

**ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖR İÇİN ETKİN BİR
DENETLEYİCİ TASARIMI**

Sertaç BAYHAN

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2012

ANKARA

Sertaç BAYHAN tarafından hazırlanan ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖR İÇİN ETKİN BİR DENETLEYİCİ TASARIMI adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Şevki DEMİRBAŞ

.....

Tez Danışmanı, Elektrik-Elektronik Müh. Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ömer Faruk BAY

.....

Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Şevki DEMİRBAŞ

.....

Elektrik-Elektronik Müh., Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Güngör BAL

.....

Elektrik-Elektronik Müh., Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. İlhami ÇOLAK

.....

Elektrik-Elektronik Müh., Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Hamit ERDEM

.....

Elektrik-Elektronik Müh., Başkent Üniversitesi

Tarih: 25.01.2012

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Sertaç BAYHAN

ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖR İÇİN ETKİN BİR DENETLEYİCİ TASARIMI

(Doktora Tezi)

Sertaç BAYHAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2012

ÖZET

Rüzgâr türbinlerinde kullanılan Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) lerin stator sargıları doğrudan şebekeye bağlanırken, rotor sargıları arka arkaya bağlı iki adet güç elektroniği dönüştürücüsü yardımıyla şebekeye bağlanmaktadır. Bu çalışmada rüzgâr türbinlerinde kullanılan ÇBAG'nin değişik hız ve yük koşullarında aktif gücünü etkin şekilde denetlemek amacıyla bir sistem tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen sistemde ÇBAG'nin rotor sargıları iki adet vektör denetimli darbe genişlik modülasyonlu dönüştürücü yardımıyla şebekeye bağlanmıştır. Rotor tarafında kullanılan dönüştürücü, ÇBAG'nin şebeke ile paralel bağlantı şartlarını sağladıktan sonra generatörün ürettiği aktif ve reaktif gücü denetlemektedir. Paralel bağlantı şartları için generatörün gerilimi PI denetleyici ile ayarlanmakta, frekans ve faz açısı ise faz kilitli döngü tarafından belirlenmektedir. Paralel bağlantıdan sonra ise PI, bulanık mantık ve çıkış ölçeklendirme katsayısı kendinden ayarlamalı bulanık mantık denetleyiciler (KABMD) kullanılarak ÇBAG'nin aktif gücü kontrol edilmiş ve bu denetleyicilerin performansları karşılaştırılmıştır. Şebeke tarafında kullanılan dönüştürücü ise PI denetleyici yardımıyla DA bara gerilimini sabit tutarken aynı zamanda giriş güç katsayısının birim değerinde, şebekeden çekilen akım harmoniklerinin de standartlarda belirtilen sınırlar içerisinde kalmasını sağlamaktadır. Ayrıca, gerçekleştirilen sistemin uzaktan izlenebilmesi ve kontrol edilebilmesi amacıyla LabVIEW programı yardımıyla

kullanıcı arayüzü hazırlanmıştır. Gerçekleştirilen sistem benzetim ve deneysel olarak test edilmiş, ÇBAG'nin aktif gücünün denetiminde kullanılan denetleyicilerden KABMD'nin değişen hız ve yük koşullarına daha iyi uyum sağladığı ve referans gücü daha düzgün izlediği sonucuna varılmıştır.

Bilim Kodu : 703.3.016
Anahtar Kelimeler : Çift beslemeli asenkron generatör, Faz kilitli döngü, Kendinden ayarlamalı bulanık mantık denetleyici
Sayfa Adedi : 132
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Şevki DEMİRBAŞ

**DESIGN OF AN EFFICIENT CONTROLLER FOR DOUBLE FED
INDUCTION GENERATOR**

(Ph. D. Thesis)

Sertaç BAYHAN

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

January 2012

ABSTRACT

Stator windings of double fed induction generators (DFIG) used in wind turbines are directly connected to grid while rotor windings are connected to line through a back-to-back converter. In this study a system with an efficient controller has been designed and implemented for controlling DFIG's active power in several speed and load condition. In the system, two vector controlled PWM converters have been used between DFIG's rotor windings and grid. The converter used in rotor side controls the active and reactive power of DFIG after parallel connection conditions are fulfilled. For parallel connection condition, generator's voltage is adjusted by PI controller, frequency and phase angle is determined by phase locked loop (PLL). Active power of the DFIG has been controlled using PI, fuzzy logic and self tuning fuzzy logic controllers (STFLC) after parallel connection and then performance of the controllers has been compared. The converter used in line side achieves stability of DC link voltage with unity input power factor. It also ensures that current harmonics drawing from line are in the limit specified by the standards. Furthermore a user interface has been prepared using LabVIEW program for remote monitoring and control of the system. Implemented system has been simulated and validated with experimental results. As a result among the controllers used to control DFIG' active power, STFLC more adapts to variable speed and load conditions and tracks the reference power adequately.

Science Code : 703.3.016
Key Words : Double fed induction generator, Phase locked loop,
Self tuning fuzzy logic controller
Page Number : 132
Adviser : Assoc. Prof. Dr. Şevki DEMİRBAŞ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımın tüm aşamalarında danışmanlığımı, yol göstericiliğini esirgemeyen, edindiğiengin bilgi ve tecrübeyi benimle paylaşmaktan çekinmeyen, değerli danışmanım Doç. Dr. Şevki DEMİRBAŞ'a yine tezim süresince bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım Prof. Dr. Güngör BAL'a, Doç. Dr. Hamit ERDEM'e, Doç. Dr. İbrahim SEFA' ya, Dr. İlhan GARİP'e ve Öğr. Gör. Şaban ÖZDEMİR' e ayrıca manevi desteklerini her zaman yanımda hissettiğim sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca tezimi 41/2010-07 kod ve “Çift Beslemeli Asenkron Generatör İçin Etkin Bir Denetleyici Tasarımı” konulu projeye desteklediği için Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

Tezimi, çalışmalarım boyunca yalnız bıraktığım kızım İpek Kübra BAYHAN'a ve eşime ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xviii
1. GİRİŞ	1
2. RÜZGÂR TÜRBİN SİSTEMLERİ.....	23
2.1. Rüzgâr Enerjisi	23
2.2. Rüzgâr Türbin Sistemlerinin Çeşitleri	27
2.2.1. Sabit hızlı rüzgâr türbin sistemleri	28
2.2.2. Değişken hızlı rüzgâr türbin sistemleri	28
2.3. Değişken Hızlı Rüzgâr Türbin Sistemlerinde Kullanılan Generatörler...30	
2.3.1. Senkron generatörler	30
2.3.2. Asenkron generatörler	32
2.4. Değişken Hızlı Rüzgâr Türbin Sistemlerinde Kullanılan Generatörlerin Karşılaştırılması	34
3. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖRÜN MODELLENMESİ.....	36
3.1. Çift Beslemeli Asenkron Generatör.....	36
3.2. ÇBAG Kararlı Durum Eşitlikleri.....	38
3.3. ÇBAG'nin Güç Analizi.....	40

Sayfa

3.4.	ÇBAG Fazör Diyagramları	43
3.5.	ÇBAG'nin Güç Sisteminde Davranışı.....	45
3.6.	ÇBAG'nin d-q Referans Düzleminde Kararlı Durum Modeli ve Aktif-Reaktif Güç Karakteristiği	49
4.	BULANIK MANTIK DENETLEYİCİLER.....	55
4.1.	Giriş	55
4.2.	Bulanık Mantık ve Bulanık Küme Kavramı	55
4.3.	Üyelik Fonksiyonları	57
4.4.	Bulanık Mantık Denetleyici	59
4.4.1.	Bulandırma arayüzü	60
4.4.2.	Bilgi tabanı	60
4.4.3.	Çıkarım motoru.....	61
4.4.4.	Durulama arayüzü.....	62
4.4.5.	Bulanık mantık denetleyicinin üstünlükleri.....	63
4.4.6.	Bulanık mantık denetleyicinin sakıncaları	64
5.	GERÇEKLEŞTİRİLEN DENEYSEL KURULUM.....	65
5.1.	Giriş	65
5.2.	Tasarlanan Mekaniksel Yapı.....	66
5.3.	Tasarlanan Güç Elektroniği Dönüştürücü Yapısı.....	67
5.4.	Ölçme Kartı	70
5.5.	TMS320F2812 DSP Denetim Kartı	71
5.6.	Tristörlü Statik Senkronizasyon Anahtarı.....	72
5.7.	Uzaktan Denetim ve İzleme Yazılımı.....	73

Sayfa

6.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	77
6.1.	Şebeke Tarafı Dönüştürücünün Denetimi.....	77
6.1.1.	Benzetim çalışmaları.....	79
6.1.2.	Deneysel çalışmalar	80
6.2.	ÇBAG Stator Geriliminin Şebeke Gerilimi ile Senkronizasyonu	83
6.2.1.	Faz kilitli döngü (PLL) tekniği.....	83
6.2.2.	Hazırlanan denetim algoritması	90
6.2.3.	Benzetim çalışmaları.....	94
6.2.4.	Deneysel çalışmalar	97
6.3.	PI Denetleyici ile ÇBAG'nin Aktif ve Reaktif Güç Denetimi.....	100
6.3.1.	Hazırlanan denetim algoritması	100
6.3.2.	Benzetim çalışmaları.....	102
6.3.3.	Deneysel çalışmalar	103
6.4.	Bulanık Mantık Denetleyici ve Çıkış Ölçeklendirme Katsayısı Kendinden Ayarlamalı Bulanık Mantık Denetleyici ile ÇBAG'nin Aktif Güç Denetimi	106
6.4.1.	Hazırlanan denetim algoritması	107
6.4.2.	Benzetim çalışmaları.....	111
6.4.3.	Deneysel çalışmalar	113
6.5.	Sonuçların Değerlendirilmesi.....	115
7.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	118
	KAYNAKLAR.....	122
	ÖZGEÇMİŞ.....	130

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Değişken hızlı rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan generatörlerin karşılaştırılması	35
Çizelge 4.1. Kuralların çizelge halinde yazılması	61
Çizelge 5.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan ÇBAG ve ASM'nin etiket değerleri	66
Çizelge 6.1. Δu için kural tablosu	109
Çizelge 6.2. α için kural tablosu	110
Çizelge 6.3. Şebekeden çekilen akım harmonik düzeylerinin değerleri	115
Çizelge 6.4. Benzetim sonuçlarının karşılaştırılması	116
Çizelge 6.5. Deneysel sonuçların karşılaştırılması	116

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Rüzgâr türbini pervanesinden geçen havanın akışı.....	24
Şekil 2.2. Rüzgâr türbin sisteminin blok diyagramı	27
Şekil 2.3. Sabit hızlı rüzgâr türbin sisteminin blok diyagramı	28
Şekil 2.4. Değişken hızlı rüzgâr türbin sisteminin blok diyagramı	29
Şekil 2.5. Değişken hızlı rüzgâr türbin sistemlerinin gruplanması.....	30
Şekil 2.6. Alan sargılı senkron generatörlü rüzgâr türbin sistemi	31
Şekil 2.7. Daimi mıknatıslı senkron generatörlü rüzgâr türbin sistemi	32
Şekil 2.8. Sincap kafesli asenkron generatörlü rüzgâr türbin sistemi	32
Şekil 2.9. Rotoru sargılı asenkron generatörlü rüzgâr türbin sistemi	33
Şekil 2.10. Çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgâr türbin sistemi	34
Şekil 3.1. Çift beslemeli asenkron generatörün bağlantı diyagramı	36
Şekil 3.2. Çift beslemeli asenkron generatörün çalışma bölgelerine göre enerji akış diyagramları a) Senkron altı çalışma b) Senkron üstü çalışma.....	37
Şekil 3.3. ÇBAG'nin bir faz için kararlı durum eşdeğer devre modeli	39
Şekil 3.4. ÇBAG'nin bir faz için stator eşdeğer devresi	40
Şekil 3.5. ÇBAG'nin stator vektör diyagramı	41
Şekil 3.6. ÇBAG'nin senkron altı, senkron üstü ve senkron çalışma durumları.....	42
Şekil 3.7. ÇBAG fazör diyagramları a) Düşük uyartım durumu b) Aşırı uyartım durumu	44
Şekil 3.8. Stator aktif (P_s) ve reaktif (Q_s) gücüne karşı güç açısı ($\delta_k + \delta_k(s)$) eğrileri.....	47

Şekil	Sayfa
Şekil 3.9. Rotor tarafı dönüştürücü temel denetim blok diyagramı.....	50
Şekil 3.10. ÇBAG d-q referans düzleminde kararlı durum modeli	52
Şekil 3.11. Stator aktif güç karakteristiği a) $V_{rd}=0$ pu b) $V_{rq}=0$ pu.....	53
Şekil 3.12. Stator reaktif güç karakteristiği a) $V_{rd}=0$ pu b) $V_{rq}=0$ pu.....	54
Şekil 4.1. Klasik ve bulanık küme kavramlarının grafiksel gösterimi a) Klasik mantık b) Bulanık mantık	56
Şekil 4.2. Bulanık mantık üyelik fonksiyonu çeşitleri.....	57
Şekil 4.3. Yedi etiketli üyelik fonksiyonu ve ölçeklendirme katsayısı.....	58
Şekil 4.4. Bulanık mantık denetleyicinin temel yapısı.....	59
Şekil 4.5. Maksimum üyelik yöntemi	62
Şekil 4.6. Ağırlık merkezi yöntemi.....	63
Şekil 4.7. Mean-max üyelik yöntemi	63
Şekil 5.1. Gerçekleştirilen deneysel kurulumu ait blok diyagram	65
Şekil 5.2. Güç elektroniği dönüştürücü yapısının blok diyagramı	67
Şekil 5.3. IGBT ikili blok yapısı ve dönüştürücü bağlantısı	68
Şekil 5.4. Tasarlanan IGBT sürücü devre şeması.....	69
Şekil 5.5. Ölçme kartının bir faz için devre yapısı	71
Şekil 5.6. Bir faz için tristör sürme devresi.....	72
Şekil 5.7. Hazırlanan yazılımın blok diyagramı.....	74
Şekil 5.8. Gerçekleştirilen arayüz yazılımının akış diyagramı.....	75
Şekil 5.9. Hazırlanan yazılımın ekran görünümü	76
Şekil 6.1. Şebeke tarafı dönüştürücünün denetim blok diyagramı	78
Şekil 6.2. Farklı DA bara gerilim değerlerinde denetim yapısının tepkisi.....	79

Şekil	Sayfa
Şekil 6.3. Şebeke tarafı dönüştürücünün bir faz giriş akım eğrisi ve harmonik analizi a) Denetim algoritması çalıştırılmadan önce b) Denetim algoritması çalıştırıldıktan sonra.....	80
Şekil 6.4. Denetim algoritması çalıştırılmadan önce güç elektroniği yapısı.....	81
Şekil 6.5. Denetim algoritması çalıştırılmadan önce DA hat gerilimi, tek faz için akım dalga şekli ve akımın THD grafiği	81
Şekil 6.6. Denetim algoritması çalıştırıldıktan sonra güç elektroniği yapısı	82
Şekil 6.7. Denetim algoritması çalıştırıldıktan sonra DA hat gerilimi, tek faz için akım dalga şekli ve akımın THD grafiği	82
Şekil 6.8. PLL blok diyagramı.....	84
Şekil 6.9. Üç faz PLL yapısının blok diyagramı	85
Şekil 6.10. Üç faz PLL yapısının doğrusallaştırılmış modeli	87
Şekil 6.11. Üç faz PLL yapısının farklı sönüm katsayısı ve doğal frekans değerleri için açısız pozisyon benzetim sonuçları a) $\zeta = 0,707$, $\omega_n = 628$ rad/sn b) $\zeta = 1,870$, $\omega_n = 1570$ rad/sn c) $\zeta = 3,535$, $\omega_n = 1570$ rad/sn.....	89
Şekil 6.12. Senkronizasyon için hazırlanan denetim algoritmasının blok diyagramı.....	90
Şekil 6.13. Üç fazlı ve iki fazlı gerilim sinyalleri ve vektörel büyüklükleri.....	91
Şekil 6.14. İki fazlı sinüsoidal ve sabit genlikli gerilim sinyalleri ve vektörleri...	92
Şekil 6.15. Denetim sistemi yazılımının blok diyagramı.....	94
Şekil 6.16. Senkronizasyon süresince şebeke ve generatör gerilimlerinin d-q bileşenlerinin değişimi.....	95
Şekil 6.17. Senkronizasyon süresince şebeke ve generatör bir faz gerilim eğrileri.....	96
Şekil 6.18. Senkronizasyon süresince şebeke ve generatör bir faz gerilim eğrileri ile bir faz için rotor akımı	98

Şekil	Sayfa
Şekil 6.19. Farklı rüzgâr hızlarında şebeke gerilimi, generatör gerilimi ve rotor akımı a) $n_r=1050$ d/d, $f_r=15$ Hz b) $n_r=1200$ d/d, $f_r=10$ Hz c) $n_r=1350$ d/d, $f_r=5$ Hz.....	99
Şekil 6.20. PI denetleyici kullanılarak ÇBAG'nin aktif-reaktif güç denetimi için hazırlanan algoritmanın blok diyagramı	101
Şekil 6.21. Hazırlanan yazılımın blok diyagramı.....	102
Şekil 6.22. PI denetleyici kullanılarak gerçekleştirilen referans ve üretilen aktif güç eğrileri	103
Şekil 6.23. PI denetleyici kullanılarak gerçekleştirilen referans ve üretilen reaktif güç eğrileri	103
Şekil 6.24. ÇBAG'nin bir faz gerilim ve akım eğrileri ile birlikte şebekeye aktardıkları bir faz için aktif ve reaktif güç değerlerini gösteren ekran görüntüleri	104
Şekil 6.25. ÇBAG'nin farklı hız değerlerinde şebekeye aktarılan zamana bağlı olan aktif güç eğrisi	105
Şekil 6.26. ÇBAG'nin farklı hız değerlerinde reaktif güç ve güç katsayısının zamana göre değişimi.....	105
Şekil 6.27. Bulanık mantık denetleyici blok diyagramı.....	107
Şekil 6.28. Hata (e), hatanın değişimi (Δe) ve çıkış (Δu) için üyelik fonksiyonları	108
Şekil 6.29. Çıkış ölçeklendirme katsayısı kendinden ayarlamalı bulanık mantık denetleyici blok diyagramı.....	110
Şekil 6.30. α değeri için üyelik fonksiyonları	110
Şekil 6.31. Hazırlanan yazılımın blok diyagramı.....	111
Şekil 6.32. Bulanık mantık denetleyici kullanılarak gerçekleştirilen referans ve üretilen aktif güç eğrileri (benzetim)	112

Şekil	Sayfa
Şekil 6.33. Çıkış ölçeklendirme katsayısı kendinden ayarlamalı bulanık mantık denetleyici kullanılarak gerçekleştirilen referans ve üretilen aktif güç eğrileri (benzetim)	112
Şekil 6.34. Bulanık mantık denetleyici kullanılarak gerçekleştirilen referans ve üretilen aktif güç eğrileri (deneysel).....	113
Şekil 6.35. Çıkış ölçeklendirme katsayısı kendinden ayarlamalı bulanık mantık denetleyici kullanılarak gerçekleştirilen referans ve üretilen aktif güç eğrileri (deneysel)	114

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Deneysel kurulumun genel görünümü.....	66
Resim 5.2. Oluşturulan mekaniksel yapının görünümü.....	67
Resim 5.3. Tasarlanan LC filtre ve şok bobini.....	70
Resim 5.4. Tasarlanan gerilim ve akım ölçme kartlarının görünümü	71
Resim 5.5. Üç faz için tristör sürme devresinin görünümü.....	73

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
E_k	Havanın kinetik enerjisi (Nm)
m	Havanın kütleli debisi (kg/s)
V_r	Rüzgâr hızı (m/s)
P_r	Rotor gücü (Watt)
P_t	Türbinden elde edilen güç (Watt)
P_m	Mekaniksel güç (Watt)
S	Rüzgârın türbin kanatlarına yaptığı basınç (kgm/s ²)
C_p	Türbin verimi
ω_m	Mekaniksel hızın frekans değeri (rad/sn)
ω_1	Stator hızının frekans değeri (rad/sn)
ω_2	Rotor hızının frekans değeri (rad/sn)
f_1	Stator geriliminin frekansı (Hz)
f_2	Rotor geriliminin frekansı (Hz)
P_{max}	Şebekeye aktarılan maksimum güç (Watt)
S_{max}	Maksimum kayma değeri
E_1	Statorunda endüklenen elektromotor kuvvet (Volt)
E_2	Rotorda endüklenen elektromotor kuvvet (Volt)
I_s	Stator akımı (Amper)
I_r	Rotor akımı (Amper)
V_s	Stator gerilimi (Volt)
V_r	Rotor gerilimi (Volt)
R_s	Stator sargı direnci (Ohm)
R_r	Rotor sargı direnci (Ohm)
L_{s1}	Stator sargısının kaçak endüktansı (Henry)
L_{r1}	Rotor sargısının kaçak endüktansı (Henry)

Simgeler	Açıklama
L_m	Stator ve rotor arasındaki ortak endüktans (Henry)
P_s	Stator aktif gücü (Watt)
Q_s	Stator reaktif gücü (VAR)
δ	Stator gerilim vektörü ile stator emk vektörünün etkin değerleri arasındaki açı
P_r	Rotor aktif gücü (Watt)
P_T	Toplam aktif güç (Watt)
Ψ_s	Stator akı vektörü (Wb/tur)
Ψ_r	Rotor akı vektörü (Wb/tur)
Ψ_m	Mıknatıslanma akı vektörü (Wb/tur)
v_{sd}, v_{sq}	Stator geriliminin d-q bileşenleri, (Volt)
v_{rd}, v_{rq}	Rotor geriliminin d-q bileşenleri, (Volt)
i_{sd}, i_{sq}	Stator akımının d-q bileşenleri, (Amper)
i_{rd}, i_{rq}	Rotor akımının d-q bileşenleri, (Amper)
$\lambda_{sd}, \lambda_{sq}$	Stator akısının d-q bileşenleri, (Wb-tur)
$\lambda_{rd}, \lambda_{rq}$	Rotor akısının d-q bileşenleri, (Wb-tur)
ω_s, ω_r	Stator ve rotor döner alan hızları, (rad/s)
μ	Bulanık mantık üyelik derecesi
L_f	LC filtrenin endüktans değeri (Henry)
C_f	LC filtrenin kapasitans değeri (Farad)
L	Şok bobinin endüktans değeri (Henry)
k_p	PI denetleyicinin oransal katsayısı
k_i	PI denetleyicinin integral katsayısı
θ_s	Şebeke gerilim sinyalinin açısal pozisyonu
θ_r	Rotorun açısal pozisyonu
θ_{slip}	Rotor akım sinyalinin açısal pozisyonu

Kısaltmalar	Açıklama
ADC	Analog-sayısal dönüştürücü
ASSG	Alan sargılı senkron generatör
ASM	Asenkron motor
BMD	Bulanık mantık denetleyici
ÇBAG	Çift beslemeli asenkron generatör
DMSG	Daimi mıknatıslı senkron generatör
DA	Doğru akım
DGM	Darbe genişlik modülasyon
DSP	Digital Signal Processor (Sayısal işaret işleyici)
emk	Elektromotor kuvvet
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
IGBT	Insulated gate bipolar transistor
KABMD	Kendinden ayarlamalı bulanık bantık denetleyici
LSC	Line side converter (Şebeke Tarafı Dönüştürücü)
MSC	Machine side converter (Makine tarafı dönüştürücü)
PWM	Pulse width modulation (Darbe genişlik modülasyon)
PLL	Phase Locked Loop (Faz kilitli döngü)
PFC	Power factor correction (Güç katsayısı düzeltme)
PI	Proportional-Integral (Oransal-İntegral)
RSAG	Rotoru sargılı asenkron generatör
SKAG	Sincap kafesli asenkron generatör
THD	Total harmonic distortion (Toplam harmonik bozulumu)
VCO	Gerilim kontrollü osilatör

1. GİRİŞ

Dünyadaki enerji krizi ve enerji fiyatlarındaki yükselme, mevcut enerji kaynaklarına alternatif kaynaklar araştırmayı ve geliştirmeyi zorunlu bir hale getirmiştir. Özellikle çevre kirliliği ile ilgili problemler ve fosil yakıtların kısa bir süre sonra tükenecek olmasının verdiği endişe insanları yenilenebilir enerji kaynaklarına yönlendirmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları sürekliliği olan ve hiç bitmeyecekleri varsayılan kaynaklar olarak tanımlanmaktadır. Dünyanın artan enerji ihtiyacının temiz, ekonomik ve güvenli bir biçimde karşılanabilmesi için yapılan çalışmalar neticesinde yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi artmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgâr enerjisi diğer enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında; temiz, ham madde ve ulaştırma masrafı olmayan doğrudan doğadaki rüzgâr kullanılarak üretilen bir enerjidir. Ayrıca rüzgâr türbinin işletmeye alınması, inşaatın başlamasından ticari üretime geçişine kadar, üç ay gibi kısa bir sürede gerçekleştirilmektedir. İstenildiğinde kısa bir süre içinde sökülüp başka bir yere sorunsuz olarak parçalar halinde taşınabilmektedir. Ömrünü tamamlamış rüzgâr türbinlerinin söküm maliyetleri de yoktur. Çünkü sökülen türbinlerin hurda değeri söküm maliyetlerini kolayca karşılamaktadır. Rüzgâr türbin teknolojisindeki bu gelişmeler, elektrik enerjisi üretiminde kullanılan rüzgâr türbinlerinin kurulu güçlerinin yükselmesine ve bu sayede birim enerji maliyetinin de düşmesini sağlamaktadır. Bunun sonucu olarak, rüzgâr türbinlerinin elektrik enerjisi üretimindeki payı gün geçtikçe artmaktadır. Örneğin; şebeke bağlantısının zor veya mümkün olmadığı köyler, gemiler, baz istasyonları vb. gibi merkezlerin elektrik enerjisini karşılamak üzere lokal olarak çalışan generatörlere ihtiyaç duyulmaktadır. Önceleri bu merkezlerin elektrik enerjisi ihtiyaçları dizel motor ile sürülen senkron generatör uygulamaları ile karşılanırsa da son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmelere paralel olarak rüzgâr türbini ile sürülen generatör uygulamaları bu merkezlerin elektrik enerjisi ihtiyaçlarını karşılamada ön plana çıkmıştır.

Rüzgâr türbinleri, rüzgâr hızı esas alındığında, çalışma prensibine göre sabit hızlı ve değişken hızlı olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Sabit hızlı rüzgâr türbinleri rüzgâr hızının sürekli olarak belirli aralıkta ($\pm\% 1$) olduğu yerlerde kullanılmakta ve

doğrudan şebekeye bağlanmaktadır. Değişken hızlı rüzgâr türbinleri ise rüzgâr hızının değişken olduğu ($\pm\% 30$) yerler için uygundur ve bir şebeke arayüzü yardımıyla şebekeye bağlanmaktadır. Günümüzde kullanılan rüzgâr türbinleri çoğunlukla değişken hızlı olarak üretilmektedir. Çünkü rüzgârın sahip olduğu kinetik enerji sabit değildir ve rüzgârın sahip olduğu bu değişken enerjinin maksimum düzeyde çıkışa aktarılabilmesi için değişken hızlı rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır.

Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatör türlerinden biri olan Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG), senkron hızın $\pm\%30$ hız aralığında çalışabilme ve kullanılan güç elektroniği dönüştürücü gücünün, generatör gücünün $\%30$ oranında olması gibi avantajlarından dolayı son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır. ÇBAG stator ve rotor olmak üzere birbirinden elektriksel olarak yalıtılmış iki farklı sargıdan meydana gelmektedir. ÇBAG'nin stator sargıları şebekeye doğrudan bağlanırken rotor sargıları, çift yönlü akım akışının olabildiği gerilim kaynaklı iki eviriciden meydana gelmiş güç elektroniği dönüştürücüsü üzerinden şebekeye bağlanmaktadır. Rotor tarafındaki evirici, statorun aktif ve reaktif gücünü denetlemekte ve generatörün ihtiyacı olan reaktif gücü sağlamaktadır. Şebeke tarafındaki evirici ise, DA bara gerilimini sabit tutmaktadır.

Rüzgâr türbini ile sürülen ÇBAG uygulamaları özellikle son yıllarda literatürde oldukça geniş bir yer tutmaktadır. Yapılan çalışmaların bir bölümünde ÇBAG'nin modeli çıkartılarak farklı denetim yapıları sunulurken, bazı çalışmalarda ÇBAG'nin sensörsüz denetimi üzerinde durulmuştur. Şebeke bağlantılı ve şebeke bağlantısız olarak gerçekleştirilen bu çalışmaların büyük bir kısmı benzetim tabanlı olarak gerçekleştirilirken bazı çalışmaların da uygulamalı olarak gerçekleştirildiği görülmüştür. Aşağıda sunulan literatür taramasında şimdiye kadar yapılan bazı çalışmalar kısaca özetlenerek avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir. Daha sonra incelenen bu çalışmalarda görülen eksiklikler belirlenerek çözüm önerileri sunulmuştur.

Iwanski ve diğerlerinin gerçekleştirdiği çalışmada, şebeke bağlantısız çalışan ÇBAG için sensörsüz yeni bir denetim tekniği sunularak uygulaması gerçekleştirilmektedir. Sunulan bu denetim tekniği yardımıyla stator terminal geriliminin büyüklüğü ve

frekansı, rotor akımı denetlenerek sabit tutulmaktadır. Doğrudan gerilim denetim tekniği kullanılan çalışmada, pozisyon sensörüne ihtiyaç duyulmaması, sensör arızalarından kaynaklanan hataları da önlemektedir. Fakat pozisyon bilgisinin doğru tahmin edilebilmesi için ilave algoritmalara ihtiyaç duyulması bir dezavantaj olarak görülmektedir [1].

Arbi ve diğerlerinin yaptığı çalışmada ÇBAG'nin doğrudan sanal tork denetimi ve rotor akı denetimi birlikte gerçekleştirilerek, şebeke bağlantısı için yeni bir denetim yapısı sunulmaktadır. Bu denetim yapısında, PI denetim kullanılmayarak generatör parametrelerinden bağımsız bir denetim sağlandığı öne sürülmektedir. Ayrıca gerçekleştirilen denetim yapısında sadece şebeke gerilimi, rotor akımı ve rotor pozisyonu ölçülmektedir. Ancak, denetim algoritmasının FPGA tabanlı olması ölçülen değerler için ayrı bir ADC kartı kullanılmasını gerektirmektedir [2].

Dat ve diğerlerinin gerçekleştirdiği çalışmada, ÇBAG için yüksek performanslı ve kısa sürede gerçekleştirilebilecek sabit ve değişken hızlarda kullanılabilen iki farklı denetim tekniği sunulmaktadır. Histerisiz denetim tekniği, vektör denetim tekniği ile karşılaştırıldığında daha yumuşak şekilde şebekeye paralel bağlandığı ifade edilmektedir. Denetim algoritması Matlab&Simulink ortamında hazırlanırken, deney düzeneğinin denetimi Dspace DS1104 kartı yardımıyla gerçekleştirilmektedir [3].

Li ve diğerlerinin hazırladığı çalışmada, ÇBAG'nin stator-akı-döner düzlemindeki karakteristik çalışması incelenmiştir. Çalışmada, geleneksel yaklaşımlar karşılaştırıldıktan sonra; (1) ÇBAG'nin d-q referans düzleminde kararlı durum modeli, (2) stator-akı-döner düzleminde d-q denetim tekniği ile benzetim tabanlı karakteristik çalışması, (3) nümerik yaklaşım tekniği ile stator ve rotor devrelerinin enerji akış benzetimleri yapılmaktadır [4].

Chowdury ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, değişken rüzgâr hızlarında sürülen ÇBAG için vektör denetim yönteminin kullanımı açıklanmaktadır. Laboratuvar ortamında kurulan deney düzeneğinde rotor tarafı güç elektroniği dönüştürücü yapısı, stator-akı-yönlendirme tekniği ile denetlenirken, şebeke tarafı güç elektroniği dönüştürücü yapısı, vektör denetim tekniği ile denetlenmiştir. Yapılan deneyler

sonucunda önerilen sistemin birim güç faktöründe çalışma sağladığı böylece verimli bir şekilde rüzgâr enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü ifade edilmektedir. Ancak yapılan çalışmada şebekeye gönderilen akım harmoniklerinin incelenmemesi ve bu harmonik düzeylerinin belirsizliği sistem veriminin tam olarak hesaplanamadığını göstermektedir [5].

Babu ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG'nin rüzgâr türbin sistemlerindeki performansı üzerine bir çalışma sunulmaktadır. Bunun için, ÇBAG'nin kararlı ve geçici durum modelleri analitik olarak geliştirilerek, ÇBAG'nin Matlab-Simulink ortamında benzetimi yapılmaktadır. Bunun yanında, vektör denetim tekniği yardımıyla generatörün aktif ve reaktif güç denetimi gerçekleştirilerek ÇBAG'nin geçici ve kararlı durum performansları incelenmektedir [6].

Fadaeinedjad ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, üç benzetim programı “TurbSim, FAST ve Simulink” kullanılarak bir rüzgâr türbini; rüzgâr, mekaniksel ve elektriksel olarak modellenerek denetimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, benzetim sonuçlarına göre üç değişik parametrenin rüzgâr türbininin çalışmasını doğrudan etkilediği ileri sürülmüştür. Örnek olarak, elektriksel bir bozukluğun yüksek rüzgâr hızlarında türbin kulesinde titreşimlere sebep olduğu belirtilmektedir. Yapılan çalışma yardımıyla elektriksel ve mekaniksel modellemeler birlikte ele alınarak bunların rüzgâr türbini üzerindeki etkileri bütün olarak değerlendirilmektedir [7].

Shahnia ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG'nin PSCAD/EMTDC tabanlı benzetimi vektör denetim tekniği kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Dinamik rüzgâr değişimleri ve ÇBAG'nin şebeke bağlantısı için gerekli olan soft-starter yapısının hazırlanan benzetim çalışmasına eklendiği görülmektedir. Çalışmada, dinamik rüzgâr değişimlerinde ÇBAG'nin maksimum güç noktasını takip ettiği ve şebekeye yumuşak bir bağlantı yapıldığı belirtilmektedir. Ayrıca hazırlanan denetim yapısı yardımıyla (1) harmoniklerin yok edilerek enerji kalitesinin iyileştirildiği, (2) güç faktörünün düzeltilerek reaktif güç denetiminin gerçekleştirildiği ifade edilmektedir. Ancak yapılan çalışma benzetim tabanlı olduğu için, önerilen denetim yönteminin başarısı gerçek bir sistemde test edilememiştir [8].

Soens ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG'li rüzgâr türbin sisteminin elektriksel ve mekaniksel olarak kapsamlı bir modeli çıkartılarak benzetimi gerçekleştirilmektedir. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen eşitlikler yardımıyla birçok programlama dilinde sistemin benzetiminin gerçekleştirilmesinin mümkün olduğu ifade edilmektedir [9].

Wang ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG için üstel yaklaşım kuralları altında kayma-kipli değişken yapıları denetleyici sunularak benzetimi gerçekleştirilmiştir. Sunulan yeni denetim tekniği PI denetleyici ile karşılaştırıldığında, ÇBAG'nin dinamik performansının arttırıldığı ve yük momentindeki salınımların etkisinin azaltıldığı söylenmektedir. Ayrıca basit tasarım süreci, sunulan yeni denetim yapısının avantajı olarak ifade edilmektedir. Ancak yapılan çalışmanın benzetim tabanlı olması önerilen denetim yapısının uygulanabilirliği hakkında bilgi vermemektedir [10].

Joshi ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, rüzgâr türbinlerinin şebekeye paralel bağlanması için yeni bir denetleyici yapısı sunulmaktadır. Bu denetleyici yapısı yardımıyla, arıza akımları sınırlandırıldığı gibi gerilim dengesizliği de ortadan kaldırıldığı benzetim sonuçlarında ifade edilmektedir. Sonuç olarak sunulan bu yeni denetim yapısının ÇBAG veya sincap kafesli asenkron generatörlerin şebekeye paralel bağlanması için kullanışlı bir yöntem olduğu belirtilmektedir. Deneysel çalışma sonuçlarına yer verilmeyen bu çalışmada, önerilen denetim yapısının gerçek bir sistemde test edilememesi bir eksiklik olarak görülmektedir [11].

Hughes ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG güç sistem dengeleyicisi (GSD) olarak kullanılmaktadır. Bu GSD'nin ÇBAG kullanılan rüzgâr tarlalarında şebeke sönümlemesine önemli miktarda katkı sağladığı belirtilmektedir. Yapılan Eigen değer analizleri ve zaman-cevap benzetim çalışmaları sonucunda geliştirilen GSD'nin şebekenin dinamik ve geçici performanslarına önemli miktarda katkısı olduğu ifade edilmektedir [12].

Hokkanen ve diğerlerinin yaptığı kısa tarama çalışmasında, ÇBAG'nin genel benzetim modeli verilerek, değişken hızlı rüzgâr türbinleri üzerindeki rüzgâr gücü ve

şebeke bağlantısının etkisi incelenmektedir. Aynı zamanda, rüzgâr türbinleri için; atmosferik altyapı, akışkan dinamiği ve olasılıksal model gibi değerlendirmeler de bu çalışmada incelenmektedir [13].

Li ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, modern bir değişken hızlı rüzgâr enerji dönüşüm sisteminde kullanılan ÇBAG'nin geçici ve kararlı durum karakteristiği incelenmektedir. Geçici ve kararlı durum benzetim modeli PSpice yardımıyla gerçekleştirilerek, ÇBAG'nin tork-hız ve aktif-reaktif güç-hız karakteristiği incelenmiştir [14].

Jeong ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, değişken rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan ÇBAG için farklı denetleyici yapıları sunulmaktadır. Aktif ve reaktif güçlerin denetlenmesi için düzenlenmiş doğrudan güç denetimi ve kayma-kipli denetimle birlikte uzay vektör modülasyonu kullanılarak yeni bir denetim modeli sunulmaktadır. Kayma-kipli denetim modeli, düzenlenmiş doğrudan güç denetim modeli kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Böylece geleneksel alan yönlendirme denetim tekniğinde kullanılan düzlem dönüştürme ve akım denetleyicileri kullanılmadan bir güç denetleyicisi elde edildiği belirtilmiştir [15].

Davijani ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG'nin dinamik modeli sunularak, uzay vektör darbe genişlik modülasyon tekniği ile sürülen evirici yapısı ile birlikte benzetimi gerçekleştirilmiştir. Benzetim PSCAD/EMTDC programı yardımıyla hazırlanmıştır. ÇBAG'nin şebekeye bağlantı anındaki dinamik tepkisi ile normal olmayan durumlardaki (kısa devre) tepkisi incelenerek sunulmuştur [16].

Janssens ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG kullanılan rüzgâr türbin sistemlerinin aktif güç denetim teknikleri karşılaştırılmıştır. Literatürde çok sayıda aktif güç denetim tekniği bulunmasına karşın bu çalışmada yüksek ve düşük rüzgâr hızlarında, kanat açısı kontrolü yardımıyla aktif gücün denetimi en iyi yöntem olarak önerilmiştir [17].

Ko ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG'lerde gerilim ayarlaması için yeni bir reaktif güç denetim tekniği sunulmuştur. Ayrıca gerçekleştirilen denetim yapısı

yardımıyla uzak noktalardan sisteme müdahale edilerek çalışma durumu ve sınır değerler değiştirilebilmiştir. Detaylı bir model sunulması bu çalışmayı önemli kılmaktadır. Geliştirilen gerilim denetim yapısının yararlı ve diğer denetim yapıları ile karşılaştırıldığında maliyet veriminin yüksek olduğu açıklanmaktadır [18].

Tsourakis ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG kullanılan rüzgâr enerji üretiminin enterkonnekte sistemde salınım sönümlenmesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada, ÇBAG için genel yaklaşımın salınım sönümlenmesini arttırdığı öne sürülmüş, fakat farklı denetim yapıları kullanılarak bu etkinin azaltılabildiği de ifade edilmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada ÇBAG'nin güç sistem dengeleyicisi olarak etkisi incelenerek avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir [19].

Arbi ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, büyük çaplı şebekelerde yaşanan gerilim düşmesi anında, değişken hızlı rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan ÇBAG'nin analizi gerçekleştirilerek çözüm önerileri sunulmaktadır. Çalışmada arıza durumunda türbinin şebekeye bağlı kalması sağlanarak, şebekeye reaktif enerji gönderilerek yeni bir şebeke gereksinim kodu oluşturulmaya çalışılmıştır. Rüzgâr türbininin güç-hız karakteristiğinin dört farklı çalışma bölgesinde benzetim çalışmaları yapılmış ve çalışmada sunulan çözüm önerisinin verimli olduğu ileri sürülmüştür [20].

Hofmann ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, kanat açısı denetimli ÇBAG tabanlı 600 kVA gücündeki rüzgâr türbin sistemi incelenmiştir. Yeni bir denetim yapısı ve bazı özel teknikler kullanılarak enerji kalitesi iyileştirilmeye çalışılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, modern büyük güçlü bir rüzgâr türbin sisteminin temel ihtiyaçları doğrultusunda yapılan iyileştirme çalışmasının başarılı olduğu belirtilmektedir [21].

Poitiers ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, değişken rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan ÇBAG incelenmiştir. d-q referans düzlemine göre ÇBAG'nin matematiksel modeli çıkartılarak benzetimi gerçekleştirilmiştir. ÇBAG'nin stator devresinden şebekeye doğru olan güç akışının denetimi PI ve RST gibi iki farklı denetim yapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her iki denetim tekniğinin performansları; referans güç değerini izleme, ani hız değişimlerine tepkisi gibi karşılaştırmalar yapılarak gözlemlenmiştir. Sonuç olarak ani hız değişimlerinde RST

denetim yapısının daha verimli olduğu, generatör parametrelerinde yaşanan değişimlere de RST'nin daha dayanıklı olduğu belirtilmektedir. Ancak önerilen denetim yapısının, gerçek bir sistemde test edilememiş olması uygulanabilirliği hakkında bilgi vermemektedir [22].

Michalke ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG tabanlı rüzgâr tarlalarının denetimi ele alınmıştır. Büyük çaplı ÇBAG tabanlı rüzgâr tarlalarının, şebeke arızası durumundaki tepkileri ve şebekeyi dengeleyici yöndeki etkileri incelenmiştir. Benzetim çalışması DİG SILENT yazılımında hazırlanarak rüzgâr tarlasının, iletim hattının ve güç sisteminin bütün halinde modellenmesi sağlanmıştır. Sunulan denetim tekniği yardımıyla ÇBAG'li rüzgâr tarlalarının arıza durumunda güç sistemini dengeleyici yönde çalıştırdıkları ileri sürülmektedir [23].

Hughes ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG'nin güç sistemini desteklemesi için yeni bir denetim tekniği sunulmuştur. Bu denetim tekniği yardımıyla, ÇBAG'li rüzgâr tarlalarının, geleneksel enerji istasyonlarına çalışma ve denetim olarak uygun olduğu ileri sürülmektedir. Ayrıca gerçekleştirilen çalışmanın; şebeke destekleyici, güç sistem kararlı kılıcı ve şebeke kesintilerinde kısa süreli frekans desteği gibi yeteneklere de sahip olduğu belirtilmektedir [24].

Saidani ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, değişken rüzgâr hızlarında kullanılan ÇBAG için yeni bir denetim yapısı sunulmuştur. Hazırlanan denetim yapısında rüzgâr türbininden maksimum güç elde edilmeye çalışılmıştır. Geliştirilen maksimum rüzgâr gücü çıkarım algoritması, değişken rüzgâr hızlarında, maksimum rüzgâr türbin gücünü araştırarak bulan ve buna göre eviricileri denetleyen akıllı bir yapı olarak sunulmaktadır. Matlab/Simulink ortamında yapılan benzetim çalışmaları sonucunda, sunulan denetim modelinin verimli olduğu ileri sürülmektedir [25].

Rüzgâr enerji sistemlerinin performansı ağırlıklı olarak akım bilgisinin doğru olarak algılanmasına bağlıdır. Arızalanan akım sensörlerinden biri sistem performansının düşmesine neden olmaktadır. Ayrıca, arıza tespit edilemez ve kısa sürede düzeltilemez ise ÇBAG'nin şebekeden kopmasına neden olur. Arızanın etkisini azaltmak ve programlanmamış şebeke kopmalarını engellemek için, gerçek zamanlı

arıza tespiti ve bu durumda yeni bir denetim modeli geliştirmek gereklidir. Rothenhagen ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, akım sensöründeki arızayı tespit eden ve denetim döngüsünü bu yeni duruma uyarlayan bir denetim tekniği sunulmuştur. Arızasız durumda, ölçülen değerler yardımıyla ÇBAG vektör denetim tekniği ile denetlenmektedir. Sensör arızası oluştuğunda, arızalı ölçüm noktası tanımlanmakta ve denetim yapısı gözlemci çıkışını kullanarak kendini yeni duruma uyarlamaktadır. Yapılan benzetim çalışmaları sonucunda, önerilen denetim yönteminin sensör arızaları durumunda başarılı bulunduğu ileri sürülmektedir. Ancak sunulan yöntemin gerçek bir sistemde test edilmemiş olması bir eksiklik olarak görülmektedir [26].

Karimi ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, FPGA tabanlı şebeke tarafı dönüştürücüde yaşanabilecek akım sensörü arızalarına karşı yeni bir denetim tekniği sunulmuştur. Akım sensörü arıza tespiti, tahmin edici model yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Çalışmada şebeke tarafı dönüştürücünün giriş akım harmonikleri üzerine herhangi bir çalışma yapılmadığı görülmektedir. Arıza öncesi ve arıza sonrası akım harmonik düzeylerinin çalışmada sunulmaması bir eksiklik olarak görülmektedir [27].

Wang ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan ÇBAG'nin rotor tarafı evirici yapısı için yeni bir akım denetim yöntemi geliştirilmiştir. Önerilen denetim yöntemi, oransal denetim (P) ve şebeke frekansını ayarlamak için harmonik rezonans (R) ayarlayıcısından meydana gelmektedir. Tasarlanan ve optimizasyonu gerçekleştirilen PR denetleyici ile 1.5 MW gücünde ÇBAG'li bir rüzgâr türbininin, dengesiz şebeke koşullarında bir benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışması sonuçlarından, geliştirilen denetim yapısının, geçerli bir sistem olduğu ifade edilmektedir. Ancak deneysel çalışmalar yapılmadığı için geliştirilen sistemin başarısı benzetim çalışmaları ile sınırlı kalmaktadır [28].

Lara ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG'nin şebeke kesintileri ve şebeke desteği sırasında kararlı kılıcı olarak çalışması incelenmiştir. Ayrıca şebeke salınımlarını iyileştirebilmesi için yeni bir denetim stratejisi sunulmuştur. Senkron ve rüzgâr tarlası üretimine dayalı üç adet generatör ve şebeke modeli geliştirilmiş ve dinamik performansları incelenmiştir. Benzetim sonuçları verilerek, sunulan ÇBAG denetleyicisinin dinamik ve geçici durumlardaki performansları tartışılmıştır [29].

Zhi ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan ÇBAG için yeni bir doğrudan güç denetim tekniği sunulmuştur. İhtiyaç duyulan rotor gerilimi, her zaman periyodunca aktif ve reaktif güç hataları ihmal edilerek, doğrudan stator akısı, rotor konum bilgisi, aktif ve reaktif güç ve bunların hataları hesaplanarak bulunmaktadır. Sistemin güç veya akım döngüsü gerektirmediği, yapısının basit ve geçici durum performansının artırıldığı ifade edilmektedir. 2 MW gücündeki ÇBAG'li sistemin değişik aktif ve reaktif güç, generatör parametreleri ve rüzgâr hızına göre benzetimi gerçekleştirilerek performansı gözlemlenmiştir. Benzetim çalışmalarında stator ve rotor akımda harmonik bozulmaların varlığı görülmektedir. Ancak çalışmada, akımlarda bulunan harmonik bozulmaların büyüklükleri standartlarda belirtilen limitler ile karşılaştırılmamıştır. [30].

Mahi ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, değişken rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan ÇBAG için doğrudan tork denetim modeli sunulmuştur. Doğrusal olmayan durum-geri besleme denetim yapısı kullanılarak referans tork belirlenmiş ve böylece ÇBAG tarafından üretilen elektrik enerjisi izleme hataları azaltıldığı ifade edilmektedir. Benzetim çalışması sonuçlarına göre, geliştirilen denetim yapısı başarılı olarak sunulmaktadır. Bu çalışmada benzetim tabanlı sunulması önerilen denetim yapısının başarısını gerçek bir sistemle doğrulamamaktadır [31].

Melicio ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan ÇBAG'nin kararlı ve geçici durum analizleri yapılmıştır. Benzetim çalışmaları sonucunda rüzgâr enerji üretiminde ÇBAG'nin avantaj ve dezavantajları verilerek tartışılmıştır. [32].

Gallardo ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG için aktif rotor koruması bulunan ve şebeke-rotor arası bağlantısı gerilim beslemeli evirici yapısı ile sağlanan bir test düzeneği gerçekleştirilmiştir. Şebeke ve rotor tarafı eviricilerin denetimi için vektör denetim tekniği kullanılan çalışmada, denetim kartı DSP ve FPGA den meydana gelmektedir. Ayrıca gerçekleştirilen sistemin bilgisayardan izlenebilmesi için gerçek zamanlı bir izleme yazılımı hazırlanmıştır. Bu yazılım yardımıyla ÇBAG'ye ait parametreler izlenebilmiştir [33].

Xu ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, dengesiz şebeke koşullarında ÇBAG'nin analizi gerçekleştirilerek, dengesiz şebeke koşullarında çalışmaya uygun denetleyici modeli geliştirilmiştir. ÇBAG'nin modeli pozitif ve negatif senkron referans düzlemine göre sunulmuştur. Stator aktif-reaktif gücünde ve generatör torkunda yaşanan değişimler gerilim ve akımın negatif bileşenleri tarafından tanımlanmıştır. Hazırlanan denetim modeli PSCAD/EMTDC programı yardımıyla 2-MW gücündeki bir rüzgâr enerji sistemine uygulanarak benzetim sonuçları incelenmiştir. Sonuç olarak, sunulan ÇBAG denetim modeli yardımıyla şebeke dengesizliği süresince stator akımındaki dengesizlik azaltılarak, tork ve güçte yaşanan dalgalanmaların minimize edilmesi avantaj olarak sunulmaktadır. Ancak denetim modelinin gerçek bir sisteme uygulanmaması ve gerçek bir sistemdeki etkisi incelenmemesi bir eksiklik olarak görülmektedir [34].

Ekanayake ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, rüzgâr türbin sistemlerinde kullanımı yaygınlaşan ÇBAG'nin dinamik modeli sunularak denetimi ve koruma devreleri incelenmiştir. Dinamik modeli üzerinden benzetimi gerçekleştirilen ÇBAG'nin rüzgâr tarlalarındaki ve değişik şebeke bozuklukları altındaki davranışları gözlemlenmiştir [35].

Değişken hız, sabit frekansa sahip rüzgâr enerji üretim sistemlerinde oldukça yaygın kullanılan ÇBAG için vektör denetim algoritması kullanılması maksimum rüzgâr enerjisi kullanımı açısından iyi performanslar vermektedir. Geleneksel vektör denetim yapısı şebeke normal koşullarında olduğu sürece çok iyi sonuçlar vermektedir. Ancak, şebeke bozulmaları oluştuğunda (şebeke gerilimi düşmesi veya yükselmesi, vb.) bu denetim yapısının performansı düşmekte ve rotor devresi aşırı akım çekmektedir. Bing ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, şebeke bozulmaları sırasında vektör denetim yapısının eksikliklerini giderebilecek iki farklı denetim yapısı geliştirilerek benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen denetim yapılarında rotor akımı, iç model denetim yöntemi kullanılarak otomatik olarak denetlenmektedir. Yapılan çalışmada, benzetim sonuçlarına göre sunulan denetim yapılarının şebeke bozukluğu sırasında iyi sonuç verdiği ileri sürülmektedir [36].

Xu'nun yaptığı bu çalışmada, dengesiz şebeke koşulları altında ÇBAG tabanlı rüzgâr enerji üretim sistemlerinin çalışması ve denetimi incelenmiştir. ÇBAG sistemlerinin dengesiz şebeke gerilimi altında davranışı analiz edilmiş ve çeşitli denetim teknikleri sunularak tartışılmıştır. Ana denetleyici içerisine yeni bir rotor akım denetim yapısı yerleştirilmiş ve böylece yardımcı bir denetleyici geliştirilmiştir. Geliştirilen denetleyicinin PsCAD yazılımı kullanılarak benzetimi gerçekleştirilmiştir. Benzetim sonuçları, geliştirilen denetleyici yapısının dengesiz şebeke koşulları altında başarılı olduğunu göstermektedir [37].

Marques ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG'nin rotor konum bilgisinin algılanması için basit bir pozisyon sensörsüz çalışma sunulmuştur. Bu çalışmanın ana konusu; rotor akımının güncel ve tahmin edilen büyüklüklerinin rotor referans düzlemine göre karşılaştırılması olarak açıklanmıştır. MRAS yöntemine benzeyen bu yöntemde PI yerine histerisis denetleyici kullanılmaktadır. Böylece, denetleyici için parametre belirlenmesine gerek kalmadığı ifade edilmektedir [38].

Schmidt ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG için alan yönlendirmeli akım vektör denetim yapısı sunulmuştur. Şebeke tarafı evirici yapısı birim güç faktöründe ve sinüsoidal biçimli hat akımı sağlamaktadır. Rotor tarafı evirici yapısının denetimi sonucunda stator akımı birim güç faktöründe olmakta ve sinüsoidal biçimli bir akım şebekeye enjekte edilmektedir. Böylece, enerji kalitesini bozmadan bir denetim sağlandığı bu denetim yapısı yardımıyla stator akımındaki dalgalanmaların azaltıldığı benzetim sonuçları ile açıklanmaktadır [39].

Davijani ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG için bulanık mantık tabanlı bir denetleyici yapısı sunulmuştur. Rotor tarafı evirici yapısı bulanık mantık denetleyici yapısı ile denetlenerek aktif güç denetimi ile birlikte rüzgâr türbininin gerilim regülasyonu yapılmıştır. Benzetim çalışmaları PsCAD/EMTDC ve Matlab programları kullanılarak hazırlanmıştır. Sistemin benzetimi PsCAD yardımıyla hazırlanırken bulanık mantık denetleyici yapısı Matlab programında hazırlanmıştır. Benzetim sonuçlarına göre geliştirilen denetleyici performansının yüksek olduğu ifade edilmektedir [40].

Khalik ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG'nin şebekeye paralel bağlanması için yeni bir senkronizasyon algoritması PsCAD/EMTDC yazılımı yardımıyla hazırlanarak sunulmaktadır. ÇBAG'nin değişken rüzgâr hızlarındaki denetimi stator akı yönlendirmeli vektör denetim tekniği kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Generatör uyarım akımının büyüklüğü denetlenerek statorda üretilen gerilimin şebeke gerilimine eşitlenmesi sağlanmaktadır. Şebeke ve generatör faz açılarının eşitliği için ise faz kilitli döngü kullanılmaktadır [41].

Chandrasena ve diğerlerinin yaptığı bu çalışmada, ÇBAG'nin şebeke tarafı evirici yapısı için yeni bir denetleyici yapısı sunulmuştur. Geliştirilen denetleyicinin PsCAD/EMTDC yazılımı yardımıyla benzetimi gerçekleştirilerek denetleyici performansı gözlenmiştir. Ancak şebeke tarafı güç elektroniği dönüştürücü yapısının denetimi sırasında şebekeden çekilen akım harmoniklerinin analizi gerçekleştirilmemesi bir eksiklik olarak görülmektedir [42].

Tremblay ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG'li rüzgâr türbin sisteminin FACTS içerisindeki yeteneği sunulmaktadır. Benzetim modeli hazırlanan sistemde, şebeke tarafı dönüştürücü yapısı paralel aktif filtre olarak kullanılmaktadır. Böylece şebeke tarafı dönüştürücü, güç katsayısının düzeltilmesi ve harmonik düzenleyici olarak çalışması sağlanmaktadır. Şebeke tarafı dönüştürücü yapısının denetimi için vektör denetim tekniği kullanılmaktadır. Benzetim sonuçlarına göre, şebeke tarafı dönüştürücü yapısının aktif filtre olarak kullanılması ile harmonik bileşenlerin azaltıldığı ve güç katsayısının birim değere yaklaştırıldığı ifade edilmektedir [43].

Hu ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, dengesiz şebeke koşullarında ÇBAG için yeni bir denetim yapısı sunulmaktadır. Şebeke ve rotor tarafı evirici yapılarının denetimi dengesiz şebeke koşullarında düzenli olarak denetlenmiştir. Dengesiz besleme gerilimi altında rotor tarafı evirici yapısı denetlenerek torkta yaşanabilecek salınımlar önlenmiştir. Stator devresinden alınan aktif güçte yaşanabilecek dalgalanmalar ise şebeke tarafı evirici yapısının denetlenmesiyle engellenmiştir. Şebeke ve rotor tarafı evirici yapısının denetlenmesinde oransal integral denetim (PI) ve rezonans (R) denetim tekniği birlikte kullanılmıştır. Benzetim çalışması 1.5 MW gücündeki bir

ÇBAG sistemi üzerinde test edilirken deneysel çalışma 1.5 kW gücündeki bir ÇBAG üzerinde test edilmektedir [44].

Francois ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG' li rüzgâr türbin sistemlerinde düşük gerilim ve yüksek rotor akımı sırasında evirici yapılarını korumak amacıyla rotor tarafı koruması olarak bilinen Crowbar koruması geliştirilmiştir. Ayrıca basit bir mıknatıslanmayı giderici yöntem kullanılarak geçici akım dalgalanmaları azaltılmıştır. Geliştirilen Crowbar koruması yardımıyla aşırı rotor akımında, rotor sargıları kısa devre edilerek evirici yapısı rotordan ayrılmıştır. Bu sayede eviricilerin zarar görmesi önlenmektedir [45].

Gagnon ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, rüzgâr türbini ile sürülen ÇBAG'nin modeli ve gerçek zamanlı benzetimi gerçekleştirilerek sunulmuştur. Benzetim Matlab/Simulink/SimPowerSystems yazılımı kullanılarak hazırlanmıştır. Simulink Real-Time Workshop yazılımı yardımıyla kodlar üretilerek Hypersim sayısal gerçek-zamanlı simülatöre gönderilerek sistemin gerçek zamanlı benzetimi yapılmıştır [46].

Babypriya ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG kullanılarak rüzgâr enerji dönüşüm sisteminin kararlı durum analizi Matlab programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Benzetim analizleri çeşitli ÇBAG karakteristiklerine göre gerçekleştirilerek incelenmiştir [47].

Cardenes ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, şebeke bağlantısız çalışan ÇBAG'nin MRAS gözlemci kullanılarak sensörsüz denetimi gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak gerçekleştirilen vektör denetimli şebeke bağlantısız ÇBAG'li sistem ile MRAS gözlemci analiz edilmiştir. Geliştirilen MRAS gözlemci tekniği burada sadece şebeke bağlantısız uygulamaya yönelik olsa da, ÇBAG'li diğer sistemlere de uygulanabilirliği belirtilmiştir. Geliştirilen sensörsüz denetim tekniği geçici ve kararlı durum altında deneysel olarak test edilmiştir [48].

Salman ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, şebeke bağlantılı ÇBAG'nin benzetim çalışması sunulmuştur. Rotor ve şebeke tarafı eviricilerin ikisi de sinüsoidal PWM tekniği ile sürülmüştür. Stator akı yönlendirmeli vektör denetim tekniği her iki

eviricinin denetiminde kullanılmıştır. Böylece bağımsız olarak aktif ve reaktif güçler denetlenebilirken DA hat gerilimi sabit tutulmuştur. Ayrıca vektör denetleyicilerin senkronizasyonunu ayarlamak için denetim yapısına İç model denetim yaklaşımı eklenmiştir [49].

Shen ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG için faz kilitleme döngüsü prensibinin eklendiği γ - δ düzlemini izleyici ayrıştırılmış P-Q denetim tabanlı yeni bir sensörsüz denetim modeli sunulmuştur. Benzetim sonuçları bu denetim modelinin ÇBAG'li rüzgâr türbinlerine uygulanabilir olduğunu göstermiştir [50].

Wegener ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, yaklaşık 30 kW gücündeki bir ÇBAG'nin modifiye edilmemiş düşük maliyetli bir evirici ile nasıl çalıştırılacağı sunulmuştur. Generatörün stator sargıları doğrudan şebekeye bağlanırken, rotor sargıları iki adet standart düşük maliyetli gerilim kaynaklı evirici yapısıyla şebekeye bağlanmıştır. Test laboratuvarında kurulan, deneysel düzenek sistemin küçük güçlü rüzgâr türbin sistemleri için düşük maliyetli bir çözüm olduğu ileri sürülmektedir [51].

Lara ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, şebeke arızaları durumunda ÇBAG rotor koruma devresinde yer alan dirençlerin tasarımının değişik denetleyiciler altında en iyilenmesi çalışması yapılmıştır. Rotor koruma devresinde yer alan dirençlerin değeri ÇBAG'nin rotor akımını, reaktif çıkış gücünü ve elektriksel torkunu etkilediği görülmektedir. Burada benzetim çalışmaları gerçekleştirilerek en iyi rotor koruma direnç değeri seçimi gerçekleştirilmiştir [52].

Moursi ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan ÇBAG'nin stator geriliminin izlenmesi ve denetiminin en iyilenmesi üzerine bir çalışma sunulmuştur. Altı adet ÇBAG tabanlı rüzgâr türbin sisteminin benzetimi gerçekleştirilerek kararlı durum ve ani yük değişimlerinde sistem performansı izlenmektedir. Benzetim sonuçları, geliştirilen bu denetim yapısının STATCOM gibi FACTS cihazları üzerinde gerilim regülasyonunu ve reaktif güç kompanzasyonunu başarılı şekilde gerçekleştirdiği ileri sürülmektedir [53].

Iwanski ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, rotor tarafı güç elektroniği dönüştürücüsünün denetimine faz kilitli döngü eklenerek ÇBAG'nin şebekeye senkron olması sağlanmaktadır. ÇBAG. şebekeye paralel bağlanmadan önce, ÇBAG'nin çıkış gerilimi otomatik olarak şebeke gerilimi ile senkron olacak şekilde senkron döner düzlemini takip etmektedir. Yapılan çalışmada senkron, senkron altı ve senkron üstü hız değerlerinde ÇBAG'nin şebekeye paralel bağlanmasının mümkün olduğu ileri sürülmektedir. Ancak generatörün, şebeke ile paralel bağlanması anında akımda darbeler meydana geldiği yapılan uygulama sonuçlarında görülmektedir [54].

Almeida ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG'nin frekans ayarını sağlaması için yeni bir denetim yapısı sunulmuştur. Sunulan denetim yapısı, aktif güç denetim döngüsüne, rotor akım denetleyici döngüsü eklenmesiyle elde edilmiştir. Uygulama sonuçlarına yer verilmeyen çalışmada benzetim sonuçlarına göre geliştirilen denetim yapısının başarılı olduğu öne sürülmektedir [55].

Kayıkcı ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG için alternatif bir gerilim denetim stratejisi sunularak performansı karşılaştırılmıştır. Rotor ve şebeke tarafı güç elektroniği dönüştürücü yapılarının gerilim denetim yapıları incelenerek reaktif güç denetimi için farklı öneriler sunulmuştur. Ayrıca DIgSILENT yazılımı kullanılarak sistemin benzetimi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar verilmiştir. Bu çalışmada da uygulama sonuçlarına yer verilmemesi önerilen denetim stratejisinin uygulanabilirliği hakkında bilgi vermemektedir [56].

Morren ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG kullanılan rüzgâr türbin sistemlerinde yaşanan şebeke kesintileri ele alınmaktadır. Şebeke kesintileri sırasında ÇBAG'nin davranışları ele alınarak şebeke kesintileri sırasında ortaya çıkan sorunlar için çözüm önerileri sunulmaktadır. Çözüm önerileri arasında; aşırı rotor akımını sınırlayacak ve güç elektroniği dönüştürücü yapılarını koruyacak sistemler yer almaktadır [57].

Mwinyiwiwa ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG'nin P-Q denetiminin bağımsız olarak yapılabilmesi için, faz kilitli döngü kullanılmaktadır. ÇBAG'nin P-Q

denetiminin gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan rotor konum bilgisi, faz kilitli döngü yardımıyla elde edilerek rotor pozisyonu ve hızı bulunmaktadır. Faz kilitli döngü, generatör parametrelerinden bağımsız olduğu için geliştirilmesinin diğer denetim tekniklerine göre daha basit olduğu ileri sürülmektedir. Ancak yapılan benzetim ve uygulama sonuçlarında sunulan denetim tekniğinin güç kalitesi üzerindeki etkisi incelenmemiştir. Ayrıca üretilen aktif ve reaktif güç değerlerinde referans güç değerlerine göre salınım bulunmaktadır [58].

İskender ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, değişken hız (senkron altı ve senkron üstü şaft hızlarında), sabit frekans ve sabit gerilim altında çalışan rüzgâr türbini ile sürülen ÇBAG'nin kararlı durum karakteristikleri incelenmiştir. Rüzgâr türbini ve ÇBAG'nin matematiksel modelleri zaman ekseninde ayrı ayrı elde edilmiştir. Sabit olmayan rüzgâr hızı ve sistem kısıtlamaları düşünülerek, generatörden maksimum toplam çıkış gücü elde etmek için bir bulanık mantık denetleyici tasarlanmıştır. Ayrıca, benzetim çalışması sonuçları ile laboratuvar ortamında hazırlanarak yapılan deneysel çalışma sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonuçları, bulanık mantık denetim yöntemi kullanılarak rüzgâr türbinine bağlı bir ÇBAG'den maksimum çıkış gücü elde edilebileceği ileri sürülmüştür. Ancak gerçekleştirilen sistemin güç elektroniği yapısında tristörlerin kullanılması ve rotor akımının harmonikli olması gerçekleştirilen sistemin, güç kalitesini olumsuz yönde etkilediği benzetim ve uygulama sonuçlarında görülmektedir [59].

Yang ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG'nin sensörsüz vektör denetimi için hız uyarlamalı akı gözlemci modeli sunulmuştur. Gözlemci kazancı kararlılık analizine göre seçilmiştir ve doğrusallaştırılmış kapalı döngü gözlemci modeli yardımıyla doğrulanmıştır. Uygulama sonuçlarına yer verilmeyen çalışmada, benzetim sonuçlarına göre, önerilen sensörsüz denetim yapısının kararlı ve geçici durum performansları gözlenmiş ve bu denetim yapısının kullanılabilirliği test edilmiştir [60].

Shen ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, ÇBAG'nin rotor konumu, faz kilitli döngü kullanılarak tespit edilmiştir. Böylece ÇBAG'nin maksimum güç noktası takibi takometre, mutlak konum algılayıcısı veya anemometre kullanılmadan

gerçekleştirilmektedir. Faz kilitli döngünün, parametreden bağımsız olması ve sadece çalışma anındaki mıknatıslanma endüktansının bilinmesi gerekliliği sistemin en büyük avantajı olarak sunulmaktadır. Ancak yapılan benzetim ve uygulama sonuçlarında sunulan denetim tekniğinin güç kalitesi üzerindeki etkisi incelenmemiştir. Ayrıca üretilen aktif ve reaktif güç değerlerinde referans güç değerlerine göre salınım bulunmaktadır [61].

Margaris ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, değişken rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan ÇBAG'nin temel çalışma karakteristiği Matlab/Simulink programı yardımıyla sunulmaktadır. Ayrıca ÇBAG'nin aerodinamik yapısının detaylı matematiksel modeli çıkartılarak kararlı durum analizi de yapılmıştır [62].

Gaillard ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, değişken hızlı rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan ÇBAG'nin eşzamanlı olarak enerji üretimi ve harmonik düzenleyici olarak kullanılmasına yeni bir yaklaşım sunulmaktadır. Yeni denetim yapısı yardımıyla ÇBAG'nin aktif ve reaktif enerji üretmesi sağlanmış ayrıca ÇBAG'nin aktif filtre olarak kullanılması da çalışmada önerilmektedir [63].

Ling ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, gemi dizel motoru tarafından sürülen ÇBAG'nin vektör denetim tekniği açıklanmıştır. Geliştirilen bu sistem yardımıyla şebeke bağlantısız yükler beslenmektedir. Yük değişimlerine veya dizel motor hızındaki değişimlerden etkilenmeden çalışabilmesi için stator akı yönlendirmeli vektör denetim yapısı kullanılmaktadır [64].

Tapia ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, rüzgârdan elde edilen gücün maksimum elektriksel güce dönüştürülebilmesi için ÇBAG'li rüzgâr tarlalarında aktif güç regülasyonu için iki denetim yapısı geliştirilmiştir. Benzetimi hazırlanan sistemden elde edilen verilere göre geliştirilen denetim yapısı değişik bölgelerde çalışan gerçek rüzgâr türbinlerine uygulanarak etkinliği gözlemlenmiştir [65].

Babu ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, rüzgâr türbini ile sürülen ÇBAG'nin şebekeden koptuğu andaki geçici durum davranışları incelenmektedir. Benzetim çalışmalarında generatör belirli bir hızda dönerken stator devresi şebekeden

ayrılmaktadır. Bu anda rotor devresi, rotor tarafı dönüştürücü yardımıyla kayma frekans gerilimi ile uyarılmış ve sonuçlar gözlemlenmiştir [66].

Qiao ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, değişken hızlı rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan ÇBAG için maksimum güç noktasını takip eden sensörsüz bir denetim modeli sunulmaktadır. Bu denetim modelinde gauss-radyal ağ fonksiyonu kullanılarak, rüzgâr hızının doğru şekilde tahmin edildiği öne sürülmektedir. Hazırlanan denetim modelinin benzetimi gerçekleştirilerek 3,6 MW gücündeki bir rüzgâr türbinine uygulanmaktadır. Benzetim çalışmalarında rüzgâr hızının, başarılı olarak tahmin edildiği görülmektedir. Ayrıca küçük ölçekli bir deneysel kurulum gerçekleştirilerek denetim modelinin etkisinde gözlemlenmiştir. Benzetim çalışmalarının aksine, deneysel çalışmalarda tahmin edilen hızda salınımlar meydana geldiği görülmektedir [67].

Literatür taraması incelendiğinde, ÇBAG ile ilgili yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunun benzetim tabanlı olduğu ve çalışmalarda önerilen denetim yapılarının uygulanabilirliğinin gerçek bir sistemde test edilmediği görülmektedir. Ayrıca ÇBAG'nin denetimi için gerekli olan güç elektroniği yapılarının birlikte değil, ayrı ayrı ele alındığı yapılan literatür taramasında ortaya konulmuştur. Literatür taraması sonucunda konu ile ilgili görülen eksiklikler aşağıda sunulmuştur.

Literatürde şebeke tarafı güç elektroniği dönüştürücü yapısının denetimi sırasında şebekeden çekilen akım harmoniklerinin dikkate alınmadığı görülmüştür. Oysa şebekeden çekilen akım harmoniklerinin ilgili standartları (IEC 61000-4-7, IEEE 1547) karşılama zorunluluğu bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde senkron altı hız değerlerinde şebeke tarafı güç elektroniği dönüştürücüsü yerine kontrolsüz doğrultucu kullanıldığı görülmektedir. Bunun sonucu olarak şebeke tarafı dönüştürücünün şebekeden çekeceği akım harmonikleri standartları karşılayamayacağı için enerji kalitesini olumsuz yönde etkileyecektir. Bu durum literatürde tespit edilen eksikliklerden biridir.

ÇBAG'nin şebekeye enerji gönderebilmesi için şebekeye paralel bağlanması gerekmektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde paralel bağlanma işleminin

kullanıcılar tarafından manuel olarak yapıldığı ve paralel bağlanma sırasında akımda dalgalanmaların meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca şebeke ile paralel bağlanmayı otomatik olarak gerçekleştirecek bir sistemin literatürde yer almaması bir başka eksiklik olarak görülmektedir.

Rotor tarafı dönüştürücünün denetimi için literatürde sunulan denetim yapılarının büyük çoğunluğu ÇBAG'nin matematiksel modeline bağlı olarak tasarlanan ve sabit kazançlı denetleyicilerden oluşmaktadır. Bunun sonucu olarak sabit kazançlı bir denetleyicinin farklı hız ve şebeke koşullarında aynı tepkiyi vermesi beklenmemektedir. Sabit kazançlı denetleyici ile kontrol edilen sistemler daha önceden belirlenen çalışma noktasında çalıştığında kabul edilebilir bir performans elde edilmektedir. Ancak sistem parametrelerinin değişimi nedeniyle farklı çalışma noktaları arasında geçişler söz konusu olduğunda, elde edilen geçici durum performansı için aynı şeyleri söylemek mümkün değildir. Özellikle rüzgâr türbinlerinin dolayısıyla bu türbinleri denetleyen güç elektroniği yapılarının çalışma noktaları, rüzgâr hızı gibi doğal nedenlere bağlı olarak sürekli değişmektedir. Dolayısıyla rotor tarafı dönüştürücünün denetimi için sabit kazançlı denetleyici yerine değişen şartlara göre uyarlanabilen denetleyici kullanılması daha uygun olacaktır.

Literatür taraması sonucu yukarıda özetlenen eksikliklere çözüm getirebilmek amacıyla yapılan bu tez çalışmasında aşağıdaki öneriler sunulmuştur.

Rotor tarafı dönüştürücünün ihtiyacı olan DA bara gerilimi, şebeke tarafı dönüştürücü yardımıyla sağlanmaktadır. Uygulamada şebeke tarafı dönüştürücünün şebekeden çektiği akım harmoniklerinin THD değerinin standartlar içerisinde tutulması en büyük sorun olarak görülmektedir. Yapılan bu çalışmada, literatürde yer alan çalışmalardan farklı olarak, senkron altı hız değerlerinde şebeke tarafı dönüştürücü üç fazlı PWM'li kontrollü doğrultucu olarak çalıştırılmıştır. Böylece doğru akım bara geriliminin sabit tutulmasının yanında, şebekeden çekilen akım harmoniklerinin standartlarda belirtilen sınırlar içerisinde kalması sağlanmıştır. Ayrıca şebeke tarafı dönüştürücünün birim güç faktöründe çalışması sağlanarak, şebekeden reaktif güç çekilmemiştir.

ÇBAG'nin şebekeye enerji gönderebilmesi için paralel bağlanma gerçekleştirilmelidir. Bu çalışmada, ÇBAG stator geriliminin, şebeke gerilimi ile senkronizasyonu için faz kilitli döngü (PLL) kullanılmıştır. Böylece farklı hız değerlerinde şebekeye paralel bağlanma başarılı şekilde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, ÇBAG'nin hızı standartlarda belirlenen hız değerinin altına düştüğünde, paralel bağlanma otomatik olarak sonlandırılarak sistem güvenliği artırılmıştır. Buna ek olarak, paralel bağlanma işlemi LabVIEW programında hazırlanan arayüz programı tarafından otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Böylece kullanıcı hatalarından kaynaklanan yanlış paralel bağlanmaların önüne geçilerek literatürde yer alan çalışmalardan daha güvenli bir sistem elde edilmiştir.

Sabit kazançlı denetleyici ile kontrol edilen sistemler daha önceden belirlenen çalışma noktasında çalıştığında kabul edilebilir bir performans elde edilmektedir. Ancak sistem parametrelerinin değişimi nedeniyle farklı çalışma noktaları arasında geçişler söz konusu olduğunda elde edilen geçici durum performansı için aynı şeyleri söylemek mümkün değildir. Özellikle rüzgâr türbinlerinin dolayısıyla bu türbinleri denetleyen güç elektroniği yapılarının çalışma noktaları, rüzgâr hızı gibi doğal nedenlere bağlı olarak sürekli değişmektedir. Bu nedenle bu tez çalışmasında, ÇBAG'nin aktif güç denetimi için sabit kazançlı bir denetleyici yerine değişen şartlara göre adaptif yapıda bir denetleyici sunulmuştur.

Yapılan tez çalışması yedi bölümden oluşmaktadır. Tezin ikinci bölümünde rüzgâr enerjisi ve rüzgâr türbin teknolojileri hakkında bilgiler verilmiştir. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatörler ve şebeke arayüzleri üzerinde durulmuş ve bu yapılar incelenmiştir.

Üçüncü bölümde Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) detaylı olarak ele alınmıştır. Bu bölümde ÇBAG'nin matematiksel modeli çıkarılarak çalışma durumları ile birlikte aktif ve reaktif güç karakteristiği farklı kayma durumları için incelenmiştir.

Dördüncü bölümde, Bulanık Mantık denetleyiciler ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bulanık mantığın yapısı, üyelik fonksiyonları, vb. özellikleri açıklanmıştır.

Beşinci bölümde ise deneysel çalışmalar için gerçekleştirilen sistemin tasarımı anlatılmıştır. Burada; çift yönlü evirici yapısı, akım ve gerilim ölçme kartları, sayısal işaret işleyiciler (DSP), veri toplama kartı ve hazırlanan bilgisayar arayüz programı hakkında detaylı bir inceleme yapılmıştır.

Altıncı bölümde gerçekleştirilen benzetim ve deneysel çalışmalar sırası ile verilerek benzetim ve deneysel çalışma sonuçları karşılaştırılmıştır.

Yedinci bölüm olan sonuç ve öneriler bölümünde ise gerçekleştirilen sistemden elde edilen sonuçlar açıklanmış ve bu sonuçlara göre öneriler sunulmuştur.

2. RÜZGÂR TÜRBİN SİSTEMLERİ

Rüzgâr türbin sistemleri, rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Bu sistemlerde; rüzgârın sahip olduğu kinetik enerji kanatlar yardımıyla mekanik enerjiye dönüştürülmekte, mekanik enerji ise kanatların döndürdüğü generatörler yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Bu bölümde rüzgârın kinetik enerji denkleminde yola çıkarak rüzgâr türbinin maksimum verim değeri hesaplanmıştır. Ayrıca rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan generatör yapıları ayrıntılı olarak incelenmiş ve çift beslemeli asenkron generatör diğer generatör türleri ile karşılaştırılmıştır.

2.1. Rüzgâr Enerjisi

Diğer akışkanlarda olduğu gibi havanın da bir kinetik enerjisi bulunmaktadır. V_r hızı ile hareket eden m kütlelerine sahip havanın kinetik enerjisi;

$$E_k = \frac{1}{2} m V_r^2 \quad [\text{Nm}] \quad (2.1)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Hareketli hava kütlesi, kanat süpürme alanı A olan bir rüzgâr türbininin pervanesine dikey yönde çarptığında, hava kütlelerinde bulunan kinetik enerjinin bir kısmı frenlenir ve frenlenen enerji türbin kanatlarının çalıştırılmasında kullanılır. Türbin kanatlarına V_r hızı ile çarpan ρ_h yoğunluğundaki havanın kütleli debisi;

$$m = \rho_h V_r A \quad [\text{kg/s}] \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilir.

Güç birim zamanda yapılan iş olarak tanımlandığından, rüzgârın iş yapabilme yeteneği;

$$P_r = \left(\frac{1}{2} m V_r^2 \right) / t \quad [\text{Nm/s}] \quad (2.3)$$

bağıntısı ile gösterilmektedir. $dm/dt=m$ şeklinde ifade edilip, m yerine (2.2) numaralı eşitlik yazılırsa, rüzgârdan elde edilebilecek teorik güç aşağıdaki şekilde yazılabilir.

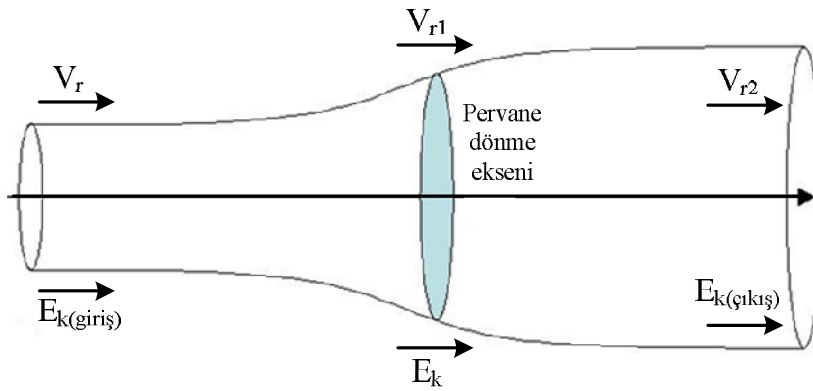
$$P_r = \frac{1}{2} \rho_h A V_r^3 \quad [\text{W}] \quad (2.4)$$

Tüm sistemlerde olduğu gibi, rüzgâr dönüşüm sistemlerinde de bu teorik gücün tamamının kullanılması, teknik olarak mümkün değildir. Bir rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminde, toplam verim;

- Türbin verimi
- Dişli mekanizmasının verimi
- Mekanik kavrama sisteminin verimi
- Generatör verimi

değerlerine bağlıdır. Bunlardan en önemlisi C_p ile ifade edilen türbin verimidir. Bununla birlikte bir rüzgâr türbininden elde edilebilecek verimin %59,26'yı aşamayacağı Betz tarafından ortaya konmuştur [68].

Betz teoremi ile ilgili olarak, rüzgâr pervanesinden geçen havanın akışı Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Rüzgâr türbini pervanesinden geçen havanın akışı

Burada rüzgâr türbini pervanesinden geçen havanın enerji dengesi;

$$E_k = E_{k(giriş)} - E_{k(çıkış)} \quad [\text{Nm}] \quad (2.5)$$

şeklinde tanımlanabilir. Kinetik enerji tanımından yola çıkarak, hareket halindeki rüzgârın taşıdığı kinetik enerjiyi ifade etmek için kullanılan Eş. 2.5 aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$E_k = \frac{1}{2}m(V_r^2 - V_{r2}^2) \quad [\text{Nm}] \quad (2.6)$$

Güç, birim zamanda yapılan iş olduğuna göre, türbinden elde edilen güç;

$$P_t = \frac{E_k}{t} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} (V_r^2 - V_{r2}^2) \quad [\text{Nm/s}] \quad (2.7)$$

şeklinde yazılabilir. Burada dm/dt , m ile ifade edilirse, türbinden elde edilecek güç;

$$P_t = \frac{1}{2}m(V_r^2 - V_{r2}^2) \quad [\text{W}] \quad (2.8)$$

şeklini alır. Rüzgârın türbin kanatlarında yapacağı iş, aynı zamanda rüzgâr tarafından uygulanan birim zamandaki basınca bağlıdır.

$$P_t = S V_{r1} \quad [\text{W}] \quad (2.9)$$

Rüzgârın türbin kanatlarında yapacağı basınç ise;

$$S = m(V_r - V_{r2}) \quad [\text{kgm/s}^2] \quad (2.10)$$

şeklinde ifade edilebilir. (2.8) ve (2.9) numaralı eşitlikler birbirine eşitlenip, (2.10) eşitliğinde yerine yazılırsa;

$$m V_{r1} (V_r - V_{r2}) = \frac{1}{2} m (V_r^2 - V_{r2}^2) \quad (2.11)$$

elde edilir. Buradan;

$$V_{r1} = \frac{1}{2}(V_r + V_{r2}) \quad [\text{m/s}] \quad (2.12)$$

şeklinde bir sonuç elde edilir. Bu durumda, türbine gelen rüzgâr hızının, kanatların önündeki havanın ve arkasındaki rüzgâr hızlarının ortalaması olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.

Eş. 2.2 kullanılarak, türbinden geçen havanın kütleli debisi (m), Eş. 2.8'de yerine yazılırsa;

$$P_t = \frac{1}{2} \rho_h A V_{r1} (V_r^2 - V_{r2}^2) \quad [\text{W}] \quad (2.13)$$

elde edilir. Eş. 2.12, Eş. 2.13'de yerine yazılırsa;

$$P_t = \frac{1}{4} \rho_h A (V_r + V_{r2}) (V_r^2 - V_{r2}^2) \quad [\text{W}] \quad (2.14)$$

ifadesi elde edilir. P_t ve P_r değerleri birbirine oranlandığında;

$$C_p = \frac{P_t}{P_r} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{V_{r2}}{V_r} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{V_{r2}}{V_r} \right) \right] \quad (2.15)$$

türbin verimi olan C_p elde edilir.

$$\frac{V_{r2}}{V_r} = n \quad (2.16)$$

ile tanımlanırsa;

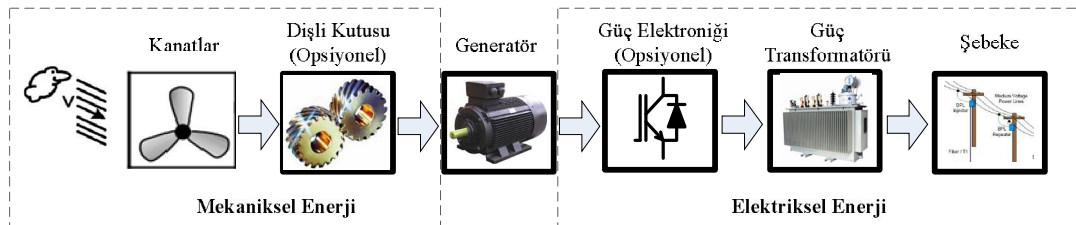
$$C_p = \frac{1}{2} (1 - n^2) (1 + n) \quad (2.17)$$

şeklinde verim katsayısı fonksiyonu elde edilir. Fonksiyonun türevi alınıp sıfıra eşitlendiğinde, C_p 'yi maksimum yapan n değeri 1/3 olarak bulunur. Bunun anlamı, C_p 'nin maksimum olması için kanatların, rüzgârın türbin giriş hızı, türbinden çıkış hızının üç katı olacak şekilde tasarlanması gerektiğini göstermektedir. Bu durumda

türbinden elde edilecek maksimum verim, % 59,26 olacaktır. Pratikte ise verim yaklaşık % 45 olmaktadır [68].

2.2. Rüzgâr Türbin Sistemlerinin Çeşitleri

Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarına verilen önem ve yenilenebilir enerji ile çalışan enerji üretim santrallerinin sayısı giderek artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde rüzgâr enerjisi oldukça fazla ilgi görmekte ve bu alana yapılan yatırımlar hızla artmaktadır. Rüzgârın sahip olduğu kinetik enerjinin önce mekanik enerjiye daha sonra elektrik enerjisine dönüştürülerek şebekeye aktarılabilmesi için rüzgâr türbin sistemleri kullanılmaktadır. Şekil 2.2'de genel bir rüzgâr türbin sisteminin blok diyagramı verilmiştir [69].



Şekil 2.2. Rüzgâr türbin sisteminin blok diyagramı

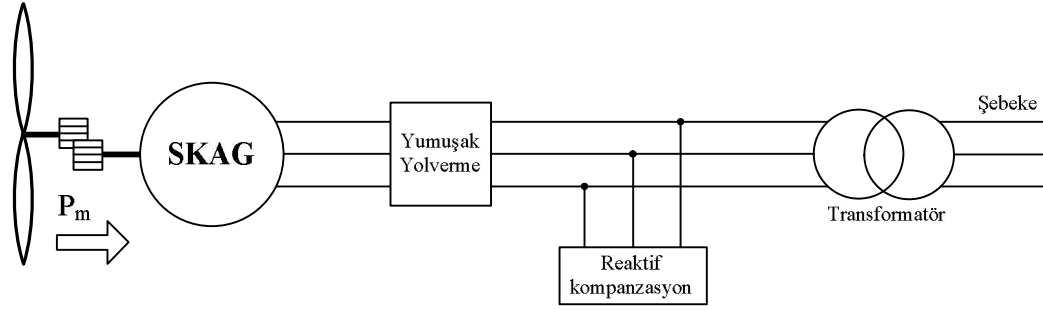
Rüzgârın sahip olduğu kinetik enerji kanatlar yardımıyla mekanik enerjiye dönüştürülmektedir. Kanatlar yardımıyla elde edilen mekanik enerji, generatörün miline dişli kutusu yardımıyla veya generatörün çok kutuplu olması durumunda doğrudan da uygulanabilmektedir. Generatör, miline uygulanan mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Generatörde üretilen elektrik enerjisi, şebekeye doğrudan aktarılabilirdiği gibi bir güç elektroniği dönüştürücüsü yardımıyla da şebekeye aktarılabilir. Günümüzde rüzgâr türbin sistemlerinin çoğunda güç elektroniği dönüştürücüleri kullanılmaktadır. Böylece, üretilen elektrik enerjisinin uluslararası standartlarda olması ve belirlenen denetim yapısı yardımıyla rüzgârdan maksimum enerji elde edilmesi sağlanmaktadır.

Rüzgâr türbin sistemleri, rüzgâr hızı esas alındığında, çalışma prensibine göre iki ayrı grupta incelenmektedir. Bunlar;

1. Sabit hızlı rüzgâr türbin sistemleri
2. Değişken hızlı rüzgâr türbin sistemleri

2.2.1. Sabit hızlı rüzgâr türbin sistemleri

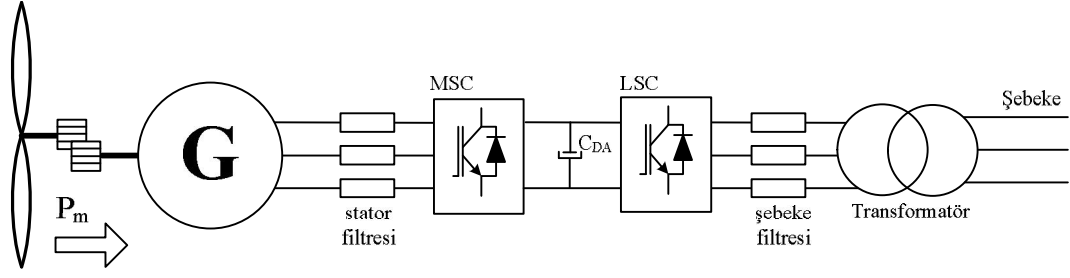
1990'lı yılların ortalarına kadar dünyada kurulu rüzgâr türbinlerinin büyük çoğunluğu sincap kafesli asenkron generatörlerden (SKAG) oluşmaktaydı. Bu generatörler doğrudan veya yumuşak yol verme teknikleri ile şebekeye bağlanmakta ve rüzgâr hızının sürekli olarak belirli aralıkta ($\pm\% 1$) olduğu yerler için uygun olmaktadır. Şekil 2.3'de sabit hızlı bir rüzgâr türbin sisteminin blok diyagramı verilmiştir. Burada SKAG'nin enerji üretmesi için gerekli olan reaktif enerji, türbin yakınında kurulan bir kompanzasyon ünitesinden sağlanmaktadır.



Şekil 2.3. Sabit hızlı rüzgâr türbin sisteminin blok diyagramı

2.2.2. Değişken hızlı rüzgâr türbin sistemleri

Günümüzde ise kurulu rüzgâr türbinlerinin büyük çoğunluğunda çift beslemeli asenkron generatörler, alan sargılı senkron generatörler ve daimi mıknatıslı senkron generatörler kullanılmaktadır. Bu generatörlerin ortak özelliği değişken hızlarda çalışabilmeleri ve şebekeye bağlanmaları için şebeke arayüzüne ihtiyaç duymalarıdır. Böylece değişken rüzgâr hızlarında sabit frekans ve genlikte çıkış gerilimi elde edilebilmektedir. Şekil 2.4'te örnek bir değişken hızlı rüzgâr türbin sisteminin blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.4. Değişken hızlı rüzgâr türbin sisteminin blok diyagramı

Değişken hızlı rüzgâr türbin sistemlerinin, sabit hızlı sistemlere göre bazı önemli avantajları aşağıda verilmiştir.

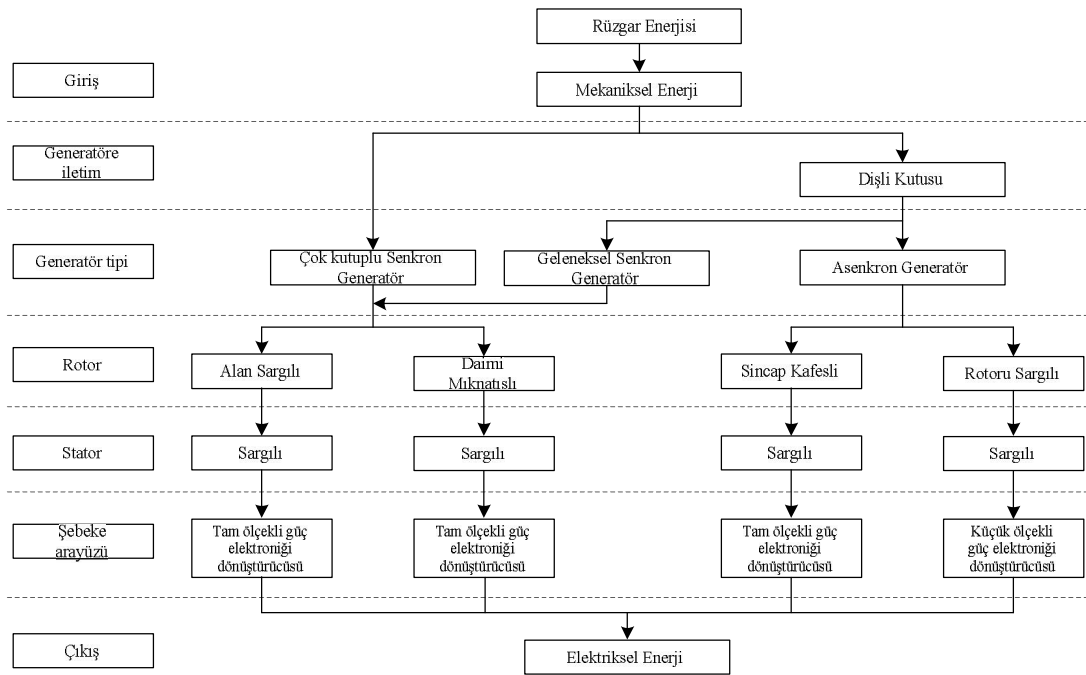
- Türbin hızı, çıkış gücünü en üst düzeye çıkarmak için rüzgâr hızının bir fonksiyonu olarak ayarlanabildiği için yıllık enerji üretimi artar. Türbin aerodinamiğine ve rüzgâr rejimine bağlı olarak, yıllık enerjiye ortalama %10 oranında bir katkı sağlanır.
- Kullanılan sistem, gücün en uygun şekilde düzenlenmesine imkan sağladığı için mekaniksel baskılar azalır.
- Rüzgâr ve mekaniksel sistemlerden kaynaklanan ve çıkış gücünde değişime sebep olan anlık durumlar önemli ölçüde azalır.
- Enerji kalitesi, güçteki dalgalanmalar azaltılarak iyileştirilebilir. Güçteki dalgalanmaların azalması, gerilimin nominal değerinden uzaklaşmasını da önleyecektir. Bu da rüzgâr gücünün şebekedeki etkisini artıracaktır.

Generatör ve şebeke arasındaki bağlantı için gerekli güç elektroniği dönüştürücüsünün karmaşıklığı ve maliyetinin yüksek olması önceleri değişken hızlı sistemlerin dezavantajı olarak görülmekteydi. Fakat son yıllarda gerek güç elektroniğinde kaydedilen ilerlemeler, gerekse yarı iletken teknolojisinin maliyetinin her geçen gün azalması, rüzgâr türbin sistemlerinde bu yapının kullanımını oldukça cazip hale getirmiştir [70].

2.3. Değişken Hızlı Rüzgâr Türbin Sistemlerinde Kullanılan Generatörler

Değişken hızlı rüzgâr türbin sistemlerinin yapılarını gruplayabilmek için Şekil 2.5’de verilen diyagram kullanılabilir [71]. Gruplamada görüldüğü gibi değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde genel olarak iki farklı generatör tipi kullanılmaktadır. Bunlar:

1. Senkron generatörler
2. Asenkron generatörler



Şekil 2.5. Değişken hızlı rüzgâr türbin sistemlerinin gruplanması

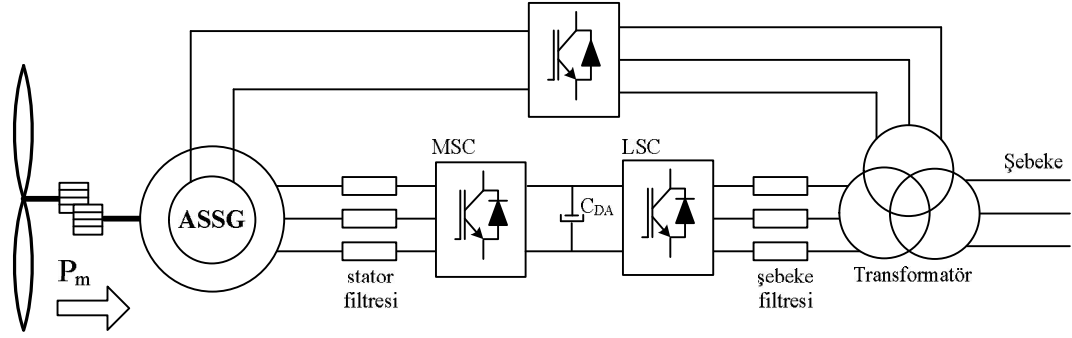
2.3.1. Senkron generatörler

Senkron generatörler, geleneksel ve çok kutuplu olmak üzere iki ayrı grupta incelenmektedir. Çok kutuplu senkron generatör mekaniksel enerjiyi doğrudan kanatlardan alırken, geleneksel senkron generatör mekaniksel enerjiyi dişli kutusu üzerinden almaktadır. Bu fark dışında her iki generatörde aynı özellikleri taşımaktadır. Her iki senkron generatör de üç fazlı stator sargılarından ve manyetik alanı oluşturan bir uyartım devresinden meydana gelmektedir. Uyartım devresi daimi mıknatıslardan meydana gelebileceği gibi alan sargılarından da meydana

gelebilmektedir. Uyarım devresinin yapısına göre senkron generatörler; alan sargılı veya daimi mıknatıslı olmak üzere iki grupta incelenmektedir.

Alan sargılı senkron generatör:

Alan Sargılı Senkron Generatörün (ASSG) stator sargısı, çift yönlü akım akışının olduğu gerilim kaynaklı iki eviricinin arka arkaya bağlanmasından meydana gelmiş tam ölçekli güç dönüştürücüsü üzerinden şebekeye bağlanmaktadır. Alan sargısı ise kontrollü bir doğrultucu ile beslenmektedir. Şekil 2.6'da geleneksel ASSG'li bir rüzgâr türbin sisteminin blok diyagramı verilmiştir.



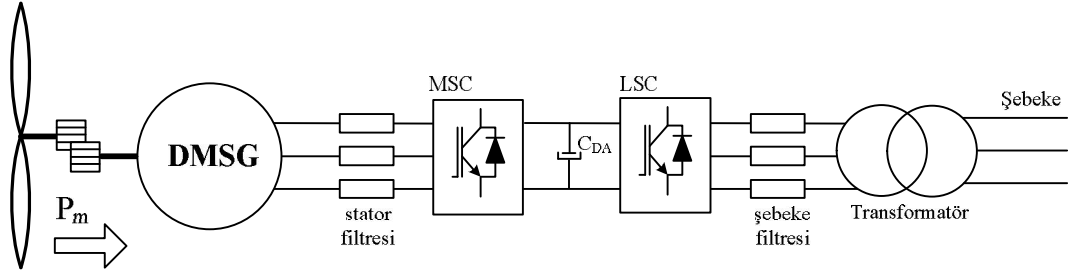
Şekil 2.6. Alan sargılı senkron generatörlü rüzgâr türbin sistemi

Stator tarafındaki evirici elektromanyetik torku, şebeke tarafındaki evirici ise bu sistemin oluşturduğu aktif ve reaktif gücü denetlemektedir. Rotor yapısında sargı bulunması ve bu sargıların beslenmesi için ilave bir güç elektroniği dönüştürücüsü kullanılması bu sistemin bir dezavantajıdır. Ayrıca üretilen aktif ve reaktif gücü denetlemek için, generatör gücüne eşdeğer yani tam ölçekli güç elektroniği dönüştürücüsü kullanılması bu sistemin en büyük dezavantajı olarak görülmektedir.

Daimi mıknatıslı senkron generatör:

Şekil 2.7'de Daimi Mıknatıslı Senkron Generatörlü (DMSG) bir rüzgâr türbin sisteminin blok diyagramı verilmiştir. ASSG'le karşılaştırıldığında alan sargısının olmaması bir avantaj olarak görülmesine karşın üretilen aktif ve reaktif gücü denetlemek için, tam ölçekli güç elektroniği dönüştürücüsü kullanılması zorunluluğu

bu sistemin de en büyük dezavantajı olarak görülmektedir. Ayrıca DMSG'de kullanılan mıknatıs maliyetleri generatör maliyetini artırmaktadır.



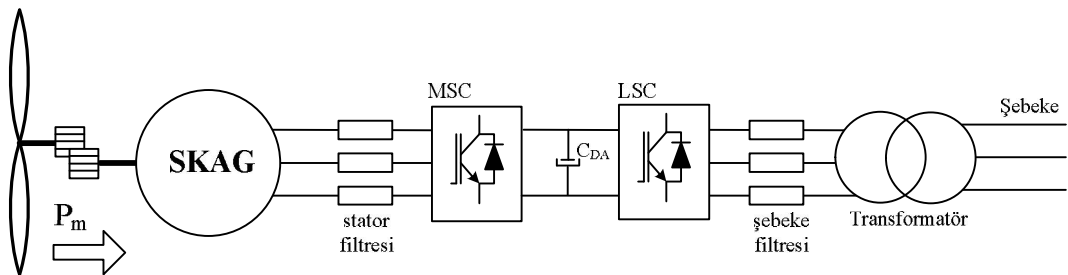
Şekil 2.7. Daimi mıknatıslı senkron generatörlü rüzgâr türbin sistemi

2.3.2. Asenkron generatörler

Asenkron generatörler önceleri sabit hızlı rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılmasına rağmen son yıllarda güç elektroniği alanında yaşanan gelişmelere paralel olarak değişken hızlı rüzgâr türbin sistemlerinde de kullanılmaya başlanmıştır. Bu generatörlerin emniyetli ve maliyetlerinin düşük olması tercih edilmelerinin en önemli sebebidir.

Sincap kafesli asenkron generatör:

Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde kullanılan Sincap Kafesli Asenkron Generatör (SKAG) tam ölçekli bir güç elektroniği dönüştürücüsü üzerinden şebekeye bağlanmaktadır. Şekil 2.8'de verilen SKAG'li rüzgâr türbin sisteminde stator tarafındaki dönüştürücü, generatörün elektromanyetik torkunu denetlemekte ve generatörün enerji üretebilmesi için ihtiyaç duyduğu reaktif enerjiyi sağlamaktadır. Şebeke tarafındaki dönüştürücü ise sistemden şebekeye aktarılan aktif ve reaktif gücü denetlemekte ve aynı zamanda DA bara gerilimini sabit tutmaktadır.

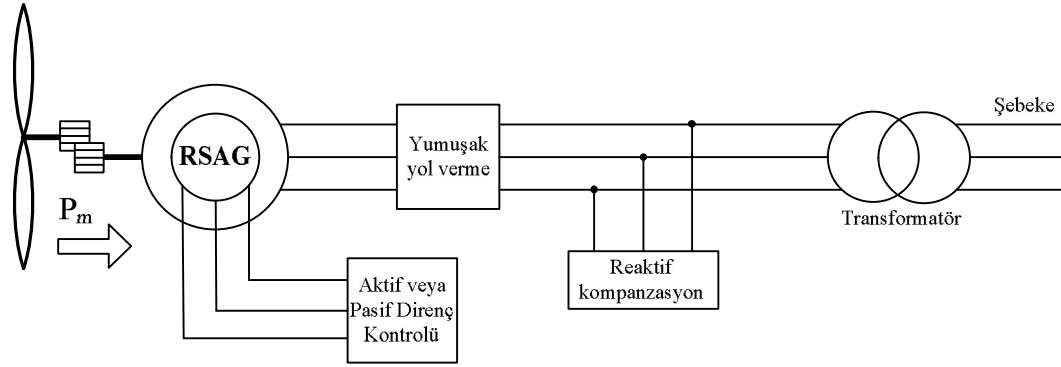


Şekil 2.8. Sincap kafesli asenkron generatörlü rüzgâr türbin sistemi

Stator tarafındaki dönüştürücünün, generatörün ihtiyaç duyduğu reaktif enerjiyi sağlaması için nominal güce göre %30-%50 oranında daha büyük ölçeklerde yapılması gerekmektedir. Bu da sistemin en büyük dezavantajı olarak görülmektedir.

Rotoru sargılı asenkron generatör:

Şekil 2.9’da Rotoru Sargılı Asenkron Generatörlü (RSAG) rüzgâr türbin sistemi verilmiştir. Bu türbin sistemi rotor devresi gücünün denetlenmesi esasına göre çalışmaktadır. Rotor devre enerjisi harici bir direnç üzerinde harcanarak stator devre gücü denetlenmektedir. Generatörün manyetik alan üretebilmesi için gerekli olan reaktif enerji, reaktif güç kompanzasyonu yapılarak karşılanmaktadır.

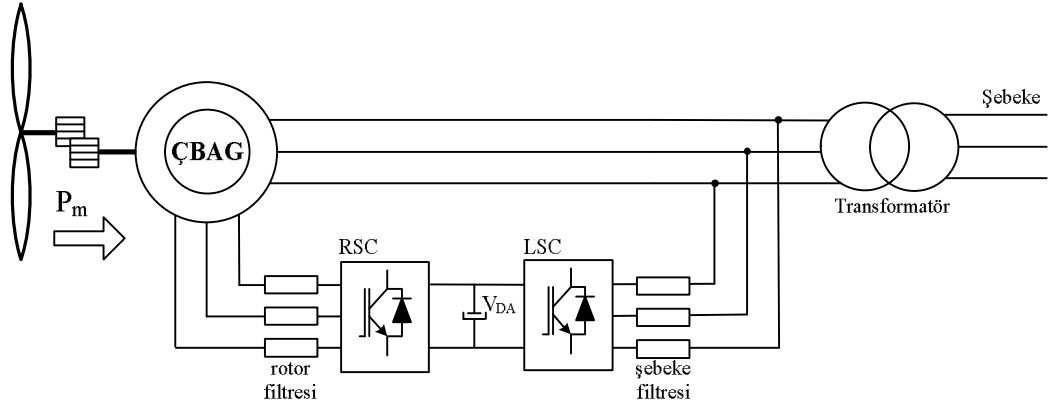


Şekil 2.9. Rotoru sargılı asenkron generatörlü rüzgâr türbin sistemi

Çift beslemeli asenkron generatör:

Şekil 2.10’da Çift Beslemeli Asenkron Generatörün (ÇBAG) kullanıldığı bir rüzgâr türbin sistemi verilmiştir. Bu sistemde, stator sargıları şebekeye doğrudan bağlanırken rotor sargıları darbe genişlik modülasyon (DGM) tekniğine göre anahtarlama yapabilen, çift yönlü akım akışının olabildiği gerilim kaynaklı iki eviriciden meydana gelmiş güç elektroniği dönüştürücüsü üzerinden şebekeye bağlanmaktadır. Rotor tarafındaki dönüştürücü, elektromanyetik torku ayarlamakta ve generatörün ihtiyacı olan reaktif gücü sağlamaktadır. Şebeke tarafındaki dönüştürücü ise, DA bara gerilimini sabit tutmaktadır. Diğer generatörlerle karşılaştırıldığında, ÇBAG’nin aşağıda belirtilen avantajları vardır.

- Sadece rotorun kayma gücünü kontrol etmeye yarayan güç elektroniği dönüştürücüsüne sahip olduğu için, toplam sistem gücünün yaklaşık %30'u oranında bir güç elektroniği dönüştürücüsü kullanılmaktadır. Bu da sistem maliyetini önemli ölçüde azaltmaktadır.
- Sistemde kullanılan filtreler toplam sistem gücünün 0.25 p.u.'lik kısmını kapsamaktadır. Bu nedenle kullanılan filtrelerin boyutu azalmakta ve maliyeti düşmektedir.



Şekil 2.10. Çift beslemeli asenkron generatörlü rüzgâr türbin sistemi

2.4. Değişken Hızlı Rüzgâr Türbin Sistemlerinde Kullanılan Generatörlerin Karşılaştırılması

Rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan generatörlerin çeşitli parametrelere göre karşılaştırılması Çizelge 2.1'de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde ÇBAG'nin diğer generatör yapılarına oranla önemli üstünlükleri olduğu görülmektedir [70]. Bu üstünlüklerin başında; ÇBAG'nin denetimi için tam ölçekli güç elektroniği dönüştürücüsü yerine ÇBAG'nin %30 gücünde bir dönüştürücü gücüne ihtiyaç duyulması gelmektedir. Böylece rüzgâr türbin sisteminin toplam maliyeti önemli ölçüde azalmaktadır. Aynı zamanda ÇBAG'nin reaktif güç denetiminin mümkün olması ve ada modunda çalışma durumunu sürdürebilir olması bu generatör türünün son yıllarda rüzgâr türbin sistemlerindeki kullanımını yaygınlaştırmıştır.

Çizelge 2.1. Değişken hızlı rüzgâr türbin sistemlerinde kullanılan generatörlerin karşılaştırılması

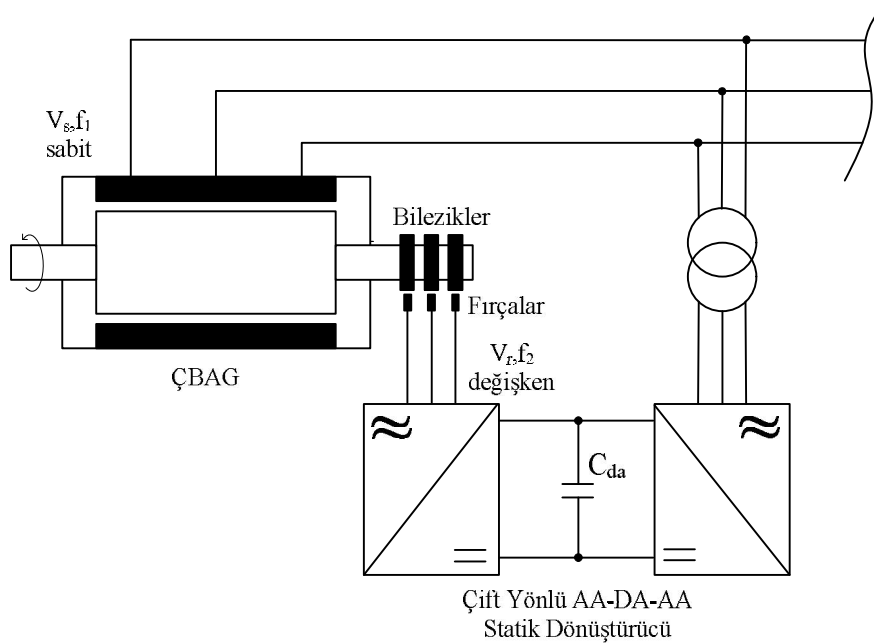
	Rüzgâr Türbin Sistemi				
	ASSG	DMSG	SKAG	RSAG	ÇBAG
Aktif Güç Denetimi	<i>Var</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>
Reaktif Güç Denetimi	<i>Var</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>		<i>Var</i>
Tam Ölçekli Güç Dönüştürücüsü	<i>Var</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>		
Ada Modu Çalışma	<i>Var</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>		<i>Var</i>
Reaktif Kompanzasyon				<i>Var</i>	
İlave Güç Elektronikleri	<i>Var</i>			<i>Var</i>	

3. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖRÜN MODELLENMESİ

Bu bölümde tezde kullanılan Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Şebeke bağlantı diyagramı verilen ÇBAG'nin matematiksel modeli elde edilerek senkron altı ve senkron üstü çalışma durumları incelenmiştir. Ayrıca şebeke bağlantılı ÇBAG'nin benzetimi Matlab&Simulink programında hazırlanarak aktif ve reaktif güç karakteristiği elde edilmiştir. Bu karakteristikler üzerinden ÇBAG'nin senkron altı ve senkron üstü çalışma bölgeleri analiz edilerek çalışması yorumlanmıştır.

3.1. Çift Beslemeli Asenkron Generatör

Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) stator ve rotor devresinde üç faz sargılar bulunduran bir generatör türüdür. Bu özelliği sayesinde motor veya generatör çalışma durumuna bağlı olarak ÇBAG'nin stator ve rotor sargılarından elektrik enerjisi alınabilir veya bu sargılara elektrik enerjisi uygulanabilir. ÇBAG'nin stator sargılarına doğrudan enerji uygulanırken rotor sargılarına çift yönlü akım akışına izin veren bir güç elektroniği dönüştürücüsü üzerinden enerji uygulanmakta veya enerji alınmaktadır. Şekil 3.1'de ÇBAG'nin bağlantı diyagramı verilmiştir [70].

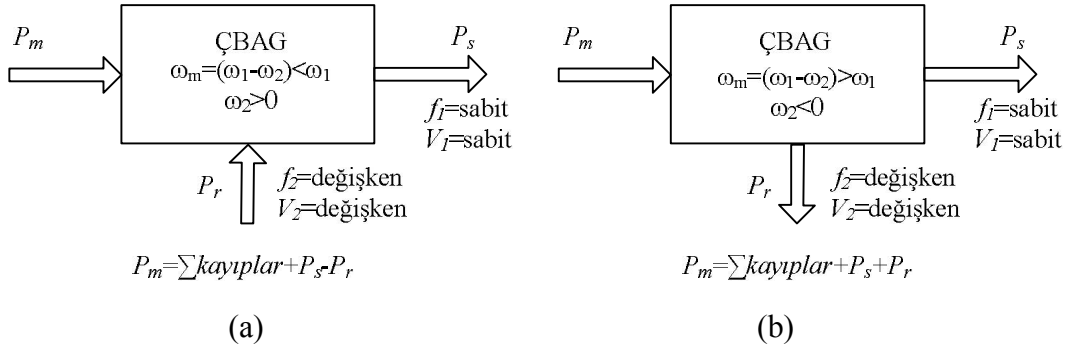


Şekil 3.1. Çift beslemeli asenkron generatörün bağlantı diyagramı

Generatör çalışma durumunda ÇBAG'nin stator sargularından sabit genlik (V_s) ve sabit frekans (f_s) değerinde enerji alınırken, rotor sargularına statik dönüştürücü yardımıyla değişken genlik (V_r) ve değişken frekans (f_r) değerine sahip enerji uygulanmakta veya enerji alınmaktadır. Stator ve rotor kutup sayıları aynı olduğu için mekaniksel hızın frekans değeri karşılığı;

$$\omega_m = \omega_1 \pm \omega_2 \quad (3.1)$$

şeklinde gösterilebilir. Burada ω_1 stator döner alan frekansını, ω_2 rotor döner alan frekansını temsil etmektedir. Rotor faz sırası statorun faz sırası ile aynı olduğu zaman Eş. 3.1'de işaret pozitif (+) ve $\omega_m < \omega_1$ olmaktadır. Bu durumda ÇBAG senkron hızın altında çalışmaktadır. Rotor faz sırası statorun faz sırası ile aynı olmadığı zaman Eş. 3.1'de işaret negatif (-) ve $\omega_m > \omega_1$ olmaktadır. Bu durumda ÇBAG senkron hızın üzerinde çalışmaktadır. Senkron altı ve senkron üstü çalışma durumları Şekil 3.2'de gösterilmiştir [74].



Şekil 3.2. Çift beslemeli asenkron generatörün çalışma bölgelerine göre enerji akış diyagramları a) Senkron altı çalışma b) Senkron üstü çalışma

Senkron altı çalışma durumu için rotora uygulanan gerilimin frekansı (f_2) ve genliği (V_2) hıza bağlı olarak değişmektedir. Böylece, ÇBAG'nin stator sargularında endüklenen gerilimin genliği ve frekansı farklı hız değerlerinde sabit tutulabilmektedir. Senkron altı hız değerlerinde rotor devresi kayma frekansında ($\omega_2 = \omega_1 - \omega_m$) üç faz AA ile uyarıldığında geleneksel senkron generatör gibi çalışabilmektedir. Geleneksel senkron makinadan farklı olarak ÇBAG'de, $\omega_1 \neq \omega_m$ olduğunda, stator devresi, rotor devresinde bir gerilim endüklemeaktadır.

ÇBAG genellikle rotor frekansının sıfır olmadığı ($\omega_2 \neq 0$) başka bir ifade ile kaymanın sıfırdan farklı ($s \neq 0$) olduğu durumlarda çalıştırılmaktadır. Bu durumda ÇBAG klasik asenkron motorun karakteristiğini taşımaktadır. ÇBAG'de aktif güç stator tarafından sağlanmasına karşılık, senkron üstü çalışma bölgesinde statorun yanında rotor tarafından da aktif güç alınabilmektedir [72].

Şebekeye aktarılan maksimum aktif güç;

$$P_{\max} = P_s + P_{r\max} = P_s + s_{\max} P_s \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilir. Uygulamalarda maksimum kayma değeri (s_{\max}) genel olarak ± 0.25 olarak seçilmektedir.

3.2. ÇBAG Kararlı Durum Eşitlikleri

Rotor sargıları açık devre iken, sırasıyla stator ve rotor sargılarında endüklenen elektromotor kuvvet (emk);

$$E_1 = \pi \sqrt{2} f_1 N_1 K_{w1} \phi_{10} ; K_{w1} = K_{d1} \cdot K_{y1} \quad (3.3)$$

$$E_{2s} = \pi \sqrt{2} s f_1 N_2 K_{w2} \phi_{10} ; K_{w2} = K_{d2} \cdot K_{y2} \quad (3.4)$$

şeklinde ifade edilebilir. Stator ve rotor sargılarında endüklenen emk arasındaki oran aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$$\frac{E_{2s}}{E_1} = s \frac{N_2 K_{w2}}{N_1 K_{w1}} = s \cdot K_{rs} \quad (3.5)$$

Stator ve rotor kararlı durum eşitlikleri karmaşık sayılar kullanılarak aşağıdaki gibi yazılırsa;

$$(R_s + j\omega_1 L_{s1}) \vec{I}_s - \vec{V}_s = \vec{E}_1 \quad \omega_1 \text{ frekansında} \quad (3.6)$$

$$(R_r^r + js\omega_1 L_{r1}^r) \vec{I}_r^r - \vec{V}_r^r = \vec{E}_{2s} \quad \omega_2 \text{ frekansında} \quad (3.7)$$

elde edilir. Eş. 3.7, $1/K_{rs}$ ile çarpılarak rotor devresi parametreleri stator tarafına aktarılabilir,

$$\left. \begin{aligned} (R_r + js\omega_1 L_{rl})\vec{I}_r - \vec{V}_r &= \frac{\vec{E}_{2s}}{K_{rs}} ; E_{2s} = sE_1 K_{rs} \\ R_r &= \frac{R_r^r}{K_{rs}^2} ; L_{rl} = \frac{L_{rl}^r}{K_{rs}^2} \\ \vec{V}_r &= \frac{\vec{V}_r^r}{K_{rs}} ; \vec{I}_r = \vec{I}_r^r \cdot K_{rs} \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

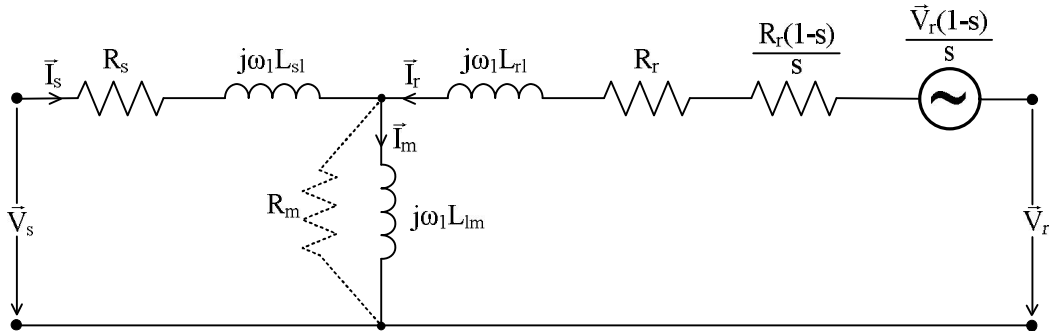
Elde edilen eşitlik, kayma (s) değerine bölünürse,

$$\left(\frac{R_r}{s} + j\omega_1 L_{rl} \right) \vec{I}_r - \frac{\vec{V}_r}{s} = \frac{s\vec{E}_1}{s} \quad (3.9)$$

elde edilir. Son olarak stator (I_s) ve rotor (I_r) akımları tarafından statorda endüklenen emk (E_1) aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\vec{E}_1 = -j\omega_1 L_{lm} (\vec{I}_s + \vec{I}_r) = -j\omega_1 L_{lm} \vec{I}_m \quad (3.10)$$

ÇBAG'nin bir faz için kararlı durum eşdeğer devre modeli Eş. 3.6,.....3.10 yardımıyla elde edilmiş ve Şekil 3.3'de verilmiştir [74].



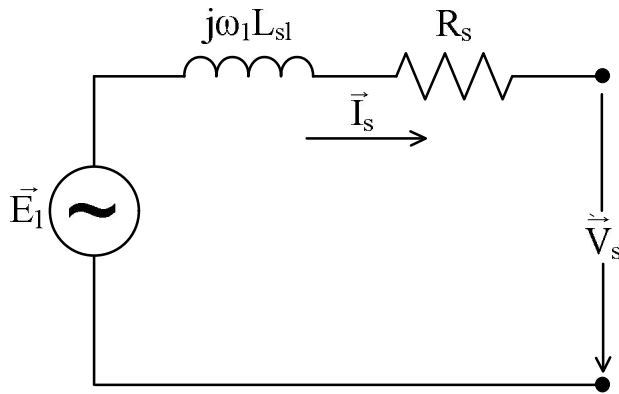
Şekil 3.3. ÇBAG'nin bir faz için kararlı durum eşdeğer devre modeli

3.3. ÇBAG'nin Güç Analizi

ÇBAG kararlı durum denklemleri kullanılarak stator gerilim eşitliği;

$$\vec{V}_s = \vec{E}_1 - (R_s + j\omega_1 L_{sl}) \vec{I}_s \quad (3.11)$$

şeklinde tanımlanabilir. Bu eşitlik için Şekil 3.4'te verilen eşdeğer devre modeli çizilebilir. Bu eşdeğer devre modeli senkron generatörün eşdeğer devre modelini de temsil etmektedir [73].



Şekil 3.4. ÇBAG'nin bir faz için stator eşdeğer devresi

ÇBAG'nin stator aktif ve reaktif gücü aşağıda verilen eşitlik yardımıyla bulunabilir.

$$P_s + jQ_s = 3\vec{V}_s \vec{I}_s^* \quad (3.12)$$

Şekil 3.4'deki eşdeğer devrede sargı direnci ihmal edilerek stator akımı;

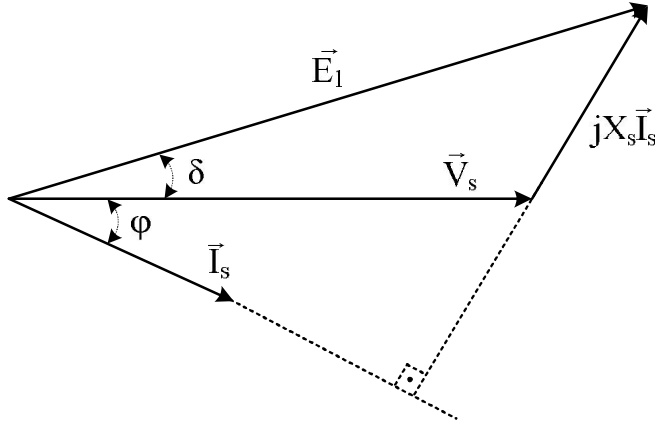
$$\vec{I}_s = \frac{\vec{E}_1 - \vec{V}_s}{jX_s} \quad (3.13)$$

olarak bulunur. Bu eşitlik, 3.12 nolu eşitlikte yerine yazılarak aktif ve reaktif güç;

$$P_s = 3 \frac{1}{X_s} E_1 V_s \sin \delta \quad (3.14)$$

$$Q_s = 3 \frac{1}{X_s} E_1 V_s \cos \delta - 3 \frac{V_s^2}{X_s} \quad (3.15)$$

şeklinde yazılabilir. Aktif ve reaktif güç denklemlerindeki V_s ve E_1 sırası ile stator gerilim vektörü ile stator emk vektörünün etkin (rms) değerleridir. δ açısı ise bu iki vektör arasındaki açıdır. Şekil 3.5'te stator vektör diyagramı verilmiştir [73].



Şekil 3.5. ÇBAG'nin stator vektör diyagramı

ÇBAG'nin rotor aktif ve reaktif gücü ise aşağıda verilen eşitlik yardımıyla bulunur.

$$P_r + jQ_r = 3 \vec{V}_r \vec{I}_r^* \quad (3.16)$$

3.7 nolu rotor gerilim eşitliği ile birlikte 3.10, 3.12 ve 3.13 nolu eşitlikler kullanılarak:

$$P_r + jQ_r = 3 \left[-R_r I_r^2 - js X_r I_r^2 + js \frac{1}{X_s} \left(\vec{E}_1 - \vec{V}_s \right) \vec{E}_1^* \right] \quad (3.17)$$

elde edilir. Elde edilen bu eşitlikte rotor bakır kayıpları ihmal edilerek aktif ve reaktif güç:

$$P_r = -3s \frac{1}{X_s} E V_s \sin \delta \quad (3.18)$$

$$Q_r = -s \left(3X_r I_r^2 + 3 \frac{1}{X_s} E_1 V_s \cos \delta - 3 \frac{E_1^2}{X_s} \right) \quad (3.19)$$

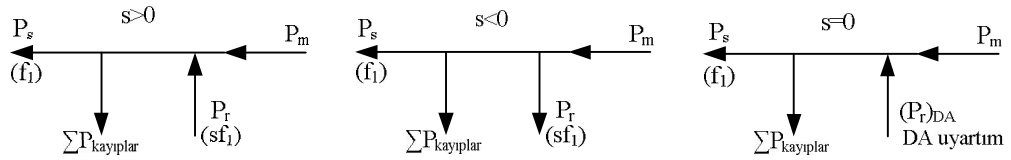
şeklinde ifade edilebilir. Eş. 3.14,.....,3.19 kullanılarak ÇBAG'nin rotor ve stator gücü arasında:

$$P_r = -sP_s \quad (3.20)$$

bağıntısı elde edilir. Bu eşitlik yardımıyla makine generatör çalışma bölgesinde çalışırken;

- Kaymanın pozitif durumu için rotor gücü negatiftir. Bu durumda generatör senkron altı hızda çalışmaktadır ve rotor gücü şebeke tarafından karşılanmaktadır.
- Kaymanın negatif durumu için rotor gücü pozitiftir. Bu durumda generatör senkron üstü hızda çalışmaktadır ve rotor gücü şebekeye aktarılmaktadır.
- Kaymanın sıfır olduğu durum için rotor devresi gücü sıfırdır, ancak bu kayma değerinde rotor DA kaynak yardımıyla uyarıldığında generatör senkron generatör olarak çalışmaktadır.

Yukarıda açıklanan üç çalışma durumunun güç akış diyagramı Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. ÇBAG'nin senkron altı, senkron üstü ve senkron çalışma durumları

ÇBAG tarafından şebekeye aktarılan toplam aktif güç;

$$P_T = P_s + P_r \quad (3.21)$$

3.20 ve 3.21 nolu eşitlikler yardımıyla stator ve rotor aktif güç eşitlikleri:

$$P_s = \frac{1}{1-s} P_T \quad (3.22)$$

$$P_r = \frac{s}{s-1} P_T \quad (3.23)$$

şeklinde bulunur. Örnek olarak; kaymanın $s=-1/3$ olduğu durumda ÇBAG'nin şebekeye aktardığı toplam gücün $3/4$ 'ü stator tarafından $1/4$ 'ü rotor tarafından karşılanmaktadır. Bu örnekten açıkça görülüyor ki ÇBAG'nin denetiminde kullanılan evirici yapısının gücü toplam generatör gücünün $1/4$ 'ü olmaktadır. Bu tam ölçekli bir evirici yapısı ile denetlenen diğer generatör türlerine göre daha az kayıp ve daha düşük maliyetli evirici anlamına gelmektedir. Bu özellik ÇBAG'nin en büyük avantajı olarak görülmektedir.

Aktif gücün aksine şebekeye aktarılan toplam reaktif güç stator ve rotor reaktif güçleri toplamına eşit değildir. Çünkü rotor reaktif enerjisi evirici yapısı üzerinden şebekeye aktarılamamaktadır. Ticari ürünlerin genelinde şebeke tarafı evirici yapısı birim güç faktöründe çalıştırılmaktadır. Bu nedenle şebekeye aktarılan reaktif gücün toplamı stator reaktif gücüne eşittir [73].

3.4. ÇBAG Fazör Diyagramları

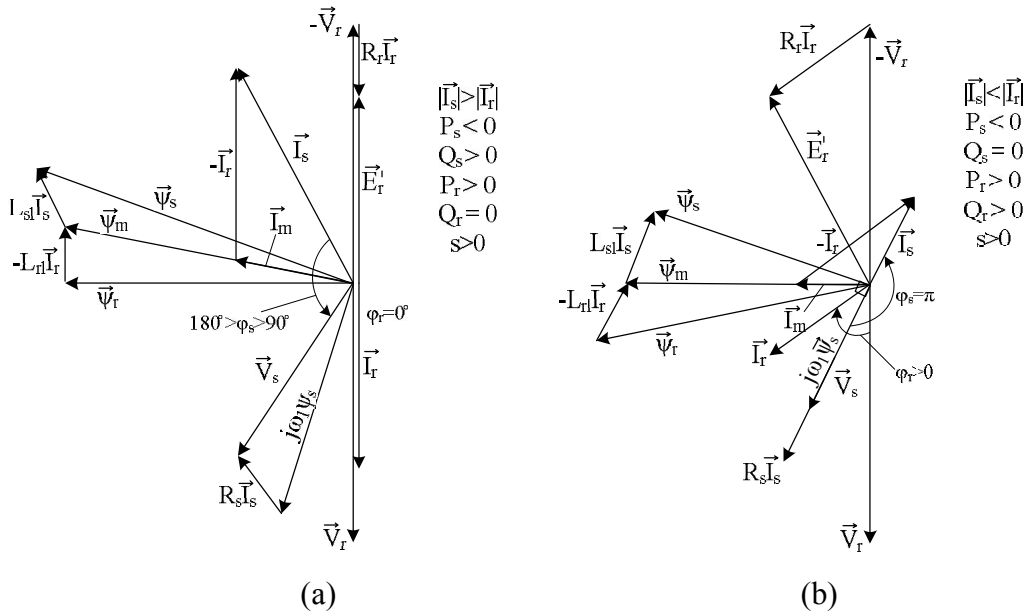
ÇBAG'nin fazör diyagramlarını daha iyi anlayabilmek için kararlı durum eşitliklerini incelememiz gerekmektedir. Generatörün mıknatıslanma akı vektörü (ψ_m), stator akı vektörü (ψ_s), ve rotor akı vektörü (ψ_r) sırasıyla aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\left. \begin{aligned} \vec{\psi}_m &= L_{lm} \vec{I}_m ; \vec{I}_m = \vec{I}_s + \vec{I}_r \\ \vec{\psi}_s &= \vec{\psi}_m + L_{sl} \vec{I}_s ; \vec{\psi}_s = L_s \vec{I}_s + L_{lm} \vec{I}_r ; L_s = L_{sl} + L_{lm} \\ \vec{\psi}_r &= \vec{\psi}_m + L_{rl} \vec{I}_r ; \vec{\psi}_r = L_r \vec{I}_r + L_{lm} \vec{I}_s ; L_r = L_{rl} + L_{lm} \end{aligned} \right\} \quad (3.24)$$

Yukarıdaki eşitlikler stator düzlemine aktarıldıktan sonra elde edilen yeni eşitlikler; Eş. 3.6, Eş. 3.9 ve Eş. 3.10'da yerine koyulursa,

$$\vec{I}_s R_s - \vec{V}_s = -j\omega_1 \vec{\psi}_s ; \vec{I}_r R_r - \vec{V}_r = -j\omega_1 s \vec{\psi}_r = \vec{E}_r' \quad (3.25)$$

eşitlikleri elde edilir. Bu eşitlikler yardımıyla ÇBAG'nin fazör diyagramları çizilebilir. Fazör diyagramın çizimi için, kaymanın (s) değeri ve işareti, rotor gerilim vektörü (V_r) ile rotor akım vektörü (I_r) arasındaki faz açısı (ϕ_r) ve generatör parametreleri bilinmelidir. Fazör diyagramın çizimi iki durum için yapılacaktır. Bunlar düşük uyartım durumu ve aşırı uyartım durumudur. Düşük uyartım durumu için rotorun birim güç faktöründe ($\phi_r=0$) olduğu kabul edilmektedir. Bu durumda mıknatıslanma stator tarafından sağlanmaktadır. Düşük uyartım durumu için geçerli olan fazör diyagram Şekil 3.7.a'da verilirken aşırı uyartım durumu için geçerli olan fazör diyagram Şekil 3.7.b'de verilmiştir. Fazör diyagramlar incelendiğinde düşük uyartım durumunda $\psi_r < \psi_s$ ($I_r < I_s$) olurken aşırı uyartım durumunda $\psi_r > \psi_s$ ($I_r > I_s$) olmaktadır. Bunun sebebi düşük uyartım durumunda generatör mıknatıslanma akımının ana kaynağının stator, aşırı uyartım durumunda ise generatör mıknatıslanma akımının ana kaynağının rotor olmasıdır [74].



Şekil 3.7. ÇBAG fazör diyagramları a) Düşük uyartım durumu b) Aşırı uyartım durumu

3.5. ÇBAG'nin Güç Sisteminde Davranışı

ÇBAG'nin güç sistemine paralel olarak bağlanması ve güç sistemine enerji aktarması senkron generatöre (SG) benzemektedir. Ancak, ÇBAG ve SG arasında bazı önemli farklılıklar vardır. Bunlar;

- ÇBAG'nin güç sistemi ile senkronizasyonu senkron altı veya senkron üstü hız değerlerinde gerçekleşebilmektedir.
- ÇBAG'nin stator gerilimi, frekansı ve şebeke gerilimi ile arasındaki faz açısı rotor tarafı güç elektroniği dönüştürücüsü yardımıyla denetlenebilmektedir.

ÇBAG'nin şebekeye paralel bağlanmasından sonra, sabit genlik ve frekans değerinde fakat değişken hızlarda aktif ve reaktif güç karakteristiğini anlamak önemlidir. Bu bölümde güç sistemine paralel bağlanan ÇBAG'nin aktif ve reaktif güç karakteristiğini açıklamak için, stator aktif gücü (P_s) ve rotor aktif gücüne (P_r) karşı güç katsayısı (δ), verilen hız (kayma) ve rotor gerilimi için incelenecektir. Stator ve rotor aktif güç karakteristiklerini basitleştirmek için stator direnci ihmal edilmiştir. Güç katsayısı, stator gerilim vektörü (V_s) ile rotor gerilim vektörü (V_r) arasındaki açı olarak tanımlanmaktadır [74].

Stator gücüne karşı güç katsayısı:

Kararlı durum eşdeğer devre modelinde I_s ve I_r akımları stator direnci ihmal edilerek aşağıdaki şekilde yeniden yazılabilir;

$$\vec{V}_s = j\omega_1 \left(L_s \vec{I}_s + L_{lm} \vec{I}_r \right) \quad (3.26)$$

$$\vec{V}_r = R_r \vec{I}_r + js\omega_1 \left(L_r \vec{I}_r + L_{lm} \vec{I}_s \right) = V_r (\cos \delta + j \sin \delta) \quad (3.27)$$

Eş. 3.26'da, stator akım vektörü (I_s) yok edilerek;

$$\left(R_r + js\omega_1 \left(L_r - \frac{L_{lm}^2}{L_s} \right) \right) \vec{I}_r = V_r (\cos \delta + j \sin \delta) - sV_s \frac{L_{lm}}{L_s} \quad (3.28)$$

elde edilir. Bu denklemde generatör kısa-devre endüktans (L_{sc}) değeri yaklaşık olarak,

$$L_{sc} \cong L_r - \frac{L_{lm}^2}{L_s} \quad (3.29)$$

şeklinde ifade edilebilir. Kısa devre endüktans değeri Eş. 3.28'de yerine konularak rotor akımı aşağıdaki şekilde yeniden yazılabilir.

$$I_r = \frac{\left(V_r \cos \delta - sV_s \frac{L_{lm}}{L_s} + jV_r \sin \delta \right) (R_r - js\omega_1 L_{sc})}{R_r^2 + (s\omega_1 L_{sc})^2} \quad (3.30)$$

Stator aktif ve reaktif güçleri Eş. 3.26'dan

$$\begin{aligned} P_s + jQ_s &= 3V_s I_s^* = 3L_{lm} \frac{V_s}{L_s} \left(\frac{jV_s}{\omega_1 L_{lm}} - \vec{I}_r^* \right) \\ &= 3 \frac{jV_s^2}{\omega_1 L_s} - \frac{\left(V_r \cos \delta - sV_s \frac{L_{lm}}{L_s} - jV_r \sin \delta \right) (R_r + js\omega_1 L_{sc})}{R_r^2 + s^2 \omega_1^2 L_{sc}^2} \cdot 3 \frac{L_{lm}}{L_s} V_s \end{aligned} \quad (3.31)$$

şeklinde yazılabilir. Buradan aktif ve reaktif güç eşitlikleri;

$$P_s = \underbrace{-3V_s V_r \frac{L_{lm}}{L_s} \frac{\sin(\delta + \delta_k(s))}{\sqrt{R_r^2 + (s\omega_1 L_{sc})^2}}}_{\text{senkron aktif güç } (P_{ss})} + \underbrace{3V_s^2 \left(\frac{L_{lm}}{L_s} \right)^2 \frac{sR_s}{R_r^2 + (s\omega_1 L_{sc})^2}}_{\text{asenkron aktif güç } (P_{as})} \quad (3.32)$$

$$Q_s = \underbrace{\frac{3V_s^2}{\omega_1 L_s} \left[1 + \frac{(s\omega_1 L_{lm})^2 L_{sc}}{[R_r^2 + (s\omega_1 L_{sc})^2] L_s} \right]}_{\text{rotor kısa devre durumunda çekilen reaktif güç } (Q_{as})} - \underbrace{3V_s V_r \frac{L_{lm}}{L_s} \frac{\cos(\delta + \delta_k(s))}{\sqrt{R_r^2 + (s\omega_1 L_{sc})^2}}}_{\text{senkron reaktif güç } (Q_{ss})} \quad (3.33)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu gösterim silindirik kutuplu senkron makinaya benzemektedir. Ancak, aktif gücün (P_s) ikinci bileşeni asenkron olarak üretilir ve pozitif kayma değeri için pozitif (motor), negatif kayma değeri için negatif (generatör) olarak üretilir. Reaktif gücün (Q_s) ilk bileşeni ise makine reaktansları tarafından çekilen reaktif gücü temsil etmektedir. Açı değeri (δ_k) ağırlıklı olarak kayma (s) ve rotor direncine (R_r) bağlıdır:

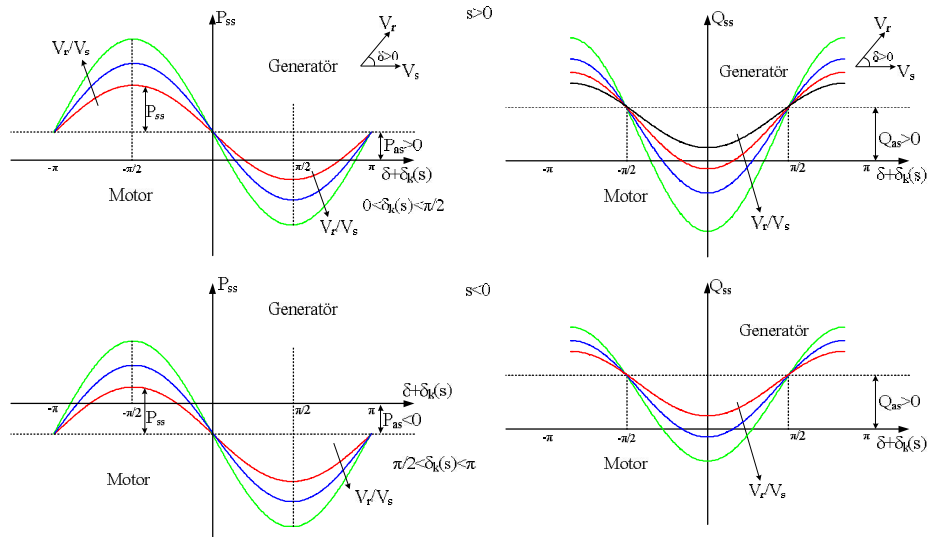
$$\delta_k = 0 \quad \text{için} \quad |s\omega_1 L_{sc}| \gg R_r$$

$$\delta_k = \frac{\pi}{2} \quad \text{için} \quad s=0$$

$$0 < \delta_k < \frac{\pi}{2} \quad \text{için} \quad s > 0$$

$$\frac{\pi}{2} < \delta_k < \pi \quad \text{için} \quad s < 0$$

Stator aktif (P_s) ve reaktif (Q_s) gücünü daha fazla genelleşirebilmek için bu büyüklükler açı bilgisi ile ilişkilendirilmelidir. Şekil 3.8'de stator aktif (P_s) ve reaktif (Q_s) gücü, güç katsayısının ($\delta_k + \delta_k(s)$) bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir [74].



Şekil 3.8. Stator aktif (P_s) ve reaktif (Q_s) gücüne karşı güç açısı ($\delta_k + \delta_k(s)$) eğrileri

Stator aktif (P_s) ve reaktif (Q_s) gücünü iki bileşene ayırırsak;

$$P_s = P_{ss} + P_{as} \quad (3.34)$$

$$Q_s = Q_{ss} + Q_{as} \quad (3.35)$$

şeklinde ifade edebiliriz. Senkron aktif (P_{ss}) ve reaktif (Q_{ss}) güçler güç katsayısına bağlı iken asenkron aktif (P_{as}) ve reaktif (Q_{as}) güçler sadece kaymaya bağlıdır. Kayma işaretinin stator reaktif enerjisi üzerinde bir etkisi yoktur, ama yinede $\delta_k(s)$ kaymaya bağlıdır. Stator koşullarında sıfır reaktif güç üretmek için rotor gerilim oranı (V_r/V_s) artırılmalıdır.

Kaymanın sıfırdan büyük olduğu değer (senkron altı) için motor çalışma bölgesinde aktif güç daha büyük iken kaymanın sıfırdan küçük olduğu değer (senkron üstü) için generatör çalışma bölgesinde aktif güç daha büyüktür [74].

Rotor gücüne karşı güç katsayısı:

Rotor aktif (P_r) ve reaktif (Q_r) güçleri;

$$P_r + jQ_r = 3\vec{V}_r \vec{I}_r^* \quad (3.36)$$

şeklinde ifade edilebilir. Eş. 3.27 ve 3.30 kullanılarak aktif ve reaktif güçler;

$$P_r = \underbrace{\frac{3V_r^2 R_r}{R_r^2 + (s\omega_1 L_{sc})^2}}_{\text{stator kısa devre iken rotor bakır kayıpları}} + \underbrace{3V_r V_s \frac{L_{lm}}{Ls} \frac{\sin(\delta - \delta_k)s}{\sqrt{R_r^2 + (s\omega_1 L_{sc})^2}}}_{\text{senkron rotor gücü}} \quad (3.37)$$

$$Q_r = \underbrace{\frac{3V_r^2 s\omega_1 L_{sc}}{R_r^2 + s\omega_1 L_{sc}^2}}_{\text{stator kısa devre iken çekilen reaktif güç}} - \underbrace{3V_r V_s \frac{L_{lm}}{Ls} \frac{\cos(\delta - \delta_k)s}{\sqrt{R_r^2 + (s\omega_1 L_{sc})^2}}}_{\text{senkron reaktif rotor gücü}} \quad (3.38)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Sıfır kayma durumunda çalışma:

Sıfır kayma durumunda, güç ve rotor akım denklemleri;

$$P_s = -3V_s V_r \frac{L_m}{R_r L_s} \sin\left(\delta + \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.39)$$

$$Q_s = \frac{3V_s^2}{\omega_1 L_s} - 3 \frac{V_s V_r L_m}{R_r L_s} \cos\left(\delta + \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.40)$$

$$I_r = \frac{V_r}{R_r} \quad (3.41)$$

şeklinde yazılabilir. Burada rotor gerilimi stator düzleminde kabul edilmiştir. Güç açısı $(\delta + \pi/2)$ standart senkron generatör ile aynıdır, ve bu açı rotorda endüklenen gerilim ile faz gerilimi arasındaki açıyı temsil etmektedir.

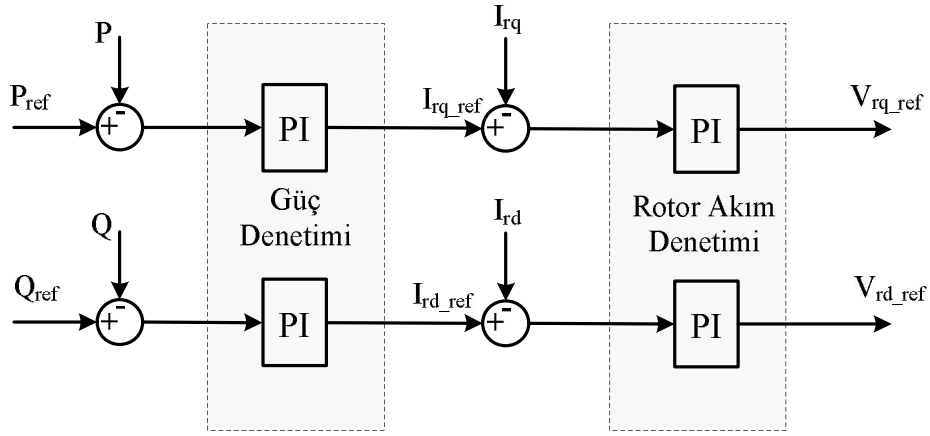
Sıfır kayma durumunda ÇBAG'nin rotor devresi DA kaynak ile beslendiği durumda senkron generatörün tüm karakteristiklerini korur. ÇBAG'nin bu çalışma durumu çok büyük reaktif güç gönderiminde veya alımında çalıştırılması için kullanılabilir [74].

3.6. ÇBAG'nin d-q Referans Düzleminde Kararlı Durum Modeli ve Aktif-Reaktif Güç Karakteristiği

Modern ÇBAG'li rüzgâr türbinlerinde rotor ve şebeke tarafı iki dönüştürücü birbirinden bağımsız olarak, ayrıştırılmış d-q vektör denetim yaklaşımı kullanılarak denetlenmektedir. Böylece her iki dönüştürücüde de, akımın d ve q eksen bileşenleri farklı parametreleri (aktif, reaktif güç, vb.) denetleyebilmektedir [75].

Rotor tarafı dönüştürücünün denetiminde, reaktif güç denetleyicisi ve aktif güç denetleyicisi olmak üzere iki seviyeli bir denetleyici kullanılmaktadır. Şekil 3.9' da aktif ve reaktif gücün denetimine ilişkin temel denetim blok diyagramı verilmiştir. Şekil 3.9'da görüldüğü gibi rotor akımının q eksen bileşeni aktif güç denetiminde

kullanılırken, d eksen bileşeni reaktif güç denetiminde kullanılmaktadır. Sonuç olarak ÇBAG için etkin bir denetleyici tasarlamak ve gerçekleştirmek için rotor akımının d ve q eksen bileşenlerinin ÇBAG'nin aktif ve reaktif güç karakteristiği üzerindeki etkilerini anlamak önemlidir. Bu bölümde ÇBAG'nin kararlı durum modeli d-q referans düzleminde elde edilmiştir. Daha sonra bu model üzerinde benzetim çalışmaları gerçekleştirilerek ÇBAG'nin aktif ve reaktif güç karakteristikleri elde edilmiştir.



Şekil 3.9. Rotor tarafı dönüştürücü temel denetim blok diyagramı

ÇBAG'nin stator ve rotor gerilim eşitlikleri ile akı eşitlikleri uzay vektör teorisi kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{pmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{pmatrix} = R_s \begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \lambda_{sd} \\ \lambda_{sq} \end{pmatrix} + \omega_s \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_{sd} \\ \lambda_{sq} \end{pmatrix} \quad (3.42)$$

$$\begin{pmatrix} v_{rd} \\ v_{rq} \end{pmatrix} = R_r \begin{pmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \lambda_{sd} \\ \lambda_{sq} \end{pmatrix} + \omega_r \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_{sd} \\ \lambda_{sq} \end{pmatrix} \quad (3.43)$$

$$\begin{pmatrix} \lambda_{sd} \\ \lambda_{sq} \\ \lambda_{rd} \\ \lambda_{rq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{sl} + L_{lm} & 0 & L_{lm} & 0 \\ 0 & L_{sl} + L_{lm} & 0 & L_m \\ L_{lm} & 0 & L_{rl} + L_{lm} & 0 \\ 0 & L_{lm} & 0 & L_{rl} + L_{lm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{pmatrix} \quad (3.44)$$

Burada;

R_s, R_r stator ve rotor sargı direnci (Ohm)

L_{sl}, L_{rl} stator ve rotor kaçak endüktansı (Henry)

L_{lm} stator ve rotor arasındaki ortak endüktans (Henry)

v_{sd}, v_{sq} stator geriliminin d-q bileşenleri, (Volt)

v_{rd}, v_{rq} rotor geriliminin d-q bileşenleri, (Volt)

i_{sd}, i_{sq} stator akımının d-q bileşenleri, (Amper)

i_{rd}, i_{rq} rotor akımının d-q bileşenleri, (Amper)

$\lambda_{sd}, \lambda_{sq}$ stator akısının d-q bileşenleri, (Wb-tur)

$\lambda_{rd}, \lambda_{rq}$ rotor akısının d-q bileşenleri, (Wb-tur)

ω_s, ω_r stator ve rotor döner alan hızları, (rad/s)

şeklinde tanımlanmaktadır. (3.42) ve (3.43) nolu eşitliklerde verilen stator ve rotor gerilim eşitlikleri yeniden düzenlenerek vektörel formda aşağıdaki şekilde gösterilebilir.

$$\vec{v}_{s_dq} = R_s \vec{i}_{s_dq} + \frac{d}{dt} \vec{\lambda}_{s_dq} + j\omega_s \vec{\lambda}_{s_dq} \quad (3.45)$$

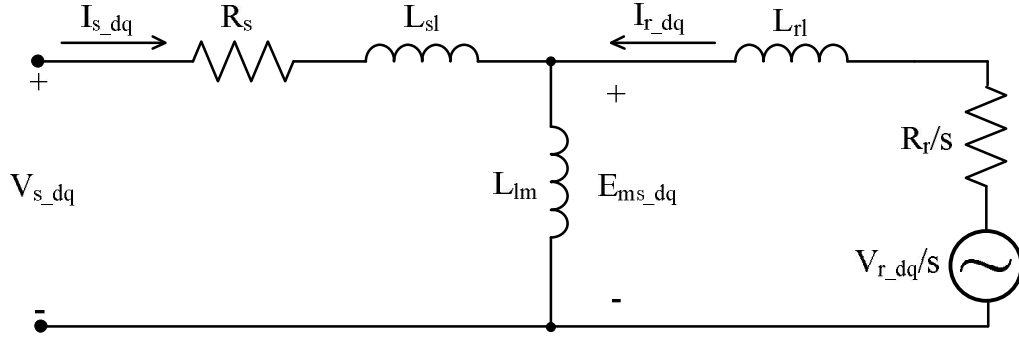
$$\vec{v}_{r_dq} = R_r \vec{i}_{r_dq} + \frac{d}{dt} \vec{\lambda}_{r_dq} + j\omega_r \vec{\lambda}_{r_dq} \quad (3.46)$$

Kararlı durum koşulları altında ve $\omega_r = s \cdot \omega_s$ olduğu göz önünde bulundurularak Eş. 44, 45, 46 yeniden düzenlenirse Eş. 3.47 ve 3.48 elde edilir.

$$\vec{v}_{s_dq} = R_s \vec{i}_{s_dq} + j\omega_s L_{sl} \vec{i}_{s_dq} + j\omega_s L_{lm} (\vec{i}_{s_dq} + \vec{i}_{r_dq}) \quad (3.47)$$

$$\frac{\vec{v}_{r_dq}}{s} = \frac{R_r}{s} \vec{I}_{r_dq} + j\omega_s L_{rl} \vec{I}_{r_dq} + j\omega_s L_{lm} (\vec{I}_{s_dq} + \vec{I}_{r_dq}) \quad (3.48)$$

Şekil 3.10'da bu eşitlikler kullanılarak elde edilen ÇBAG'nin kararlı durum eşdeğer devre modeli verilmiştir [75].



Şekil 3.10. ÇBAG d-q referans düzleminde kararlı durum modeli

Bu eşdeğer devre yardımıyla üretilen tork, stator aktif ve reaktif güçleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$T_{em} = p(\lambda_{sd} i_{sq} - \lambda_{sq} i_{sd}) = p(\lambda_{sd} i_{sq}) \quad (3.49)$$

$$P_s = v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq} \quad (3.50)$$

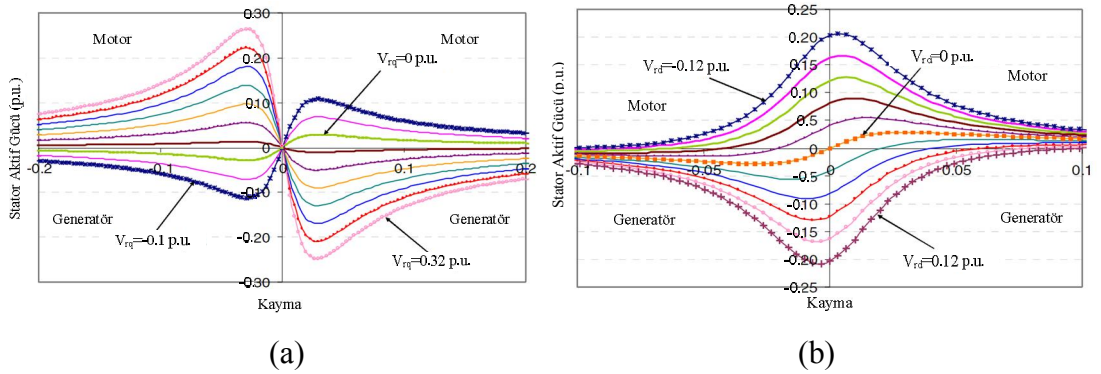
$$Q_s = v_{sq} i_{sd} - v_{sd} i_{sq} \quad (3.51)$$

Eşdeğer devrede yer alan stator sargı empedansı genellikle ihmal edilmektedir. Bu nedenle stator geriliminin d eksen bileşeni sıfır olurken stator akısının d eksen bileşeni ile stator geriliminin q eksen bileşeni sabit olmaktadır. Bu kabullenmeler doğrultusunda tork ve aktif güç i_{sq} ile orantılı iken reaktif güç i_{sd} ile orantılı olmaktadır.

Geleneksel sabit hızlı asenkron generatörlerin, aktif güç üretebilmesi sadece senkron üstü hız değerlerinde mümkün olurken, generatör veya motor çalışma durumunda senkron altı ve senkron üstü tüm hız değerlerinde şebekeden reaktif güç

çekmektedirler. Bu özellikler ÇBAG için farklıdır. ÇBAG'nin stator tarafından, aktif ve/veya reaktif güç senkron altı veya senkron üstü hız değerlerinde şebekeye aktarılabilir. Bu özellikler ÇBAG için farklıdır. ÇBAG'nin stator tarafından, aktif ve/veya reaktif güç senkron altı veya senkron üstü hız değerlerinde şebekeye aktarılabilir.

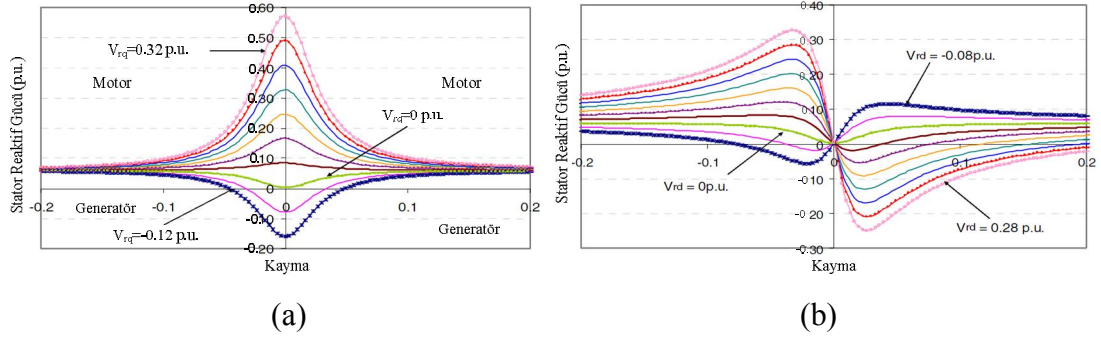
ÇBAG'nin statoruna sabit genlik ve frekans değerinde bir gerilim uygulanması durumunda rotor gerilim bileşenleri V_{rd} ve V_{rq} değişiminin stator aktif gücü üzerindeki etkisi farklı kayma değerleri için Şekil 3.11'de verilmiştir. V_{rd} ve V_{rq} 'nin pozitif olması rotora gerilim uygulandığını negatif olması ise rotordan gerilim alındığını ifade etmektedir. Bu karakteristik eğrilerden görüldüğü gibi, geleneksel sabit hızlı asenkron makinanın aksine çok sayıda karakteristik eğri elde edilmiştir. Rotor gerilim bileşenlerinin (V_{rd} ve V_{rq}) büyüklükleri ve generatör hızı değiştirildikçe karakteristik eğride değişmektedir. ÇBAG senkron hızın altında veya üstünde elektrik enerjisi üretebilmektedir. Stator aktif gücü rotor gerilim bileşenlerinin (V_{rd} ve V_{rq}) değişimi ile denetlenebilmektedir. Ancak aktif gücün denetiminde karakteristik eğrilerden görüldüğü üzere (V_{rd}) bileşeni (V_{rq}) bileşenine göre daha kararlı bir denetim sağlamaktadır [47, 75].



Şekil 3.11. Stator aktif güç karakteristiği a) $V_{rd}=0$ pu b) $V_{rq}=0$ pu

ÇBAG'nin statoruna sabit genlik ve frekans değerinde bir gerilim uygulanması durumunda rotor gerilim bileşenleri V_{rd} ve V_{rq} değişiminin stator reaktif gücü üzerindeki etkisi farklı kayma değerleri için Şekil 3.12'de verilmiştir. Rotor gerilim bileşenlerinden (V_{rd}) aktif gücün denetiminde daha uygun ve kararlı olmasına karşı özellikle senkron altı hız değerlerinde aşırı reaktif güç üretilmesine neden olmaktadır. Rotor gerilim bileşenlerinden (V_{rd}), (V_{rq}) ile birlikte kullanıldığında,

reaktif güç üretimi sıfır yapılabilmektedir. Böylece generatör nominal güç sınırları içinde daha fazla aktif güç üretebilmektedir. Sonuç olarak ÇBAG'nin aktif güç denetiminde (V_{rq}) bileşeni, reaktif güç denetiminde ise (V_{rd}) bileşeni denetlenerek daha kararlı bir çalışma sağlanabilmektedir [47, 75].



Şekil 3.12. Stator reaktif güç karakteristiği a) $V_{rd}=0$ pu b) $V_{rq}=0$ pu

4. BULANIK MANTIK DENETLEYİCİLER

Bu bölümde bulanık mantık denetleyiciler ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bulanık mantığın yapısı, bulanık küme kavramı, üyelik fonksiyonları, vb. özellikleri incelenerek, bulanık mantığın avantaj ve dezavantajları verilmiştir.

4.1. Giriş

Bulanık mantık kavramı ilk kez 1965’de California Berkeley Üniversitesi’nden Lotfi Asker Zadeh tarafından ortaya koyulmuş, geleneksel matematiksel yaklaşımın yeterli olmadığı durumlar için hemen hemen bütün bilim dallarında kendisine uygulama alanı bulmuş bir kavramdır. Özellikle klasik sistem yaklaşımının gerektirdiği katı tanımlama zorunluluğuna bir alternatif olarak, değişkenlerin bir insanın anladığı şekilde esnek bir yöntemle ifade edilebilmesi, sistemlerin modellenmesi ve denetimi konusunda büyük bir değişimin başlangıcı olmuştur. Günlük hayatta karşılaştığımız durumların bilinen kesin matematiksel tanımlamalarla ifade edilememesi böyle bir yaklaşımı doğurmuş, bu yaklaşım paralelinde günlük olaylar ve durumların sınıflandırılması matematiksel anlamda çok daha esnek bir yapıya kavuşmuştur. Özellikle doğal yaşamda sık karşılaşılan fakat matematiksel yöntemlerle izah edilemeyen belirsizlik durumlarını tanımlayabilme avantajı, bulanık mantık kavramını bilim dünyasında ayrı bir konuma taşımış ve çoğu bilim dalında özellikle doğrusal olmayan sistemlerin çözümünde kendisine uygulama alanı bulabilmiştir. Uygulama alanlarına örnek olarak; çamaşır makineleri, fotoğraf makineleri, klimalar, haberleşme araçları gibi birçok cihaz gösterilebilir. Ayrıca son yıllarda A.B.D.’de askeri alanda, havacılık ve uzay çalışmalarında uygulama örnekleri de mevcuttur. Bir insan için sıradan bir kavramın, sistem tasarımı ve modelleme açısından klasik yöntemlerle tanımlanamadığı durumlara bir çözüm getiren bulanık mantık kavramı gelecek yıllarda uygulama alanını hızla artıracak görünmektedir [76].

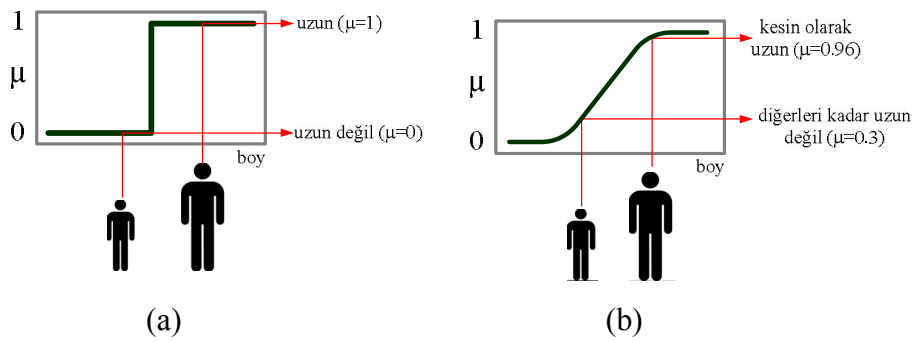
4.2. Bulanık Mantık ve Bulanık Küme Kavramı

Bulanık mantık, insanların yaptığına benzer şekilde sistemleri analiz etmekte kullanılan matematiksel bir yöntemdir. Bu yöntem yardımıyla belirsiz, muğlak

özelli taşıyan durumlardan bir sonuç çıkarabilme klasik yöntemlere göre daha kolay yapılabilmektedir. Ayrıca bir problemi çözmek için klasik karmaşık matematiksel modeller yerine yaklaşık olarak sonuçlandırma amacını taşımaktadır.

Geleneksel matematiksel sınıflandırma yöntemi sınırları kesin değerlerle çizilmiş durum ve kavramları ele almaktadır. İkili mantık olarak da adlandırılan bu yöntemde bir bildirim doğru ya da yanlış değerlerinden ancak birini alabilmektedir. Bunların dışında bir alternatif söz konusu olmamaktadır. Başka bir ifade ile geleneksel matematiksel sınıflandırma yönteminde kesin ve net tanımlamalar söz konusudur.

Bulanık mantık yönteminde ise durum ve kavramlar birden fazla kümeye ait olabilmektedir. Kümelere ait olma durumları üyelik dereceleri ile ifade edilmektedir ve bu üyelik dereceleri elemanın o kümeye ne oranda dahil olduğunun göstergesidir. Şekil 4.1’de, klasik mantık ve bulanık mantık yaklaşımlarına göre kişilerin boy uzunluklarının farklı küme üyeliklerine karar vermeye ilişkin nitelermelerin nasıl yapıldığı gösterilmektedir [77].



Şekil 4.1. Klasik ve bulanık küme kavramlarının grafiksel gösterimi a) Klasik mantık b) Bulanık mantık

Şekil 4.1.a’ da klasik mantık kurallarına göre boy uzunluğu kümesi iki farklı üyelik derecesi almaktadır. Bunlar uzun boylu olanlar ($\mu=1$) ve kısa boylu olanlar ($\mu=0$). Bulanık mantık kurallarına göre boy uzunluğu kümesi ise Şekil 4.1.b de verilmiştir. Burada ise boy uzunluğu kümesi sonsuz sayıda üyelik derecesine sahiptir. Yani üyelik derecesi (μ) 0-1 arasında sürekli. Üyelik derecesi $\mu=1$ ’e yaklaştıkça kişinin uzun boylu kümeye olan üyeliği artmakta, tersi durumda yani üyelik derecesi $\mu=0$ ’a yaklaştıkça kişinin kısa boylu kümeye olan üyeliği artmaktadır [77].

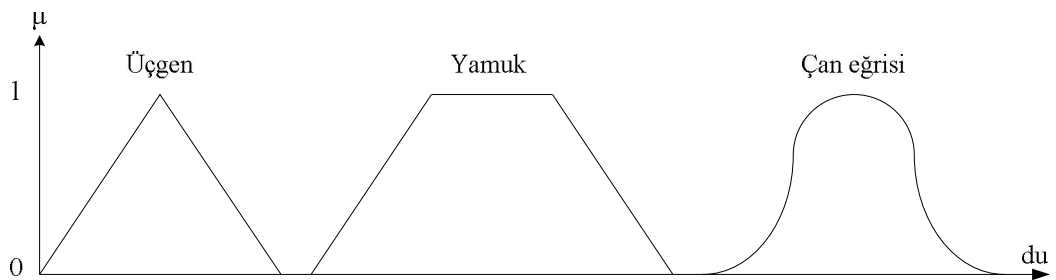
Bir X uzayında tanımlı bulanık A kümesi, $[0,1]$ aralığında değerler alan $\mu(x)$ üyelik fonksiyonuyla ifade edilmekte ve \bar{A} simgesiyle gösterilmektedir.

$$\bar{A} = \{(x, \mu(x) | x \in X)\} \quad (4.1)$$

Bulanık kümeler, X uzayının elemanları (x) ile üyelik fonksiyonu olarak adlandırılan $\mu(x)$ 'in oluşturduğu düzenlenmiş çiftler kümesinden oluşmaktadır. Üyelik fonksiyonu X 'in her bir elemanını $[0, 1]$ aralığındaki bir üyelik derecesine karşılık gelmektedir. Ayrıca bulanık kümeler ayrık olarak tanımlanabileceği gibi sürekli formda da tanımlanabilir.

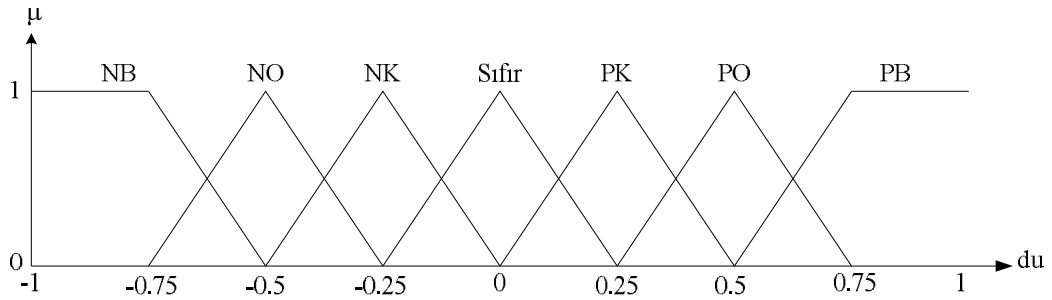
4.3. Üyelik Fonksiyonları

Bulanık mantıkta kullanılan üyelik fonksiyonları tek bir şekle sahip değildir. İhtiyaç duyulan sisteme bağlı olarak kullanıcı tarafından en uygun şekil seçilebilir. Hangi tür üyelik fonksiyonunun kullanılacağı ve kullanılacak üyelik fonksiyonu sayısı tamamen kullanıcıya bağlı olup daha fazla sayıda üyelik fonksiyonunun kullanılması çözümün hassasiyetini artırmaktadır. Kullanılan üyelik fonksiyonları değişik türlerde olmakla birlikte en çok kullanılanlar üçgen, yamuk, gaussian ve çan tipinde olanlardır. Şekil 4.2'de bu tür üyelik fonksiyonlar için örnekler görülmektedir. Genel olarak sistemde hassasiyet önemli ise üçgen üyelik fonksiyonu kullanılırken, değişimin çok hızlı olması istenilen yerlerde yamuk üyelik fonksiyonu kullanılmaktadır.



Şekil 4.2. Bulanık mantık üyelik fonksiyonu çeşitleri

Pratikte üyelik fonksiyonları denetlenecek sistemin durumuna göre uygulayıcı tarafından yamuk, üçgen, çan eğrisi gibi çok değişik şekillerde seçilebilir. Üyelik fonksiyonları genelde küçük, orta, büyük olarak 3; küçük, orta küçük, orta, orta büyük, büyük olarak 5; veya çok küçük, küçük, az küçük, sıfır, az büyük, büyük, çok büyük olarak 7 etiketle tek sayı olarak tanımlanmaktadır. Şekil 4.3'de 7 etiketli üçgen üyelik fonksiyonları verilmiştir. Burada ölçeklendirme katsayısı 1/4 şeklinde alınmıştır. Bu değer 1/4, 1/8 gibi denetim stratejisine uygun herhangi bir değer olabilir.



Şekil 4.3. Yedi etiketli üyelik fonksiyonu ve ölçeklendirme katsayısı

Sonuç olarak bir bulanık küme, o kümenin elemanları ve elemanların üyelik dereceleri ile oluşturulabilir. A' bir bulanık küme olmak üzere;

$$\bar{A} = \{u / \mu_{A'}(u) | u \in U\} \quad (4.2)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada u , A' kümesinin bir elemanı, $\mu_{A'}(u)$ üyelik fonksiyonu, U ise A' kümesinin tanımlandığı evrendir.

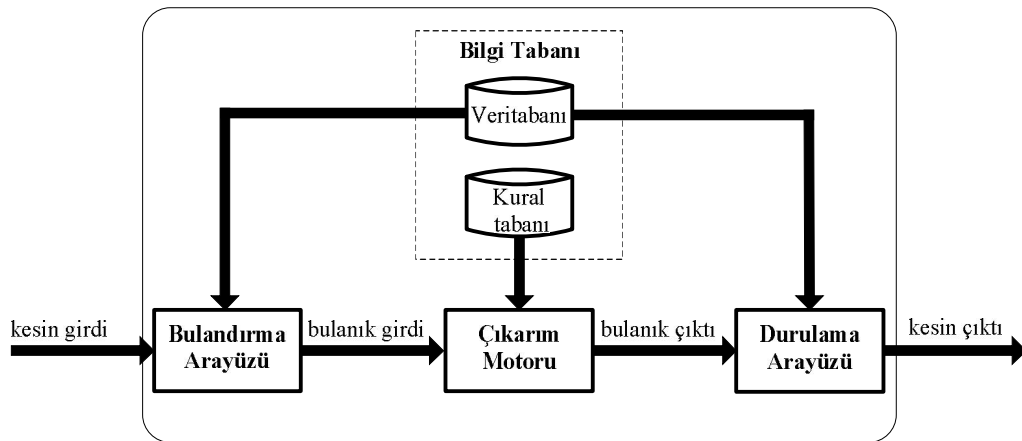
Üyelik fonksiyonu bir kümenin elemanlarının o kümeye hangi üyelik derecesi ile ait olduğunu gösteren ve $[0, 1]$ aralığında değer alabilen bir fonksiyon olduğuna göre;

$$\mu_{A'}(u) : U \rightarrow [0,1]; \mu_{A'}(u) \in [0,1] \quad (4.3)$$

Burada A bulanık küme, U ise A' kümesinin üzerinde tanımlandığı evren, $\mu_{A'}(u)$ ise üyelik fonksiyonudur [78].

4.4. Bulanık Mantık Denetleyici

Karmaşık sistemlerin modellenmesi çok zor bir iştir. Bu nedenle karmaşık bir sistemde, hatalı modellemeler kararsız sistemlere ya da kararsız sistem performanslarına yol açabilmektedir. Bulanık mantık denetleyici, modellenmesi zor olan sistemler için etkili alternatif bir yaklaşımdır. Bulanık mantık denetleyiciler, denetim algoritmasını oluşturmak için insanın karar verme işleminin nitel durumunu kullanmaktadır [80]. Şekil 4.4’de bulanık mantık denetleyicinin temel yapısının blok diyagramı görülmektedir. Burada; sistem değişkenleri, denetlenen sistemden ölçülen giriş değişkeni ve sistemin denetimi için kullanılan çıkış değişkeni olmak üzere iki çeşittir. Bulandırma birimi en son ölçülen verinin uygun dilsel değerlere dönüştürülmesini sağlamaktadır. Bulanık bilgi tabanı bilginin iki ana tipini kapsamaktadır. Veri tabanı, her bir sistem değişkeninin değerleri gibi kullanılan bulanık kümelerin üyelik işlevlerini tanımlarken, kural tabanı ise giriş bulanık değerlerin, çıkış bulanık değerlerine tam olarak eşlenmesini temsil etmektedir. Karar verme birimi bulanık mantık denetleyicinin özüdür ve arzu edilen denetim stratejisine erişmek için, yaklaşık çıkarım sağlaması ile insan gibi karar verme yeteneğine sahiptir. Durulama birimi ise karar verme biriminden gelen bulanık bilgileri, gerçek değerlere dönüştürerek, sistemin tanıyabileceği denetim hareketi haline gelmesini sağlar [79].



Şekil 4.4. Bulanık mantık denetleyicinin temel yapısı

4.4.1. Bulandırma arayüzü

Bulandırma, sistemden alınan giriş bilgilerini dilsel niteleyiciler olan sembolik değerlere dönüştürme işlemi olarak tanımlanmaktadır. Üyelik fonksiyonundan faydalanılarak giriş bilgilerinin ait olduğu bulanık kümeyi/kümeleri ve üyelik derecesini tespit edip, girilen sayısal değere küçük, en küçük, gibi dilsel değişken değerler atamaktadır. Sistemin verimli çalışmasını sağlamak amacıyla değişik şekillerde (üçgen, yamuk, çan eğrisi,..vb) seçilebilir [78].

4.4.2. Bilgi tabanı

Bilgi tabanı uygulama alanı hedeflerinin bilgisini içermektedir. Ayrıca kural ve üyelik fonksiyonlarını tanımlamaktadır. Bilgi tabanı; veri tabanı ve kural tabanından meydana gelmektedir. Veritabanı denetim kuralları ve veri işlemede kullanılan gerekli tanımları içermektedir. Kural tabanı ise stratejiyi ve kuralları sözel ifadeler aracılığı ile tanımlamaktadır. Kural tabanı, sözel olarak ilgili sistemin modellenmiş hali olarak düşünülebilir [79].

Veri tabanı:

Denetimi yapılan sistemle ilgili; bulandırma, bulanık çıkarım, durulama işlemleri sırasında gerek duyulan üyelik fonksiyonu ve kural tablosu bilgileri veri tabanından kullanıma sunulmaktadır.

Kural tabanı:

Kural tabanı, denetim amaçlarını karakterize eder. Denetim topluluğu, dilsel denetim kurallarının bir kümesi aracılığı ile bilinir. Bulanık bir sistem, uzman bilgisine dayanan dilsel deyimlerin oluşturduğu bir küme ile karakterize edilebilir. Uzman bilgisi, bulanık mantıkta bulanık koşul deyimleri ile kolayca gerçekleştirilen genellikle 'EĞER-O HALDE' kuralları formundadır. Bulanık denetim kuralları, bulanık mantık denetleyicisinin kural kümesi veya kural tabanlı bulanık koşul deyimleri olarak tanımlanabilir.

Temel olarak, dilsel denetleyici EĞER-O HALDE şeklindeki kurallara sahiptir, ancak bu kurallar farklı şekillerde gösterilebilir. Bir çok sistemde, kurallar şu şekilde verilir:

1. Eğer (hata) Neg ve (hatanın değişimi) Neg O halde (çıkış) NB
2. Eğer (hata) Neg ve (hatanın değişimi) Sıfır O halde (çıkış) NO
3. Eğer (hata) Neg ve (hatanın değişimi) Poz O halde (çıkış) SIFIR
4. Eğer (hata) Sıfır ve (hatanın değişimi) Neg O halde (çıkış) NO
5. Eğer (hata) Sıfır ve (hatanın değişimi) Sıfır O halde (çıkış) SIFIR
6. Eğer (hata) Sıfır ve (hatanın değişimi) Poz O halde (çıkış) PO
7. Eğer (hata) Poz ve (hatanın değişimi) Neg O halde (çıkış) SIFIR
8. Eğer (hata) Poz ve (hatanın değişimi) Sıfır O halde (çıkış) PO
9. Eğer (hata) Poz ve (hatanın değişimi) Poz O halde (çıkış) PB

Sıfır, Neg (Negatif), Poz (Pozitif), NB (Negatif Büyük), NO (Negatif Orta), PO (Pozitif Orta) ve PB (Pozitif Büyük) bulanık kümenin etiketleridir. Yukarıda verilen kural tabanının çizelge olarak gösterilmesi Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kuralların çizelge halinde yazılması

Δe \ e	Neg	Sıfır	Poz
Neg	NB	NO	Sıfır
Sıfır	NO	Sıfır	PO
Poz	Sıfır	PO	PB

Burada, giriş değişkenleri eksenlerde ve çıkış değişkenleri ise çizelgenin içinde verilmiştir. Çizelgenin boş bir hücrenin olması durumunda bu, bir kuralın eksik olduğunun göstergesidir ve bu yapı tamamlılığı kontrol etmek için kullanışlıdır.

4.4.3. Çıkarım motoru

Çıkarım motoru bulanık mantık denetleyicinin çekirdeği olarak kabul edilmektedir. Çıkarım motoru, bulanık mantıktaki çıkarım kurallarını ve bulanık gerçeklemeyi kullanarak denetim etkisini elde etme ve ayrıca bulanık mantıktaki insanın karar vermesine benzer benzetimleri yapma özelliğine sahiptir. Çıkarım motoru yardımıyla

birçok bulanık gerçekleştirme yapılmaktadır. Yani insan beyninin bir benzetimi çıkarım motorunda yapılmaya çalışılmaktadır [78].

4.4.4. Durulama arayüzü

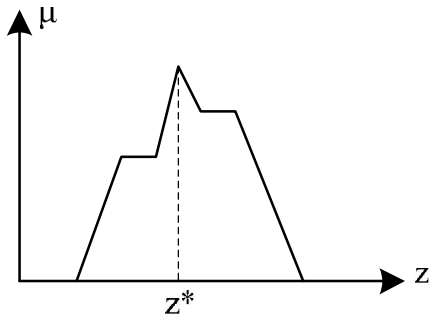
Bulanık çıkarımın sonucu, bulanık bir kümedir. Bu sonucun sisteme tekrar uygulanması için giriş değeri gibi sayısal değere dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu işlem durulama olarak adlandırılmaktadır. Durulama birimi karar verme biriminden gelen bulanık bir bilgiden bulanık olmayan ve uygulamada kullanılacak gerçek değerlerin elde edilmesini sağlamaktadır [78-80].

Durulama işleminde değişik yöntemler kullanılmaktadır. Önce her kural için üyelik derecelerinden oluşan değer ve sonuç kuralı tespit edilmektedir. Daha sonra, en uygun yöntem seçilerek durulama yapılmaktadır. En çok kullanılan durulama yöntemleri şu şekilde sıralanabilir;

1. Maksimum üyelik yöntemi,
2. Ağırlık merkezi yöntemi,
3. Mean-Max üyelik yöntemi.

1. Maksimum üyelik yöntemi:

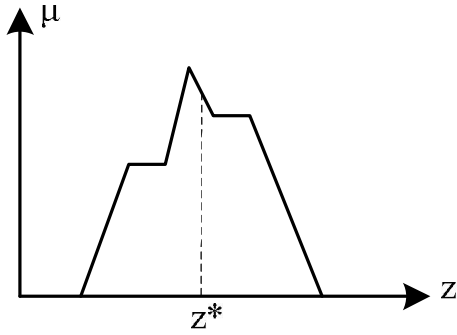
Yükseklik yöntemi olarak da adlandırılmaktadır. Bütün üyelik dereceleri içinde en büyük olana eşittir. Çıkış değerinin elde edilişi Şekil 4.5’de görülmektedir.



Şekil 4.5. Maksimum üyelik yöntemi

2. Ağırlık merkezi yöntemi:

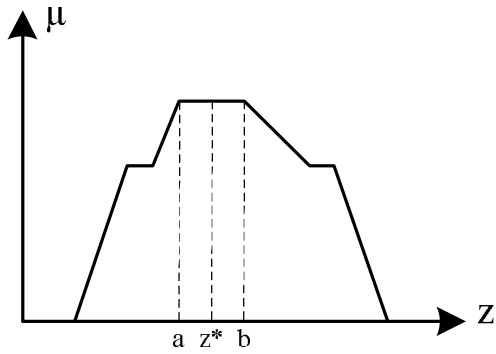
Ağırlık merkezi veya alan merkezi olarak da bilinen bu yöntem en yaygın kullanılan durulama yöntemidir. Çıkış değerinin elde edilişi Şekil 4.6'da görülmektedir.



Şekil 4.6. Ağırlık merkezi yöntemi

3. Mean-Max üyelik yöntemi:

Maksimum üyelik fonksiyonu yöntemiyle ilişkilidir. Bu fonksiyon maksimum üyelik derecesi tek bir nokta olmayan, düz olabilen sistemler için tercih edilmektedir. Bu yöntem yardımıyla çıkış değerinin elde edilişi Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Mean-max üyelik yöntemi

4.4.5. Bulanık mantık denetleyicinin üstünlükleri

Bulanık mantığın insan düşünüş tarzına uygun olması önemli bir üstünlüktür. Bulanık mantığın bu özelliği sebebiyle denetim işlemlerinin bir çoğu dilsel niteleyicilerle yapılabilmektedir.

Bulanık mantıkta sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duyulmadığı için matematiksel modeli iyi tanımlanmamış, zamanla değişen ve doğrusal olmayan sistemler en iyi uygulama alanlarıdır.

Bulanık mantıkta, işaretlerin bir ön işleme tabi tutulmaları ve geniş bir alana yayılmış değerlerin az sayıda üyelik işlevlerine indirgenmeleri, uygulamaların daha hızlı bir şekilde sonuca ulaşmasını sağlamaktadır [80].

4.4.6. Bulanık mantık denetleyicinin sakıncaları

Bulanık mantık denetleyicilerin otomatik denetim sistemlerindeki deneyim ve insanın uzman bilgisini birleştiren araçları sağlamasına karşın, önemli sakıncaları vardır.

Bulanık mantık uygulamalarında mutlaka kuralların uzman deneyimlerine dayanarak tanımlanması gerekmektedir. Üyelik fonksiyonlarını ve bulanık mantık kurallarını tanımlamak her zaman kolay değildir. Bulanık mantık denetleyiciyi ayarlama, henüz bilinen bir analitik tekniği olmayan açık bir sorundur. Bu nedenle, ayarlama deneme yanılma yoluyla yapılmak zorundadır. Bu da uzun zaman alabilmektedir.

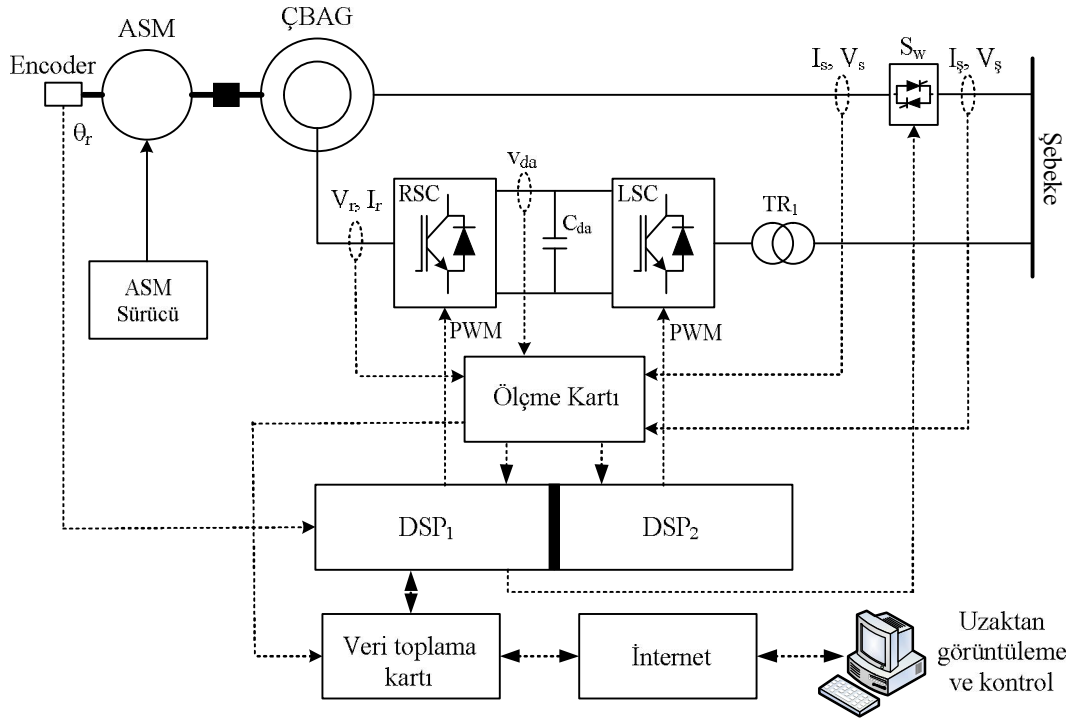
Sistemlerin kararlılık, gözlemlenebilirlik ve denetlenebilirlik analizlerinin yapılmasında ispatlanmış kesin bir yöntemin olmayışı bulanık mantığın temel sorunudur. Bulanık mantık denetim sisteminin kararlılığını sağlayabilecek model geliştirmek zordur. Bu problemin çözümlerinden biri, kararlılığı kesinleştirmek için geleneksel denetim sistemlerini bulanık sistemlerle birlikte kullanmaktır [80].

5. GERÇEKLEŞTİRİLEN DENEYSSEL KURULUM

Bu bölümde deneysel çalışmalar sırasında kullanılan deney düzeneğinin tasarım aşamaları ayrıntısıyla ele alınmıştır. Ayrıca kullanıcıların sistemi uzaktan izleyebilmesi ve denetleyebilmesi için hazırlanan arayüz programı da bu bölümde açıklanmıştır.

5.1. Giriş

Gerçekleştirilen deneysel kurulumla ait blok diyagram Şekil 5.1’de verilirken deneysel kurulumun genel görünümü Resim 5.1’de verilmiştir. Deneysel kurulum, mekaniksel yapı, güç elektroniği dönüştürücüsü, ölçme kartı, denetim kartları, tristörlü senkronizasyon anahtarı, veri toplama kartı ve bilgisayar arayüz yazılımından meydana gelmektedir. Deneysel kurulumun basamakları aşağıda ayrıntılı olarak ele alınmıştır.



Şekil 5.1. Gerçekleştirilen deneysel kurulumla ait blok diyagram



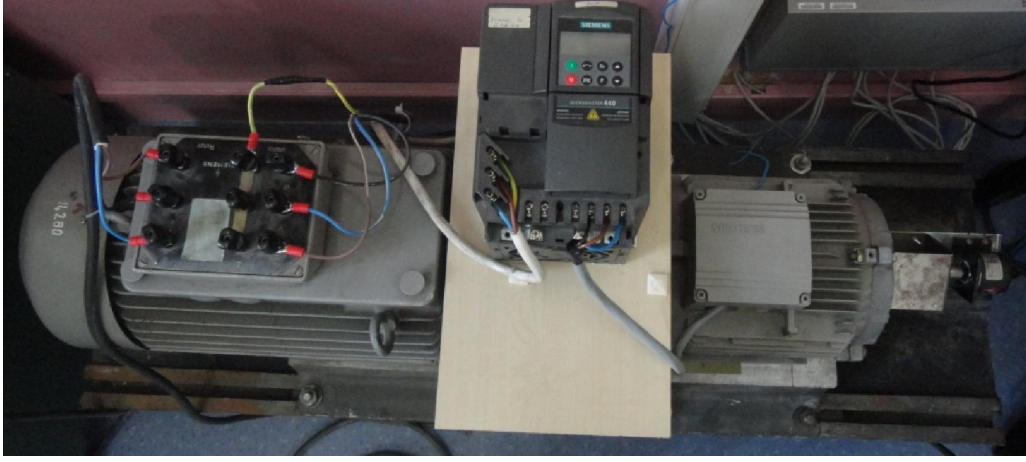
Resim 5.1. Deneysel kurulumun genel görünümü

5.2. Tasarlanan Mekaniksel Yapı

ÇBAG'nin ihtiyaç duyduğu mekaniksel enerji miline akuple bağlı bir asenkron motor (ASM) tarafından sağlanmaktadır. Deneysel çalışmalarda kullanılan ÇBAG ve ASM'nin etiket değerleri Çizelge 5.1'de verilmiştir. ASM'nin senkron altı ve senkron üstü farklı hız değerlerinde döndürülmesi amacıyla değişken hızlı bir ASM sürücü kullanılmıştır. Ayrıca aynı mil üzerine pozisyon sensörü akuple edilerek ÇBAG'nin rotor pozisyon bilgisi okunarak DSP'ye aktarılmıştır. Gerçekleştirilen mekaniksel yapının görünümü Resim 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan ÇBAG ve ASM'nin etiket değerleri

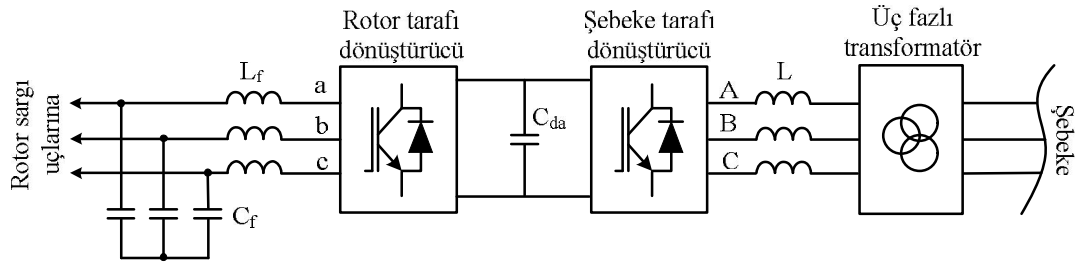
ÇBAG	ASM
Stator	220/400 V Δ/Y 50 Hz
220/380 V Δ/Y 50 Hz	14.3/8.2 A Δ/Y 4 kW
17.1/9.9 A Δ/Y 4 kW	Cosφ=0.83 1440 rpm
Cosφ=0.8 1410 rpm	
Rotor	
130 V / 21 A	



Resim 5.2. Oluşturulan mekaniksel yapının görünümü

5.3. Tasarlanan Güç Elektroniği Dönüştürücü Yapısı

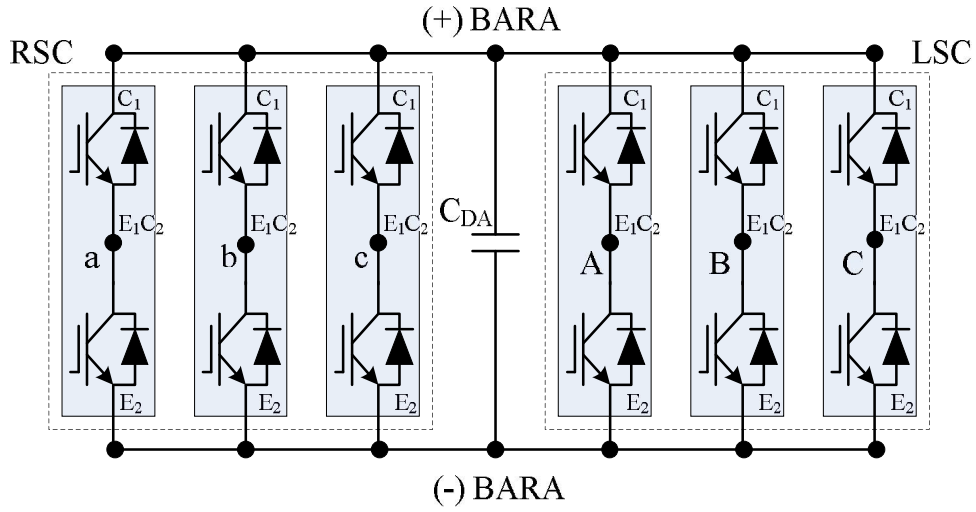
ÇBAG'nin rotor devre enerjisinin denetimi için çift yönlü akım akışının olabildiği gerilim kaynaklı iki eviriciden meydana gelmiş güç elektroniği dönüştürücüsü tasarlanmıştır. Şekil 5.2'de güç elektroniği dönüştürücü yapısının blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 5.2. Güç elektroniği dönüştürücü yapısının blok diyagramı

Güç elektroniği dönüştürücüsü, üç fazlı transformatör, üç fazlı şok bobinleri, şebeke tarafı dönüştürücü, doğru akım hat kondansatörü, rotor tarafı dönüştürücü ve LC filtreden meydana gelmektedir. Şebeke ve rotor tarafı dönüştürücü yapılarının oluşturulmasında güç anahtarı olarak IGBT kullanılmıştır. IGBT seçiminde deneysel çalışmalarda kullanılan ÇBAG'nin rotor sargı akımı dikkate alınarak, FUJI firması tarafından üretilen 2MBI100U4A-120 modülü kullanılmıştır [81]. Her bir modül kendi içerisinde yarım köprü bağlantı oluşturacak şekilde iki adet IGBT güç

anahtarından oluşmaktadır. Kullanılan modüldeki anahtarların her biri 100 A akım taşıma ve 600 V gerilim tutma kapasitesine sahiptir. 2MBI100U4A-120 IGBT ikili blok yapısı ve dönüştürücü bağlantısı Şekil 5.3’de verilmiştir. IGBT anahtarların kesime gitmesi durumunda uçlarında oluşacak yüksek gerilimden korunması amacıyla her modül için $1\mu\text{F}/1200\text{ V}$ değerinde snubber kondansatörler kullanılmıştır. Generatör ve transformator endüktansları yeterli olduğu için ayrıca iletimde söndürme devresi tasarlanmamıştır.

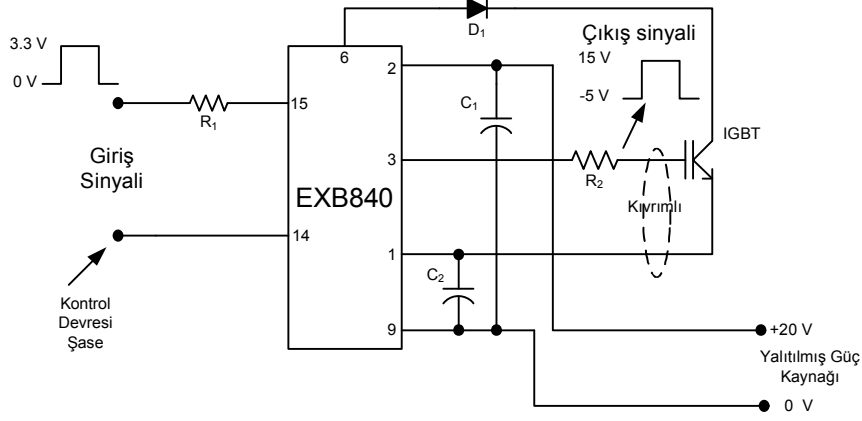


Şekil 5.3. 2MBI100U4A-120 IGBT ikili blok yapısı ve dönüştürücü bağlantısı

Rotor ve şebeke tarafı güç elektroniği dönüştürücüleri arasında 4 adet $4700\mu\text{F}/450\text{ V}$ kondansatör yerleştirilmiştir. Bu kondansatörler DA gerilimde yaşanacak salınımları önlemekle beraber ÇBAG'nin senkron altı ve senkron üstü hızlara geçişlerde kısa süreli enerjinin depolanması amacıyla da kullanılmaktadır.

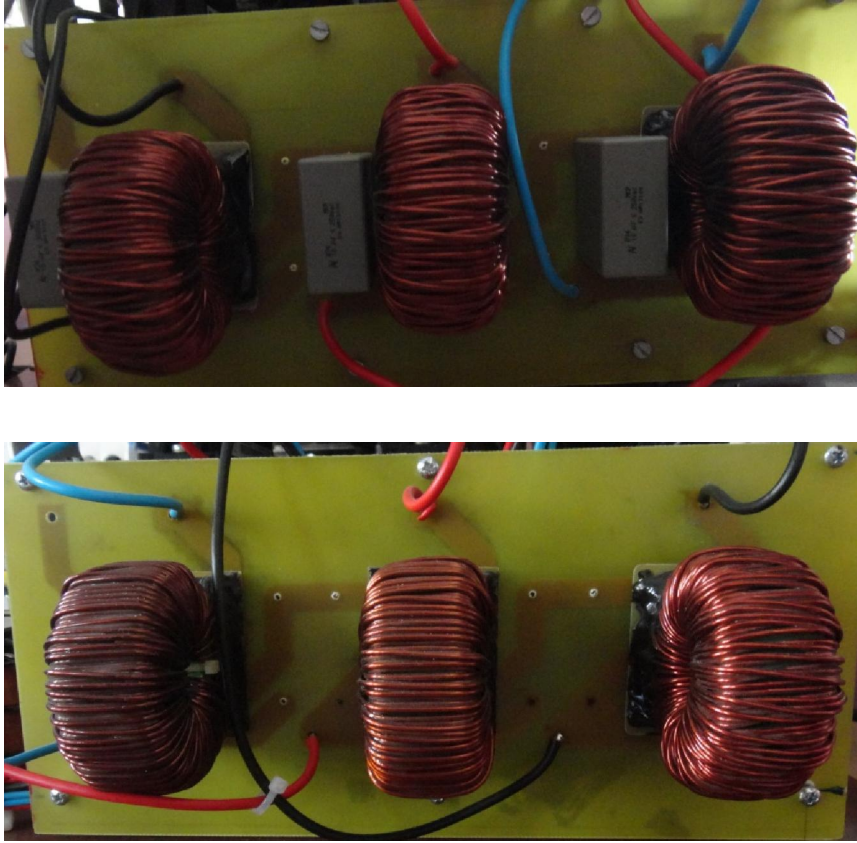
Güç elektroniği dönüştürücü yapısında kullanılan IGBT güç anahtarlarının DSP tarafından sürülebilmesi için bir sürme devresine ihtiyaç vardır. Çünkü DSP tarafından üretilen PWM sinyallerinin genliği 3.3 V 'tur ve bu değer IGBT güç anahtarlarının sürülebilmesi için yeterli değildir. Ayrıca her güç anahtarının yalıtılmış DA güç kaynağından beslenme zorunluluğu sürücü devrenin kullanılmasını gerekli kılmıştır. Uygulamada Fuji firması tarafından üretilen EXB-840 IGBT sürücüsü kullanılırken her IGBT sürücüsü için yalıtılmış DA güç kaynağı

tasarlanmıştır. Şekil 5.4’de uygulamada tek anahtar için kullanılan sürücü devre şeması verilmiştir [82,83].



Şekil 5.4. Tasarlanan IGBT sürücü devre şeması

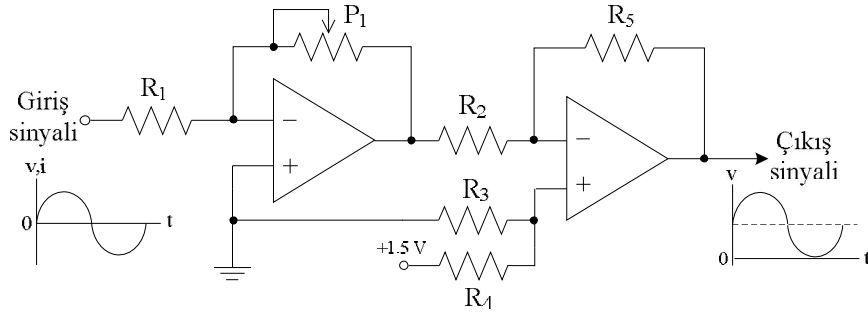
Şebeke tarafındaki güç elektroniği dönüştürücüsünün şebekeye bağlantısı üç fazlı bir transformatör yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu sayede hem galvanik izolasyon sağlanmış, hem de dönüştürücü çıkış geriliminin şebekeye uygunlaştırılması kolaylaştırılmıştır. Transformatör seçiminde dönüştürücü çıkış gerilimi ile şebeke gerilimi arasındaki dönüştürme oranı ve dönüştürücü gücü dikkate alınmıştır. Deneysel çalışmalar için seçilen üç fazlı transformatör 4 KVA gücünde ve 55/380 V dönüştürme oranına sahiptir. Üç fazlı transformatör ile şebeke tarafındaki dönüştürücü arasında üç fazlı şok bobin bağlanmıştır. Bu bobin şebeke tarafındaki dönüştürücünün senkron altı hızlarda PWM doğrultucu olarak (boost konverter) çalışması için gereklidir. Ayrıca şok bobin yardımıyla şebekeden çekilen akım harmonikleri azaltılarak toplam harmonik bozulum (THD) değeri küçültülmüştür. Üç fazlı şok bobinin seçiminde anahtarlama frekansı, şebeke frekansı ve yük dikkate alınarak $L=1$ mH olarak seçilmiştir [84]. Ayrıca rotor tarafı güç elektroniği dönüştürücü çıkış akımındaki yüksek frekanslı harmonik bileşenlerin süzülmesi için LC filtre kullanılmıştır. LC filtredeki eleman değerleri; anahtarlama frekansı, rotora uygulanan gerilimin frekansı ve dönüştürücü gücü dikkate alınarak $L_f=1.4$ mH, ve $C_f=20$ μ F olarak seçilmiştir [84]. Deneysel çalışmalarda kullanılan LC filtre ile üç fazlı şok bobinin görünümü Resim 5.3’te verilmiştir.



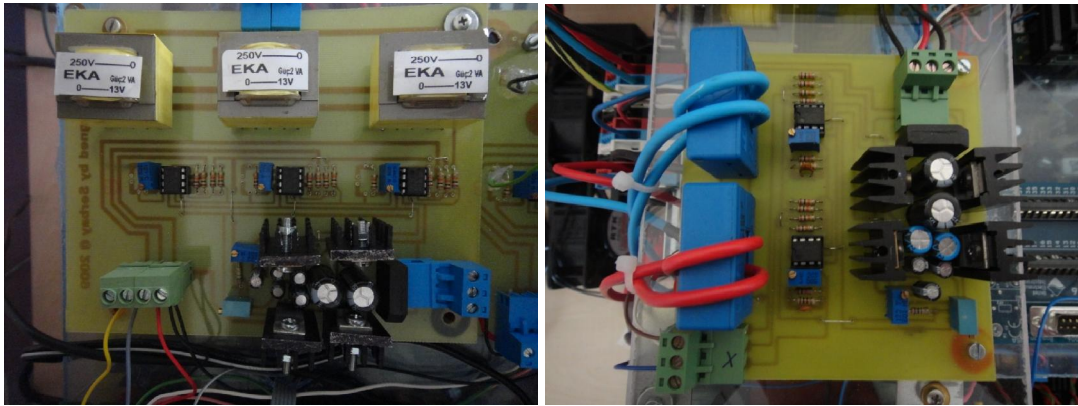
Resim 5.3. Tasarlanan LC filtre ve şok bobini

5.4. Ölçme Kartı

Şebeke gerilimleri, akımları, ÇBAG stator gerilimleri, akımları ile ÇBAG rotor akımlarını DSP'nin analog girişlerine uygun hale getirmek amacıyla bir ölçme kartı tasarlanmıştır. Tasarlanan ölçme kartında, LEM firması tarafından üretilen LA100-P akım sensörü, LV25-P gerilim sensörü ve 250/13.5 dönüştürme oranına sahip gerilim transformatörleri kullanılmıştır. Akım ve gerilim algılayıcılarından elde edilen sinyaller pozitif ve negatif değerlere sahip olduklarından doğrudan DSP'ye uygulanamamaktadır. Bunun nedeni DSP'nin analog giriş kanallarının 0-3 V aralığındaki sinyalleri sayısal değere dönüştürebilmesidir. Bu nedenle akım ve gerilim algılayıcılarından alınan sinyallerin negatif değerlerinin de DSP'de işlenebilmesi için +1.5 Volt DA bindirme devresi tasarlanmıştır. Şekil 5.5' de bir faz için tasarlanan devre yapısı verilmiştir [85]. Tasarlanan gerilim ve akım ölçme kartlarının görünümü Resim 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.5. Ölçme kartının bir faz için devre yapısı



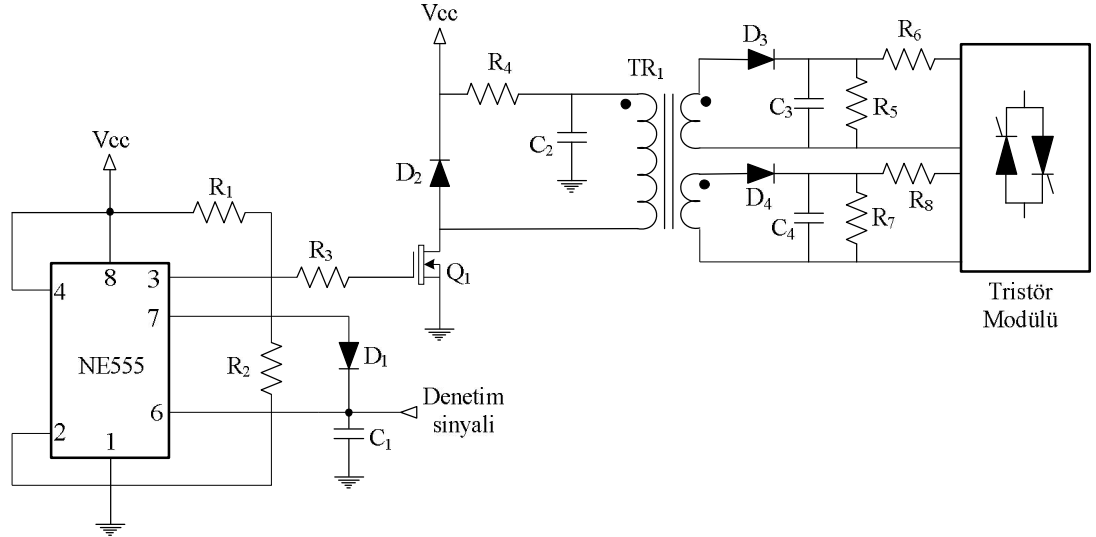
Resim 5.4. Tasarlanan gerilim ve akım ölçme kartlarının görünümü

5.5. TMS320F2812 DSP Denetim Kartı

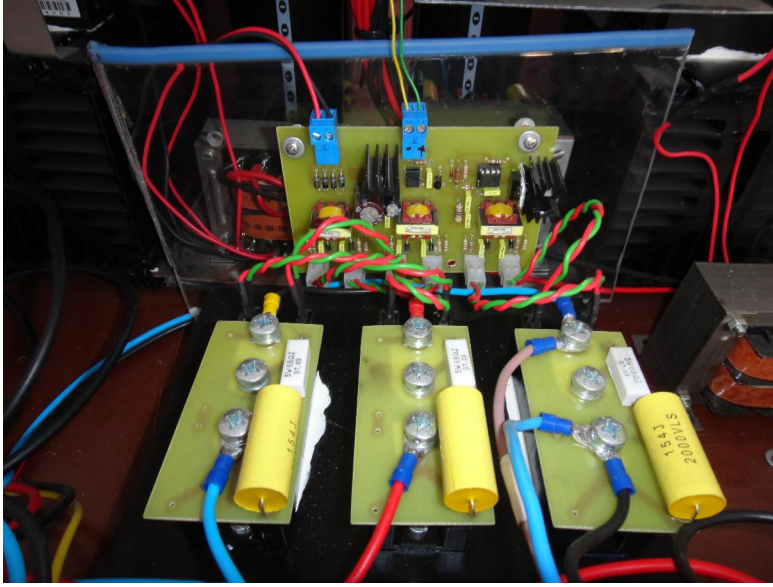
Son yıllarda güç elektroniği yapılarının denetiminde daha karmaşık yöntemler geliştirilmiş ve uygulama alanında da buna uyumlu ve hızlı mikroişlemciler üretilmiştir. Çalışma frekansının yüksek ve analog bilgiyi sayısal bilgiye çevirme zamanının kısa olması sebebiyle gerçekleştirilen bu çalışmada Texas Instruments firması tarafından üretilen TMS320F2812 sayısal sinyal işlemcisi (DSP) tercih edilmiştir. TMS320F2812 DSP, sabit noktalı işlem yapan 32-bit 150 MHz bir işlemci olup, 16 kanal 6.67 ns çözünürlüklü ölü zaman ayarlı programlanabilir PWM çıkışı, 16 kanal 12-bit 80 ns dönüşüm zamanlı A/D çevirici, 4 adet sayısal yakalama girişi ve 4 adet kare dalga kodlayıcı girişe ve C/C++ programlama desteğine sahiptir. İşlemci sabit noktalı aritmetik işlem yapmasına rağmen IQmath kütüphane desteği ile kayan noktalı aritmetik işlem kolaylığında ve ona yakın doğrulukta işlem yapabilmektedir [86].

5.6. Tristörlü Statik Senkronizasyon Anahtarı

ÇBAG'nin şebeke ile paralel bağlanması amacıyla üç fazlı tristörlü statik anahtar tasarlanmıştır. Böylece mekanik anahtarların hantallığı ortadan kaldırılarak şebeke ile paralel bağlanmada yaşanan arklar önlenmiştir. Senkronizasyon şartlarının sağlanmasından sonra denetim kartından gelen sinyalle statik anahtar iletime sokulmaktadır. Böylece paralel bağlanma otomatik olarak denetim kartı yardımıyla yapılmaktadır. Şekil 5.6'da bir faz için tristör sürme devresinin şeması verilmiştir. Her faz için tristör modülü olarak IXYS firması tarafından üretilen MCC132-12 modülü kullanılmıştır. Kullanılan modüldeki tristörlerin her biri 130 A akım taşıma ve 600 V gerilim tutma kapasitesine sahiptir. Resim 5.5'te üç fazlı tristör sürme devresinin gerçekleştirilen devresi görülmektedir.



Şekil 5.6. Bir faz için tristör sürme devresi



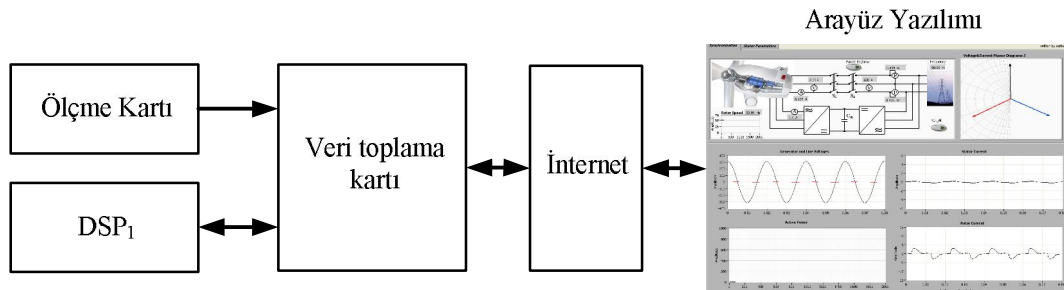
Resim 5.5. Üç faz için tristör sürme devresinin görünümü

5.7. Uzaktan Denetim ve İzleme Yazılımı

Veri toplama kartından verilerin alınması ve alınan bu verilerin analiz edilerek kullanıcıya sunulması, değerlendirilmesi ve kullanıcı tarafından verilen komutların sisteme iletilmesi LabVIEW programında hazırlanan yazılım yardımı ile yapılmaktadır. LabVIEW; verilerin toplanması, analizi ve sunumunda kullanılan, grafik tabanlı program geliştirme ortamıdır. Metin tabanlı programlama dillerine oranla daha güçlü programlama yeteneği ve esnekliğine sahip olan LabVIEW test ve ölçme işlemlerinde, veri toplama ve kontrolünde, bilimsel araştırma çalışmalarında, işlem takibinde, fabrika otomasyonlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yazılımın hazırlanmasında ihtiyaç duyulabilecek hemen hemen her tip fonksiyon LabVIEW programında hazır olarak kullanıcıya sunulduğu için yazılım geliştirmek için harcanan zaman, diğer metin tabanlı programlara oranla önemli ölçüde azaltılmıştır [87].

Hazırlanan uzaktan görüntüleme ve denetim yazılımının blok diyagramı Şekil 5.7’de verilmiştir. Ölçme kartı yardımıyla okunan akım ve gerilim sinyalleri veri toplama kartı aracılığıyla bilgisayara aktarılmaktadır. Alternatif akım sinyallerinin faz analizi gibi girdiler arasındaki zaman ilişkisinin önemli olduğu uygulamalarda eşzamanlı

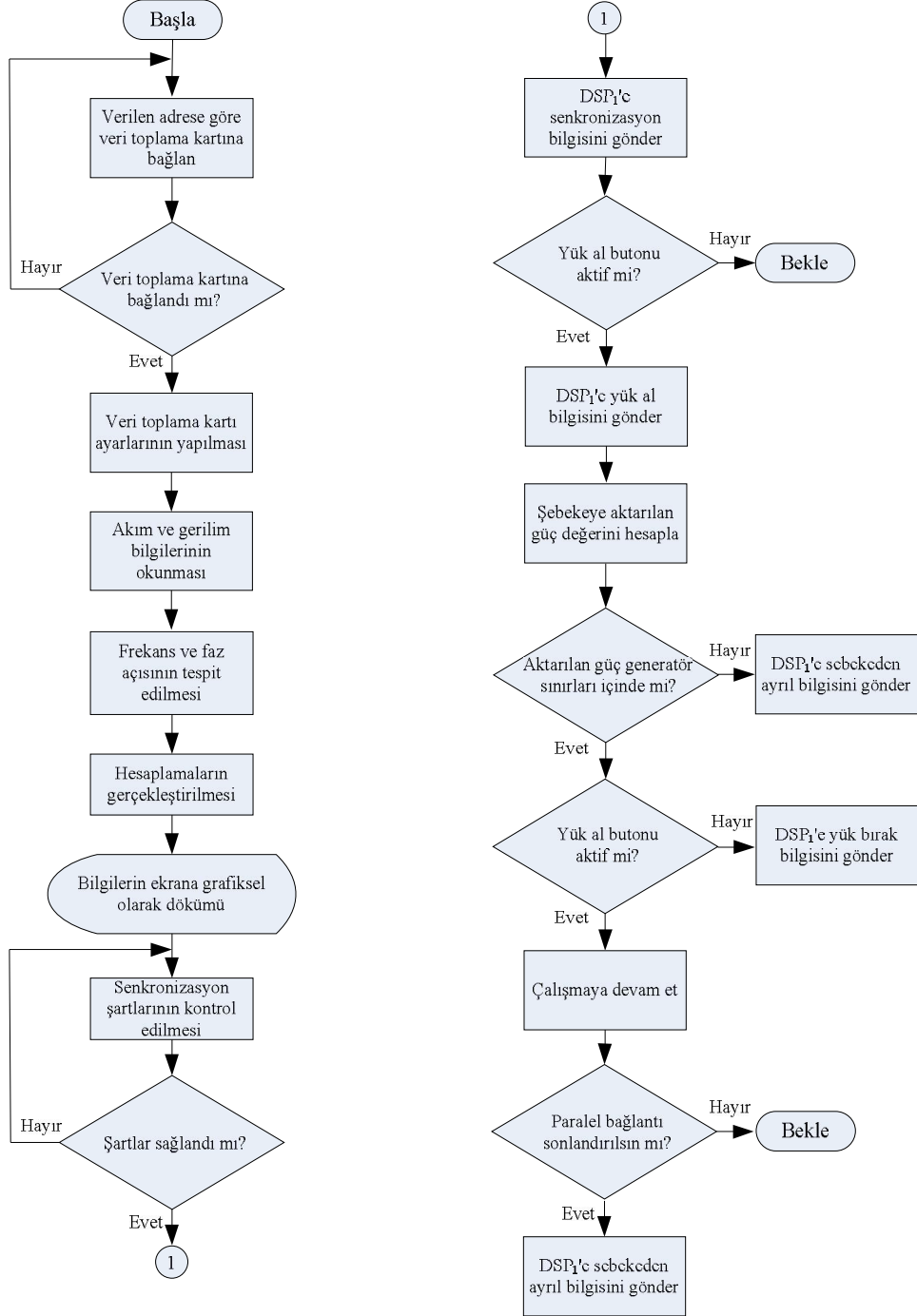
örnekleme ihtiyacı duyulduğundan kullanılan veri toplama kartı eşzamanlı örnekleme özelliğine sahip olacak şekilde seçilmiştir. Veri toplama kartı olarak “United Electronics” firmasına ait PowerDNA model bir veri toplama küpü ve bu küp üzerinde bulunan üç adet eşzamanlı örnekleme özelliğine sahip analog giriş katmanı kullanılmıştır. Bu analog giriş katmanları birbirinden bağımsız 18 bit çözünürlükte ADC giriş katmanına sahip olmakla beraber maksimum 100 kHz/kanal örnekleme hızına sahiptir [88]. Veri toplama küpü üzerinde bulunan ethernet girişi yardımıyla veriler bilgisayara ethernet haberleşmesi üzerinden aktarılmaktadır. Bu sayede ölçüm yapılan sistem ile kullanıcı bilgisayarı aynı noktada olması gerekmediğinden daha esnek bir denetleme ve görüntüleme sistemi elde edilmiştir [87].



Şekil 5.7. Hazırlanan yazılımın blok diyagramı

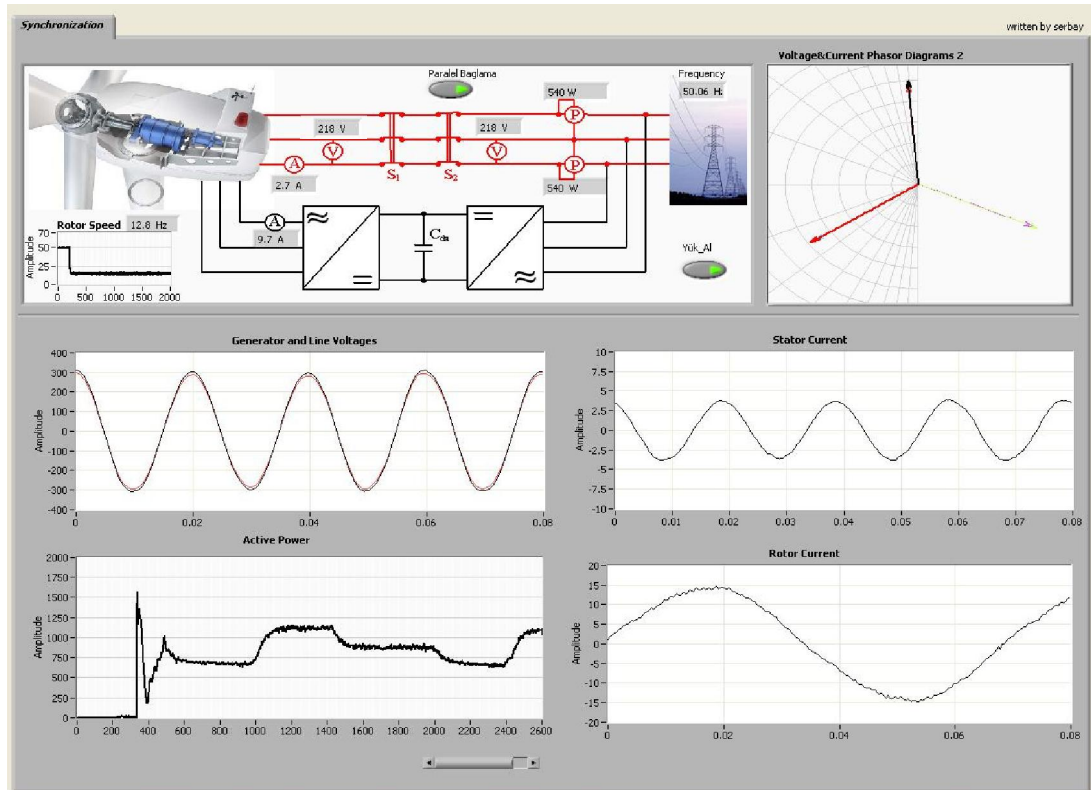
Şekil 5.8’de gerçekleştirilen arayüz yazılımının akış diyagramı verilmiştir. Arayüz programı başlangıçta önceden girilen ve statik olan veri toplama kartının IP numarası üzerinden sisteme bağlanmaya çalışmaktadır. Bağlantının sağlanması durumunda yazılım tarafından otomatik olarak veri toplama kartının ayarları (analog okuma hızı, vb.) gerçekleştirilmektedir. Ayarlar gerçekleştirildikten sonra ölçme kartından akım ve gerilim sinyalleri okunarak bu sinyallerin analizleri gerçekleştirilmektedir. Analizleri gerçekleştirilen sinyaller görsel olarak kullanıcı ekranına çizdirilmektedir. Generatör ve şebeke gerilim sinyalleri değerlendirilerek senkronizasyon şartları kontrol edilmektedir. Senkronizasyon şartlarının sağlanması durumunda yazılım veri toplama kartı aracılığı ile DSP₁’e senkronizasyon komutunu göndermektedir. Generatörün şebekeye paralel bağlanması sonrası eğer kullanıcı, arayüz programında yer alan YÜK AL butonunu aktif ederse yazılım veri toplama kartı aracılığıyla DSP₁’e yük al komutunu göndermektedir. Bu andan itibaren DSP₁ içerisinde gömülü

olan yazılıma bağlı olarak generatör üzerine yük almaktadır. Generatör tarafından şebekeye aktarılan güç değerleri sürekli hesaplanarak sınırlar içinde olup olmadığı denetlenmektedir.



Şekil 5.8. Gerçekleştirilen arayüz yazılımının akış diyagramı

Güç sınırlar dışında ise yazılım DSP₁'e şebekeden ayrılması için komut göndermektedir. Ayrıca kullanıcı, arayüz programında bulunan YÜK AL butonunun aktifliğini sonlandırırrsa DSP₁'e bilgi gönderilerek generatörün üzerine aldığı yükü bırakması sağlanmaktadır. Son olarak kullanıcı istediği anda şebeke ile generatörün paralel bağlanmasını sonlandırabilmektedir. Hazırlanan yazılımın ekran görüntüsü Şekil 5.9'da verilmiştir. Kullanıcı bu ekran yardımıyla şebeke ve generatör gerilimlerinin dalga şekilleri ile birlikte generatör stator ve rotor akımlarının dalga şekillerini görebilmekte, şebekeye aktarılan aktif gücün değişimini zamana göre izleyebilmektedir. Ayrıca kullanıcı paralel bağlanma işlemini görsel olarak bu arayüz üzerinden takip edebilmekte ve ilgili butonlar yardımıyla sistemde kontrol edebilmektedir.



Şekil 5.9. Hazırlanan yazılımın ekran görünümü

6. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu bölümde gerçekleştirilen benzetim ve deneysel çalışmalar anlatılarak elde edilen sonuçlar verilmiştir.

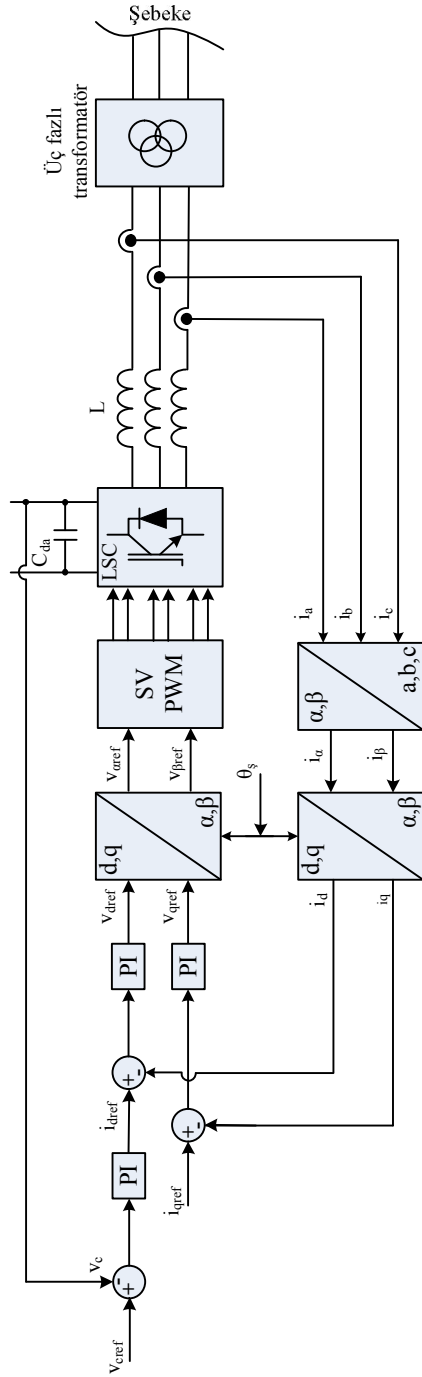
6.1. Şebeke Tarafı Dönüştürücünün Denetimi

Rotor tarafı dönüştürücünün ihtiyacı olan DA bara gerilimi, şebeke tarafı dönüştürücü yardımıyla sağlanmaktadır. Uygulamada şebeke tarafı dönüştürücünün şebekeden çektiği akım harmoniklerinin THD değerinin standartlar içerisinde tutulması en büyük sorun olarak görülmektedir [89, 90]. Bu çalışmada, şebeke tarafı dönüştürücünün denetim algoritması geliştirilerek DA bara geriliminin sabit tutulmasının yanında şebekeden çekilen akım harmoniklerinin THD değerinin standartlarda belirtilen sınırlar içerisinde kalması sağlanmıştır. Şekil 6.1’de hazırlanan denetim algoritmasının blok diyagramı verilmiştir.

DA bara gerilimi, referans bara gerilim değeri ile karşılaştırılarak PI denetleyiciye uygulanmaktadır. PI denetleyici için gerekli olan k_p ve k_i değerleri için çok sayıda deney tekrarlanmış ve sonuç olarak $k_p=12$, $k_i=0,8$ değerlerinde en iyi yükselme ve yerleşme zamanı elde edilmiştir. PI denetleyicinin çıkışından alınan sinyal referans akım sinyalinin d bileşenini (i_{dref}) oluşturmaktadır. Şebeke tarafı dönüştürücünün üç faz giriş akımları (i_a , i_b , i_c) Clarke dönüşümü yardımıyla iki boyutlu (i_α , i_β) akım vektörlerine dönüştürülmüştür. Daha sonra elde edilen bu iki boyutlu akım vektörleri Park dönüşümü yardımıyla d ve q sabit eksen düzleminde, sabit genlikli ve sabit açısal hızla dönen vektörlere dönüştürülmüştür (i_d , i_q). Park dönüşümü için gerekli olan pozisyon bilgisi (θ_s) PLL bloğundan elde edilmiştir. Referans akım sinyalinin q bileşeni (i_{qref}) ise yazılımda sıfır olarak girilmiştir. Referans akım sinyallerinin d ve q bileşenleri dönüştürücü aktif ve reaktif güçlerinin bağımsız olarak denetimini sağlamaktadır. Dönüştürücü aktif ve reaktif güç ifadeleri Eş. 6.1 ve 6.2’de verilmiştir [91].

$$P = \frac{3}{2} V i_d \quad (6.1)$$

$$Q = -\frac{3}{2} V i_q \quad (6.2)$$

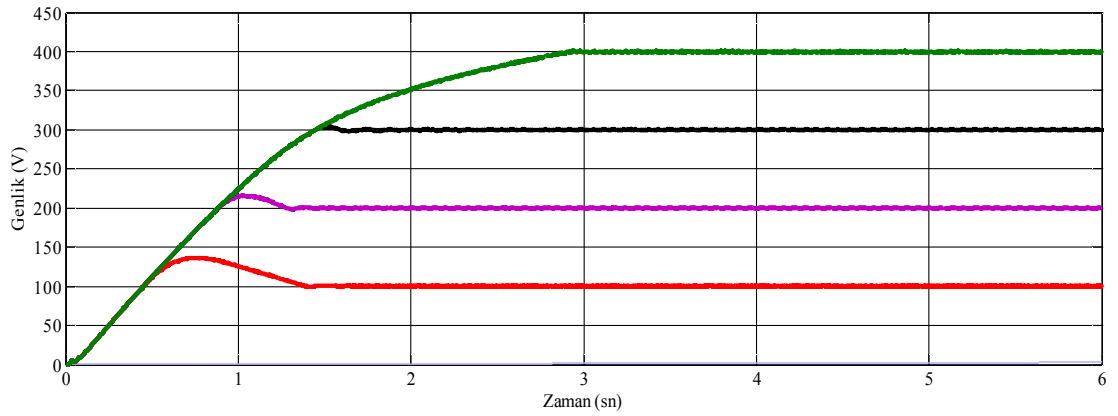


Şekil 6.1. Şebeke tarafı dönüştürücünün denetim blok diyagramı

Elde edilen akım referans sinyalleri (i_{dref} , i_{qref}), dönüştürücü giriş akım sinyallerinin sabit genlikli ve sabit açısal hızla dönen vektörleri (i_d , i_q) ile karşılaştırılarak PI denetleyicilere uygulanmıştır. PI denetleyiciler için gerekli olan k_p ve k_i değerleri için çok sayıda deney tekrarlanmış ve sonuç olarak $k_p=0,04$, $k_i=0,02$ değerlerinde en iyi yükselme ve yerleşme zamanı elde edilmiştir. PI denetleyici çıkışlarından elde edilen referans gerilim değerleri (v_{qref} , v_{dref}) Ters Park dönüşümü yardımıyla iki boyutlu sabit sinyaller 90° faz farkı bulunan iki boyutlu sinüsoidal sinyallere (v_α , v_β) dönüştürülmüştür. Elde edilen bu sinüsoidal sinyaller kullanılarak şebeke tarafı dönüştürücü yapısının denetimi için gerekli olan anahtarlama sinyalleri elde edilmektedir. Darbe Genişlik Modülasyon (DGM) yöntemi olarak Uzay Vektör DGM (UVDGM) yöntemi tercih edilmiştir [91].

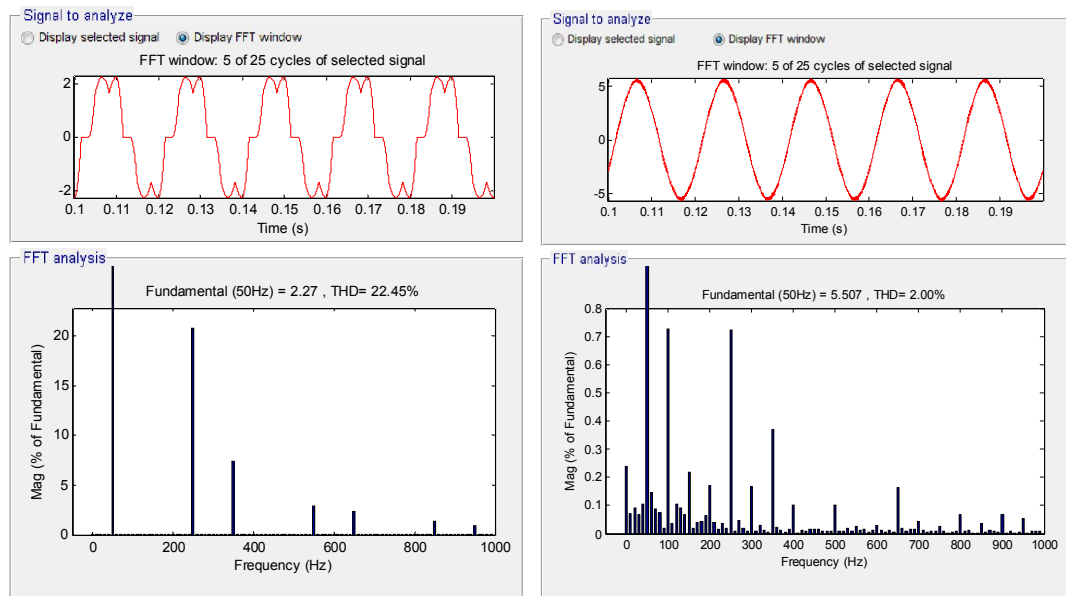
6.1.1. Benzetim çalışmaları

Benzetim çalışmalarında şebeke tarafı dönüştürücünün giriş gerilimi faz-faz 55 V olacak şekilde seçilmiştir. Benzetim çalışmalarının ilkinde referans DA bara gerilim değeri değiştirilerek denetim yapısının tepkisi gözlemlenmiştir. Şekil 6.2’de DA bara gerilim değerinin farklı referans gerilim değerlerine sabitlenmesi gösterilmiştir. Dönüştürücü giriş gerilimi faz-faz 55 V olmasına rağmen dönüştürücü çıkış gerilimi sırasıyla 100 V, 200 V, 300 V ve 400 V değerlerini başarılı şekilde takip edebilmiştir. Burada şebeke tarafı dönüştürücünün yükselten (boost) dönüştürücü olarak kullanıldığı giriş ve çıkış gerilim değerlerinden anlaşılmaktadır.



Şekil 6.2. Farklı DA bara gerilim değerlerinde denetim yapısının tepkisi

Benzetim çalışmalarının bir diğ erinde ise denetim algoritması çalıştırılmadan önce şebeke tarafı dönüştürücünün bir faz için akım eğrisi ile birlikte harmonik analiz sonuçları, Şekil 6.3a'da verilmiştir. Burada görüldüğü gibi akım dalga şekli sinüsoidal formdan uzak ve THD değeri %22,49 olarak ölçülmüştür. Şekil 6.3b'de ise denetim algoritması çalıştırıldıktan sonra şebeke tarafı dönüştürücünün bir faz için akım eğrisi ile birlikte harmonik analiz sonuçları verilmiştir. Burada akım eğrisi sinüsoidal formda ve THD değeri %2,00 olarak ölçülmüştür. Benzetim sonuçlarına göre sunulan denetim yapısı yardımıyla şebeke tarafı dönüştürücünün giriş akım harmonik düzeyi %22,49'dan %2,00 düzeyine düşürülmüştür. Böylece şebeke tarafı dönüştürücünün giriş akım harmonik düzeyi standartlarda belirtilen harmonik sınırları içerisinde tutulmuştur.



(a)

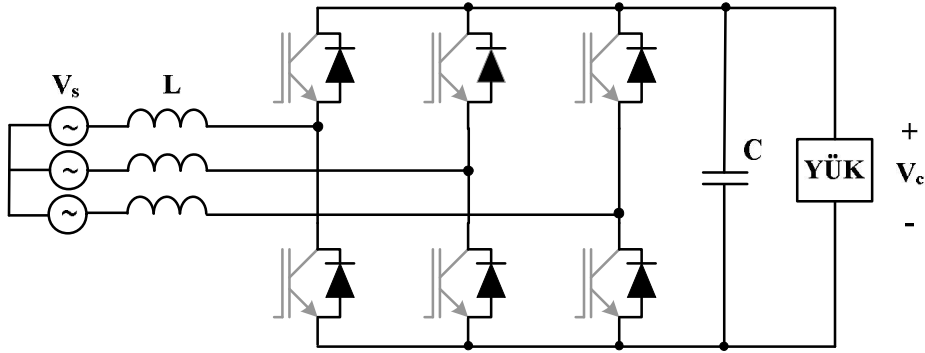
(b)

Şekil 6.3. Şebeke tarafı dönüştürücünün bir faz giriş akım eğrisi ve harmonik analizi
 a) Denetim algoritması çalıştırılmadan önce b) Denetim algoritması çalıştırıldıktan sonra

6.1.2. Deneysel çalışmalar

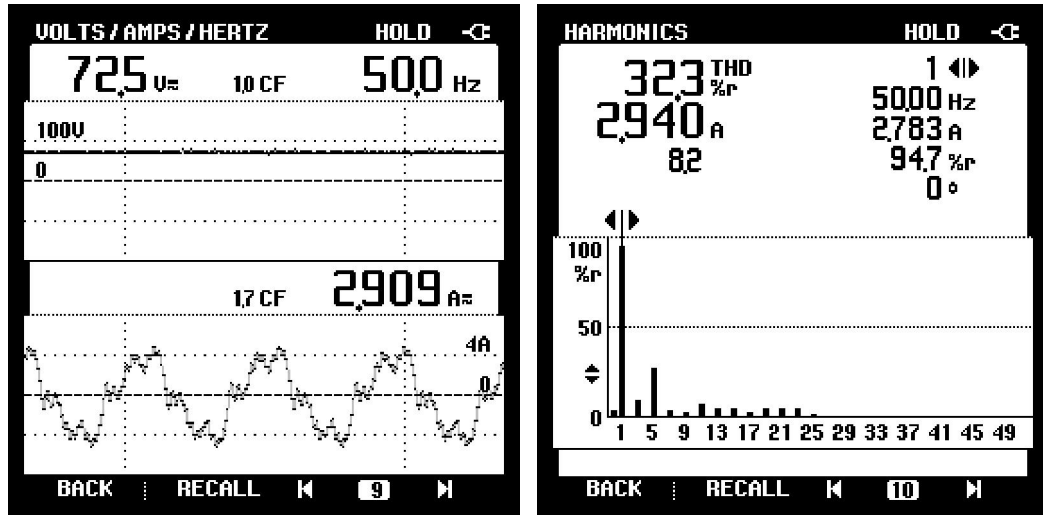
Deneysel çalışmalarda şebeke tarafı dönüştürücünün giriş gerilimi faz-faz 55 V, filtre bobininin endüktans değeri 1 mH, DA bara kondansatörünün değeri 18800 μ F ve referans DA bara gerilim değeri 100 V olarak seçilmiştir. Deneysel çalışmalar sırasındaki ölçümler için FLUKE 43B enerji analizörü kullanılmıştır.

Şekil 6.4'de denetim algoritması çalıştırılmadan, yani IGBT' lere anahtarlama sinyalleri uygulanmadan önce şebeke tarafı dönüştürücü yapısının şeması verilmiştir. Burada şebeke tarafı dönüştürücünün üç faz kontrolsüz doğrultucu yapısında çalıştığı görülmektedir [91].



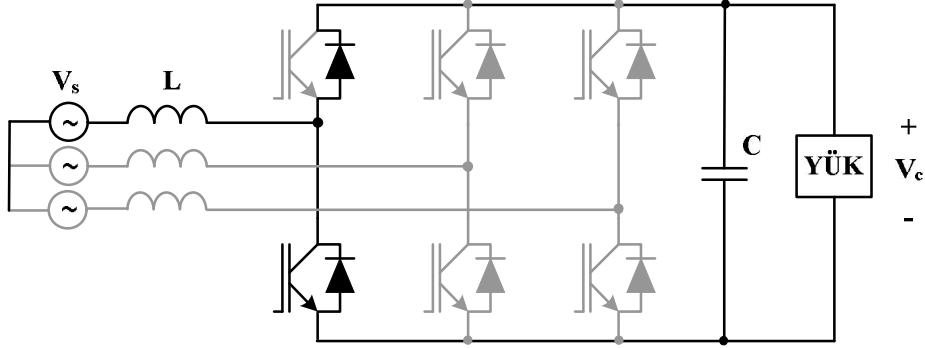
Şekil 6.4. Denetim algoritması çalıştırılmadan önce güç elektroniği yapısı

Denetim algoritması çalıştırılmadan önce; DA hat gerilimi, tek faz için şebeke tarafı dönüştürücünün şebekeden çektiği akım dalga şekli ve akım dalga şeklinin THD grafiği Şekil 6.5 de verilmiştir. Kontrolsüz doğrultucunun şebekeden çektiği akım dalga şekli incelenirse sinüsten oldukça uzak bir dalga formunda ve THD değerinin %32,3 gibi standartlarda belirtilen sınırların dışında olduğu görülebilir.



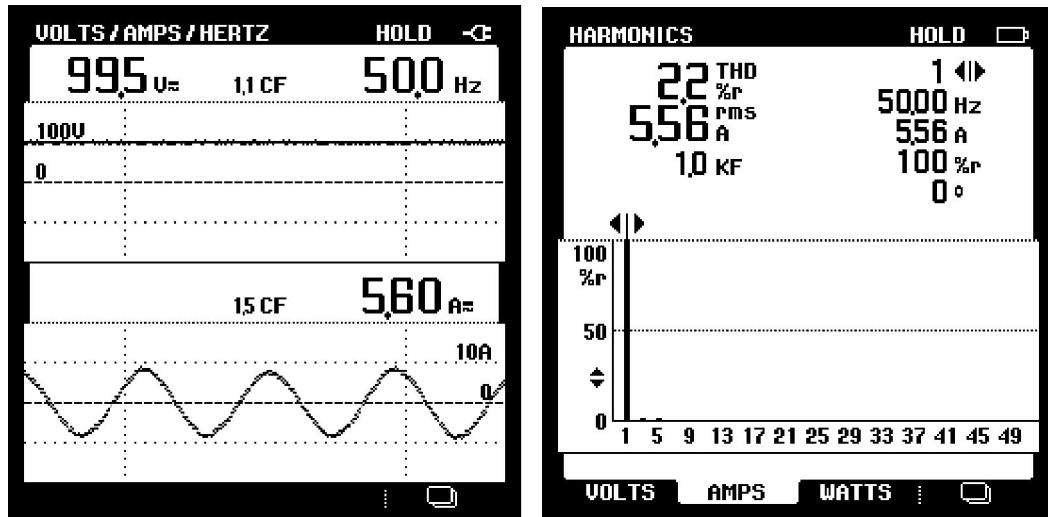
Şekil 6.5. Denetim algoritması çalıştırılmadan önce DA hat gerilimi, tek faz için akım dalga şekli ve akımın THD grafiği

Denetim algoritması çalıştırıldıktan sonra şebeke tarafı güç elektroniği dönüştürücü yapısı her yarım periyot için yükseltici (boost) dönüştürücü yapısında çalışmaktadır. Şekil 6.6'da denetim algoritması çalıştırıldıktan sonra, güç elektroniği yapısı yarım periyot için devre şeması verilmiştir [91].



Şekil 6.6. Denetim algoritması çalıştırıldıktan sonra güç elektroniği yapısı

Şekil 6.7'de ise denetim algoritması çalıştırıldıktan sonra; DA hat gerilimi, şebeke tarafı dönüştürücünün tek faz için şebekeden çektiği akım dalga şekli ve akım dalga şeklinin THD grafiği verilmiştir. Şebeke tarafı dönüştürücünün şebekeden çektiği akım dalga şekli incelenirse sinüs formuna yakın ve THD değerinin %2,2 olduğu görülebilir. Ayrıca DA bara gerilim değeri referans gerilim (100 V) değerini takip etmektedir.



Şekil 6.7. Denetim algoritması çalıştırıldıktan sonra DA hat gerilimi, tek faz için akım dalga şekli ve akımın THD grafiği

6.2. ÇBAG Stator Geriliminin Şebeke Gerilimi ile Senkronizasyonu

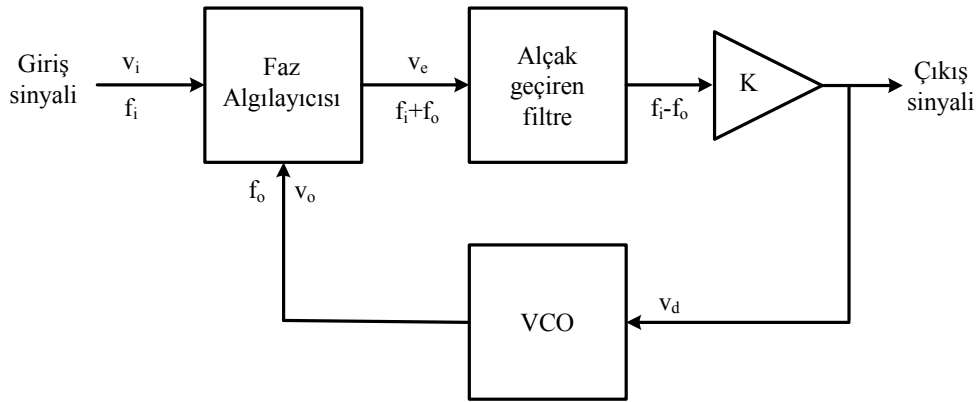
Yapılan çalışmada ÇBAG stator geriliminin, şebeke gerilimi ile senkronizasyonu için faz kilitli döngü (PLL) kullanılmıştır. Böylece farklı hız değerlerinde şebekeye paralel bağlanma başarılı şekilde gerçekleştirilmiştir. LabVIEW programı kullanılarak hazırlanan arayüz yazılımı ÇBAG'nin şebekeye paralel bağlanma işlemini otomatik olarak gerçekleştirmektedir. Böylece kullanıcı hatalarından kaynaklanan yanlış paralel bağlanmaların önüne geçilerek literatüre katkı sağlayacak daha güvenli bir paralel bağlanma sistemi elde edilmiştir. Ayrıca, ÇBAG'nin hızı standartlarda (IEC 61400-21, IEEE 1547) belirlenen hız değerinin altına düştüğünde paralel bağlanma otomatik olarak sonlandırılarak sistem güvenliği artırılmıştır.

6.2.1. Faz kilitli döngü (PLL) tekniği

Faz kilitli döngü (PLL- phase-locked loop) geri besleme işaretinin frekans ve fazının, giriş işaretinin fazına ve frekansına kilitlenme ilkesine dayanan bir sistemdir. Giriş işaretinin dalga şekline ilişkin bir sınırlama bulunmamaktadır. PLL'in ilk uygulaması, 1932 yılında radyo işaretlerinin aranması amacıyla kullanım alanı bulmuştur. 1960'larda ise, NASA uydu programları için faz kitleme döngüsü tekniğinden yararlanmışlardır. Tüm devre teknolojisinin hızlandığı ve büyük gelişme gösterdiği 1960'lı yıllara kadar, PLL sistemlerinin gerçekleştirilmesi hem pahalı hem de karmaşık olmaktadır. Tüm devre teknolojisinin gelişmesinin getirdiği ekonomik avantaj, PLL tekniğini özellikle endüstriyel elektronik ve tüketici elektroniği alanlarında çok büyük uygulama çeşitliliği ile karşı karşıya getirmiştir [92].

Temel PLL Çalışması:

Şekil 6.8'de blok diyagramı verilen PLL tekniği genel olarak; bir faz algılayıcısı, bir alçak geçiren filtre, bir kazanç katı ve gerilim kontrollü osilatörden (VCO) meydana gelmektedir.



Şekil 6.8. PLL blok diyagramı

Giriş sinyal frekansı ile VCO'dan karşılaştırma devresine gelen frekans aynı olduğu zaman, çıkış olarak alınan V_d gerilimi, VCO'yu giriş sinyali ile kilitli tutmak için gereken değerdir. Ardından VCO, giriş frekansında sabit genlikli kare dalga sinyali üretir. En iyi çalışma, VCO merkez frekansının (f_o), kendi doğrusal çalışma aralığının ortasındaki DA ön gerilim noktasına ayarlanmasıyla elde edilmektedir. Yükselteç, filtre devresinin çıkışı olarak elde edilen DA geriliminin ayarlanmasını mümkün kılar. Döngü kilitli olduğu zaman, karşılaştırıcıya uygulanan iki sinyal, aynı fazda olmasa da aynı frekanstadır. Karşılaştırıcıya uygulanan iki sinyal arasındaki sabit faz farkı, VCO için sabit bir DA gerilimi oluşturmaktadır. Bu durumda giriş sinyali frekansındaki değişimler, VCO'ya uygulanan DA geriliminin değişmesine neden olur. Yakalama ve kilitleme frekans aralığında DA gerilimi, VCO frekansını sürerek giriş frekansıyla eşitlenmesini sağlamaktadır.

Döngü kilitleme durumuna geçmeye çalışırken, faz karşılaştırıcısının çıkışı, karşılaştırılan sinyallerin toplam ve fark sinyal bileşenlerini içermektedir. Alçak geçiren filtre, döngünün, giriş ile VCO sinyalleri arasında kilitleme sağlayabilmesi için sinyalin sadece alçak frekans bileşenlerini geçirmektedir.

VCO'nun sınırlı çalışma aralığı ve PLL devresinin geri besleme bağlantısından dolayı, PLL için belirlenen iki önemli frekans bandı vardır. PLL'nin yakalama aralığı, döngünün giriş sinyaliyle kilitleme sağlayabildiği VCO serbest çalışma frekansı f_o civarında merkezlenen frekans aralığıdır. PLL yakalamayı

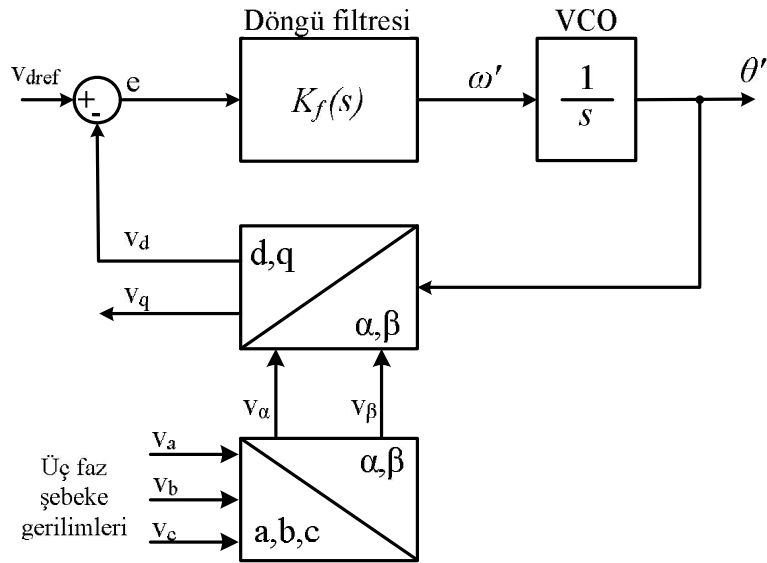
gerçekleştirdikten sonra, kilitleme aralığı olarak adlandırılan biraz daha geniş bir frekans aralığında giriş sinyaliyle kilitlenmeyi sürdürmektedir [93].

Üç faz PLL yapısı:

Üç faz PLL yapısının blok diyagramı Şekil 6.9'da verilmiştir [94]. Üç faz şebeke gerilim vektörleri aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = V_m \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Şebeke gerilimlerinin dengeli olduğu varsayımıyla şebeke gerilim vektörleri Clarke dönüşümü yardımıyla sabit eksen düzlemine aktarılır. Clarke dönüşümü Eş. 6.4 yardımıyla gerçekleştirilir.



Şekil 6.9. Üç faz PLL yapısının blok diyagramı

Clarke dönüşümü sonucunda aralarında 120° faz farkı bulunan üç fazlı sinüsoidal gerilim sinyalleri aralarında 90° faz farkı bulunan iki fazlı sinüsoidal gerilim sinyallerine (v_α, v_β) dönüştürülmüştür.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

Daha sonra elde edilen bu iki boyutlu şebeke gerilim sinyalleri Park dönüşümü yardımıyla senkron referans düzlemine aktarılmaktadır. Park dönüşümü için gerekli pozisyon bilgisi (θ') PLL yapısının çıkışından elde edilmektedir. Bu dönüşüm sonucunda aralarında 90° faz farkı bulunan iki boyutlu sinüsoidal sinyaller d ve q senkron referans düzleminde, sabit genlikli ve sabit açısal hızla dönen iki gerilim vektörüne dönüştürülür (v_d, v_q) .

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta' & \sin\theta' \\ -\sin\theta' & \cos\theta' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

Elde edilen iki gerilim vektöründen d eksen bileşeni (v_d) trigonometrik dönüşümler kullanılarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$v_d = E_m \sin \delta = e \quad (6.6)$$

Burada $E_m = V_m$ ve $\delta = \theta - \theta'$ şeklindedir. PLL yapısının açısal frekansı ise aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\omega' = \frac{d\theta'}{dt} = K_f \cdot e \quad (6.7)$$

Burada K_f filtre kazanç katsayısıdır. Faz açısı farkı δ çok küçük olduğu durumlarda hata;

$$e \cong E_m \delta \quad (6.8)$$

şeklinde doğrusallaştırılabilir.

Sonuç olarak, uygun tasarlanmış döngü filtresi yardımıyla PLL açısal frekansı (ω') ve faz açısı (θ'), şebeke açısal frekansı (ω) ile faz açısını (θ) mükemmel şekilde takip edebilmektedir.

İkinci mertebe kapalı döngü sistem tasarımı:

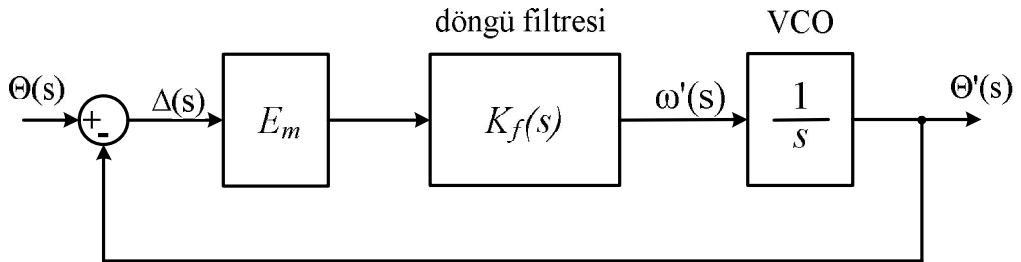
Üç faz PLL yapısının doğrusallaştırılmış modeli Şekil 6.10'da verilmiştir. Bu model yardımıyla kapalı döngü sistemin transfer fonksiyonu yazılırsa,

$$G_c(s) = \frac{\Theta'(s)}{\Theta(s)} = \frac{K_f(s)E_m}{s + K_f(s)E_m} \quad (6.9)$$

Burada $\Theta(s)$, $\Theta'(s)$ ve $\Delta(s)$ sırasıyla θ , θ' ve δ 'nın Laplace transformasyonu sonucu s-domenindeki karşılıklarıdır. Döngü filtresinin tasarımı için çeşitli yöntemler vardır. İkinci mertebe döngü tasarımı, filtre performansını iyileştirmek ve sistem kararlılığını sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır [94]. İkinci mertebe döngü için oransal–integral (PI) tipi filtre,

$$K_f(s) = K_p \cdot \left(\frac{1 + s\tau}{s\tau} \right) \quad (6.10)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada K_p ve τ PI filtrenin kazanç katsayılarını belirleyen parametrelerdir.



Şekil 6.10. Üç faz PLL yapısının doğrusallaştırılmış modeli

Kapalı döngü sistemin transfer fonksiyonu, ikinci mertebe bir sistemin genel ifade şeklinde yeniden yazılırsa,

$$G_c(s) = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (6.11)$$

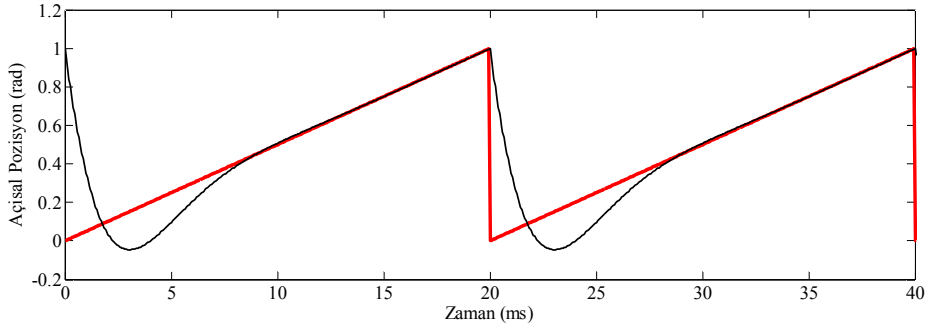
elde edilir. Burada;

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_p E_m}{\tau}} \quad (6.12)$$

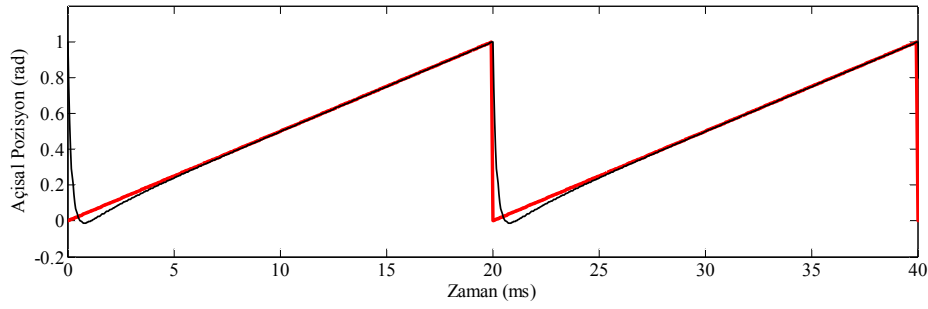
$$\zeta = \frac{K_p E_m}{2\omega_n} = \frac{\sqrt{\tau \cdot K_p E_m}}{2} \quad (6.13)$$

şeklinde ifade edilmektedir [94].

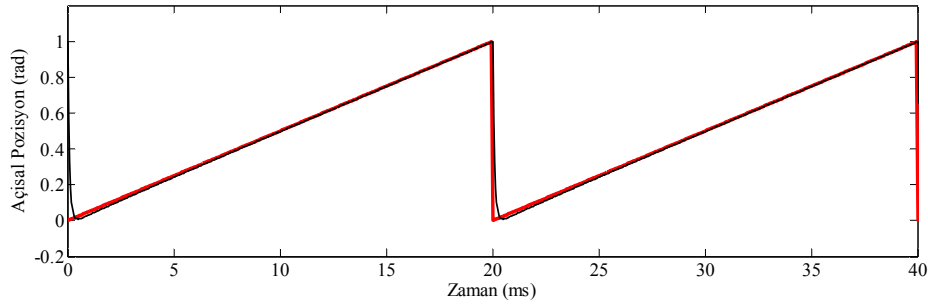
Elde edilen transfer fonksiyonu kullanılarak, Şekil 6.11'de farklı sönüm katsayıları ve farklı doğal frekans değerleri için PLL çıkış tepkileri verilmiştir. Benzetim çalışmalarında; sönüm katsayısı $\zeta = 3,535$, doğal frekans değeri ise $\omega_n = 1570$ rad/sn olarak seçilmiştir.



(a)



(b)

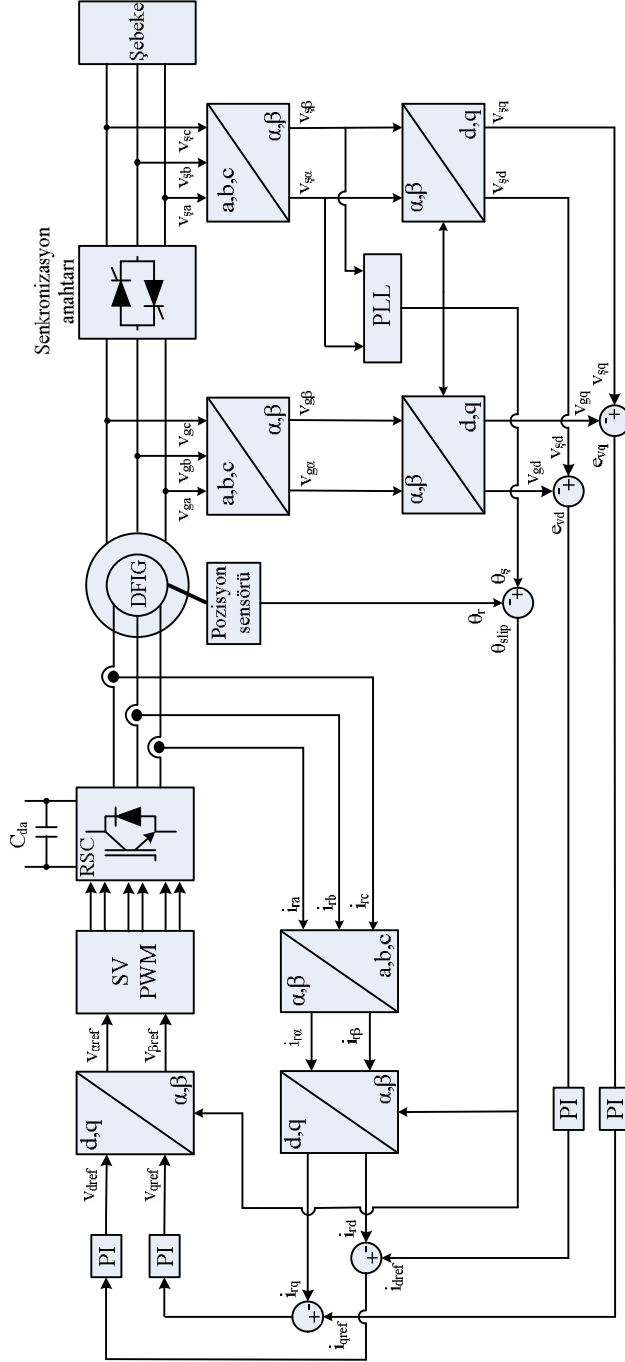


(c)

Şekil 6.11. Üç faz PLL yapısının farklı sönüm katsayısı ve doğal frekans değerleri için açısız pozisyon benzetim sonuçları a) $\zeta=0,707$, $\omega_n=628$ rad/sn b) $\zeta=1,870$, $\omega_n=1570$ rad/sn c) $\zeta=3,535$, $\omega_n=1570$ rad/sn

6.2.2. Hazırlanan denetim algoritması

Bu çalışmada, ÇBAG'nin stator gerilimi ile şebeke geriliminin senkronizasyonu faz kilitli döngü (PLL) tekniği kullanılarak sağlanmıştır. Şekil 6.12'de hazırlanan denetim algoritmasının blok diyagramı verilmiştir [95].

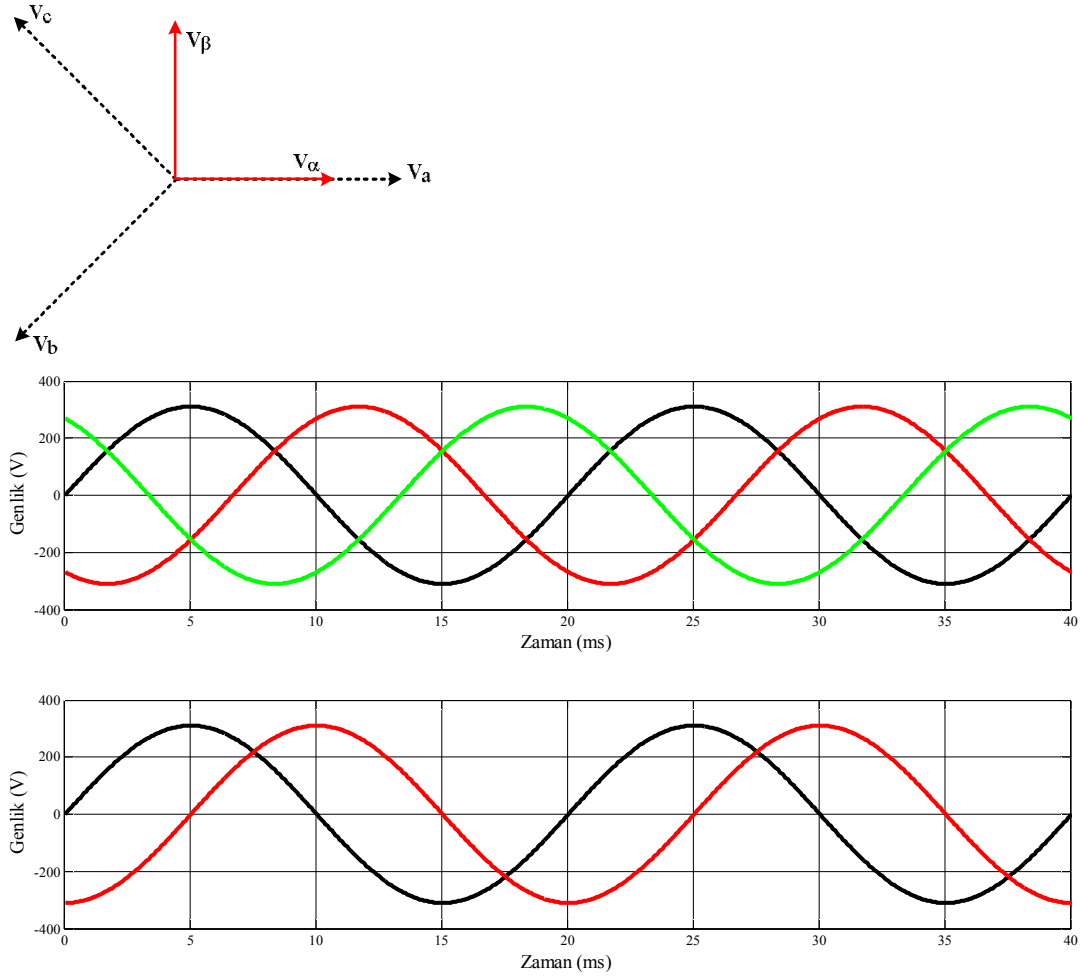


Şekil 6.12. Senkronizasyon için hazırlanan denetim algoritmasının blok diyagramı

Şebeke ve generatör stator terminallerinden alınan gerilim sinyalleri Clarke dönüşümüne tabi tutulmuşlardır. Clarke dönüşümü için gerekli olan matematiksel ifade Eş. 6.14’de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

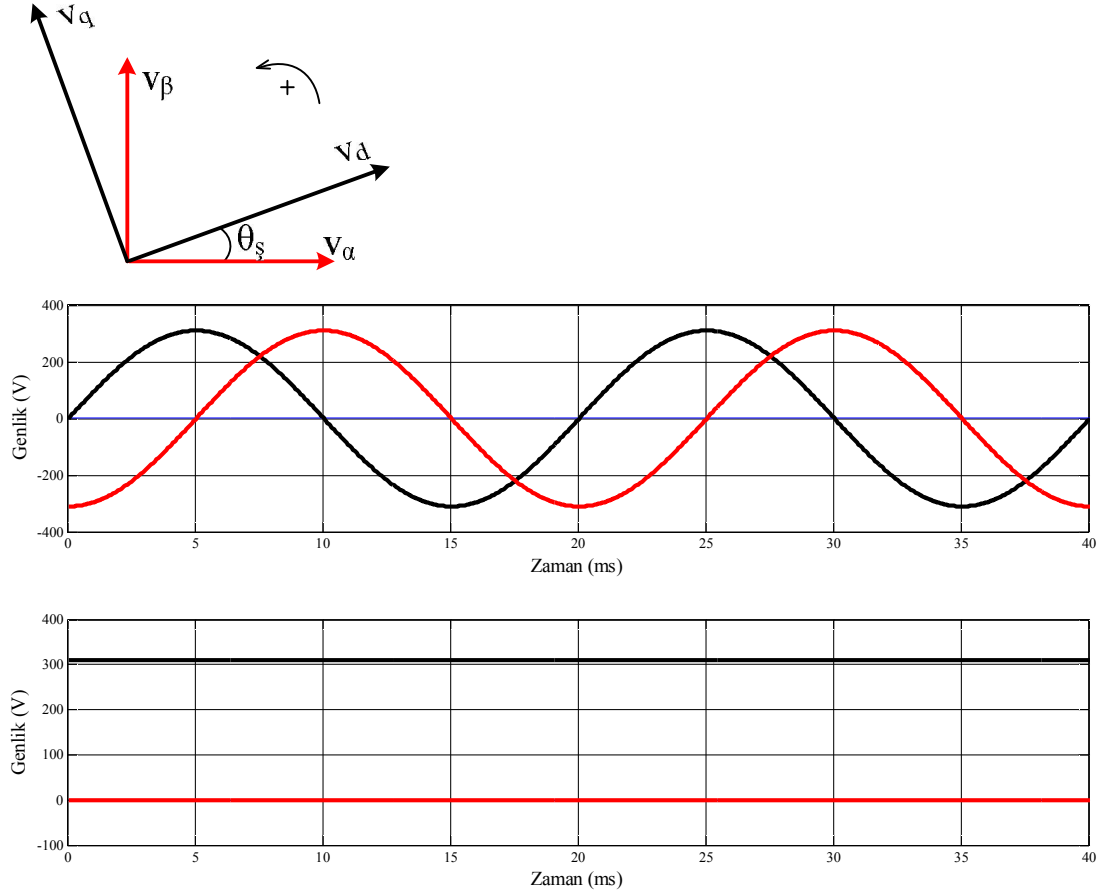
Bu eşitlik yardımıyla 120° faz farkı bulunan üç fazlı sinüsoidal gerilim sinyalleri 90° faz farkı bulunan iki fazlı sinüsoidal gerilim sinyallerine dönüştürülmektedir. Şekil 6.13’de bu sinyaller ve vektörel büyüklükleri verilmiştir.



Şekil 6.13. Üç fazlı ve iki fazlı gerilim sinyalleri ve vektörel büyüklükleri

Clarke dönüşümü sonucu alınan iki boyutlu şebeke ve generatör gerilim sinyalleri ($v_{\alpha}, v_{\beta}, v_{g\alpha}, v_{g\beta}$) Eş. 6.15’de verilen Park dönüşümüne uygulanır. Bu dönüşüm sonucunda aralarında 90° faz farkı bulunan iki boyutlu sinüsoidal sinyaller d ve q sabit eksen düzleminde, sabit genlikli ve sabit açısal hızla dönen iki sinyale dönüştürülür. Böylece üç fazlı sinüsoidal gerilim sinyalleri iki boyutlu sabit sinyaller ile temsil edilebilmektedir. Şebeke ve generatör gerilim sinyallerinin Park dönüşümlerinde kullanılan pozisyon bilgisi ise PLL bloğundan elde edilmektedir. Şekil 6.14’de 90° faz farkı bulunan iki boyutlu sinüsoidal gerilim sinyalleri ile Park dönüşümü sonucu elde edilen sabit sinyaller ve vektör diyagramları verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{\xi} & \sin\theta_{\xi} \\ -\sin\theta_{\xi} & \cos\theta_{\xi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \end{bmatrix} \quad (6.15)$$



Şekil 6.14. İki fazlı sinüsoidal ve sabit genlikli gerilim sinyalleri ve vektörleri

Park dönüşümü sonucu elde edilen şebeke gerilim sinyalleri (v_{sd}, v_{sq}) ile generatör gerilim sinyalleri (v_{gd}, v_{gq}) karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu elde edilen sinyaller d ve q eksenlerindeki hataları vermektedir (e_{vd}, e_{vq}). Elde edilen bu hatalar PI denetleyiciye uygulanarak rotor akımının referans değerleri elde edilmektedir (i_{qref}, i_{dref}). PI denetleyici için gerekli olan k_p ve k_i değerleri için çok sayıda deney tekrarlanmış ve sonuç olarak $k_p=1,5$, $k_i=0,56$ değerlerinde en iyi sonuç elde edilmiştir.

Rotor faz akım sinyalleri aynı şekilde Clarke ve Park dönüşümüne tabi tutulmuşlardır. Park dönüşümü için gerekli olan pozisyon bilgisi:

$$\theta_{slip} = \theta_s - \theta_r \quad (6.16)$$

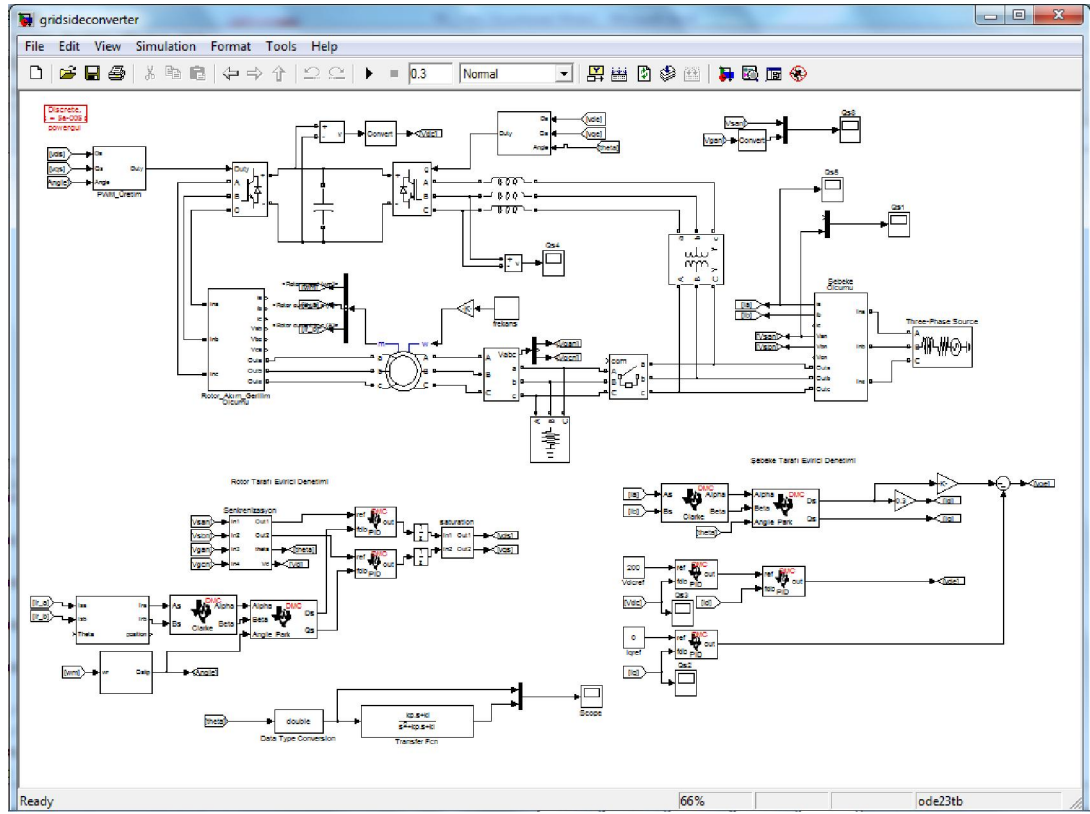
eşitliği yardımıyla elde edilmiştir. Burada θ_s , PLL bloğundan alınan şebeke geriliminin pozisyonu, θ_r ise rotor miline bağlı encoder yardımıyla okunan rotor pozisyonudur. θ_{slip} ise kayma pozisyonu olarak tanımlanmıştır. Park dönüşümü sonucu elde edilen iki boyutlu rotor akım sinyalleri (i_{rq}, i_{rd}), referans akım sinyalleri (i_{qref}, i_{dref}) ile karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırma sonucunda elde edilen elde edilen sinyaller d ve q eksenlerindeki hataları vermektedir (e_{id}, e_{iq}). Elde edilen bu hatalar PI denetleyiciye uygulanarak referans gerilim değerleri elde edilmektedir (v_{qref}, v_{dref}). PI denetleyici için gerekli olan k_p ve k_i değerleri için çok sayıda deney tekrarlanmış ve sonuç olarak $k_p=0,38$, $k_i=0,025$ değerlerinde en iyi sonuç elde edilmiştir. PI denetleyici çıkışından elde edilen referans gerilim değerleri (v_{qref}, v_{dref}) ters Park dönüşümüne aşağıda verilen eşitlik yardımıyla tabi tutulmaktadır.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{slip} & -\sin\theta_{slip} \\ \sin\theta_{slip} & \cos\theta_{slip} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (6.17)$$

Bu dönüşüm sonucunda iki boyutlu sabit sinyaller 90° faz farkı bulunan iki boyutlu sinüsoidal sinyallere dönüştürülmüştür. Elde edilen bu sinüsoidal sinyaller kullanılarak rotor tarafı evirici yapısının denetimi için gerekli olan anahtarlama sinyalleri elde edilmektedir.

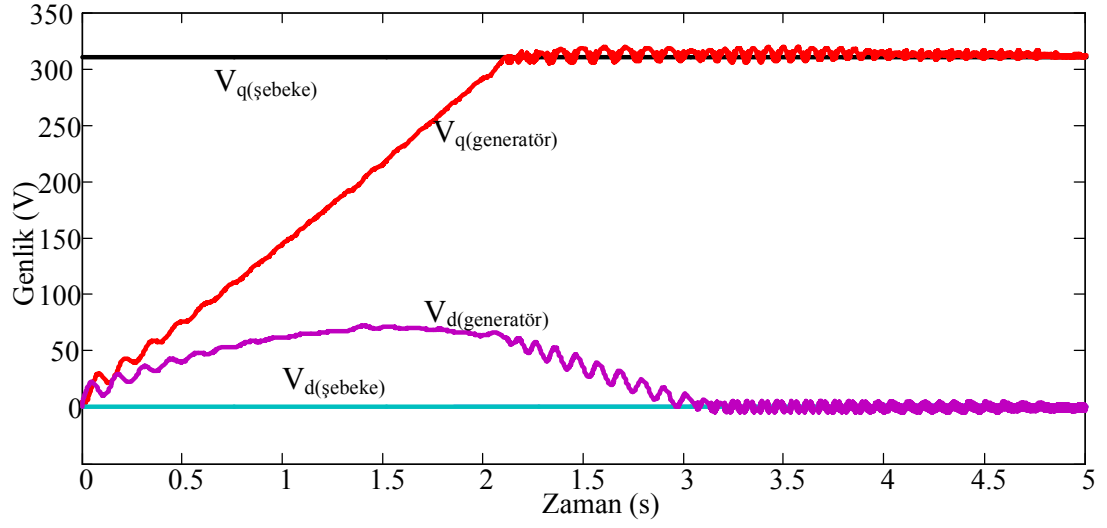
6.2.3. Benzetim çalışmaları

Yapılan benzetim çalışmasında rüzgâr türbinlerinde oldukça yaygın kullanılan ÇBAG stator geriliminin şebeke gerilimi ile senkronizasyonu Matlab&Simulink programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan benzetim yazılımına ait blok diyagram görünümü Şekil 6.15’de verilmiştir.



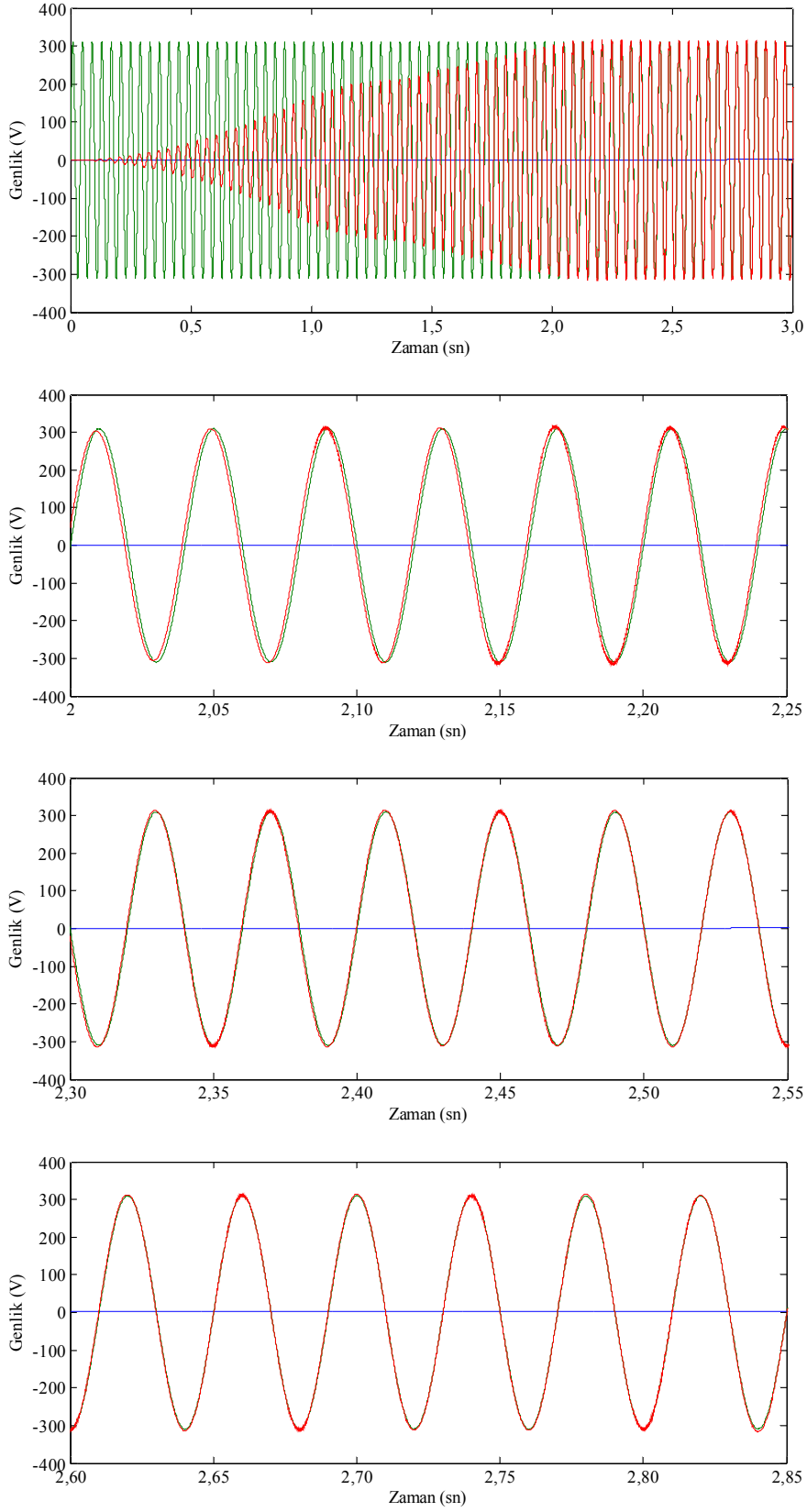
Şekil 6.15. Denetim sistemi yazılımının blok diyagramı

Benzetim sırasında ÇBAG'nin stator uçları ile şebeke arasında bir anahtar yapısı yerleştirilerek senkronizasyon sonrası paralel bağlanma işlemi gerçekleştirilmektedir. Şebeke ve generatör gerilimlerinin d-q bileşenleri Şekil 6.16'da verilmiştir. Şebeke ve generatör gerilimlerinin d-q bileşenlerinin, 3 sn'de eşitlendiği görülmektedir.



Şekil 6.16. Senkronizasyon süresince şebeke ve generatör gerilimlerinin d-q bileşenlerinin değişimi

Senkronizasyon süresince şebeke ve generatör bir faz sinüsoidal gerilim sinyalleri ise Şekil 6.17’de verilmiştir. Burada şebeke ve generatör gerilimlerinin yaklaşık 3 sn’de senkon oldukları görülmektedir. Paralel bağlanma ise



Şekil 6.17. Senkronizasyon süresince şebeke ve generatör bir faz gerilim eğrileri

6.2.4. Deneysel çalışmalar

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda şebeke gerilimi ile ÇBAG stator geriliminin senkronizasyonu incelenmiştir. Şekil 6.18’de senkronizasyon süresince şebeke ve generatör bir faz gerilim eğrileri ile bir faz için generatör rotor akım eğrisi verilmiştir. Burada şebeke ve generatör gerilimlerinin frekansı 50 Hz, rotor akımının frekansı ise 15 Hz olarak ölçülmüştür. Senkronizasyonun meydana geldiği hız değeri;

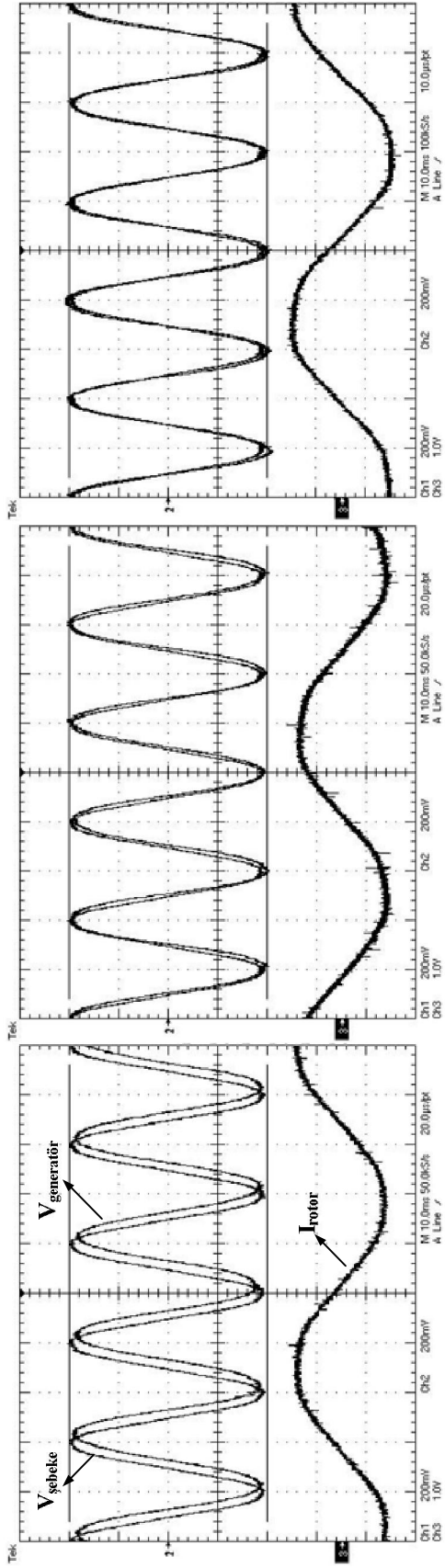
$$n_r = 1050 \text{ d/d}$$

olarak seçilmiştir. Bu değer ÇBAG’nin standartlara uygun gerilim üretebilmesi için gerekli olan minimum hız değeridir. Çünkü ÇBAG’nin standartlara uygun gerilim üretebilmesi için gerekli şart senkron hızın $\pm\%30$ oranında hız değerine sahip olmasıdır. ÇBAG’yi döndürmek için gerekli mekaniksel enerji değişken hızlı motor sürücüsü yardımıyla döndürülen bir asenkron motordan sağlanmıştır. Senkronizasyon süreci önceki bölümde anlatıldığı şekilde gerçekleşmiştir. Sonuç olarak Şekil 6.18 incelenirse ÇBAG stator geriliminin yaklaşık 10 periyot sonunda şebeke gerilimi ile senkron olduğu görülmektedir [95].

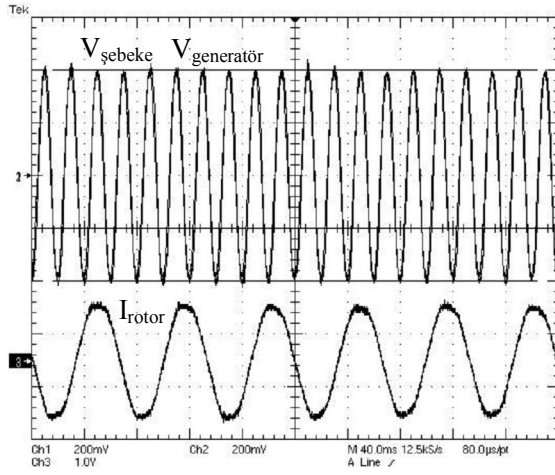
Şekil 6.19 da ise farklı rüzgâr hızlarında rotor akımı, şebeke gerilimi ve generatör gerilim eğrileri verilmiştir. Bu deneysel çalışma ÇBAG’nin rotor hız değeri 1050 d/d ile 1350 d/d arasında gerçekleştirilmiştir. Bu aralıktaki hız değerlerinde şebeke gerilimi ile ÇBAG stator geriliminin sürekli olarak senkron kaldığı görülmektedir. Farklı hız değerlerinde rotor akımı frekans değerinin kayma frekans değerinde olduğuna dikkat edilmelidir. ÇBAG stator geriliminin frekans değeri,

$$f_s = f_r + f_m \quad (6.18)$$

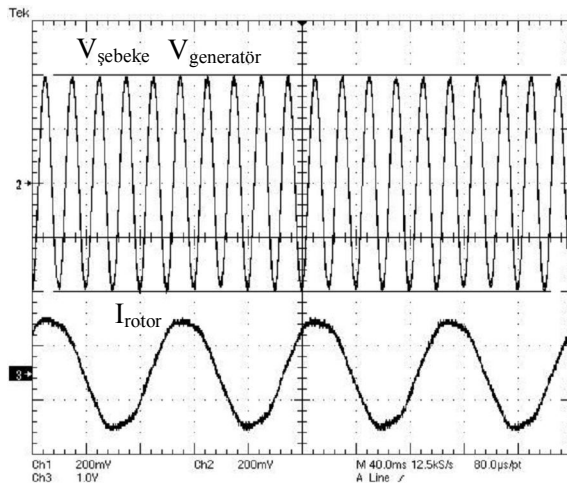
şeklinde olmaktadır. Böylece ÇBAG stator geriliminin frekansı sürekli olarak 50 Hz’de sabit tutulmaktadır.



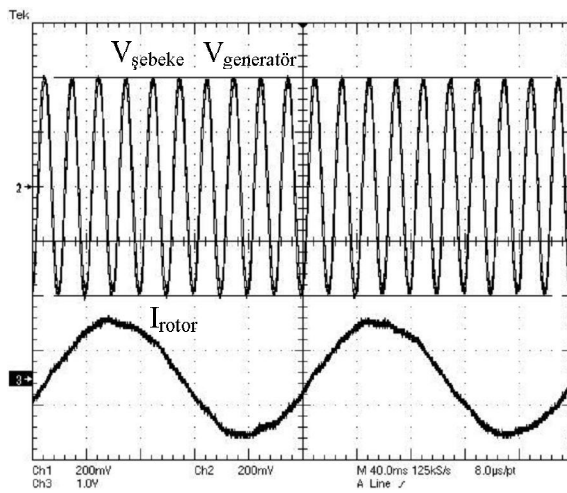
Şekil 6.18. Senkronizasyon süresince şebeke ve generatör bir faz gerilim eğrileri ile bir faz için rotor akımı



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.19. Farklı rüzgâr hızlarında şebeke gerilimi, generatör gerilimi ve rotor akımı
 a) $n_r=1050$ d/d, $f_r=15$ Hz b) $n_r=1200$ d/d, $f_r=10$ Hz c) $n_r=1350$ d/d, $f_r=5$ Hz

6.3. PI Denetleyici ile ÇBAG'nin Aktif ve Reaktif Güç Denetimi

Bu çalışmada, ÇBAG'nin şebeke ile paralel bağlanması sağlanarak, generatörün aktif ve reaktif güç denetimi gerçekleştirilmiştir. ÇBAG'nin stator gerilimi ile şebeke geriliminin senkronizasyonu önceki bölümde anlatıldığı gibi faz kilitli döngü (PLL) tekniği kullanılarak sağlanmıştır.

6.3.1. Hazırlanan denetim algoritması

Şebeke ve generatör gerilimleri senkron olduğunda kullanıcı arayüz programı tarafından DSP ve senkronizasyon anahtarına sinyal gönderilerek generatörün şebekeye paralel bağlanması sağlanmaktadır. Bu andan itibaren generatör şebekeye paralel bağlanarak kullanıcı arayüz programı tarafından gönderilecek "YÜK AL" komutunu beklemektedir.

Kullanıcı arayüz programı tarafından "YÜK AL" komutu DSP'ye gönderilerek DSP'de farklı bir denetim algoritmasının çalışması sağlanmaktadır. ÇBAG'nin aktif ve reaktif güç denetimi için hazırlanan denetim algoritmasının blok diyagramı Şekil 6.20'de verilmiştir.

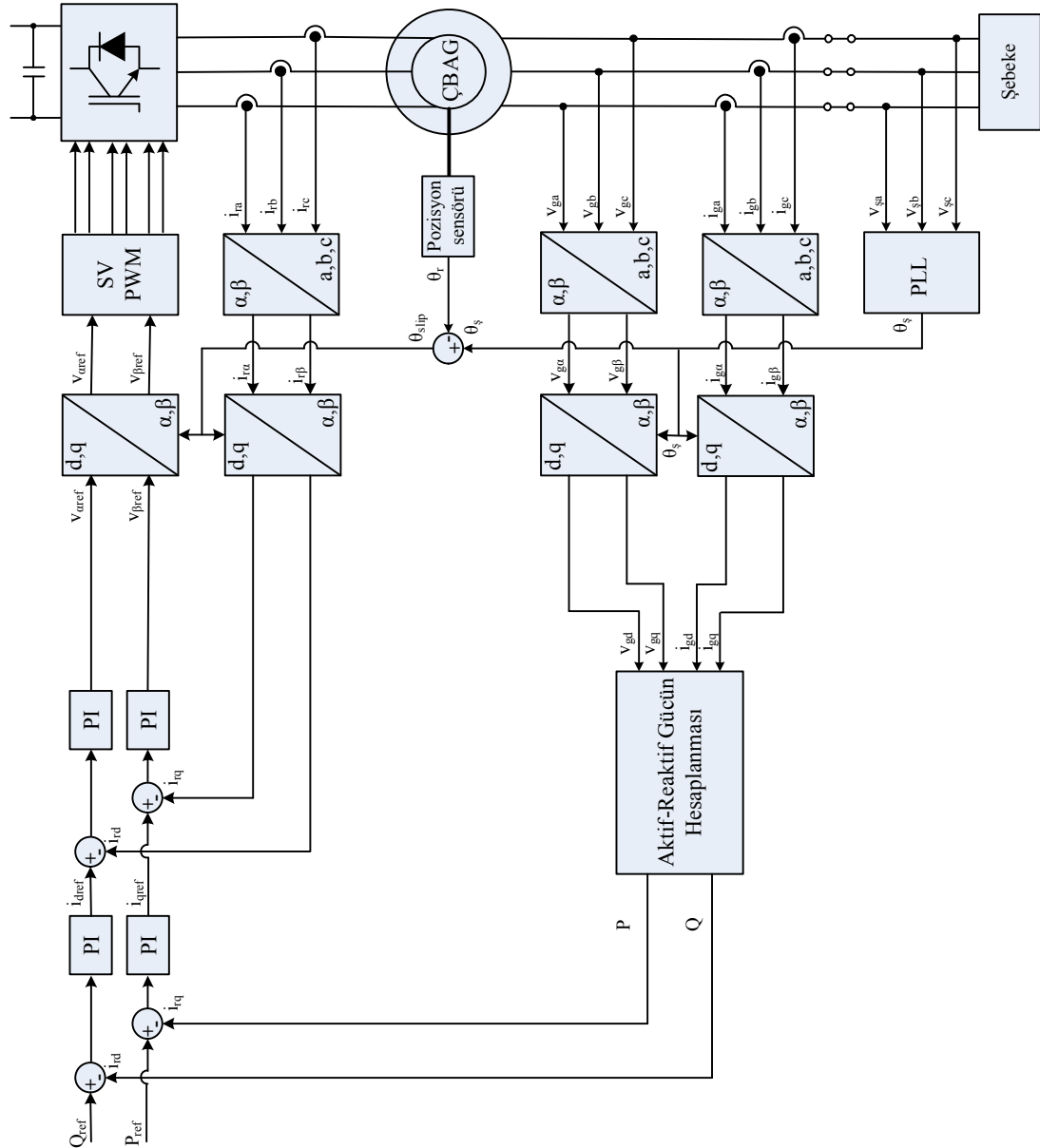
Denetim algoritmasında generatörün ürettiği aktif ve reaktif güç d-q dönüşümü kullanılarak hesaplanmıştır. Bu dönüşümlere göre aktif ve reaktif güçler aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$P_g = v_{gd}i_{gd} + v_{gq}i_{gq} \quad (6.19)$$

$$Q_g = v_{gq}i_{gd} - v_{gd}i_{gq} \quad (6.20)$$

Hesaplanan bu değerler, referans aktif ve reaktif güç değerleri ile karşılaştırıldıktan sonra hata sinyalleri PI denetleyicilere uygulanmaktadır. PI denetleyicilerin çıkışları ise rotor akımlarının referans değerlerini belirlemektedir. Rotor akım sinyalleri (i_{rq} , i_{rd}), referans akım sinyalleri (i_{qref} , i_{dref}) ile karşılaştırılarak, elde edilen hatalar PI denetleyiciye uygulanarak referans gerilim değerleri elde edilmektedir (v_{qref} , v_{dref}). Elde edilen referans gerilim değerleri (v_{qref} , v_{dref}) Ters Park dönüşümü yardımıyla iki

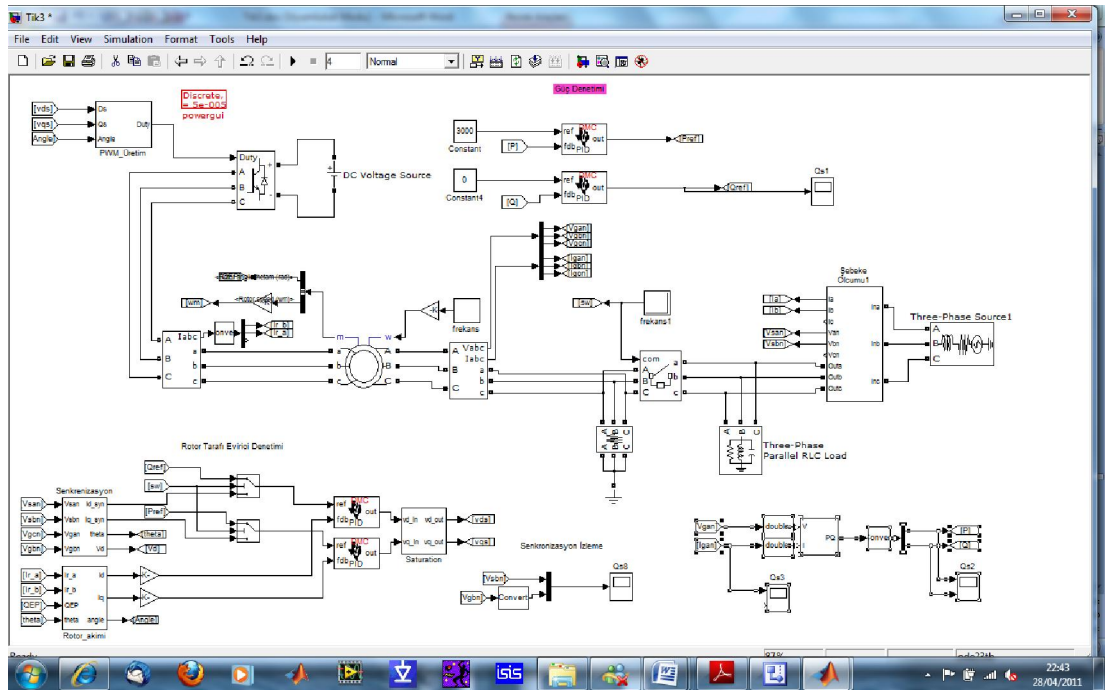
boyutlu sinüsoidal sinyallere dönüştürülmektedir. Elde edilen bu sinüsoidal sinyaller kullanılarak rotor tarafı evirici yapısının denetimi için gerekli olan anahtarlama sinyalleri elde edilmektedir. Böylece generatörün ürettiği aktif ve reaktif güç denetlenmektedir.



Şekil 6.20. PI denetleyici kullanılarak ÇBAG'nin aktif-reaktif güç denetimi için hazırlanan algoritmanın blok diyagramı

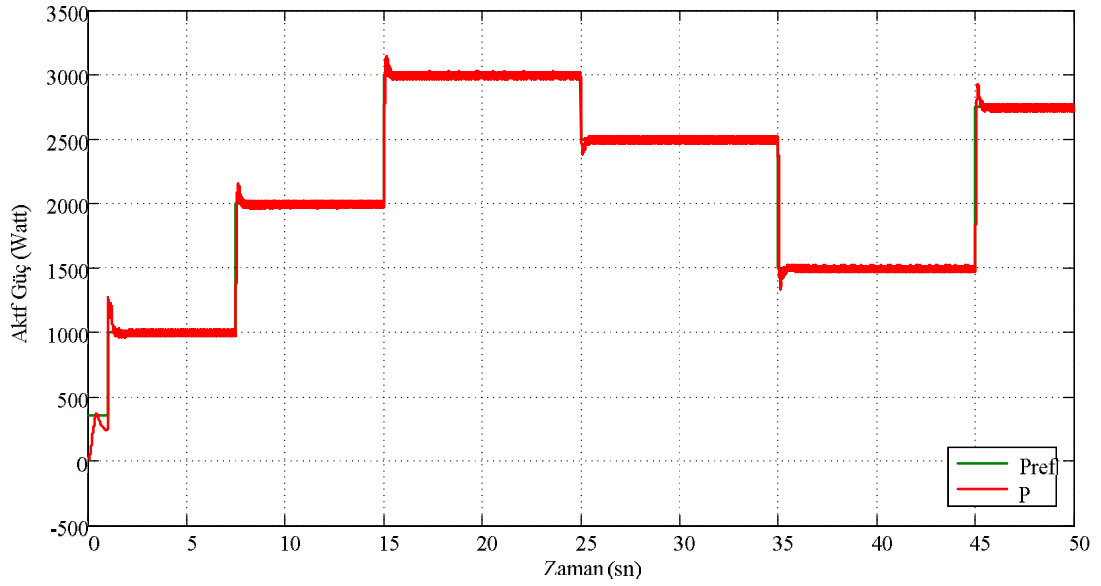
6.3.2. Benzetim çalışmaları

Yapılan bu benzetim çalışmasında rüzgâr türbinlerinde oldukça yaygın kullanılan ÇBAG'nin stator geriliminin şebeke gerilimi ile senkronizasyonu sağlandıktan sonra aktif ve reaktif güç denetimi yapılmıştır. Güç denetimi için PI denetim tekniği kullanılmıştır. Benzetim çalışmaları Matlab&Simulink programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan benzetim yazılımına ait blok diyagram görünümü Şekil 6.21'de verilmiştir.

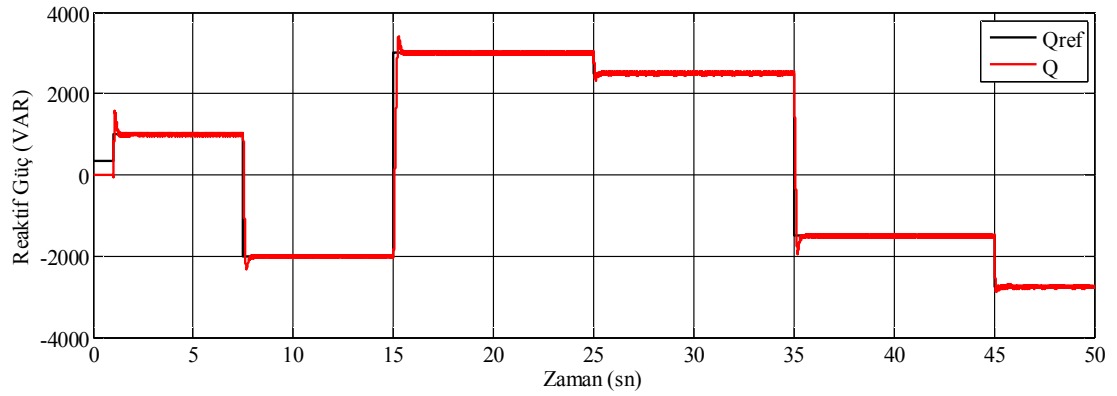


Şekil 6.21. Hazırlanan yazılımın blok diyagramı

Şekil 6.22'de referans ve üretilen aktif güç eğrileri verilmiştir. Eğrilerden görüldüğü gibi denetim algoritması yardımıyla generatörün ürettiği aktif güç, referans aktif gücü takip edebilmektedir. Şekil 6.23'de ise referans ve üretilen reaktif güç eğrileri verilmiştir. Aynı şekilde eğrilerden görüldüğü gibi denetim algoritması yardımıyla generatörün ürettiği reaktif güç, referans reaktif gücü takip edebilmektedir. Bunun yanında PI denetim tekniği kullanımının sonucu olarak hem aktif hem de reaktif güçte aşımalar meydana gelmektedir. Bu aşımalar değerleri referans güç değerlerine göre de farklılık göstermektedir.



Şekil 6.22. PI denetleyici kullanılarak gerçekleştirilen referans ve üretilen aktif güç eğrileri

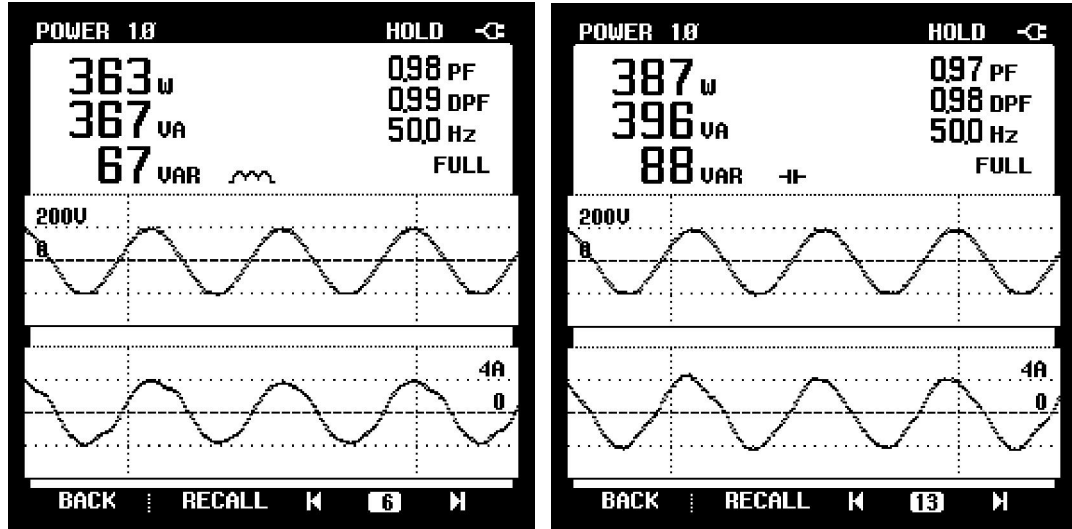


Şekil 6.23. PI denetleyici kullanılarak gerçekleştirilen referans ve üretilen reaktif güç eğrileri

6.3.3. Deneysel çalışmalar

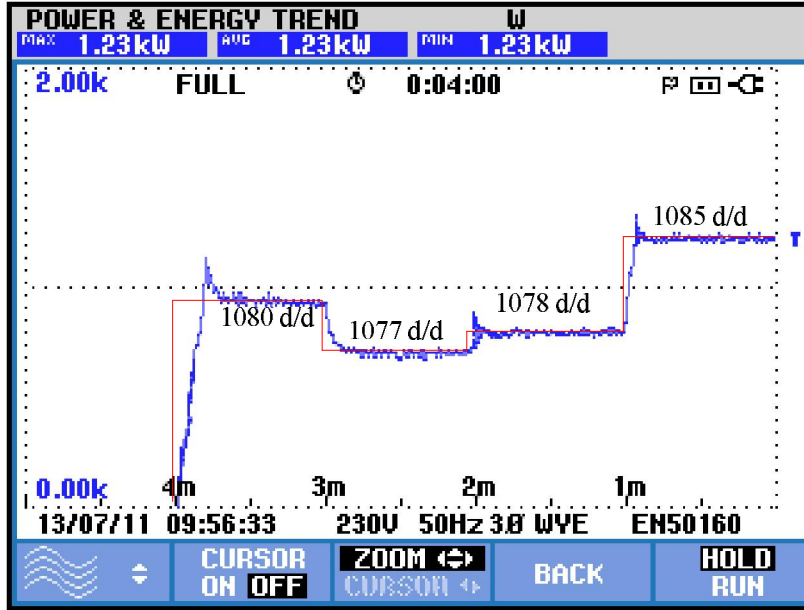
Deneysel çalışmalarda şebeke gerilimi ile ÇBAG uç geriliminin senkronizasyonu sağlandıktan sonra ÇBAG, şebekeye paralel bağlanmıştır. Daha sonra ÇBAG'nin ürettiği aktif ve reaktif güçler denetlenmiştir. Deneysel çalışmalar sırasında ÇBAG'nin şebekeye aktardığı güçler Fluke-43B ve Fluke-434 enerji analizörleri yardımıyla gözlenmiştir. Şekil 6.24'te ÇBAG'nin bir faz gerilim ve akım eğrileri ile birlikte şebekeye aktardıkları bir faz için aktif ve reaktif güç değerlerini gösteren

ekran görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.24a'da generatörün endüktif karakterli çalıştırıldığı, Şekil 6.24b'de ise generatörün kapasitif karakterli çalıştırıldığı görülmektedir. Böylece ÇBAG'nin şebekeyi endüktif veya kapasitif karakterli reaktif güç bakımından da destekleyici olarak çalıştırılabileceği görülmüştür.



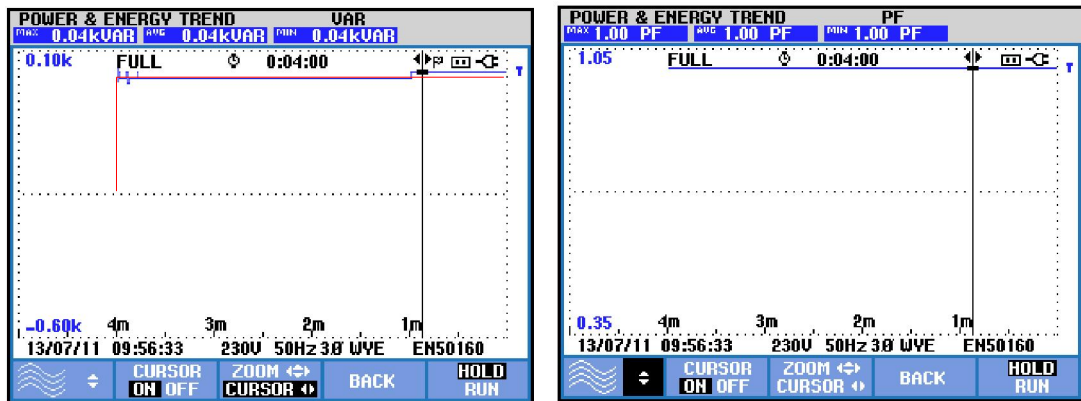
Şekil 6.24. ÇBAG'nin bir faz gerilim ve akım eğrileri ile birlikte şebekeye aktardıkları bir faz için aktif ve reaktif güç değerlerini gösteren ekran görüntüleri

Şekil 6.25'de ise farklı hız değerlerinde şebekeye aktarılan zamana bağlı aktif güç eğrisini gösteren ekran görüntüsü verilmiştir. Generatör hızındaki artış veya azalmaya bağlı olarak PI denetleyicinin tepkisi benzetim çalışmalarında olduğu gibi hızlı olmaktadır. Ancak özellikle generatörün şebekeye enerji aktarmaya başladığı anlarda aktif güç, referans güç değerinin %20'si kadar bir aşım seviyesine ulaşmaktadır. Bu güç değeri deneysel çalışmalar sırasında kullanılan generatörün gücü dikkate alındığında önemsiz bir güç değeri gibi görünse de ticari ürünlerde bu kadar fazla aşımın yaşanması ciddi sorunlar meydana getirebilmektedir. Ayrıca farklı güç değerlerinde farklı aşım seviyelerinin meydana geldiğine dikkat edilmelidir.



Şekil 6.25. ÇBAG'nin farklı hız değerlerinde şebekeye aktarılan zamana bağlı aktif güç eğrisi

Şekil 6.26'da ise aynı çalışma durumu için referans reaktif gücün sıfır değerine ayarlanması sonucu ÇBAG'nin şebekeye aktardığı reaktif güç eğrisi ile birlikte güç katsayısının zamana göre değişim eğrileri verilmiştir. Bu eğrilerden görüldüğü gibi ÇBAG şebekeden reaktif güç çekmediği gibi reaktif güçte göndermemektedir. Aynı zamanda çalışma süresi boyunca ÇBAG şebekeye sadece aktif güç aktarmakta ve güç faktörü birim değerde kalmaktadır.



Şekil 6.26. ÇBAG'nin farklı hız değerlerinde reaktif güç ve güç katsayısının zamana göre değişimi

6.4. Bulanık Mantık Denetleyici ve Çıkış Ölçeklendirme Katsayısı Kendinden Ayarlanmalı Bulanık Mantık Denetleyici ile ÇBAG'nin Aktif Güç Denetimi

Klasik PI veya PID denetleyiciler diğer güç elektroniği dönüştürücülerin denetiminde olduğu gibi bu çalışmada tasarlanan rotor tarafı dönüştürücünün denetiminde de kullanılabilir. Bu denetleyicilerin kazançları tespit edilirken sistemin matematiksel modeli ve Ziegler-Nichols tarafından önerilen değerler kullanılmaktadır [96]. Sabit kazançlı PI veya PID denetleyici ile kontrol edilen sistemler daha önceden belirlenen çalışma noktasında çalıştığında kabul edilebilir bir performans elde edilmektedir. Ancak sistem parametrelerinin değişimi nedeniyle farklı çalışma noktaları arasında geçişler söz konusu olduğunda elde edilen geçici durum performansı için aynı şeyleri söylemek mümkün değildir. Özellikle rüzgâr türbinlerinin dolayısıyla bu türbinleri denetleyen güç elektroniği yapılarının çalışma noktaları, rüzgâr hızı gibi doğal nedenlere bağlı olarak sürekli değişmektedir. Buna ek olarak şebeke parametreleri de generatörün çalışması sırasında değişebilmektedir. Bu nedenle ÇBAG'nin rotor tarafı güç elektroniği dönüştürücüsünün denetiminde sabit kazançlı bir denetleyici yerine değişen şartlara göre uyarlanabilen yapıda bir denetleyici kullanılmalıdır. [97]

Bulanık mantık denetim (BMD) teorisi belirsizlik ve değişkenlik üzerine kurulmuş matematiksel bir disiplindir. Kesin kurallara bağlı olmayan ve tam tanımlanmamış kavramların kullanılmasına izin vermektedir. BMD, doğrusal olmayan ve uyarlanabilir yapısı sayesinde yük bozukluklarının ve parametre değişimlerinin bulunduğu uygulamalarda güçlü performans göstermektedir. BMD'nin klasik denetleyicilerden en büyük üstünlüğü genel olarak bilindiği gibi sistemin matematik modeline olan bağlılığının çok sınırlı olmasıdır [97].

BMD'nin uyarlanabilir yapısı dikkate alınarak ÇBAG'nin aktif güç denetimi için bu çalışmada BMD tabanlı bir denetleyici yapısı kullanılmıştır. Klasik BMD'nin performansını iyileştirebilmek amacıyla ayrıca çıkış ölçeklendirme katsayısının kendinden ayarlanması için ikinci bir BMD kullanılmıştır.

6.4.1. Hazırlanan denetim algoritması

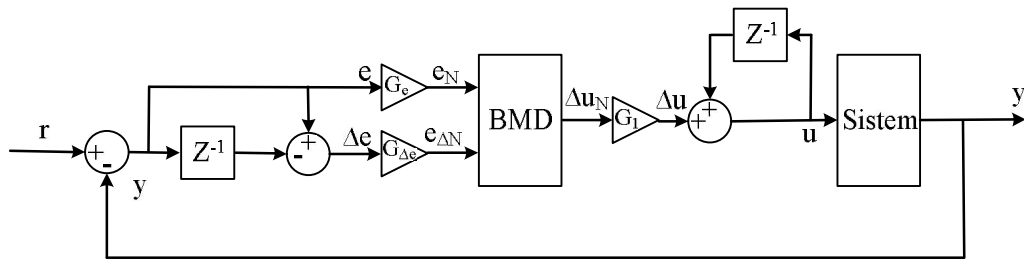
Şekil 6.27’de bulanık mantık denetleyicisinin (BMD) blok diyagramı verilmiştir. Burada $e(k)$ k’nıncı örnekteki hatayı temsil etmektedir. Hatayı aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz.

$$e(k) = r - y \quad (6.21)$$

Burada r referans değeri, y ise çıkış değerini temsil etmektedir. Hatanın değişimi ise hatanın k 'nıncı örnekteki değerinden $(k-1)$ 'nıncı örnekteki değerinin çıkarılması ile elde edilmektedir. Hatanın değişimi de aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (6.22)$$

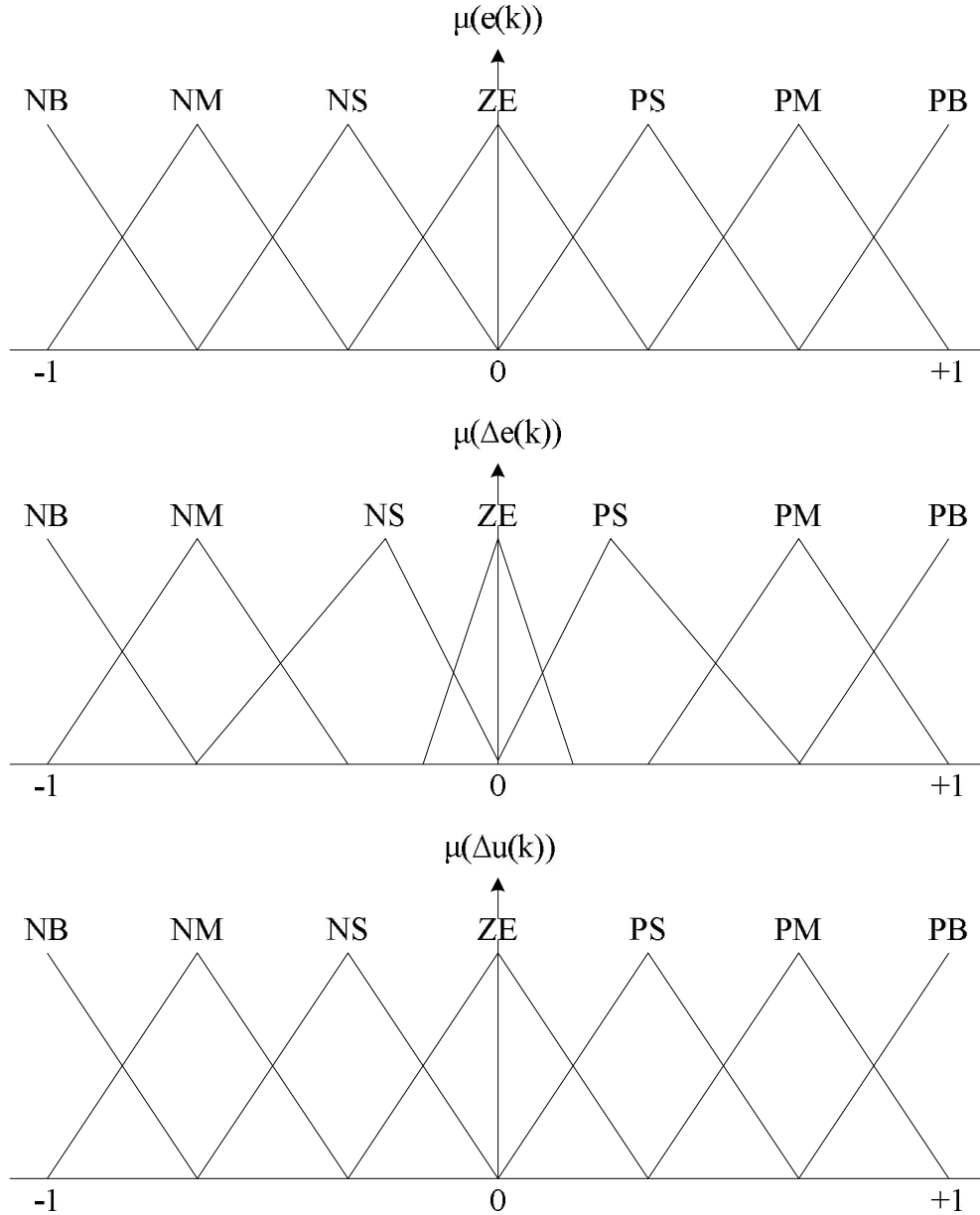
Hata (e) ve hatanın değişimi (Δe), sırasıyla (G_e) ve ($G_{\Delta e}$) katsayıları ile çarpılarak normalize edilmektedir. Normalize edilen bu büyüklükler bulanık mantık denetleyicisinin (BMD) girişlerini oluşturmaktadır. Giriş değişkenleri bulanıklaştırıldıktan sonra, bulanıklaştırılan girişler bulanık çıkarım katına uygulanmaktadır. Bulanık çıkarım katında kural tabanı yardımıyla değerlendirilen veriler daha sonra durulaştırma katmanına uygulanmaktadır [98].



Şekil 6.27. Bulanık mantık denetleyici blok diyagramı

Çalışmada kullanılan hata ve hatanın değişimine ait üyelik fonksiyonları Şekil 6.28’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi giriş bilgileri “Negatif Büyük (NB)”, “Negatif Orta (NM)”, “Negatif Küçük (NK)”, “Sıfır (ZE)”, “Pozitif Küçük (PS)”, “Pozitif Orta (PM)”, “Pozitif Büyük (PB)” gibi dilsel etiketler ile temsil edilmektedir. Hem giriş, hem de çıkış bulanık değişkenleri için (-1, +1) birime

indirgenmiş değer değişim aralığı kullanılmıştır. Tasarlanan bulanık mantık denetleyici çıkışının (Δu) tespiti için kullanılan kural tabanı Çizelge 6.1'de verilmiştir.

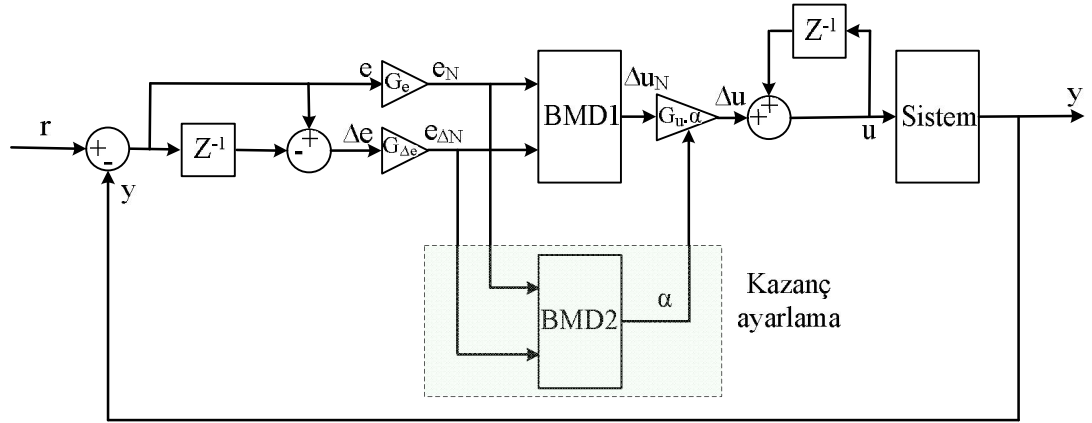


Şekil 6.28. Hata (e), hatanın değişimi (Δe) ve çıkış (Δu) için üyelik fonksiyonları

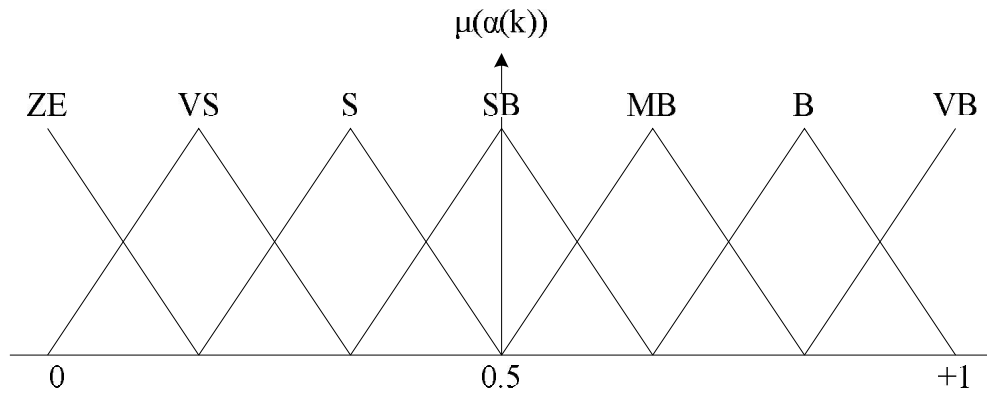
Çizelge 6.1. $\Delta\alpha$ için kural tablosu

$\Delta\alpha$ \ e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NS	NS	ZE
NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZE	PS
NS	NB	NM	NM	ZE	ZE	PS	PM
ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PM	PM	PB
PB	ZE	PS	PS	PM	PM	PB	PB

Şekil 6.27’de verilen Bulanık mantık denetim modelinde çıkış kazanç değeri sabit olduğu için farklı giriş büyüklüklerine göre kalıcı durum hatası oluşabilmektedir. Bu durumu engelleyebilmek için çıkış kazancının giriş bilgilerine göre sürekli olarak otomatik olarak ayarlanması gerekmektedir. Bu nedenle önerilen denetim modelinde çıkış kazancının değerinin belirlenmesinde ikinci bir BMD kullanılmıştır [98]. Böylece klasik bulanık mantık denetleyicinin çıkış ölçeklendirme katsayısı sürekli değiştirilerek, çıkış ölçeklendirme katsayısı kendinden ayarlamalı bulanık mantık denetleyici modeli elde edilmiştir. Şekil 6.29’da çıkış ölçeklendirme katsayısı kendinden ayarlamalı bulanık mantık denetleyicinin modeli verilmiştir. Bu denetim modeli bulanık mantık denetim modeline benzemekle birlikte, çıkış kazanç değerinin ayarlanması için ikinci bir BMD kullanılmıştır. Denetim modelindeki ikinci BMD’nin girişleri birinci BMD girişlerinin aynısıdır. İkinci BMD’nin çıkış üyelik fonksiyonları Şekil 6.30’da verilmiştir. Çıkış bulanık değişkenleri için (0, +1) birime indirgenmiş değer değişim aralığı kullanılmıştır. Tasarlanan ikinci BMD çıkışının ($\Delta\alpha$) tespiti için kullanılan kural tabanı ise Çizelge 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.29. Çıkış ölçeklendirme katsayısı kendinden ayarlamalı bulanık mantık denetleyici blok diyagramı



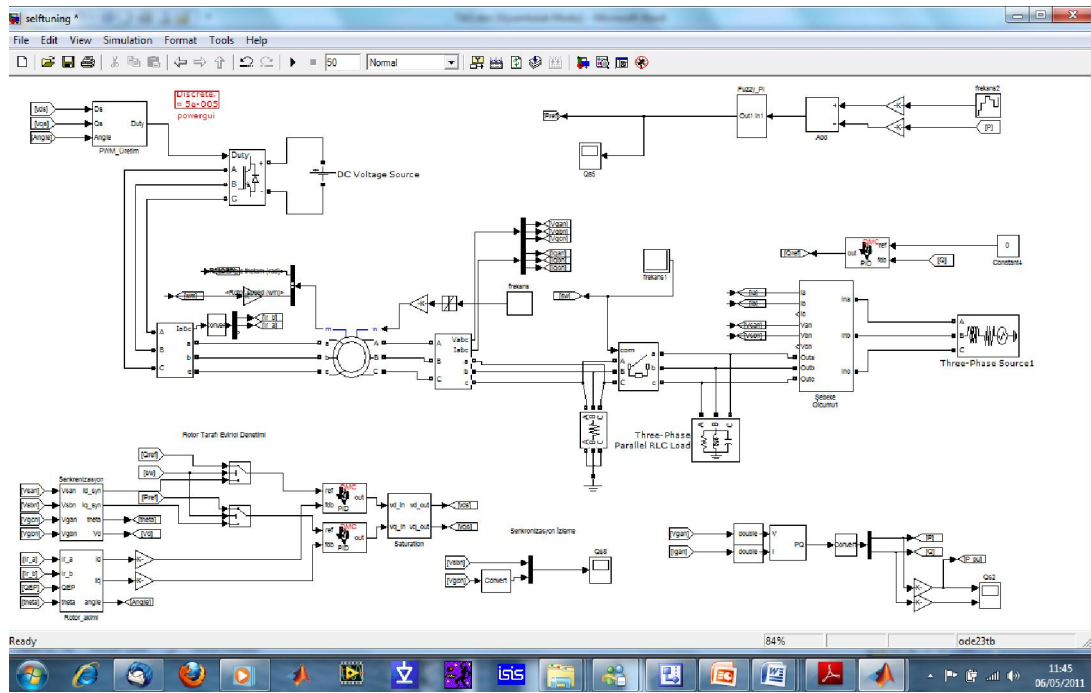
Şekil 6.30. α değeri için üyelik fonksiyonları

Çizelge 6.2. α için kural tablosu

Δe e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	VB	VB	VB	B	SB	S	ZE
NM	VB	VB	B	B	MB	S	VS
NS	VB	MB	B	VB	VS	S	VS
ZE	S	SB	MB	ZE	MB	SB	S
PS	VS	S	VS	VB	B	MB	VB
PM	VS	S	MB	B	B	VB	VB
PB	ZE	S	SB	B	VB	VB	VB

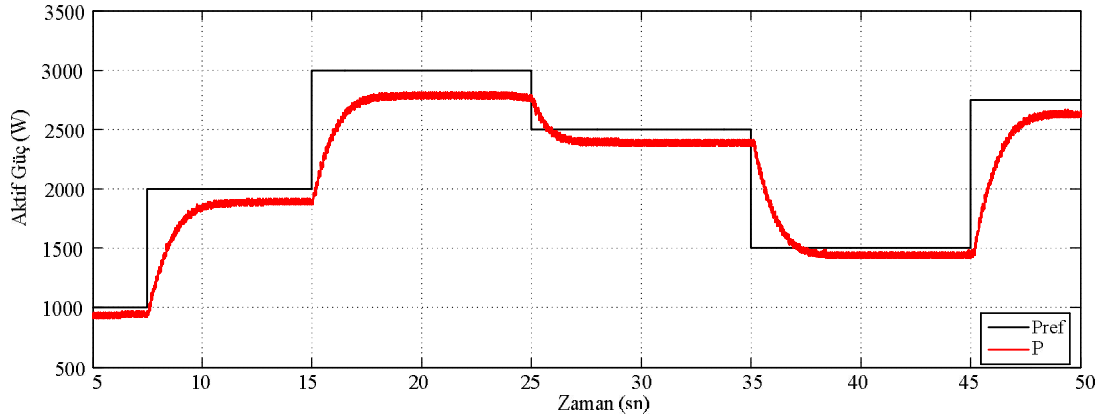
6.4.2. Benzetim çalışmaları

Benzetim çalışmaları için hazırlanan denetim algoritması önceki bölümde verilen algoritmadan aktif güç denetimi noktasında ayrılmaktadır. Burada aktif gücün denetimi için sırasıyla bulanık mantık denetleyici ve çıkış ölçeklendirme katsayısı kendinden ayarlamalı bulanık mantık denetleyici yapıları kullanılmıştır. Hazırlanan yazılım blok diyagram görünümü Şekil 6.31’de verilmiştir.



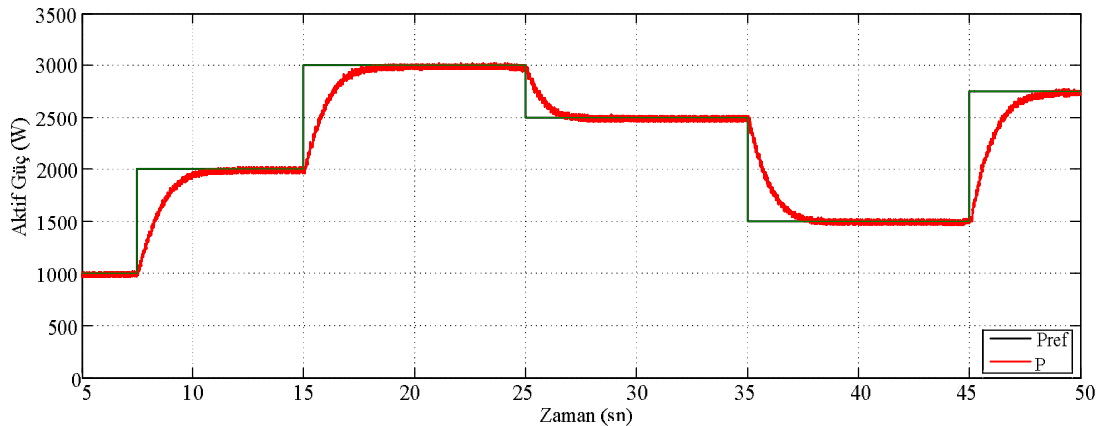
Şekil 6.31. Hazırlanan yazılımın blok diyagramı

Şekil 6.32’de bulanık mantık denetleyici kullanılarak gerçekleştirilen benzetim çalışmasının sonucu verilmiştir. Burada üretilen aktif gücün referans aktif gücü takibi gözlemlenmiştir. Eğrilerden görüldüğü gibi referans değer ile üretilen değer arasında farklı güç değerleri için farklı kalıcı durum hataları meydana gelmektedir. Bunun nedeni çıkış kazanç değerinin tüm çalışma durumları için sabit olmasıdır.



Şekil 6.32. Bulanık mantık denetleyici kullanılarak gerçekleştirilen referans ve üretilen aktif güç eğrileri (benzetim)

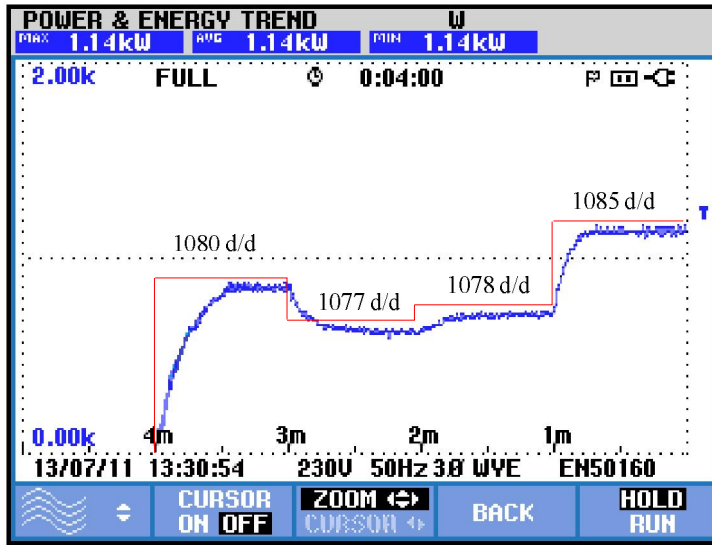
Şekil 6.33'de ise çıkış ölçeklendirme katsayısı kendinden ayarlamalı bulanık mantık denetleyici kullanılarak gerçekleştirilen benzetim çalışması sonucu verilmiştir. Burada üretilen aktif gücün referans aktif gücü takibi gözlemlenmiştir. Eğrilerden görüldüğü gibi çıkış ölçeklendirme katsayısı kendinden ayarlamalı bulanık mantık denetleyici kullanılarak hazırlanan denetim algoritması yardımıyla generatörün ürettiği aktif güç, referans aktif gücü başarılı şekilde takip edebilmektedir. Ancak PI denetleyici ile karşılaştırıldığında sistemin tepki süresi uzamıştır. Buna karşın aktif güçte aşım meydana gelmemiştir.



Şekil 6.33. Çıkış ölçeklendirme katsayısı kendinden ayarlamalı bulanık mantık denetleyici kullanılarak gerçekleştirilen referans ve üretilen aktif güç eğrileri (benzetim)

6.4.3. Deneysel çalışmalar

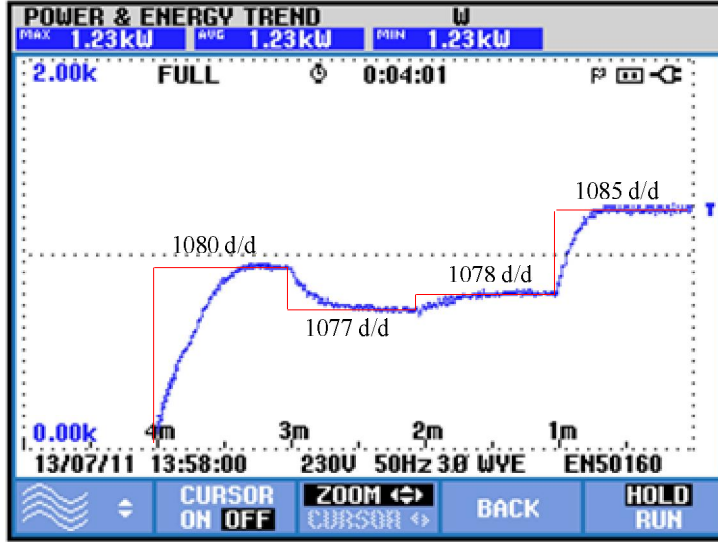
Şekil 6.34’de bulanık mantık denetleyici kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu, Fluke-434 enerji analizöründen alınan ekran görüntüsü verilmiştir. Burada farklı hız değerlerinde şebekeye aktarılan aktif gücün referans aktif gücü takip etme tepkisi gözlemlenmiştir. Benzetim çalışmalarında olduğu gibi bulanık mantık denetleyici ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucunda da aktif güç ile referans aktif güç arasında farklı güç değerlerinde farklı kalıcı durum hataları meydana gelmektedir.



Şekil 6.34. Bulanık mantık denetleyici kullanılarak gerçekleştirilen referans ve üretilen aktif güç eğrileri (deneysel)

Çıkış ölçeklendirme katsayısı kendinden ayarlamalı bulanık mantık denetleyici kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu ise, Fluke-434 enerji analizöründen alınan ekran görüntüsü Şekil 6.35’de verilmiştir. Burada üretilen aktif gücün referans aktif gücü takibi gözlemlenmiştir. PI ve bulanık mantık denetleyicinin tepkisiyle karşılaştırma yapabilmek için referans güç değerleri deneysel çalışma sırasında sabit tutulmuştur. Eğrilerden görüldüğü gibi çıkış ölçeklendirme katsayısı kendinden ayarlamalı bulanık mantık denetleyici kullanılarak hazırlanan denetim algoritması yardımıyla generatörün ürettiği aktif güç, referans aktif gücü başarılı şekilde takip edebilmektedir. Ancak PI ve bulanık mantık denetleyici ile karşılaştırıldığında sistemin tepki süresi uzamıştır. Buna karşın aktif güçte aşım

meydana gelmemiştir. Yapılan deneysel çalışma sonuçları benzetim sonuçları ile örtüşmektedir.



Şekil 6.35.Çıkış ölçeklendirme katsayısı kendinden ayarlamalı bulanık mantık denetleyici kullanılarak gerçekleştirilen referans ve üretilen aktif güç eğrileri (deneysel)

6.5. Sonuçların Değerlendirilmesi

Şebeke tarafındaki dönüştürücünün benzetim ve uygulama sonuçları Çizelge 6.3’de verilmiştir. Bu çizelgede hazırlanan denetim algoritması çalıştırılmadan önce ve denetim algoritması çalıştırdıktan sonra şebekeden çekilen akım harmonik düzeylerinin benzetim ve uygulama sonuçları yer almaktadır. Uygulamadan elde edilen sonuçlar benzetim sonuçlarına oldukça yakındır. Şebeke tarafı dönüştürücü için hazırlanan denetim algoritmasının başarısı verilen çizelgede görülmektedir. Uygulama sonuçlarına göre denetim algoritması çalıştırılmadan önce %32,30 olan giriş akım harmonikleri denetim algoritması çalıştırdıktan sonra %2,2 seviyesine düşürülmüştür. Böylece şebeke tarafı dönüştürücü giriş akım harmonik seviyesi IEEE-1547 standardına uygun düzeye düşürülmüştür. Ayrıca hazırlanan denetim algoritması yardımıyla şebeke tarafı dönüştürücünün birim güç faktöründe çalışması sağlanarak şebekeden reaktif güç çekmeside engellenmiştir.

Çizelge 6.3. Şebekeden çekilen akım harmonik düzeylerinin değerleri

	Giriş gerilimi (faz-faz)	Çıkış gerilimi (DA bara)	Benzetim sonucu (THD)	Uygulama sonucu (THD)
Denetleyici öncesi	55 V	72,5 V	%22,45	%32,30
Denetleyici sonrası	55 V	100 V	%2,0	%2,2

Çift beslemeli asenkron generatörün şebekeye enerji gönderebilmesi için şebekeye paralel bağlanması gerekmektedir. Yapılan çalışmada ÇBAG stator gerilimi ile şebeke geriliminin senkronizasyonu faz kilitli döngü (PLL) yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Senkronizasyon işleminin farklı hız değerlerinde başarılı şekilde gerçekleştiği yapılan benzetim ve deneysel çalışmalar sonucunda görülmüştür.

Çift beslemeli asenkron generatörün ürettiği aktif güç rotor tarafı dönüştürücü yardımıyla denetlenmektedir. Rotor tarafı dönüştürücünün denetimi sırası ile PI, bulanık mantık denetleyici (BMD) ve çıkış ölçeklendirme katsayısı kendinden ayarlamalı bulanık mantık denetleyici (KABMD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Rotor tarafındaki dönüştürücünün denetimi sonrası benzetim ve uygulama sonuçları

sırası ile Çizelge 6.4 ve Çizelge 6.5'te verilmiştir. Benzetim ve uygulama sonuçları karşılaştırıldığında oturma zamanı dışındaki parametrelerin birbirleri ile yaklaşık değerlerde olduğu görülmektedir. Oturma zamanında yaşanan farklılık ise uygulama ve benzetim çalışmalarında kullanılan referans güç değerlerinin birbirlerinden farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 6.4. Benzetim sonuçlarının karşılaştırılması

	Kalıcı durum hatası	Aşım	Oturma zamanı
PI	%0	%25	1,5 sn
BMD	%8,3	%0	2,5 sn
KABMD	%0	%0	3,0 sn

Benzetim ve uygulama sonuçları karşılaştırıldığında aktif güç denetimi için PI denetim tekniğinin BMD ve KABMD tekniklerinden daha hızlı olduğu görülmektedir. Ancak aktif güç denetimi için PI denetimin kullanılması sonucu referans güç değerlerinde aşım meydana gelmektedir. Bu aşım değeri PI denetleyici parametrelerinin optimize edilmesi ile azaltılabilsede tam olarak yok edilememektedir. Ayrıca aşım değerinin azaltılması sonucu kalıcı durum hatası meydana gelmekte ve generatürün ürettiği aktif güçte salınımlar yaşanmaktadır. BMD kullanılması sonucu referans aktif güçte aşım engellenmede farklı güç değerleri için farklı kalıcı durum hataları meydana gelmektedir.

Çizelge 6.5. Deneysel sonuçların karşılaştırılması

	Kalıcı durum hatası	Aşım	Oturma zamanı
PI	%0	%20	25 sn
BMD	%7,2	%0	30 sn
KABMD	%0	%0	35 sn

PI denetleyicide yaşanan aşım ve BMD'de yaşanan kalıcı durum hatalarını yok etmek için önerilen KABMD'nin kullanılması ile hem aşım engellenmiş hemde kalıcı durum hatası sıfır yapılmıştır. Sonuç olarak ÇBAG'nin aktif güç denetimi için kullanılan rotor tarafı dönüştürücünün denetiminde sabit kazançlı bir denetleyici

yerine değişen Şartlara uyarlanabilen yapıda bir denetleyicinin başarısı benzetim ve uygulama sonuçlarına göre kanıtlanmıştır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, rüzgâr türbin sistemlerinde yaygın olarak kullanılan çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG) için etkin bir denetleyici tasarımı sunulmuştur.

İlk olarak, ÇBAG'nin yapısı ve çalışma prensibi incelenmiştir. ÇBAG'nin matematiksel modeli çıkartılarak Matlab&Simulink programı yardımıyla benzetim modeli oluşturulmuştur. Bu benzetim modeli yardımıyla ÇBAG'nin aktif ve reaktif güç karakteristikleri çıkartılarak denetleyici parametreleri elde edilmiştir.

Yapılan tez çalışmasında, benzetim çalışmalarının yanında deneysel çalışmalarda gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar için; çift yönlü akım geçişine izin veren ve arka arkaya bağlı üç fazlı iki adet güç elektroniği dönüştürücüsü ve bunların çevre birimleri özgün olarak tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemin denetimi için iki adet TMS320F2812 DSP kartı kullanılmıştır. Deneysel kurulumun denetimi için gerekli algoritmalar Matlab&Simulink programı yardımıyla hazırlanmıştır. Böylece yazılım hazırlama süreci kısaltılmış ve denetim sistemine esneklik kazandırılmıştır.

Rotor tarafı dönüştürücünün ihtiyacı olan DA bara gerilimi, literatürde yer alan benzer çalışmalardan [59, 64] farklı olarak şebeke tarafı dönüştürücünün PWM'li doğrultucu olarak çalıştırılması ile sağlanmıştır. Böylece şebeke tarafı dönüştürücünün denetimi gerçekleştirilerek DA bara geriliminin sabit kalmasının yanında şebekeden çekilen akım harmonikleride azaltılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, sunulan denetim algoritması çalıştırılmadan önce şebekeden çekilen akım harmoklerinin THD değeri %32,3 iken, denetim algoritması çalıştırıldıktan sonra bu değer, %2,2 olarak ölçülmüştür. Böylece şebekeden çekilen akım harmoniklerinin THD değeri, IEEE 1547 ve IEC 61000-4-7 standartlarında belirlenen sınırlar içerisine indirilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmada şebeke tarafı dönüştürücü yapısının birim güç faktöründe çalışması sağlanmıştır. Böylece sunulan denetim tekniği yardımıyla, şebeke tarafı güç elektroniği dönüştürücüsü giriş akım harmoniklerini azaltmanın yanında şebekeden reaktif güçte çekmemektedir.

Yapılan çalışmada ÇBAG stator geriliminin, şebeke gerilimi ile senkronizasyonu için faz kilitli döngü (PLL) kullanılmıştır. Böylece farklı hız değerlerinde şebekeye paralel bağlanma başarılı şekilde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, ÇBAG'nin hızı standartlarda belirlenen hız değerinin altına düştüğünde paralel bağlanma otomatik olarak sonlandırılarak sistem güvenliği literatürde yer alan benzer çalışmalardan [33, 41, 49, 54] daha üstün hale getirilmiştir. Bunun yanında senkronizasyon işleminin yumuşak şekilde gerçekleştiği ve şebekede herhangi bir akım salınımına yol açmadığı da deneysel çalışmalar sonucu görülmüştür. Bunlara ilaveten kullanıcıların generatör ve şebeke parametrelerini izleyebilmesi amacıyla bir kullanıcı arayüz yazılımı da hazırlanmıştır. LabVIEW programı kullanılarak hazırlanan arayüz yazılımı ÇBAG'nin şebekeye paralel bağlanma işlemini otomatik olarak gerçekleştirmektedir. Böylece kullanıcı hatalarından kaynaklanan yanlış paralel bağlanmaların önüne geçilerek literatüre katkı sağlayacak daha güvenli bir sistem elde edilmiştir.

Deneysel çalışmalar sonucu asenkron generatörlerin aksine ÇBAG'nin şebekeyi reaktif güç bakımından da başarılı şekilde desteklediği görülmüştür. Reaktif gücün denetlenebilmesi amacıyla PI denetim tekniği kullanılmıştır. Böylece şebekeye aktarılan reaktif gücün referans reaktif gücü başarılı şekilde takip ettiği görülmüştür. Ayrıca, ÇBAG'nin şebekeyi hem endüktif hemde kapasitif karakterli reaktif güç bakımından başarılı şekilde desteklediği deneysel çalışmalar sonucu görülmüştür.

ÇBAG'nin aktif güç denetimi için PI, bulanık mantık denetleyici ve çıkış ölçeklendirme katsayısı kendinden ayarlamalı bulanık mantık denetleyici denetim teknikleri kullanılmıştır.

PI denetim tekniğinde denetleyici parametrelerinin ayar zorluğu ve sistemin matematiksel modeline bağlılığı bu denetim tekniğinin en büyük dezavantajı olarak görülmektedir. Ayrıca PI denetim modelinde referans güç değerinin %20'si oranında yaşanan aşım bu denetim modelinin eksiklikleri arasında görülmektedir. Bu aşım değeri deneysel çalışmalar sırasında kullanılan generatör gücü dikkate alındığında önemsiz gibi görünse de ticari ürünlerde bu kadar fazla aşımın yaşanması şebeke üzerinde ciddi sorunlar meydana getirebilmektedir. Bunun yanında PI denetim

modelinde farklı referans güç değerlerinde farklı aşım seviyelerinin meydana geldiğine de dikkat edilmelidir.

Bulanık mantık denetleyici modelinde ise çıkış ölçeklendirme katsayısının sabit bir değer seçilmesi, farklı referans güç değerlerine göre farklı kalıcı durum hatalarının oluşmasına neden olmuştur. Bunun yanında bulanık mantık denetim tekniğinde referans güce göre aşım meydana gelmezken denetleyici tepkisi PI denetleyiciden daha yavaş olmuştur.

Önerilen çıkış ölçeklendirme katsayısı kendinden ayarlamalı bulanık mantık denetleyici, bulanık mantık denetleyicide yaşanan çıkış ölçeklendirme katsayısının sabit olması sorununu ikinci bir bulanık mantık denetleyici kullanarak çözmüştür. Burada ikinci bulanık mantık denetleyicinin görevi, çıkış ölçeklendirme katsayısını, girişlerden gelen bilgilere göre sürekli güncellemektir. Çıkış ölçeklendirme katsayısı kendinden ayarlamalı bulanık mantık denetleyici sonuçları incelendiğinde referans güce göre güçte herhangi bir aşımın meydana gelmediği ayrıca kalıcı durum hatasının sifıra çok yakın olduğu görülmektedir. Ancak denetleyici tepkisi diğer iki denetleyici tepkisinden daha yavaş olmuştur.

Sonuç olarak sabit kazançlı PI ve bulanık mantık denetleyici ile kontrol edilen sistemler daha önceden belirlenen çalışma noktasında çalıştığında kabul edilebilir bir performans elde edilebilir. Ancak sistem parametrelerinin değişimi nedeniyle farklı çalışma noktaları arasında geçişler söz konusu olduğunda elde edilen geçici durum performansı için aynı şeyi söylemek mümkün değildir. Özellikle rüzgâr türbinlerinin dolayısıyla bu türbinleri denetleyen güç elektroniği yapılarının çalışma noktaları, rüzgâr hızı gibi doğal nedenlere bağlı olarak sürekli değişebilmektedir. Bu nedenle ÇBAG'nin rotor tarafı güç elektroniği dönüştürücüsünün denetiminde sabit kazançlı bir denetleyici yerine değişen şartlara uyarlanabilen yapıda bir denetleyici bu tezde sunulmuş ve başarısı kanıtlanmıştır.

Tezde kullanılan ÇBAG'nin rotor devresi parametreleri uygun olmadığı için senkron üstü hızlarda deneysel çalışmalar yapılamamıştır. İyi tasarlanmış bir ÇBAG seçilerek senkron altı hızın yanında senkron üstü hız değerlerinde de önerilen denetim sisteminin başarısı test edilebilir.

ÇBAG'nin çalışması sırasında olası bir arızadan dolayı generatörü ve güç elektroniği dönüştürücülerini korumak amacıyla rotor devresini kısa devre eden bir koruma devresi (crowbar protection) tasarlanabilir.

Ayrıca daha hızlı ve daha büyük hafızalı işaret işleyicilerin piyasada yer alması ile birlikte iki işaret işleyici yerine tek işaret işleyici kullanılması mümkün görülmektedir.

Uzaktan görüntüleme ve kontrol yazılımı birden fazla generatörün izlenmesini ve kontrolünü yapacak şekilde geliştirilebilir. Ayrıca ÇBAG veya şebekenin daha fazla parametresi analiz edilebilir. Örneğin ÇBAG'nin şebekeye aktardığı akım harmonikleri analiz edilebilir.

Gerçekleştirilen deneysel kurulum, laboratuvar derslerinde mühendislik öğrencilerine faydalı bir ders aracı haline getirilebilir. Böylece uygulamalı olarak öğrenciler ÇBAG'nin çalışma prensibini ve şebekedeki davranışını görme fırsatını yakalayabilirler.

Denetim algoritmasında değişikliğe gidilerek ÇBAG'nin lokal yükleri beslemesinde kolaylıkla sağlanabilir. Böylece enterkonnekte sistemin gidemediği yerler için geleneksel dizel jeneratörlere yeni bir alternatif enerji kaynağı sunulabilir.

KAYNAKLAR

1. Iwanski G., Koczara W., “Sensorless Direct Voltage Control Method for Stand-Alone Slip-Ring Induction Generator”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(2): 1237-1239, (2007).
2. Arbi J., Ghorbal M., Belkhdja I., Charaabi L., “Direct Virtual Torque Control for Doubly Fed Induction Generator Grid Connection”, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 56(10): 4163-4173, (2009).
3. Dat M., Loc M., Truc P., Phue N., “Control of DFIGs Using Dspace R&D Controller Board-An Application of Rapid Control Coordinated With Matlab/Simulink” *International Symposium on Electrical&Electronics Engineering*, 302-307, (2007).
4. Li S., Haskew T. A., “Characteristic Study of Vector-Controlled DFIG in Stator-flux-oriented Frame”, *Electric Power Components and Systems*, 36: 990-1015, (2008).
5. Chowdhury B.H., Chellapilla S., “DFIG Control for Variable Speed Wind Power Generation”, *Electric Power System Research*, 76: 786-800, (2006).
6. Babu B.C., Mohanty K.B., Poongothai C., “Performance of DFIG for Wind Energy Conversion Systems”, *First International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology*, 933-938, (2008).
7. Fadaeinedjad R., Moallem M., Moschopoulos G., “Simulation of a Wind Turbine With DFIG by FAST and Simulink”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(2): 690-700, (2008).
8. İnternet: Shahnia F., Sharifian M.B.B., “PsCAD/EMTDC Based Simulation of DFIG for Wind Turbines”
<http://ezepdico.ir/papers/shahnia/DFIG-%20eng%20-%20croatia.pdf>, (2011).
9. Soens J., Driesen J., Belmans R., “A Comprehensive Model of a DFIG for Dynamic Simulations and Power System Studies”, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Vigo, Spain, (2003).
10. Wang Y., Zhao D., Zhao B., Xu H., “A New Type of Control Strategy of DFIG in Wind Power System Based on SMC”, *International conference on Electrical Machines and Systems*, Wuhan, (2008).
11. Joshi N., Mohan N., “A Novel Scheme to Connect Wind Turbines to the Power Grid”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24(2): 504-510, (2009).
12. Hughes F.M., Lara O., Jenkins N., Strbac G., “A Power System Stabilizer for DFIG-Based Wind Generation”, *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(2): 763-772, (2006).

13. Hokkanen M., Salminen H.J., Vekara T., "A Short Review of Models for Grid-Connected Doubly-Fed Variable Speed Wind Turbines", *Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics*, Trondheim, (2004).
14. Li S., Sinha Sitanshu, "A Simulation Analysis of DFIG for Wind Energy Conversion Using PSpice", *Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, Canada, (2006).
15. Jeong H.G., Kim W.S., Lee K.B., Jeong B.C., Song S.H., "A Sliding-Mode Approach to Control the Active and Reactive Powers for A DFIG in Wind Turbines", *Power Electronics Specialists Conference*, Greece, (2008).
16. Davijani, H.K., Sheikholeslami A., Ahmadi R., Livani H., "Active and Reactive Power Control of DFIG Using SVPWM Converter", *43rd International Universities Power Engineering Conference*, Manchester, (2008).
17. Janssens N.A., Lambin G., Bragard N., "Active Power Control Strategies of DFIG Wind Turbines", *IEEE Power Tech Conference*, Switzerland, (2007).
18. Ko H.S., Yoon G.G., Hong W.P., "Active Use of DFIG-Based Variable-Speed Wind-Turbine for Voltage Regulation at a Remote Location", *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(4): 1916-1925, (2007).
19. Tsourakis G., Nomikos B.M., Vournos C.D., "Contribution of Doubly Fed Wind Generators to Oscillation Damping", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24(3): 783-791, (2009).
20. Arbi J., Belkhdja I., Arnaltez S., "Control of a DFIG-based wind system in presence of large grid faults: analysis of voltage ride through capability." *9th International Electrical Power Quality and Utilisation Conference*, Barcelona, (2007).
21. Hofmann W., Thieme A., "Control of a DFIG for Wind-Power Plants", *7th European Conference on Power Electronics and Applications*, Norway, (1997).
22. Poitiers F., Machmoum M., Doeuff R.L., Zaim M.E., "Control of a DFIG for Wind Energy Conversion Systems", *International Journal of Renewable Energy*, 3(3): 373-378, (2001).
23. Michalke G., Hansen A.D., Hartkopf T., "Control of a Wind Park With DFIGs in Support of Power System Stability in Case of Grid Faults", *European Wind Energy Conference*, Italy, (2007).
24. Hughes F.M., Lara O.A., Jenkins N. Strbac G., "Control of DFIG-Based Wind Generation for Power Network Support", *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(4): 1958-1966, (2005).

25. Saidani D., Hasnaoui O., Dhifaoui R., "Control of DFIG for Wind Conversion System", *International Journal of Sciences and Techniques of Automatic Control & Computer Engineering*, 2(2): 710-721, (2008).
26. Rothenhagen K., Fuchs F.W., "Current Sensor Fault Detection, Identification and Reconfiguration for a DFIG", *33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Taiwan, (2007).
27. Karimi S., Gaillard A., Poure P., Saadate S., "Current Sensor Fault-Tolerant Control for WECS With DFIG", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(11): 4660-4670, (2009).
28. Wang H., Zhang W., Hu J., He Y., "Design and Optimization of Proportional Resonant Controller for Rotor Current of a Wind Turbine Driven DFIG", *International Conference on Electrical Machines and Systems*, China, (2008).
29. Lara O., Hughes F.M., Jenkins N., Strbac G., "DFIG Control Contributions to Power Network Dynamic and Transient Stability", *European Wind Energy Conference*, Athens, (2006).
30. Zhi, D., Xu L., "Direct Power Control of DFIG With Constant Switching Frequency and Improved Transient Performance", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(1): 110-118, (2007).
31. Mahi Z., Serban C., Siguerdidjane H., "Direct Torque Control of a DFIG of a Variable Speed Wind Turbine Power Regulation", *European Wind Energy Conference*, Milan, (2007).
32. Melicio R., Mendes V.M.F., "DFIG Sytems For Variable Speed Wind Turbine", *IEEE Trans. Power Syst.*, 25(1):1-4, (2004).
33. Gallardo S., Carrasco J.M., Galvan E., Franquelo L.G., "DSP-Based DFIG Test Bench Using a Back-to-Back Converter", *The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Korea, (2004).
34. Xu L., Wang Y., "Dynamic Modelling and Control of DFIG-Based Wind Turbines Under Unbalanced Network Conditions", *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(1): 314-323, (2007).
35. Ekanayake J.B., Holdsworth L., Wu X., Jenkins N., "Dynamic Modelling of DFIG Wind Turbines", *IEEE Transactions on Power Systems*, 18(2): 803-809, (2003).
36. Bing H., Kang H., "Dynamic Modelling and Robust Current Control of Wind-Turbine Driven DFIG During External AC Voltage Dip", *Journal of Zhejiang University Science A*, 7(10): 1757-1764, (2006).

37. Xu L., "Enhanced Control and Operation of DFIG-Based Wind Farms During Network Unbalance", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(4): 1073-1081, (2008).
38. Marques G.D., Pires V.F., Sousa S., Sousa D.M., "Evaluation of a DFIG Rotor Position-Sensorless Detector Based on a Hysteresis Controller", *International Conference on Power Engineering*, Lisbon, (2009).
39. Schmidt I., Veszpremi K., "Field Oriented Current Vector Control of Double-Fed Induction Wind Generator", *32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, Paris, (2006).
40. Davijani H.K., Sheikholeslami A., Livani H., Davijani M.K., "Fuzzy Logic Control of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbine", *World Applied Sciences Journal*, 6(4): 499-508, (2009).
41. Khalik A.G., Lee D.C., Lee S., "Grid Connection of Doubly-Fed Induction Generators in Wind Energy Conversion System", *CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference*, China, (2006).
42. Chandrasena R.P.S., Arulampalam A., Ekanayake J.B., Abeyratne S.G., "Grid Side Converter Controller of DFIG for Wind Power Generation", *Second International Conference on Industrial and Information Systems*, Sri-Lanka, (2007).
43. Tremblay E., Chandra A., Lagace P.J., "Grid-Side Converter Control of DFIG Wind Turbines to Enhance Power Quality of Distribution Network", *Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, Canada, (2006).
44. Hu J., He Y., Xu L., Williams B., "Improved Control of DFIG Systems During Network Unbalance Using PI-R Current Regulators", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(2): 439-450, (2009).
45. Francois B., Peng L., Li Y., "Improved Crowbar Control Strategy of DFIG Based Wind Turbines for Grid Fault Ride-Through", *Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Washington, (2009).
46. Gagnon R., Sybille G., Bernard S., Pare D., Casoria S., Larose C., "Modeling and Real-Time Simulation of a Doubly-Fed Induction Generator Driven by a Wind Turbine", *The International Conference on Power Systems Transients*, , Canada, (2005).
47. Babypriya B., Anita R., "Modelling, Simulation and Analysis of Doubly Fed Induction Generator for Wind Turbines", *Journal of Electrical Engineering*, 60(2): 79-85, (2009).

48. Cardenes R., Pena R., Proboste J., Asher G., Clare J., "MRAS Observer for Sensorless Control of Standalone Doubly Fed Induction Generators", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(4): 710-718, (2005).
49. Salman S.K., Badrzadeh B., "New Approach for Modelling DFIG for Grid-Connection Studies", *European Wind Energy Conference & Exhibition*, (2004).
50. Shen B., Ooi B.T., "Novel Sensorless Decoupled P-Q Control of DFIG Based on Phase Locking to γ - δ Frame", *IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference*, Brazil, (2005).
51. Wegener R., Soter S., Rösman T., "Operation of DFIG With Unmodified Low Cost Standart Converters", *IEEE 37th Power Electronics Specialists Conference*, Korea, (2006).
52. Lara O.A., Liu Z., Varela G.Q., McDonald J.R., "Optimal DFIG Crowbar Resistor Design Under Different Controllers During Grid Faults", *The 3rd IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring, and Power Technology*, China, (2008).
53. Moursi M., Abbey C., Joos G., "Optimal Tracking Secondary Voltage Control for The DFIG Wind Turbines", *Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, Canada, (2006).
54. Iwanski G., Koczara W., "PLL Grid Synchronization of The Standalone DFIG Based Wind Turbine or Rotory UPS", *The International Conference on Computer as a Tool*, Warsaw, (2007).
55. Almeida R.G., Lopes J.A.P., "Primary Frequency Control Participation Provided by Doubly Fed Induction Wind Generators", 15th *Power System Computation Conference*, Belgium, (2005).
56. Kayıkçı M., Milanovic J.V., "Reactive Power Control Strategies for DFIG-Based Plants", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(2): 389-397, (2007).
57. Morren J., Sjoerd W.H., "Ridethrough of Wind Turbines with DFIG During a Voltage Dip", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(2): 435-441, (2005).
58. Mwinyiwiwa B., Zhang Y., Shen B., Ooi B., "Rotor Position Phase-Locked Loop for Decoupled P-Q Control of DFIG for Wind Power Generation", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24(3): 758-765, (2009).
59. İskender İ., Genç N., "Rüzgâr Türbini İle Sürülen Çift Çıkışlı Asenkron Jeneratörün İncelenmesi ve Bulanık Mantık Kontrol Yöntemiyle Maksimum Çıkış Gücünün Elde Edilmesi", *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 24(2): 343-350, (2009).

60. Yang S., Ajarapu V., "Sensorless Control of the DFIG for Wind Energy Generations Using a Speed-Adaptive Full-Order Flux Observer", *Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Washington, (2009).
61. Shen B., Mwinyiwiwa B., Zhang Y., Ooi B., "Sensorless Maximum Power Point Tracking of Wind by DFIG Using Rotor Position Phase Lock Loop(PLL)", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(4): 942-951, (2009).
62. Margaris I., Tsouchnikas A., Hatziargyriou N., "Simulation of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbines", *European Wind Energy Conference*, Italy, (2007).
63. Gaillard A., Poure P., Saadate S., Machmoum M., "Variable Speed DFIG Wind Energy System For Power Generation and Harmonic Current Mitigation", *Renewable Energy*, 34(2009): 1545-1553, (2009).
64. Ling P., Yongdong L., Jianyum C., Guofeng, "Vector Control of a Doubly Fed Induction Generator for Stand Alone Ship Shaft Generator Systems", *Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems*, Korea, (2007).
65. Tapia G., Otaegui A. T., "Wind Generation Optimization Algorithm for a Double Fed Induction Generator", *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, 152(2): 253-263, (2005).
66. İnternet: Babu B.C., Mohanty K.B., Poongathai C., "Wind Turbine Driven Doubly Fed Induction Generator With Grid Disconnection", <http://eeeic.org/proc/papers/6.pdf>, (2011).
67. Qiao W., Zhou W., Aller J.M., Harley R.G., "Wind Speed Estimation Based Sensorless Output Maximization Control for a Wind Turbine Driving a DFIG", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23(3): 1156-1169, (2008).
68. Çetin N.S., "Şebeke Bağlantısız PM Generatörlü Rüzgâr Türbinlerinin YSA ile Sistem Optimizasyonu", Doktora Tezi, *Ege Üniv. Fen Bil. Ens.*, (2006).
69. Blaabjerg F., Chen Z., "Power Electronic for Modern Wind Turbines", Synthesis Lectures on Power Electronics #1, *Institute of Energy Technology*, Aalborg University, Denmark, (2006).
70. Uyar M., Gençoğlu M.T., Yıldırım S., "Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinleri için Generatör Sistemleri", *III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, Mersin, (2005).
71. Hansen L.H., Blaabjerg F., Christensen H.C., Lindhard U., "Generators and Power Electronics Techlogy for wind Turbines", *The 27th annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, (2001).

72. Petersson A., "Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for wind Turbines", Phd Thesis, *Chalmers University of Technology*, Göteborg, Sweden, (2005).
73. Santos-Martin D., Arnaltes S., Amenedo J.L.R., "Reactive Power Capability of Doubly Fed Asynchronous Generators", *Electric Power Systems Research*, 78: 1837-1840, (2008).
74. Boldea I., "Variable Speed Generators", *Taylor&Francis*, (2006).
75. Li S., Haskew T.A., Jackson J., "Integrated power characteristic study of DFIG and its frequency converter in wind power generation", *Renewable Energy*, 35: 42-51, (2010).
76. Esen M., "Bulanık Mantık Destekli Güç Akış Analizi", Y.Lisans tezi, *Karadeniz Teknik Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2006).
77. Fuzzy Logic Toolbox 2 User's Guide, *The Mathworks Inc.*, (2011).
78. Bolat Y., "Matlab-Simulink+PIC Tabanlı Bulanık Mantık Denetleyici Tasarımı ve Gerçek Zamanlı Sıcaklık Kontrolü Uygulaması", Y.Lisans Tezi, *Marmara Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2006).
79. Baykal N., Beyan T., "Bulanık Mantık Uzman Sistemler ve Denetleyiciler", *Bıçaklar Kitabevi*, (2004).
80. Elmas, Ç: "Bulanık Mantık Denetleyiciler", *Seçkin Yayıncılık*, Türkiye, (2003).
81. İnternet: "2MBI1004A-120 IGBT Module Data Sheet", Fuji Electric, <http://www.fujielectric.de>, (2005).
82. İnternet: "IGBT-Driving Hybrid ICs Application Manual", Fuji Electric, <http://www.fujielectric.de>, (2004).
83. Demirbaş Ş., Irmak, E., Bayhan, S., Çolak, İ. "Mikrodenetleyici ile Rotoru Sargılı Asenkron Motor Rotor Direncinin Değiştirilerek Tork ve Hız Kontrolü", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(4): 801 - 809, (2008).
84. Raoufi, M., Lamchich, M.T., "Average Current Mode Control of a Voltage Source Inverter Connected to the Grid: Application to Different Filter Cells", *Journal of Electrical Engineering*, 55(3-4): 77-82, (2004).
85. Demirbaş Ş., Bayhan S., "Yenilenebilir Enerji Kaynakları İçin DSP Tabanlı Üç Fazlı Şebeke Etkileşimli Evirici", *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(1): 21-33, (2011).

86. Kesler S., "Elektrik Makinaları Denetim Sistemlerinde TMS320F2812 DSP Kullanımı", *Akademik Bilişim*, Çanakkale, 685-69, (2008).
87. Bayhan S., "Enerji Kalitesinin İnternet Tabanlı Ölçüm ve Analizi", Y. Lisans Tezi, *Gazi Üniv. Fen Bilimleri Enst.*, (2008).
88. İnternet: United Electronic Industries "PowerDNA DNA-PPCX Data Sheet", <http://www.ueidaq.com/pdf/datasheets/dna-ppcx.pdf>, (2008).
89. "IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems", *IEEE Standard 1547*, (2003).
90. Jacobson R., Gregory B., "Wind Power Quality Test for Comparison of Power Quality Standards", *National Renewable Energy Laboratory*, (1999).
91. Bayhan S., Demirbaş Ş., Garip İ., "Design and Implementation of DSP-Based Three-Phase PFC", *XXII International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies*, Sarajevo, Bosnia&Herzegovina, (2011).
92. Best, R. E., "Phase-locked Loops: Design, Simulation and Applications", *McGraw-Hill*, (2003).
93. Boylestad R., Nashelsky L., "Elektronik Elemanlar ve Devre Teorisi", *MEB Yayınları*, (2000).
94. Chung S., "A Phase Tracking System for Three Phase Utility Interface Inverters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 15(3): 431-438, (2000).
95. Demirbaş Ş., Bayhan S., "Grid Synchronization of Doubly Fed Induction Generator in Wind Power Systems", *III. International Conference on Power Engineering Energy and Electrical Drives*, Malaga, Spain, (2011).
96. Ziegler, J.G. and Nichols, N.B. "Optimum settings for automatic controllers", *Transactions of The American Society of Mechanical Engineers*. 64: 759-768, (1942).
97. Altın N., "Bulanık Adaptif PI Denetimli Şebeke Etkileşimli Eviricinin Benzetimi", *Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(3): 325-335, (2009).
98. Hameed S., Das B., Pant V., "A Self-tuning fuzzy PI controller for TCSC to improve power system stability", *Electrical Power System Research*, 78: 1726-1735, (2008).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BAYHAN, Sertaç
 Uyuşu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 17.04.1981 Şanlıurfa/Siverek
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 505 404 25 83
 e-mail : sbayhan@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	M. tarihi
Y.Lisans	Gazi Üniversitesi/ Fen Bilimleri Enstitüsü	2008
Lisans	Gazi Üniversitesi/ TEF Elektrik Eğitimi Bölümü	2006
Lise	Siverek E.M.L./ Elektrik Bölümü	1998

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005-2007	Emniyet Müdürlüğü (ANKARA)	Bilgi-İşlem Sor.
2007-2009	Başkent Üniversitesi (ANKARA)	Öğretim Görevlisi
2009-	Gazi Üniversitesi (ANKARA)	Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Demirbaş Ş., **Bayhan S.**, “*Bilgisayar Kontrollü Gezin Robot Tasarımı*”, Süleyman Demirel Üniversitesi Ulusal Öğrenci Sempozyumu, Isparta/Türkiye, 2006.
2. Demirbaş Ş., Irmak, E., **Bayhan, S.**, Çolak, İ. “*Mikrodenetleyici ile Rotoru Sargılı Asenkron Motor Rotor Direncinin Değiştirilerek Tork ve Hız Kontrolü*”, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 23(4), 801 - 809, 2008.
3. **Bayhan S.**, Yılmaz, D. “*Güç Sistemlerindeki Dalga Şekli Bozukluklarının Tespiti*”, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ELECO 2008, 26-30 Kasım 2008, Bursa/Türkiye.
4. Demirbaş Ş., **Bayhan, S.**, “*Güç Sistem Harmoniklerinin Uzaktan İzlenebilmesi İçin LabVIEW Tabanlı Görüntüleme Sistemi Gerçekleştirilmesi*” e-Journal of New World Sciences Academy, Technological Applied Sciences, (2A),55-66, 2009.
5. **Bayhan S.**, Demirbaş Ş., “*Güç Sistemlerinde Enerji Kalitesi Bozukluklarının Eşzamanlı Tespit Edilmesi*” e-Journal of New World Sciences Academy - Technological Applied Sciences, 4(2), 120 - 135, 2009.
6. **Bayhan S.**, Yılmaz D., “*Güç Sistemlerinde Meydana Gelen Dalga Şekli Bozukluklarının Dalgacık Dönüşümü Yardımıyla Tespiti*” e-Journal of New World Sciences Academy -Technological Applied Sciences, 4(2), 151 - 162, 2009.
7. **Bayhan S.**, Demirbaş Ş., “*LabVIEW ile İnternet Tabanlı Sanal Laboratuvar Uygulaması*” e-Journal of New World Sciences Academy -Engineering Sciences, 4(2), 176 - 185, 2009.
8. Bayındır, R., Çolak, İ., Garip, İ., **Bayhan, S.**, “*Alternatörler için Mikrodenetleyici Tabanlı Faz Sırası Doğruluğu ve Faz Kopukluğu Uyarı Sistemi*” Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi 24(1), 105 - 118, 2009.
9. **Bayhan S.**, Demirbaş Ş., “*Şebeke Gerilim Değişimlerinin LabVIEW Tabanlı İzlenmesi*”, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 13-15 Mayıs 2009, Karabük/Türkiye
10. **Bayhan S.**, Demirbaş Ş., “*Mikrodenetleyici Tabanlı Multimetre Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi*”, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 13-15 Mayıs 2009, Karabük/Türkiye
11. Demirbaş Ş., **Bayhan S.**, Mutlu G., “*Güç Elektronik Deneyleri İçin Bir Sanal Laboratuvar: DA/DA Çevirici Benzetimi*”, 1. Uluslararası, 5. Ulusal Meslek Yüksekokulları Sempozyumu, 27-29 Mayıs 2009, Konya/Türkiye
12. Demirbaş Ş., **Bayhan S.**, “*Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Gerçek Zamanlı Ölçüm ve Analizi*”, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi 24(3), 461-468, 2009.
13. Garip İ., **Bayhan S.**, Çolak İ., “*Alternatörlerin Paralel Bağlanma Şartlarından Gerilim Eşitliğinin Mikrodenetleyici İle Gerçekleştirilmesi*” e-Journal of New World Sciences Academy - Technological Applied Sciences, 4(4), 348 - 359, 2009.

14. Garip İ., **Bayhan S.**, Çolak İ., “*Senkronoskop Cihazının Mikrodenetleyici Tabanlı Olarak Gerçekleştirilmesi*” e-Journal of New World Sciences Academy - Engineering Sciences, 5(1), 55 - 63, 2010.
15. Sefa İ., Bayındır R., Garip İ., **Bayhan S.**, Çolak İ., “Generatörlerin Paralel Bağlanma Şartlarından Frekans ve Faz Açısı Eşitliğinin Mikrodenetleyici Tabanlı Olarak Sağlanması”, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 25(1), 39-48, 2010.
16. Bal G., **Bayhan S.**, “Internet Based Virtual Electric Machine Lab: Switched Reluctance Motor”, Application of Information and Communication Technologies-AICT2010, Uzbekistan, Taskent, 12-14 October 2010.
17. Demirbaş Ş., **Bayhan S.**, “Şebeke Bağlantısız Çift Beslemeli Asenkron Generatörün Doğrudan Gerilim Denetimi”, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ELECO 2010, 2-5 Aralık 2010, Bursa/Türkiye.
18. **Bayhan S.**, Garip İ., Beşirli M., “Mikrodenetleyici Tabanlı Fındık Taşıma Bandı Tasarımı ve Uygulaması”, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ELECO 2010, 2-5 Aralık 2010, Bursa/Türkiye.
19. Demirbaş Ş., **Bayhan S.**, “Yenilenebilir Enerji Kaynakları İçin DSP Tabanlı Üç Fazlı Şebeke Etkileşimli Evirici”, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(1), 21-33, 2011.
20. Demirbaş Ş., **Bayhan S.**, “Grid Synchronization of Doubly Fed Induction Generator in Wind Power Systems”, III. International Conference on Power Engineering Energy and Electrical Drives, POWERENG 2011, Malaga, Spain.
21. Çolak İ., Garip İ., Sağiroğlu Ş., **Bayhan S.**, “Remote Monitoring of the Load Characteristics of Synchronous Generators”, III. International Conference on Power Engineering Energy and Electrical Drives, POWERENG 2011, Malaga, Spain.
22. Demirbaş Ş., **Bayhan S.**, Garip İ., “Mikrodenetleyici Tabanlı İki Seviye DA/DA Alçaltan Dönüştürücü”, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey.
23. **Bayhan S.**, Demirbaş Ş., Garip İ., “Design and Implementation of DSP-Based Three-Phase PFC”, XXII International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies, 27-29 October 2011, Sarajevo, Bosnia&Herzegovina.