deneysel sistemde artıran tip DA/DA dönüştürücü kullanılmış olup bu bölümde bu dönüştürücüler hakkında bilgi verilecektir. Ayrıca sistem için tasarlanan DA/DA dönüştürücü açıklanacaktır.

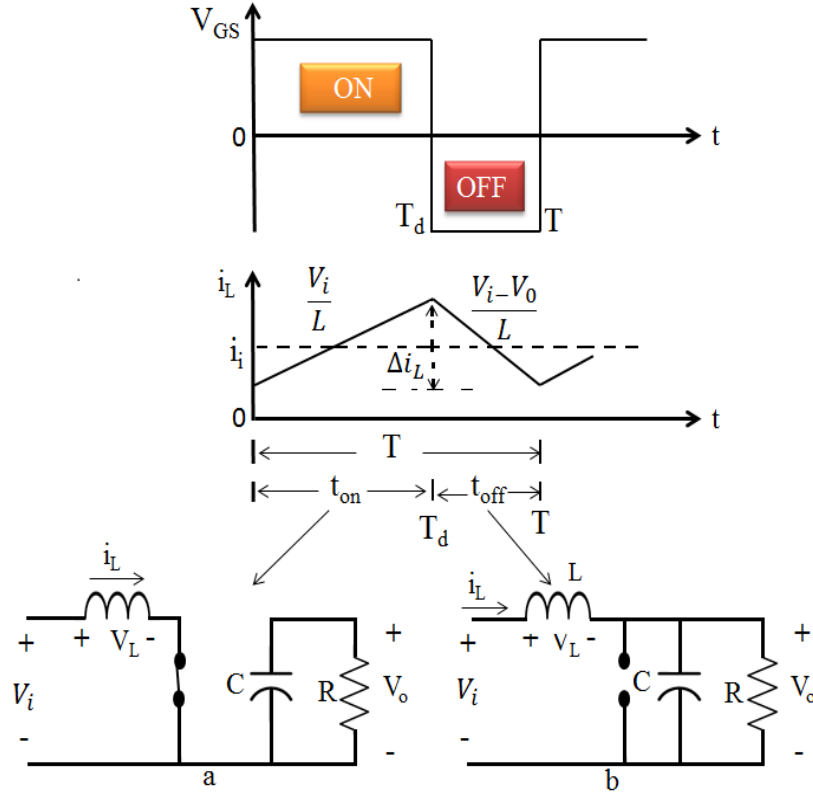
İdeal bir artıran tip DA/DA dönüştürücünün genel yapısı Şekil 3.20'de görüldüğü gibi yarı iletken anahtar, diyot, endüktans, kapasite ve yük olarak kullanılan direnç elemanlarından oluşmaktadır. Adından da anlaşılacağı gibi bu çeviricilerde çıkış gerilimi her zaman giriş geriliminden daha büyüktür [143, 145, 146, 153].



Şekil 3.20. DA/DA artıran (Boost) çevirici genel yapısı

Şekil 3.20'de gösterilen devrenin kontrolü, yarı iletken güç anahtarının iletim ve kesim durumuna göre gerçekleştirilmektedir. Sürekli iletim durumunda anahtar on

konumuna geçince, diyot ters kutuplanır ve çıkış devresini girişten ayırır. Bu esnada kaynaktan endüktansa enerji uygulanır ve endüktans akımı sürekli akmaktadır. Bunun neticesinde bobin içerisinden geçen akım artar ve bobin üzerinde enerji depolamaya başlar. Bu durumda DA kaynağı endüktansı beslerken kondansatör de yükü besler [143, 145, 146].  $0 < t \leq T_d$  zaman aralığında oluşan bu durum Şekil 3.21’de gösterilmiştir. Anahtar kesime gidince, yük hem endüktanstan hem de DA kaynaktan beslenir ve giriş geriliminden yüksek bir çıkış gerilimi elde edilir. Ayrıca güç elemanları çıkış gerilimine maruz kalır. Bu durumda devre bozta çalıştırılmaz; aksi halde çıkış gerilimi aşırı yükselir ve devreye hasar verir.  $T_d < t \leq T$  zaman aralığında oluşan bu durum Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Sürekli akım iletim durumu a) Anahtar “ON” konumunda  
b) Anahtar “OFF” konumunda

Şekil 3.21’den görüleceği gibi  $0 < t \leq T_d$  zaman aralığında yani anahtar ON konumunda iken, diyot üzerindeki gerilim  $V_D = -V_o$  olacağından diyot ters kutuplanır ve çıkış devresini girişten ayırır. Bu durumda endüktans gerilimi  $V_L$  giriş gerilimi  $V_i$ ’ye eşittir. Denklem (3.35)’te endüktans gerilimi ve denklem (3.36)’da endüktans akımı  $i_L$  ifadeleri verilmiştir.

$$V_L = V_i = L \frac{di_L}{dt} \quad (3.35)$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int_0^t V_i dt + i_{L0} \quad (3.36)$$

$i_{L0}$  endüktansın  $t=0$  anındaki başlangıç değeridir. Endüktans akımı ( $i_L$ ) maksimum değerini  $t=T_d$  anında alır. Bu durum denklem 3.37'de verilmiştir.

$$i_{LTd} = \frac{V_i t}{L} + i_{L0} \quad (3.37)$$

$0 < t \leq T_d$  zaman aralığında endüktans akımı  $\frac{V_i}{L}$  ifadesi gereğince doğrusal bir eğimle artar.  $T_d < t \leq T$  zaman aralığında endüktans akımı  $(V_L - V_0)/L$  eğimi ile azalır. Bu durum Şekil 3.21'de gösterilmiştir.  $\Delta i_L$  endüktans akımının değişimini temsil etmekte olup ifadesi denklem (3.38)'de verilmiştir.

$$\Delta i_L = \frac{V_0 D (1 - D)}{f_s L} \quad (3.38)$$

Burada  $f_s$  anahtarlama frekansını,  $D$  doluluk oranını belirtmekte olup,  $\Delta i_L$  maksimum değerini, doluluk oranı 0,5 olduğunda alır. Anahtarlama akımı, giriş akımı ve ortalama endüktans akımının toplamına eşit olup denklem (3.39)'da verilmiştir.

$$i_{ant} = i_g + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (3.39)$$

$t = T_d$  olduğu anda anahtar off konumuna geçer ve  $t_{off}$  süresince bu konumda kalır. Anahtar off konumuna geçince endüktans bir akım kaynağı gibi davranarak diyotu iletme alır ve Şekil 3.22 (b)'deki devre elde edilir. Çıkış geriliminin kaynak geriliminden büyük olduğu ( $V_i < V_0$ ) bu durum artıran DA/DA dönüştürücülerinin genel karakteristiğini göstermektedir [143, 145, 146, 153]. Bu esnada endüktans üzerindeki gerilim denklem (3.40)'da verilmiştir.



$$V_L = V_i - V_o = L \frac{di_L}{dt} < 0 \quad (3.40)$$

Anahtar OFF konumunda iken devreden akan akım yani endüktans ve diyot üzerinden akan akım denklem (3.41) ve (3.42)'de verilmiştir.

$$i_D = i_L = \frac{1}{L} \int_{T_d}^t V_L dt + i_{LTd} = \frac{1}{L} \int_{T_d}^t (V_i - V_o) dt + i_{LTd} \quad (3.41)$$

$$i_D = i_L = \left( \frac{V_i - V_o}{L} \right) (t - T_d) + i_{LTd} \quad (3.42)$$

$i_{LTd}$  akımı  $i_L$  akımının  $t = T_d$  anındaki değeridir. Bu durumda tepeden tepeye endüktans akımı denklem 3.43'de verilmiştir.

$$\Delta i_L = i_{LTd} - i_{LT} = \frac{(V_o - V_i) - (1-D)T}{L} = \frac{V_o D(1-D)}{f_s L} \quad (3.43)$$

Yükseltici tip DA/DA dönüştürücülerinde bir periyot için endüktans geriliminin ortalamasının veya akımın net değişiminin sıfır olduğu göz önüne alınarak, giriş gerilimi ile çıkış gerilimi arasındaki ilişki elde edilir. Bu denklem (3.44)'de verilmiştir [143, 145, 146, 153].

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{(1-D)} \quad (3.44)$$

$D$  değeri  $0 < D < 1$  aralığında değişmektedir. Denklem (3.44) incelendiğinde çıkış gerilimi  $D = 0$  durumunda en düşük değerini alır ve giriş gerilimine eşit olur. Doluluk oranı  $D = 1$  olduğunda çıkış gerilimi sonsuz olur ve istenmeyen bir durum ortaya çıkar. Bu bakımdan uygulamalarda doluluk oranı  $0.1 < D < 0.9$  aralığında seçilir. Ayrıca genel yapısı Şekil 3.21'de verilmiş olan DA/DA artıran çevirici için endüktans ve kapasite değerlerinin belirlenmesi gerekir. Bunun için endüktans akımının sınırdaki ortalama değeri denklem (3.45)'te ve sınır bölgesindeki çıkış akımı denklem (3.46)'da verilmiştir.

$$i_{is} = \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_i DT}{2L} = \frac{V_o D(1-D)}{2f_s L} \quad (3.45)$$

$$i_{os} = i_{is}(1-D) = \frac{V_o D(1-D)^2}{2f_s L} \quad (3.46)$$

$D=0,5$  doluluk oranında  $i_{is}$  maksimum değerini alır ve  $i_{os}$  de maksimum değerini  $D=1/3$  olduğunda alır. Bu bilgiler ışığında sınır bölgesinde yük direnci  $R_{LSmin}$  denklem (3.47)'de ifade edilmiştir.

$$R_{LSmin} = \frac{V_o}{i_{os-mak}} = 13,5 f_s L_{min} \quad (3.47)$$

Sürekli iletim modunda minimum L değeri, denklem (3.48)'de ve D'ye bağlı olarak değişimi denklem (3.49)'da verilmiştir. Ayrıca minimum C değeri için gerekli bağıntı denklem (3.50)'de verilmiştir [143, 145, 149].

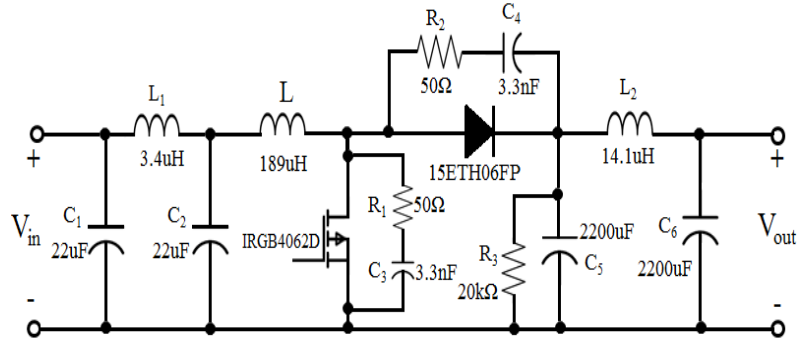
$$L_{min} = \frac{2}{27} \frac{V_o}{f_s i_{os-mak}} = \frac{2}{27} \frac{R_{Lmak}}{f_s} \quad (3.48)$$

$$L_{min} \begin{cases} \frac{R_{Lmak} D_{mak} (1 - D_{mak})^2}{2f_s}, & D < 1/3 \\ \frac{R_{Lmak} D_{min} (1 - D_{min})^2}{2f_s}, & D \geq 1/3 \end{cases} \quad (3.49)$$

$$C_{min} = \frac{V_o D_{mak}}{f_s R_{Lmin} V_{Ctt}} \quad (3.50)$$

Burada  $V_{Ctt}$  kondansatör üzerindeki dalgalanma gerilimini ifade etmektedir.

Bu çalışmada kullanılan artıran tip DA/DA dönüştürücünün genel yapısı Şekil 3.23'te görülmektedir. Bu devre Şekil 3.20'de verilen genel devre şemasından farklı olup devre giriş ve çıkışı filtrelerden oluşur. Şekil 3.22'te verilen devre şeması diğer bileşenlerle birlikte Matlab/Simulink programı kullanılarak modellenmiştir. Sistem hakkında daha detaylı bilgi yapılan çalışmalar ve sonuçlar bölümünde verilecektir.

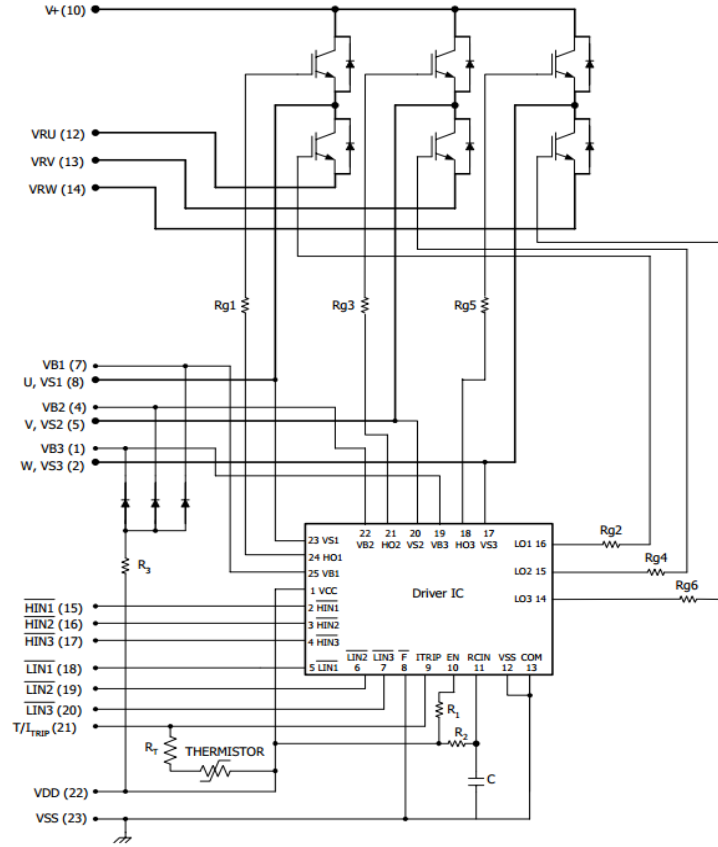


Şekil 3.22. Tasarlanan artıran DA/DA dönüştürücü devre genel yapısı

DA/DA artıran çevirici, rüzgâr hızına bağlı olarak girişine uygulanan değişken DA gerilimini çıkışında istenilen sabit DA gerilimine dönüştürmek için kontrol edilir. Sistem için kullanılan kontrol yöntemleri bu bölümde kontrol stratejisi kısmında açıklanmıştır.

### 3.3.3. Evirici (DA/AA Çevirici)

Yapılan çalışmada AA yüklerle güç sağlamak için DA/AA dönüşüm yapan güç elektroniği devresi kullanılmıştır. DA/AA dönüşüm yapan devrelere evirici adı verilmektedir [143-145]. Eviriciler girişine uygulanan doğru gerilimi, çıkışında istenilen frekans ve genlikte alternatif gerilime dönüştürürler. Çıkış geriliminin değişimi, evirici kazancı ve giriş gerilimine bağlıdır. Evirici kazancının sabit tutulmasıyla girişteki DA gerilim değiştirilerek çıkış gerilimi değiştirilir veya giriş geriliminin sabit olması halinde evirici kazancı değiştirilerek çıkış geriliminin değiştirilmesi sağlanır. Eviriciler akım ve gerilim beslemeli olup, faz sayısına, iletim süresine, çıkış dalga şekline ve devre yapısına göre farklılıklar göstermektedirler [143, 145, 154]. Farklı güç ve frekans uygulamaları için eviricilerde kullanılan anahtarlama elemanları değişmekte olup bu tez kapsamında IGBT modül kullanılmıştır. Tezde kullanılan evirici Şekil 3.23'te gösterilen devre şeması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Evirici simülasyonu Matlab/Simulink kullanılarak gerçekleştirilmiş olup devre hakkında daha detaylı bilgi bir sonraki bölümde verilecektir.



Şekil 3.23. Evirici (DA/AA) sistem blok yapısı

Evirici, çıkışına bağlanmış yükler için gerekli olan sabit gerilim ve frekans değerlerinde üç fazlı gerilim elde etmek için kontrol edilir. Evirici için kullanılan kontrol yöntemleri bu bölümde kontrol stratejisi kısmında açıklanmıştır.

### 3.4. Denetim Stratejisi

#### 3.4.1. Giriş

Gerçekleştirilen sistemin belirtilen şartlara göre çalışıp çalışmadığının kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu bakımdan kontrolörler yıllardır endüstriyel uygulamaların vazgeçilmez bir parçası olup önemini gittikçe artırmaktadır. Teknolojik gelişmelere paralel olarak sistem performanslarını artırmaya yönelik farklı denetleyici türleri gelişmiştir. Bu bölümde uygulaması gerçekleştirilen sistemi kontrol eden denetleyiciler incelenecek ve bu denetleyicilerin performansları karşılaştırılacaktır. Sistemde kontrolör olarak klasik oransal-integral (PI) ve bulanık mantık (BM) denetleyici kullanılmıştır. Kullanılan

denetleyicilerin parametreleri parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve genetik algoritma (GA) yöntemleriyle belirlenerek, sistem için daha verimli ve akıllı bir kontrol tasarımı sağlanmıştır. Böylece sistem üzerinde hem denetleyici hem de optimizasyon yöntemlerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

### 3.4.2. Geleneksel (P, PI ve PID) Denetim

PID kontrol; geri beslemeli sistemlerde ilk akla gelen denetleyici türü olup oransal + integral + türev (proportional + integral + derivation) ifadelerinin kısaltılmasından meydana gelmektedir. PID denetleyici günümüzde mühendislik uygulamalarında en yaygın kullanılan denetleyicidir. Ayrıca kontrol yapısının basitliği, düşük maliyet yüksek verim oranı ve uygulama alanının genişliği bakımından kullanıcılar tarafından çok tercih edilmektedir [44-50]. PID denetleyicinin sürekli zamandaki ifadesi ve transfer fonksiyonu denklem (3.51) ve denklem (3.52)'de görülmektedir.

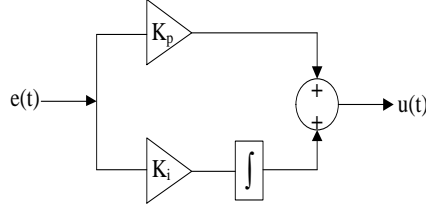
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.51)$$

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3.52)$$

Burada  $K_p$  oransal denetleyici kazancı,  $K_i$  integral denetleyici kazancı ve  $K_d$  türev denetleyici kazancını göstermektedir. Ayrıca  $u(t)$  çıkış,  $e(t)$  ise hatayı ifade etmektedir. Bir PID kontrolörün başarısı  $K_p$ ,  $K_i$  ve  $K_d$  parametreleri tarafından belirlenir ve birbirlerine bağımlıdır. Çünkü  $K_p$ ,  $K_i$  ve  $K_d$ 'den birinin değişimi diğer ikisinin etkisini değiştirir. Bu bakımdan denetlenecek sistemin yapısına göre PI, PD veya PID yapıları kullanılabilir [160-162].

Gerçekleştirilen uygulamada PI denetleyici kullanılmış ve Şekil 3.24'de blok yapısı gösterilmiştir. PI denetleyicideki oransal kazancın artırılması, sürekli durum hatasını ve yükselme zamanını azaltırken, yerleşme zamanı ve aşım miktarını artırır. Fakat düşük değeri karasızlığa götürür. İntegral parametresi ise sürekli durum hatasını ortadan kaldırır ancak yüksek değerleri aşımı ve osilasyonu artırır [160-162]. Bu bakımdan PI denetleyicinin  $K_p$  ve  $K_i$  parametreleri doğru şekilde seçilirse az aşımlı, kalıcı hal hatası

olmayan, yükselme ve yerleşme zamanı düşük ideal cevaplar elde edilir. Tablo 3.1’de PI denetleyici parametrelerinin sistem davranışına olan etkisi gösterilmektedir.



Şekil 3.24 PI denetleyici blok yapısı

Tablo 3.1. PI parametrelerinin sistem davranışına etkisi

Parametreler	Yükselme zamanı	Aşma	Oturma zamanı	Kararlı durum hatası
$K_p$ artarsa	Azalır	Artar	Az değişir	Azalır
$K_i$ artarsa	Azalır	Artar	Artar	Sıfırlanır

PI denetleyici kazançlarının belirlenmesinde referans olarak verilen Tablo 3.1, endüstrideki pek çok sistem için geçerlidir. Ancak yapılan çalışmada kullanılan PI denetleyici parametreleri optimizasyon yöntemleriyle (PSO, GA) belirlenerek sistem için en iyi  $K_p$  ve  $K_i$  değerleri elde edilerek kontrolörden en yüksek verim alınması sağlanmıştır. Bu bakımdan PI denetleyici günümüzde hala gelişime açık olup araştırmacıların ilgisini çekmektedir.

### 3.4.3. Bulanık Mantık Denetim

1965 yılında Lotfi A. Zadeh tarafından yayınlanan makale [163] ile temelleri atılan bulanık mantık kavramı, kesin olmayan değerler üzerine kurulmuş olup belirsizlik içeren sistemlerin incelenmesinde yeni bir boyut kazandırmıştır [164-166]. Daha sonra Mamdani ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalar [167] neticesinde bulanık denetimin kontrol sistemlerinde uygulaması hız kazanmıştır.

Bulanık mantık, klasik denetim sistemlerinin aksine denetlenecek sistemin matematiksel modeline gerek duymadan sadece istenilen çıkışı verecek şekilde sistem girişine uygulanan işareti ayarlar. Bu bakımdan bulanık denetim sanki uzman bir kişinin

bilgi ve deneyimlerinden yararlanarak o sistemin kontrol edilmesine benzemektedir [166]. Özellikle doğrusal olmayan sistemlerin denetiminde bulanık mantık alternatif bir kontrol yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bulanık mantık, sistem davranışlarını kesin değerler yerine dilsel ifadelerle nitelendirip değerlendiren bir kontrol modeli olup bulanık küme kavramı üzerine oturmuş ve insan davranışlarını esas alan bir yöntemdir. Ayrıca klasik sayısal (0,1) mantığının ötesine geçmiş bir yaklaşım olan bulanık mantık, bu iki değer arasında çok seviyeli değerler üretilmesi sonucunda denetimin daha doğru kararlar üretmesini, böylece performansın ve verimin artmasını sağlamaktadır. Günümüzde kontrol sistemlerinde bulanık denetim önemli bir hale gelmiş olup pek çok farklı alanda kullanılmaktadır [166-174]. Bu bölümde bulanık mantık kavramını oluşturan temel kısımlara yüzeysel olarak değinilecek olup, daha çok bulanık mantık denetleyici (BMD) bileşenleri üzerinde durulacaktır.

Klasik mantıkta bir önerme doğru veya yanlıştır. Fakat gerçek dünyadaki olayların ne derece doğru veya yanlış olduğunun belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle önermeleri doğru (1) ve yanlış (0) olarak değil de az, biraz, fazla, sıcak, soğuk, ılık, yaşlı, genç vb. günlük hayatımızda sıklıkla kullanmış olduğumuz terimler kullanılarak, dereceli veri modellenmesini sağlayan bulanık küme kavramı ortaya atılmıştır. Bulanık kümeler bulanıklık ve bulanık mantık kavramının temelini oluşturmakta olup olayların modellenmesinde daha gerçekçi ve doğala yakın sonuçların elde edilmesini sağlar.

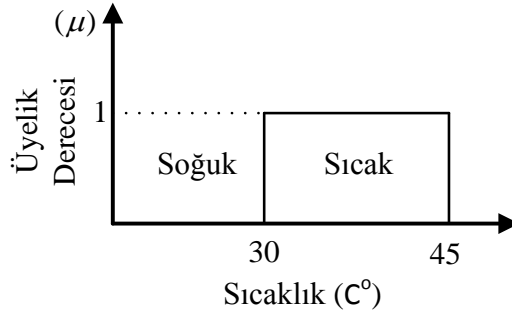
Klasik küme kavramında tanımlanmış kesin sınırlar mevcut olup kısmi üyelik söz konusu değildir. Yani nesne, o kümenin ya elemanıdır ya da değildir. Nesne kümenin elemanı ise üyelik değeri 1, elemanı değilse üyelik değeri 0 olur. Bu tanımlama,  $\mu$  nesnenin üyelik derecesi olmak üzere, aşağıdaki karakteristik fonksiyon ile ifade edilir.

$$\mu:U \Rightarrow \{0,1\} \quad (3.53)$$

Bulanık küme klasik kümelerin aksine iyi tanımlanmış sınırlara sahip değildir. Bulanık küme, küme içerisinde üyelik dereceleri (0-1) arasında değişen elemanlardan oluşur. Bu durum aşağıdaki gibi ifade edilir [175, 176].

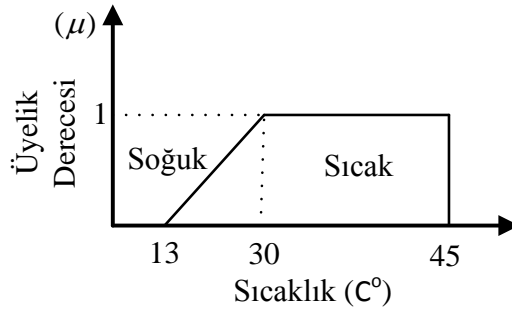
$$\mu:U \Rightarrow \{0-1\} \quad (3.54)$$

Bu iki küme arasındaki farkı daha iyi açıklayabilmek için termometrenin ölçtüğü bir sıcaklık değerinin klasik ve bulanık kümelerde nasıl ifade edileceğini görelim. Şekil 3.25’de görüldüğü gibi klasik küme mantığında sıcaklık  $30\text{ C}^{\circ}$  veya  $30\text{ C}^{\circ}$ ’den büyük ise “sıcak” yani üyelik derecesi 1 olarak ifade edilirken,  $30\text{ C}^{\circ}$ ’den küçük olan herhangi bir sıcaklık ise “soğuk” yani üyelik derecesi 0 olarak tanımlanır. Bu mantığa göre  $29,5\text{ C}^{\circ}$  sıcak değil soğuk olarak kabul edilmektedir. Bu bakımdan bu mantığın hiçbir esnekliği yoktur.



Şekil 3.25. Sıcaklık uzayında tanımlı sıcak klasik kümesi

Bulanık kümelerde klasik kümelerin aksine sınırlar bu kadar keskin bir şekilde tanımlanmamıştır. Yani ölçülen sıcaklık değeri, hissedilen sıcaklığa göre sıcak, soğuk, az sıcak, çok sıcak, az soğuk, çok soğuk gibi bulanıklık içeren sözel ifadelerle oluşturulan bir üyelik derecelendirmesi söz konusudur. Şekil 3.26’da bu durum gösterilmiştir.



Şekil 3.26. Sıcaklık uzayında tanımlı sıcak bulanık kümesi

Burada  $30\text{--}45\text{ C}^{\circ}$  arasındaki değerler sıcak olarak kabul edilip üyelik derecesi 1’dir. Eğer sıcaklık  $13\text{--}30\text{ C}^{\circ}$  derece arasında ise üyelik dereceleri 0 ile 1 arasında değişecektir. Yani



başka bir ifadeyle örneğin  $15\text{ C}^\circ$  az sıcak,  $25\text{ C}^\circ$  biraz sıcak olarak değerlendirilecektir. Sıcaklık kümesi üyeleri ise  $13\text{-}45\text{ C}^\circ$  arasındaki değerlerdir.

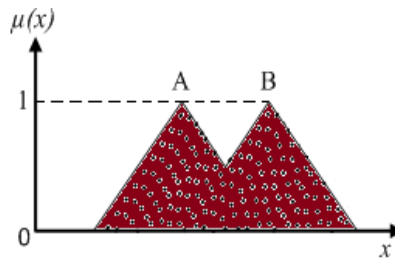
Herhangi bir bulanık küme, elemanlarının ait olma derecelerini gösteren bir karakteristik veya üyelik fonksiyonu ile temsil edilebilir. Örneğin  $X$  uzayında tanımlı bulanık  $A$  kümesi ayrık ve sürekli biçimde aşağıdaki gibi tanımlanabilir [166].

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \text{ öyleki } x \in X\} \quad (3.55)$$

$$A = \sum_{x_i \in X} \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} \quad (\text{ayrık biçim}) \quad A = \int_x \frac{\mu_A(x)}{x} \quad (\text{sürekli biçim}) \quad (3.56)$$

Klasik kümelerde olduğu gibi bulanık kümelerde de birleşim, kesişim ve tümeleme gibi işlemler vardır.  $x$  değişken olmak üzere  $\mu_A(x)$  ve  $\mu_B(x)$  üyelik derecelerine sahip  $A$  ve  $B$  bulanık kümelerinin birleşimi  $A \cup B$  şeklinde gösterilir ve matematiksel ifadesi denklem (3.57)'de verilmiştir.  $A \cup B$  kümesinin herhangi bir  $x \in X$  için elemanlarının üyelik derecesi,  $A$  ve  $B$  bulanık kümelerinden üyelik derecesi büyük olanına eşittir [175, 176]. Şekil 3.27'de bulanık kümelerde birleşme işlemi gösterilmektedir.

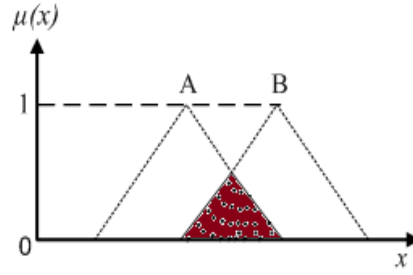
$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad , \quad x \in X \quad (3.57)$$



Şekil 3.27. Bulanık kümelerde birleşme işlemi

Bulanık kümelerde kesişim işlemi klasik kümelerde olduğu gibi  $A \cap B$  şeklindedir. Burada  $A \cap B$  kümesinin herhangi bir  $x \in X$  için elemanlarının üyelik derecesi,  $A$  ve  $B$  bulanık kümelerinden üyelik derecesi küçük olana eşittir ve matematiksel ifadesi denklem (3.58)'de verilmiştir [175, 176]. Şekil 3.28'de  $A$  ve  $B$  olarak tanımlanan bu iki kümenin kesişimi verilmektedir.

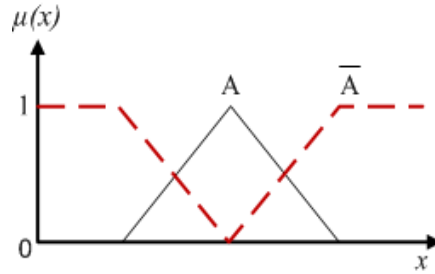
$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad , \quad x \in X \quad (3.58)$$



Şekil 3.28. Bulanık kümelerde kesişim işlemi

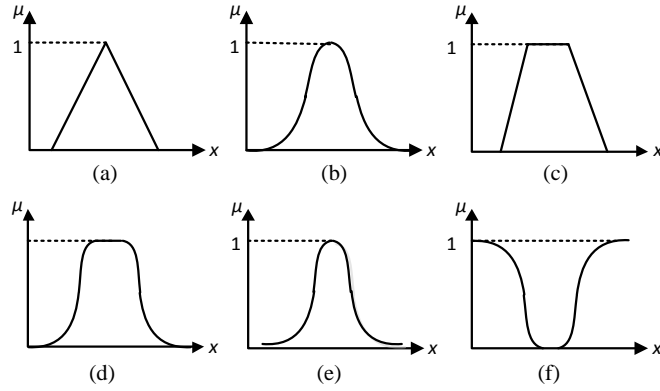
A bulanık kümesinin tümleyeni  $\bar{A}$  ile gösterilmekte olup üyelik fonksiyonu denklem (3.59)'da verilmiştir. A bulanık kümesinin tümleme işlemi Şekil 3.29'da gösterilmiştir [175, 176].

$$\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad , \quad x \in X \quad (3.59)$$



Şekil 3.29. Bulanık kümelerde tümleme işlemi

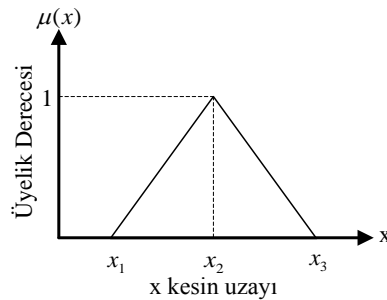
Bulanık denetim sisteminin temel yapılarından biri olan üyelik fonksiyonları, denetim sistemine ait kesin giriş bilgilerini üyelik dereceleriyle bulanık kümelerde ifade etmek için kullanılır. Bu fonksiyonlar sayesinde herhangi bir x girişinin bulanık bir kümeye ait olma derecesi belirlenmiş olur. Üyelik fonksiyonları denetlenecek sistemin yapısına ve kullanıcı bilgisine bağlı olarak farklı yapılarda olabilirler. Şekil 3.30'da farklı yapılara sahip üyelik fonksiyonları verilmiştir [176]. Literatürde bu fonksiyonlardan en fazla tercih edileni üçgen, yamuk ve çan eğrisidir.



Şekil 3.30. Değişik üyelik fonksiyonları: (a) Üçgen, (b) Gaussian, (c) Yamuk, (d) Çan, (e) Cauchy, (f) Sigmoid

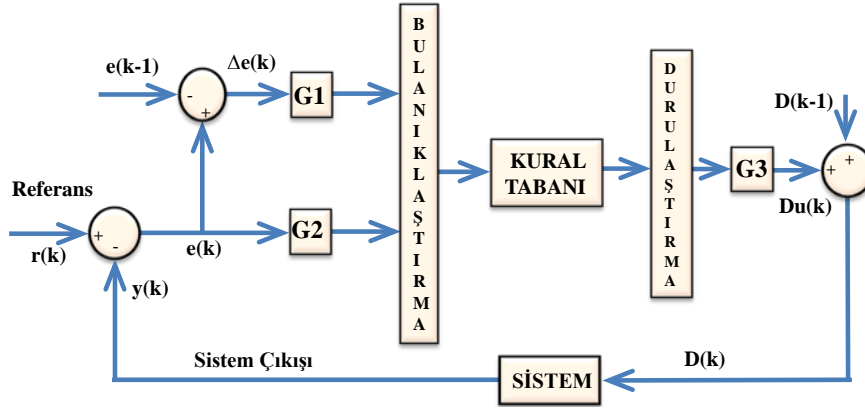
Yapılan tasarımlarda üyelik fonksiyonlarının seçimi önemli olup, bu çalışmada üçgen üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Üçgen üyelik fonksiyonu yapısının basit olması, doğrusal değişimli oluşu ve literatürde yapılan çalışmalarda diğer üyelik fonksiyonlarına göre daha iyi sonuçlar vermesi nedeniyle tercih edilmiştir. Üçgen üyelik fonksiyonunun matematiksel ifadesi denklem (3.60)'da verilmiştir. Denklem (3.60)'da  $x_1$  üçgen üyelik fonksiyonunun alt sınır değerini,  $x_T$  maksimum değerini ve  $x_2$  üst sınır değerini temsil etmekte olup, bu değerler Şekil 3.31'de gösterilmiştir [176-184].

$$\mu(x) = \max \left[ \min \left( \frac{x - x_1}{x_T - x_1}, \frac{x_2 - x}{x_2 - x_T} \right), 0 \right] \quad (3.60)$$



Şekil 3.31. Üçgen üyelik fonksiyonu

Bulanık denetim mantığı temel olarak üç ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar bulanıklaştırıcı birim, kural tabanı ve durulaştırma birimidir. Bulanık mantık denetleyicinin temel blok yapısı Şekil 3.32'de gösterilmiştir [141, 180-184].



Şekil 3.32. Bulanık mantık denetleyici yapısı

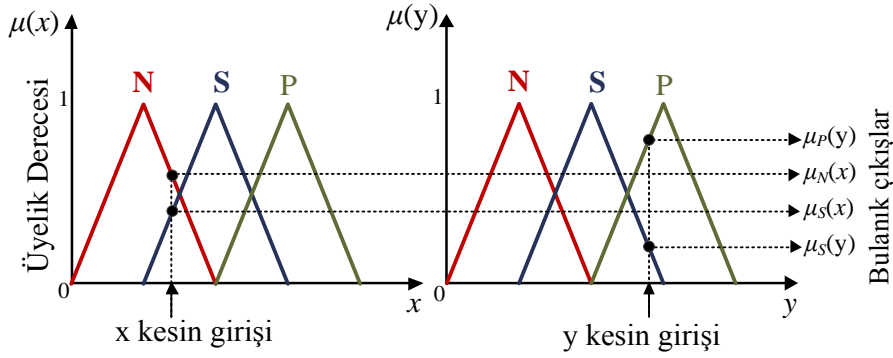
Bulanık mantık denetleyicinin, Şekil 3.32'den de görüldüğü gibi iki kesin girişi olup bunlar referans işareti  $r(k)$  ile sistem çıkışı  $y(k)$  arasındaki farkı gösteren  $e(k)$  hata ve hatadaki değişimi temsil eden  $\Delta e(k)$ 'dir. Ayrıca sistemde  $G1$ ,  $G2$  ve  $G3$  kazanç değerleri olup durulaştırma birimi çıkışı  $Du(k)$  bir önceki değeri olan  $Du(k-1)$  ile toplanmak suretiyle  $D(k)$  elde edilerek sistemin girişine uygulanmıştır [141, 180-184]. Denklem (3.61)'de  $e(k)$  ve  $\Delta e(k)$  ifadeleri verilmiştir.

$$\begin{aligned} e(k) &= r(k) - y(k) \\ \Delta e(k) &= e(k) - e(k-1) \end{aligned} \quad (3.61)$$

Bulanık mantık denetleyicinin ilk elemanı olan bulanıklaştırma birimi, denetleyici girişine gelen kesin bilgileri bulanık hale getirerek bu bilgilerin 0 ile 1 arasında değişen üyelik değerleriyle ifade edilmesini sağlar. Kesin girişlere karşılık gelen bulanık değerler elde edildikten sonra bir sonraki adım olan kural tabanı birimine gönderilir. Burada kural tabanı içerisinde mevcut olan veri tabanı ve dilsel denetim öğeleri kullanılarak bulanık sonuçlar elde edilir. Elde edilen bu bulanık çıkarımlar durulaştırma birimine gönderilerek kesin sayılara dönüştürülür ve böylece denetlenecek sistem için gerekli olan kontrol sinyali elde edilmiş olur [180-185]. Bu birimler daha detaylı bir şekilde aşağıda anlatılmıştır.

Bulanıklaştırma birimi; kesin sayıları bulanıklaştırır yani denetleyici giriş bilgilerini dilsel olarak nitelendiren sembolik değerlere dönüştürür [175]. Diğer bir deyişle sistemden gelen kesin değerlerin bulanıklaştırma biriminde tanımlı olan bulanık kümelerde bir üyeliğe sahip olup olmadığını araştırır. Eğer bir üyeliğe sahipler bu üyelik dereceleri belirlenerek girilen kesin değerlere dilsel değişkenler atanır. Örneğin bulanıklaştırma

birimine uygulanan  $x$  ve  $y$  girişlerinin bulanık kümelerdeki üyelik dereceleri araştırılır. Burada her bir giriş değişkenini tanımlamak için Pozitif (P), Sıfır (S), Negatif (N) şeklinde üç adet dilsel değişken seçilmiştir [179]. Bu durumda  $x$  ve  $y$  kesin girişleri verilen dilsel değişkenler ile bulanıklaştırılması Şekil 3.33'te gösterilmiştir.



Şekil 3.33. Bulanıklaştırma işleminin yapılışı

Kural tabanı birimi; bilgilerin depolandığı ve bu bilgiler ışığında bulanıklaştırıcıdan gelen bulanık değerlerin karar verme biriminde hangi kurallar ile işleneceği, ayrıca bu kuralların sonuçları olan veri tablosunu içeren kısımdır. Kural tabanı bütün ihtimaller göz önüne alınarak uzman kişiler tarafından oluşturulur. Üyelik fonksiyonu ve kural sayısı uzman kişiye ve sisteme bağlı olarak değiştirilebilir. Şekil 3.34'te iki girişli BMD'de her giriş kendi uzayında üçgen üyelikli üç bulanık küme ile tanımlanmıştır. Bu durumda kural tablosu dokuz üyelikli olacaktır. Kurallar oluşturulurken giriş ile çıkış arasındaki ilişki "if ... then ... else" biçimine sahip koşul cümleleri ile sağlanır. Bu koşul cümleleri ile kural tablosu oluşturulur. Tablo 3.2'de örnek olarak oluşturulan kural tablosu verilmiştir.

Tablo 3.2. Örnek kural tablosu

Z		x		
		P	S	N
y	P	P	P	S
	S	P	S	N
	N	S	N	N

Burada Z, çıkış bulanık kümesini temsil etmekte olup uzman kişilerce belirlenir ve kurallar biçiminde depolanır. Tablo 3.2'deki 9 kurallı çıkış bulanık kümesi koşul cümleleriyle aşağıdaki gibi yazılabilir.

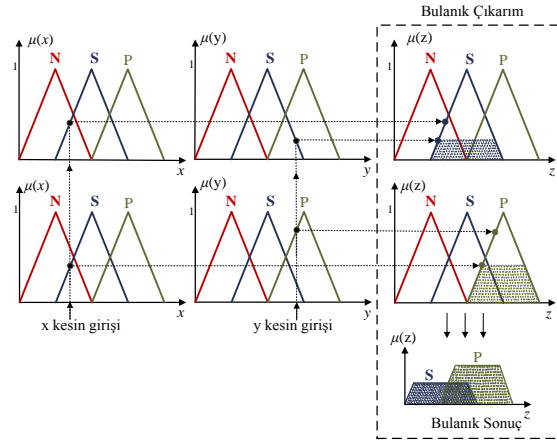
$$\begin{aligned}
& \text{Kural 1 } \text{If } (x = P) \text{ and } (y = P) \text{ then } z = P \text{ else} \\
& \text{Kural 2 } \text{If } (x = P) \text{ and } (y = S) \text{ then } z = P \text{ else} \\
& \text{Kural 3 } \text{If } (x = P) \text{ and } (y = N) \text{ then } z = S \text{ else} \\
& \text{Kural 4 } \text{If } (x = S) \text{ and } (y = P) \text{ then } z = P \text{ else} \\
& \text{Kural 5 } \text{If } (x = S) \text{ and } (y = S) \text{ then } z = S \text{ else} \\
& \text{Kural 6 } \text{If } (x = S) \text{ and } (y = N) \text{ then } z = N \text{ else} \\
& \text{Kural 7 } \text{If } (x = N) \text{ and } (y = P) \text{ then } z = S \text{ else} \\
& \text{Kural 8 } \text{If } (x = N) \text{ and } (y = S) \text{ then } z = N \text{ else} \\
& \text{Kural 9 } \text{If } (x = N) \text{ and } (y = N) \text{ then } z = N
\end{aligned} \tag{3.62}$$

Burada kullanılan *and* terimi, klasik ve bulanık kümelerde kesişim işlemi temsil etmektedir ve üyelik fonksiyonları da dikkate alındığında bu *and* bağlacının bir minimum alma işlemi olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla yukarıda oluşturulan kural tablosunda *and* ile birbirine bağlanan terimlere minimum alma işlemi uygulandığında, üyelik fonksiyonlarına bağlı olarak aşağıda yazılan ifadeler elde edilir.

$$\begin{aligned}
& \text{Kural 1 } \min[\mu_P(x), \mu_P(y)] = \mu_P(z) \\
& \text{Kural 2 } \min[\mu_P(x), \mu_S(y)] = \mu_P(z) \\
& \text{Kural 3 } \min[\mu_P(x), \mu_N(y)] = \mu_S(z) \\
& \text{Kural 4 } \min[\mu_S(x), \mu_P(y)] = \mu_P(z) \\
& \text{Kural 5 } \min[\mu_S(x), \mu_S(y)] = \mu_S(z) \\
& \text{Kural 6 } \min[\mu_S(x), \mu_N(y)] = \mu_N(z) \\
& \text{Kural 7 } \min[\mu_N(x), \mu_P(y)] = \mu_S(z) \\
& \text{Kural 8 } \min[\mu_N(x), \mu_S(y)] = \mu_N(z) \\
& \text{Kural 9 } \min[\mu_N(x), \mu_N(y)] = \mu_N(z)
\end{aligned} \tag{3.63}$$

Kısacası bu denklemler  $\mu(z) = \min [\mu(x), \mu(y)]$  şeklinde ifade edilebilir. Aslında bu ifade X ve Y uzayları arasındaki ilişkiyi temsil eder ve kartezyen çarpım olarak  $Z = X * Y$  şeklinde gösterilebilir.

Literatürde birçok farklı yapıda bulanık çıkarım yöntemi tanımlanmış olup bunlardan en çok kullanılanı Min-Max olarak da bilinen Mamdani bulanık çıkarım yöntemidir [176, 179]. Bu yöntem Şekil 3.34'te görülmektedir.



Şekil 3.34. Mamdani bulanık çıkarımı

Durulaştırma birimi; Bulanık mantık denetleyicinin son elemanı olup, bulanık niceliği kesin niceliğe çevirir. Yani kural işleme ünitesinden elde edilen sonuçların sisteme uygulanabilmesi için kesin değere dönüştürme işlemini yapar. Literatürde durulaştırma işleminde değişik yöntemler geliştirilmiş olup bunların birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları söz konusudur [166, 176, 179]. Literatürde yaygın olarak durulaştırma işleminde kullanılan yöntemler şunlardır;

- Alanların Merkezi Yöntemi (COA-Center of Area)
- İki Bölge Yöntemi (BOA-Bisector of Area)
- Maksimum Ortalaması Yöntemi (MOM-Mean of Maximum)
- Maksimumun En Küçüğü Yöntemi (SOM-Smallest of Maximum)
- Maksimumun En Büyüğü Yöntemi (LOM-Largest of Maximum)

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen bulanık mantık denetleyicide durulaştırma işlemi için alanların merkezi yöntemi kullanılmıştır. Bulanık denetleyici çıkışı  $Z_{\zeta}$  denklem (3.64)'deki gibi ifade edilir.

$$z_{\zeta} = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_i(z_i) z_i}{\sum_{i=1}^N \mu_i(z_i)}, \quad z \in Z \quad (3.64)$$

Bu denklem Şekil 3.35'te verilen örnek için açılırsa,

$$Z_{\zeta} = \frac{\mu_S(Z_S) Z_S + \mu_P(Z_P) Z_P}{\mu_S(Z_S) + \mu_P(Z_P)} \quad (3.65)$$

elde edilir. Denklem (3.64)'de  $i$  kural numarasını ve  $N$ 'de toplam kural sayısını göstermektedir. Etkin olmayan kurallar için daima  $\mu_i(z_i)=0$ 'dır. Etkin kurallar için ise  $i$  kural numarasını ve  $i$ . kural için geçerli olan sözel komutu da temsil etmektedir. Durulaştırma işlemi sonunda elde edilen  $Z_C$  kesin değeri, denetlenecek sisteme gönderilir [176, 179].

#### 3.4.4. Parçacık Sürü Optimizasyonu

Problemlerin çözümünde kullanılan bir çok optimizasyon yöntemi doğadaki sistemlerin ve canlıların davranışlarından esinlenerek tasarlanmıştır. Bunlardan birisi olan parçacık sürü optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO) ilk olarak 1995 yılında Dr. Eberhart ve Dr. Kennedy [186] tarafından ortaya atılmıştır. Popülasyon temelli sezgisel bir optimizasyon yöntemi olan PSO algoritması, pek çok alanda uygulanmakta olup özellikle kontrol alanında denetleyici parametrelerinin optimize edilmesinde tercih edilir [187-189]. PSO algoritması, kontrol alanında bulanık mantık denetleyici (BMD), klasik oransal-integral (PI), oransal-integral-türevsel (PID) ve bulanık mantık PID (BMPID) gibi kontrolör parametrelerinin optimize edilmesinde çokça tercih edilmiştir [190-192]. PSO algoritması doğrusal olmayan çok parametre ve değişken içeren problemlerin çözümünde yaygın bir şekilde kullanılmakta olup, literatürde bu alanda birçok araştırma yayınlanmıştır [186]. PSO, genetik algoritmalar gibi evrimsel hesaplama teknikleriyle birçok benzerlik gösterir. Ancak genetik algoritmada mevcut olan çaprazlama ve mutasyon işlemleri PSO'da bulunmamaktadır. Bu bakımdan bu yöntem diğer optimizasyon yöntemlerine göre yapısının basitliği, yüksek uygulanabilirlik ve etkin hesaplama avantajlarına sahiptir [188]. Aynı zamanda PSO algoritması her alanda başarı ile uygulandığı için ilk bulunduğu andan günümüze kadar birçok versiyonları geliştirilmiştir. Yeni kalıtsal PSO [193], ayrık PSO [194] ve geometrik PSO [195] bunlardan birkaç tanesidir. PSO algoritmasında kullanılan terimler aşağıda açıklanmıştır.

**Parçacık:** Sürü içerisindeki her bir kuş algoritmada bir parçacık olup her bir parçacıkta problemin olası çözümüne karşılık gelir. Ayrıca parçacıklara ait konum ve hız değerleri mevcuttur.

**Parçacık Pozisyonu:** Her parçacığın,  $d$ -boyutlu arama uzayında bulunduğu noktayı belirtir.



Parçacık hızı: Her parçacığın, d-boyutlu arama uzayında, mevcut konumu ile bir önceki konumu arasındaki atım aralığı olarak tanımlanır. Parçacık hızı, bir sonraki iterasyon için hız ve konum güncellemede kullanılır.

Sürü büyüklüğü: Algoritmada kullanılan parçacık sayısı olarak tanımlanır. d-boyutlu arama uzayında parçacık sayısının artırılması algoritmanın yakınsama hızını artırır ancak gerçek zamanlı uygulamalarda sürenin uzamasına neden olur.

Parçacığa ait en iyi değer: D-boyutlu arama uzayında her hangi bir parçacığa ait en iyi değer (aranan besin kaynağına en yakın konum) "*pbest*" olarak adlandırılır. Bu değer parçacığın belleğinde saklanmakta olup sonraki iterasyonlarda bu değerden daha iyi bir sonuç elde edildiğinde, belleğinde bulunan mevcut değer güncellenir. Ayrıca parçacık hızının güncellenmesinde kullanılır.

Global en iyi değer: Yapılan iterasyonlar sonucu sürü içerisindeki tüm parçacıklar içerisinde en iyi değere sahip olan değer global en iyi değer olarak sürü belleğinde saklanır ve "*gbest*" olarak gösterilir. Sonraki iterasyonlarda bu değerden daha iyi bir değer elde edilirse güncellenir.

Uygunluk değeri: D boyutlu arama uzayında parçacığın bulunduğu koordinatların, uygunluk fonksiyonuna uygulanması ile elde edilen değerdir. Amaç fonksiyonunda maximizasyonu veya minimizasyonu belirlenecek fonksiyonun aldığı çözümdür.

Aralık sınırlaması: Sürüyü oluşturan parçacıkların d-boyutlu arama uzayında yayılımı sırasında parçacığın arama uzayını terk etme olasılığı vardır. Parçacıkları her zaman arama uzayında tutmak veya terk etmelerini önlemek için, arama uzayı [ $x_{min}$ ,  $x_{max}$ ] olacak şekilde sınırlandırılır [196]. Bu durum denklem (3.66) ve denklem (3.67)'de ifade edilmiştir.

$$x_d \leftarrow \min(\max(x_d + v_d, x_{min}), x_{max}) \quad (3.66)$$

$$x_d \notin [x_{min}, x_{max}] \Rightarrow \begin{cases} v_d \leftarrow 0 \\ x_d < x_{min} \Rightarrow x_d \leftarrow x_{min} \\ x_d > x_{max} \Rightarrow x_d \leftarrow x_{max} \end{cases} \quad (3.67)$$

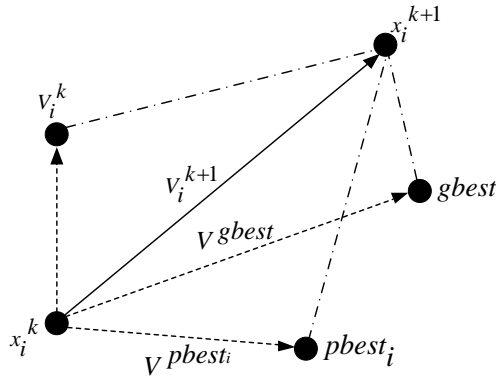
Bu sınırlamayla ilerleyen iterasyon adımlarında parçacık hızlarında oluşabilecek yüksek miktarda salınımlar engellenmiş olur [197, 198].

Sonlandırma Kriteri: İterasyon sayısına ulaşıldığında algoritmanın durmasını sağlayan kriterdir.

PSO algoritması, genel olarak kuş veya balık sürülerinin yemlerine ulaşmak için kullandıkları sezgisel hareketlerin matematiksel olarak ifade edilmesinden oluşmaktadır. Bu matematiksel ifadeler parçacığın hızı “(V)” ve parçacığın konumudur “(x)”. Algoritma temelde üç adımdan oluşmaktadır:

1. Sürüyü oluşturan parçacıkların konumlarının ve hızlarının oluşturulması
2. Parçacıkların hızlarının güncellenmesi
3. Parçacıkların konumlarının güncellenmesi

D-boyutlu arama uzayında sürüyü oluşturan parçacıkların hızları ve konumları her iterasyon sonunda güncellenir. Bu güncelleme, her bir parçacığın o ana kadar elde ettiği en iyi konum “*pbest*” ve tüm parçacıkların en iyi konum bilgisi “*gbest*” kullanılarak yapılır. Arama uzayındaki bu değişim Şekil 3.35’de gösterilmiştir.



Şekil 3.35. Arama uzayında parçacığın konum değişimi

D-boyutlu bir arama uzayında n adet parçacığın hız ve konumları aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$V = \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} & \cdots & V_{1D} \\ V_{21} & V_{22} & \cdots & V_{2D} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ V_{n1} & V_{n2} & \cdots & V_{nD} \end{bmatrix}_{n \times D} \quad (3.68)$$

$$x = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1D} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2D} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nD} \end{bmatrix}_{n \times D} \quad (3.69)$$

Yukardaki matriste  $i$ 'nci parçacık  $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]$  şeklinde gösterilir. Ayrıca kişisel en iyi konum  $pbest_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}]$  olarak ifade edilir. Tüm  $pbest$  arasında en iyi global konum olarak adlandırılan  $gbest = [p_1, p_2, \dots, p_D]$  şeklinde gösterilir. Evrimsel gelişim sürecinde  $pbest$  ve  $gbest$  belirlendikten sonra, her bir parçacık hızı ve konumu aşağıdaki denklemlere göre hesaplanır.

$$V_i^{k+1} = wV_i^k + c_1r_1(pbest_i - x_i^k) + c_2r_2(gbest - x_i^k) \quad (3.70)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + V_i^{k+1} \quad (3.71)$$

$V_i^k$  : k. iterasyon sonunda i. parçacığın mevcut hızı

$V_i^{k+1}$  : k+1. iterasyon sonunda i. parçacığın mevcut hızı

$x_i^k$  : k. iterasyon sonunda i. parçacığın mevcut konumu

$x_i^{k+1}$  : k+1. iterasyon sonunda i. parçacığın mevcut konumu

$pbest_i$  : i. parçacığın bireysel en iyi değeri

$gbest$  : Sürünün en iyi değeri

$c_1$  ve  $c_2$ : İvmelendirme sabitleri

$r_1$  ve  $r_2$ : 0 ile 1 arasında normal dağılımlı rasgele sayılar

Denklem (3.70)'de yer alan  $w$ , atalet ağırlık katsayısı olup, temel PSO algoritmasında yer almamaktadır. 1998 yılında Shi ve Eberhart [199] tarafından yapılan çalışma ile algoritmaya eklenmiştir. İlgili çalışmada en uygun eylemsizlik katsayısı değerinin 0.9 ile 1.2 arasında olduğu ifade edilmektedir [199]. Tez kapsamında ise 0.8 olarak seçilmiştir. Eylemsizlik katsayısının matematiksel ifadesi denklem (3.72)'de verilmiştir.

$$w = w_{max} - \frac{(w_{max} - w_{min})}{k_{max}} \times k \quad (3.72)$$

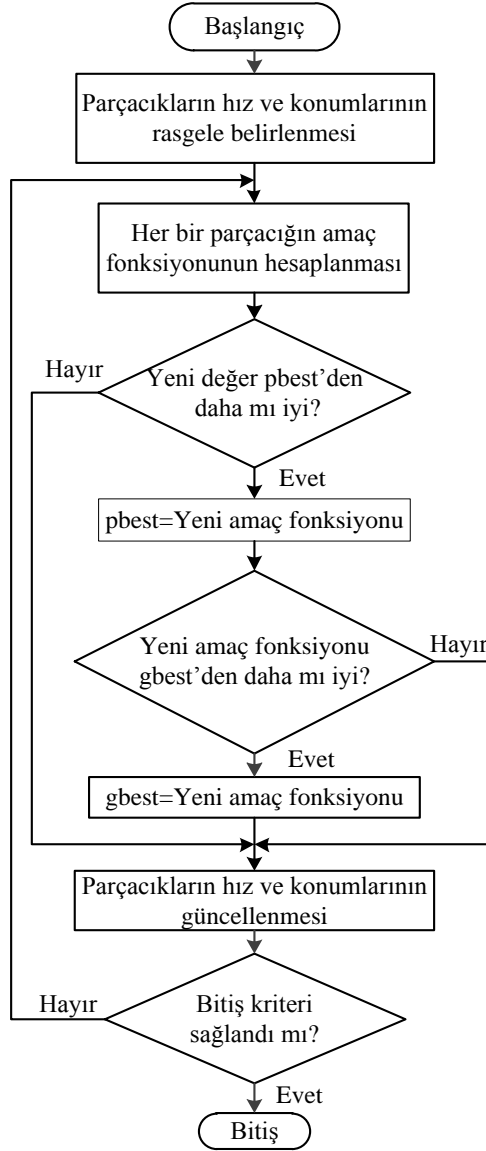
Burada  $w_{max}$  ve  $w_{min}$  sırasıyla atalet katsayısının en büyük ve en küçük değerini ifade etmekte olup genelde 0.9 ve 0.4 değerlerini alır. Ayrıca  $k_{max}$  maksimum iterasyon sayısını ve  $k$  mevcut iterasyon sayısını temsil eder.

Denklem (3.70)'de yer alan ivmelendirme sabitleri  $c_1$  ve  $c_2$ , parçacıkların arama uzayında  $pbest$  ve  $gbest$  değerlerine doğru yönelmesini sağlar. Bunlar pozitif değerli olup parçacıkların hareketini önemli ölçüde etkiler.  $c_1$ , parçacığın  $pbest$ 'e göre,  $c_2$  ise parçacığın  $gbest$ 'e göre hareket etmesini sağlar. İvmelendirme sabitlerinin küçük seçilmesi arama uzayının yeterince taranmamasına dolayısıyla hedefe ulaşma süresinin uzamasına neden olmaktadır. Diğer taraftan ivmelendirme sabitlerinin büyük seçilmesi hedefe ulaşmayı hızlandırırken karasızlığa yol açabilmektedir. Bu bakımdan tez kapsamında ivmelendirme sabitleri genel olarak önerilen değer olan 2 alınmıştır.

Şekil 3.36'da PSO algoritmasının çalışmasını ifade eden akış diyagramı görülmektedir [200]. Algoritma ilk olarak parçacık sayısının belirlenmesi ve rastgele konumlandırılması gibi başlangıç değerlerinin oluşturulmasıyla başlamaktadır. Aynı zamanda rastgele konumlandırılan parçacıkların her biri için belirlenen amaç fonksiyonu da hesaplanmaktadır. Belirlenen amaç fonksiyonları hafızada tutulmaktadır. Daha sonra amaç fonksiyonları kendi aralarında karşılaştırılarak yerel optimum adı verilen ( $pbest$ ) en iyi sonuç bulunmaktadır. Lokal en iyi sonuçların karşılaştırılması sonucunda ise genel en iyi değer ( $gbest$ ) elde edilir. Daha sonra ise yukarıda bahsedilen hız ve konum denklemleri yenilenerek parçacıkların hızı ve konumları güncellenir. Algoritma bu şekilde maksimum tekrarlanma veya bitiş kriteri sağlanana kadar devam etmektedir [201].

Kontrol alanında yapılan çalışmalara bakıldığında, PSO algoritması genel kabul görmüş bazı amaç fonksiyonlarının minimize edilmesi için kullanılmıştır. Zaman ağırlıklı mutlak hatanın integrali (ITAE), hatanın karesinin integrali (ISE), mutlak hatanın integrali (IAE), zaman ağırlıklı hatanın karesinin integrali (ISTE) bunlardan bazılarıdır. Tez kapsamında PSO algoritması, PI kontrolörün  $K_p$  ve  $K_i$  parametrelerinin ayarlanması ve BMD'nin hata ( $e$ ), hatanın değişimi ( $de$ ) ve kontrol işareti ( $u$ ) değişkenlerinin üçgen üyelik fonksiyonlarının ayarlanması için kullanılmıştır. Amaç fonksiyonu olarak ise yukarıda bahsedilen zaman ağırlıklı mutlak hatanın integrali (ITAE) kullanılmıştır. Kullanılan amaç fonksiyonunun matematiksel ifadesi ise denklem (3.72)'de verilmiştir. Verilen denklemde  $r$  referans,  $y$  sistem çıkışı ve  $e$  hatadır.

$$ITAE = \int_0^T t|r(t) - y(t)|dt = \int_0^T t|e(t)| dt \quad (3.73)$$



Şekil 3.36. PSO algoritmasının akış diyagramı

### 3.4.5. Genetik Algoritma

Evrimsel programlamanın bir parçası olan genetik algoritma (GA) Darwin'in evrim teorisinden esinlenerek ortaya çıkmıştır. Genetik algoritma ilk olarak Michingan Üniversitesi'nden psikolog ve bilgisayar bilimleri uzmanı J. H. Holland tarafından 1975 yılında ortaya konmuştur. Genetik algoritmalar en iyinin korunumu ve doğal seçilim ilkesinin benzetim yoluyla bilgisayarlara uygulanması neticesinde oluşan bir arama yöntemi olup geleneksel çözüm yöntemleriyle incelenmesi zor olan problemlerin analizinde kullanılır [202, 203]. Genetik algoritmaların problemin çözümü için herhangi

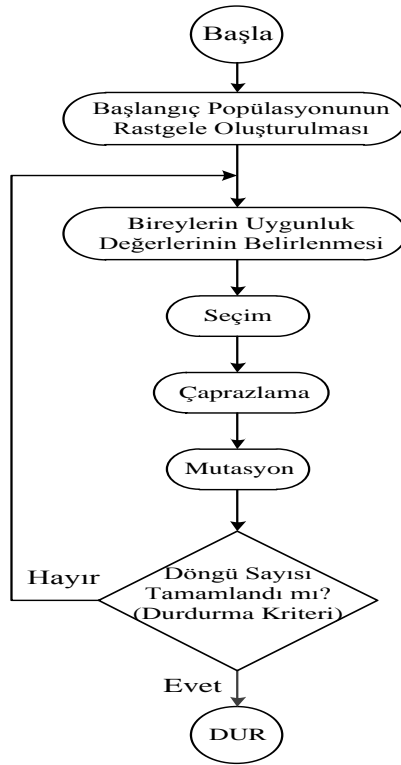
bir başlangıç veya türev bilgisine ihtiyaç duymamaları, bu algoritmanın optimizasyon problemlerinin çözümünde sıklıkla kullanılmasını sağlamıştır [203]. Genetik algoritmanın diğer optimizasyon yöntemleri ve klasik arama yöntemlerinden en önemli farkı tek bir çözüm yerine bir çözüm kümesi kullanmasıdır [204]. Genetik algoritmalar, çok boyutlu arama uzayında en iyinin hayatta kalması prensibine göre en uygun çözüme ulaşırlar. Bu yöntemde arama uzayında en iyi sonuca ulaşmak için tek bir çözüm yerine bir çözüm kümesi oluşturulur ve genel çözüme ulaşma ihtimali artırılmış olur. Genetik algoritmalarda oluşturulan çözüm kümesi popülasyon olarak adlandırılır ve bu popülasyonu oluşturan sayı dizileri ise kromozom veya birey olarak isimlendirilir. Bireyler evrimsel olarak genetik operatörler tarafından belirlenir ve problemin çözümünde bireylerin gösterimi GA'da önemli bir faktördür. Uygunluk fonksiyonu tarafından, bireylerin çözümü temsil edip etmediği belirlenir ve uygunluk değeri yüksek olan bireylerin popülasyon içindeki diğer bireylerle çoğalması sağlanır. Böylece iyi özellikteki bireylerin popülasyon içerisinde yayılması artırılır ve bu işlem sürekli tekrarlanır. İyi özelliklere sahip bu bireylerin genetik işlemler sonucunda diğer iyi özelliklerle birleşmesiyle arama uzayında çözümün elde edilmesi kolaylaştırılmış olur [205, 206].

Genetik algoritma ile çözüme gidilirken temel olarak takip edilmesi gereken adımlar aşağıda belirtilmiştir:

1. İlk adımda çözüm grubu olarak adlandırılan başlangıç popülasyonu rastgele bir şekilde oluşturulur. Bu popülasyonda olası çözümler kodlanır ve çözüm grubu içinde kodlanan kromozom veya birey sayısı, problemin türüne göre farklılıklar gösterebilir.
2. Kromozomun ne kadar başarılı olduğunu hesaplayan fonksiyona uygunluk fonksiyonu denir ve başlangıç popülasyonu oluşturulduktan sonra her bir bireyin uygunluk değeri hesaplanır. Bu fonksiyon, amaç fonksiyonunu kullanarak işlem yapar. Ayrıca amaç fonksiyonu ve uygunluk fonksiyonu seçimi GA'nın başarısını etkiler.
3. Popülasyon içinde uygunluk değeri yüksek olan bireyler seçilir ve bu adımda seçilen kromozomlar eşlenir. Seçme işlemi için rulet çemberi, rank seçimi, turnuva seçimi gibi yöntemler kullanılır. Seçilen kromozomlarla eşleme havuzu oluşturulur.

4. GA'nın yürütücüsü olarak kabul edilen çaprazlama ve mutasyon operatörleri, eşleme havuzundaki bireylere uygulanır. Böylece yeni nesil kromozomlar elde edilir.
5. Elde edilen yeni nesil kromozomlar ebebeyn kromozomlarla yer değiştirerek popülasyonun sabit büyüklükte kalması sağlanır.
6. Elde edilen yeni nesil kromozomların uygunluk değeri yeniden hesaplanır.
7. Belirli bir nesil sayısı veya durdurma kriteri sağlanana kadar döngü devam eder.
8. GA'nın işleyişinin sonucunda nesiller içerisinde en uygun değere sahip olan kromozom, aranan çözüm olarak kabul edilir.

Şekil 3.37'de genetik algoritmaya ilişkin akış diyagramı verilmiştir



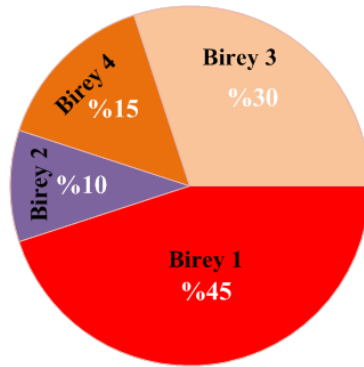
Şekil 3.37. GA akış diyagramı

Genetik algoritma temelde yeniden üreme, çaprazlama ve mutasyon olmak üzere üç ana operatörden oluşmaktadır. Bu operatörler sırayla aşağıda açıklanmıştır.

**Yeniden Üreme:** Burada kromozomlar uygunluk değerlerine göre kopyalanır ve bir sonraki nesilde uygunluk değeri yüksek olan kromozomların var olma ihtimali artırılmış olur [204, 207]. Seçme işlemi için;

- Rulet Çemberi
- Rank Seçimi
- Turnuva Seçimi

gibi yöntemler uygulanır. Bu yöntemlerden en yaygın kullanılan rulet çemberi, kromozomları uygunluk değerlerine göre bir rulet etrafında toplar ve bireylerin seçilme olasılıklarını gösterir. Bireylerin, uygunluk değerlerine bağlı olarak rulet çemberi üzerinde gösterimi Şekil 3.38’de verilmiştir. Uygunluk fonksiyonu herhangi bir kıstasa uyan bireylerin rasgele seçilmesi ve rulet çemberinde geniş alana sahip bireylerin seçilme ihtimalleri daha fazladır [204, 208].



Şekil 3.38. Rulet çemberi seçim operatörü

Bu yöntemde bireyin seçilme ihtimali kendi uygunluk değerinin bireylerin toplam uygunluk değerine oranı ile tanımlanır [209]. Bu durum denklem (3.74) ile ifade edilmiştir

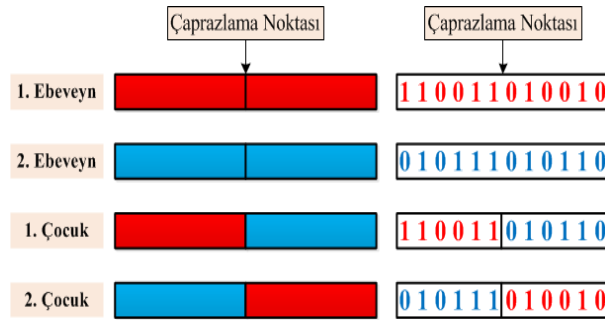
$$(birey) = \frac{uygunluk(i)}{\sum_i uygunluk(i)} \quad \text{olasılık} \quad (3.74)$$

Burada seçilen bireyler eşleşme havuzunda toplanır. Eşleşme havuzunda toplanan bireylere GA'nın diğer operatörleri olan çaprazlama ve mutasyon uygulanarak yeni nesil kromozomlar elde edilir [204, 210].

Çaprazlama: Genetik algoritmanın performansını etkileyen önemli parametrelerden biri olup eşleşme havuzundan seçilen bireylerden yeni bireyler üretilmesi için kullanılır. Diğer bir deyişle çaprazlama, bir önceki nesile ait kromozomlardan daha iyi özelliklere sahip kromozomlar elde etmek için kullanılır. Çaprazlama işlemi yapılırken eşleşme

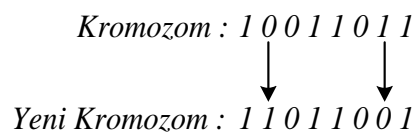


havuzundan rasgele iki birey veya kromozom çifti seçilir. Ele alınan problem için olası çözümleri içeren bu kromozomlar, çaprazlama işlemi sonucu yeni olası çözümleri temsil eder. Uygunluk değerine göre eski ve yeni olası çözümler karşılaştırılır ve daha iyi çözümü temsil eden kromozomlar mevcut nesilde tutulur ve diğerleri atılarak popülasyon büyüklüğü sabit tutulmuş olur [206, 210]. Literatürde birçok çaprazlama yöntemi önerilmiş olup bu tez çalışmasında, yaygın kullanılan tek noktalı çaprazlama operatörü kullanılmıştır. Tek noktalı çaprazlamada kromozomlar, rasgele seçilmiş bir noktadan ikiye ayrılır ve karşılıklı ikili kodlar yer değiştirilir. Böylece daha iyi nesillerin elde edilmesi sağlanmaya çalışılır [204]. Tek noktalı çaprazlama işlemine ilişkin bir örnek Şekil 3.39'da verilmektedir.



Şekil 3.39. Tek noktalı çaprazlama işlemi

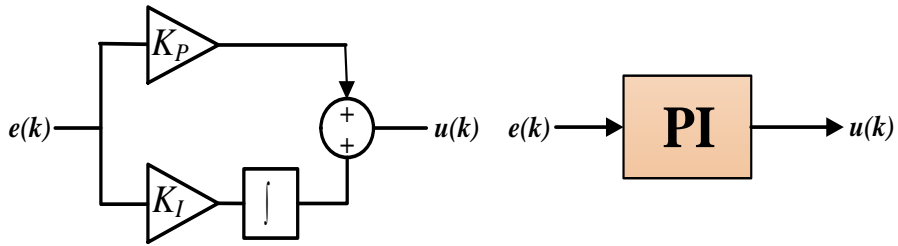
Mutasyon: Genetik algoritmanın başarısında çaprazlama operatörü gibi önemli bir rol oynar. Bu operatör var olan bir çözüme ait kromozomların bazı genlerinin değerini değiştirerek yeni bir çözüm üretir. Böylelikle kromozomlardaki çeşitlilik artırılır ve algoritmanın yerel minimuma veya maksimuma takılması önlenir [206, 211]. Literatürde birçok mutasyon çeşidi olup bu tez kapsamında, bit tabanlı mutasyon işlevi kullanılmıştır. Mutasyon işlemi kromozomları ifade eden sayı dizilerinin bitlerinde rasgele değişiklikler yapılması ile gerçekleştirilir [204, 210]. Örneğin bir bit 0 iken 1 veya 1 iken 0 yapılır ve bu durum Şekil 3.40'da gösterilmiştir.



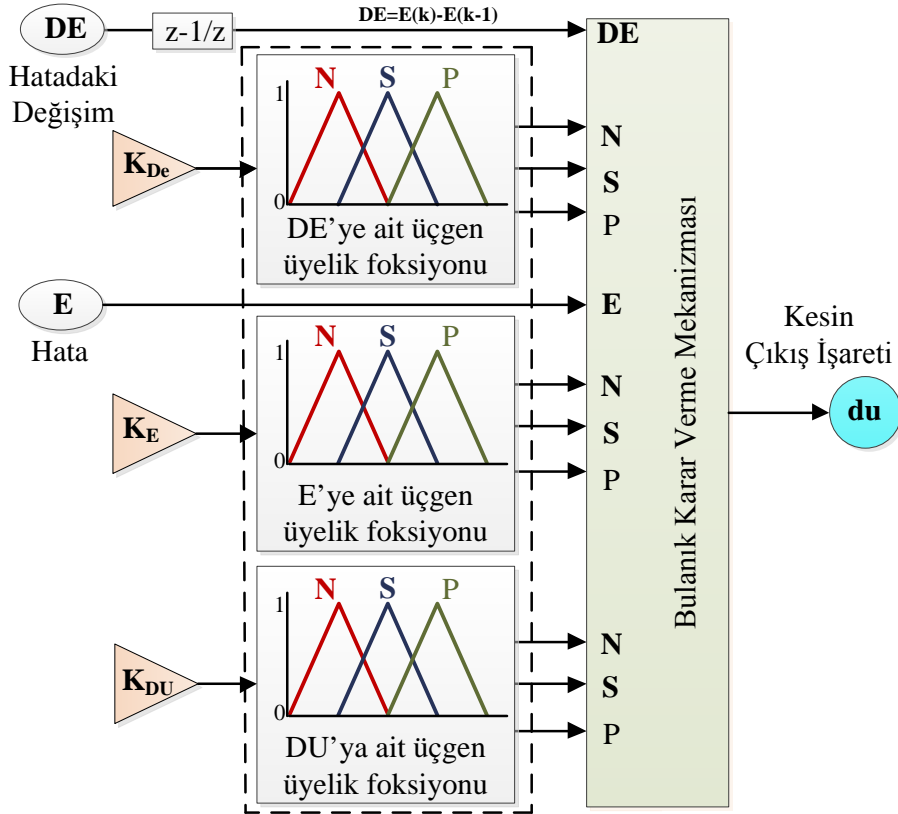
Şekil 3.40. Tek bir kromozom için mutasyon işlemi

### 3.4.6. Denetleyicilerin Kullanımı

Bu tez çalışması kapsamında kontrolör olarak geleneksel denetleyicilerden oransal-integral (PI) denetleyici ve bulanık mantık denetleyici (BMD) kullanılmıştır. Kullanılan kontrol yapıları Şekil 3.41 ve Şekil 3.42’te gösterilmiştir. Bulanık mantık denetleyici yukarıda verilen bilgiler ışığında  $5 \times 5 = 25$  kurallı, üçgen üyelik fonksiyonlu olarak tasarlanmıştır. Kullanılan bulanık mantık denetleyici İ.H. Altaş’a ait [185]’nolu referans dikkate alınarak tasarlanmıştır. Modele ilişkin detaylı bilgi bu kaynakta mevcuttur.



Şekil 3.41. PI denetleyici



Şekil 3.42. Bulanık mantık denetleyici genel blok yapısı

Burada e hatayı, de hatadaki değişimi ve du çıkış işaretindeki değişimi ifade eder. Önerilen denetleyicilerle, sistem için tasarlanan DA/DA yükseltici ve DA/AA evirici kısımları ayrı ayrı kontrol edilmiştir. Sistemin performansını artırmak ve daha iyi bir yük gerilimi elde etmek için, kullanılan denetleyicilerin parametrelerinin en uygun değerlerini belirleyebilmek amacıyla PSO ve GA yöntemleri kullanılmıştır. PSO ve GA kullanılarak bulanık mantık denetleyici için üyelik fonksiyonlarının sınır değerlerini belirleyen  $K_{DE}$ ,  $K_E$ ,  $K_{DU}$  parametreleri belirlenmiştir. PI denetleyicide ise  $K_P$ ,  $K_I$  parametreleri PSO ve GA ile belirlenmiştir. Tablo 3.3’de tezde kullanılan kontrolörlerin uygulamaları özetlenmiştir.

Tablo 3.3. Kullanılan kontrolörlerin uygulama parçaları

<i>Uygulama</i> <i>Kontrolörler</i>	<i>DA/DA Yükseltici</i> <i>Gerilimi (V)</i>	<i>DA/AA Evirici</i> <i>Gerilimi(V)</i>	<i>Yük</i>
PSO-PI	X	X	3~M /R
PSO-BMD	X	X	3~M /R
GA-PI	X	X	3~M /R
GA-BMD	X	X	3~M /R

Önerilen kontrolörler parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve genetik algoritma (GA) yöntemleri ile minimum ITAE (Zaman Ağırlıklı Mutlak Hatanın İntegrali) kriterini elde etmek için optimize edilmiştir. Böylece sistem için daha akıllı ve verimli bir kontrol sağlanmış olup farklı yükler için denetleyici ve optimizasyon yöntemleri karşılaştırılmıştır.

### 3.5. Yük

Tezin amaçlarından biri olan yük uçlarındaki gerilimin sabit ve düzenli olması, farklı yükler için de sağlanmaya çalışılmıştır. Bu bakımdan bu tez çalışması kapsamında yük olarak üç fazlı asenkron motor ve direnç kullanılmıştır. Yük olarak kullanılan üç fazlı asenkron motor, 250W gücünde olup 0,9/1.55A akım çekmektedir. Direnç olarak kullanılan yük 5W gücünde 10k $\Omega$  değerindedir. Yukarıda Tablo 3.3’de kullanılan yüklerin kontrol yöntemleriyle uygulamaları özetlenmiştir. Benzetim ve deneysel sonuçlar bölümünde, Matlab/Simulink programı kullanılarak oluşturulan sistem modelleri verilmiş olup sonuçları tartışılmıştır.

## 4. YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 4.1. Giriş

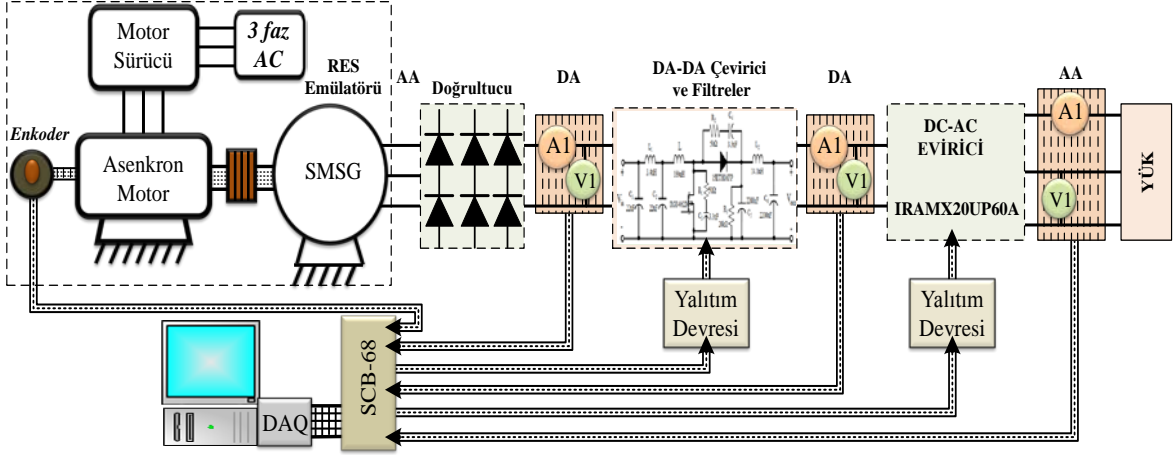
Bu bölümde bir önceki bölümde anlatılan tüm sistemin deneysel tasarımı ve gerçekleştirilmesi açıklanmıştır. Şekil 4.1’de blok diyagramı gösterilen rüzgar enerji dönüşüm sisteminin laboratuvar ortamında oluşturulmuş haline ait genel görünüş, Şekil 4.2’de görülmektedir.

Şekil 4.2’de gösterilen rüzgar enerji dönüşüm sisteminin laboratuvar ortamı deney düzeneği temelde; makine cihazları (motor ve generatörler), güç elektroniği devreleri, ölçü aletleri, bilgisayar yazılımı ve veri alışverişini sağlayan veri toplama kartından (PCI 6259) oluşmaktadır. Sistemi oluşturan elemanların bazıları (motor, generatör, vb.) doğrudan satın alınmış olup, özellikle güç elektroniği devreleri ve sistemin kontrolünde kullanılan kontrol algoritmaları ve optimizasyon yöntemleri bu tez içinde tasarlanmıştır.

Motor miline bağlanmış olan SMSG’den elde edilen elektrik enerjisinin kullanılabilmesi için gerekli güç elektroniği devreleri tasarlanmış ve deney düzeneğine eklenmiştir. Sistemin kontrolü için önerilen denetleyicilerin parametreleri optimizasyon yöntemleri ile Matlab/Simulink programı kullanılarak belirlenmiştir. Sistem, bilgisayar aracılığıyla kontrol edilmekte olup bilgilerin iletilmesi ve alınması için veri toplama kartı kullanılmıştır. Rüzgar enerji sistemi laboratuvar ortamı deney düzeneği aşağıdaki kısımlardan oluşmaktadır.

- Rüzgâr enerji dönüştürücü emülatörü (REDE)
- AA/DA doğrultucu
- DA-DA artıran çevirici
- DA/AA evirici
- Yalıtım devreleri
- Akım ve gerilim devreleri
- Ölçü aletleri
- Motor sürücüsü (Teco N<sub>3</sub>)
- Yük
- Güç kaynakları

- Bilgisayar ve veri toplama kartı (PCI 6259)
- Bilgisayar kullanıcı denetim arayüzleri



Şekil 4.1. Laboratuar ortamında gerçekleştirilen sistemin blok yapısı

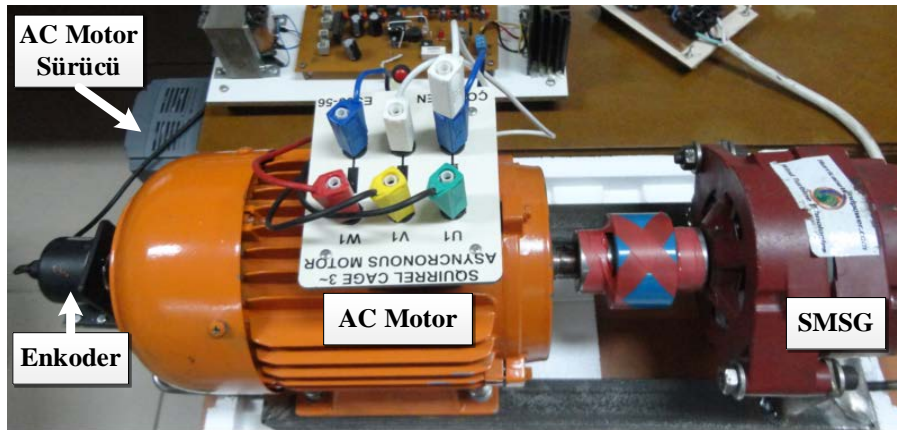


Şekil 4.2. Laboratuar ortamında gerçekleştirilen deney düzeneği genel görünüşü

Rüzgar enerji sistemi laboratuvar ortamı deney düzeneğine ait kısımlar ile ilgili daha ayrıntılı bilgiler, aşağıdaki bölümlerde verilmektedir.

#### 4.2. Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemi Emülatörü

Rüzgar enerji dönüşüm sistemlerinin bazı dezavantajlarını ortadan kaldırarak daha esnek çalışma ortamı sağlamak amacıyla tasarlanan laboratuvar ortamı rüzgâr enerji dönüşüm sistemi emülatörü Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Deneysel rüzgâr enerjisi dönüştürücü emülatörü; generatör, generatörün miline doğrudan bağlanmış ve dönmesini sağlayan motor ve bu motorun hız denetiminin yapıldığı motor sürücüsünden (Teco N<sub>3</sub> AC Driver) oluşmaktadır. Ayrıca farklı çalışma koşullarında generatör hızının ölçülebilmesi için generatör miline monte edilmiş enkoder bulunmaktadır. Enkoder vasıtasıyla elde edilen hız bilgisi, veri toplama kartı vasıtasıyla bilgisayara aktarılmaktadır. Hız bilgisinin doğru ve güvenli bir şekilde sistem denetiminde kullanılması için hem donanımsal hem de yazılımsal devreler tasarlanmıştır.



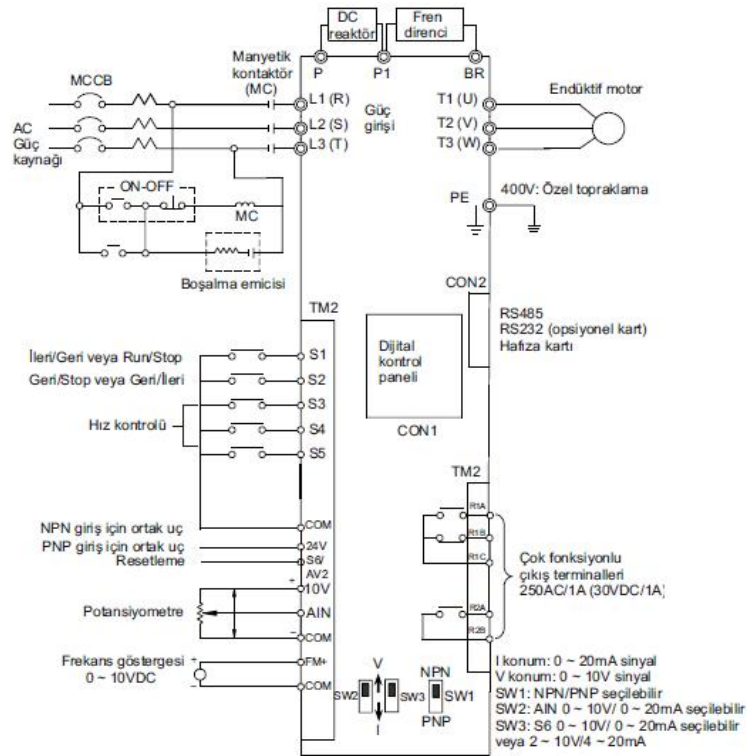
Şekil 4.3. Deneysel çalışmada kullanılan rüzgar enerji dönüştürücü emülatörü

Sistemde kullanılan asenkron motor üç fazlı, sincap kafesli, 4 kutuplu, 1500dv/dk ve 1,5kW gücünde olup generatör miline kaplin yardımıyla direk bağlanmıştır. Üç fazlı asenkron motor, sürekli mıknatıslı senkron generatörü döndürmek için kullanılmıştır. Generatörün farklı hızlarda dönmesini sağlamak amacıyla AA motor sürücüsü kullanılmış ve bu sayede sistemin gerçek hayatta rüzgârdaki ani değişimlerine karşı davranışları incelenmiştir. Bu nedenle asenkron motora hız kontrolü yapılmamış, belirtilen hız değerleri

aralığında rasgele olarak hızı değiştirilmiştir. Sistemde AA sürücü olarak Teco N<sub>3</sub> modeli kullanılmış ve Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Şekil 4.5'te Teco N<sub>3</sub> devre bağlantısı görülmektedir.



Şekil 4.4. Sistemde kullanılan AA sürücü



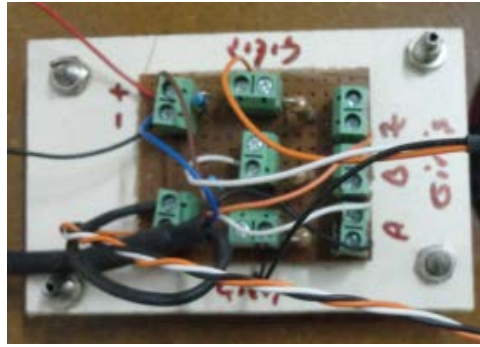
Şekil 4.5. Teco N3 devre bağlantısı

Şekil 4.5'te gösterilen devre bağlantısı ile AA sürücü asenkron motora bağlanmış ve sürücü üzerinde gerekli ayarlamalar yapılmıştır. Yapılan ayarlamalarla asenkron motorun



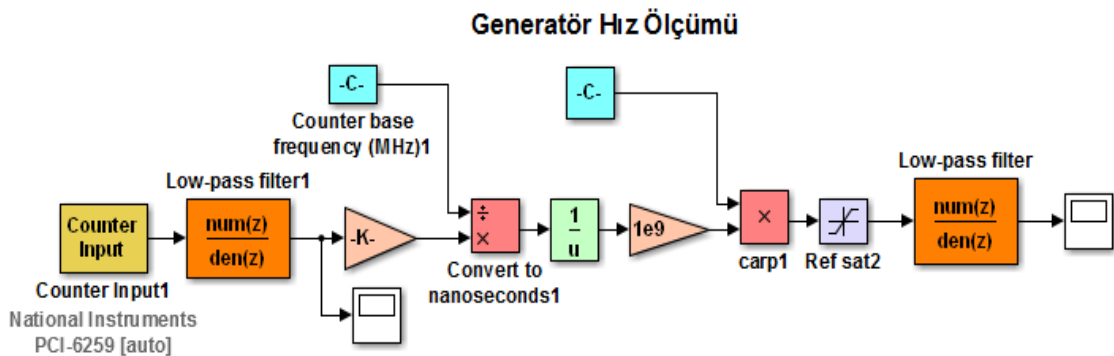
dolayısıyla SMSG'ün farklı hızlarda dönmesi, Şekil 4.4'te gösterilen sürücü üzerindeki potansiyometre ile sağlanmıştır. Potansiyometre belirlenen maksimum ve minimum hız aralıklarında rasgele (hızı artıracak veya azaltacak yönde) çevrilerek generatörün ürettiği gerilim değiştirilmiş ve bu sayede rüzgâr hızı benzetimi yapılmıştır.

Hızdaki değişimi gözlemlemek için Şekil 4.3'te gösterilen enkoder kullanılmıştır. Enkoderden alınan verilerin Matlab/Simulink ortamına veri toplama kartı yardımı ile aktarılabilmesi için kullanılan elektronik devre Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Gerilim bölücü devre

Kullanılan enkoder 24 volt çıkışlı olup, PCI 6259 veri toplama kartına maksimum 10 volt girilebilmektedir. Bu bakımdan enkoder çıkışının veri toplama kartına girilebilmesi için Şekil 4.6'da gösterilen gerilim bölücü devre kullanılmış ve gerekli bağlantılar yapılmıştır. Veri toplama kartından generatör hızına ilişkin gelen bilgilerin Matlab/Simulink ortamında işlenebilmesi için oluşturulan Simulink programı arayüzü Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Generatör hız ölçüm Matlab/Simulink programı arayüzü



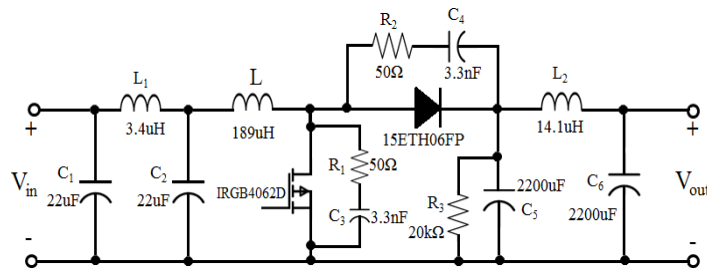
Deneysel düzenekte kullanılan generatör sürekli mıknatıslı senkron makine olup, mıknatıslar rotor yüzeyine açılmış oyuklara yerleştirilmiştir. Kullanılan generatör 250 W gücünde olup, mil hızına bağlı olarak üretmiş olduğu gerilim, dolayısıyla akım değeri değişmektedir. Şekil 4.3'te sistemde kullanılan generatör görülmektedir. Generatör hakkında daha detaylı bilgi bir önceki bölümde verilmiştir.

### 4.3. Güç Elektroniği Devre Tasarımı

Bu bölümde Şekil 4.2'de gösterilen deney düzeneğindeki tasarlanmış güç elektroniği devreleri hakkında bilgiler verilecektir. Bu devreler temelde; AA/DA doğrultucu, DA-DA artıran çevirici, DA/AA evirici ve gerekli akım-gerilim değerlerinin ölçülmesi için oluşturulan akım ve gerilim ölçüm, yalıtım ve simetrik besleme katlarıdır. Tasarlanan DA-DA artıran çevirici ve DA/AA evirici devleri ile ilgili bilgiler aşağıdaki bölümlerde paylaşılmaktadır.

#### 4.3.1. DA-DA Artıran Çevirici Devre Tasarımı

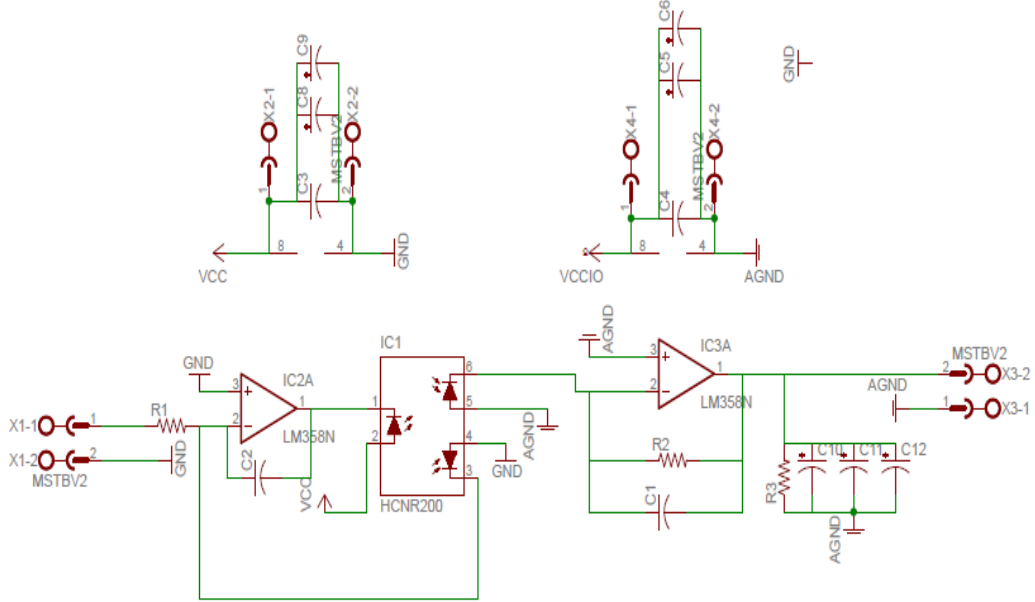
Rüzgâr enerji dönüştürücü emülatörü (REDE) çıkış gerilimi, generatörün çalışma koşullarına bağlı olarak değişmekte olup türü AA'dır. REDE çıkış gerilimi, üç fazlı pasif AA/DA doğrultucu devresinden geçtikten sonra DA-DA artıran çevirici girişine bağlanır. Bu çevirici ile REDE'nün farklı çalışma koşulları için, DA gerilim seviyesinin istenilen bara referans gerilim değerinde tutulması amaçlanmaktadır. Tasarlanan DA-DA artıran çevirici devresinin devre şeması, Eagle programı kullanılarak oluşturulmuş devre diyagramı ve gerçekleştirilmiş baskı devresini gösteren fotoğraf sırasıyla Şekil 4.8, 4.9 ve 4.10'da gösterilmiştir. Ayrıca çeviriciye ait baskı devre şeması Ek-1'de verilmiştir.



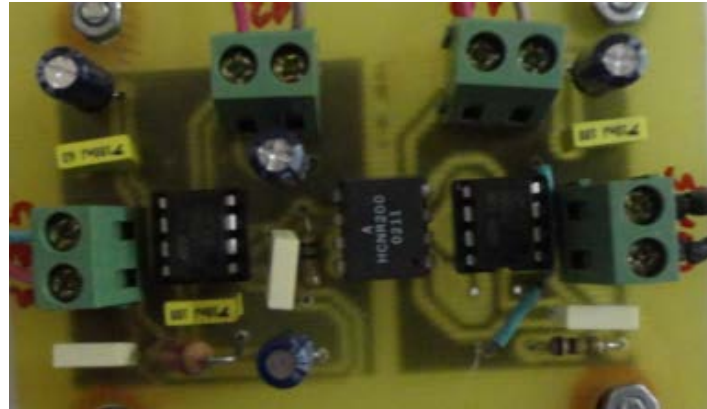
Şekil 4.8. DA-DA artıran çevirici devre şeması



diyagramı Şekil 4.11’de ve gerçekleştirilmiş baskı devresini gösteren fotoğraf Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Yalıtım devresine ait baskı devre şeması Ek-1’de verilmiştir.



Şekil 4.11. Yalıtım devresi elektronik devre diyagramı



Şekil 4.12. Tasarlanan yalıtım devresi genel görünüşü

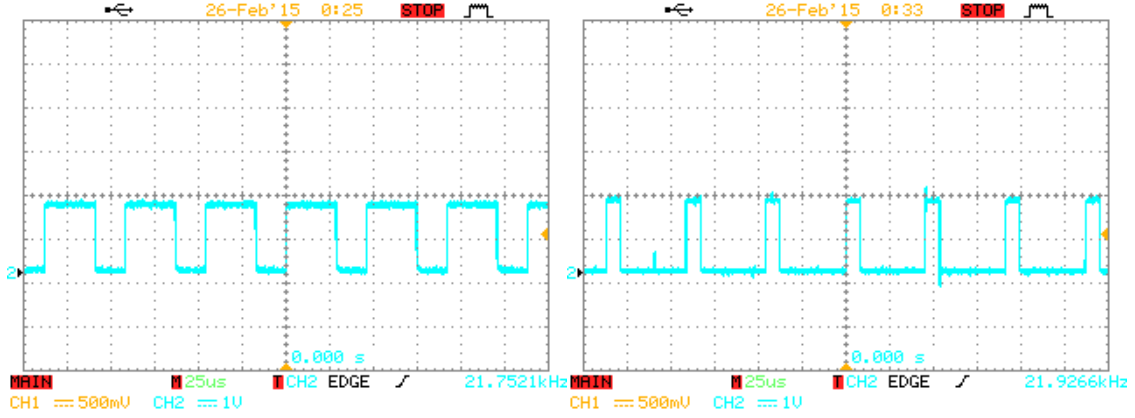
Yalıtım devresinde, iki adet genel amaçlı tek beslemeli işlemsel yükselteç LM 358, yüksek doğrusallıklı analog optik çift HCNR200, direnç ve kapasite kullanılmıştır. Giriş ve çıkış tarafı ayrı ayrı 12V’luk güç kaynaklarından beslenmiştir. Veri toplama kartından gelen analog işaretin GND’si ile giriş tarafını besleyen güç kaynağının GND’si ortaktır. Aynı şekilde çıkış tarafını besleyen güç kaynağının GND’si ile DA-DA yükseltici çevircininin GND’si de ortak olup böylelikle giriş ve çıkış tamamen yalıtılmıştır. Sistemde

kullanılan yüksek doğrusallıklı analog optik çift HCNR200, çok çeşitli analog sinyalleri izole etmek için farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. DA-DA artıran çeviricisinin çalışması, veri toplama kartı üzerinden gelen analog işarette sağlanır. Bu işaret, sistemin kontrolü için Matlab/Simulink programı kullanılarak oluşturulan arayüz ile, istenilen çıkış gerilimini elde etmek amacıyla, sistem girişinden alınan gerilim değerleriyle referans gerilim değerini karşılaştırıp önerilen denetleyicilerle kontrolünden elde edilir.

Yapılan deneysel çalışmalarda, DA-DA artıran çevirici için uygulanması gereken analog işaret 1.9V-3.7V aralığında sınırlandırılmıştır. Bunun nedeni yükselticinin doyuma gitmesini önlemek ve doluluk oranının sıfırlanıp girişin çıkışa eşit olmasını engellemek içindir. DA-DA yükselteçlerinde giriş gerilimi ile çıkış gerilimi arasındaki ilişkiyi gösteren ifade bir önceki bölümde denklem (3.44)'te verilmiştir. Veri toplama kartından gelen analog işaret, yalıtım devresinden geçerek Şekil 4.10'da gösterilen DA-DA çevirici devresi üzerindeki darbe genişlik modülasyonu (PWM) kontrol entegresinin (TL494) 3'nolu bacağına ulaşır. TL494 entegresi bir PWM kontrol devresinin yapımında gerekli olan tüm işlevleri içermekte olup genellikle güç kaynaklarının kontrolünde kullanılır. Sistemde TL494 entegresi, DA-DA artıran çeviricide kullanılan anahtarlama elemanını tetikleyen anahtarlama elemanı sürücüsü (MIC4452) için gerekli olan işareti üretir. Diğer bir ifadeyle girişine gelen analog işareti kare dalgaya dönüştürür ve MIC4452'ye iletir. Ayrıca TL494 entegresinin 5 ve 6 nolu bacaklarına bağlanmış olan  $C_T$ ,  $R_T$  elemanlarıyla tetikleme işaretinin frekansı belirlenir. Frekansın belirlenmesinde kullanılan matematiksel ifade Denklem 4.1'de verilmiştir. Gerçekleştirilen uygulamada anahtarlama frekansı 21 kHz olarak ayarlanmıştır.

$$f = \frac{1}{C_T \times R_T} \quad (4.1)$$

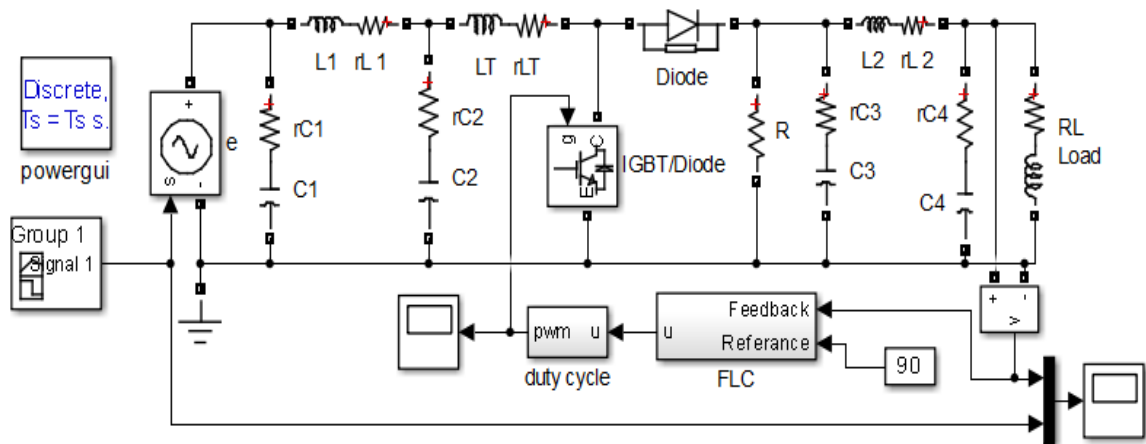
MIC4452 entegresi, girişine gelen işarete bağlı olarak sistemde kullanılan anahtarlama elemanı için gerekli olan tetikleme işaretini üretir. Sistemde kullanılan entegreler 15V'luk gerilim kaynağından beslenmektedir. Şekil 4.13'te, TL494 entegresi çıkış işaretinin osiloskop görüntüsü ve Şekil 4.14'te ise anahtarlama elemanı için üretilen işaretin osiloskop görüntüsü veya bir başka ifade ile MIC4452 entegresinin çıkışı görülmektedir.



Şekil 4.13 TL494 çıkış işareti dalga şekli Şekil 4.14 MIC4452 çıkış işareti dalga şekli

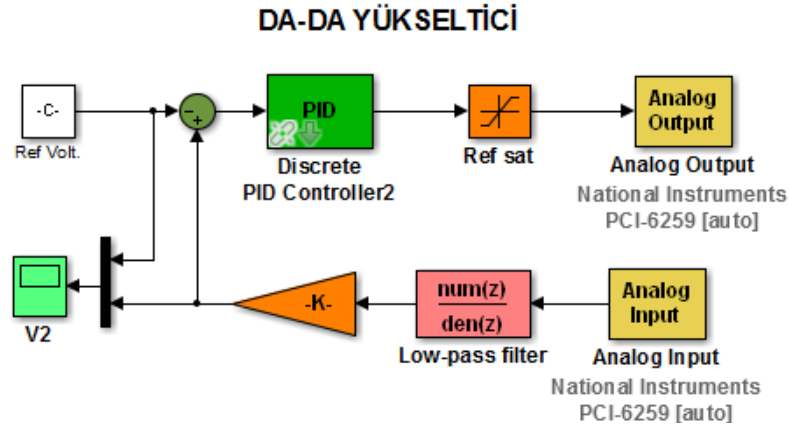
Şekil 4.8’de gösterildiği gibi, DA-DA çeviricisinin girişi ve çıkışında oluşabilecek salınımları sönmölemek için filtreler tasarlanmıştır. Ayrıca sistemde kullanılan anahtarlama elemanı ve diyot üzerinde oluşabilecek gerilimin zamana göre değişiminin aşırı değerlere ulaşmasını önlemek için susturucu devre kullanılmıştır.

Sistemin gerçek zamanlı ve benzetimsel olarak kontrolleri, bilgisayar üzerinde Matlab/Simulink programı kullanılarak oluşturulan arayüzler yardımı ile gerçekleştirilmektedir. DA-DA çeviricinin benzetimi için oluşturulmuş sistem arayüzü Şekil 4.15’te gösterilmiştir. Bu model kullanılarak sistem için önerilen denetleyiciler test edilmiş ve sistem davranışı değişik yükler için gözlemlenmiştir. Ayrıca DA-DA çeviricisinin benzetim modelinde, parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve genetik algoritma (GA) kullanılarak denetleyici parametrelerinin belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu konu hakkında daha detaylı bilgi benzetimsel ve deneysel sonuçlar bölümünde verilecektir.



Şekil 4.15. DA-DA çevirici Matlab/Simulink programı blok diyagramı

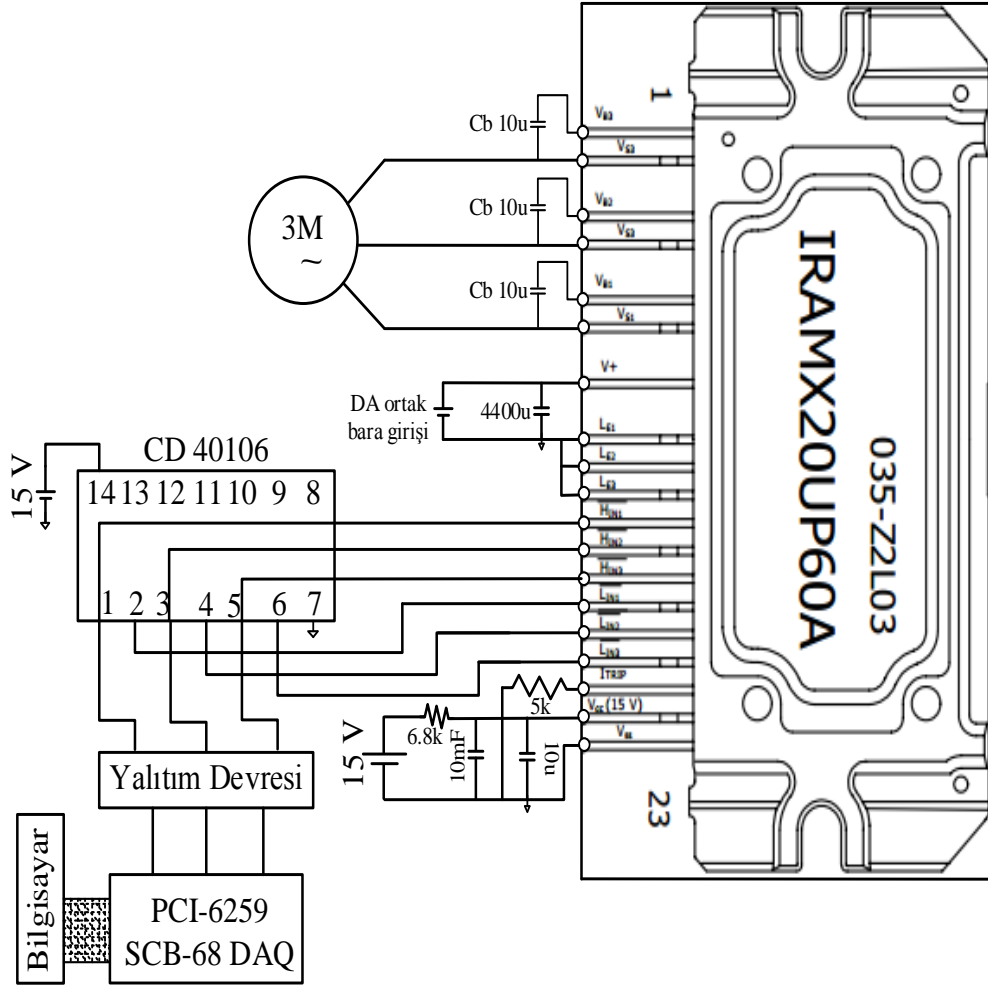
Gerçekleştirilen deneysel çalışmada veri toplama kartından DA-DA artıran çeviriciye ilişkin gelen bilgilerin, Matlab/Simulink programı ortamında işlenebilmesi için oluşturulan arayüz, Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.16. DA-DA artıran çevirici gerçek zamanlı çalışma arayüz blok diyagramı

#### 4.3.2. DA/AA Evirici Tasarımı

Rüzgâr enerji dönüşüm sisteminin REDE çıkış gerilimi, üç fazlı pasif AA/DA doğrultucusu tarafından DA gerilime dönüştürüldükten sonra gerilim değerini, istenen seviyede tutmak için DA-DA yükselteci çeviricisi kullanılmaktadır. Çevirici çıkışı, sistemin DA ortak barasına bağlıdır. DA ortak barasına yükler, doğrudan veya güç elektroniği devresi yardımı ile bağlanabilmektedir. Günümüzde kullanılan yükler kullanım yerlerine göre çeşitlilik göstermektedir ve bu çalışmada, DA ortak barası üzerinden istenilen gerilim değerlerinde bir AA yükünün beslenebilmesi için üç fazlı DA/AA eviricisi tasarlanmıştır. Tasarlanan üç fazlı DA/AA evirici devresinin blok diyagramı Şekil 4.17'de gösterilmiştir.

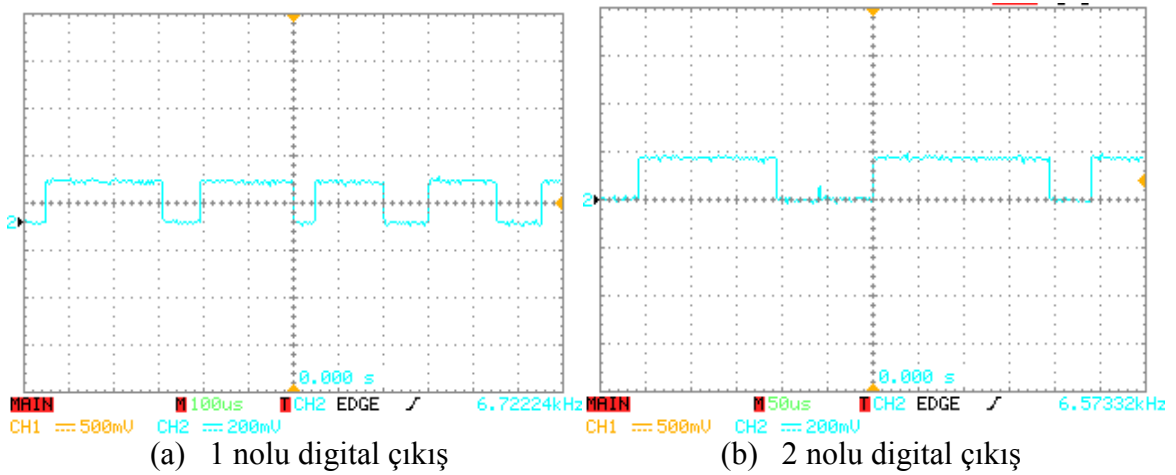


Şekil 4.17. Tasarlanan üç fazlı DA/AA evirici blok diyagramı

Teknolojik gelişmelere paralel olarak güç elektroniği elemanlarının performanslarını artırmak ve yüksek güç yoğunluğu elde etmek amacıyla anahtarlama elemanları için kompakt paket yapılar geliştirilmiştir. Bu çalışmada DA/AA dönüşüm yapmak için IRAMX20UP60A (20A, 600V) tümleşik karma güç (TKG) modülü kullanılmıştır. Kullanılan modül içinde her faz için 2 olmak üzere toplamda 6 adet anahtarlama elemanı vardır. Şekil 4.17'den görüleceği gibi, anahtarlama elemanları için gerekli olan sinyaller veri toplama kartı (PCI6259), yalıtım devresi ve schmitt tetikleyicisi (CD40106BE) üzerinden TKG modülüne iletilir. Matlab/Simulink programı yardımı ile oluşturulan 3 adet PWM sinyal, veri toplama kartı üzerinden yalıtım devresine aktarılır. Yalıtım devresi için optik çift (A3120) entegresi kullanılmıştır. Yalıtım devresi, sinyallerdeki gürültüyü azaltmak ve veri toplama kartı ile evirici arasında tampon görevi görmekte olup, gelen sinyalleri CD40106BE entegresine iletir. CD40106BE entegresi, girişine gelen 3 PWM

işaretinin tersini üreterek, 6 adet PWM işareti oluşturur ve bu işaretleri TKG modülü içindeki anahtarlama elemanlarına iletir. Sistemde kullanılan elemanlar 15V veya 24V değerlerine sahip kaynaklardan beslenmektedir.

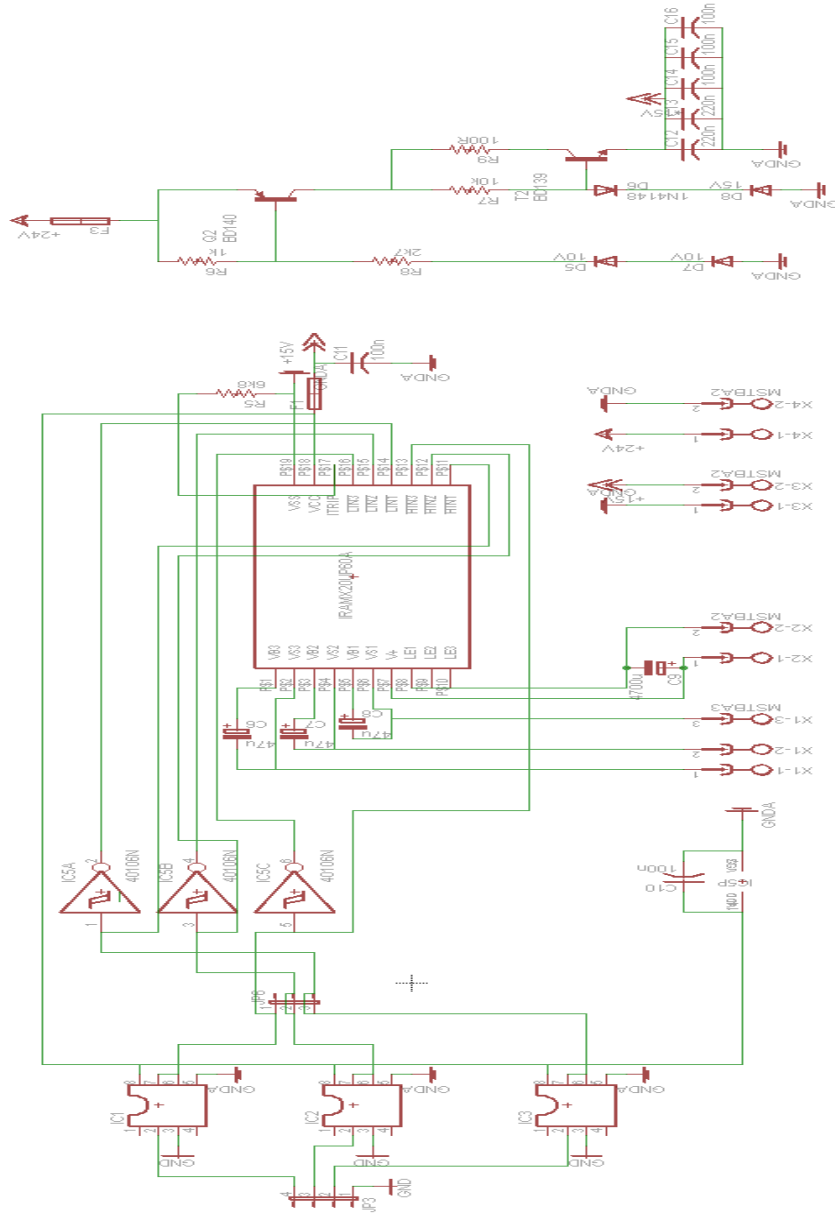
Anahtarlama elemanları için gerekli olan PWM işaretini, Matlab/Simulink programı kullanılarak oluşturulan arayüz ile, AA yük uçlarında istenilen frekans ve genlikte çıkış gerilimi elde etmek amacıyla, alınan geri beslemenin referans gerilim değeri ile karşılaştırılıp önerilen denetleyicilerle kontrolünden elde edilir. Sistem için oluşturulan ve veri toplama kartı üzerinden gönderilen PWM işaretinin osiloskop görüntüsü Şekil 4.18'de görülmektedir.



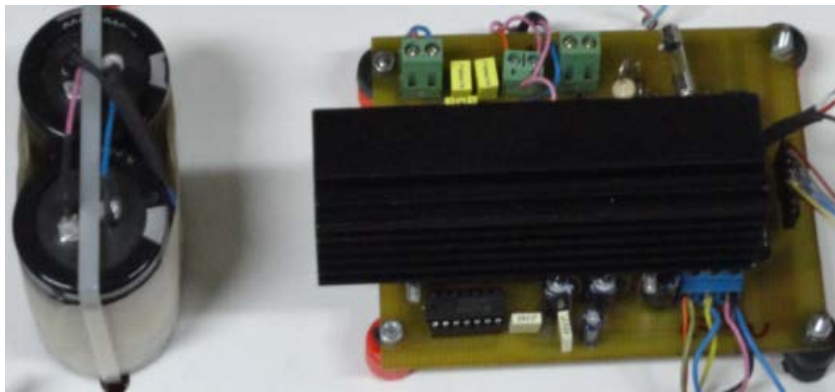
Şekil 4.18. PWM işaretinin dalga şekli

Tasarlanan üç fazlı DA/AA eviricinin Eagle programı kullanılarak oluşturulmuş devre diyagramı ve gerçekleştirilmiş baskı devresini gösteren fotoğraf sırasıyla Şekil 4.19 ve 4.20'de gösterilmiştir. Ayrıca çeviriciye ait baskı devre şeması Ek-1'de verilmiştir.



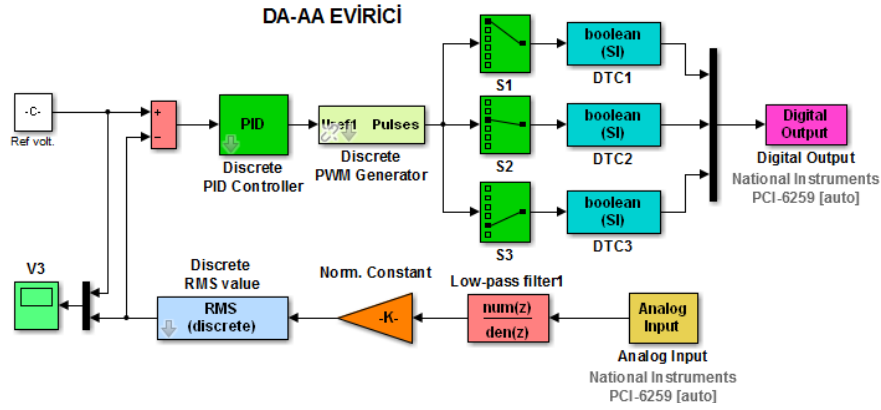


Şekil 4.19. Tasarlanan DA/AA evirici elektronik devre diyagramı



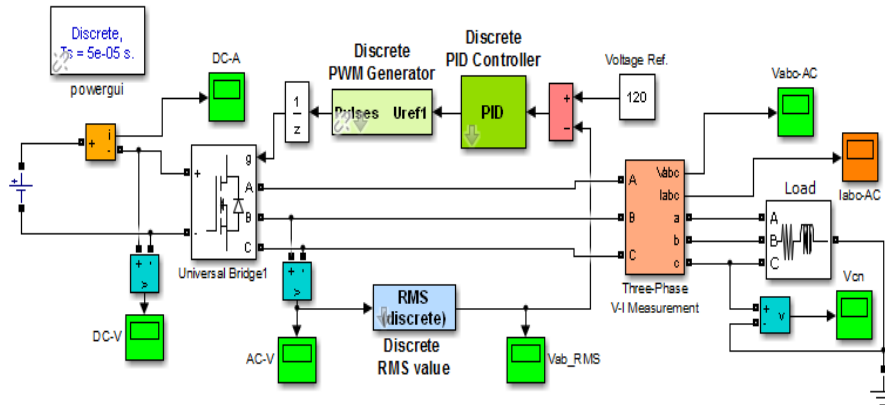
Şekil 4.20. Tasarlanan DA/AA evirici devresi genel görünüşü

Gerçekleştirilen deneysel çalışmada, veri toplama kartından DA/AA eviricisine ilişkin gelen bilgilerin Matlab/Simulink programı ortamında işlenebilmesi için oluşturulan arayüz, Şekil 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.21. DA/AA evirici gerçek zamanlı çalışma arayüz blok diyagramı

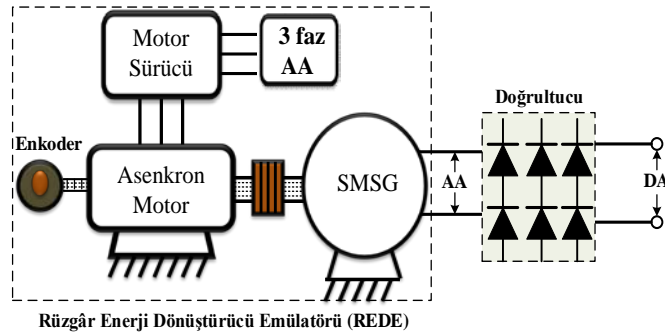
Sistemin gerçek zamanlı ve benzetimsel olarak kontrolleri, bilgisayar üzerinde Matlab/Simulink programı kullanılarak oluşturulan arayüzler yardımı ile gerçekleştirilmektedir. DA/AA evirici benzetimi için oluşturulmuş sistem arayüzü Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Bu model kullanılarak sistem için önerilen denetleyiciler test edilmiş ve sistem davranışı değişik yükler için gözlemlenmiştir. Ayrıca DA/AA çeviricisinin benzetim modelinde, PSO ve GA yöntemleri kullanılarak denetleyici parametrelerinin belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu konu hakkında daha detaylı bilgi benzetimsel ve deneysel sonuçlar bölümünde verilecektir.



Şekil 4.22. DA/AA evirici benzetim çalışması Matlab/Simulink programı blok diyagramı

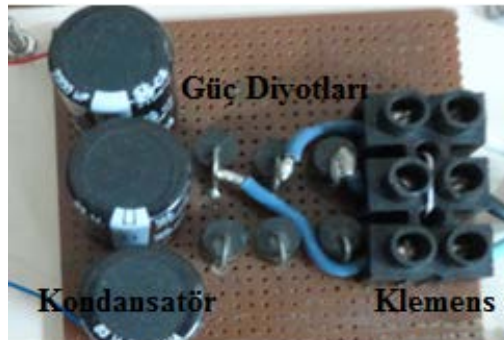
### 4.3.3. AA/DA Doğrultucu Devresi

Rüzgâr enerji dönüştürücü emülatörü (REDE) çıkış gerilimi, generatörün çalışma koşullarına bağlı olarak değişmekte olup türü AA'dır. REDE çıkış gerilimi, üç fazlı pasif AA/DA doğrultucu devresinden geçtikten sonra DA-DA yükselteç çeviricisi girişine bağlanır. REDE ve doğrultucu blok yapısı Şekil 4.23'te gösterilmiştir.



Şekil 4.23. REDE ve AA/DA doğrultucu blok yapısı

REDE'ünde kullanılan 3 fazlı sürekli mıknatıslı senkron generatör çıkış gerilimi, generatörün dönüş hızına bağlı olarak değişmektedir. REDE AA çıkış gerilimi, üç fazlı pasif AA/DA doğrultucu devresi kullanılarak DA gerilim elde edilir. Deneysel çalışmada kullanılan üç fazlı pasif AA/DA doğrultucu genel görünüşü Şekil 4.24'te verilmiştir.



Şekil 4.24. AA/DA doğrultucu genel görünüşü

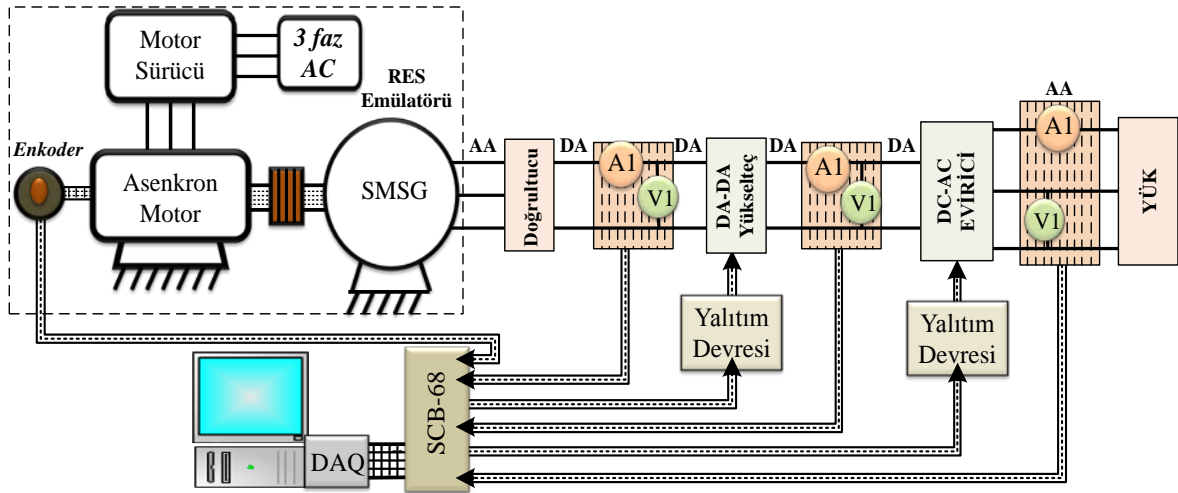
Şekil 4.24'te görüleceği gibi gerçekleştirilen AA/DA doğrultucu devresinde, SMSG'ün üç faz AA çıkışı klemensler üzerinden güç diyotlarına ulaşır. Her faz için 2 adet olmak üzere toplam 6 adet 6A değerinde güç diyotları kullanılmıştır. Doğrultucu devresi

çıkış gerilimindeki kırırtıyı minimum düzeyde tutmak ve yüksek güçlerde de bara kararlılığını sürdürmek için devre çıkışına elektrolitik kondansatörler (2200 $\mu$ f, 63V) bağlanmıştır. Sitemde kullanılan generatörün nominal hızı 1500 devir/dk olup 185-190V AA gerilim üretmektedir.

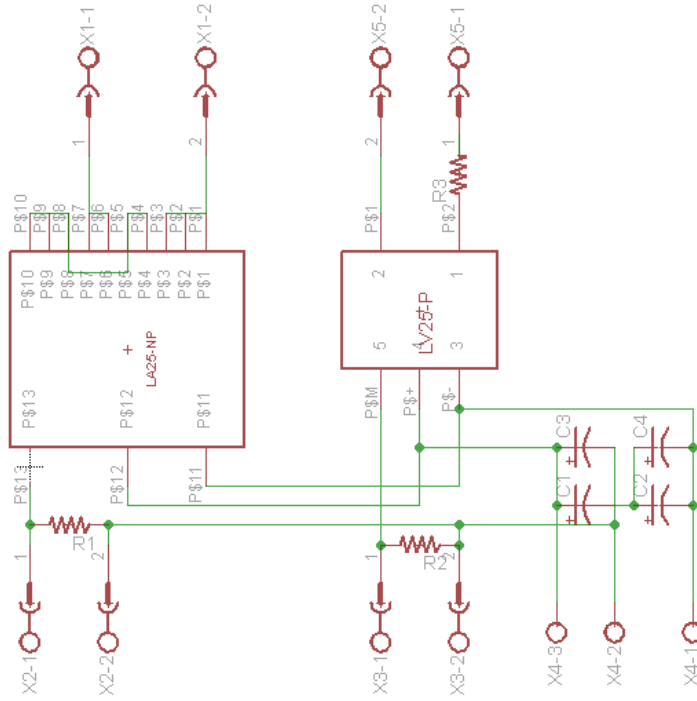
#### 4.3.4. Ölçüm Devreleri

Deney düzeneği üzerinde denetlenecek kısımlar (DA-DA artıran çevirici ve DA/AA evirici) için gerekli olan değerler ve deneysel düzeneğin çalışmasını gözlemlemek amacıyla, akım ve gerilim bilgilerinin veri toplama kartı (PCI6259) üzerinden bilgisayar kullanıcı arayüzüne iletilmesi için elektronik devreler tasarlanmıştır.

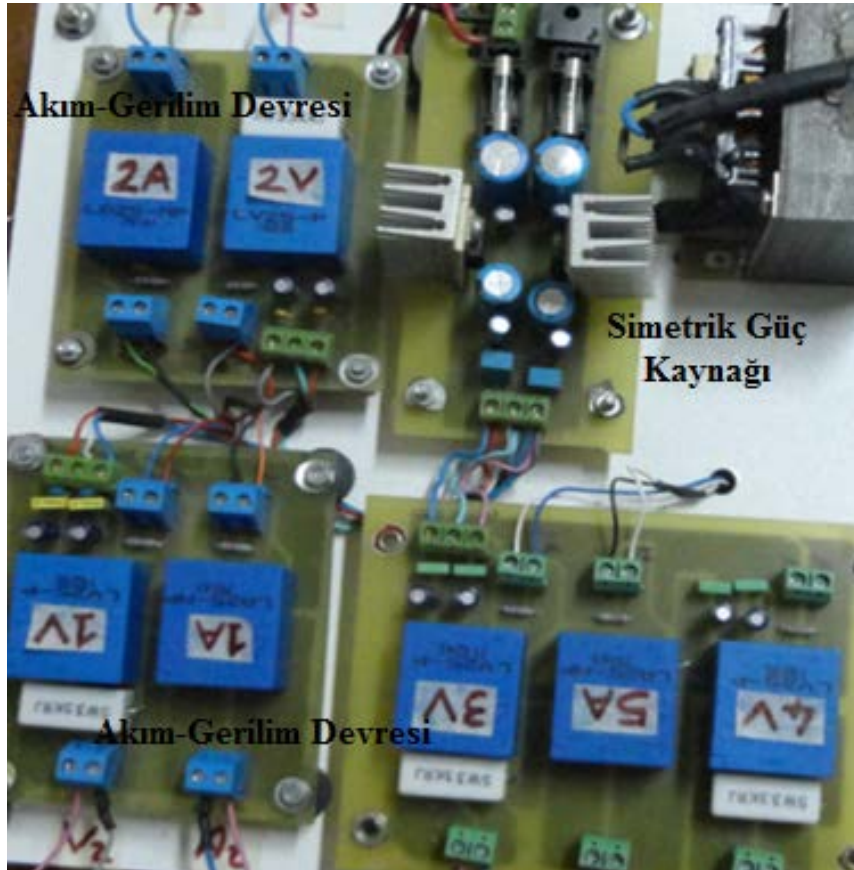
Tasarlanan akım-gerilim devresinin çalışmasını gösteren blok yapısı Şekil 4.25'te, Eagle programı kullanılarak oluşturulmuş devre diyagramı Şekil 4.26'da ve gerçekleştirilmiş baskı devresini gösteren fotoğraf Şekil 4.27'de verilmiştir. Akım-gerilim devresine ait baskı devre şeması Ek-1'te verilmiştir.



Şekil 4.25. Rüzgar enerji dönüşüm sisteminde veri alış verişini gösteren blok yapısı



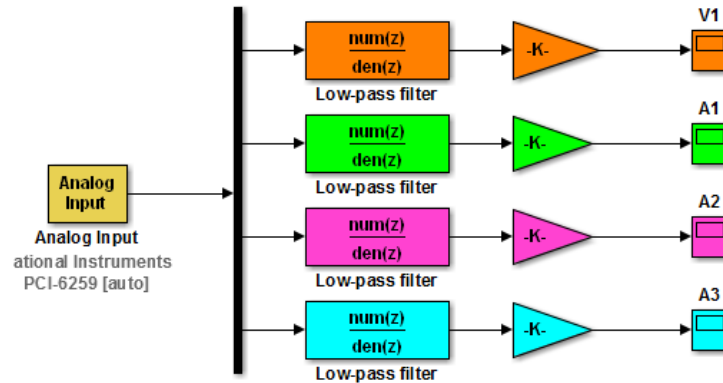
Şekil 4.26. Akım-gerilim ölçüm devre şeması



Şekil 4.27. Tasarlanan akım ve gerilim ölçüm devreleri genel görünüşü

Şekil 4.27'den görüleceği üzere, tasarlanan akım-gerilim ölçüm devrelerinde gerilim sensörü olarak LV25-P ve akım sensörü olarak LA25-NP kullanılmıştır. Ayrıca tasarlanan akım-gerilim ölçüm devresinde pasif elektronik elemanlar da kullanılmış olup, tasarlanan devrelerin enerjisi, yine tasarlanmış doğrusal simetrik  $\mp 12V$  güç kaynağı tarafından karşılanmaktadır.

Ölçülen tüm akım ve gerilim değerleri, veri toplama kartının analog girişleri vasıtasıyla bilgisayar kullanıcı arayüzüne aktarılır. Veri toplama kartı analog girişi maksimum 10V olduğundan dolayı, deneysel çalışmada ölçülen akım-gerilim değerlerinin gerçek değerleriyle arayüzde gösterilebilmesi için, akım-gerilim devrelerinin dönüştürme oranlarının tespit edilmesi gerekmektedir. Tasarlanan akım-gerilim devrelerinin dönüştürme oranları, laboratuvar ortamında yapılan testler sonucunda belirlenmiştir. Sistemde üç adet gerilim ve akım ölçüm elamanı kullanılmaktadır. Veri toplama kartının analog girişlerinden alınan akım ve gerilim bilgilerinin bilgisayar kullanıcı arayüzünde gözlemlenebilmesi için oluşturulan arayüz kısmı Şekil 4.28'de gösterilmiştir.

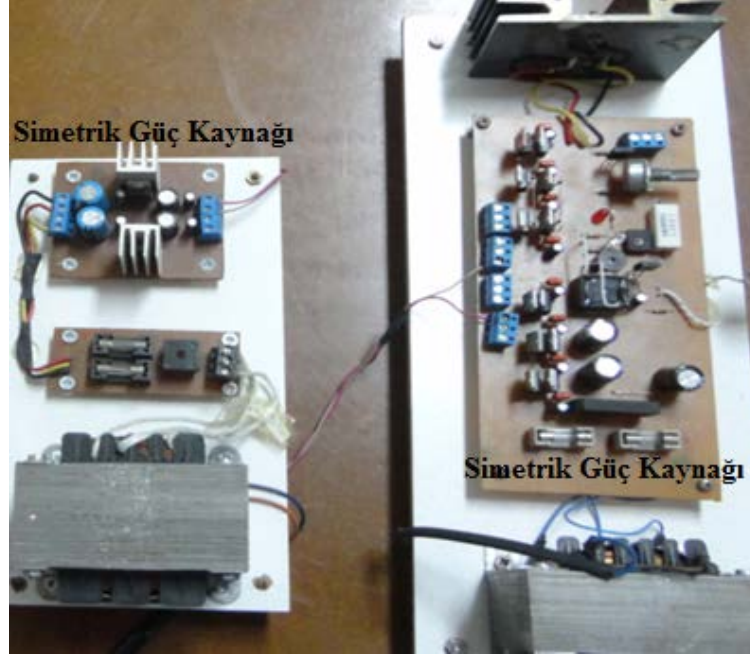


Şekil 4.28. Akım-gerilim ölçümü Matlab/Simulink programı arayüzü

#### 4.3.5. Güç Elektroniği Devreleri İçin Doğrusal Güç Kaynağı

Yapılan deneysel çalışma için üç adet doğrusal simetrik güç kaynağı tasarlanmıştır. Tasarlanan güç kaynaklarından bir tanesi akım-gerilim devrelerinin beslenmesinde kullanılmakta olup diğer ikisi yalıtım devresinin beslenmesinde kullanılmıştır. Ayrıca deneysel çalışmadaki diğer kısımların beslenmesi için de iki adet DA güç kaynağı kullanılmıştır. Tasarlanan güç kaynaklarının baskı devresinin gerçekleştirilmiş halini

gösteren fotoğraf Şekil 4.29'da görülmektedir. Simetrik güç kaynağı devresine ait baskı devre şeması Ek-1'te verilmiştir.



Şekil 4.29. Tasarlanan güç kaynaklarının genel görünüşü

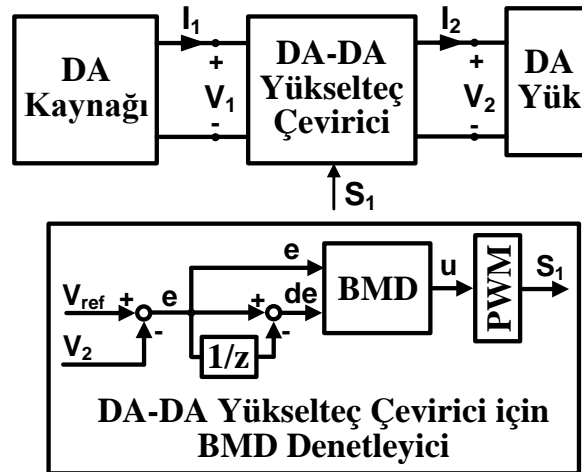
## 5. BENZETİMSEL VE DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde, bir önceki bölümde tasarımı ve gerçekleşmesi açıklanan rüzgâr enerji dönüşüm sisteminin deneysel sonuçları ele alınmış ve sistem için önerilen denetleyicilerin, parametrelerini belirlemek amacıyla Matlab/Simulink programı kullanılarak oluşturulan benzetimleri incelenmiştir.

### 5.1. Sistem Denetleyici Özelliklerinin Kararlaştırılması

#### 5.1.1. Bulanık Mantık Denetleyici Üyelik Fonksiyonu Türü

Rüzgâr enerji dönüşüm sistemi güç elektroniği devrelerinin kontrolünde kullanılacak olan bulanık mantık denetleyici (BMD) için farklı üyelik fonksiyon türleri kullanılabilir. Günümüzde yaygın olarak kullanımına rastlanan başlıca BMD üyelik fonksiyonları; Üçgen, Yamuk, Cauchy, Gaussion ve Çan dır. Bu tez kapsamında faydalanılacak BMD üyelik fonksiyonu türünün belirlenmesi için, Sekil 5.1’de blok diyagramı gösterilen DA-DA yükselteç çevirici gerilim kontrolü benzetim çalışması gerçekleştirilecektir.



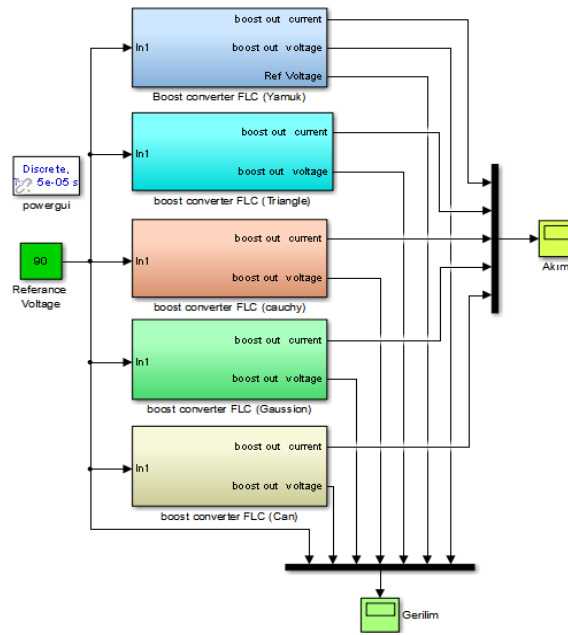
Sekil 5.1. DA-DA artıran çevirici gerilim kontrolü blok diyagramı

Şekil 5.1’de gösterilen DA-DA artıran çevirici giriş geriliminin ( $V_1$ ) zamanla değişen değerlere ve sabit referans çıkış gerilimine ( $V_{ref}$ ) sahip olma durumu için çıkış

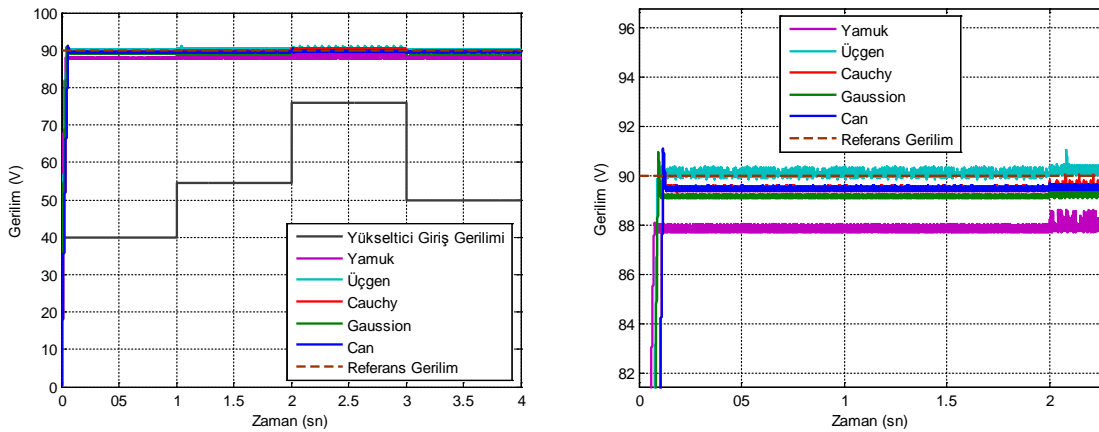


geriliminin ( $V_2$ ) denetimi, BMD'nin farklı üyelik fonksiyonu türleri (Üçgen, Yamuk, Cauchy, Gaussion ve Çan) için ayrı ayrı benzetimi yapılarak gerçekleştirilmektedir. Şekil 5.2'de farklı BMD üyelik fonksiyonu türleri için oluşturulmuş Matlab/Simulink programı benzetim blok diyagramı gösterilmektedir.

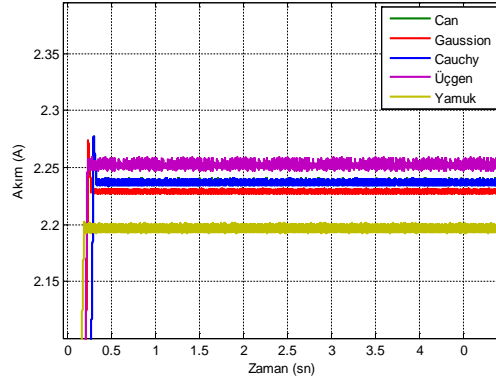
Benzetim çalışması, hem sadece direnç yükü (R) hem de direnç-endüktans (RL) yükü için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. En iyi sonucu sağlayan üyelik fonksiyonu türü, DA/AA eviricinin BMD'i için de kullanacaktır. Sadece direnç yükü (R) için DA-DA artıran çevirici çıkış gerilimi ve akımı Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te görülmektedir.



Şekil 5.2. Farklı BMD üyelik fonksiyon türleri için oluşturulan Matlab/Simulink blok diyagramı.

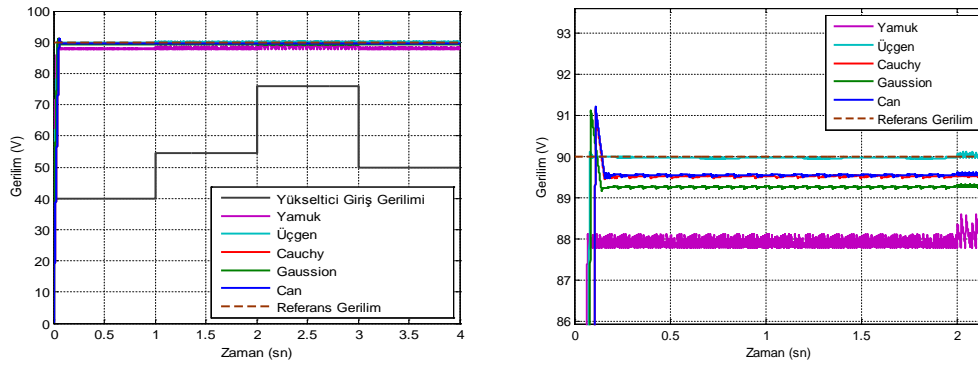


Şekil 5.3. DA-DA artıran çevirici çıkış gerilimi (R yükü)

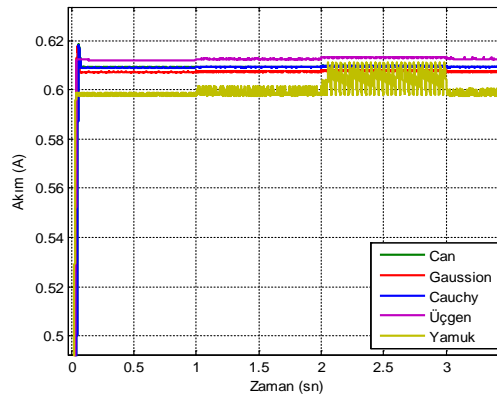


Şekil 5.4. DA-DA artıran çevirici akımı (R yükü)

RL yükü için DA-DA artıran çevirici çıkış gerilimi ve akımı Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.5. DA-DA artıran çevirici gerilimi (RL yükü)



Şekil 5.6. DA-DA artıran çevirici akımı (RL yükü)

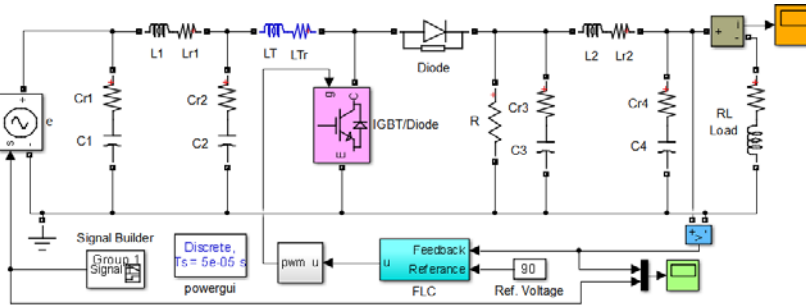
Farklı BMD üyelik fonksiyon türleri için yapılan tüm benzetim çalışmaları sonucunda; üçgen üyelik fonksiyonuna sahip BMD'nin diğer üyelik fonksiyon türlerine

(Yamuk, Cauchy, Gaussian ve Çan) göre daha iyi sonuç sağladığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar ışığında; tasarlanan çevirici ve evirici devrelerinin kontrolünde faydalanılacak BMD yapısında üçgen üyelik fonksiyonu kullanılacaktır.

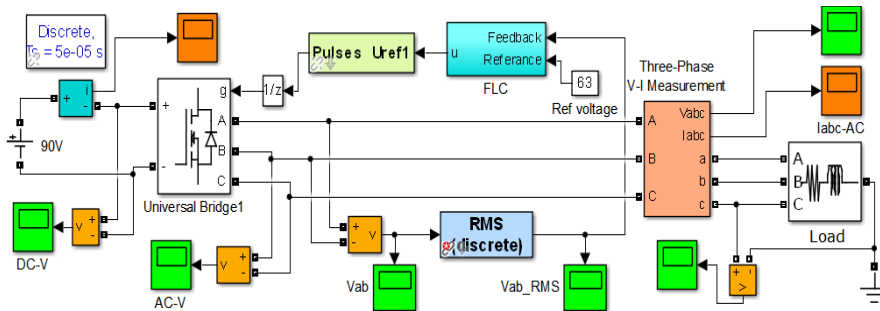
### 5.1.2. PI ve Bulanık Mantık Denetleyici Parametreleri

Rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminde denetleyici olarak kullanılacak PI ve bulanık mantık denetleyicilerine ait bazı parametrelerin belirlenmesi aşamaları bu bölümde anlatılmaktadır. PI denetleyiciye ait oransal katsayı ( $K_P$ ) ve İntegral katsayısı ( $K_I$ ) ile bulanık mantık denetleyici giriş hatası ( $e$ ), hatadaki değişim ( $de$ ) ve çıkış birim sinyali ( $du$ ) sınır değerleri ( $K_{de}$ ,  $K_e$ ,  $K_{du}$ ), parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve genetik algoritma (GA) yöntemleri ile ayrı ayrı belirlenmiştir.

Sistem için tasarlanan DA-DA çevirici ve DA/AA evirici devrelerinin kontrolü için önerilen denetleyicilerin parametrelerini belirlemek amacıyla Matlab/Simulink programı kullanılarak oluşturulan blok diyagramlar, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de gösterilmiştir.



Şekil 5.7. BMD kontrollü DA-DA çevirici için oluşturulan Matlab/Simulink blok diyagramı.



Şekil 5.8. BMD kontrollü DA/AA evirici için oluşturulan Matlab/Simulink blok diyagramı.

Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de gösterilen yapılar kullanılarak PI ve BMD parametreleri PSO ve GA optimizasyon yöntemleriyle ayrı ayrı belirlenmektedir. Her bir denetleyici için kullanılan optimizasyon yöntemi 1000 iterasyonluk işlem sonucunda belirlenen katsayılar benzetim arayüzü kullanılarak farklı referanslara göre test edilmekte ve en iyi sonucu veren katsayılar kaydedilmektedir. Daha sonra bu katsayıların ortalamaları alınarak deneysel çalışmalar için kullanılacak ilgili denetleyici parametreleri belirlenmektedir. Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’de çevirici ve evirici denetiminde kullanılacak olan PI ve bulanık mantık denetleyicilerinin elde edilmiş parametre değerleri verilmiştir.

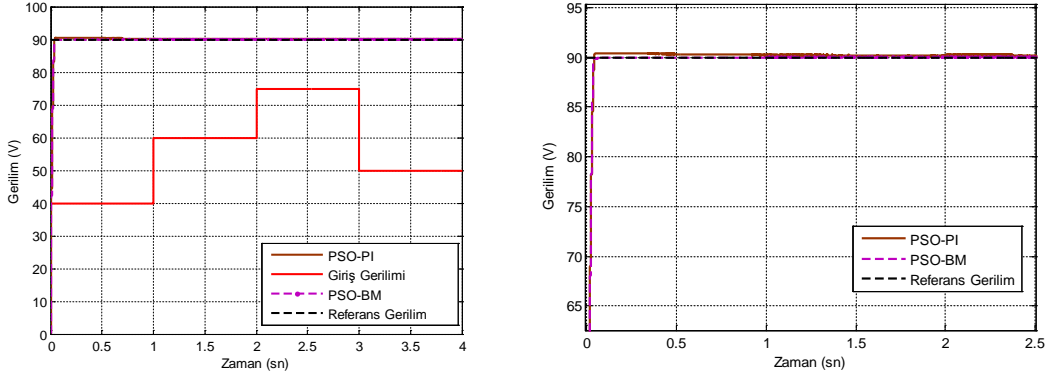
Tablo 5.1. PI parametreleri (PSO ve GA)

PI	DA-DA Çevirici		DA/AA Evirici	
	K <sub>P</sub>	K <sub>I</sub>	K <sub>P</sub>	K <sub>I</sub>
GA	1.8248	0.5682	0.0595	1.7031
PSO	1.2092	0.7349	0.7508	1.2589

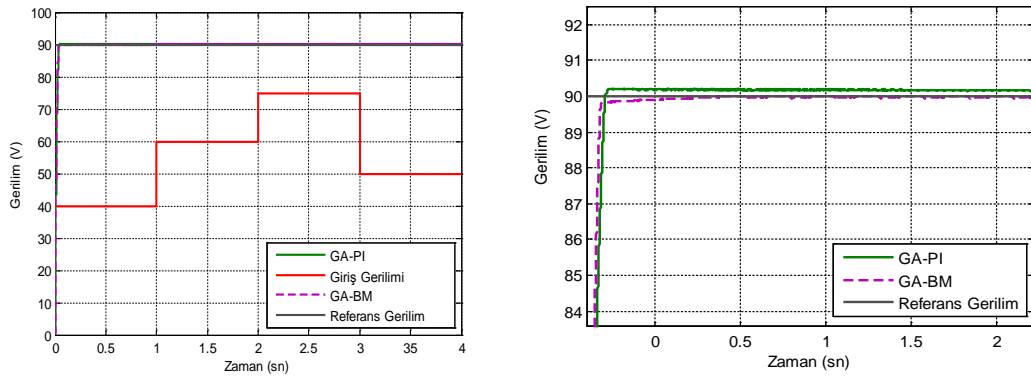
Tablo 5.2. BMD parametreleri (PSO ve GA)

BMD	DA-DA Çevirici			DA/AA Evirici		
	K <sub>de</sub>	K <sub>e</sub>	K <sub>du</sub>	K <sub>de</sub>	K <sub>e</sub>	K <sub>du</sub>
GA	2.0241	0.9560	7.2342	0.9734	0.9231	2.3073
PSO	3.1791	1	8.2898	1.0241	0.7311	4.6085

Önerilen denetleyicilerden PI denetleyici parametreleri BMD parametrelerine göre daha hızlı belirlenmiştir. Ayrıca PSO algoritmasının GA yöntemine göre yapısının daha basit oluşu, yazılım açısından kolaylık sağladığı gibi denetleyici parametrelerinin belirlenmesi için geçen sürede daha kısa olmaktadır. DA-DA çevirici kontrolü için PSO ve GA yardımıyla belirlenen denetleyici parametreleri ile Matlab/Simulink programı kullanılarak yapılan benzetimsel çalışmada elde edilen sonuçlar, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da gösterilmiştir.

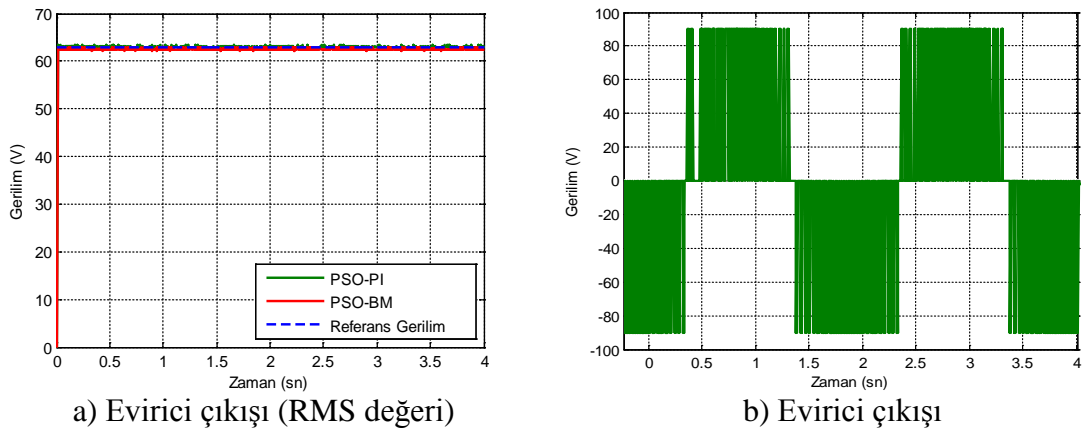


Şekil 5.9. DA-DA çevirici çıkış gerilimi (PSO-PI ve PSO-BMD)



Şekil 5.10. DA-DA çevirici çıkış gerilimi (GA-PI ve GA-BMD)

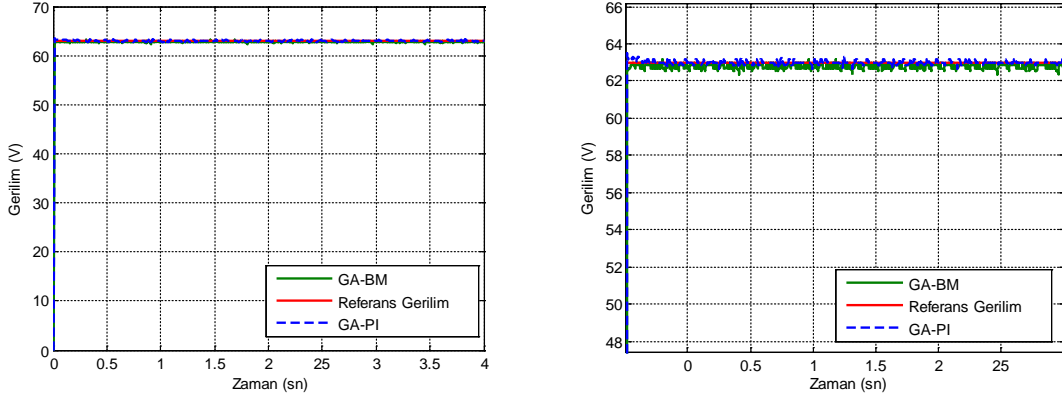
Yukarıdaki şekillerden görüleceği gibi PI denetleyicili sistem çıkış gerilimi, aşma ve referansa oturma süresi bakımından BMD'ye göre daha kötü sonuç vermiştir. Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de sistem için tasarlanan DA/AA evirici kontrolünün belirlenen parametrelerle yapılan benzetimsel çalışma sonuçları verilmiştir.



a) Evirici çıkışı (RMS değeri)

b) Evirici çıkışı

Şekil 5.11. DA/AA evirici çıkış gerilimi (PSO-PI ve PSO-BMD)



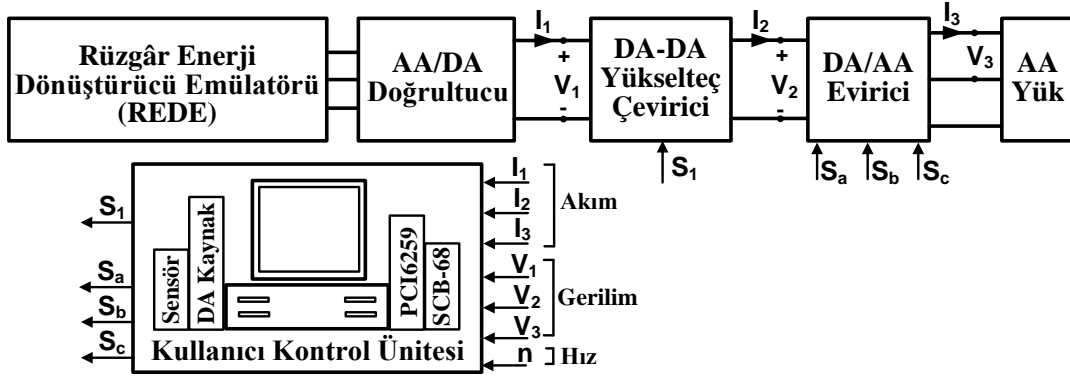
Şekil 5.12. DA/AA evirici çıkış gerilimi (GA-PI ve GA-BMD)

Şekil 5.11 ve 5.12’den görüleceği gibi belirlenen parametreler kullanıldığında, her iki denetleyici de DA/AA evirici çıkış gerilimini kararlı bir şekilde kontrol edebilmektedir. PI denetleyicide başlangıçta aşma, BM denetleyicide ise kabul edilebilir düzeyde referansa ulaşamama; yani sürekli durum hatası meydana gelmiştir. Evirici girişi 90V olup çıkışı Şekil 5.11(b)’deki gibi tepeden tepeye “+90,-90” aralığındadır. Bu gerilimin RMS veya etki değeri  $V_{RMS} = V_{max}/\sqrt{2}$  ifadesinden hesaplanabilir.

## 5.2. Deneysel Sonuçlar

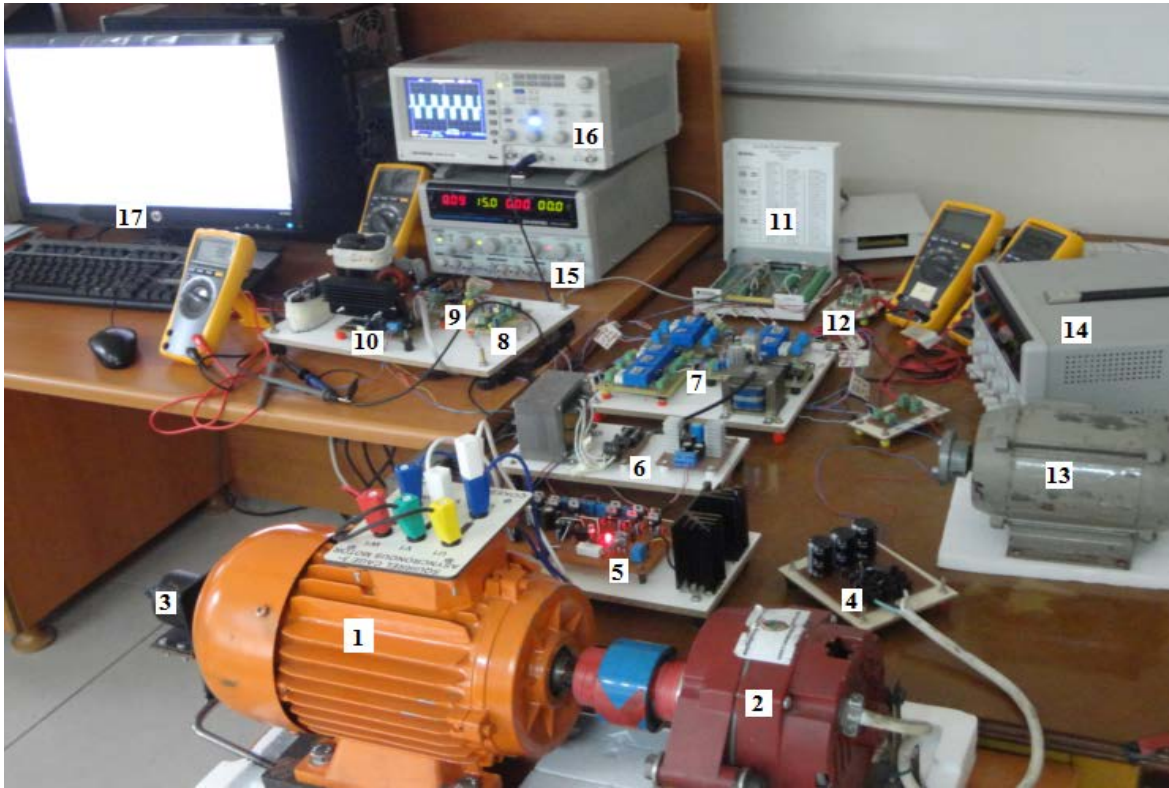
Rüzgâr enerji dönüşüm sisteminin deneysel düzeneğine ait şematik çizim Şekil 5.13’te gösterilmiştir. Sistemin denetimi ve çıkış değerlerinin gözlemlenmesi Matlab/Simulink programı kullanılarak oluşturulan gerçek zamanlı kullanıcı arayüzü aracılığıyla gerçekleştirilmektedir.

Kullanıcı arayüzü ile sistem arasındaki veri alış-verişi PCI6259 veri toplama kartı üzerinden sağlanmaktadır. Gerçek zamanlı yapılan uygulamada örnekleme frekansı 20 kHz olarak seçilmiştir. Deneysel çalışmada yük olarak 250W gücünde, 0,9/1.55A nominal akım değerlerine sahip üç fazlı asenkron motor ve ayrıca 5W-10KΩ değerinde direnç kullanılmıştır. Ancak sistem üzerinde endüktansın etkisini daha iyi gözlemleyebilmek için uygulamada RL yükü daha çok tercih edilmiştir.



Şekil 5.13. Deneysel düzeneğe ait şematik çizim

Laboratuar ortamında gerçekleştirilen deneysel düzeneğin genel görüntüsü Şekil 5.14'te görülmektedir. Ayrıca sistemde denetleyici olarak önerilen BMD'de 25 kuralı üçgen üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Tablo 5.3'te BMD için oluşturulan kural tablosu verilmiştir. Sistemin kontrolü için oluşturulan gerçek zamanlı kullanıcı arayüz blok diyagramı Şekil 5.15'te gösterilmiştir.

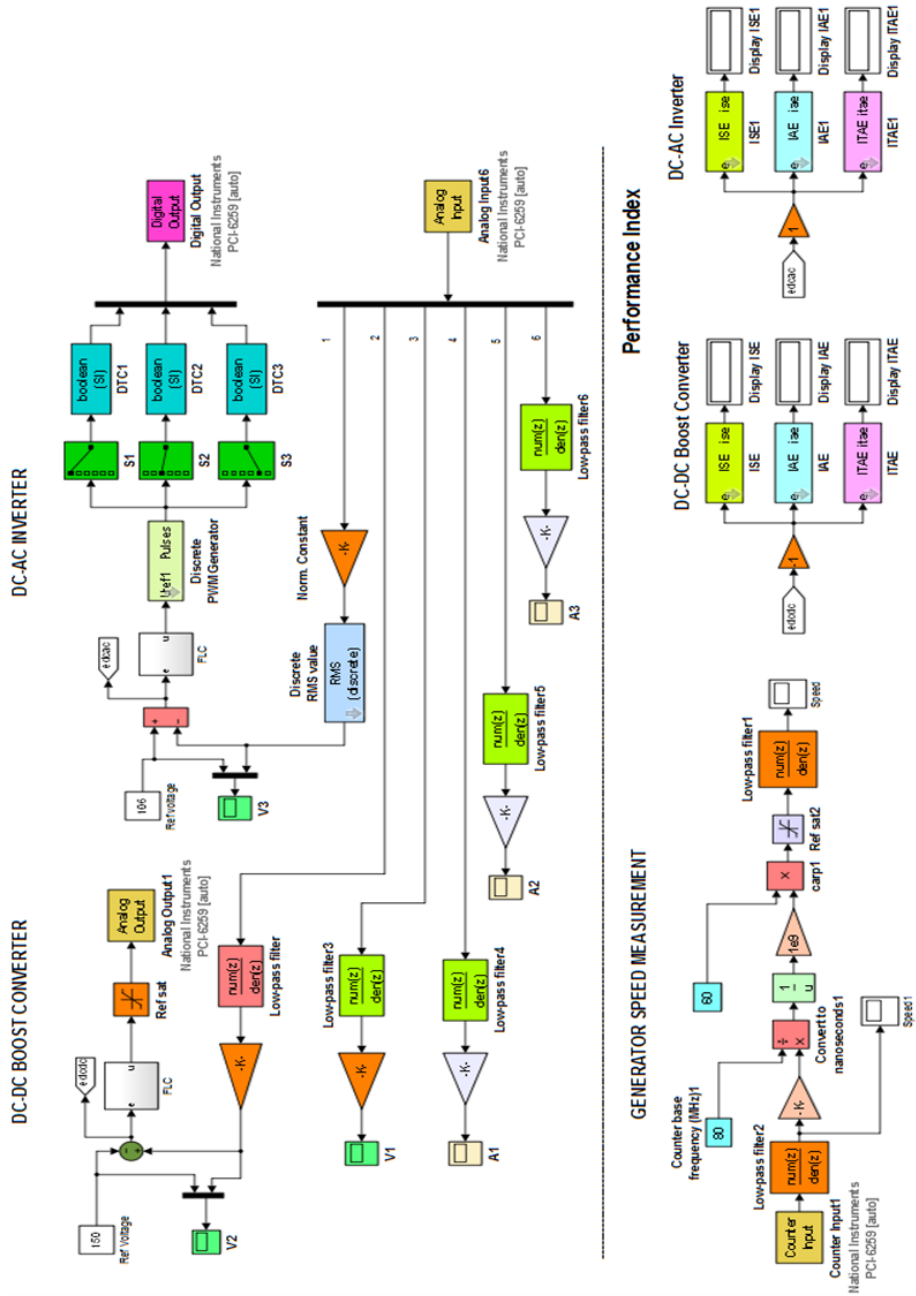


[1.Asenkron Motor; 2.SMSG; 3.Enkoder; 4.3 Faz Doğrultucu; 5-6.Simetrik Güç Kaynağı; 7.Akım-Gerilim Devreleri; 8.Yalıtım Devresi; 9.DA-DA Yükseltici; 10.DA/AA Evirici; 11.PCI 6259 Veri Toplama Kartı; 12.Gerilim Bölücü Devre; 13.Yük; 14-15.DA Güç Kaynağı; 16.Osiloskop; 17.Bilgisayar]

Şekil 5.14. Deneysel düzeneğin çalışır haldeki genel görüntüsü

Tablo 5.3. BMD kural tablosu

$\Delta u$		$e$				
		NB	NS	Z	PS	PB
$d e$	NB	NB	NB	NS	NS	Z
	NS	NB	NS	NS	Z	PS
	Z	NS	NS	Z	PS	PS
	PS	NS	Z	PS	PS	PB
	PB	Z	PS	PS	PB	PB

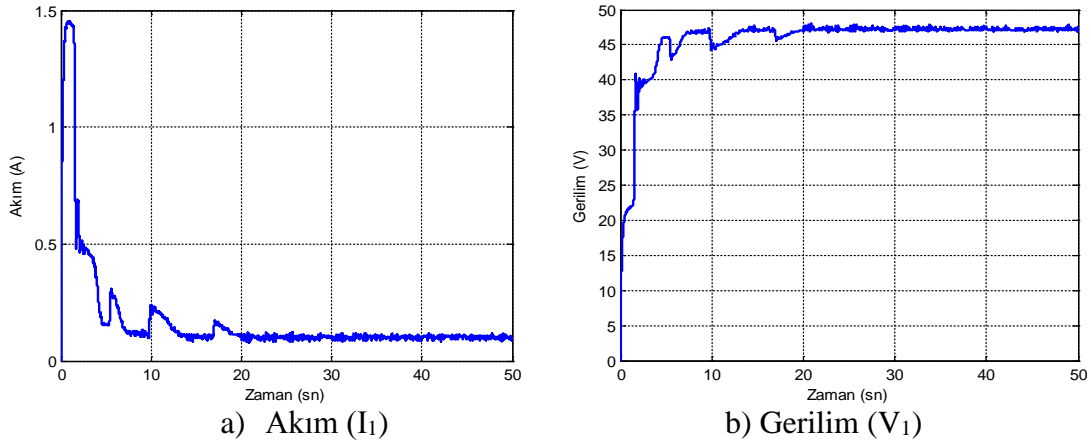


Şekil 5.15. Gerçek zamanlı kullanıcı arayüz blok diyagramı

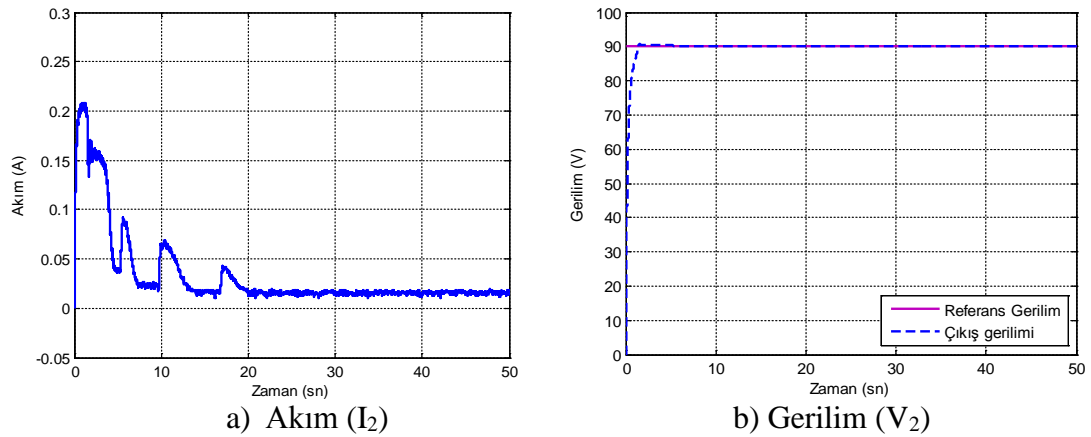


### 5.2.1. PI Denetimli Sistem

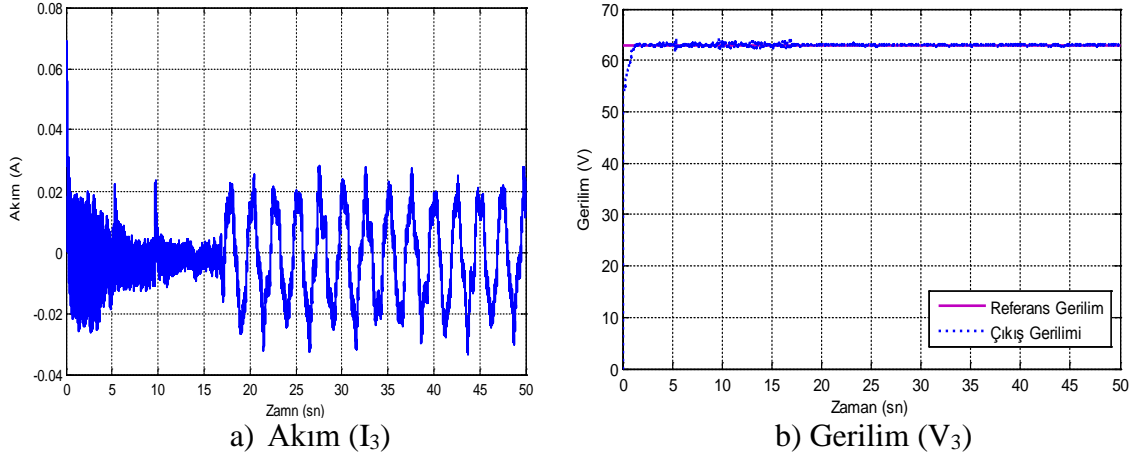
GA ve PSO algoritmaları kullanılarak yapılan benzetim çalışması sonucunda Tablo 5.1’de gösterilen PI denetleyici parametreleri ( $K_P$  ve  $K_I$ ) ayrı ayrı olarak elde edilmiştir. Bu belirlenen denetleyici parametre değerleri, gerçek zamanlı kullanıcı arayüzünde gerekli yerlere yazılarak farklı çalışma koşulları için sistemin çıkış değerleri gözlemlenmiştir. Ayrıca her yapılan deneysel çalışma sonunda denetleyici başarımını ortaya koymak için literatürde yaygın olarak kullanılan performans indekslerine (ISE, IAE ve ITAE) göre denetleyici hatası karşılaştırılması yapılmıştır. Sabit generatör hız koşulu altında; genetik algoritma (GA) yöntemi yardımıyla parametreleri belirlenen PI denetleyici ve RL yükü kullanılarak yapılan deneysel çalışma neticesinde elde edilen akım, gerilim ve hıza ilişkin sonuçlar Şekil 5.16-5.19’da gösterilmiştir.



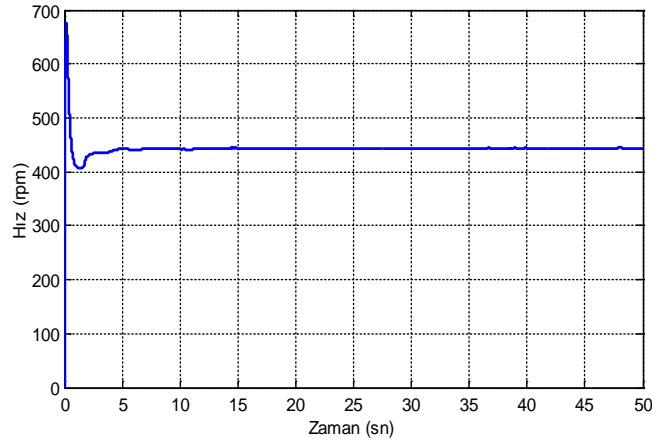
Şekil 5.16. DA-DA çevirici giriş akımı ve gerilimi (GA-PI, n: sabit)



Şekil 5.17. DA-DA çevirici çıkış akımı ve gerilimi (GA-PI, n: sabit)

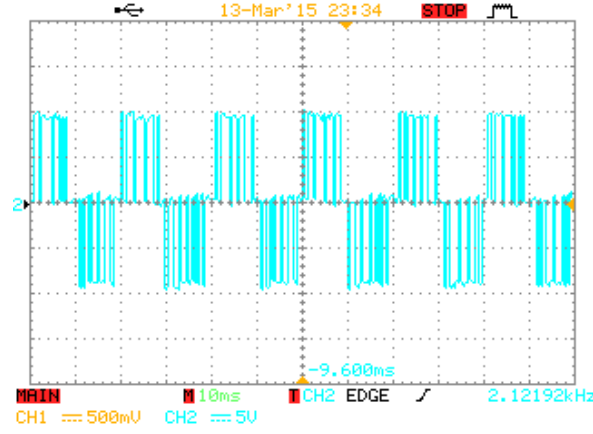


Şekil 5.18. DA/AA evirici çıkış akımı ve gerilimi (GA-PI, n: sabit)



Şekil 5.19. Generatör hızı (GA-PI, n: sabit)

Şekillerden görüleceği üzere, GA yöntemi ile parametreleri belirlenen PI denetleyici, sistem için tasarlanan devrelerin kontrolünü belirtilen referanslar için sağlamıştır. Şekil 5.18(a)'da gözlemlendiği üzere, evirici çıkış akımı yaklaşık 16-17sn sonra sürekli değerine erişmektedir. Bunun sebebi, sistemde yük olarak kullanılan 3 fazlı asenkron motora, sistem için tasarlanan evirici üzerinden frekansla yol verilmesidir. Yani başlangıçta yük olarak kullanılan motor düşük frekansta çalıştırılıp (20 Hz) daha sonra kademeli şekilde frekans 50 Hz'e çıkarılmıştır. Bu çalışma sonucunda yük uçlarındaki gerilimin osiloskop görüntüsü Şekil 5.20'de görülmektedir. Denetleyici ile ilgili performans indeks sonuçları Tablo 5.4'te verilmiştir.

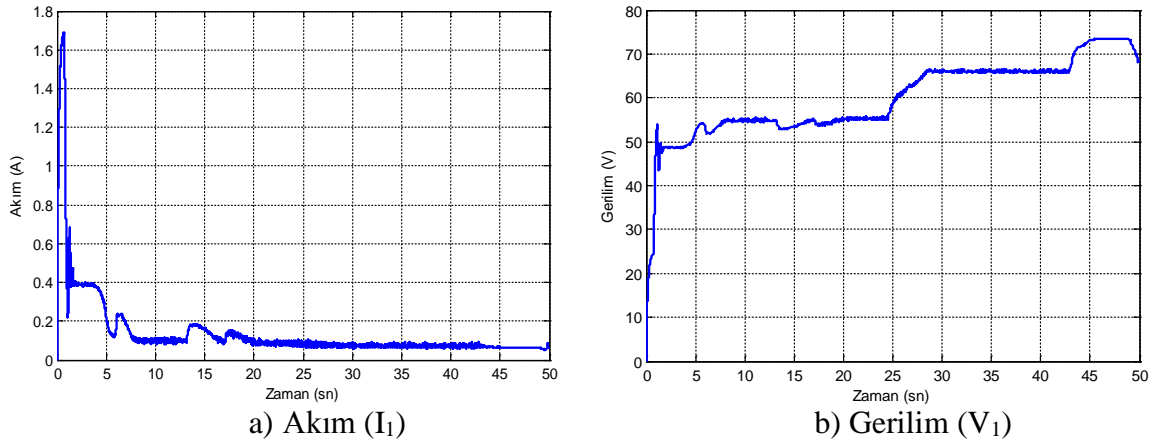


Şekil 5.20. Yük faz-faz gerilimi osiloskop görüntüsü (GA-PI, n: sabit)

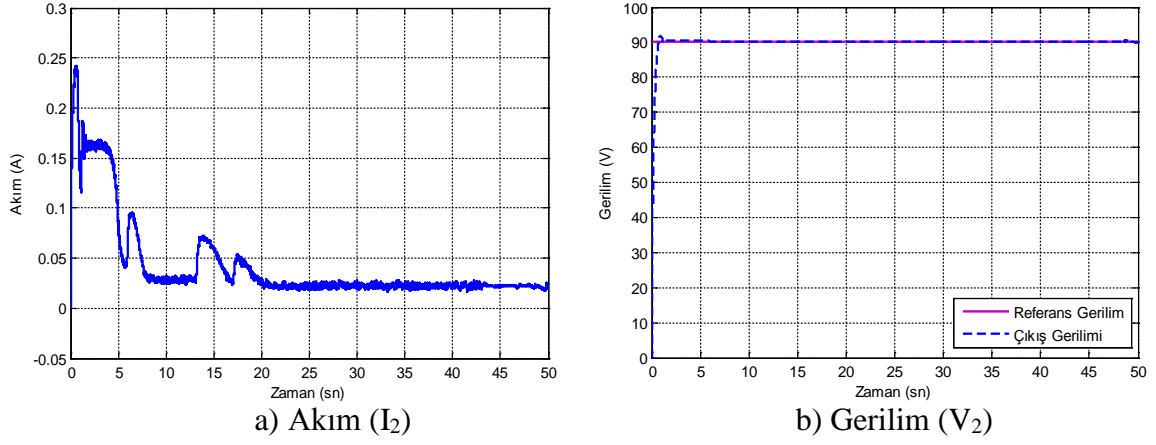
Tablo 5.4. Denetleyici performans indeks değerleri (GA-PI, n: sabit)

DA-DA Yükseltici			DA/AA Evirici		
ISE	IAE	ITAE	ISE	IAE	ITAE
902.8	26.06	30.37	426	16.11	117.5

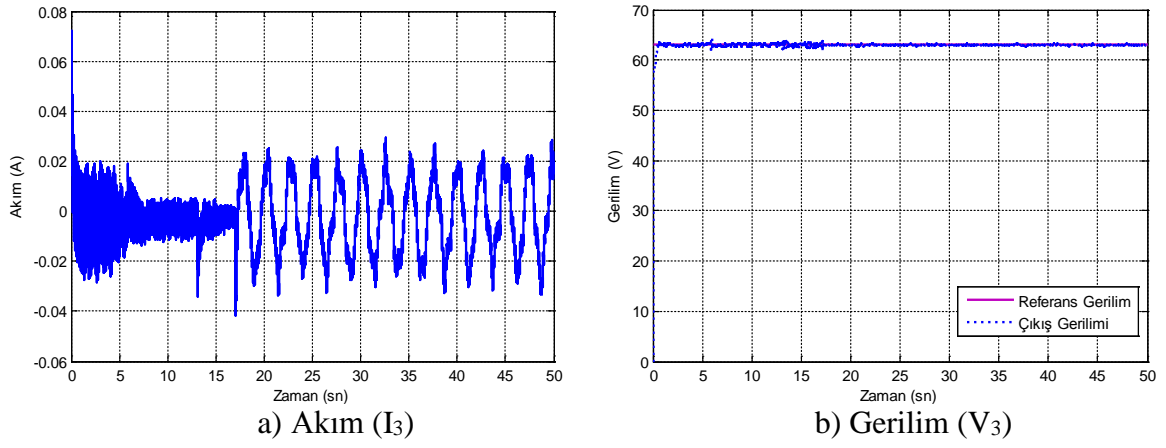
Değişken generatör hız koşulu altında; genetik algoritma (GA) yöntemi yardımıyla parametreleri belirlenen PI denetleyici ve RL yükü kullanılarak yapılan deneysel çalışma neticesinde elde edilen akım, gerilim ve hıza ilişkin sonuçlar Şekil 5.21-5.24'te gösterilmiştir. Denetleyici ile ilgili performans indeks sonuçları Tablo 5.5'te verilmiştir.



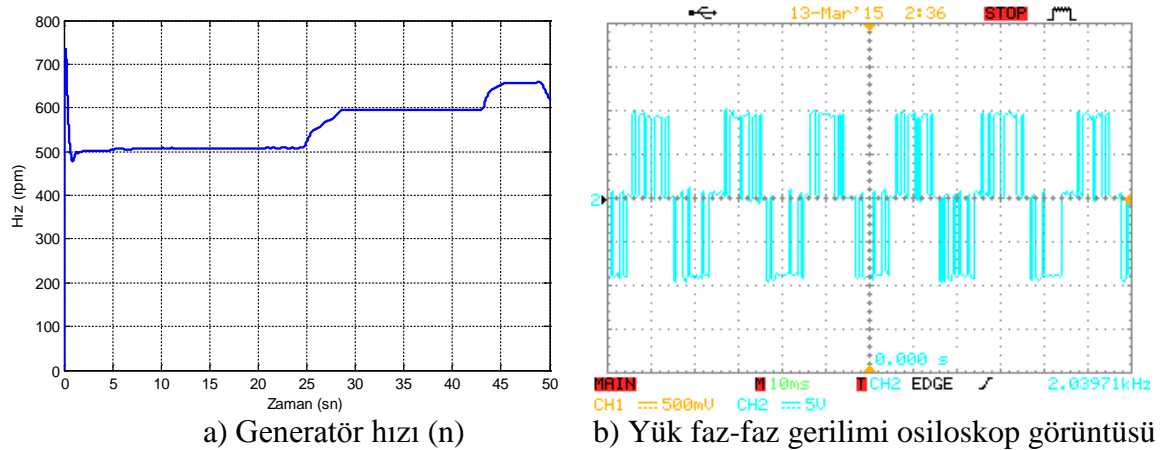
Şekil 5.21. DA-DA çevirici giriş akımı ve gerilimi (GA-PI, n: değişken)



Şekil 5.22. DA-DA çevirici çıkış akımı ve gerilimi (GA-PI, n: değişken)



Şekil 5.23. DA/AA evirici çıkış akımı ve gerilimi (GA-PI, n: değişken)

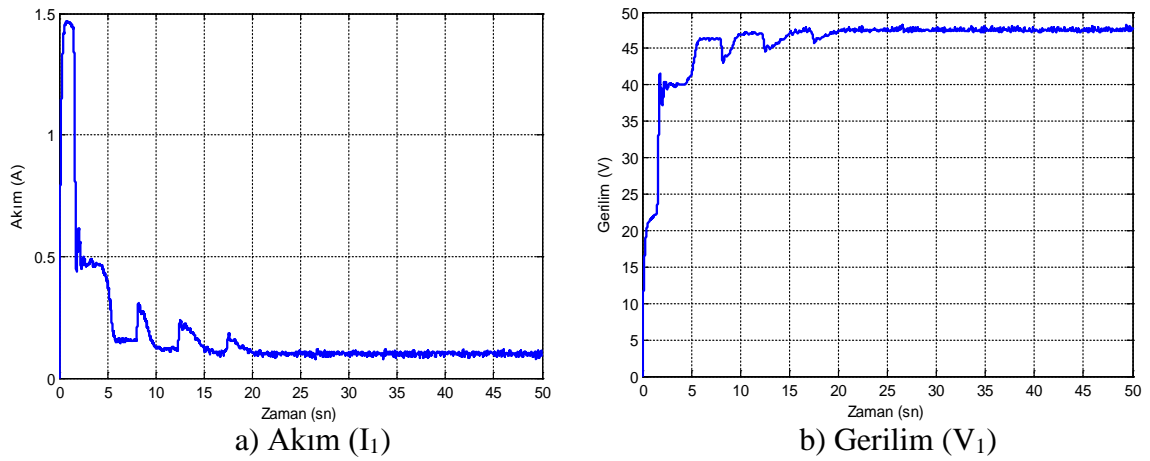


Şekil 5.24. Generatör hızı ve çıkış gerilimi (GA-PI, n: değişken)

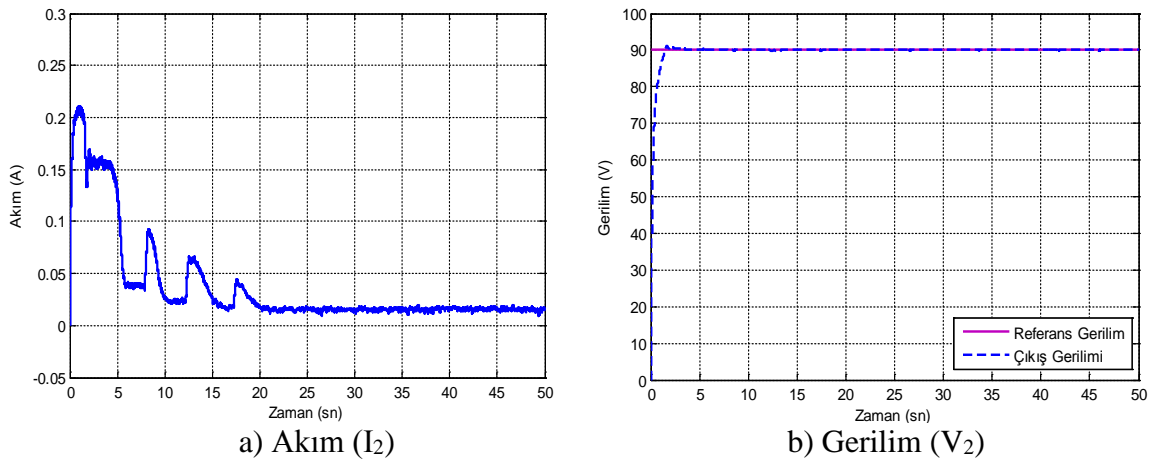
Tablo 5.5. Denetleyici performans indeks değerleri (GA-PI, n: değişken)

DA-DA Yükseltici			DA/AA Evirici		
ISE	IAE	ITAE	ISE	IAE	ITAE
759.1	22.03	85.95	401.8	12.25	108.8

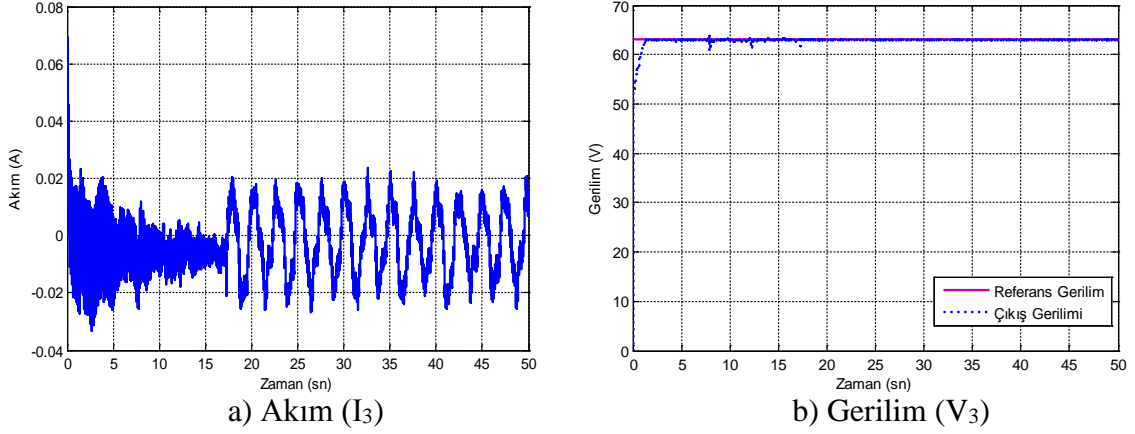
Sabit generatör hız koşulu altında; PSO yöntemi yardımıyla parametreleri belirlenen PI denetleyici ve RL yükü kullanılarak yapılan deneysel çalışma neticesinde elde edilen akım, gerilim ve hıza ilişkin sonuçlar Şekil 5.25-5.28'de gösterilmiştir. Denetleyici ile ilgili performans indeks sonuçları Tablo 5.6'da verilmiştir.



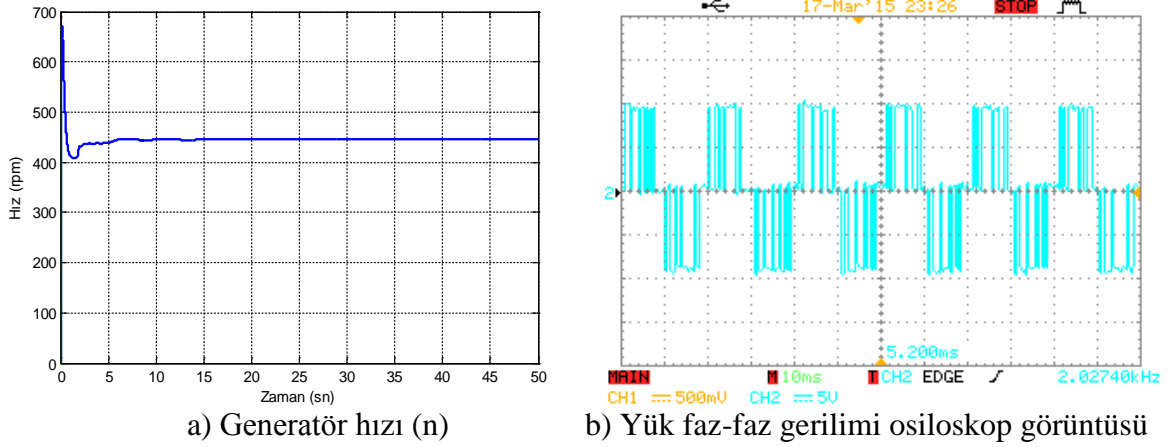
Şekil 5.25. DA-DA çevirici giriş akımı ve gerilimi (PSO-PI, n: sabit)



Şekil 5.26. DA-DA çevirici çıkış akımı ve gerilimi (PSO-PI, n: sabit)



Şekil 5.27. DA/AA evirici çıkış akımı ve gerilimi (PSO-PI, n: sabit)



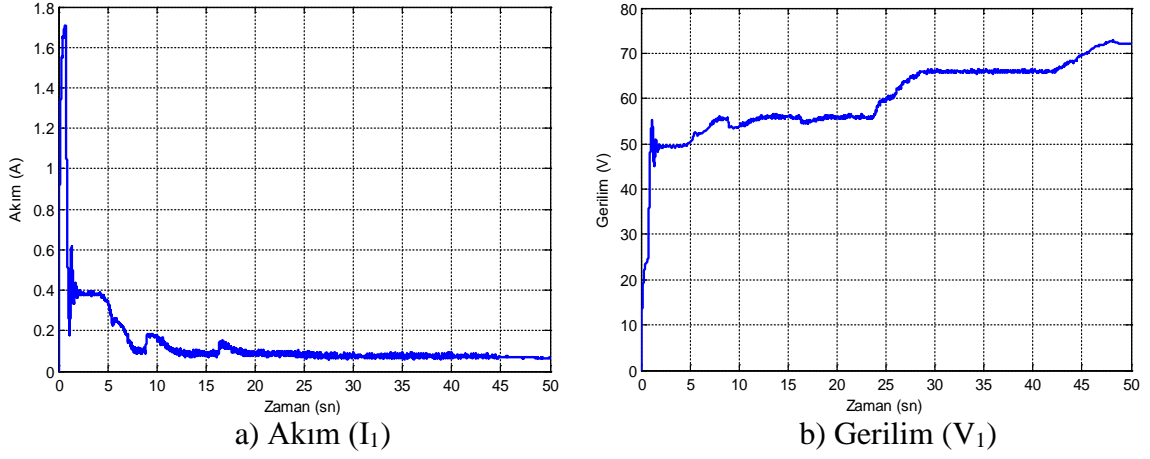
Şekil 5.28. Generatör hızı ve çıkış gerilimi (PSO-PI, n: sabit)

Tablo 5.6. Denetleyici performans indeks değerleri (PSO-PI, n: sabit)

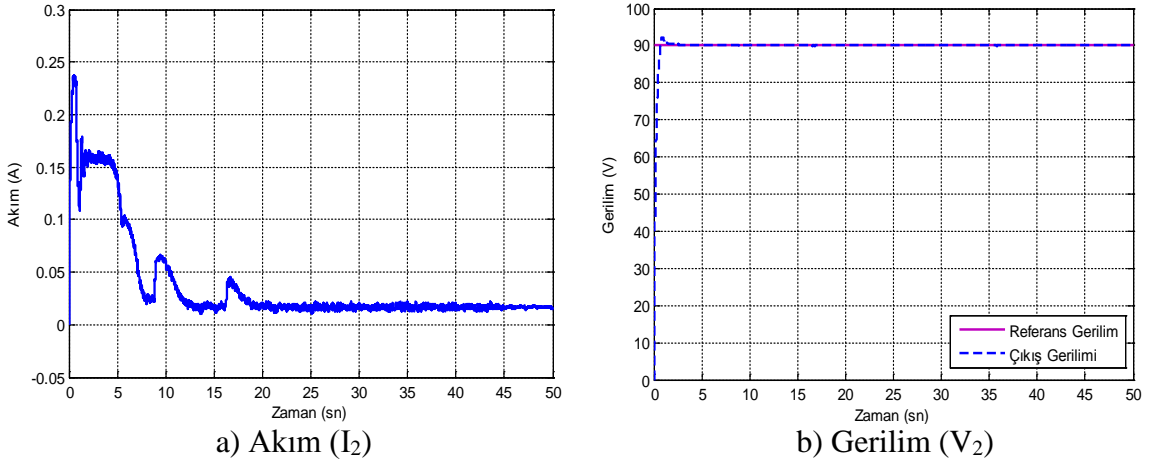
DA-DA Yükseltici			DA/AA Evirici		
ISE	IAE	ITAE	ISE	IAE	ITAE
931.4	26.66	29.4	430.4	13.64	49.97

PSO ile parametreleri optimize edilmiş PI denetleyici ile yapılan deneysel çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde, istenilen referans değerler için sistem kontrolünün sağlandığı görülmektedir.

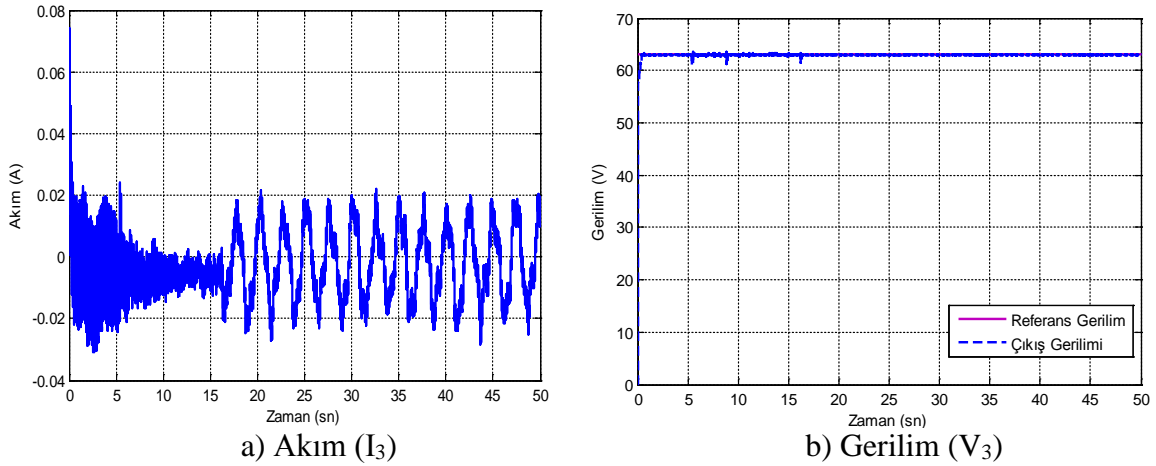
Değişken generatör hız koşulu altında; PSO yöntemi yardımıyla parametreleri belirlenen PI denetleyici ve RL yükü kullanılarak yapılan deneysel çalışma neticesinde elde edilen akım, gerilim ve hıza ilişkin sonuçlar Şekil 5.29-5.32'de gösterilmiştir. Denetleyici ile ilgili performans indeks sonuçları Tablo 5.7'de verilmiştir.



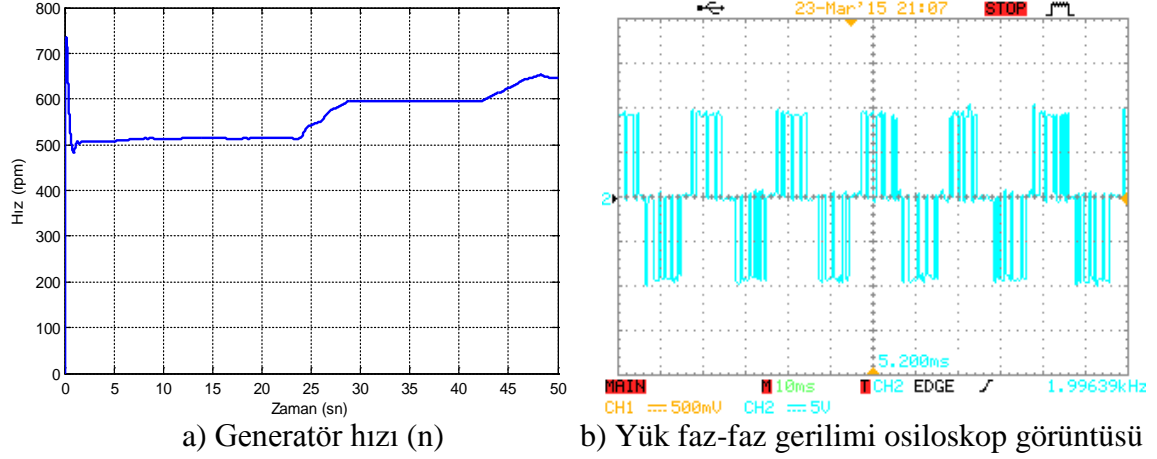
Şekil 5.29. DA-DA çevirici giriş akımı ve gerilimi (PSO-PI, n: değişken)



Şekil 5.30. DA-DA çevirici çıkış akımı ve gerilimi (PSO-PI, n: değişken)



Şekil 5.31. DA/AA evirici çıkış akımı ve gerilimi (PSO-PI, n: değişken)

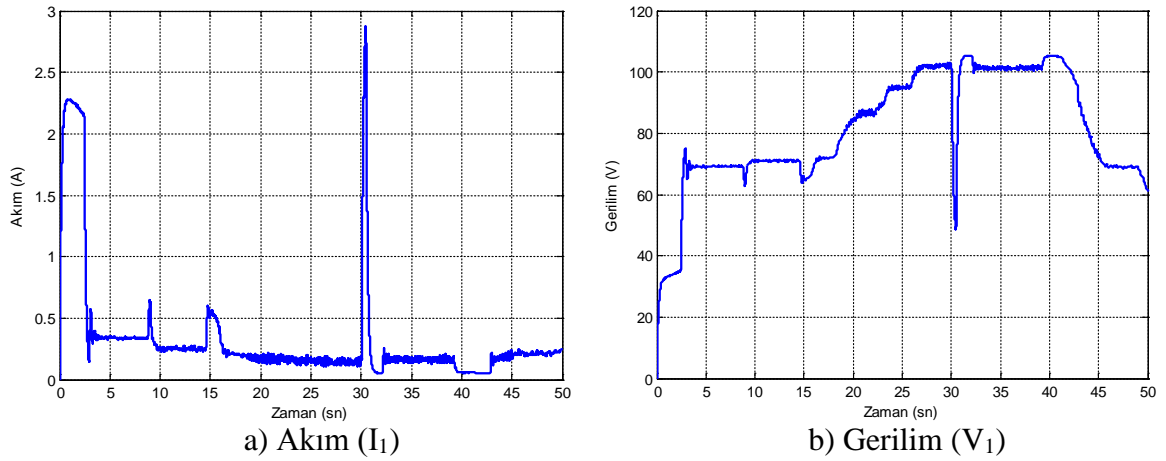


Şekil 5.32. Generatör hızı ve çıkış gerilimi (PSO-PI, n: değişken)

Tablo 5.7. Denetleyici performans indeks değerleri (PSO-PI, n: değişken)

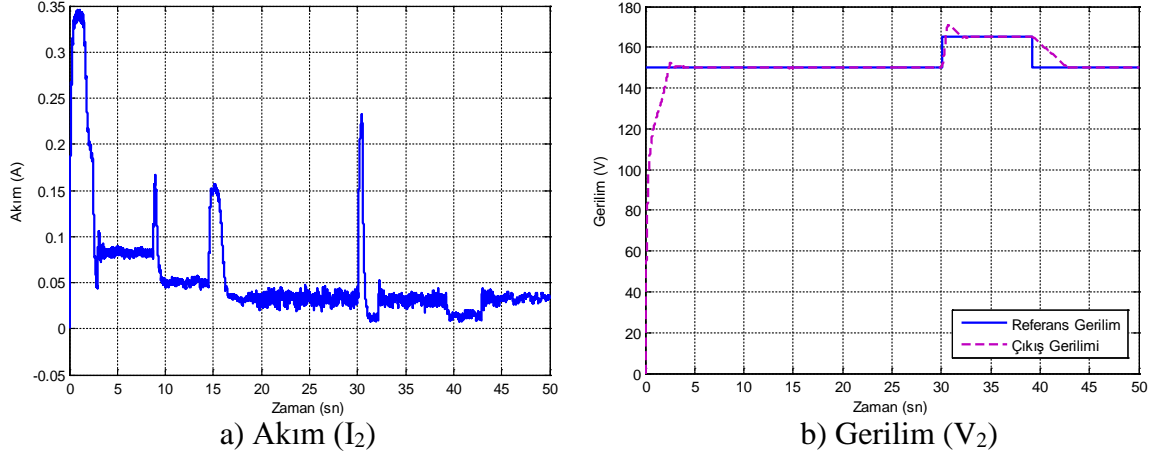
DA-DA Yükseltici			DA/AA Evirici		
ISE	IAE	ITAE	ISE	IAE	ITAE
755.1	19.31	38.12	401.2	9.592	47.09

PSO-PI denetleyici ile değişken hız ve farklı referans durumlarına ilişkin deneysel sonuçlar aşağıda verilmiştir.

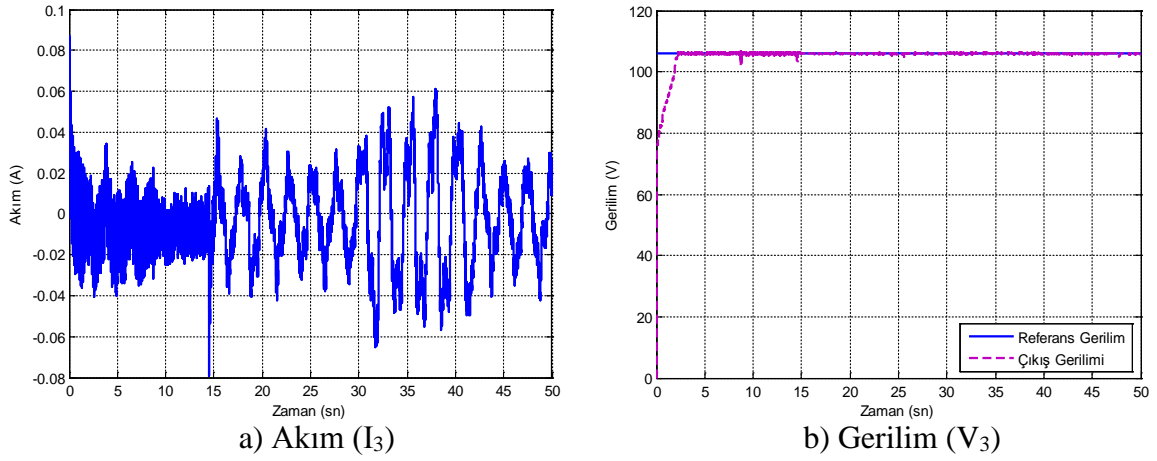


Şekil 5.33. DA-DA çevirici giriş akımı ve gerilimi (PSO-PI, n: değişken,  $V_{ref}$ : değişken)

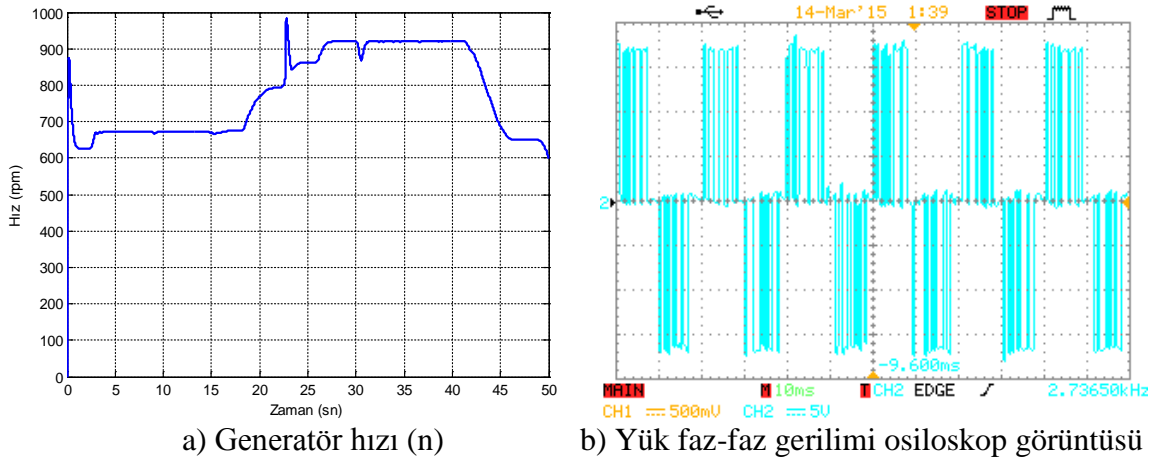




Şekil 5.34. DA-DA çevirici çıkış akımı ve gerilimi (PSO-PI, n: değişken,  $V_{ref}$ : değişken)



Şekil 5.35. DA/AA evirici çıkış akımı ve gerilimi (PSO-PI, n: değişken,  $V_{ref}$ : değişken)



Şekil 5.36. Generatör hızı ve çıkış gerilimi (PSO-PI, n: değişken,  $V_{ref}$ : değişken)

Tablo 5.8. Denetleyici performans indeks değerleri  
(PSO-PI, n: değişken, Vref: değişken)

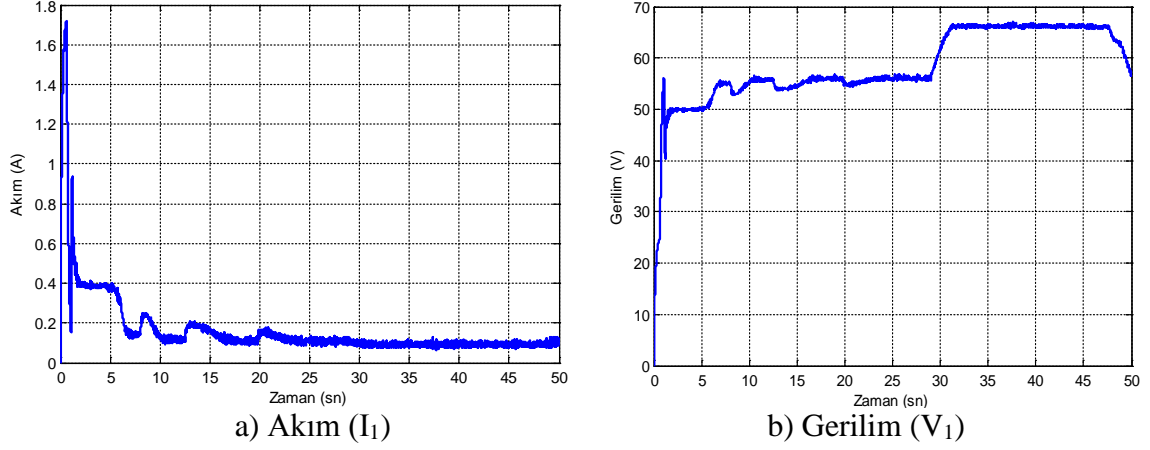
DA-DA Yükseltici			DA/AA Evirici		
ISE	IAE	ITAE	ISE	IAE	ITAE
4422	114.1	1495	1732	46.06	121.6

PI denetleyicisi kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar incelendiğinde, her iki optimizasyon yöntemiyle belirlenen parametrelerle sistem denetiminin gerçekleştirildiği görülmüştür. Ayrıca PI denetleyicide PSO ve GA için aşma meydana geldiği, PSO'daki aşmanın GA'ya nispeten daha az olduğu, aynı çalışma koşulları için performans indeksleri bakımından PSO ve GA yöntemlerinin, yaklaşık aynı değerleri verdiği gözlemlenmiştir.

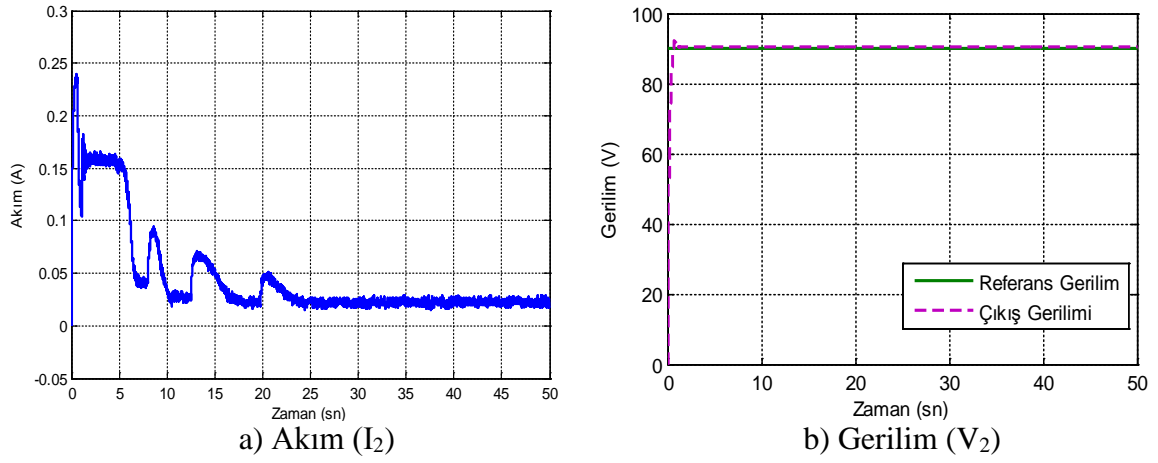
### 5.2.2. Bulanık Mantık Denetimli Sistem

GA ve PSO yöntemleri ayrı ayrı kullanılarak BMD parametreleri ( $K_{de}$ ,  $K_e$ ,  $K_{du}$ ) belirlenmiş ve Tablo 5.2'de verilmişti. Bu belirlenen denetleyici parametreleri ile deneysel düzenek ayrı ayrı çalıştırılıp sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca her yapılan deneysel çalışma sonunda, denetleyici başarımını ortaya koymak için literatürde yaygın olarak kullanılan performans indekslerine (ISE, IAE ve ITAE) göre denetleyici hatası karşılaştırılması yapılmıştır.

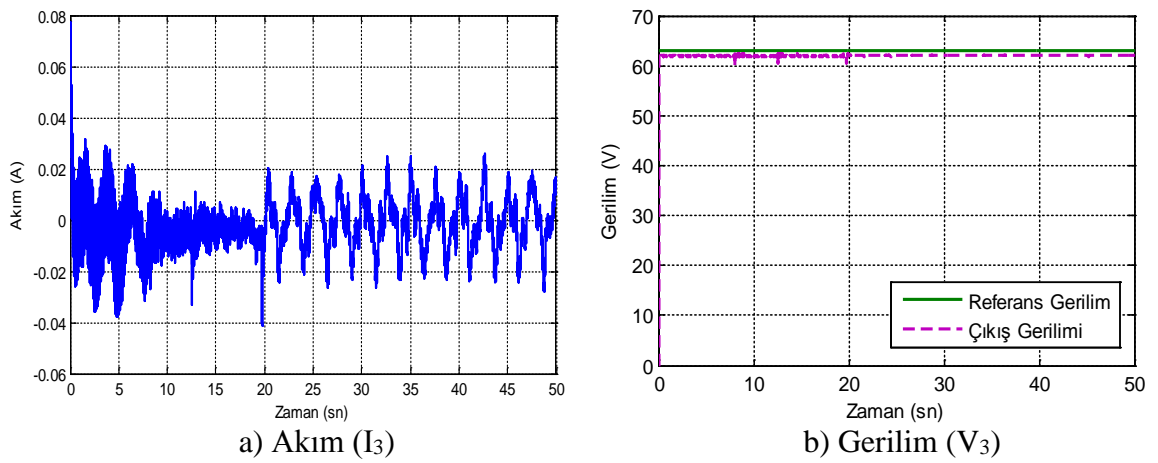
Değişken generatör hız koşulu altında; genetik algoritma (GA) yöntemi yardımıyla parametreleri belirlenen bulanık mantık denetleyici (BMD) ve RL yükü kullanılarak yapılan deneysel çalışma neticesinde elde edilen akım, gerilim ve hıza ilişkin sonuçlar Şekil 5.37-5.40'da gösterilmiştir. Denetleyici ile ilgili performans indeks sonuçları Tablo 5.9'da verilmiştir.



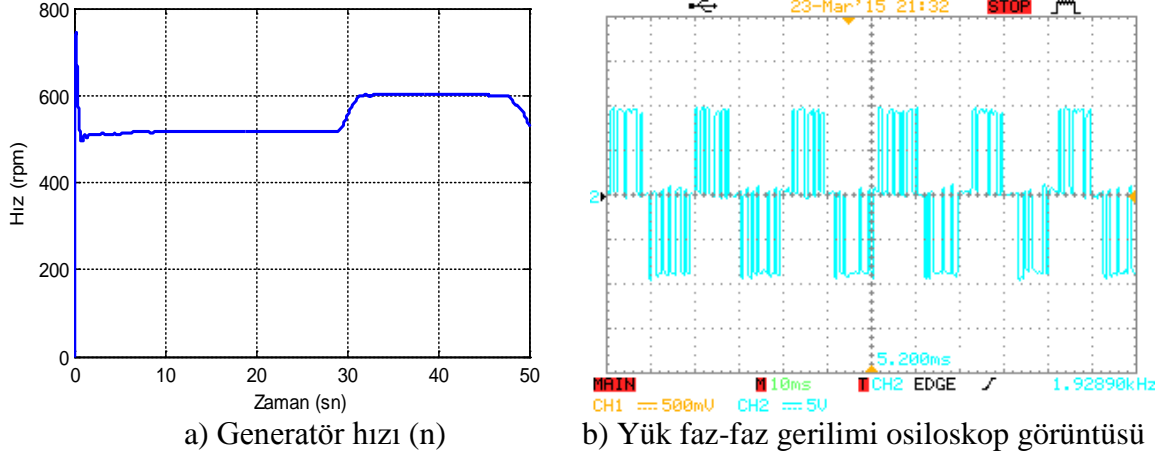
Şekil 5.37. DA-DA çevirici giriş akımı ve gerilimi (GA-BMD, n: değişken)



Şekil 5.38. DA-DA çevirici çıkış akımı ve gerilimi (GA-BMD, n: değişken)



Şekil 5.39. DA/AA evirici çıkış akımı ve gerilimi (GA-BMD, n: değişken)

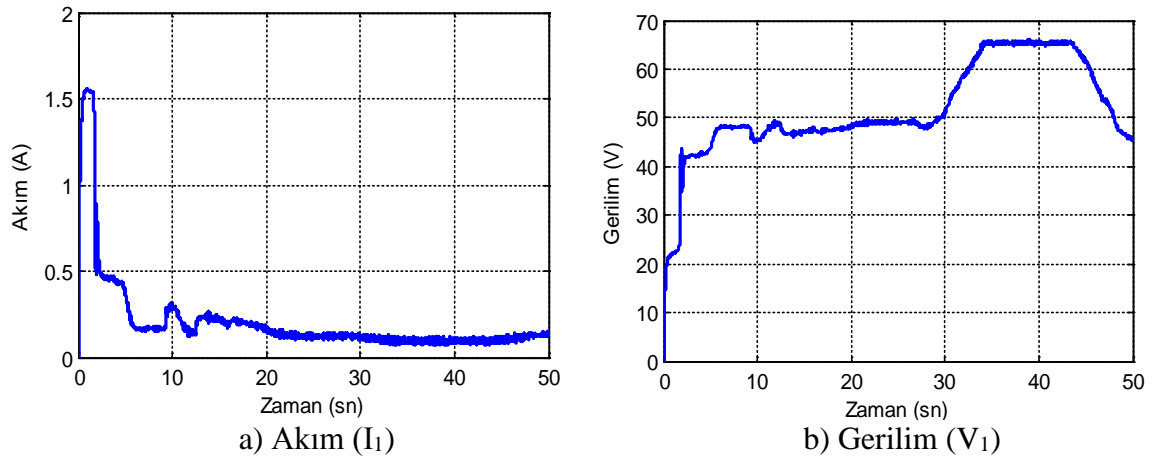


Şekil 5.40. Generatör hızı ve çıkış gerilimi (GA-BMD, n: değişken)

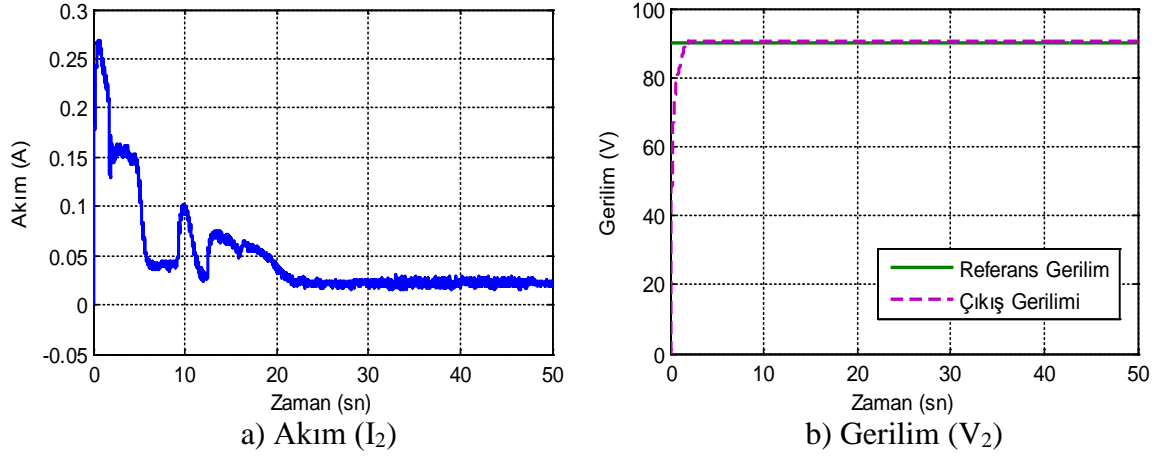
Tablo 5.9. Denetleyici performans indeks değerleri  
(GA-BMD, n: değişken)

DA-DA Yükseltici			DA/AA Evirici		
ISE	IAE	ITAE	ISE	IAE	ITAE
731.9	39.22	602.6	444.6	54.9	1212

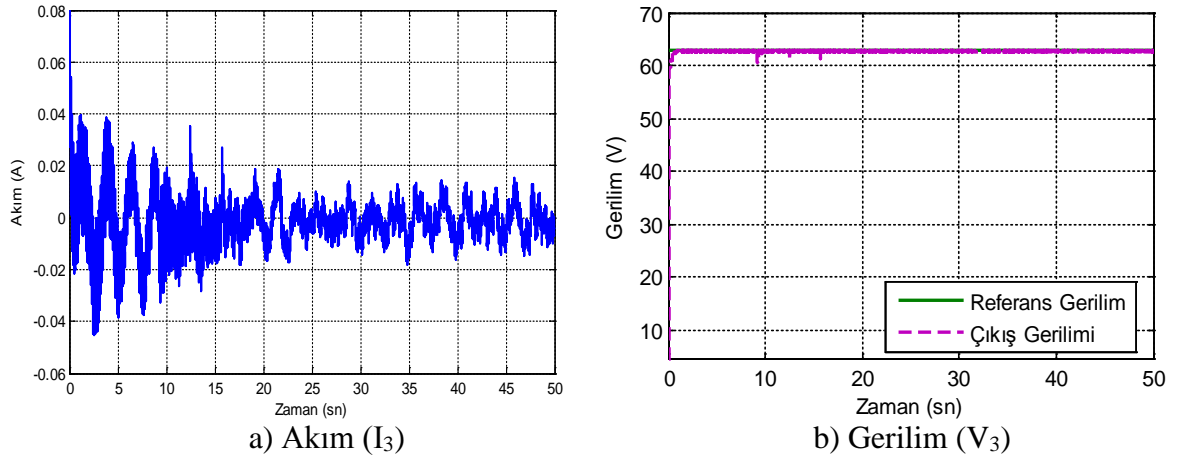
GA ile parametreleri optimize edilmiş BMD ile yapılan deneysel çalışma sonuçları incelendiğinde istenilen referanslar için sistemin kontrolü sağlanmıştır. Değişken generatör hız koşulu altında; RL yükü kullanılarak PSO ile parametreleri optimize edilmiş BMD ile yapılan deneysel çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar Şekil 5.41-5.44 sırasıyla aşağıda verilmiştir. Denetleyici ile ilgili performans indeks sonuçları Tablo 5.10'da verilmiştir.



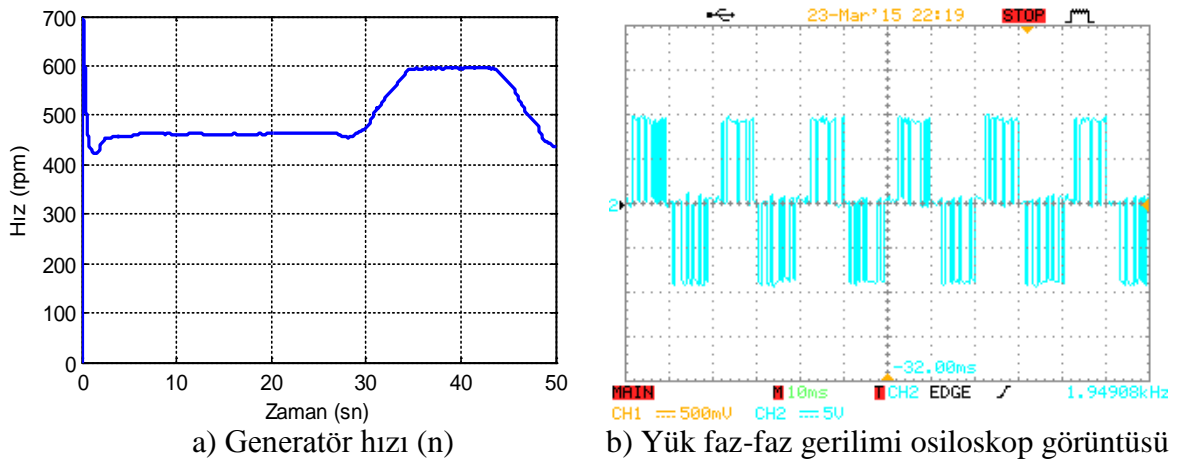
Şekil 5.41. DA-DA çevirici giriş akımı ve gerilimi (PSO-BMD, n: değişken)



Şekil 5.42. DA-DA çevirici çıkış akımı ve gerilimi (PSO-BMD, n: değişken)



Şekil 5.43. DA/AA evirici çıkış akımı ve gerilimi (PSO-BMD, n: değişken)

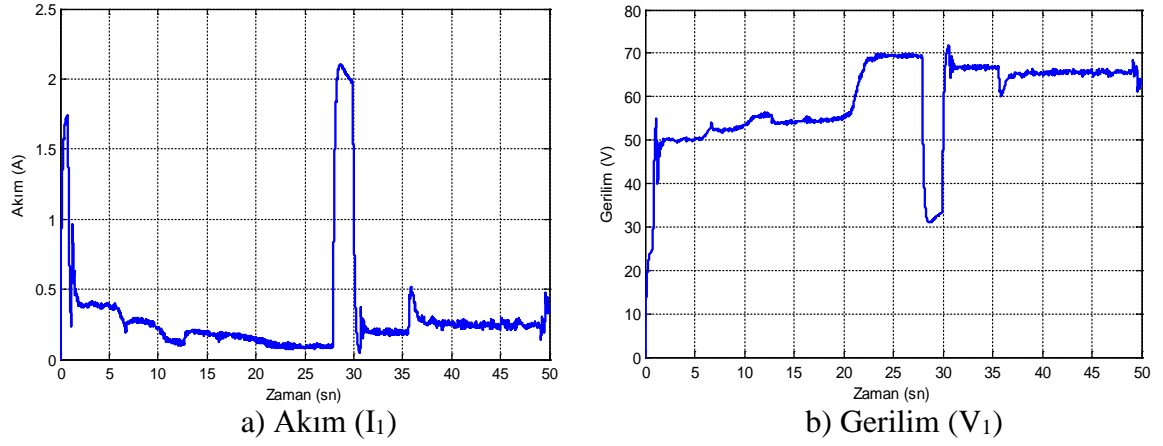


Şekil 5.44. Generatör hızı ve çıkış gerilimi (PSO-BMD, n: değişken)

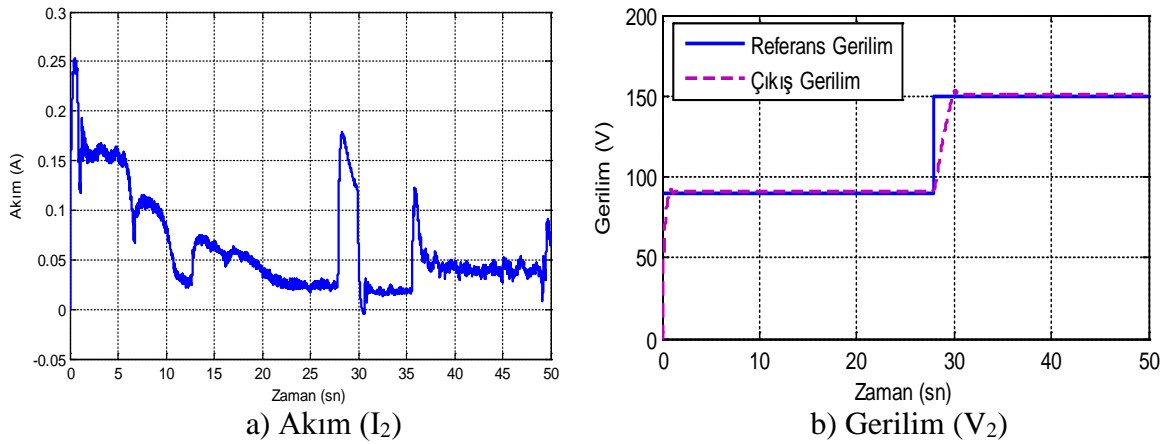
Tablo 5.10. Denetleyici performans indeks değerleri  
(PSO-BMD, n: değişken)

DA-DA Yükseltici			DA/AA Evirici		
ISE	IAE	ITAE	ISE	IAE	ITAE
981.4	47.02	549.3	406.2	24.39	428.4

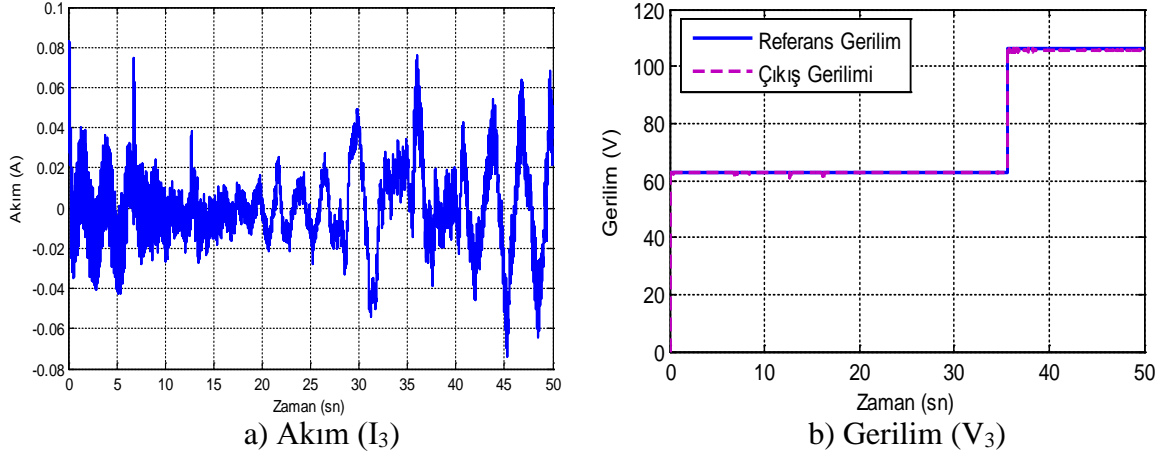
PSO-BMD ile değişken hız ve farklı referans durumlarına ilişkin deneysel sonuçlar Şekil 5.45-5.48'de gösterilmiştir. Denetleyici ile ilgili performans indeks sonuçları Tablo 5.11'de verilmiştir.



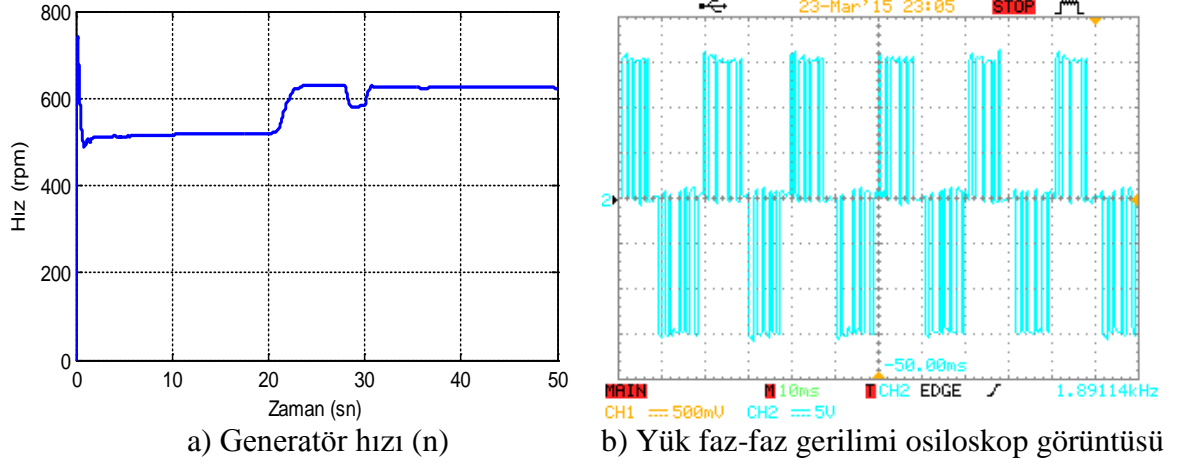
Şekil 5.45. DA-DA çevirici giriş akımı ve gerilimi (PSO-BMD, n: değişken,  $V_{ref}$ : değişken)



Şekil 5.46. DA-DA çevirici çıkış akımı ve gerilimi (PSO-BMD, n: değişken,  $V_{ref}$ : değişken)



Şekil 5.47. DA/AA evirici çıkış akımı ve gerilimi (PSO-BMD,  $n$ : değişken,  $V_{ref}$ : değişken)



Şekil 5.48. Generatör hızı ve çıkış gerilimi (PSO-BMD,  $n$ : değişken,  $V_{ref}$ : değişken)

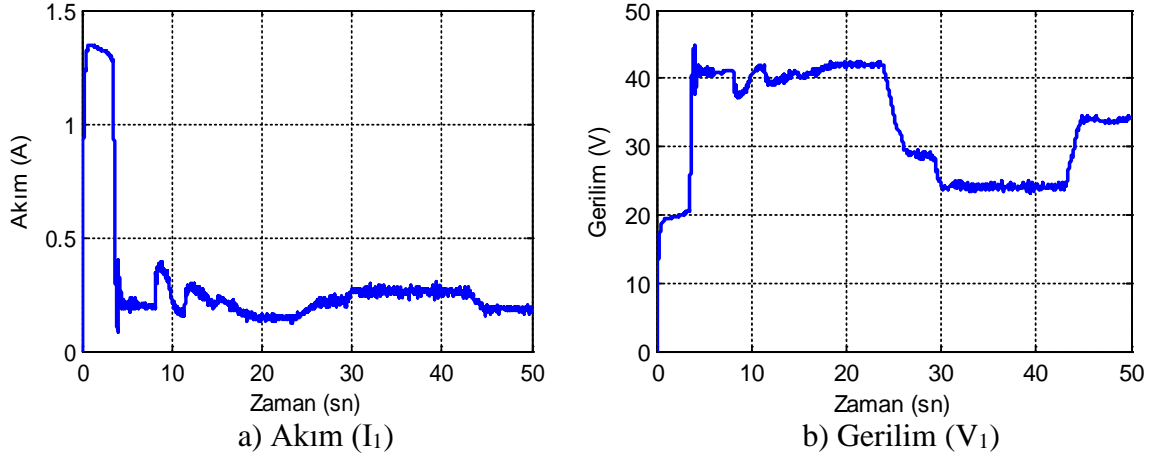
Tablo 5.11. Denetleyici performans indeks değerleri (PSO-BMD,  $n$ : değişken,  $V_{ref}$ : değişken)

DA-DA Yükseltici			DA/AA Evirici		
ISE	IAE	ITAE	ISE	IAE	ITAE
3045	103.7	2370	440.3	24.07	456.7

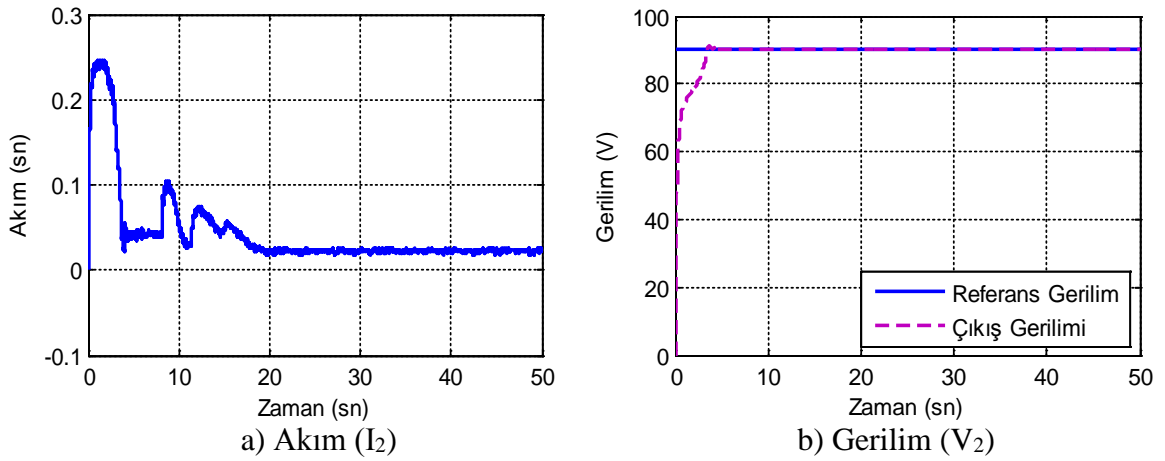
PSO ve GA optimizasyon yöntemleri ile parametreleri belirlenen BMD kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar incelendiğinde her iki optimizasyon yöntemiyle belirlenen parametrelerle sistem kontrolü kararlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. PSO-BMD'deki aşma ve sürekli durum hatasının, GA-BMD'ye göre daha az olduğu görülmüştür. BMD, PI denetleyiciye göre aşma, sürekli durum hatası ve referansa oturma

süresi bakımından daha iyi sonuçlar vermiştir. Ayrıca generatörün düşük hızlarda çalışması durumlarında BMD, PI denetleyiciye göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

RL yükü için generatörün düşük hızlarda çalıştırılması durumunda PSO-BMD ile yapılan deneysel çalışma sonuçlarına ilişkin akım, gerilim ve hız grafikleri, Şekil 5.49-5.51’de gösterilmiştir.

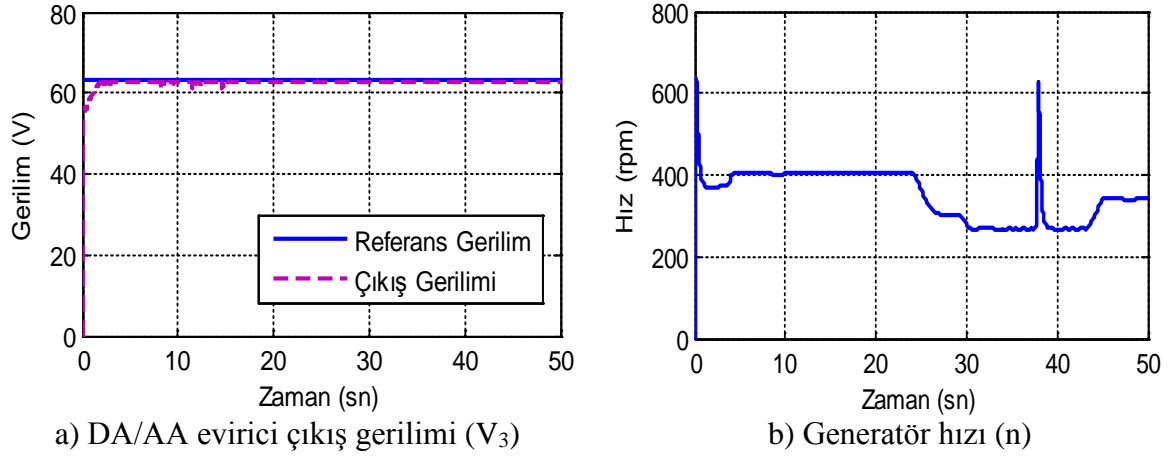


Şekil 5.49. DA-DA çevirici giriş akımı ve gerilimi (PSO-BMD, n: değişken düşük hız)



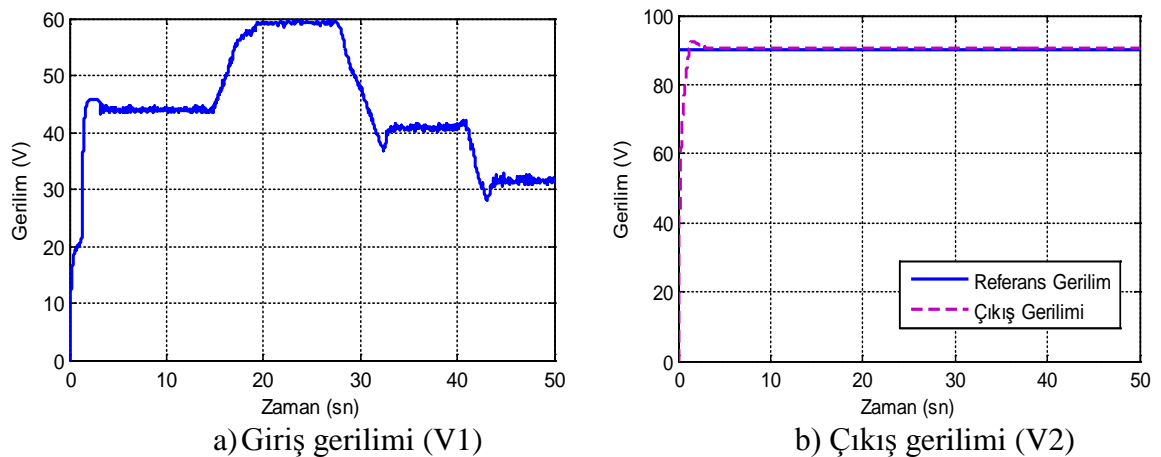
Şekil 5.50. DA-DA çevirici çıkış akımı ve gerilimi (PSO-BMD, n: değişken düşük hız)



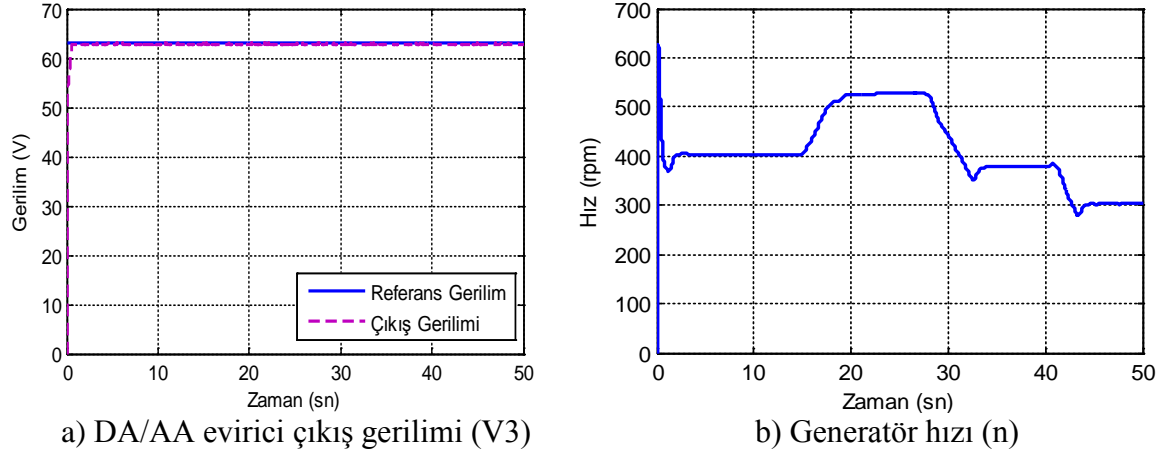


Şekil 5.51. DA/AA evirici çıkış gerilimi ve generatör hızı (PSO-BMD, n: değişken düşük hız)

Rüzgâr enerji dönüşüm sisteminin farklı yük koşullarındaki çalışma performansını RL türü yük kullanılması durumunda; denetleyicinin PSO-PI, GA-PI, PSO-BMD ve GA-BMD olması halleri için gözlemlendi. PSO yöntemi kullanılarak ayarlanan denetleyici performansının GA yöntemi uygulanarak düzenlenen denetleyiciye göre daha iyi olduğu belirlendi. Bu sebeple, sadece R yükü kullanılması durumu için PSO-PI ve PSO-BMD’li sistem dalga şekilleri ve denetleyici performansları gözlemlenecektir. Sistem güç elektroniği devreleri kontrolünde PSO-BMD kullanılması durumunda elde edilen dalga şekilleri, Şekil 5.52 ve 5.53’te gösterilmiştir. Denetleyiciler ile ilgili performans indeks sonuçları Tablo 5.12’de verilmiştir.



Şekil 5.52. DA-DA çevirici giriş ve çıkış gerilimleri (PSO-BMD, n: değişken, R yük)

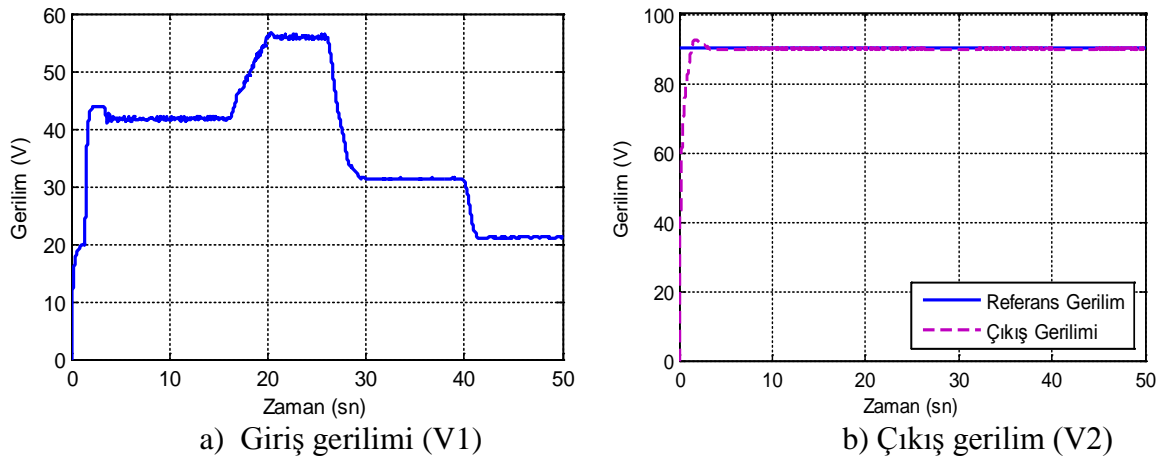


Şekil 5.53. DA/AA evirici çıkış gerilimi ve generatör hızı (PSO-BMD, n: değişken, R yük)

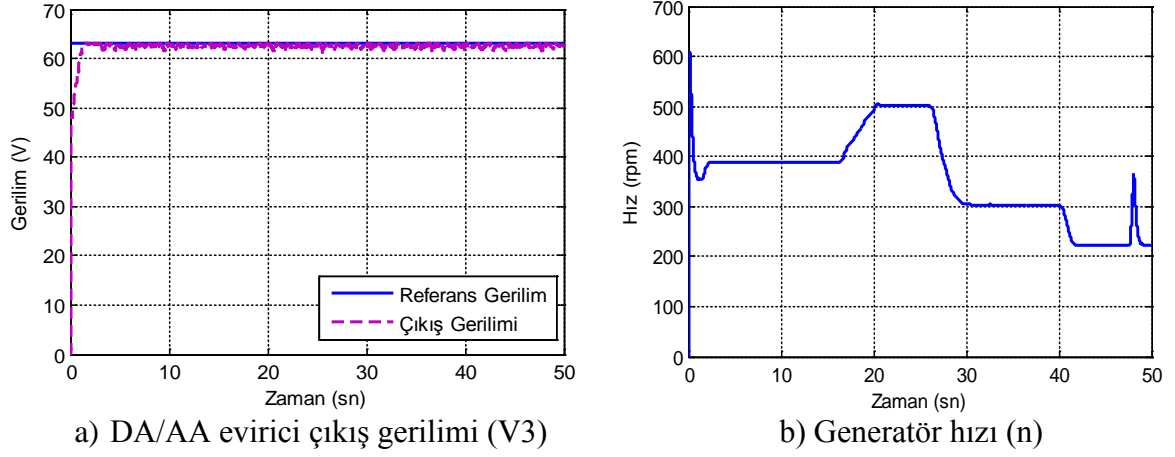
Tablo 5.12. Denetleyici performans indeks değerleri (PSO-BMD, n: değişken, R yük)

DA-DA Yükseltici			DA/AA Evirici		
ISE	IAE	ITAE	ISE	IAE	ITAE
1070	49.08	553.2	413.8	17.64	227.9

R yük durumu için PSO ile parametreleri optimize edilmiş PI denetleyici ile yapılan deneysel çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar Şekil 5.54 ve 5.55 sırasıyla aşağıda gösterilmiştir. Denetleyici ile ilgili performans indeks sonuçları Tablo 5.13'te verilmiştir.



Şekil 5.54. DA-DA çevirici giriş ve çıkış gerilimleri (PSO-PI, n: değişken, R yük)



Şekil 5.55. DA/AA evirici çıkış gerilimi ve generatör hızı (PSO-PI, n: değişken, R yük)

Tablo 5.13. Denetleyici performans indeks değerleri  
(PSO-PI, n: değişken, R yük)

DA-DA Yükseltici			DA/AA Evirici		
ISE	IAE	ITAE	ISE	IAE	ITAE
1081	30.72	38.18	501.9	37.47	598.7

R yükü için yapılan deneysel çalışma sonuçları incelendiğinde PSO-BMD'li sistemde aşma, referansa oturma süresi ve kalıcı durum hatası bakımından PSO-PI denetleyiciye göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 6.1. Sonuçlar

Bu tez kapsamında yapılan çalışmada, değişken hızlı rüzgâr enerji dönüşüm sistemleri için güç dönüştürücü ve denetleyiciler tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan güç dönüştürücülerinin, farklı rüzgâr hızı ve yük durumlarında, istenilen gerilim seviyesinin elde edilmesi amacıyla, önerilen denetleyiciler ile kontrolü sağlanmıştır. Denetleyiciden maksimum performans elde etmek için denetleyici parametre değerlerinin ayarlanmasında PSO ve GA yöntemlerinden faydalanılmıştır. Ayrıca sistem kontrolünde kullanılan denetleyiciler ve denetleyici parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan optimizasyon yöntemleri karşılaştırılmıştır.

Optimizasyon yöntemi olarak PSO algoritma yapısının GA yöntemine göre daha basit oluşu ve yazılım açısından kolaylık göstermesi, denetleyici parametrelerinin belirlenmesi için geçen sürenin de daha az olmasına olanak sağlamıştır. Benzetimsel ve deneysel çalışmalarda her iki denetleyici için de PSO algoritması GA yöntemine göre aşma, referansa oturma süresi ve sürekli durum hatası bakımından daha iyi sonuçlar vermiştir. Ayrıca PI denetleyici parametreleri, BMD parametrelerine göre daha kısa sürede belirlenmiştir.

PI denetleyicisi kullanılarak farklı yükler için yapılan benzetimsel ve deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlardan, her iki optimizasyon yöntemiyle belirlenen parametrelerle sistem kontrolünün verimli bir şekilde gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, PSO-PI ve GA-PI için aşma meydana geldiği, PSO-PI'daki aşmanın GA-PI'ya nispeten daha az olduğu, aynı çalışma koşulları için performans indeksleri bakımından PSO-PI ve GA-PI yöntemlerinin yaklaşık aynı değerlere ulaştığı belirlenmiştir.

Sistemin kontrolü için önerilen BMD'de, benzetimsel olarak üyelik fonksiyonlarının sonuca etkisi karşılaştırılmış ve üçgen üyelik fonksiyonlu BMD'nin en iyi sonucu verdiği görülmüştür. BMD'ye ait üçgen üyelik fonksiyonlarının en uygun sınır değerleri PSO ve GA kullanılarak belirlenmiştir. BMD kullanılarak farklı yükler için yapılan benzetimsel ve deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar incelendiğinde, her iki optimizasyon yöntemiyle belirlenen parametrelerle sistem kontrolünün kararlı bir şekilde

gerçekleştirildiği görülmüştür. PSO-BMD'deki aşma ve sürekli durum hatasının, GA-BMD'ye göre daha az olduğu gözlemlenmiştir.

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, BMD'nin farklı generatör hızı ve farklı yük durumları için PI denetleyiciye göre aşma, sürekli durum hatası ve referansa oturma süresi bakımından daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiş ve generatörün düşük hızlarda çalışması durumlarında da BMD'nin, PI denetleyiciye göre daha iyi sonuç sağladığı gözlemlenmiştir.

## 6.2. Öneriler

Güç elektroniği devrelerinin kontrolünde genellikle yüksek hızlı işlemcilerin kullanılması önerilir. Gerçekleştirilen uygulamada, tasarlanan güç dönüştürücülerinin kontrolünde ve deneysel düzenek ile bilgisayar kullanıcı arayüzü arasında veri alışverişi için veri toplama kartı kullanılmıştır. Sistemde kullanılan veri toplama kartı yerine daha yüksek örnekleme hızına sahip kontrol kartı kullanılarak sistem performansının iyileştirilmesine pozitif katkı sağlanabilir.

Gerçekleştirilen uygulamada kullanılan PI ve BMD denetleyiciler yerine kayan kip kontrol, kesir dereceli PI, adaptif BMD gibi yöntemler denenip elde edilecek sonuçlar karşılaştırılabilir. Sistemde denetleyici olarak kullanılan BMD kurallarının değişen generatör hız koşullarına göre adaptif hale getirilmesinin sistem performansına etkisi irdelenebilir. Bu çalışmada önerilen denetleyicilerin parametrelerini belirlemek amacıyla PSO ve GA optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemlerden farklı olarak karınca kolonisi veya karma yapıdaki algoritmaların kullanılması neticesinde denetleyici performansının artıp artmayacağı araştırılabilir.

## 7. KAYNAKLAR

1. Çetin, N.S., Başaran, K., Adnan Menderes Üniversitesi Yerleşkesinin Rüzgar Elektrik Potansiyelinin Belirlenmesi, VIII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, Aralık 2010, Bursa, Bildiriler Kitabı:167-174.
2. Başaran, K., Çetin, N. S. ve Çelik, H., Rüzgâr-Güneş Hibrit Güç Sistemi Tasarımı ve Uygulaması, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Mayıs 2011, Elazığ, Bildiriler Kitabı:114-119.
3. T. Ackermann, Wind Power in Power Systems, John Wiley and Sons, 2005.
4. F. D. Bianchi, H. De Battista and R. J. Mantz, Wind Turbine Control Systems, Springer, 2007.
5. IEA, World Energy Outlook 2014, Paris, 2014.
6. Dai, S., Ren, D., Chou, C., L., Finkelman, R., B., Seredin, V., V. ve Zhou, Y., Geochemistry of Trace Elements in Chinese Coals: A Review of Abundances, Genetic Types, Impacts on Human Health, and Industrial Utilization, International Journal of Coal Geology, 91 (2012) 3-21.
7. Sun, C., Lyu, N. ve Ouyang, X., Chinese Public Willingness to Pay to Avoid Having Nuclear Power Plants in the Neighborhood, Sustainability, 6 (2014) 7197-7223.
8. World Nuclear Association, Number of nuclear reactors operable and under construction [online], <http://www.world-nuclear.org/Nuclear-Basics/Global-number-of-nuclear-reactors/>, Available: 16.02.2015.
9. Min Fang, Research on Wind and Grid Power Intelligent Complementary System in Oilfield, World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference (WNWEC), 2010,1-4.
10. Özpınar, M. A., Yenilenebilir Enerji Santrallerinde Yapay Sinir Ağları Yöntemiyle Enerji Üretiminin Modellenmesi ve Planlanması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
11. Chen, W.-M., Kim, H. ve Yamaguchi H., Renewable Energy in Eastern Asia: Renewable Energy Policy Review and Comparative SWOT Analysis for Promoting Renewable Energy in Japan, South Korea, and Taiwan, Energy Policy, 74 (2014) 319-329.
12. REN21, Renewables 2014 Global Status Report, Paris, 2014.
13. WWEA, 2014 Half-year Report, Bonn, 2014.

14. Dent, C., M., *Renewable Energy in East Asia: Towards a New Developmentalism*, Routledge, New York, 2014.
15. IEA, *World Energy Outlook 2006*, Paris, 2006.
16. Pazheri, F., R., Othman, M., F. ve Malik, N., H., A Review on Global Renewable Electricity Scenario, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31 (2014) 835-845.
17. EPIA, *Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018*, Brussels, 2014.
18. IEA, *PVPS Report Snapshot of Global PV 1992-2013: Preliminary Trends Information from the IEA PVPS Programme*, St. Ursen, 2014.
19. Munteanu, I., Bratcu, A.I., Cutululis, N.A. and Ceanga, E., *Optimal Control of Wind Energy Systems: Towards A Global Approach*: Springer Verlag, 2008.
20. Çetin, N. S., Şebeke bağlantısız PM Generatörlü Rüzgar Türbinlerinin YSA ile Sistem Optimizasyonu, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2006.
21. Özerdem, B., Türkiye’de rüzgar enerjisi uygulamalarının gelişimi ve geleceği, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, Türkiye 9. Enerji Kongresi, Eylül 2003, İstanbul, Bildiriler Kitabı: 167-175.
22. GENI, *How is 100% Renewable Energy Possible for Turkey by 2020?*, California, 2011.
23. Kaygusuz, K., Wind Energy Status in Renewable Electrical Energy Production in Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 7 (2010) 2104-2112.
24. <http://www.invest.gov.tr/en-US/theagency/Pages/MessagefromthePresident.aspx>. 11 Ocak 2015.
25. <http://www.tureb.com.tr/tr/bilgi-bankasi/turkiye-res-durumu>. 11 Ocak 2015.
26. <http://www.tureb.com.tr/tr/duyurular/173--turkiye-ruzgar-santralleri-atlasi-2014-> Ocak. 5 Şubat 2015.
27. Akyazı, Ö., Akpınar, A. S., Dünyada ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisi, *Otomasyon Dergisi, Bilişim Yayıncılık*, 4, 262 (2014) 352-354.
28. UNDP, *Renewable Energy Snapshot: Turkey*, Ankara, 2014.
29. Ata, R., The Current Situation of Wind Energy in Turkey, *Journal of Energy*, 2013 (2013) 1-8.
30. EWEA, *Eastern Winds-Emerging European Wind Power Markets*, Brussels, 2013.

31. Iglesias, R. L., Arantegui, R. L. ve Alonso, M. A., Power Electronics Evolution in Wind Turbines-A Market-Based Analysis, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 9 (2011) 4982-4993.
32. Mathew, S., Wind Energy Fundamentals Resource Analysis and Economics springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
33. Pope, K., Dincer, I. and Naterer, G. F., Energy and exergy efficiency comparison of horizontal and vertical axis wind turbines, Renewable Energy, 35, 9 (2010) 2102-2113.
34. Molenaar, D., Cost-effective design and operation of variable speed wind turbines: closing the gap between the control engineering and the wind engineering community, DUP Science, 2003.
35. Johnson, K. E., Adaptive Torque Control of Variable Speed Wind Turbines, National Renewable Energy Lab, Golden, CO, NREL/TP-500-36265, 2004.
36. Bianchi, F., Battista, H. De and Mantz, R., Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain-scheduling Design (Advances in Industrial Control): Springer, 2006.
37. Hand, M. M., Johnson, K. E., Fingersh, L. J. and Wright, A. D., Advanced Control Design and Field Testing for Wind Turbines, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, NREL/CP-500-36118, 2004.
38. Laks, J., Pao, L. and Wright, A., Control of Wind Turbines: Past, Present, and Future, Proc. of American Control Conference, 2009, 2096-2103.
39. Thomsen, S., Poulsen, N., A Disturbance Decoupling Nonlinear Control Law for Variable Speed Wind Turbines, Proc. of the 15th Mediterranean Conference on Control and Automation, Greece , 2007.
40. Beltran, B., Ahmed-Ali, T. and Benbouzid, M., Sliding Mode Power Control of Variable Speed Wind Energy Conversion System, IEEE Transactions on Energy Conversion, 23, 2 (2008) 551-558.
41. Beltran, B., Ahmed-Ali, T. and Benbouzid, M., High-Order Sliding-Mode Control of Variable-Speed Wind Turbines, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 56, 9 (2009) 3314-3321.
42. Boukhezzar, B., Siguerdidjane, H., Nonlinear Control of Variable Speed Wind Turbines or Power Regulation, Proc. of the IEEE Conference on Control Applications, 2005, Canada, 28- 31.
43. Boukhezzar, B., Siguerdidjane, H., Nonlinear Control of Variable Speed Wind Turbines without wind speed measurement, 44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, 2005, Spain, 3456-3461.



44. Ang, K. H., Chong, G. and Li, Y., PID Control System Analysis, Design and Technology, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 13, 4 (2005) 559-576.
45. Da, Z., Zhengyun, R., Jian'an, F. and Lei, J., Computation of Stabilizing PI and PID Controllers by Using Kronecker Summation Method, Proceedings of the 27th Chinese Control Conference, July 2008, China, 72-75.
46. Hand, M., Variable-Speed Wind Turbine Controller Systematic Design Methodology: a Comparison of Nonlinear and Linear Model-Based Designs, National Renewable Energy Lab., Golden, CO, NREL/TP-500-25540, 1999.
47. Hansen, M., Hansen, A., Larsen, T. and Oye, S., Sorensen P., Fuglsang P., Control Design for a Pitch-regulated Variable-speed Wind Turbine Report# Riso-R-1500(EN), Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, 2005.
48. Sandquist, F., Muskulus, M. and Anaya-Lara, O., Gain Scheduled and Robust Control Above Rated Wind Speed for Wind turbines, Energy Procedia, 24, (2012) 186-193.
49. Rocha, R., Siqueira, L. and Filho, M., A Multivariable  $H_{\infty}$  Control for Wind Energy Conversion System, IEEE Conference on Control Applications, 1, (2003) 206-211.
50. Stol, K., Disturbance Tracking and Blade Load Control of Wind Turbines in Variable Speed Operation, National Renewable Energy Lab., Golden, CO, NREL/CP-500-33011, 2003.
51. Wright, A., Balas, M. and Fingersh, L., Testing State-Space Controls for the Controls Advanced Research Turbine," ASME Journal of Solar Energy Engineering, 128, 4 (2006) 506-515.
52. Parker, G., Johnson, C., Improved Speed Regulation and Mitigation of Drive-Train Torsion Fatigue in Flexible Wind Turbines, Using Disturbance Utilization Control: Part One, 41st Southeastern Symposium on System Theory, 2009, 171-176.
53. Parker, G., Johnson, C., Improved Speed Regulation and Mitigation of Drive-Train Torsion Fatigue in Flexible Wind Turbines, Using Disturbance Utilization Control: Part Two, 41st Southeastern Symposium on System Theory, 2009, 177-183.
54. Parker, G., Johnson, C., Improved Drive-Train and Blade Fatigue Mitigation in Flexible Wind Turbines Using Disturbance Utilization Control, 17th Mediterranean Conference on Control and Automation, 2009, 1283-1289.
55. Parker G., Johnson C., Use of Reduced-Order Observers for Feedback Control in Large Wind Turbines May Reduce Fatigue Damage from Excitement of Flexible Modes, 42nd Southeastern Symposium on System Theory, 2010, 85-89.

56. Takaai, H., Chida, H., Sakurai, K. and Isobe, T., Pitch Angle Control of Wind Turbine Generator Using Less Conservative Robust Control, 18th IEEE International Conference on Control Applications, 2009.
57. Mirzaei, M., Niemann, H. and Poulsen, N., DK -Iteration Robust Control Design of a Wind Turbine, IEEE International Conference on Control Applications, USA 2011, 1493-1498.
58. Geng, H., Yang , G., Output Power Control for Variable-Speed Variable-Pitch Wind Generation System, IEEE Trans. Energy Conversion, 25, 2 (2010) 494-503.
59. Garcia-Sanz, M., Quantitative Robust Control Engineering: Theory and Experimental Results on Wind Turbines, Plenary Session. 2nd International Conference on Renewable Energy and Power Quality, Barcelona, Spain 2004.
60. Bianchi, F., Mantz, R. and Christiansen, C., Control of Variable-Speed Wind Turbines by LPV Gain Scheduling, Wind Energy, 7, (2004) 1–8.
61. Lescher, F., Zhao, J. and Martinez, A., Multi-objective H<sub>2</sub>/H<sub>∞</sub> Control of a Pitch Regulated Wind Turbine for Mechanical Load Reduction, Proc. of the European Wind Energy Conference, Greece, 2006.
62. Bianchi, F., Battista, H. and Mantz, R., Wind Turbine Control Systems: Principles, Modeling and Gain-Scheduling Design, Springer-Verlag London, 2007.
63. Sloth, C., Esbensen, T. and Stoustrup, J., Robust and Fault-Tolerant Linear Parameter- Varying Control of Wind Turbines, Mechatronics, 21, 4 (2011) 645-659.
64. Adegas, F., Sloth, C. and Stoustrup, J., Structured Linear Parameter Varying Control of Wind Turbines, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, 303-337.
65. Soliman, M., Malik, O. and Wetswick, D., Multiple Model MIMO Predictive Control for Variable Speed Pitch Wind Turbines, American Control Conference, USA 2010, 2778-2784.
66. Sakamoto, R., Senjyu, T., Kinjo, T., Urasaki, N. and Funabashi, T., Output Power Leveling of Wind Turbine Generato by Pitch Angle Control Using Adaptive Control Method, International Conference on Power System Technology, Singapore 2004, 834-839.
67. Senjyu, T., Sakamoto, R., Urasaki, N., Funabashi, T., Fujita, H. and Sekine, H., Output Power Leveling of Wind Turbine Generator for All Operating Regions by Pitch Angle Control, IEEE Transactions on energy conversion, 21, 2 (2006) 467-475.
68. Johnson, K., Adaptive Torque Control of Variable Speed Wind Turbines, National Renewable Energy Lab., Golden, CO, NREL/TP-500-36265, 2004.
69. Johnson, K., Fingersh, L., Adaptive Pitch Control of Variable Speed Wind Turbines, Journal of Solar Energy Eng., 130, 3 (2008) 1-7.

70. Rezaei, V., Salmasi, F. R., Robust Adaptive Fault Tolerant Pitch Control of Wind Turbines, submitted to Wind Engineering Journal, 38, 6 (2014) 601-612.
71. Wang, N., LIDAR-assisted Feedforward and Feedback Control Design for Wind Turbine Tower Load Mitigation and Power Capture Enhancement, Ph.D. dissertation, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Colorado School of Mines, 2013.
72. Mikkelsen, T., Hansen, K., Angelou, N., Sjöholm, M., Harris, M., Hadley, P., Scullion, R. and Ellis, G., LIDAR Wind Speed Measurement From a Rotating Spinner, European Wind Energy Conference and Exhibition, Poland, 2010.
73. Scholbrock, A., Fleming, P., Fingersh, L., Wright, A., Schlipf, D. and Belen, F., Field Testing LIDAR Based Feed-Forward Controls on the NREL Controls Advanced Research Turbine, Proc. of AIAA Aerospace Sciences Meeting, USA, 2013.
74. Laks, J., Pao, L., Simley, E., Wright, A., Kelley, N. and Jonkman, B., Model Predictive Control Using Preview Measurement from LIDAR, Proc. of AIAA Aerospace Sciences Meeting, USA, 2011.
75. Simley, E., Pao, L., Reducing Lidar Wind Speed Measurement Error with Optimal Filtering, Proc. American Control Conference, 2013 621-627.
76. Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J. and Staroswiecki, M., Diagnosis and Fault-Tolerant Control, Springer-Verlag, 2006.
77. Jiang, J., Yu, X., Fault-tolerant control systems: A comparative study between active and passive approaches, Annual Reviews in Control, 36, 1 (2012) 60–72.
78. Chen, W., Ding, S. X., Haghani, A., Naik, A., Khan, A. Q. and Yin, S., Observer-Based FDI Schemes for Wind Turbine Benchmark, 18th IFAC World Congress Milano, Italy 2011, 7073-7078.
79. Ozdemir, A., Seiler, P. and Balas, G., Wind Turbine Fault Detection Using Counter-Based Residual Thresholding, 18th IFAC World Congress Milano, Italy 2011.
80. Uyar, M., Gençoğlu, M. T., Yıldırım, S., Değişken hızlı rüzgar türbinleri için generatör sistemleri, III. Enerji Kaynakları Sempozyumu (YEKSEM 2005), Ekim 2005, Mersin, Bildiriler Kitabı: 173-178.
81. Dursun, E., Binark, A. K., Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Generatörler, VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu (UTES'2008), Aralık 2008, İstanbul, Bildiriler Kitabı: 667-674.
82. Pena, R. S., Cardenas, R. J., Asher, G. M. and Clare, J. C., Vector controlled induction machines for stand-alone wind energy applications. Proc IEEE Ind Appl Annu Meet 2000, 3, 1409–1415.

83. Ramtharan, G, Ekanayake, J. B. and Jenkins, N., Frequency support from doubly fed induction generator wind turbines. IET Renew Power Generation, 1, 1 (2007) 3–9.
84. Hansen, L. H., Madsen, P. H., Blaabjerg, F., Christensen, H. C., Lindhard, U. And Eskildsen, K., Generators and power electronics technology for wind turbines, Proc. of IECON '01, 3, 1 (2001) 2000–2005.
85. Chen, Z., Guerrero, J. M. and Blaabjerg, F., A review of the state of the art of power electronics for wind turbines, IEEE Transactions on power electronics, 24, 8 (2009) 1859-1875.
86. Tafticht, T., Agbossou, K. and Cheriti, A., DC bus control of variable speed wind turbine using a buck-boost converter, In Power Engineering Society General Meeting, IEEE 2006, 1-5.
87. Tafticht, T., Agbossou, K., Cheriti, A. and Doumbia, M. L., Output power maximization of a permanent magnet synchronous generator based stand-alone wind turbine., In Industrial Electronics 2006 IEEE International Symposium on, 3, (2006) 2412-2416.
88. Arifujjaman, Md., Iqbal, M. T. and Quaicoe, J. E., Maximum power extraction from a small wind turbine emulator using a dc-dc converter controlled by a microcontroller, In Electrical and Computer Engineering (ICECE'06), International Conference on, IEEE 2006, 213-216.
89. Eftichios, K., Kalaitzakis, K., Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications, Industrial Electronics, IEEE Transactions on 53, 2 (2006) 486-494.
90. Shao, Z., Tseng, K.-J., M. Vilathgamuwa, D., Nguyen, T. D., and Wang, X.-Y., Design of a robust grid interface system for PMSG-based wind turbine generators., Industrial Electronics, IEEE Transactions on 58, 1 (2011) 316-328.
91. Dehghan, S. M., Mohamadian, M. and Varjani, A.Y., A New Variable-Speed Wind Energy Conversion System Using Permanent-Magnet Synchronous Generator and Z-Source Inverter, IEEE Trans. on, Energy Conversion, 24, 3 (2009) 714–724.
92. Quoc-Nam, T., Hong-Hee, L., Z-source inverter based grid connected for PMSG wind power system, in IFOST 2010, IEEE 2010,145–150.
93. Jie, L., Keqing, Q., Xiaoliang, S. and Guo-cheng, C., Study on control methods of direct-drive wind generation system based on three-phase Z-source inverter, in IPEMC'09, IEEE 2009, 644–649.
94. Chen, Z., Spooner, E., Current source thyristor inverter and its active compensation system., In: Proceedings of IEE generation, transmission and distribution, 150, 4 (2003) 447–454.

95. Jamal, A. B., Venkata D. and Andrew, M. K., A review of power converter topologies for wind generators, Renewable Energy, 32, 14 (2007) 2369–2385.
96. Chen, Z., Spooner, E., Wind turbine power converters: A comparative study. In: Proceedings of IEE seventh international conference on power electronics and variable speed drives, September 1998, 471–476.
97. Tan, K., Islam, S., Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors, IEEE Trans. On Energy Conversion, 19, 2 (2004) 392–399.
98. Chen, Z., Spooner, E., Grid power quality with variable speed wind turbines., IEEE Trans Energy Convers, 16, 2 (2001) 148–154.
99. Chen, Z., Spooner, E., Grid interface options for variable-speed permanent-magnet generators. In: Proceedings of IEE electric power applications, 145, 4 (1998) 273–283.
100. Geng, H., Yeng, G., Xu, D. and Wu, B., Unified power control for PMSG-based WECS operating under different grid conditions, IEEE Transactions on Energy Conversion, 26, 3 (2011) 822-830.
101. Baroudi, J. A., Venkata D. and Andrew M. K., A review of power converter topologies for wind generators., Renewable Energy 32, 14 (2007) 2369-2385.
102. Haque, M. E., Negnevitsky, M. and Muttaqi, K. M., A novel control strategy for a variable-speed wind turbine with a permanent-magnet synchronous generator, IEEE Trans. on, Industry Applications, 46,1 (2010) 331–339.
103. Yuan, X., Wang, F. and Boroyevich, DC-link voltage control of a full power converter for wind generator operating in weak-grid systems, IEEE Trans. Power Electron., 24, 9 (2009) 2178- 2192.
104. Nikkhajoei, H., Iravani, R., Dynamic Model and Control of AC-DC-AC Voltage-Sourced Converter System for Distributed Resources, IEEE Trans. Power Del., 20, 3 (2005) 2182-2192.
105. Orlando, N. A., Liserre, M., Monopoli, V. G., Mastromauro, R. A. and Dell'Aquila, A., Comparison of power converter topologies for permanent magnet small wind turbine system, Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2008.
106. Zeng, Q., Chang, L. and Shao, R., Fuzzy logic based maximum power point tracking strategy for PMSG variable-speed wind turbine generation systems, Proceedings of IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Fredericton, NB, May 2008, 405-410.

107. Valenciga, F., Puleston, P. F., High-order sliding control for a wind energy conversion system based on a permanent magnet synchronous generator, IEEE Transactions on Energy Conversion, 23, 3 (2008) 860-867.
108. Whei-Min, L., Chih-Ming, H., Ting-Chia, O. and Tai-Ming, C., Hybrid intelligent control of PMSG wind generation system using pitch angle control with RBFN, Energy Conversion and Management, 52, 2 (2011) 1244–1251.
109. Minh, H. Q., Frédéric, N., Najib, E. and Abdelaziz, H., Control of permanent magnet synchronous generator wind turbine for stand-alone system using fuzzy logic, EUSFLAT-LFA, 1, 1 (2011) 720-727.
110. Kendouli, F., Abed, K., Nabti, K. and Benalla, H., High Performance PWM Converter Control Based PMSG for Variable Speed Wind Turbine, International conference on Renewable energy, March 2012, Hammamet, 502-507.
111. Muyeen, S. M., Modelling and control strategies of fuzzy logic controlled inverter system for grid interconnected variable speed wind generators, IEEE Trans. on Energy Conversion, 7, 4 (2013) 817-824.
112. Colak, I., Bulbul, H. I., Sagioglu, S. and Sahin, M., Modeling a Permanent Magnet Synchronous Generator Used in Wind Turbine and the Realization of Voltage Control on the Model with Artificial Neural Networks, Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2012 International Conference on, Nov. 2012, Nagasaki, 1-6.
113. Ackermann, T., Wind Power in Power Systems, John Wily and Sons LTD, England, 2005.
114. Ateş, A. M., Otonom Rüzgar Türbinlerinde Sistem Karakteristiklerinin Belirlenmesi ve Optimizasyonu, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2012.
115. Barambones, O., Slinding Model Control Strategy for Wind Turbine Power Maximization, Energies, 5, 7 (2012) 2310-2330.
116. Mengi, O. Özdal, Yenilenebilir Enerji Sistemlerinde Süreklilik için Akıllı Bir Enerji Yönetim Sistemi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2011.
117. Mathew, S., Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis, and Economics , springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006, 76-88.
118. Pope, K., Dincer, I. and Naterer, G. F., Energy and exergy efficiency comparison of horizontal and vertical axis wind turbines, Renewable Energy, 35, 9 (2010) 2102-2113.
119. Mergen, A. F., Zorlu, S., Elektrik Makineleri II Asenkron Makineler, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2005.

120. Akyazı, Ö., Akpınar, A. S., Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Generatörler, 3e Electrotech Dergisi, Bilişim Yayıncılık, 4, 238 (2014) 224-230.
121. Patel, M., R., Wind and Solar Power Systems Design, Analysis and Operation, Taylor and Francis, 2006.
122. Bal, G., Doğru Akım Makinaları ve Sürücüleri, Seçkin Yayınevi, Ankara, 2001.
123. Heier, S., Wind Plant Development and State of the Art of Grid Connected Systems, The World Renewable Energy Congress IX and Exhibition, August 2006, Florence, Italy, 1-6.
124. Dursun, E., Binark, A. K., Generator Types in Wind Turbines, 7. Natioanal Clean Energy Symposium Istanbul, December 2008.
125. Khadraoui, M. R., Elleuch, M., Comparison between OptiSlip and Fixed Speed Wind Energy Conversion Systems, 5 th International Multi Conference on Systems, Signal and Devices, Amman, Jordan 2008.
126. Akyazı, Ö., Akpınar, A. S., Rüzgâr Türbinleri ve Aerodinamik Karakteristikleri, Otomasyon Dergisi, Bilişim Yayıncılık, 6, 264 (2014) 188-194.
127. Rahim, A. H. M. A., Ahsanul, A., M. and Kandlawala, M. F., Dynamic performance improvement of an isolated wind turbine induction generator, Computers and Electrical Engineering, 35, 4 (2009) 594-607.
128. Babu, B. C., Mohanty, K. B., Doubly-Fed Induction Generatör for Variable Speed Wind Energy Conversion Systems-Modeling & Simulation, International Journal of Computer and Electrical Engineering, 2, 1 (2010) 1793-8163.
129. Singh, M., Chandra, A., Power maximization and voltage sag/swell ride-through capability of PMSG based variable speed wind energy con-version system, in Proc. 34th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.(IECON 2008), Orlando 2008, 2206–2211.
130. Santoso, S., Le, H. T., Fundamental Time-domain Wind Turbine Models for Wind Power Studies., Renewable Energy 32, 14 (2007) 2436-2452.
131. Mayurappriyan, P. S., Jerome, J., Ramkumar, M. and Rajambal, K., Dynamic Modeling and Analysis of Wind Turbine Driven Doubly Fed Induction Generator, International Journal of Recent Trends in Engineering, 2, 5 (2009) 367-372.
132. Chinchilla, M., Arnaltes, S. and Burgos, J. C., Control of Permanent-Magnet Generators Applied to Variable-Speed Wind-Energy Systems Connected to the Grid, IEEE Transactions on Energy Conversion, 21, 1 (2006) 130-135.
133. Güzelbeyoğlu, N., Elektrik Makinaları I-II Teori-Çözümlü Problemler, Birsen yayınevi, İstanbul 2005.

134. Çolak, İ., Senkron Makinalar, 2. Baskı, Seçkin Yayıncılık, Ankara 2010.
135. Fitzgerald, A. E., Charles K. J. and Stephen, D. U., Elektrik Makineleri, Gürleyük, Sırrı Sunay Gürleyük, 6. Baskıdan çeviri, Palme Yayıncılık, Ankara 2014.
136. Özçira, S., Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Kontrol Yöntemleri ve Endüstriyel Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
137. Kütük, O., Rüzgar Türbinleri İçin Doğrudan Sürürlü Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörü Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
138. Öner, Y., Sürekli Mıknatıslı DC Motor İle Tahrik Edilen Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörün Çıkış Geriliminin Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.
139. Çelik, H., Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun DSP Tabanlı Doğrudan Moment Kontrolü, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2012.
140. Harrouz, A., Benatiallah, A. and Moulay, A., Control of machine PMSG dedicated to the conversion of wind power off-grid, 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, May 2013, Istanbul, 1729-1733.
141. Akyazı, Ö., Küçükali, M., Akpınar, A. S., Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Hız Denetiminin Farklı Bulanık Üyelik Fonksiyonları Kullanılarak Gerçekleştirilmesi, Elektrik-Elektronik Bilgisayar Sempozyumu, Ekim 2011, Elazığ, Bildiriler Kitabı:311-315.
142. Yang, S, Zhang, L., Modeling and Control of the PMSG Wind Generation System with a Novel Controller, Intelligent System Design and Engineering Applications (ISDEA), 2013 Third International Conference on, Jan. 2013, 946-949.
143. Bodur, H., Güç Elektroniği, 2. Baskı, Birsen yayınevi, İstanbul, 2012.
144. Gürdal, O., Güç Elektroniği, 2. Baskı, Birsen yayınevi, İstanbul, 2008.
145. Mohan, N., Undeland, T. M. ve Robbins, W. P., Güç Elektroniği Çeviriciler, Uygulamalar ve Tasarım, Literatür yayınları, İstanbul, 2003.
146. Sesli, E., Giriş Gerilimi ve Yüğü Değişken DA/DA Yukarı Dönüştürücü Denetimi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2012.
147. Elshaer, M., Mohamed, A., Smart Optimal Control of DC-DC Boost Converter in PV Systems, Transmission and Distribution Conference and Exposition, Latin America, 2010, 403-410.



148. Akyazı, Ö., Sesli, E., DA-DA Boost Dönüştürücülerde Çıkış Gerilimi ve Endüktans Akımının Bulanık Mantık ve Oransal İntegral Denetleyicilerle Karşılaştırılması, II. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi, Kasım 2011, İzmir, Bildiri Kitabı: 435-440.
149. El Aroudi, A., Debbat, M., Giral, R., Olivar, G., Benadero, L. and Toribio, E., Bifurcations in DC–DC Switching Converters: Review of Methods and Applications, International Journal of Bifurcation and Chaos, 15, 5 (2005) 1549-1578.
150. Wens, M., Steyaert, M., Design and Implementation of Fully-Integrated Inductive DC-DC Converters in Standard CMOS, Springer, 2011.
151. Arias, M., Lamar, D. G., Rodriguez, M., Hernando, M. ve Fernandez, A., Simple Droop Voltage Control System for Parallel Operation of UPS, Applied Power Electronics Conference and Exposition, Twenty-Third Annual IEEE, 2008, 1946-1951.
152. Shukla, R. D., Tripathi, R. K. ve Gupta, S., Power Electronics Applications in Wind Energy Conversion System: A Review, International Conference of Power, Control and Embedded Systems (ICPCES), Chennai 2010, 1-6.
153. Kazimierczuk, M. K., Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters, Wiley, 2008.
154. Şerefoğlu, Ş., Solar Sistemler İçin Akıllı Evirici Tasarımı ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2014.
155. Akyazı, Ö., Sesli, E., Ayas, M. Ş., Akpınar, A. S., Kıyıcı Beslemeli Doğru Akım Motorunun Oransal İntegral, Bulanık Mantık ve Bulanık Mantık-Oransal İntegral Denetleyicilerle Hız Kontrolü Karşılaştırılması, Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları Sempozyumu (ASYU), Haziran 2010, Kayseri, Bildiriler Kitabı: 178-182.
156. Akyazı, Ö., Ayas, M. Ş., Altaş, İ. H., Fırçasız Doğru Akım Motorunun Oransal İntegral ve Bulanık Mantık Denetleyicilerle Hız Kontrolü Karşılaştırılması, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK'10), Eylül 2010, Gebze, Bildiriler Kitabı: 532-535.
157. Sesli, E., Akyazı, Ö., Cora, A., Elektrik, Elektronik, Kıyıcı Beslemeli DA Motorun Oransal İntegral ve Bulanık Mantık Oransal İntegral Denetleyicilerle Hız Kontrolü Karşılaştırılması, Bilgisayar, Biyomedikal Mühendisliği 13. ulusal kongresi 23-26 Aralık 2009, Ankara, Bildiriler Kitabı: 31-35
158. Akyazı, Ö., Küçükali, M., Akpınar, A. S., Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Oransal İntegral, Bulanık Mantık ve Bulanık Mantık-Oransal İntegral Denetleyicilerle Hız Kontrolü Karşılaştırılması, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO), Aralık 2010, Bursa, Bildiriler Kitabı: 311-315

159. Ang, K. H., Chong, G. and Li, Y., PID Control System Analysis, Design, and Technology, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 13, 4 (2005) 559-576.
160. Yu, C. C., Autotuning of PID Controllers: A Relay Feedback Approach, Second Edition, Springer-Verlag, Germany, 2006.
161. Ogata, K., Modern Control Engineering Fifth Edition, Prentice-Hall Inc., USA, 2010.
162. Karataş, M., Statik Senkron Kompanzatorün PID Kontrolör ile Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 2011.
163. Zadeh, L. A., Fuzzy Sets, Information and Control, 8, 3 (1965) 338-353.
164. Zadeh, L. A., Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 3, 1 (1973) 28-44.
165. Zadeh, L. A., The Concept of Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning, Part 1, 2, and 3, Information Sciences, 8, 8, 9, (1975) 199-249, 301-357, 43-80.
166. Altaş, İ. H., Bulanık Mantık: Bulanık Denetim, Enerji Elektrik Elektromekanik-3e, Bilesim Yayıncılık A.Ş., 9, 62 (1999) 80-85.
167. Mamdani, E. H., Assilian, S., An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller, Int. J. Man-Machine Studies, 7, 1 (1975) 1-13.
168. Usta, M. A., Akyazı, Ö., Akpınar, A. S., Aircraft Roll Control System Using LQR and Fuzzy Logic Controller, International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA), June 2011, İstanbul, 223-227.
169. Akyazı, Ö., Sesli, E., Akpınar, A. S., Sürekli Mıknatıslı Doğru Akım Motorunun Bulanık Mantık ve Bulanık Mantık-PI Denetim Yöntemleriyle Karşılaştırılması, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK'09), Ekim 2009, İstanbul, Bildiriler Kitabı: 187-192.
170. Akyazı, Ö., Küçükali, M., Akpınar, A. S., Kapalı Ortam Sıcaklık ve Nem Değişiminin Bulanık Mantık ve Bulanık Mantık Oransal İntegral Denetleyicilerle Gerçeklenmesi, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO), Aralık 2010, Bursa, Bildiriler Kitabı: 367-370.
171. Usta, M. A., Akyazı, Ö., Akpınar, A. S., Çift Çevrim SMDA Motorunun Dört Bölge Kontrolünün Bulanık Mantık ile Gerçekleştirilmesi, Çankaya Üniversitesi 4. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, Nisan 2011, Ankara, Bildiriler Kitabı: 590-596.

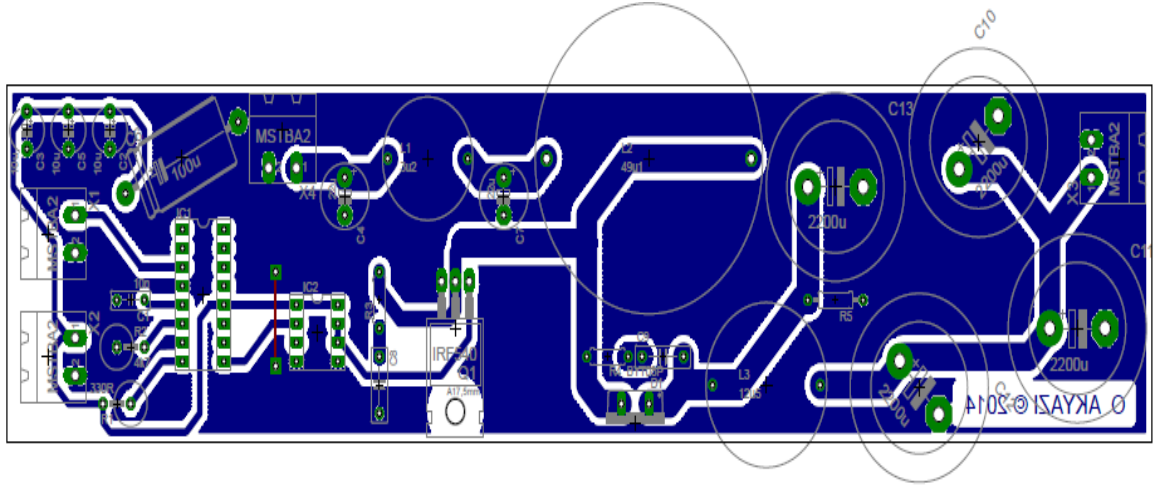
172. Usta, M. A., Akyazı, Ö., Altaş, İ. H., Design and Performance of Solar Tracking System with Fuzzy Logic Controller, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Mayıs 2011, Elazığ, 331-336.
173. Okumus, H. İ., Sahin, E., Akyazi, O., Antenna azimuth position control with fuzzy logic and self-tuning fuzzy logic controllers, 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), December 2013, Bursa, 477-481.
174. Okumus, H. İ., Sahin, E., Akyazi, O., Antenna Azimuth Position Control with Classical PID and Fuzzy Logic Controllers, International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA 2012), July 2012, Trabzon, 435-439.
175. Elmas, Ç., Bulanık Mantık Denetleyiciler (Kuram, Uygulama, Sinirsel Bulanık Mantık), Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2003.
176. Özkop, E., Doğrusal Hareketli Asenkron Motorun Bulanık Mantıkla Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2006.
177. Kesler, S., Bilezikli Asenkron Makinaların Bilezikleri Üzerinden Bulanık Mantık Tabanlı Hız Denetiminin TMS320F2812 DSP İle Gerçekleştirilmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2006.
178. Altaş, İ. H., Bulanık Mantık Denetleyici: Matlab/Simulink Ortamı İçin Bir Modelleme, Otomasyon Dergisi, Bilesim Yayıncılık A.Ş, 3, (2007) 158-162.
179. Altaş, İ. H., Bulanık Mantık: Bulanıklık Kavramı, Enerji Elektrik Elektromekanik-3e, Bilesim Yayıncılık A.Ş, 64, 6 (1999) 76-81.
180. Usta, M. A., Akyazı, Ö., Altaş, İ. H., Design and Performance of Solar Tracking System with Fuzzy Logic Controller Used Different Membership Functions, 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO 2011), December 2011, Bursa, 381-385.
181. Akyazı, Ö., Zenk, H., Akpınar, A. S., Farklı Bulanık Üyelik Fonksiyonları Kullanarak Sürekli Miknatıslı DA Motorunun Hız Denetiminin Gerçeklenmesi, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Mayıs 2011, Elazığ, 163-168.
182. Akyazi, O., Usta, M. A., Akpınar, A. S., A Self-Tuning Fuzzy Logic Controller or Aircraft Roll Control System, International Journal of Control Science and Engineering, 2, 6 (2012) 181-188.
183. Akyazı, Ö., Usta, M. A., Altaş, İ. H., Farklı Bulanık Üyelik Fonksiyonları Kullanarak Kıyıcı Beslemeli Doğru Akım Motorunun Hız Denetiminin Gerçeklenmesi, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK'11), Eylül 2011, İzmir, Bildiri Kitabı: 66-70.

184. Akyazı, Ö., Usta, M. A., Akpınar, A. S., Kapalı Ortam Sıcaklık ve Nem Denetiminin Farklı Bulanık Üyelik Fonksiyonları Kullanılarak Gerçekleştirilmesi, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Mayıs 2011, Elazığ, 158-162.
185. Altas, İ. H., Sharaf, A. M., A Generalized Direct Approach for Designing Fuzzy Logic Controllers in Matlab/Simulink GUI Environment, International Journal of Information Technology and Intelligent Computing, Int. J. IT&IC, 1, 4 (2007).
186. Kennedy, J., Eberhart, R. C., Particle swarm optimization, Proc. IEEE Intel. Conf. On Neural Networks, Vol. IV, (1995) 1942–1948, Piscataway, NJ.
187. Eberhart, R. C., Kennedy, J., A New Optimizer Using Particle Swarm Theory, In Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Japan, Nagoya 1995, 39-43.
188. Abido, M. A., Optimal Design of Power System Stabilizers Using Particle Swarm Optimization, IEEE Transactions on Energy Conversion, 17, 3 (2002) 406-413.
189. Liu, L., Liu, W. ve Cartes, D. A., Particle Swarm Optimization Based Parameter Identification Applied to Permanent Magnet Synchronous Motors, Engineering Applications of Artificial Intelligence 21, 7 (2008) 1092–1100.
190. Gaing, Z. L., A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system, Energy Conversion, IEEE Transactions on 19, 2 (2004) 384-391.
191. Zamani, M., Masoud, K. G., Nasser, S. and Mostafa, P., Design of a fractional order PID controller for an AVR using particle swarm optimization, Control Engineering Practice, 17,12 (2009) 1380-1387.
192. Rahmani, R., Mahmodian, M. S., Mekhilef, S. and Shojaei, A. A., Fuzzy logic controller optimized by particle swarm optimization for DC motor speed control, In Research and Development (SCOREd), IEEE Student Conference on, Dec. 2012, Pulau Pinang, 109-113.
193. Miranda, V., Fonseca, N., New evolutionary particle swarm algorithm (EPSO) applied to voltage/VAR control. In Proceedings of the 14th power systems computation conference (PSCC), Seville-Spain 2002,21, 5 (2002) 1–6.
194. Mohan, C. K., Al-Kazemi, B., Discrete particle swarm optimization. In Proceedings of the workshop on particle swarm optimization, Indianapolis, IN, Purdue School of Engineering and Technology, IUPUI, 2001.
195. Moraglio, A., Di Chio, C. and Poli, R., (2007). Geometric particle swarm optimization. In M. Ebner et al.(Eds.), Lecture notes in computer science 4445. Proceedings of the European conference on genetic programming (EuroGP), Berlin: Springer, 4445, (2007) 125–136.

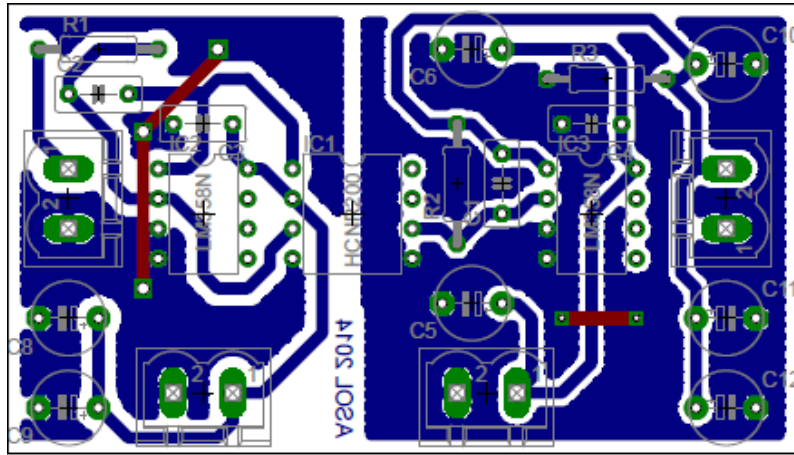
196. Clerc, M., Partical Swarm Optimization, 2006.
197. Kennedy, J., Russell, R. C. and Shi, Y., Swarm Intelligence, The Morgan Kaufmann Series in Evolutionary Computation, 2001.
198. Carlisle, A., Dozier, G., An Off-The-Shelf PSO, In Proceedings of the PSO Workshop, 2001, 1-6.
199. Shi, Y., Eberhart, R. C., A Modified Particle Swarm Optimizer, Proceeding of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 1998, 69-73.
200. Şahin, E., Özkop, E. ve Altaş, İ. H., Dalga Enerji Sisteminden Beslenen Bir DA Motorunun Hız Kontrolü İçin Denetleyici Parametrelerinin PSO İle Optimizasyonu, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Ulusal Toplantısı (TOK), Eylül 2013, Malatya, Bildiri Kitabı:483-487.
201. Riccardo, P., Kennedy, J. and Blackwell, T., Particle swarm optimization. Swarm intelligence 1, 1 (2007) 33-57.
202. Nabiyev, V. V., Yapay Zeka (Problemler-Yöntemler-Algoritma), Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2005.
203. Mitchell, M., An Introduciton to Genetic Algorthims, MIT Press, Fifth Edition, 1998.
204. Özcan, M., Türkiye Elektrik Enerjisi Üretim Genişletme Planlamasında Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Etkileri, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Koçaeli, 2013.
205. Karaoğlan, Ö. G., Kontrol Sistemleri İçin Bulanık PID Kontrolörlerin Genetik Algoritmalar Yardımıyla Ayarlanması, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
206. Randy, L. H., Sue, E. H., Practical Genetic Algorithms, Second Edition, A John Wiley&Sons, Inc., Publication, USA, 2004.
207. Zbigniew, M., Genetic Algorithms+Data Structures=Evolution Programs, Third, Revised and Extenden Edition, Springer series Artificial Intelligence, 1992.
208. Goldberg, D. E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989.
209. Booker, L. B., Goldberg, D. E. ve Holland, J. H., Classifier Systems and Genetic Algorithms, Artificial Intelligence, 40, 1-3 (1989) 235-282.
2010. Ayaz, B., PID Kontrolörlerinin Optimal Parametrelerinin Belirlenmesi Amacıyla Bir Bulanık Mantık Karar Mekanizması Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
211. Elmas, Ç., Yapay Zekâ Uygulamaları, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2007.

## 8. EKLER

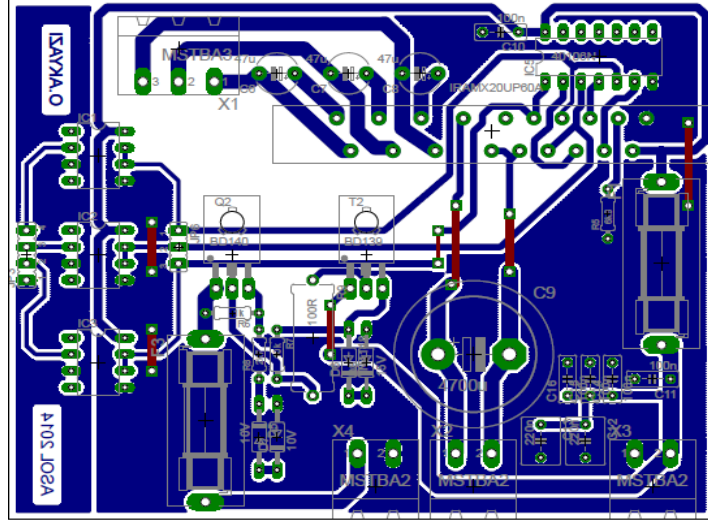
Ek 1. DA-DA yükseltici çevirici baskı devresi (Bölüm 4.3.1), Yalıtım devresi baskı devre şeması (Bölüm 4.3.1), DA/AA evirici baskı devresi (Bölüm 4.3.2), Akım-gerilim devresine ait baskı devre şeması (Bölüm 4.3.4), Simetrik güç kaynağı devresine ait baskı devre şeması (Bölüm 4.3.5)



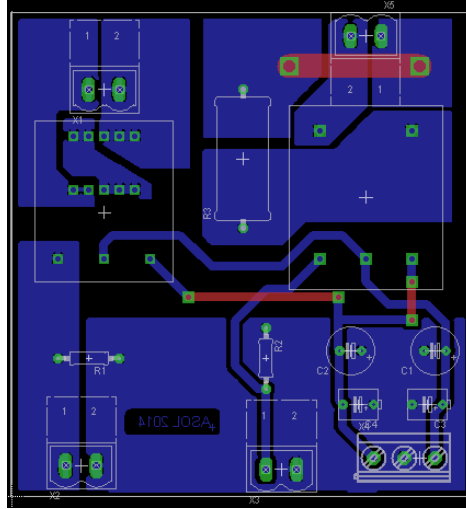
Şekil E.1.1. DA-DA yükseltici baskı devre şeması



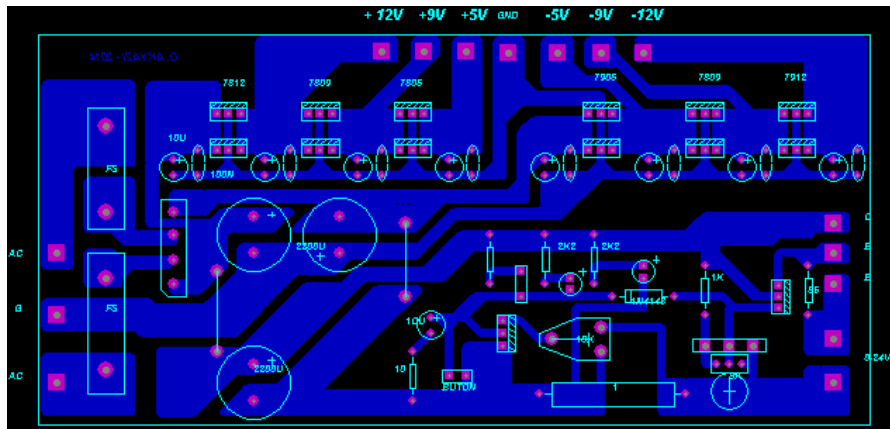
Şekil E.1.2. Yalıtım devresine ait baskı devre şeması



Şekil E.1.3. DA/AA evirici baskı devresi



Şekil E.1.4. Akım-gerilim devresine ait baskı devre şeması



Şekil E.1.5. Simetrik güç kaynağı devresine ait baskı devre şeması

## ÖZGEÇMİŞ

15.07.1979 tarihinde Trabzon'un Vakfikebir ilçesinde doğdu. İlk ve ortaokul Trabzon Çarşıbaşı ilçesinde bitirdikten sonra Endüstri Meslek Lisesi sınavlarına girerek Trabzon Akçaabat Endüstri Meslek Lisesi Elektrik Bölümünü kazandı. Bu bölümde bir yıl okuduktan sonra derslerindeki başarısından dolayı Teknik liseye girmeye hak kazandı. 1997 yılında Akçaabat Teknik lisesini başarı ile bitirdi. Lise öğrenimini tamamladıktan sonra yaklaşık iki yıl kadar alanıyla ilgili serbest piyasada çalıştı.

Üniversite eğitimine 1999 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü'nde başladı. 2003 yılında bölüm 3.sü olarak Teknik Öğretmen unvanı ile mezun oldu. 2003-2006 yılları arasında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimini tamamladı ve 2007 yılında aynı anabilim dalında doktora eğitimine başladı. 2005 yılında K.T.Ü Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde bir yıl araştırma görevlisi olarak çalıştı. 2008 yılında Sürmene Abdullah Kanca Meslek Yüksekokulu Elektrik ve Enerji Bölümü Elektrik Programında Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı ve halen bu göreve devam etmektedir. Yabancı dil olarak İngilizce bilmektedir. Evli ve iki çocuk babasıdır.

### Ulusal ve Uluslararası hakemli dergilerde yayınlanan makaleler

1. Akyazı, Ö., Akpınar, A. S., Elektromanyetik Fırlatıcılar, F.Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20, 1 (2008) 117-126.
2. Akyazı, Ö., Gençtürk, G., Hidrolik Sistem Uygulamaları, Otomasyon Dergisi, Bilişim Yayıncılık, 6, 229 (2011) 206-209.
3. Akyazı, Ö., Akpınar, A. S. ve Çokrak, D., PLC Kontrollü Hidrolik Sistem Uygulamaları, Otomasyon Dergisi, Bilişim Yayıncılık, 9, 243 (2012) 118-122.
4. Akyazı, O., Usta, M. A. and Akpınar, A. S., A Self-Tuning Fuzzy Logic Controller for Aircraft Roll Control System, International Journal of Control Science and Engineering, 2, 6 (2012) 181-188.
5. Akyazı, Ö., Bezir, Y. E. ve Akpınar, A. S., Rüzgar-Güneş Hibrit Enerji Üretim Sistemi Tasarımı ve Uygulaması, 3e Electrotech Dergisi, Bilişim Yayıncılık, 9, 231 (2013) 182-184.



6. Akyazı, Ö., Akpınar, A. S., Dünyada ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi, Otomasyon Dergisi, Bilişim Yayıncılık, 4, 262 (2014) 352-354.
7. Akyazı, Ö., Akpınar, A. S., Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Generatörler, 3e Electrotech Dergisi, Bilişim Yayıncılık, 4, 238 (2014) 224-230.
8. Akyazı, Ö., Akpınar, A. S., Rüzgâr Türbinleri ve Aerodinamik Karakteristikleri, Otomasyon Dergisi, Bilişim Yayıncılık, 6, 264 (2014) 188-194.
9. Akyazı, Ö., Keskin, Y. ve Yaşayan, A., Kablosuz Enerji Transferi, 3e Electrotech Dergisi, Bilişim Yayıncılık, 6, 241 (2014) 130-132.

### **Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler**

1. Akyazı, Ö., Usta, M. A. ve Akpınar, A. S., Kapalı Ortam Sıcaklık ve Nem Denetiminin Farklı Bulanık Üyelik Fonksiyonları Kullanılarak Gerçekleştirilmesi, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11), Mayıs 2011, Elazığ, 158-162.
2. Usta, M. A., Akyazı, Ö. ve Akpınar, A. S., Bilgisayar Üzerinden Bir Silah Kontrol Sistemi Prototipinin Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11), Mayıs 2011, Elazığ, 240-244.
3. Usta, M. A., Akyazı, Ö. ve Altaş, İ. H., Design and Performance of Solar Tracking System with Fuzzy Logic Controller, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11), Mayıs 2011, Elazığ, 331-336.
4. Akyazı, Ö., Zenk, H. ve Akpınar, A. S., Farklı Bulanık Üyelik Fonksiyonları Kullanarak Sürekli Miknatıslı DA Motorunun Hız Denetiminin Gerçeklenmesi, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11), Mayıs 2011, Elazığ, 163-168.
5. Usta, M. A., Akyazı, Ö. ve Akpınar, A. S., Aircraft Roll Control System Using LQR and Fuzzy Logic Controller, International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA 2011), June 2011, İstanbul, 223-227.
6. Usta, M. A., Akyazı, Ö. ve Altaş, İ. H., Design and Performance of Solar Tracking System with Fuzzy Logic Controller Used Different Membership Functions, 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ELECO 2011, December 2011, Bursa, 381-385.
7. Usta, M. A., Akyazi, O. ve Akpınar, A. S., Simulation of Direct Thrust Control for Linear Induction Motor Including End-Effect, International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA 2012), July 2012, Trabzon, 161-165.

8. Okumus, H. İ., Sahin, E. ve Akyazi, O., Antenna Azimuth Position Control with Classical PID and Fuzzy Logic Controllers, International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA 2012), July 2012, Trabzon, 435-439.
9. Okumus, H. İ., Sahin, E. ve Akyazi, O., Antenna azimuth position control with fuzzy logic and self-tuning fuzzy logic controllers, 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ELECO 2013, December 2013, Bursa, 477-481.

### **Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan bildiri kitabında basılan bildiriler**

1. Akyazi, Ö., Okumuş, H. İ. ve Özkop, E., Asenkron Motor İçin Uyarlamalı Akı Gözlemleyici Tabanlı Hız Algılayıcısız Doğrudan Moment Kontrolü Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK07), Eylül 2007, İstanbul, Bildiri Kitabı: 580-583.
2. Küçükali, M., Akyazi, Ö. ve Akpınar, A. S., Doğrusal Hareketli Asenkron Motor Sürücülü Mekanik Osilatör ve Evirici ile Kontrolü, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO), Kasım 2008, Bursa, Bildiri Kitabı: 194-198.
3. Sesli, E., Akyazi, Ö., Bölgesel Kalkınma Kongresi 2009, Meslek Yüksekokulu ve Sanayi Entegrasyonunun Bölgeye Katkıları, Kasım 2009, İzmir, Bildiriler Kitabı: 299-304.
4. Akyazi, Ö., Sesli, E. ve Akpınar, A. S., Sürekli Mıknatıslı Doğru Akım Motorunun Bulanık Mantık ve Bulanık Mantık-PI Denetim Yöntemleriyle Karşılaştırılması, TOK'09, Ekim 2009, İstanbul, Bildiriler Kitabı: 187-192.
5. Sesli, E., Akyazi, Ö. ve Cora, A., Kıyıcı Beslemeli DA Motorun Oransal İntegral ve Bulanık Mantık Oransal İntegral Denetleyicilerle Hız Kontrolü Karşılaştırılması, Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal Mühendisliği 13. ulusal kongresi, Aralık 2009, Ankara, Bildiriler Kitabı: 31-35.
6. Akyazi, Ö., Sesli, E., Ayas, M. Ş. ve Akpınar, A. S., Kıyıcı Beslemeli Doğru Akım Motorunun Oransal İntegral, Bulanık Mantık ve Bulanık Mantık-Oransal İntegral Denetleyicilerle Hız Kontrolü Karşılaştırılması Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları Sempozyumu (ASYU), Haziran 2010, Kayseri, Bildiriler Kitabı:178-182.
7. Akyazi, Ö., Ayas, M. Ş. ve Altaş, İ. H., Fırçasız Doğru Akım Motorunun Oransal İntegral ve Bulanık Mantık Denetleyicilerle Hız Kontrolü Karşılaştırılması, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK'10), Eylül 2010, Gebze, Bildiriler Kitabı: 532-535.

8. Akyazı, Ö., Küçükali, M. ve Akpınar, A. S., Kapalı Ortam Sıcaklık ve Nem Değişiminin Bulanık Mantık ve Bulanık Mantık Oransal İntegral Denetleyicilerle Gerçeklenmesi, ELECO'2010 Elektril-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Aralık 2010, Bursa, Bildiriler Kitabı: 367-370.
9. Akyazı, Ö., Küçükali, M. ve Akpınar, A. S., Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Oransal İntegral, Bulanık Mantık ve Bulanık Mantık-Oransal İntegral Denetleyicilerle Hız Kontrolü Karşılaştırılması, ELECO'2010 Elektril-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Aralık 2010, Bursa, Bildiriler Kitabı: 311-315.
10. Usta, M. A., Akyazı, Ö. ve Akpınar, A. S., Çift Çevrim SMDA Motorunun Dört Bölge Kontrolünün Bulanık Mantık ile Gerçekleştirilmesi, Çankaya Üniversitesi 4. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, Nisan 2011, Ankara, Bildiriler Kitabı: 590-596.
11. Akyazı, Ö., Aktaş, K. ve Aydın, V., Pnömatik Sistem Uygulamaları, Çankaya Üniversitesi 4. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, Nisan 2011, Ankara, Bildiriler Kitabı: 638-643.
12. Akyazı, Ö., Usta, M. A., Altaş, İ. H., Farklı Bulanık Üyelik Fonksiyonları Kullanarak Kıyıcı Beslemeli Doğru Akım Motorunun Hız Denetiminin Gerçeklenmesi, TOK'11 Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, Eylül 2011, İzmir, Bildiriler Kitabı: 66-70.
13. Akyazı, Ö., Çokrak, D., Pnömatik ve Hidrolik Sistem Uygulamaları, Elektrik-Elektronik Bilgisayar Sempozyumu, Ekim 2011, Elazığ, Bildiriler Kitabı: 142-147.
14. Akyazı, Ö., Küçükali, M. ve Akpınar, A. S., Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Hız Denetiminin Farklı Bulanık Üyelik Fonksiyonları Kullanılarak Gerçekleştirilmesi, Elektrik-Elektronik Bilgisayar Sempozyumu, Ekim 2011, Elazığ, Bildiriler Kitabı: 311-315.
15. Akyazı, Ö., Sesli, E., DA-DA Boost Dönüştürücülerde Çıkış Gerilimi ve Endüktans Akımının Bulanık Mantık ve Oransal İntegral Denetleyicilerle Karşılaştırılması, II.Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi, Kasım 2011, İzmir, Bildiriler Kitabı: 435-440.
16. Akyazı, Ö., Akpınar, A. S. ve Çokrak, D., PLC İle Kontrolü Gerçekleştirilen Elektropnömatik Sistem Uygulamaları, 5. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, Nisan 2012, Ankara, Bildiriler Kitabı: 165-169.
17. Akyazı, Ö., Bozdağ, M. O. ve Yılmaz, F., Güneş Enerjisi İle Çalışan Gemi Protopinin Gerçeklenmesi, Proje Tabanlı Mekatronik Eğitim Çalıştayı, Mayıs 2012, Çankırı-İlgaz, Bildiriler Kitabı: 55.

18. Akyazı, Ö., Bozdağ, M. O. ve Yılmaz, F., Mikrodenetleyici ile Otomasyon Sistemlerinin Kontrolünü gerçekleştiren Deney Seti Tasarımı ve Uygulaması, Ulusal Meslek Yüksekokulları Çalıştayı ve Öğrenci Sempozyumu UMÇÖS 2012, Haziran 2012, Nevşehir, Bildiriler Kitabı:313-319.
19. Akyazı, Ö., Bozdağ, M. O. ve Çokrak, D., PIC 18F452 ile Pnömatik ve Hidrolik Sistemlerin Kontrollerini Gerçekleştiren Deney Seti Tasarımı ve Uygulaması, TOK'12 Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, Ekim 2012, Niğde, Bildiri Kitabı: 666-670.
20. Akyazı, Ö., Bozdağ, M. O. ve Akpınar, A. S., Manyetik Etkili Alan Savunma Sistemi, TOK'13 Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, Eylül 2013, Malatya, Bildiri Kitabı:1113-1116.
21. Buyrukoğlu, S., Akyazı, Ö. ve Akpınar, A. S., Tüpsel Yapılı Sürekli Mıknatıslı DA Motorunun Hız Kontrolünün Bulanık Mantıkla Gerçeklenmesi, TOK'13 Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, Eylül 2013, Malatya, Bildiri Kitabı: 231-236.