

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI



ŞEBEKE BAĞLANTILI RÜZGAR ENERJİ SİSTEMİNİN
MODELLENMESİ VE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUHAMMED DURAN YAZAR

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Erdal BEKİROĞLU

BOLU, TEMMUZ - 2023

KABUL VE ONAY SAYFASI

Muhammed Duran YAZAR tarafından hazırlanan “**Şebeke Bağlantılı Rüzgar Enerji Sisteminin Modellenmesi ve Analizi**” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliğiyle kabul edilmiştir. 6/07/2023

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Prof. Dr. Erdal BEKİROĞLU
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Prof. Dr. Erdal IRMAK
Gazi Üniversitesi

.....

Üye
Doç. Dr. Nihat DALDAL
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. İbrahim KÜRTÜL
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir,

aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Teze ilişkin 28/07/2023 tarihinde Turnitin adlı intihal tespit programından enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı %20 olarak tespit edilmiştir.

.....

MUHAMMED DURAN YAZAR

ÖZET

**ŞEBEKE BAĞLANTILI RÜZGAR ENERJİ SİSTEMİNİN
MODELLENMESİ VE ANALİZİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MUHAMMED DURAN YAZAR
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ERDAL BEKİROĞLU)**

BOLU, TEMMUZ - 2023

XV + 76

Bu tez çalışmasında, şebeke bağlantılı çift beslemeli asenkron jeneratör (ÇBAJ) tabanlı rüzgar enerji sistemi (RES) tasarlanmış, değişken rüzgar hızında performansı ve hata sonrası yeniden bağlanma (HSYB) kabiliyeti analiz edilmiştir. Öncelikle rotor tarafı dönüştürücüsüne (RTD) ve şebeke tarafı dönüştürücüsüne (ŞTD) PI denetleyici eklenerek sistemin değişken rüzgar hızındaki performansı incelenmiştir. Ardından RTD'ye maksimum güç noktası takibi (MGNT) denetleyici eklenerek sistemin performansı iyileştirilmiştir. Ayrıca tasarlanan sistemin şebekede meydana gelen simetrik ve asimetrik gerilim düşümleri sırasındaki HSYB kabiliyeti incelenmiştir. RTD'ye crowbar koruma devresi eklenerek, gerilim düşümünün neden olacağı aşırı akım ve aşırı gerilime karşı koruma sağlanmıştır. Crowbar koruma devresinin anahtarlama süresini iyileştirmek için bulanık mantık denetleyicisi (BMD) eklenmiştir. Bu sayede RES'in HSYB kabiliyeti iyileştirilmiştir. Rüzgar hız profili olarak Edremit/Balıkesir bölgesinin gerçek rüzgar verileri kullanılmıştır. Çalışmada türbin modeli olarak Nordex firmasının N90/2.5MW rüzgar türbin modelinin jeneratör parametreleri kullanılmıştır. Önerilen sistemin Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilen simülasyonlar sayesinde üretilen güç, DA bara gerilimi, tepki süresi, elektromanyetik tork, şebeke akımı, crowbar akımı ve terminal gerilimi değerleri elde edilmiştir. Benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında önerilen şebeke bağlantılı ÇBAJ tabanlı RES'in değişken rüzgar hızındaki performansı ve HSYB kabiliyeti açısından geçerli, uygulanabilir ve güvenilir olduğu görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELELER: Rüzgar Enerji Sistemi, Çift Beslemeli Asenkron Jeneratör, Hata Sonrası Yeniden Bağlanma, Gerilim Düşümü, Crowbar

ABSTRACT

MODELLING AND ANALYSIS OF GRID CONNECTED WIND ENERGY SYSTEM

MSC THESIS

MUHAMMED DURAN YAZAR

BOLU ABANT IZZET BAYSAL UNIVERSITY

INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. ERDAL BEKIROGLU)

BOLU, JULY 2023

XV + 76

In this thesis, a grid-connected doubly-fed induction generator (DFIG) based wind energy system (WES) was designed and performance of the designed system at variable wind speed and fault ride-through (FRT) capability were analysed. Firstly, a PI controller was applied to the rotor-side converter (RSC) and grid-side converter (GSC) of the designed system and the designed system was analysed at variable wind speed. Then, the performance of the system was improved by adding a maximum power point tracking (MPPT) controller to the RSC. In addition, the FRT capability of the proposed system was investigated during symmetrical and asymmetrical voltage dips in the grid. By adding a crowbar protection circuit to the RSC, the system components were protected against overcurrent and overvoltage caused by voltage dips. In order to improve the switching time of the crowbar protection circuit, a fuzzy logic controller (FLC) was implemented to the crowbar protection circuit. In this way, the FRT capability of the WES was improved. Real wind data of Edremit/Balıkesir region was used as wind speed profile. The generator parameters of Nordex N90/2.5MW wind turbine model were used as the turbine model. As a result of the simulation, the generated power, DC bus voltage, response time, electromagnetic torque, grid current, crowbar current and terminal voltage results were obtained. Additionally the results obtained from simulation were compared with related studies. The obtained results showed that the proposed system is valid, applicable, and reliable when compared to related studies from the viewpoint of performance under variable wind speeds and FRT capability of the system.

KEYWORDS: Wind Energy System, Doubly Fed Induction Generator, Fault Ride-Through, Voltage Dip, Crowbar

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL VE ONAY SAYFASI	iii
ETİK BEYAN.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
TABLO LİSTESİ	xi
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	xii
TEŞEKKÜR	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. RÜZGAR ENERJİ SİSTEMLERİ	6
2.1 Rüzgar Türbininin Aerodinamik Modeli	6
2.2 Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması.....	7
2.2.1 Sabit Hızlı Rüzgar Türbini	8
2.2.2 Değişken Hızlı Rüzgar Türbini	9
2.2.3 Çift Beslemeli Asenkron Jeneratörünü İçeren Değişken Hızlı Rüzgar Türbini	10
3. RÜZGAR ENERJİ SİSTEMLERİNDE KULLANILAN JENERATÖRLER.....	12
3.1 Asenkron Jeneratörler	12
3.1.1 Rotoru Sargılı Asenkron Jeneratörler	13
3.1.2 Sincap Kafesli Asenkron Jeneratör.....	14
3.2 Senkron Jeneratörler	15
3.2.1 Sabit Mıknatıslı Senkron Jeneratörler	15
3.2.2 Rotoru Sargılı Senkron Jeneratörler	15
4. TASARLANAN SİSTEMİN MATEMATİKSEL MODELİ	16
4.1 Referans Çerçevesi ve Dönüşümü	17
4.1.1 Clarke ($abc-a\beta$) Dönüşüm Matrisleri	18
4.1.2 Park ($abc-dq$) Dönüşüm Matrisleri.....	18
4.2 ÇBAJ'nin Dinamik Modeli	19
4.3 HSYB Kabiliyeti.....	22
4.3.1 Simetrik Gerilim Düşümü	24
4.3.2 Asimetrik Gerilim Düşümü	25
4.3.3 ÇBAJ Tabanlı RES'lerinde Kullanılan HSYB Yöntemleri.....	26
5. TASARLANAN SİSTEMİN SİMÜLASYONU	29
5.1 RES Kurulacak Yerin Seçimi	29
5.2 Çalışmada Kullanılacak Jeneratör	32

5.3 Rüzgar Türbini Modeli	34
5.4 Şebeke Senkronizasyon Kontrolü	34
5.5 PI Kontrol Parametrelerinin Belirlenmesi	37
5.6 Rotor Tarafı Dönüştürücünün Kontrolü	39
5.7 Şebeke Tarafı Dönüştürücünün Kontrolü	40
5.8 Rotor Tarafı Dönüştürücü için Önerilen Kontrol	41
5.9 Crowbar Koruma Devresi Kontrolü	43
5.10 Tasarlanan Sistemin Simülasyonu	44
5.10.1 Değişken Rüzgar Hızı Performansı	45
5.10.2 Tasarlanan Sistemin Gerilim Düşümü Sırasında Analizi	56
5.10.3 Simetrik Gerilim Düşümü	56
5.10.4 Asimetrik Gerilim Düşümü	62
6. SONUÇ	68
7. KAYNAKLAR	70



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Şebeke Bağlantılı RES.....	6
Şekil 2.2. Asenkron Jeneratörlü Sabit Hızlı Rüzgar Türbini	8
Şekil 2.3. Senkron/Asenkron Jeneratörlü Değişken Hızlı Rüzgar Türbini.....	9
Şekil 2.4. Senkron Jeneratörlü (SJ) Değişken Hızlı Doğrudan Tahrikli (dişlisiz) Rüzgar Türbini	9
Şekil 2.5. ÇBAJ Tabanlı Değişken Hızlı Rüzgar Türbini.....	10
Şekil 4.1. Şebeke bağlantılı ÇBAJ tabanlı RES.....	16
Şekil 4.2. $abc-\alpha\beta$ ve $abc-dq$ Eksen Dönüşümleri.....	18
Şekil 4.3. ÇBAJ'ün d ve q Ekseninde Eşdeğer Devresi	21
Şekil 4.4. HSYB Gereksinimleri için Genel Eğri Sınırları (61)	23
Şekil 5.1. Şebeke Bağlantılı Crowbar Korumalı ÇBAJ Tabanlı RES	29
Şekil 5.2. Balıkesir İli Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı Dağılımı (73).....	30
Şekil 5.3. Balıkesir İli Trafo Merkezleri ve Enerji Nakil Hatları (74).....	31
Şekil 5.4. Balıkesir İli Kapasite Faktörü Dağılımı (73)	32
Şekil 5.5. ÇBAJ'ün Güç Eğrisi	33
Şekil 5.6. Tasarlanan Rüzgar Türbin Modeli.....	34
Şekil 5.7. Şebeke Takip Kontrolü	35
Şekil 5.8. Şebeke Oluşturan Kontrol	36
Şekil 5.9. Rotor Tarafı Dönüştürücünün Vektör Kontrolü	39
Şekil 5.10. Şebeke Tarafı Dönüştürücünün Vektör Kontrolü.....	40
Şekil 5.11. Rotor Tarafı Açık Hesaplama Blok Diyagramı	41
Şekil 5.12. Rotor Tarafı Dönüştürücüye Uygulanan MGNT Kontrolcü	41
Şekil 5.13. Önerilen Rotor Tarafı Dönüştürücü Kontrolü	42
Şekil 5.14. Matlab/Simulinkte Oluşturulan MGNT Denetleyici	42
Şekil 5.15. Tasarlanan RES'nin Crowbar Koruma Devresi	43
Şekil 5.16. Matlab/Simulink'te Oluşturulan ÇBAJ Tabanlı RES.....	44
Şekil 5.17. Gerçek Rüzgar Profili (9.4 m/s ortalama hızda).....	46
Şekil 5.18. ÇBAJ Tarafından Üretilen Güç	46
Şekil 5.19. RES'nin DA Bara Gerilimi.....	47
Şekil 5.20. PI Denetleyicili RES'nin Şebeke Akımları	48
Şekil 5.21. Önerilen Denetleyicili RES'nin Şebeke Akımları.....	49
Şekil 5.22. ÇBAJ'ün Elektromanyetik Tork (T_{em}) Grafiği.....	50
Şekil 5.23. Gerçek Rüzgar Profili (12.15 m/s ortalama hızda).....	51
Şekil 5.24. ÇBAJ Tarafından Üretilen Güç	51
Şekil 5.25. RES'nin DA Bara Gerilimi.....	52
Şekil 5.26. PI Denetleyicili RES'nin Şebeke Akımları	53
Şekil 5.27. Önerilen Denetleyicili RES'nin Şebeke Akımları.....	54
Şekil 5.28. ÇBAJ'ün Elektromanyetik Tork (T_{em}) Grafiği.....	55
Şekil 5.29. Simetrik Gerilim Düşümünün Dalga Şekli.....	57
Şekil 5.30. Simetrik Gerilim Düşümü Altında V_{bus}	57
Şekil 5.31. BMD'li Sistemin Terminal Gerilimi	58
Şekil 5.32. BMD'siz Sistemin Terminal Gerilimi	59
Şekil 5.33. ÇBAJ'ün Elektromanyetik Tork Grafiği	60
Şekil 5.34. BMD'li Sistemin Şebeke Akımı.....	61
Şekil 5.35. BMD'siz Sistemin Şebeke Akımı.....	61

Şekil 5.36. Sistemin Crowbar Akımı	62
Şekil 5.37. Asimetrik Gerilim Düşümünün Dalga Şekli	63
Şekil 5.38. Asimetrik Gerilim Düşümü Altında V_{bus}	64
Şekil 5.39. ÇBAJ'ün Elektromanyetik Tork Grafiği	65
Şekil 5.40. Sistemin Crowbar Akımı	66



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 5.1. ÇBAJ parametreleri.....	33
Tablo 6.1. Karşılaştırma Sonuçları (20. saniyede)	56



KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

AYK	: Akı Yönelim Kontrolü
BMD	: Bulanık Mantık Denetleyici
ÇBAJ	: Çift Beslemeli Asenkron Jeneratör
ÇBAM	: Çift Beslemeli Asenkron Makine
DGK	: Doğrudan Güç Kontrolü
DOGK	: Dolaylı Güç Kontrolü
EKMK	: Entegre Kayan Mod Kontrolü
GKMEAK	: Geliştirilmiş Kayan Mod Ekstremum Arama Kontrolü
HSYB	: Hata Sonrası Yeniden Bağlanma
İYOO	: İstilacı Yabani Ot Optimizasyonu
KDPI	: Kesir Dereceli PI
KMT	: Kayan Mod Tekniği
MGNT	: Maksimum Güç Noktası Takibi
PSO	: Parçacık Solucan Optimizasyonu
RES	: Rüzgar Enerji Sistemi
RSAJ	: Rotoru Sargılı Asenkron Jeneratör
RSAM	: Rotoru Sargılı Asenkron Makine
RSSJ	: Rotoru Sargılı Senkron Jeneratör
RTD	: Rotor Tarafı Dönüştürücü
SKAJ	: Sincap Kafesli Asenkron Jeneratör
SMSJ	: Sabit Mıknatıslı Senkron Jeneratör
ŞTD	: Şebeke Tarafı Dönüştürücü
UVT	: Uzay Vektör Teorisi
VKY	: Vektör Kontrol Yöntemi
$\overrightarrow{I_{rn}}$	: Rotor Doğal Akımı
$\overrightarrow{\psi_{sn}}$	: Stator Doğal Akısı
R_r	: Rotor Sargı Direnci
R_s	: Stator Sargı Direnci
T_t	: Rotor Tarafından Üretilen Tork
A	: Kanatların Süpürme Alanı

C_p	: Güç Katsayısı
D_{t_m}	: Referans Tork
$I_{crowbar}$	: Crowbar Akımı
I_g	: Şebeke Akımı
K_{opt}	: Optimizasyon Sabiti
N	: Dişli Oranı
r	: Kanat Yarıçapı
$R_{crowbar}$	: Crowbar Akımı
$R_{rotor\ tarafi\ dönüştürücü}$	: Rotor tarafı Dönüştürücü Akımı
T_{em}	: Elektromanyetik Tork
T_{em}^*	: Referans Tork
v	: Rüzgar Hızı
V_{bus}	: DA Bara Gerilimi
$V_{r,max}$	: RTD'nün Maksimum Çıkış Gerilimi
$V_{terminal}$	: Terminal Gerilimi
λ	: Uç Hız Oranı
L_g	: Şebekenin Hat Endüktansı
L_m	: Mıknatıslanma Endüktansı
$L_{r\sigma}$	: Rotor Kaçak Endüktansı
L_{si}	: Stator Kaçak Endüktansı
$L_{s\sigma}$	: Stator Kaçak Endüktansı
V_{gd}	: d Eksenine İndirgenmiş Şebeke Gerilimi
V_{gq}	: q Eksenine İndirgenmiş Şebeke Gerilimi
V_{qr}	: q Eksenine İndirgenmiş Rotor Gerilimi
V_{qs}	: q Eksenine İndirgenmiş Stator Gerilimi
V_{dr}	: d Eksenine İndirgenmiş Rotor Gerilimi
V_{ds}	: d Eksenine İndirgenmiş Stator Gerilimi
i_{gq}	: q Eksenine İndirgenmiş Şebeke Akımı
i_{gd}	: d Eksenine İndirgenmiş Şebeke Akımı
i_{rq}	: q Eksenine İndirgenmiş Rotor Akımı
i_{rd}	: d Eksenine İndirgenmiş Rotor Akımı
i_{sq}	: q Eksenine İndirgenmiş Stator Akımı
i_{sd}	: d Eksenine İndirgenmiş Stator Akımı

P	: Rotor Tarafından Üretilen Güç
ψ_{qr}	: q Eksenine İndirgenmiş Rotor Akısı
ψ_{qs}	: q Eksenine İndirgenmiş stator Akısı
ψ_{dr}	: d Eksenine İndirgenmiş Rotor Akısı
ψ_{ds}	: d Eksenine İndirgenmiş Stator Akısı
ω_r	: Rotor Elektriksel Hızları
ω_s	: Stator Elektriksel Hızları
ρ	: Hava Yoğunluğu



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez sürecim boyunca desteğini esirgemeyen, akademik gelişimim için mesleki bilgi, birikim ve tecrübeleriyle; gerekse insani vasıflarıyla yol gösterici olan, motivasyonumu yüksek tutmama yardımcı olan değerli danışmanım Prof. Dr. Erdal BEKİROĞLU'na derin minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tez çalışmamın nihai haline ulaşmasında değerli yorum ve katkılarını esirgemeyen Prof. Dr. Erdal IRMAK ve Doç. Dr. Nihat DALDAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecim boyunca her koşulda benden desteğini esirgemeyen, yoğun çalıştığım zamanlarda sabırla bana yardımcı olan sevgili eşim Hande YAZAR'a çok teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi yaşam koşullarının iyileştirilmesi, endüstriyel faaliyetlerin gelişimi ve insan toplumunun gelişimi açısından temel bir faktördür. Kullanım esnekliği ve faaliyet alanlarının çokluğu sayesinde günümüz dünyasında vazgeçilmez bir enerji formu haline gelmiştir (1). Yıllar geçtikçe elektrik enerjisinin üretim yöntemleri çeşitlenmiştir. Bu süreçte yenilenebilir enerji (rüzgar, güneş vb.) dönüşümüne dayalı üretim yöntemlerinin genel üretimdeki payı çevresel kaygılar, küresel ısınmanın kritik seviyelere ulaşması, kurulum maliyetlerinin düşmesi ve üretim kapasitesinin artması gibi sebeplere bağlı olarak giderek artmıştır (2). Bu yenilenebilir enerji kaynakları arasında RES en hızlı büyüyen dönüşüm sistemidir. Son yıllarda türbin ve diğer sistem parçalarının üretim maliyetleri ciddi oranda azalırken üretim süreci hızlanmıştır. Bu olumlu gelişmeler RES'ne olan ilgiyi artırmıştır (3).

RES'lerinin mevcut güç sistemindeki artan payı, yeni fırsat ve zorlukları da beraberinde getirmiştir. Bu sistemlerin en önemli zorluklarından biri, sistemin değişken rüzgar hızı koşullarında istenen gücü üretmesini ve rüzgar hızı değişikliklerine hızlı tepki verebilmesini sağlamaktır. Bu zorluğa çözüm üretmek amacıyla literatürde arka arkaya bağlı ŞTD ve RTD'ye çeşitli kontrol stratejileri uygulanmıştır. RES'lerinin bir diğer önemli zorluğu ise şebeke arızaları altında sistemin sürdürülebilirliğidir. Sistem bileşenlerinin uzun ömürlülüğü ve sürdürülebilirliği için, simetrik/asimetrik gerilim düşüşleri sırasında sistemin HSYN kabiliyetlerinin artırılması çok önemlidir. RES, şebeke arızalarında şebekeye bağlı kalmalıdır. Aksi takdirde, rüzgar enerjisi üretiminin kesintiye uğraması, şebeke tarafında şebeke arızasının yol açtığı sonuçları daha olumsuz hale getirebilir (4), (5).

Literatürde bu sorunlara çözüm getirmek amacıyla yayınlanmış birçok çalışma vardır. MGNT algoritmaları iki ana bölüme ayrılabilir: doğrudan güç kontrolü (DGK) ve dolaylı güç kontrolü (DOGK). DOGK tekniğinde rüzgar hızı grafikleri vasıtasıyla üretilen güç önceden hesaplanırken, DGK'de rüzgar türbininin maksimum güç noktasında üretebilmesi için elektrik gücü doğrudan incelenir (6), (7). Diğer bir çalışmada ise, önerilen sistem tasarlanırken DOGK yöntemi kullanılmıştır. DGK teknikleri, farklı testler için Matlab/Simulink

üzerinde ÇBAG tabanlı RES'ne uygulanmıştır. Simülasyon sonuçları, sistemin sağlamlığının ve yanıt süresinin iyileştirildiğini göstermektedir (8). Chhipa ve ark. uyarlanabilir nöro-bulanık çıkarım yöntemi tabanlı MGNT kontrolü, rüzgar enerjisi dönüştürme sistemine eklemiş ve test sonuçlarını geleneksel PI denetleyicisi ile karşılaştırmıştır (9). Mahvash ve ark. kesir dereceli PI denetleyici (KDPI) tekniğini, 18 m/s'lik rüzgar hızında ÇBAJ kapasitesini artırmak amacıyla kanat eğim açısının kontrolü için uygulamıştır (10). Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinin kontrolünde yaygın olarak kullanılan bir diğer teknik ise kayan mod tekniğidir. Sistem parametrelerindeki değişikliklere ve harici bozulmalardaki sınırlı değişikliklere karşı dayanıklıdır. Bu nedenle, sincap kafesli endüksiyon jeneratörleri ile rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinde yaygın olarak uygulanmaktadır. Zribi ve ark. tarafından önerilen sistem MATLAB/Simulink ortamında oluşturularak test edilmiştir (11). Hu ve ark. geliştirilmiş bir kayan mod ekstremum arama kontrolü (GKMEAK) parametreleri üretmek için gelişmiş bir istilacı yabancı ot optimizasyonu (İYOO) sunmuştur. Teknik, sağlamlığını artırmak ve kodlama aşamasını ıslah etmek için yeni bir stokastik üreme stratejisi geliştirilmiştir (12). Yasmine ve ark. ÇBAJ'ün arka arkaya dönüştürücülerini, Matlab/Simulink ortamında bir PI denetleyicisi ve kayan mod tekniği (KMT) kullanılarak akı yönelimli kontrol (AYK) tarafından kontrol etmiştir. İki teknik, şebekeye iletilen güç ve sistem tarafından üretilen güç açısından karşılaştırılmıştır (13). Saravanakumar ve ark. başka bir çalışmada düşük seviyeli rüzgar hızı koşulları için entegre kayan mod kontrolü (EKMK) uygulamış, yüksek seviyeli rüzgar hızı koşulları için bir PI kontrolü uygulanmış ve analiz yapmıştır (14). Dahbi ve ark. değişken hızlı rüzgar türbin sistemi için entegre MGNT-eğim açısı kontrol algoritması gerçekleştirmiştir. Geliştirilen sistemin doğruluğu Matlab/Simulink ortamında simülasyon sonuçları ile doğrulanmıştır (15). Karasis ve ark. ÇBAJ'e sahip bir rüzgar sistemi için optimum verimlilik kontrol şeması önermektedir. Önerilen kontrol şeması, ÇBAJ'deki kayıp minimizasyonu ile rüzgar türbinindeki MGNT birleştirir ve böylece aynı rüzgar enerjisi potansiyeli ile maksimum elektrik enerjisi üretimi elde edilir. ÇBAJ'e sahip bir rüzgar sistem için optimum verimlilik kontrol şeması önermiştir. Önerilen kontrol şeması, ÇBAJ'deki kayıp minimizasyonu ile rüzgar türbinindeki maksimum güç noktası takibini (MGNT) birleştirmiş ve böylece aynı rüzgar enerjisi potansiyeli ile maksimum elektrik enerjisi üretimi elde edilmiştir (16). Benzouaoui ve ark. stator

aktif ve reaktif gücü için gerilim vektörlerini senkronize bir şekilde seçmek için iki maliyet fonksiyonunu en aza indirerek ÇBAJ tabanlı model öngörücü doğrudan güç kontrolünün yeni bir doğrudan güç kontrolü (DGK) yaklaşımı geliştirilmiştir (17). Naik ve ark. ÇBAJ'ün rotor tarafı dönüştürücüsünün tork ve gerilim kontrol döngüleri için gelişmiş bir aralıklı tip-2 bulanık mantık PI denetleyici önermiştir (18). Chojaa ve ark. çift beslemeli asenkron jeneratör (ÇBAJ) tabanlı bir rüzgar türbininin aktif ve reaktif güçlerini kontrol etmek ve rüzgar hızı değişimine göre yüksek dinamik performanslar sağlamak için Lyapunov fonksiyonlu sağlam bir entegre kayan kipli kontrol (EKKK) önermiştir (19). Qouarti ve ark. Hem parçacık solucan optimizasyonu (PSO) hem de süper büküm algoritmasının ayrı ayrı kombinasyonun şebekeye bağlı bir rüzgar türbini jeneratörünün performansları üzerindeki etkisini göstermek ve vurgulamak amacıyla normal ve anormal koşullar altında farklı kontrol senaryoları için karşılaştırmalı bir çalışma yapmıştır (20). Ananth ve ark. ÇBAJ tabanlı RES'nin rotor ve stator gerilimleri, rotor hızı ve tork değerleri, maksimum uç hız oranına göre MGNT denetleyici ile dengelenmiştir. Sistemin değişken hızlara ve reaktif güç değişimine tepkisi incelenmiştir (21). Ebrahimkhani ÇBAJ tabanlı rüzgar enerjisi dönüştürme sisteminin MGNT kontrolü için yeni bir sağlam kesirli sıralı kayan kipli (KSKK) denetleyici önermektedir. Kontrol sisteminin sağlamlığını artırmak için, belirsizlikler ve bozulmalar kesirli bir belirsizlik tahmincisi kullanılarak tahmin edilir (22).

RES uygulamalarında, crowbar devreleri tipik olarak güç dönüştürücülerin şebeke gerilimi düşüşlerinden kaynaklanan aşırı akım ve aşırı gerilimden korunması için kullanılır (23). Bu alanda birçok yeni çalışma yayınlanmıştır ve önerilen çözümler, kontrol geliştirmeleri ve donanım çözümleri olmak üzere iki ana yöntem olarak kategorize edilebilir. Tohidi ve ark. literatürde önerilen çözüm yaklaşımının temel özelliklerini değerlendirmiştir (24). Yaklaşımlar arasında crowbar devresi, kolay uygulanabilirliği ve teknolojik basitliği avantajları ile RTD'yü korumak ve RES'ni şebekeye bağlı tutmak için endüstriyel uygulamalarda en çok kullanılan çözüm yöntemidir (25), (26), (27), (28). Gencer, 3 fazlı bir şebeke arızası altında RES'nin HSYB performansını geliştirmek için makine öğrenimini kullanan yeni bir kontrol algoritması sunmuştur (29). Sahoo ve ark. tasarlanan RES'nin HSYB kapasitesini artırmak için bir seri dinamik direnç ve jeneratörün rotor tarafında süper kapasitör enerji deposundan oluşan bir kontrol

şeması önerilmiştir (30). Mohammadi ve ark. ÇBAJ'ün rotor tarafında uygulanan Dirençli Tip Süperiletken Arıza Akım Sınırlayıcılarının performansı ile sistemin HSYB kapasitesini iyileştirmek için bir levye arasında karşılaştırmalı testler yapmayı amaçlamıştır (31). Bellmunt ve ark. simetrik olmayan gerilim düşüşlerinin üstesinden gelmek için ÇBAJ kontrolünü incelemiştir. Pozitif ve negatif dizilerde belirli akım referans değerleri seçilerek bir kontrol stratejisi önerilmiştir, böylece bu tür dengesiz sarkmalar sırasında tork ve dc gerilimi sabit tutulmuştur (32). Falehi ÇBAJ tabanlı RES için maksimum gücü elde etmek ve HSYB yeteneğini geliştirmek amacıyla yeni bir Sağlam Pertürbasyon Gözlemcisi tabanlı Kesir Sıralı Kayan Mod Denetleyicisi önermiştir (33). Döşoğlu bir ÇBAJ'de simetrik ve asimetrik arızalara karşı HSYB kabiliyeti için bir levye devresi geliştirmiştir. Stator ve rotor dinamik modellemesi, rotor aktif empedansı olan bir levye devresi tasarımı kullanmıştır (34). Döşoğlu önerilen çeşitli kontrol stratejilerinde, ÇBAJ'lerde rotor devrelerindeki yeni akı modelleri ve elektromotor kuvveti gerilimi geliştirilmiştir. ÇBAJ'deki gerilim düşüşleri sırasındaki dinamik davranışlar, sistemin manyetikliği giderici akım kontrol modeli iyileştirmesi yoluyla incelenmiştir (35), (36). Ling bu makalede, üç geniş alt kategoriye dayalı olarak çift beslemeli asenkron jeneratör rüzgar türbini için arıza giderme teknikleri üzerine kapsamlı bir karşılaştırmalı çalışma sunulmaktadır: kontrol algoritmaları, ek donanım devresi ve birleşik yaklaşımlar. Ayrıca, bu yöntemlerin HSYB kabiliyetinin farklı özellikleri üzerine bir tartışma yapılmış ve farklı şemaların performansını göstermek için bir durum çalışması gerçekleştirilmiştir (37).

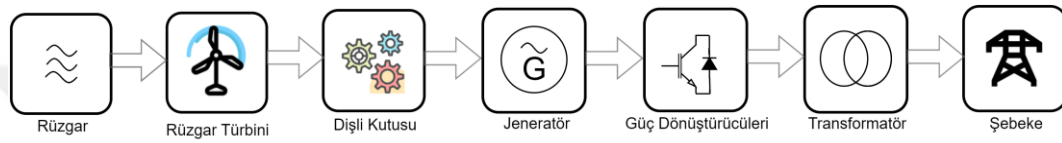
Bu tez çalışmasında, şebeke bağlantılı ÇBAJ tabanlı RES Matlab/Simulink ortamında tasarlanmış ve tasarım aşamaları ayrıntılı şekilde sunulmuştur. Tasarlanan sistemin değişken rüzgar hızına karşı tepki süresinin iyileştirilmesi ve HSYB kabiliyetinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Sistem tasarlanırken REPA raporları incelenerek seçilen bölge için en uygun rüzgar türbini modeli belirlenmiş ve bu türbine ait parametreler kullanılmıştır. Ayrıca seçilen bölgenin gerçekçi rüzgar hız verilerinden yararlanılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, tasarlanan sistemde RTD ve ŞTD için geleneksel PI denetleyici kullanılarak değişken rüzgar hızı altında performans analizi yapılmıştır. Daha sonra, RTD'ye MGNT denetleyici eklenerek sistemin performansı iyileştirilmiştir. Bu sayede seçilen

bölgenin gerçek rüzgar hızları altında sistem, güç eğrisiyle uyumlu çalışabilmiş ve değişken rüzgar hızına hızlı bir şekilde tepki verebilme kabiliyeti artırılmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında ise, sistemin şebeke arızalarından etkilenme durumunda analizi gerçekleştirilmiştir. Simetrik ve asimetrik gerilim düşüşleri durumunda ÇBAJ'nin HSYB kabiliyetini artırmak amacıyla bir BMD tabanlı crowbar koruma devresi tasarlanmıştır. Öncelikle, geleneksel crowbar devresi kullanılarak sistemin şebeke arızaları altındaki davranışı analiz edilmiştir. Daha sonra, crowbar koruma devresine BMD eklenerek analizler tekrarlanmıştır. Her iki analizden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Önerilen ÇBAJ tabanlı RES'nden değişken rüzgar hızları ve simetrik/asimetrik gerilim düşümleri altında elde edilen sonuçlar incelendiğinde amaçlanan performans kriterlerini sağladığı ortaya konmuştur.

Tezin birinci bölümünde tezin amacı, ana motivasyonu ve literatür özetine yer verilmiştir. İkinci bölümde RES'lerinin aerodinamik modelinin yanında RES'lerinin sınıflandırılması konusundan bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde RES'lerinde kullanılan jeneratörler avantaj ve dezavantajlarıyla ele alınmıştır. Dördüncü bölümde sistemin matematiksel modelinin oluşturulması ve HSYB kabiliyetinin açıklamasına yer verilmiştir. Beşinci bölümde tasarlanan sistemin simülasyon ortamında oluşturulma aşamalarından detaylı olarak bahsedilmiş ayrıca elde edilen sonuçlar hakkında ayrıntılı yorumlara yer verilmiştir. Altıncı bölümde çalışmanın literatüre katkısı ve elde edilen sonuçlar detaylı olarak değerlendirilmiştir.

2. RÜZGAR ENERJİ SİSTEMLERİ

RES'de, rüzgardan elektrik enerjisi üretmek için bir rüzgar türbini ve bir elektrik jeneratörü kullanılır. Ana taşıyıcı ve rüzgar türbini doğrudan veya bir dişli kutusu konfigürasyonu aracılığıyla bağlanabilir. Jeneratörün rotorunun şaftı, ana hareket ettiricinin bağlı olduğu yerdir ve stator, uygun bir güç elektroniği arabirimi aracılığıyla bağımsız yüklere veya şebeke şebekesine bağlanır (38). Şekil 2.1, şebekeye bağlı tipik bir RES'nin blok diyagramını göstermektedir.



Şekil 2.1. Şebeke Bağlantılı RES

Jeneratörün ürettiği elektrik enerjisi, güç elektroniği elemanları tarafından kontrol edilir. Daha sonra transformatörler kullanılarak istenilen gerilim değerine yükseltilir ve iletim hatları yardımıyla şebekeye iletilir.

2.1 Rüzgar Türbininin Aerodinamik Modeli

Rüzgar türbininin aerodinamik modeli, rotor tarafından üretilen gücü ve kanatlar üzerindeki hava akışının bir fonksiyonu olan mekanik torkun hesaplanmasını temsil eder. Rüzgarın mekanik enerjisi rüzgar türbinleri tarafından torka dönüştürülür. Kinetik enerjinin büyüklüğü hava yoğunluğuna ve rüzgar hızına bağlıdır. Rotor tarafından üretilen tork ve güç denklem (2.1-2.2)'deki gibi ifade edilebilir (39).

$$T_t = \rho \pi R^3 V_v^2 C_t / 2 \quad (2.1)$$

$$P = \rho C_p A V^3 \quad (2.2)$$

Uç hız oranı denklem (2.3) gibi ifade edilebilir (40):

$$\lambda = R\omega_t/V_v \quad (2.3)$$

Denklem 2.2 ve 2.3 birlikte yazılırsa. Denklem (2.4) elde edilir.

$$P = \rho C_p(\lambda) A(R/\lambda)^3 \omega^3 \quad (2.4)$$

Güç katsayısı (C_p), rüzgar türbini tarafından mekanik enerjiye dönüştürülen kinetik enerjinin oranını temsil eder. Bu oran, uç hız oranının (λ) bir fonksiyonudur ve türbin sistemleri için kanat açısına bağlıdır. Burada ρ hava yoğunluğudur (kg/m^3), v rüzgar hızıdır (m/s). A rotor süpürme alanıdır (m^2) ve r kanat yarıçapıdır (m). Hava yoğunluğu sıcaklığa, neme ve yüksekliğe bağlıdır. Hava, deniz seviyesinde $15^\circ C$ 'de tipik olarak $1.225 kg/m^3$ yoğunluğa sahiptir. Aerodinamik dönüşüm kayıpları, mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi sırasında önemlidir.

2.2 Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması

Rüzgar türbinleri, sabit hızla (yaklaşık %1 hız aralığında) veya değişken hızla çalışabilir. Sabit hızlı rüzgar türbinleri için jeneratör doğrudan şebekeye bağlıdır. Hız neredeyse şebeke frekansına sabitlendiğinden ve kontrol edilemediğinden, rüzgarın türbülansını dönme enerjisi şeklinde depolamak mümkün değildir. Bu nedenle, sabit hızlı bir sistem için rüzgarın türbülansı güç değişimlerine neden olacak ve böylece şebekenin güç kalitesini etkileyecektir (41). Değişken hızlı bir rüzgar türbini için jeneratör, rotor hızını kontrol etmeyi mümkün kılan güç elektroniği ekipmanı tarafından kontrol edilir. Bu şekilde, rüzgar değişimlerinden kaynaklanan güç dalgalanmaları, rotor hızı değiştirilerek aşağı yukarı emilebilir ve böylece rüzgar dönüşümünden ve aktarma organlarından kaynaklanan güç değişimleri azaltılabilir (42). Dolayısıyla, rüzgar türbininin neden olduğu güç kalitesi etkisi, sabit hızlı bir türbine kıyasla iyileştirilebilir.

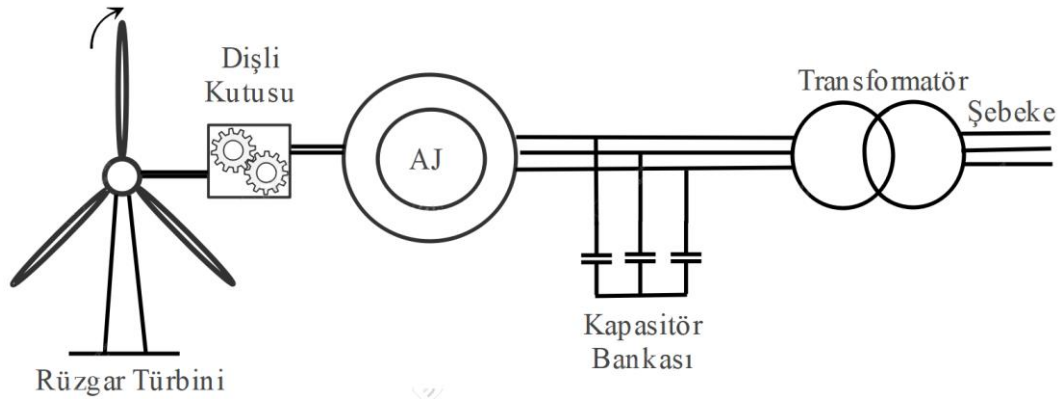
Bir rüzgar türbininin dönme hızı oldukça düşüktür ve bu nedenle elektrik frekansına göre ayarlanması gerekir. Bu iki şekilde yapılabilir: bir dişli kutusuyla veya jeneratörün kutup çifti sayısı ile. Kutup çiftlerinin sayısı, elektrik frekansına göre jeneratörün mekanik hızını ayarlar ve dişli kutusu, türbinin rotor hızını

jeneratörün mekanik hızına göre ayarlar. Rüzgar türbinleri çalışma prensiplerine göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (43).

- Asenkron jeneratörlü sabit hızlı rüzgar türbini.
- Sincap kafesli ya da senkron jeneratörlü değişken hızlı rüzgar türbini
- Çok kutuplu senkron jeneratör veya çok kutuplu sabit mıknatıslı senkron jeneratör ile donatılmış değişken hızlı rüzgar türbini
- Çift beslemeli asenkron jeneratörü ile donatılmış değişken hızlı rüzgar türbini

2.2.1 Sabit Hızlı Rüzgar Türbini

Sabit hızlı rüzgar türbini için endüksiyon jeneratörü, Şekil 2.2'de görüldüğü gibi doğrudan elektrik şebekesine bağlanır.

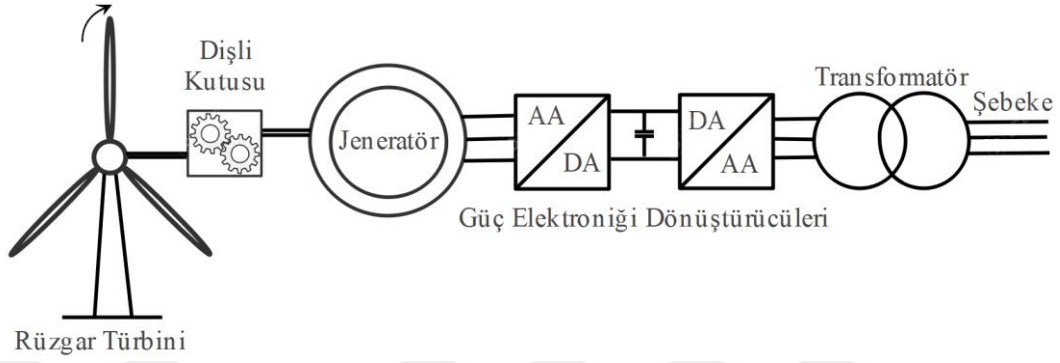


Şekil 2.2. Asenkron Jeneratörlü Sabit Hızlı Rüzgar Türbini

Sabit hızlı rüzgar türbininin rotor hızı prensip olarak bir dişli kutusu ve jeneratörün kutup çifti sayısı tarafından belirlenir. Sabit hızlı rüzgar türbini sistemi genellikle iki sabit hıza sahiptir. Bu, farklı değerlere ve kutup çiftlerine sahip iki jeneratör kullanılarak gerçekleştirilir veya farklı değerlere ve kutup çiftlerine sahip iki sargılı bir jeneratör olabilir. Bu, aerodinamik yakalamanın artmasına ve düşük rüzgar hızlarında mıknatıslanma kayıplarının azalmasına yol açar. Bu sistem, 1980'lerde ve 1990'larda birçok Danimarkalı üretici tarafından kullanılan "geleneksel" konseptti (43).

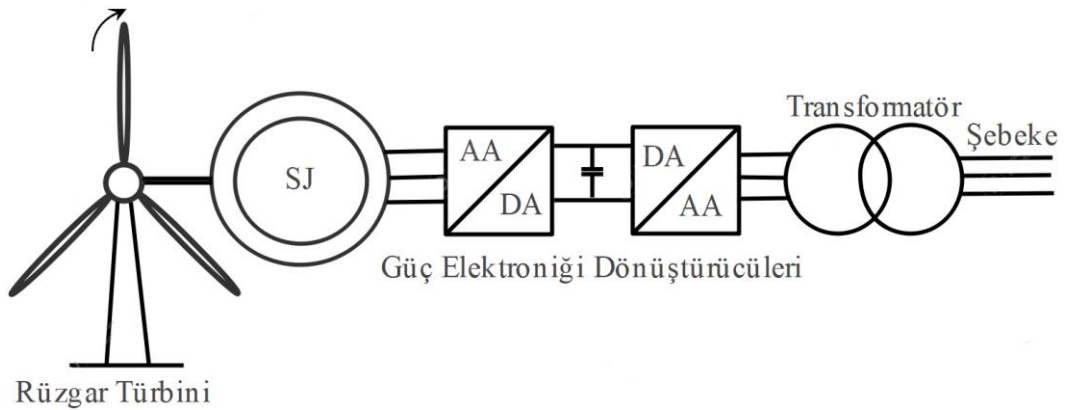
2.2.2 Değişken Hızlı Rüzgar Türbini

Şekil 2.3'te sunulan sistem, jeneratör statoruna bağlı bir dönüştürücü ile donatılmış bir rüzgar türbininden oluşur.



Şekil 2.3. Senkron/Asenkron Jeneratörlü Değişken Hızlı Rüzgar Türbini

Jeneratör, sincap kafesli asenkron jeneratörü veya senkron jeneratör olabilir. Dişli kutusu, maksimum rotor hızı jeneratörün nominal hızına karşılık gelecek şekilde tasarlanmıştır. Senkron jeneratörler veya sabit mıknatıslı senkron jeneratörler, Şekil 2.4'te görüldüğü gibi dişli kutusuna ihtiyaç olmadığı anlamına gelen çok kutuplu olarak tasarlanabilir.

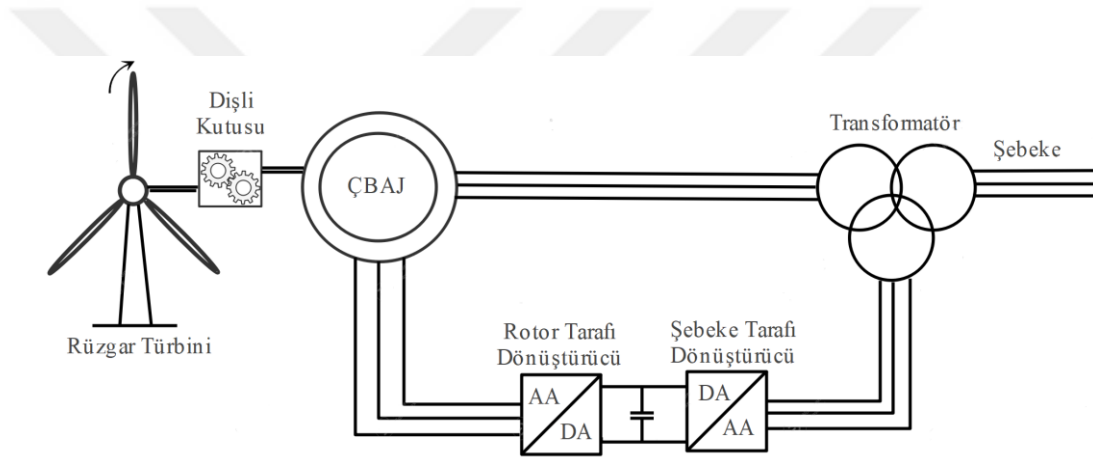


Şekil 2.4. Senkron Jeneratörlü (SJ) Değişken Hızlı Doğrudan Tahrikli (dişlisiz) Rüzgar Türbini

Bu "tam güç" dönüştürücü/jeneratör sistemi diğer uygulamalar için yaygın olarak kullanıldığından, bu sistemin bir avantajı iyi gelişmiş ve sağlam kontrolüdür. Bir rüzgar türbini jeneratörü olarak çok kutuplu bir senkron jeneratör, Enercon tarafından başarıyla üretilmiştir.

2.2.3 Çift Beslemeli Asenkron Jeneratörünü İçeren Değişken Hızlı Rüzgar Türbini

Çift beslemeli asenkron jeneratör tabanlı bir RES Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. ÇBAJ Tabanlı Değişken Hızlı Rüzgar Türbini

Stator doğrudan şebekeye bağlı olduğu, rotor sargısının ise kayma halkaları aracılığıyla bir dönüştürücüye bağlı olduğu anlamına gelir. Bu sistem son zamanlarda değişken hızlı rüzgar türbinleri için jeneratörler olarak çok popüler hale geldi. Bunun başlıca nedeni, güç elektroniği dönüştürücünün toplam gücün yalnızca bir kısmını (%20-30) işlemek zorunda olmasıdır (44). Bu nedenle, güç elektroniği dönüştürücüsündeki kayıplar, dönüştürücünün toplam gücü işlemek zorunda olduğu bir sisteme kıyasla azaltılabilir. Ayrıca dönüştürücünün maliyeti de düşer.

ÇBAJ yönteminin kontrol edilebilir harici rotor dirençlerini kullanan bir çeşidi vardır. Bu yöntemin dezavantajlarından bazıları, dış rotor dirençlerinde

gereksiz enerji harcanması ve reaktif gücün kontrol edilmesinin mümkün olmamasıdır. BAJ tabanlı rüzgar türbini reticileri Nordex, DeWind, GEWind Energy ve Vestas şeklinde sıralanabilir.



3. RÜZGAR ENERJİ SİSTEMLERİNDE KULLANILAN JENERATÖRLER

Rüzgar türbinlerinin mekanik enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren en önemli bileşenleri olan generatörler, doğru akım (DA) makinelerinin başlangıçtaki kullanımına rağmen, ilerleyen teknoloji ile birlikte sağladıkları avantajların dezavantajlara dönüşmesi nedeniyle alternatif akım (AA) generatörlere doğru kaymıştır. Bu sektördeki en önemli faktörlerden biri olan maliyet ve bakım ihtiyacı, bu geçişi etkilemiştir (45)-(46). Son dönemde rüzgar enerjisinde yaygın olarak kullanılan generatörler aşağıda sıralanmıştır.

- Asenkron jeneratörler
 - Rotoru sargılı asenkron jeneratörler (RSAJ) (Çift beslemeli asenkron jeneratörler, OptiSlip asenkron jeneratörler)
 - Sincap kafesli asenkron jeneratörler (SKAJ)
- Senkron jeneratörler
 - Sabit mıknatıslı senkron jeneratörler
 - Rotoru sargılı senkron jeneratörler

3.1 Asenkron Jeneratörler

Rüzgar enerji sistemleri uygulamalarında, SKAJ ve RSAJ olmak üzere iki grup asenkron jeneratör kullanılmaktadır. Bu generatörler, indüksiyon generatörleri olarak da bilinirler ve düşük maliyetleri, aşırı yük ve kısa devrelere karşı sağlamlıkları ve basit yapıları nedeniyle oldukça tercih edilmektedir (45).

Asenkron generatörler, başlangıçta reaktif güce ihtiyaç duyarlar. Bu reaktif güç, şebeke bağlantısı varsa şebekeden, yoksa kapasitör bankalarından temin edilebilir. Generatörler başlangıçta nominal akımdan çok daha yüksek akımlar çekerler ve bu akımlar, hem generatöre hem de sisteme zarar verebilir. Bu nedenle, bu akımlar sınırlandırılmalıdır. Yüksek teknolojiye güç elektroniği ekipmanları kullanılarak, uyarma akımı kontrol edilerek sistemin kararlılığı sağlanır.

3.1.1 Rotoru Sargılı Asenkron Jeneratörler

RSAJ, değişken rüzgar hızlarında kullanılabildiği için, rüzgâr enerjisi uygulamalarında günümüzde de genellikle tercih edilen bir generatördür. Bu generatör, sincap kafesli asenkron generatörden farklı olarak rotorunda sargılar içerir. OptiSlip® generatörler ve çift beslemeli asenkron generatörler, bu generatör tipi içinde literatürde yer almaktadır.

3.1.1.1 OPTİSLİP® JENERATÖRLER

OptiSlip® generatörler sektörün önde gelen türbin üreticilerinden biri olan Vestas tarafından 1990'lı yıllarda piyasaya sürülerek kullanılmaya başlanmıştır. Bu jeneratörler sınırlı bir değişken hız kontrolüne imkan sağlar. Ayrıca değişken rotor direncine sahiptir. Rotor sargıları direnç devresi yardımıyla şebekeye bağlanırken seri olarak kontrol edilebilme imkanına sahiptir. Reaktif güç kompanzasyonunu gerçekleştirebilmek için şönt bağlı bir kapasitör bankası yer alır. Bu jeneratörü diğerlerinden ayıran özellik, rotor şaftına monte edilmiş bir dönüştürücü tarafından optik olarak kontrol edilen değişken bir ek rotor direncine sahip olmasıdır. Bu sayede toplam rotor direnci kontrol edilebilir. Bu optik bağlantı sayesinde, bakım gerektiren pahalı kayma halkaları ve fırçalara ihtiyaç duyulmaz. Sistemin bakım maliyeti azaltılmış olur. Sistemdeki güç çıkışı, rotor direncinin ve dolayısıyla kayma miktarının değiştirilmesiyle kontrol edilir. Dinamik hız kontrol aralığı, değişken rotor direncinin boyutuna bağlıdır ve tipik olarak senkron hızın %0-10 üzerinde olacak şekilde ayarlanır. Değişken dirençler, değişen rüzgar hızlarında sistemi kontrol etmek için kullanılır ve genellikle senkron hızın %0-10 aralığındadır (47).

3.1.1.2 ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON JENERATÖRLER

ÇBAJ, rüzgar enerji sistemleri uygulamalarında en popüler jeneratör tiplerinden biridir. Çift beslemeli olarak adlandırılır, çünkü hem rotor hem de stator sargılarından enerji akışı sağlar. Stator sargıları doğrudan şebekeye bağlıyken, rotor sargıları bir dönüştürücü aracılığıyla şebekeye bağlanır. Rotor tarafı dönüştürücü sayesinde geniş bir rüzgar hızı aralığında çalışabilmesi, verimli bir generatör kontrolü ve düşük maliyet gibi temel avantajlara sahip olmasına rağmen, sınırlı reaktif güç kontrolü ve periyodik bakım gerektiren fırça ve bilezik düzenekleri nedeniyle bazı dezavantajları bulunmaktadır.

ÇBAJ'lerin senkron jeneratörlere göre birkaç avantajı bulunmaktadır. Bunlar arasında, daha düşük dönüştürücü maliyeti gelmektedir. Bunun sebebi, sadece toplam gücün %25'i için dönüştürücü kullanılmasıdır. Dolayısıyla, inverter maliyeti senkron jeneratörlere göre daha düşüktür. Ayrıca, sistemde kullanılan filtrelerin maliyeti de azdır. Çünkü filtreler, toplam sistem gücünün sadece %0,25'ine ihtiyaç duyulması nedeniyle daha azdır. Bir başka avantajı ise, çift beslemeli asenkron jeneratörlerin harici bozucu etkilere karşı daha dayanıklı ve kararlı olmasıdır. Bu avantajlar, çift beslemeli asenkron jeneratörlerin senkron jeneratörlere göre tercih edilmesine neden olabilir (48).

3.1.2 Sincap Kafesli Asenkron Jeneratör

Sincap kafesli asenkron jeneratörler, sabit hızlı veya değişken hızlı uygulamalarda kullanılabilirler. Manyetik gürültüyü azaltmak için rotor çubukları, mil ile belli bir açı yapacak şekilde ayarlanmıştır. Bu, aynı zamanda iyi bir kalkınma momenti elde etmek için de önemlidir. Sincap kafesli asenkron jeneratörler, sağlam ve ekonomik bir seçenektir. Bu jeneratörler, düşük maliyetli, basit ve dayanıklı yapıya sahiptirler. Ayrıca, harici bir uyarıcı cihaza ihtiyaç duymadan makineyi uyarma özelliğine sahiptirler ve düşük bakım gereksinimleri vardır.

Ancak, rotorlarında sargılar olmadığı için, generatörü uyuracak bir devreleri yoktur ve ihtiyaç duyulan reaktif güç dışarıdan sağlanır. Jeneratör, çalışma durumunda şebekeye reaktif güç veremez ve bu nedenle bu güç paralel bağlı kapasitörlerden veya şebekeden karşılanır. Kapasitörler kullanılmazsa, jeneratör çalışma anında şebekeye etkin güç verirken aynı zamanda etkin güç de çeker (49).

Sincap kafesli asenkron jeneratörlerin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlardan biri, herhangi bir hız kontrolü olmamasıdır. Bu durum, jeneratörün sabit bir hızda çalıştığı anlamına gelir. Ayrıca, zayıf şebekelerde gerilim dalgalanmalarına sebep olabilir ve enerji sürekliliğinde güvensizlik yaratabilir. Bir diğer dezavantajı ise, meydana gelen mekaniksel darbeleri sönmeyecek bir kontrol yöntemi olmamasıdır. Bu nedenle, jeneratörün fiziksel yapısının çok sağlam olması gereklidir (50).

3.2 Senkron Jeneratörler

Senkron Jeneratörler, manyetik alanı oluşturan bir rotor ve harici bir yükü besleyen 3-fazlı sargılardan meydana gelir. Bu jeneratörler, sabit hızlı sistemler için daha uygundur ve sabit frekansta çalışırlar. Rüzgar türbinlerinde, alan sargılı ve sürekli mıknatıslı senkron jeneratörler kullanılır. Bu jeneratörlerde, rotor manyetik alanı doğru akım veya sabit mıknatıslardan üretilir. Senkron jeneratörlerin rotoru elektromıknatıstan oluşur ve manyetik alanı rotorun dönüş yönünü belirler. Senkron jeneratörler yapısal olarak daha karmaşıktır ve daha pahalıdır (51).

3.2.1 Sabit Mıknatıslı Senkron Jeneratörler

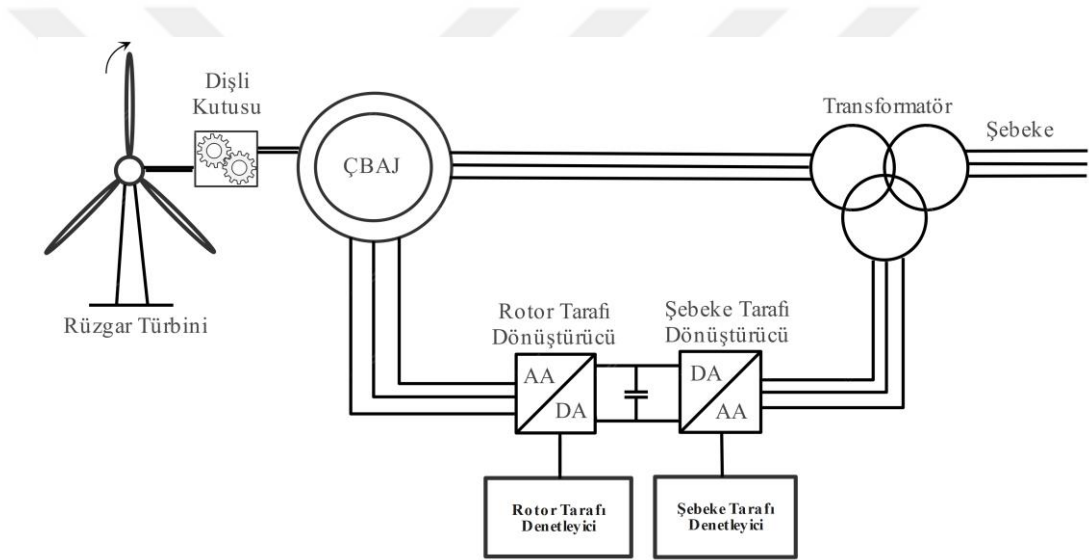
Rüzgâr türbinlerinde kullanılan SMSJ'ler, elektromanyetik torku kontrol eden yükseltici DA-DA kıyıcısı ile üç fazlı doğrultucuya bağlanır. Şebeke tarafındaki konvektör, giriş güç faktörünü ve DA link gerilimini regüle eder. Bu yapı genellikle küçük güçlü sistemler için kullanılır. SMSJ'lerin çalışma prensibi RSSJ'lere benzer, fakat rotor üzerinde sabit mıknatıslar vardır ve sargıya gerek yoktur. Bu durum daha yüksek güvenilirlik ve daha az bakım ihtiyacı sağlar, ancak mıknatısların yüksek üretim maliyetleri ve yüksek sıcaklıklarda demanyetize olabilmesi dezavantajlarıdır. Dönüştürücü arızası durumunda elektromanyetik kuvvet tehlikeli tork dalgalanmalarına neden olabilir, bu nedenle ciddi kontrol stratejileri gereklidir (52).

3.2.2 Rotoru Sargılı Senkron Jeneratörler

Rüzgar türbinlerinde kullanılan RSSJ'lerin, stator sargıları dönüştürücü ünitesi aracılığıyla şebekeye tam kapasite bağlanırken, rotor sargıları fırça gerektirmeyen bir dönen doğrultucu veya bir DA akım kaynağı tarafından uyarılır. Ayrıca, üretilen aktif ve reaktif güçleri düzenlemek için nominal rüzgâr gücünün 1,2 katı büyüklüğünde konvektörler kullanılması gerekmektedir. Şebeke tarafındaki konvertör, bu sistemin ürettiği aktif ve reaktif gücü düzenlerken, stator tarafındaki konvertör elektromanyetik torku kontrol eder. Bu tip jeneratörler, mıknatıs bulundurmaması sayesinde daha düşük üretim maliyetine sahiptir. Ancak, yüksek güçlü dönüştürücü üniteleri, pahalı güç elektroniği elemanları ve yoğun soğutma sistemleri gerektirdiğinden, genellikle yüksek maliyetlidir (53).

4. TASARLANAN SİSTEMİN MATEMATİKSEL MODELİ

Son yıllarda, çift beslemeli asenkron makine (ÇBAM) veya rotoru sargılı asenkron makine (RSAM) adı verilen elektrik makinası, megavatlar düzeyinde RES yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Makine, sınırlı bir hız aralığına sahip olan uygulamalarda avantajlı olabilir ve bu sayede, değişken hızlı jenerasyon, su pompalama vb. uygulamalarda besleme güç elektronik dönüştürücüsünün boyutunu azaltmaya olanak sağlar. Klasik bir şebekeye bağlı ÇBAJ tabanlı bir RES sistemi Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Şebeke bağlantılı ÇBAJ tabanlı RES

Bu sistemde, stator sargıları doğrudan şebekeye bağlanırken, rotor sargıları güç elektroniği dönüştürücüler aracılığıyla şebekeye bağlanır. Bu dönüştürücüler, PWM ile anahtarlama yapan iki yönlü akım akışına sahip iki gerilim kaynağı invertöründen oluşur. Üretilen güç kontrolü RTD tarafından gerçekleştirilirken, DA bara gerilimi ŞTD ile sabit tutulur. Sabit genlik ve sabit frekanstaki enerji, şebekeye bağlı ÇBAJ'ün üç fazlı stator sargılarından alınırken, değişken genlik ve değişken frekanstaki enerji dönüştürücüler yardımıyla rotor sargılarına uygulanır.

4.1 Referans Çerçevesi ve Dönüşümü

ÇBAJ'ın kontrol yapısını oluşturabilmek için asenkron makinaların genel matematiksel denklemlerinin bilinmesi gerekmektedir. Oluşturulacak matematiksel model, asenkron jeneratörün geçici ve kararlı durum karakteristiklerini doğru bir şekilde yansıtabilen bir yapıya sahip olmalıdır. ÇBAJ denklemleri, senkron hızda dönen dq eksenini kullanılarak tanımlanır. Oluştulan sistem Model ifade edilmeden önce bir faza ilişkin $abc-\alpha\beta$ ve senkron dönen $abc-dq$ dönüşümleri elde edilir (54).

2-fazlı sistemler, elektrik makinelerinin modellenmesinde ve teorik analizinde önemli kolaylıklar sağladığından, aralarında 120 derece faz farkı olan 3-fazlı dengeli sistemlerin, durağan düzlemde aralarında 90 derece faz farkı olan 2-fazlı sistemlere dönüştürülmesi ile sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca bu dönüşümler ile kontrol yapılarındaki gereksiz boyut fazlalıkları azaltılmaktadır (55).

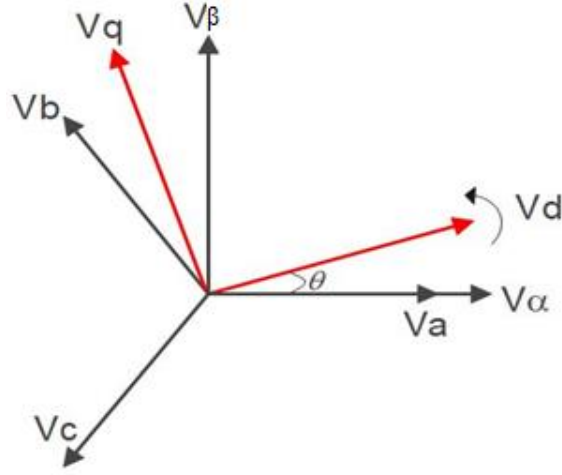
3 fazlı gerilim formülleri denklem (4.1), (4.2) ve (4.3) şu şekilde ifade edilir.

$$V_a = \cos(\omega t) \quad (4.1)$$

$$V_b = \cos(\omega t - 2\pi/3) \quad (4.2)$$

$$V_c = \cos(\omega t + 2\pi/3) \quad (4.3)$$

$abc-\alpha\beta$ ve $abc-dq$ eksen dönüşümleri ve gerilim vektörünün vektörel gösterimi Şekil 4.2 'te verilmiştir.



Şekil 4.2. $abc-\alpha\beta$ ve $abc-dq$ Eksen Dönüşümleri.

4.1.1 Clarke ($abc-\alpha\beta$) Dönüşüm Matrisleri

Clarke dönüşümü olarak bilinen dönüşüm tekniği ile 120 derecelik faz farkına sahip 3 fazlı makine modeli, 90 derecelik faz farkına sahip $\alpha\beta$ eksenleri olarak adlandırılan 2 faza indirgenmiştir. 3-fazdan 2-faza dönüştürülen makine dönüşüm matris modeli denklem (4.4)'de, 2-fazdan 3-faza dönüştürülen matris modeli ise denklem (4.5)'de ifade edilmektedir (56).

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = 2/3 \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

4.1.2 Park ($abc-dq$) Dönüşüm Matrisleri

Clarke ve Park'ın dönüşümleri matris formunda ifade edilir. 3 fazlı makine modelinden doğrudan 2 fazlı dq eksen setindeki makine modeline dönüşüm matris ile gerçekleştirilir. $abc-dq$ dönüşümü ve $dq-abc$ dönüşümü sırasıyla Denklem (4.6) ve (4.7) 'de ifade edilmektedir (57).

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Buna ek olarak, makine modelinin dönüşümü $\alpha\beta$ eksen matrisi ile dq eksenleri rotor eksenlerine dönüştürülerek elde edilebilir denklem (4.8) ve (4.9).

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Bu denklemler, değişken hızlı şebeke bağlantılı ÇBAJ tabanlı RES'in önerilen kontrol sisteminde kullanılan ŞTD ve RTD'de işlenir.

4.2 ÇBAJ'nin Dinamik Modeli

Önerilen sistemi simülasyon ortamında oluştururken öncelikle kullanılacak jeneratörün dinamik modelinin oluşturulması gerekir. Model oluşturulurken yararlanılacak denklemler ve bazı varsayımlar bu alt başlıkta yer alacaktır.

ÇBAJ'ün dinamik modeli oluşturulurken, modellemenin daha basit hale getirilmesi için bazı varsayımlar yapılmıştır. Stator sargıları stator etrafına eşit olarak yayılmıştır ve hava aralığındaki akı değişiminin sinüzoidal olduğu varsayılmıştır. 3 fazlı stator sargıları 120 derecelik bir açıyla yerleştirilmiştir. Demir kayıpları ihmal edilmiş ve manyetik parçaların geçirgenliği sonsuz kabul edilmiştir. Deri etkisi ihmal edilmiştir. Dirençlerin ve endüktansların sıcaklık ve frekans ile değişimi ihmal edilmiştir (58).

ÇBAJ dinamik modelini oluştururken, makina modelinin temel elektrik formülasyonlarına uzay vektör teorisi (UVT) uygulanmıştır. Bu nedenle, UVT kullanılarak rotor ve statorun 3 fazlı denklemleri 2 fazlı denklemlerle ifade edilebilir. Bu sayede oluşturulan modelin simülasyon ortamına aktarılması kolaylaştırılmış olur.

$$\vec{v}_s^s = R_s \vec{i}_s^s + \frac{d\vec{\psi}_s^s}{dt} \quad (4.10)$$

$$\vec{v}_r^r = R_r \vec{i}_r^r + \frac{d\vec{\psi}_r^r}{dt} \quad (4.11)$$

$$\vec{\psi}_s^s = L_s \vec{i}_s^s + L_m \vec{i}_r^s \quad (4.12)$$

$$\vec{\psi}_r^s = L_m \vec{i}_s^s + L_r \vec{i}_r^s \quad (4.13)$$

ÇBAJ'nin UVM dq çerçevesinde de gösterilebilir. dq çerçevesindeki gerilim denklemlerini elde edebilmek için, $e^{-j\theta}$ ve $e^{-j\theta}$ sırasıyla denklem (4.10) ve (4.11) ile çarpılır ve aşağıdaki denklemler elde edilir:

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \psi_{qs} \quad (4.14)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_s \psi_{ds} \quad (4.15)$$

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - \omega_s \psi_{qr} \quad (4.16)$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + \omega_s \psi_{dr} \quad (4.17)$$

Benzer şekilde denklem (4.12) ve (4.13) için uygulanırsa aşağıdaki denklemler elde edilir:

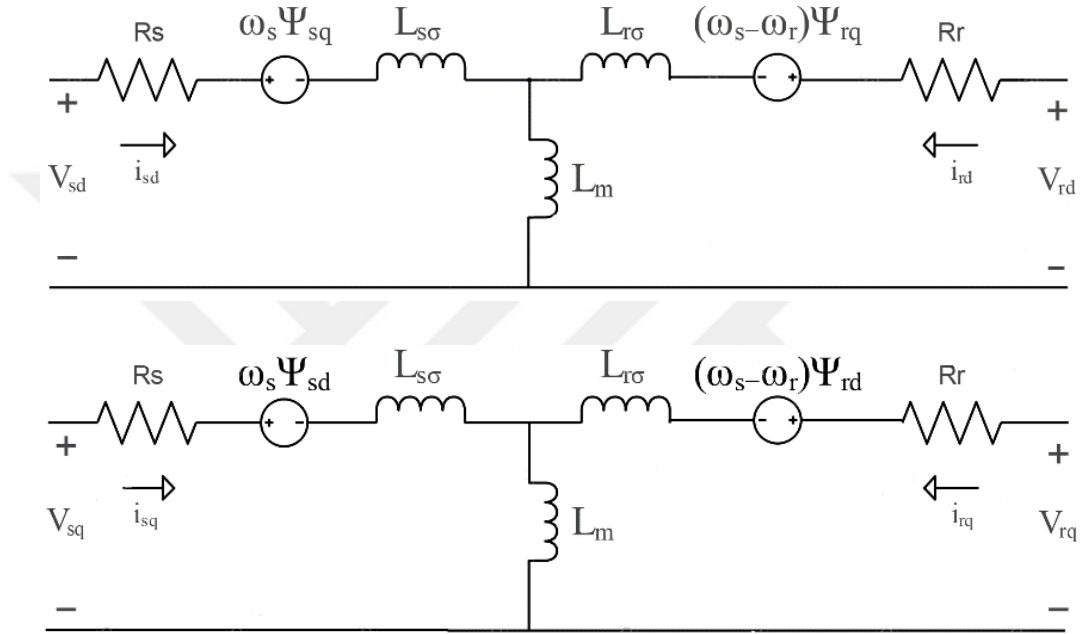
$$\psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (4.18)$$

$$\psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (4.19)$$

$$\psi_{dr} = L_m i_{dr} + L_r i_{dr} \quad (4.20)$$

$$\psi_{qr} = L_m i_{qs} + L_r i_{qr} \quad (4.21)$$

ÇBAJ'nin dq çerçevesinde eşdeğer devresi, denklem (4.10-4.21)'den yararlanılarak Şekil 4.3'de görüldüğü gibi elde edilir.



Şekil 4.3. ÇBAJ'ün d ve q Ekseninde Eşdeğer Devresi

Burada V_{ds} , V_{qs} dq ekseninde stator gerilimleri ve V_{dr} , V_{qr} dq eksenindeki rotor gerilimleri, i_{sd} , i_{sq} dq eksenindeki stator akımları ve i_{dr} , i_{qr} dq eksenindeki rotor akımları, $L_{s\sigma}$, $L_{r\sigma}$, L_m dq eksenindeki stator, rotor kaçak endüktansı ve mıknatıslanma endüktansı değerleri, R_s , R_r dq eksenindeki stator ve rotor dirençleri, ω_s , ω_r dq eksenindeki stator ve rotor elektriksel hızlarını, ψ_{ds} , ψ_{qs} , ψ_{dr} , ψ_{qr} sırasıyla dq eksenindeki stator ve rotor akısını göstermektedir.

ÇBAJ'nin eşdeğer devre modellemesi tasarlanırken devre modeli Şekil 4.3'te gösterildiği gibi 3 fazlı sistemden 2 fazlı sisteme indirgenerek karmaşıklığı azaltılmış ve simülasyon ortamına aktarılması kolaylaştırılmıştır. Bu eşdeğer

devreler, ilerleyen bölümlerde açıklanacak olan ŞTD ve RTD'nün blok diyagramları tasarlanırken kullanılmıştır.

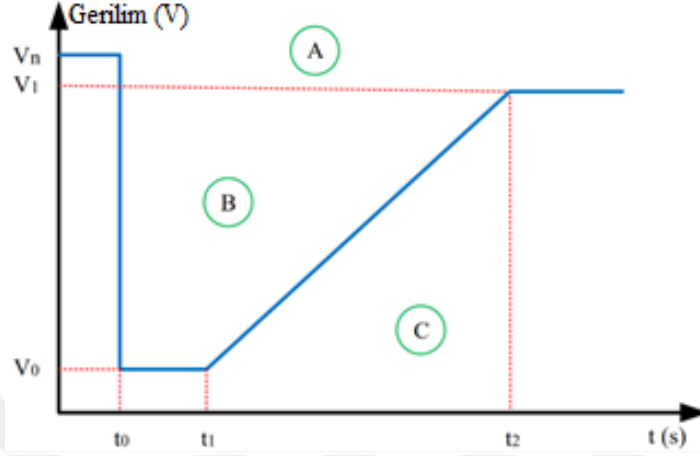
4.3 HSYB Kabiliyeti

Yenilenebilir enerjiye dayalı üretim tesislerinin sayısının ve kurulu güç içindeki payının artması nedeniyle enerji kalitesini ve sistem sürekliliğini garanti altına almak için yeni önlemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, ülkemizdeki ve dünyanın diğer birçok ülkesindeki rüzgar enerjisi tesisleri bazı bağlantı kriterlerine tabi tutulmuştur. HSYB kabiliyetinin iyileştirilmesi de bu gerekliliklerden biridir. ÇBAJ, yapısı gereği şebekede oluşabilecek herhangi bir arızadan doğrudan etkilenmektedir. Jeneratör ve dönüştürücü ünitenin yapısını korumak ve bağlantı kriterinde belirtilen arıza sonrası desteği sunmak için ek adımlar atılmalıdır. Bu konuda teoride ve pratikte çeşitli teknikler kullanılmaktadır.

Şebeke RMS geriliminde 1 pu'dan 0,1-0,9 pu'ya kısa süreli bir düşüş "gerilim sarkması" veya "gerilim düşmesi" olarak adlandırılır. Gerilim düşümünün süresi koruma yönteminin temizleme süresine göre belirlenir. Koruyucu rölelerin arıza giderme süresi 50 ms ile 2000 ms arasındadır. Akım sınırlayıcı sigortalar ve levye devreleri gibi daha kısa arıza giderme sürelerine sahip diğer koruma cihazları da bu amaçla kullanılabilir. Gerilim düşmeleri en yaygın güç kesintisi türüdür. Tipik bir endüstriyel tesis, servis girişinde yılda birkaç düşüş yaşayabilir. Gelişmekte olan ülkelerde, tesisin iç kısımlarında veya daha gelişmiş ülkelerle aynı güç kalitesi seviyelerine ulaşamamış olan bölgelerde bu düşüşler daha sık görülür. Düşüşler genellikle akkor veya floresan aydınlatmaları, motorları veya ısıtıcıları etkilemez. Ancak, bazı elektronik elemanlar yeterli dahili enerji depolama kapasitesine sahip olmadığından, besleme gerilimindeki düşüşleri tolere edemezler. Çok kısa ve derin düşüşlerden veya daha uzun süreli ancak daha sık düşüşlerden etkilenebilir (59).

HSYB kabiliyeti, RES'lerinin arıza ve gerilim düşüşleri sırasında sabit bir şebeke bağlantısını sürdürme kapasitesini ifade eder. Bir RES'in HSYB kabiliyetine sahip olabilmesi için şebekeye bağlanabilirliğini ve şebeke arızaları boyunca kararlılığını koruması gerekir. Tasarlanacak olan RES'inin uygulanabilirliği ve sürdürülebilirliği artırmak için açısından HSYB kabiliyetini

iyileştirmek oldukça önemlidir (60). Şebekeye bağlı RES için tipik HSYB özellikleri Şekil 4.4'da gösterilmektedir.



Şekil 4.4. HSYB Gereksinimleri için Genel Eğri Sınırları (61)

RES sürekli olarak ortak toplama noktası olarak da bilinen bağlantı noktasındaki nominal gerilimi gösteren A bölgesinde çalışmalıdır. Bununla birlikte, RES'leri gerilim düşüşüne dayanmalı ve gerilim B bölgesindeyse bir süre ($t_0 \rightarrow t_1$) sisteme bağlı kalmalıdır; aksi takdirde bağlantıları kesilmelidir. C alanındaki bağlantı noktasındaki gerilim, bir arıza meydana geldikten sonra 2 t süresi içinde V_1 'e geri döner. Bir RES'nin bağlantı kesilmeden sürekli üretime devam etmesi esastır. V_0 , V_1 , t_1 ve t_2 değerleri ulusal şebekenin standartlarına ve özelliklerine bağlı olarak her ülkenin şebeke koduna göre farklılık gösterebilir (61).

Bir gerilim düşümü, bir veya daha fazla fazda kısa süreli bir gerilim düşümü olarak tanımlanabilir. Tüm faz gerilimlerinin eşit olarak düştüğü durumlarda, bu tür gerilim düşümleri dengeli veya simetrik olarak sınıflandırılır. Dengesiz gerilim düşümleri ise asimetrik olarak adlandırılır. Gerilim düşümleri genellikle kısa süreli aşırı akımlardan, trafo enerjilendirmesinden, motor grubu başlatmalarından kaynaklanan ani akımlardan veya üç fazdan toprağa kısa devrelerden kaynaklanır (62).

4.3.1 Simetrik Gerilim Düşümü

Simetrik gerilim düşümleri genellikle bir ÇBAJ'ün terminallerinde dengeli gerilim düşümlerine neden olur. Simetrik bileşenlerin incelenmesinden, dengeli bir gerilim düşümü sırasında negatif ve sıfır dizi bileşenlerinin mevcut olmadığı çıkarılabilir. Bu nedenle simetrik gerilim düşümü sırasındaki kontrol sadece doğal akının azalmasına odaklanabilir (63). Gerilim düşüşü sırasında RTD'nin doyması, RTD maksimum çıkış gerilimine ulaştığında meydana gelir ve bu durum rotor akımını kontrolünün kaybedilmesine neden olabilir. RTD'nin maksimum çıkış gerilimi $V_{r,max}$ kullanılarak elde edilebilir:

$$V_{r,max} = V_{bus} / \sqrt{3} D_{max} \quad (4.22)$$

Burada V_{bus} DA bara voltajı ve D_{max} maksimum görev döngüsüdür (yaklaşık %97 ve %99).

$t = 0$ 'da ani bir gerilim düşüşü meydana geldiğinde, gerilim uzay vektörü $\vec{V}_s$ derhal kararlı durum değerine düşürülür. Ancak, akının korunumu prensibi gereği, stator akısı $\vec{\psi}_s$ stator gerilimi kadar hızlı azalamaz; bu nedenle stator sargılarında korunur. Stator akısının her fazı, sinüzoidal bir bileşenin (kalıcı akı veya stator zorlamalı akı) $\vec{\psi}_{sf}$ ve gerilim düşüşünün meydana gelmesiyle oluşan ve L_s/R_s zaman sabitiyle azalan üstel DA bileşenin (doğal akı) $\vec{\psi}_{sn}$ bir fonksiyonudur.

$$\frac{d\vec{\psi}_s^s}{dt} = \vec{v}_s^s - \frac{R_s}{L_s} \vec{\psi}_s^s + \frac{L_m}{L_s} \vec{i}_r^s \quad (4.23)$$

Denklem (4.23)'ten rotor akımı teriminin stator akısının hızlı düşüşünü zorlamak için kullanılabileceği görülebilir. RTD, arıza nedeniyle kontrol kaybedilmediyse rotor akımını kolayca kontrol edebilir (64).

Simetrik gerilim düşüşleri altında, süperpozisyon prensibi ÇBAJ'ün dinamik modelinin, yani doğal makine ve zorlanmış makinenin birlikte ifade edilebilmesini verir. Zorlanmış makine normal ÇBAJ dinamik modeline eşdeğerdir. Rotor doğal akımı $\overrightarrow{i_{rn}}$ 'nin bir fonksiyonu olarak stator doğal akısı $\overrightarrow{\psi_{sn}}$ aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{d\overrightarrow{\psi_{sn}}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}\overrightarrow{\psi_{sn}} + \frac{L_m}{L_s}R_s\overrightarrow{i_{rn}} \quad (4.24)$$

4.3.2 Asimetrik Gerilim Düşümü

Üç faz dengesiz bir gerilim düşümüne maruz kaldığında asimetrik bir gerilim düşümü meydana gelir. Bunun nedeni güç sistemindeki fazdan faza arızalar, tek fazlı motorların grup halinde çalıştırılması nedeniyle şebekelerin hızlı dengesiz üç fazlı yüklenmesi veya büyük üç fazlı motorlarda tek faza neden olan açık devre arızaları olabilir. Uygulamada, asimetrik arızalar simetrik arızalardan daha sık görülür. Her simetrik bileşenin empedansını türetmek kolay olmadığı için asimetrik gerilim düşüşlerini modellemek zordur. Modellemeyi basitleştirmek için negatif, sıfır-sıra empedansları ve pozitif empedansların eşit olduğu varsayılır. Hattan hatta arıza modellenirken iki hat arasındaki empedans ihmal edilir.

Birinci fazda hattan toprağa tek bir arıza meydana geldikten sonra, şebekenin faz gerilimleri aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$E_1(t = 0_+) = \sqrt{2}V \cos(\theta_g + \pi/2 + \phi) \quad (4.25)$$

$$E_2(t = 0_+) = \sqrt{2}VE_{g,nom} \cos(\theta_g + \pi/2 - 2\pi/3) \quad (4.26)$$

$$E_3(t = 0_+) = \sqrt{2}VE_{g,nom} \cos(\theta_g + \pi/2 + 2\pi/3) \quad (4.27)$$

Burada E_1 , E_2 ve E_3 gerilim düşüşünden sonra şebekenin faz gerilimleri, ϕ ilk fazdaki faz açısı atlamaşını ve V kalan rms gerilimini temsil eder.

Birinci ve ikinci fazlar arasında iki hattan toprağa arıza meydana geldikten sonra, şebekenin faz gerilimleri aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$E_1(t = 0_+) = \sqrt{2}V \cos(\theta_g + \pi/2 + \phi) \quad (4.28)$$

$$E_2(t = 0_+) = \sqrt{2}V \cos(\theta_g + \pi/2 - 2\pi/3 + \phi) \quad (4.29)$$

$$E_3(t = 0_+) = \sqrt{2}V E_{g,nom} \cos(\theta_g + \pi/2 + 2\pi/3) \quad (4.30)$$

Faz 2 ve 3 arasında hattan hatta bir şebeke arızasından sonra şebeke faz gerilimleri aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$E_1 = \sqrt{2}E_{g,nom} \cos(\theta_g + \pi/2) \quad (4.31)$$

$$E_2 = \frac{E_{g,nom}}{\sqrt{2}} \cos(\theta_g + \pi/2 - \pi) \quad (4.32)$$

$$E_3 = \frac{E_{g,nom}}{\sqrt{2}} \cos(\theta_g + \pi/2 - \pi) \quad (4.33)$$

4.3.3 ÇBAJ Tabanlı RES'lerinde Kullanılan HSYB Yöntemleri

Yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam üretimdeki payının artması, bu kaynaklardan üretimin sürekli olma gereksinimini daha da artırmıştır. Bu gereksinim sonucunda özellikle RES'lerin HSYB kabiliyetinin iyileştirilmesi konusu en güncel konular arasında yer almaya devam etmektedir. Frekans yönetimindeki sorunlar nedeniyle HSYB'nin geliştirilmesi gereklidir ve düşük gerilim, en kötü durumda sistemin çökmesine neden olabilir. HSYB kabiliyeti, şebeke kodlarının önemli bir gerekliliğidir; bu da rüzgar türbinlerinin, PV sistemlerinin veya MG'lerin belirli bir limit dahilinde bir arıza sırasında ve sonrasında şebekeye bağlı kalması anlamına gelir. Bir RES'nin bağlantısının kesilmesi daha büyük bir tüketim dengesizliğine, sistemin frekansında düşüşe ve ani akıma neden olacaktır. Uzun yıllardır kullanılan ve etkinliği kanıtlanmış geleneksel yaklaşımların yanı sıra akıllı kontrol yöntemleri üzerine yapılan çalışmalar son yıllarda önemli ölçüde artmıştır (65,66).

RTD, ÇBAJ'nin hızını ve reaktif gücü yönetir. ŞTD, DA bara gerilimini yönetir ve aktif gücün RTD ve ŞTD arasında şebekeye aktarılmasını sağlamak için nominal değerinde tutar. ÇBAJ, statoru ile şebeke arasında doğrudan bir bağlantı olduğu için şebeke arızasına karşı son derece hassastır (67)(68) Bu nedenle, ÇBAJ'nin HSYB yeteneğini geliştirmek için koruma devreleri, reaktif güç enjeksiyon cihazları, enerji depolama sistemleri, geleneksel kontrol yöntemleri ve gelişmiş kontrol yöntemleri gibi farklı yöntemler önerilmiştir.

Geleneksel koruma teknikleri, RTD aşırı akımını sınırlamak ve DA bara gerilimini istenen değerde tutmak için hayati öneme sahiptir. Crowbar, RTD'yi aşırı gerilimden korumak için en basit yöntem olması, kolay kullanımı ve kontrolü nedeniyle ÇBAJ tabanlı RES'lerinde tercih edilmektedir (69). Dirençli antiparalel tristör (CB1), dirençli IGBT köprüsü (CB2) ve dirençli IGBT'li diyot köprü doğrultucu (CB3) olmak üzere üç CB şeması önerilmiştir. CB1, bir tristör anahtarı kullandığı için en ucuz tiptir. Anında açma/kapama imkanı sunar. Bu şemanın dezavantajı, rotor akımının büyük bir dc bileşenine sahip olması nedeniyle sıfır akımı düzeltmek için beklemesi gereken kapanma karakteristiğidir. CB2 aşırı akımı sınırlar ve RTD'yi korur. Bu şema sıkıştırma devresinden daha karmaşık ve pahalıdır. CB3 maliyetten tasarruf sağlar ve tek bir anahtar kullanıldığı için kontrolü daha kolaydır. Kısa devre akımını ortadan kaldırdığı için ÇBAJ'nin iyileştirilmesi için başarılı bir şemadır (70). Rotor devresine bağlı bir CB devresinin varlığında, ÇBAJ bir sincap kafesli indüksiyon jeneratörü gibi davranır ve arıza sırasında şebekeden daha fazla reaktif güç tüketilir. CB direncinin uygun değeri ÇBAJ performansına bağlıdır. $R_{crowbar}/R_{rotor}$ tarafı dönüştürücü uygun oranı 9 MW ÇBAJ tabanlı RES için 10'dur. CB direncinin uygun değeri aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir (71).

$$R_{crowbar} = \frac{\sqrt{2(V_{max}\omega_s L_s)}}{\sqrt{(3.2V_s^2 - 2V_{max}^2)}} \quad (4.34)$$

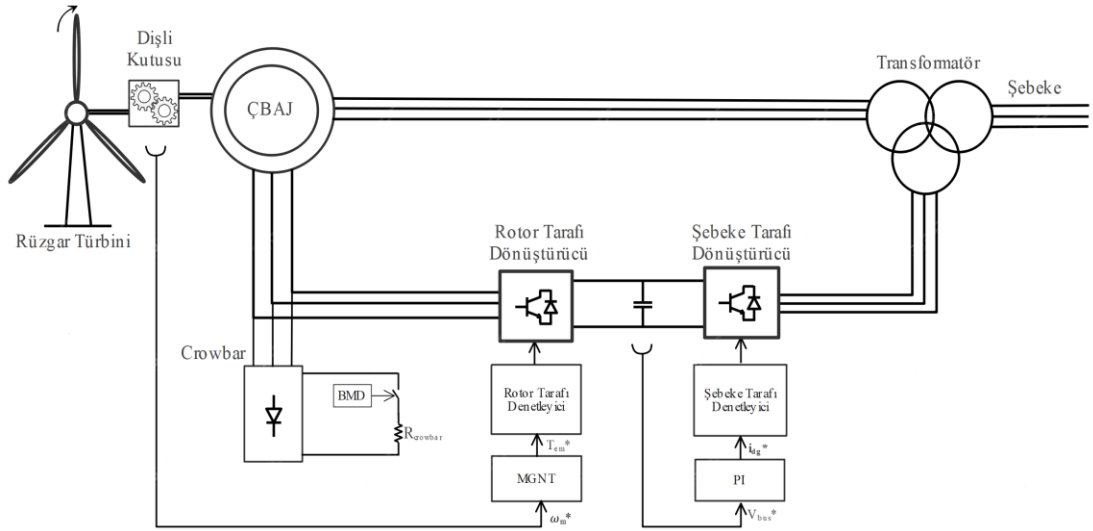
Frenleme kısıyıcı direnci, salınımı sönmölemek için DA bara bağlantısına bağlanır. Bozulmalar sırasında dönüştürücülerin bağlantısını kesmeden onları korur. Bu teknikte direnç, anahtarlama sinyalinin kontrol etmek için IGBT ve PI

denetleyici bağlanır. Dinamik frenleme direnci, direnç değerini kontrol etmek için bir anahtara paralel olarak bağlanan bir dirençtir. Statoru akım üzerinden sınırlamak için ÇBAJ'ün stator tarafına bağlanır. Bir arıza sırasında bağlantının kesilmesini önlemek için RTD'nin çalışma süresini artırır. Crowbar devresi tork dalgalanmalarını azaltır. Anahtarlama gecikmesine karşı çok hassastır, bu nedenle ÇBAJ'nin HSYB'sini geliştirmek için İleri Besleme veya Geri Besleme kontrol tekniğini kullanmak önemlidir (72).



5. TASARLANAN SİSTEMİN SİMÜLASYONU

Bu bölümde simülasyon ortamında benzetimi yapılmak istenen çift beslemeli asenkron jeneratör tabanlı rüzgar enerji santralinin Matlab/Simulink ortamında oluşturulma aşamalarına yer verilecektir. Öncelikle rüzgar türbin modelinin oluşturulacak ardından oluşturulan sistemde kullanılacak jeneratörün parametrelerinin belirlenmesi, rotor tarafı dönüştürücü kontrolcüsü, şebeke tarafı dönüştürücü kontrolcüsü ve son olarak crowbar koruma devresinin oluşturulması aşamalarına yer verilecektir. Matlab/Simulink ortamında modellenerek simülasyonu gerçekleştirilecek olan şebeke bağlantılı crowbar koruma devresi içeren ÇBAJ tabanlı RES'in blok diyagramı Şekil 5.1'de verilmiştir.



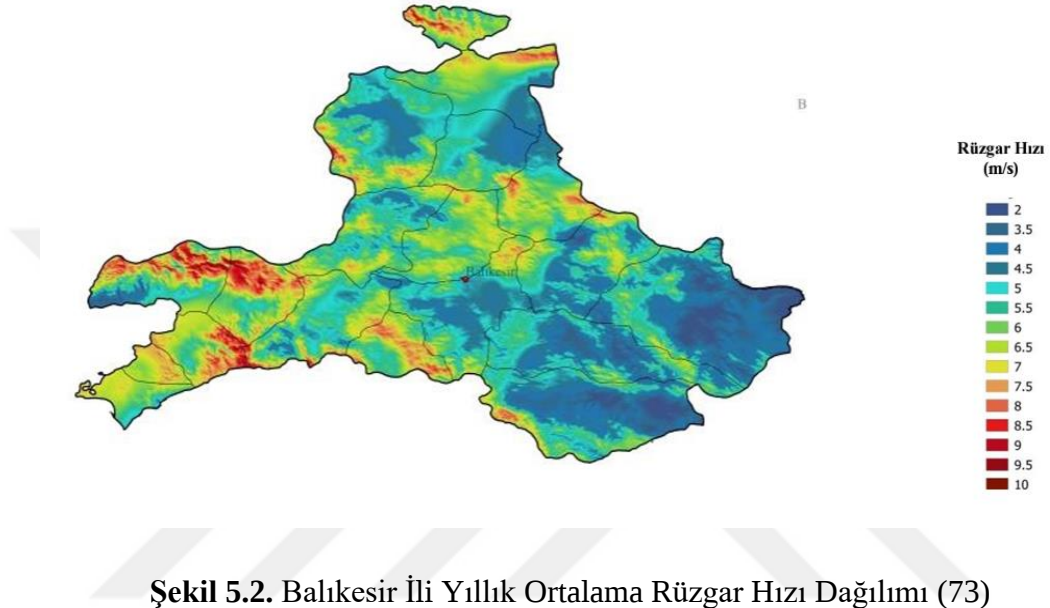
Şekil 5.1. Şebeke Bağlantılı Crowbar Korumalı ÇBAJ Tabanlı RES

5.1 RES Kurulacak Yerin Seçimi

Bir bölgeye RES kurulmak istendiğinde göz önünde bulundurulması gereken birçok kriter vardır. Yer seçiminde kullanılacak kriterler bölgedeki hakim rüzgar yönü, rüzgar hızı, aktif fay hattına uzaklık, yükseklik, eğim, kuş göç yollarına uzaklık ve trafolarla olan uzaklık şeklinde sıralanabilir. Çalışmamızda Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na bağlı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü'nün Balıkesir ili için hazırladığı Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA) raporu

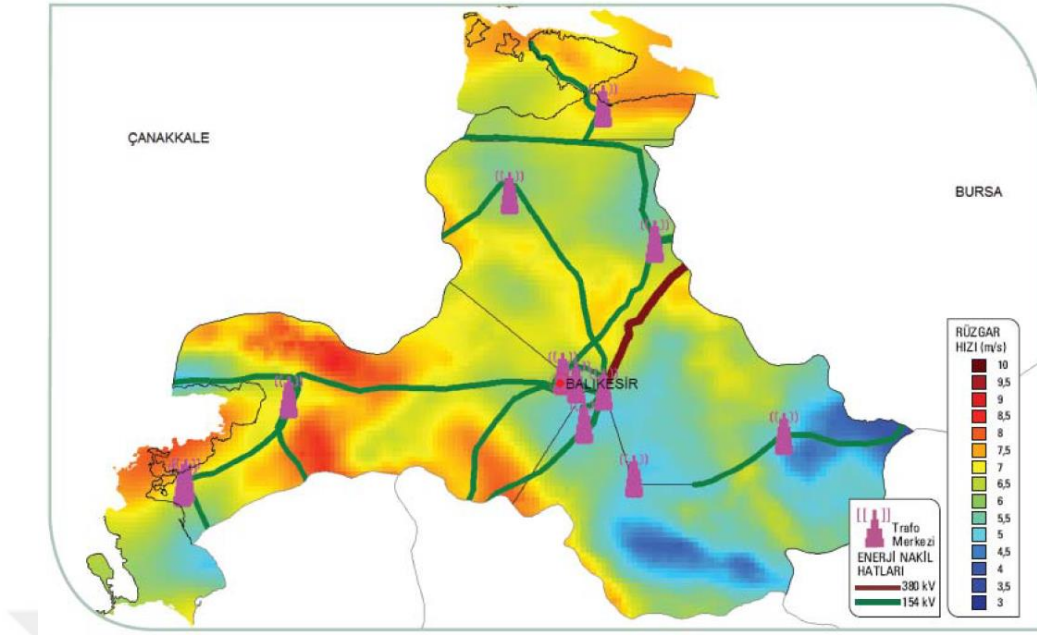
incelenerek önerilen sistemin kurulacağı konum yukarıda belirtilen kriterlere göre belirlenmiştir.

Şekil 5.2’de Balıkesir ili için 100 metrede yıllık ortalama rüzgar hızı dağılımı verilmiştir.



Harita incelendiğinde Balıkesir ilinin Edremit ilçesine denk gelen güney batı bölgesindeki ortalama rüzgar hızı 8-9 m/s civarındadır. Bu değerler ekonomik açıdan RES kurulumu için oldukça uygundur.

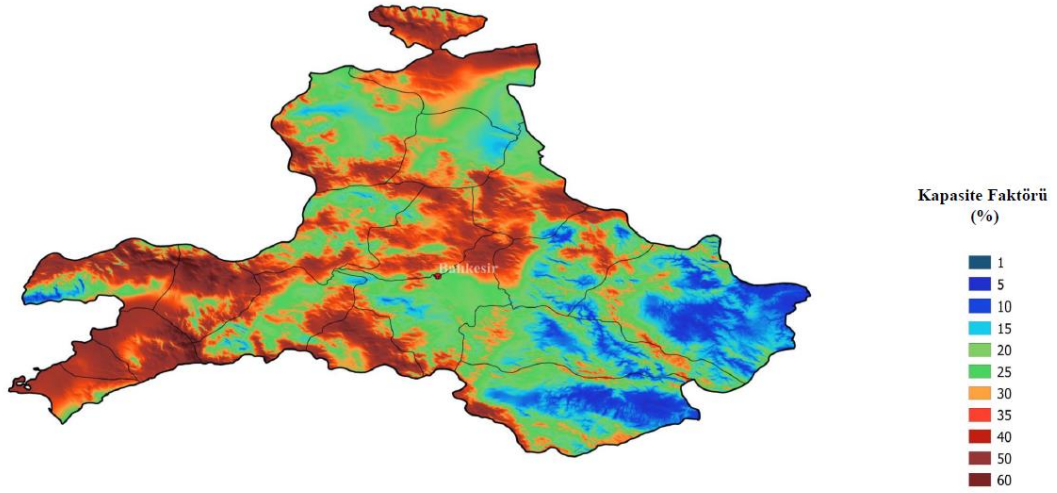
Balıkesir ili için trafo merkezleri ve enerji nakil hatlarını içeren harita Şekil 5.3’de gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Balıkesir İli Trafo Merkezleri ve Enerji Nakil Hatları (74)

RES kurulumu yapılırken kurulum yapılacak konumun trafo merkezlerine yakınlığı iletim maliyetlerinin düşürülmesi açısından önemlidir. Harita incelendiğinde trafo merkezlerine yakınlık kriteri göz önünde bulundurulduğunda ortalama rüzgar hızı dağılımı haritasında olduğu gibi Edremit bölgesi RES kurulumu için en uygun konumlardan biridir.

Balıkesir ili için kapasite faktörü dağılımını gösteren harita Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Balıkesir İli Kapasite Faktörü Dağılımı (73)

RES kurulacak konum belirlenirken göz önünde bulundurulması gereken diğer bir kriter ise kapasite faktörüdür. Kapasite faktörü sistemin belirli bir periyotta ürettiği toplam gücün tam kapasitede üretebileceği güce oranıdır. Ekonomik açıdan sistemin maliyetini karşılaması için bu oranın yaklaşık %35'ten yüksek olması beklenir. Harita incelendiğinde Edremit bölgesinin kapasite faktörü açısından da ön plana çıktığı görülmektedir.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının hazırlamış olduğu Balıkesir iline ait REPA raporu incelendiğinde rüzgar hızı, enerji nakil hatlarına yakınlık ve kapasite faktörü kriterleri açısından Balıkesir ili Edremit ilçesi bölgesi bu çalışmada önerilen RES'nin kurulması için daha uygun olduğuna karar verilmiştir.

5.2 Çalışmada Kullanılacak Jeneratör

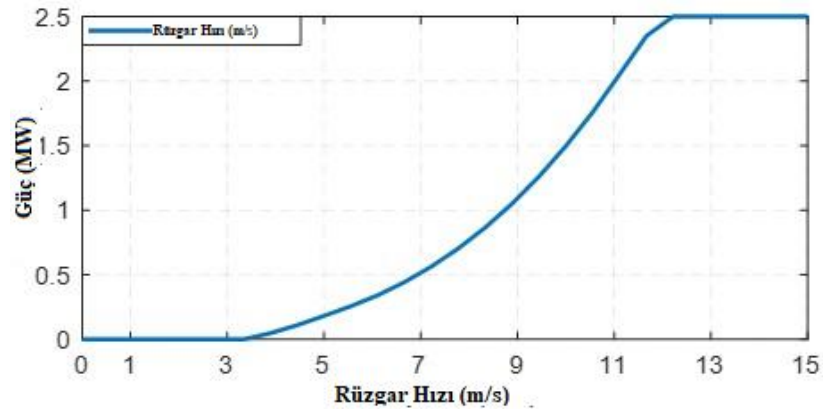
RES'nin kurulacağı konumun belirli kriterlere göre belirlenmesinin ardından kullanılacak jeneratörün belirlenmesi gerekmektedir. Bölgenin REPA raporları incelendiğinde rüzgar hızı ve kapasite faktörü değerlerine göre bölge için en uygun jeneratör nominal güç değeri 2.5-3.0 MW olarak belirlenmiştir. Raporlara göre bölgenin ortalama rüzgar hızı ve güç faktörü kapasitesi açısından sistemde kullanılacak en uygun jeneratörün ÇBAJ olduğu belirlenmiştir. Rüzgar hızı ve kapasite faktörü kapasitesine ek olarak, sistemin teknik ve ekonomik kurulum kriterlerine göre seçilen bölge için en uygun jeneratör tipinin ÇBAJ olduğu belirlenmiştir. Bu kriterler göz önünde bulundurularak piyasada yaygın

olarak kullanılan türbin üreticisi markaların modelleri incelendiğinde Nordex markasının ürettiği N90 model isimli 2.5MW nominal gücündeki türbinin sistemimiz için en uygun türbin olduğu görülmüştür. MATLAB/Simulink'te tasarlanan ÇBAJ'nin parametreleri Tablo 5.1'de listelenmiştir.

Tablo 5.1. ÇBAJ Parametreleri

Parametre	Değer	Birim
Anma gücü	2.5	MW
Anma gerilimi	660	V
DA bara gerilimi	1150	V
Frekans	50	Hz
Stator direnci (R_s)	0.0026	Ω
Rotor direnci (R_r)	0.0029	Ω
Mıknatıslanma endüktansı (L_m)	0.0025	H
Stator kaçak endüktansı (L_{si})	0.000087	H
Stator/Rotor dönüş oranı	0.333	-
Eylemsizlik sabiti	127	$\text{Kg} \times \text{m}^2$
Kutup sayısı	2	-
Devreye girme rüzgar hızı	3	m/s
Devreden çıkma rüzgar hızı	25	m/s

Bir rüzgar türbininin güç eğrisi, türbin tarafından üretilen güç ile rüzgar hızı arasındaki ilişkiyi ifade eder. Güç eğrisi türbinlerin performansının izlenmesine yardımcı olur. Bu çalışmada kullanılan ÇBAJ'ün güç eğrisi Şekil 5.5'de gösterilmiştir.

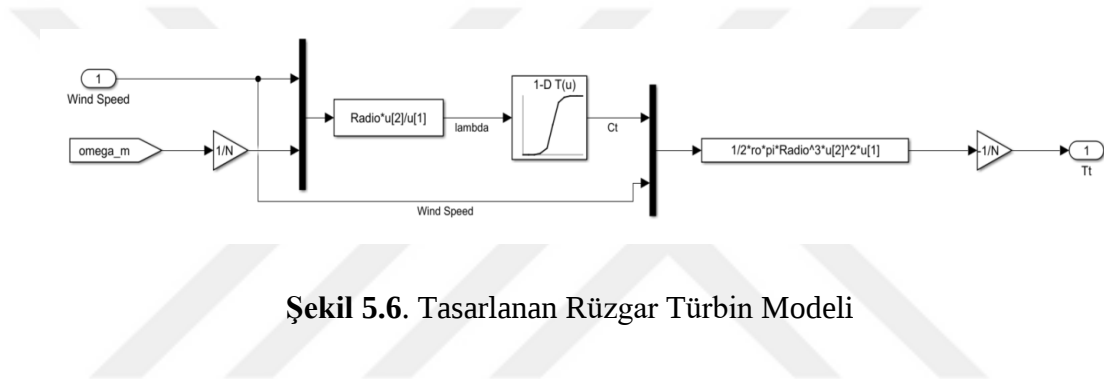


Şekil 5.5. ÇBAJ'ün Güç Eğrisi

Güç eğrisinde görüldüğü gibi, jeneratör 12 m/s nominal hızında 2,5 MW nominal güç üretmektedir. Tasarlanan sistem değişken rüzgar hızında analiz edilirken, ÇBAJ'den üretilen gücün Şekil 5.4'te gösterilen güç eğrisi grafiğindeki verilerle uyumlu olması gerekmektedir.

5.3 Rüzgar Türbini Modeli

Rüzgar türbini modeli Matlab/Simulink ortamında oluşturulurken ikinci bölümde yer verilen rüzgar türbininin aerodinamik model denklemlerinden yararlanılmıştır. Rüzgar türbini modeli Şekil 5.6'da gösterildiği gibi oluşturulmuştur.



Şekil 5.6. Tasarlanan Rüzgar Türbin Modeli

Rüzgar türbininin aerodinamik modelleme denklemleri yardımıyla oluşturulan rüzgar türbin modeli sayesinde rüzgar hızına göre jeneratöre iletilen mekanik tork değeri elde edilir. Burada omega_m ile ifade edilen değer jeneratörün açısal hız değeridir. Rüzgar hızı olarak Meteoroloji genel müdürlüğü'nden elde edilen gerçek rüzgar hızı verileri kullanılacaktır.

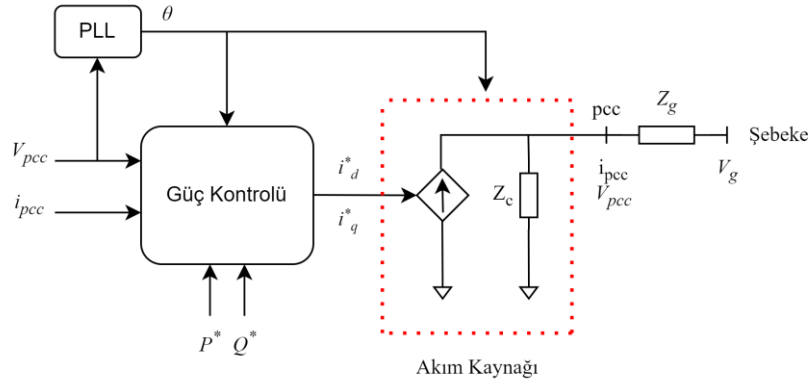
5.4 Şebeke Senkronizasyon Kontrolü

Geçtiğimiz birkaç yıl, elektrik şebekelerinde güç elektroniği tabanlı kaynakların kullanımı katlanarak artmıştır (75). Senkron makinelerden farklı olarak, dönüştürücü tabanlı kaynakların şebekeyle senkronizasyonlarını yöneten doğal bir "salınım denklemi" yoktur, bunun yerine kontrol algoritmalarına dayanır(76). Bu nedenle, dönüştürücü tabanlı kaynakların şebeke senkronizasyon dinamikleri, senkron makinelerden temel olarak farklıdır. Dönüştürücü tabanlı kaynaklar için çok çeşitli şebeke senkronizasyon yöntemleri geliştirilmiştir. Şebeke senkronizasyonu üzerine yapılan araştırmaların odak noktası, gerilim harmonikleri ve dengesizlikleri, faz atlamaları ve frekans sapmaları gibi

bozulmaların reddedilmesinden zayıf ve hatalı şebekelerdeki senkronizasyon kararlılığına kaydırılmıştır (77,78). Bu değişiklik, azalan atalet ve azaltılmış kısa devre oranının (KDO) dönüştürücü tabanlı kaynakların kararlılığını bozduğu, güç sistemindeki dönüştürücü tabanlı kaynakların sürekli artan payından kaynaklanmaktadır.

Şebeke senkronizasyon yöntemleri, dönüştürücü tabanlı kaynakların çalışma modlarına göre iki kategoride sınıflandırılabilir:

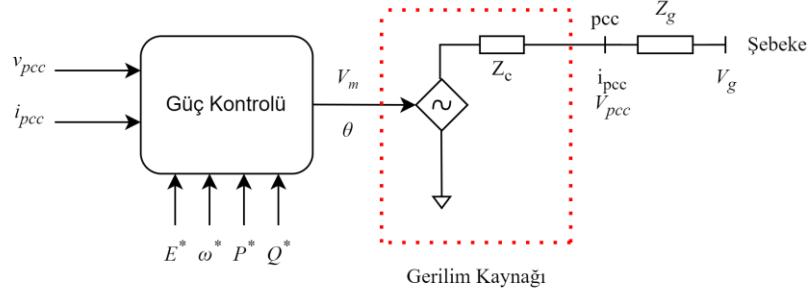
1) Şebekeye bağlı dönüştürücülerin ortak bağlantı noktasında gerilimin frekansı ve fazı ölçülür veya tahmin edilir (gerilim sensörü olmadan). Tespit edilen faz daha sonra şebeke ile değiştirilen aktif ve reaktif gücü düzenlemek için vektör akım kontrolü veya doğrudan güç kontrolü ile birlikte kullanılır. Böyle bir gerilim tabanlı şebeke senkronizasyon kontrolü, şebeke geriliminin fazını takip ettikleri için şebeke takip kontrolü olarak adlandırılır (79). Şebeke takip kontrolü yönteminin çalışma prensibi Şekil 5.7’de gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Şebeke Takip Kontrolü

2) Güce dayalı senkronizasyon, dönüştürücülerin aktif gücünü düzenleyerek doğrudan ortak bağlantı noktası geriliminin fazını belirler; burada genel fikir, yaygın olarak kullanılan aktif güç frekansı (P- ω) düşüş kontrolünü kullanmaktır. Ortak bağlantı noktası geriliminin üretilen fazını izlemek için, şebekeyi takip eden dönüştürücülerden farklı olarak gerilim kontrolü gereklidir. Bu tür gerilim kontrollü dönüştürücüler son zamanlarda şebeke oluşturan (grid

forming) kontrollü dönüştürücüler olarak bilinmektedir (79,80). Şebeke oluşturan kontrol yönteminin çalışma prensini Şekil 5.8’de gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Şebeke Oluşturan Kontrol

Ciddi şebeke arızaları ve büyük bir üretim/yük kaybı gibi büyük bozulmalar sırasında, sistemin denge noktaları değişebileceği veya hatta kaybolabileceği için, küçük sinyal analizi dönüştürücü tabanlı kaynakların senkronizasyon dinamiklerini karakterize etmek için yetersiz olacaktır. Bu nedenle, bozulmadan sonra ilk olarak denge noktalarının varlığının kontrol edilmesi gereklidir. Eğer, hiçbir denge noktası yoksa dönüştürücüler şebeke ile senkronizasyonu kaybedeceklerdir. Bununla birlikte, büyük bozulmadan sonra denge noktaları olsa bile, sistem dinamikleri, kullanılan şebeke senkronizasyon yöntemlerine büyük ölçüde bağlı olan kararlı denge noktasına yakınsamayabileceğinden, dönüştürücüler şebeke ile senkronizasyonu kaybedebilir (81–83). Bu nedenle, denge noktalarının varlığı, dönüştürücü tabanlı kaynakların geçici kararlılığı için yalnızca gerekli bir koşuldur (78).

Bu çalışmada yer alan dönüştürücüler yukarıda ayrıntıları verilen şebeke senkronizasyon kontrolü yöntemlerinden şebeke takip kontrol yöntemi kullanılarak Matlab/Simulink ortamında tasarlanmıştır.

5.5 PI Kontrol Parametrelerinin Belirlenmesi

Oransal kontrol yöntemleri günümüzde de yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedir. Önerilen ÇBAJ tabanlı RES Matlab/Simulink ortamında benzetimi yapılırken, RTD ve ŞTD'lerin kontrol bloklarının simülasyon ortamında tasarlanması gerekir. Daha önce de bahsedildiği gibi sistemimiz öncelikle PI denetleyici içeren RTD ve ŞTD'ler ile tasarlanmıştır.

Oransal denetleyicilerdeki asıl amaç ölçü değeri ve ayar değeri arasındaki hatayı sıfıra indirmektir. PI denetleyici parametrelerinin belirlenmesi de kontrol sistemlerinde önemli bir adımdır. Bu parametreler, kontrol sisteminin istenen performansı göstermesini sağlamak için doğru bir şekilde ayarlanmalıdır. Bu sayede istenilen değerlere ulaşılmış ve sistemin doğrusallığı sağlanmış olur. P, I parametrelerinin uygun şekilde belirlenmesi yardımıyla kontrol edilmek istenen değişkenin ayar değerine minimum zamanda, minimum alt ve üst tepe değerlerinden geçerek ulaşması sağlanır.

Tasarlanan sistemimiz için şebeke ve rotor tarafı dönüştürücülerinde d-q eksenindeki akımları ve açısal hızı kontrol eden PI denetleyicinin parametreleri aşağıdaki denklemlerden yararlanılarak belirlenmiştir. Tasarlanan sistemin DA bara gerilimini kontrol eden PI denetleyicinin parametreleri denenerek sistemimiz için en uygun parametreler belirlenmiştir.

Rotor tarafı dönüştürücü kontrolünde id ve iq akımlarını kontrol eden PI denetleyici parametreleri denklem (5.1-5.4) kullanılarak elde edilmiştir (59). Denklemler yardımıyla $K_{p_id} = 0.11$, $K_{p_iq} = 0.11$, $K_{i_id} = 19.66$, $K_{i_iq} = 19.66$ olarak hesaplanmıştır.

$$K_{p_id} = (2 * \omega_{ni} * \sigma * L_r) - R_r \quad (5.1)$$

$$K_{p_iq} = K_{p_id} \quad (5.2)$$

$$K_{i_id} = (\omega_{ni}^2) * \sigma * L_r \quad (5.3)$$

$$K_{i_iq} = K_{i_id} \quad (5.4)$$

Şebeke tarafı dönüştürücü kontrolünde i_d ve i_q akımlarını kontrol eden PI denetleyici parametreleri denklem (5.5-5.8) kullanılarak elde edilmiştir (59). Denklemler yardımıyla $K_{p_idg} = 0.25$, $K_{p_iqg} = 0.25$, $K_{i_idg} = 39.48$, $K_{i_iqg} = 39.48$ olarak hesaplanmıştır.

$$K_{p_idg} = (2 * \omega_{n_ig} * L_g) - R_g \quad (5.5)$$

$$K_{p_iqg} = K_{p_idg} \quad (5.6)$$

$$K_{i_idg} = (\omega_{n_i}^2) * L_g \quad (5.7)$$

$$K_{i_iqg} = K_{i_idg} \quad (5.8)$$

Rotor tarafı dönüştürücü kontrolünde referans tork üretilirken PI denetleyici parametreleri denklem (5.9) ve (5.10) kullanılarak elde edilmiştir (59). Denklemler yardımıyla $K_{p_n} = 635$ ve $K_{i_n} = 6350$ olarak hesaplanmıştır.

$$K_{p_n} = (2 * \omega_{n_n} * J) / p \quad (5.9)$$

$$K_{i_n} = ((\omega_{n_n}^2) * J) / p \quad (5.10)$$

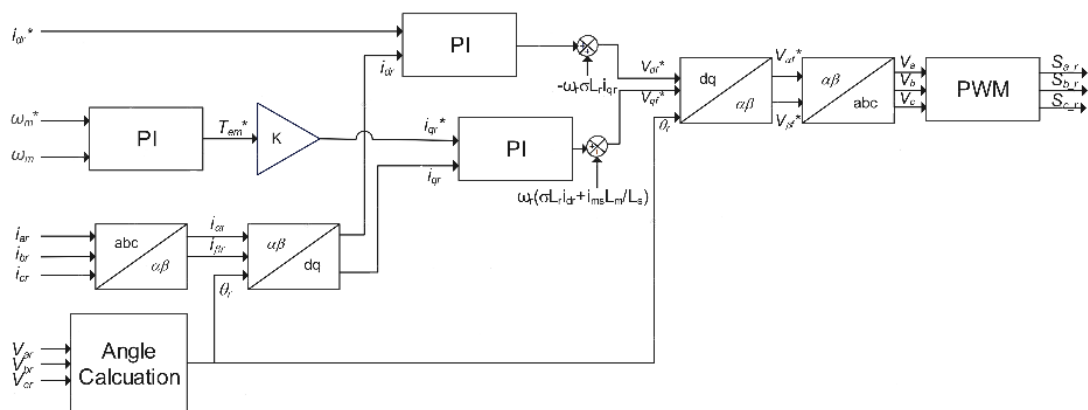
Şebeke tarafı dönüştürücü kontrolünde DA bara gerilimini kontrol eden PI denetleyici parametreleri farklı değerler denenerek belirlenmiştir. Diğer K_p ve K_i değerlerinden yola çıkılarak $K_{p_v} = 1000$ ve $K_{i_v} = 300000$ olarak belirlenmiştir. Bu nihai değerler belirlenirken birçok katsayı değeri denenerek sistemin bu değerler altında DA bara gerilim grafikleri incelenmiştir. Sonuç olarak belirtilen K_{p_v} ve K_{i_v} değerleri ile DA bara gerilim dalgalanması ve aşımının en düşük seviyede olduğu gözlemlenmiştir.

5.6 Rotor Tarafı Dönüştürücünün Kontrolü

ÇBAJ'ü kontrol etmek için öncelikle önerilen sistemin RTD ve ŞTD'si Matlab/Simulink'te tasarlanmalıdır. RTD ve ŞTD yapıları, önceki bölümde bahsedilen dönüşüm denklemleri ve eşdeğer devreler kullanılarak tasarlanmıştır. RTD'nün görevi üretilen gücü kontrol etmektir. ŞTD'nün görevi ise DA bara gerilimini sabit tutarak şebekeden rotora veya rotordan şebekeye güç akışının çift yönlü transferini kontrol etmektir (84).

RTD kontrolü için çeşitli kontrol yöntemleri vardır. Stator akısı veya stator gerilimi ile ilgili doğrudan vektör kontrolü, ÇBAJ kontrolü için temel bir yöntemdir. Buna ek olarak, doğrudan vektör kontrolü ve doğrudan tork kontrol yöntemleri kullanılır. Doğrudan vektör kontrol, dolaylı vektör kontrol ve doğrudan tork kontrol yöntemlerinde stator ve rotor akı yönelimleri kullanılır. Rotor akı yönelimini kullanan vektör kontrol yönteminde (VKY) rotor akısının genliği ve açısı hesaplanır. Rotor akısının hesaplanan açısı 3 fazdan 2 faza ve 2 fazdan 3 faza dönüşümlerde kullanılır. Doğrudan ve dolaylı VKY'leri arasındaki fark, bu değerleri elde etme yöntemidir (85).

Şekil 5.9'te gösterilen RTD için vektör kontrolü dq eksen dönüşümleri prensibine dayanmaktadır. Dönüşüm tekniği kullanılarak 3 fazlı jeneratör model değişkenleri, 90 derecelik farklarla dq eksenlerine dönüştürülerek birbirlerinden bağımsız olarak kontrol edilebilirler.



Şekil 5.9. Rotor Tarafı Dönüştürücünün Vektör Kontrolü

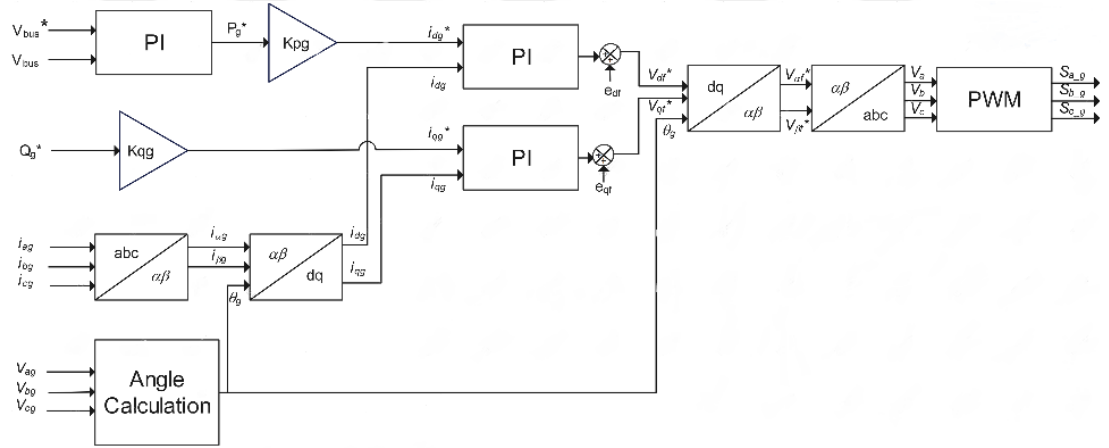
5.7 Şebeke Tarafı Dönüştürücünün Kontrolü

Şebeke geriliminden yönlendirilen VKY, RTD'de olduğu gibi abc-dq dönüşümleri uygulanarak gerçekleştirilebilir. ŞTD için VKY denklemleri Denklem (5.1) ve Denklem (5.2)'de ifade edilmiştir:

$$V_d = Ri_{gd} + L_g \frac{di_{gd}}{dt} - \omega_g L_g i_{gq} + V_{gd} \quad (5.11)$$

$$V_q = Ri_{gq} + L_g \frac{di_{gq}}{dt} - \omega_g L_g i_{gd} + V_{gq} \quad (5.12)$$

Burada, V_d , V_q dönüştürücü tarafından üretilen gerilimi, V_{gd} , V_{gq} şebeke gerilimini, i_{gd} , i_{gq} şebeke akımlarını, R şebekenin direncini, L_g şebekenin hat endüktansını ve ω_g şebekenin açısal hızını temsil eder. Şekil 5.10, ŞTD'nin vektör kontrol blok diyagramını göstermektedir.



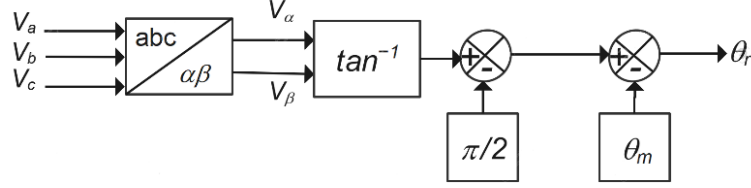
Şekil 5.10. Şebeke Tarafı Dönüştürücünün Vektör Kontrolü

V_d^* ve V_q^* gerilim referansları PI kontrolcü yardımıyla akım kontrolü yapılarak elde edilebilir. DA gerilimi de üst döngüde kullanılan DA gerilim kontrolü ile kontrol edilir. Aktif güçte DA, gerilimi kontrol eden i_d 'deki değişime göre değişir.

Şebeke geriliminin açısı Denklem (5.13) yardımıyla belirlenir ve rotor tarafı geriliminin açısı hesaplamasının blok diyagramı Şekil 5.11'de verilmiştir.

Denklem (5.13) ve Şekil 5.11'de gösterilen blok diyagram yardımıyla gerilimin açısı hesaplanabilir:

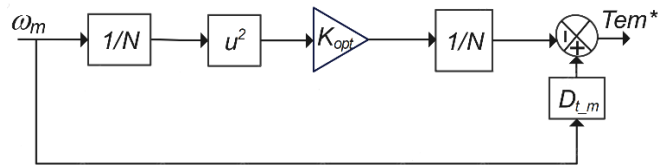
$$\theta_g = \int \omega_g dt = \tan^{-1} V_\beta / V_\alpha \quad (5.13)$$



Şekil 5.11. Rotor Tarafı Açı Hesaplama Blok Diyagramı

5.8 Rotor Tarafı Dönüştürücü için Önerilen Kontrol

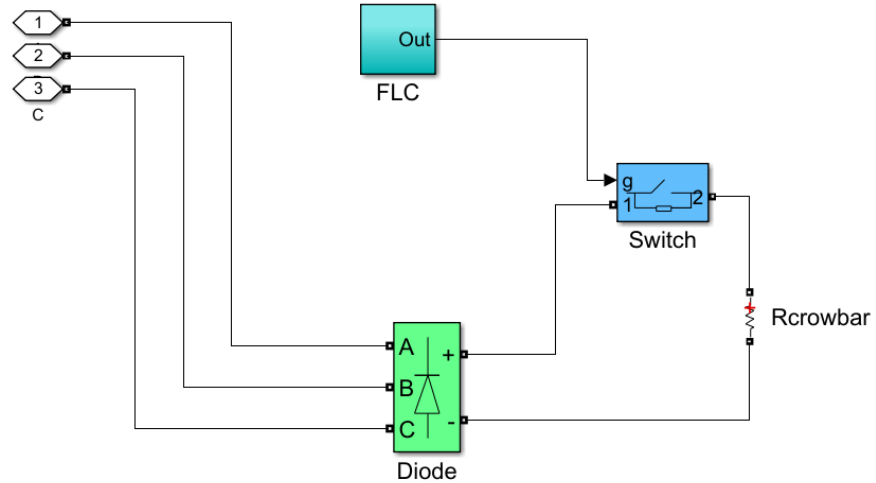
Kontrol sistemlerinin tepki süresi, kararlılığı ve dayanıklılığı çok önemlidir. Değişken rüzgar hızlarında, RES'nin bu değişime tepki süresinin hızlı olması beklenir. RTD kontrolünün performansını artırmak için RTD'ye PI kontrolörüne ek olarak MGNT kontrolcü bloğu eklenmiştir. Referans tork (T_{em}^*) değeri Şekil 5.12'da gösterilen MGNT kontrolcü bloğu kullanılarak üretilmiştir. MGNT kontrolcü ile referans tork hesaplanarak daha uygun sonuçlar elde edilmesi amaçlanmıştır. RTD'ye uygulanan MGNT ile önerilen PI kontrolcü Şekil 5.13'da gösterilmiştir.



Şekil 5.12. Rotor Tarafı Dönüştürücüye Uygulanan MGNT Kontrolcü

5.9 Crowbar Koruma Devresi Kontrolü

Şebekeye bağlı RES'leri için, şebeke arızaları sırasında güç dönüştürücülerini ve sistem bileşenlerini aşırı gerilim ve aşırı akıma karşı koruyan çeşitli koruma yöntemleri kullanılmaktadır. Rotor crowbar devreleri günümüzde RES'lerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Gerilim düştüğünde rotor dönüştürücünün bağlantısı kesilir, crowbar koruma devresi rotor devresine paralel olarak bağlanır. Crowbar devresi crowbar dirençleri ve çift yönlü anahtarlardan oluşur. Bir arıza sırasında, crowbar direnci yardımıyla arıza akımına yeni bir yol sağlar ve dönüştürücüleri korur, arızanın giderilmesinden sonra crowbar devre dışı bırakılır ve rotor tarafı dönüştürücüsü tekrar devreye girer (86). Arıza meydana geldiğinde crowbarın devreye girme süresi ve arıza giderildiğinde crowbarın devre dışı kalma süresinin kısa olması RES'nin uygulanabilirliği, uzun ömürlülüğü ve sağlamlığı açısından oldukça önemlidir. Bu süreler ise crowbar devresini kontrol eden denetleyicinin performansına bağlıdır. Bu tezde bu süreyi en aza indirmek amacıyla crowbar devresini kontrol etmek için bulanık mantık denetleyicisi eklenmiştir. Matlab/Simulink'te tasarlanan ÇBAJ tabanlı RES'nin crowbar koruma devresi Şekil 5.15'te gösterilmiştir.

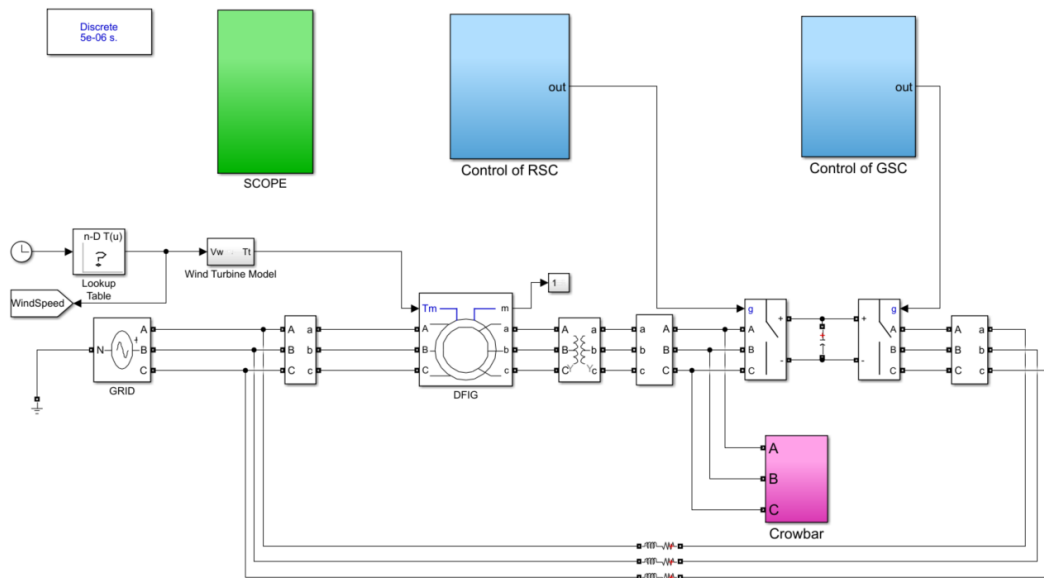


Şekil 5.15. Tasarlanan RES'nin Crowbar Koruma Devresi

Crowbar yardımıyla, asimetrik ve simetrik gerilim düşüşleri sırasında aşırı akım emilir. Önerilen şebeke bağlantılı ÇBAJ tabanlı RES'in HSYB kabiliyetini artırmak için crowbar devresine bulanık mantık denetleyicisi eklenmiştir. Crowbar anahtarı bulanık mantık denetleyici yardımıyla kontrol edilir.

5.10 Tasarlanan Sistemin Simülasyonu

Matlab/Simulink kullanılarak RES analiz edilirken, rüzgar hızı profili olarak Türkiye'deki Edremit/Balıkesir bölgesinin rüzgar hızı verileri kullanılmıştır. Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayınlanan Edremit/Balıkesir bölgesi rüzgar enerjisi potansiyeli atlası raporu incelenmiştir. Rapora göre bu bölgede iletim geriliminin 154 kV olduğu ve bölge için en uyumlu jeneratör modelinin Nordex N90/2,5 MW olduğu görülmüştür. Matlab/Simulink'te tasarlanan sistemden gerçekçi ve uygulanabilir sonuçlar elde etmek için gerçek rüzgar profilinin kullanılması ve türbin modelinin gerçek parametrelerinin kullanılması gibi kurulum kriterlerine göre RES tasarlanmıştır. Matlab/Simulink ortamında RES tasarlanırken bir önceki bölümde tasarlanan bloklar kullanılmıştır. Matlab/Simulink ortamında tasarlanan RES Şekil 5.16'de gösterilmiştir.



Şekil 5.16. Matlab/Simulink'te Oluşturulan ÇBAJ Tabanlı RES

Tasarlanan ÇBAJ tabanlı RES, ÇBAJ modeli, RTD, ŞTD, şebeke, RTD'nin kontrolü, ŞTD'nün kontrolü ve crowbar koruma devresi bloklarından oluşmaktadır. ŞTD DA bara gerilimini kontrol ederken, RTD ÇBAJ tarafından üretilen gücü, ÇBAJ'nin elektromanyetik torkunu kontrol etmektedir. Crowbar bloğu sayesinde RTD ve rotor sargıları aşırı akım ve aşırı gerilime karşı korunmaktadır. Matlab/Simulink kütüphanesinde bulunan asenkron makine modeli, gerçek ÇBAJ parametreleri kullanılarak tasarlanan RES'e eklenmiştir.

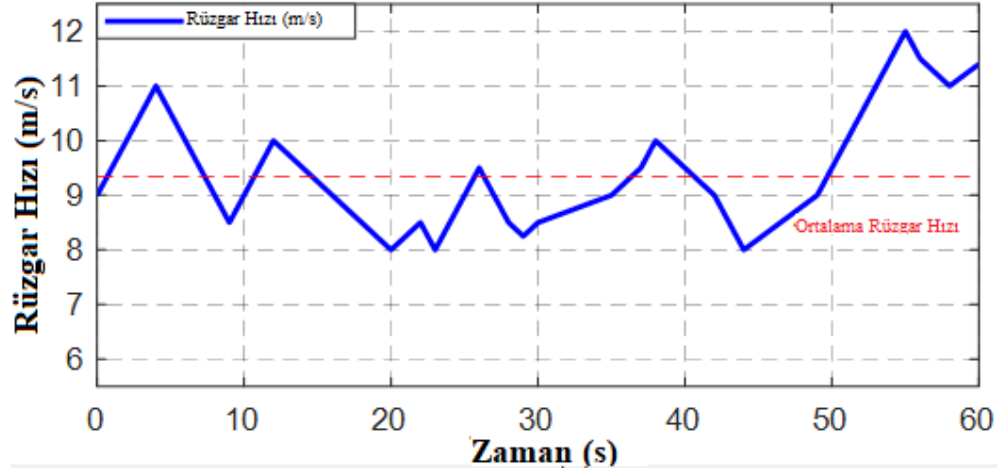
Bu tez çalışmasında tasarlanan sistemin simülasyon testleri 2 aşamadan oluşmaktadır. Öncelikle sistemin değişken rüzgar hızına göre performansı incelenecek. Ardından sistemin şebekede meydana gelen simetrik ve asimetrik gerilim düşüşlerine karşı performansı incelenecektir.

5.10.1 Değişken Rüzgar Hızı Performansı

Bu tez çalışmasının sonuçlarının geçerliliğini ve uygulanabilirliğini artırmak için, Türkiye'nin en yüksek rüzgar potansiyeline sahip Edremit/Balıkesir bölgesinin gerçek rüzgar hızı verileri referans rüzgar hızı olarak kullanılmıştır. Gerçek rüzgar hızı profilini rüzgar hızı değeri olarak RES'e uygulamak için Matlab/Simulink'teki lookup table bloğu kullanılmıştır.

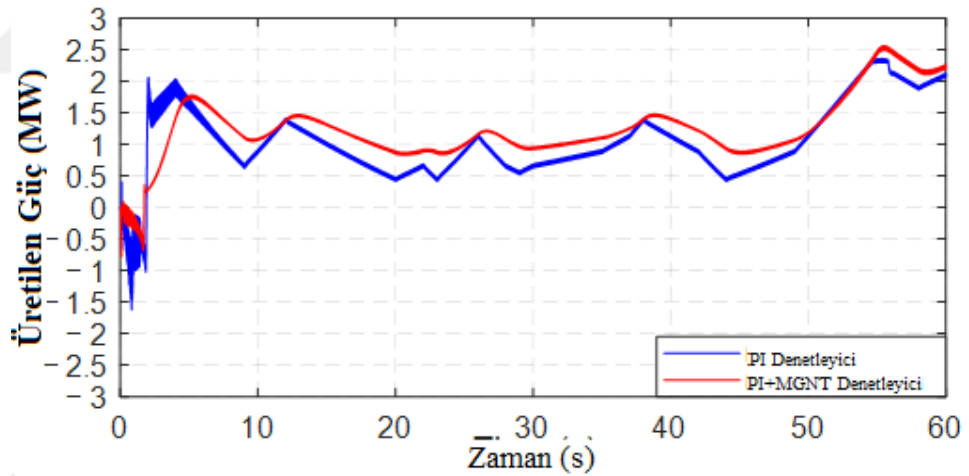
İlk olarak, şebeke bağlantılı RES, hem rotor hem de şebeke tarafı dönüştürücülere uygulanan geleneksel bir PI denetleyicisi ile tasarlanmıştır. Daha sonra, sistemin tepki süresini artırmak ve üretilen gücü bu çalışmada kullanılan ÇBAJ'nin güç eğrisine yakalamak için rotor tarafı dönüştürücüsüne MGNT denetleyicisi eklenmiştir. RES gerçek rüzgar hızı profilinde test edilmiştir. Üretilen güç, DA bara gerilimi, şebeke akımı ve sistemin tepki süresi parametreleri elde edilmiştir. Geleneksel PI denetleyici ve MGNT ile önerilen PI denetleyiciden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu bölümde, test sonuçlarının karşılaştırılması ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Türkiye'nin Edremit/Balıkesir bölgesinde 12 Ocak günü sabah 09.00'da ölçülen gerçek rüzgar hızı profili Şekil 5.17'de gösterilmiştir. Bu hız profilinde ortalama hız 9.4 m/s'dir.



Şekil 5.17. Gerçek Rüzgar Profili (9.4 m/s ortalama hızda)

Hem PI denetleyici hem de MGNT denetleyicili PI için bu hız profilinde üretilen aktif güç grafikleri Şekil 5.18'de gösterilmiştir.

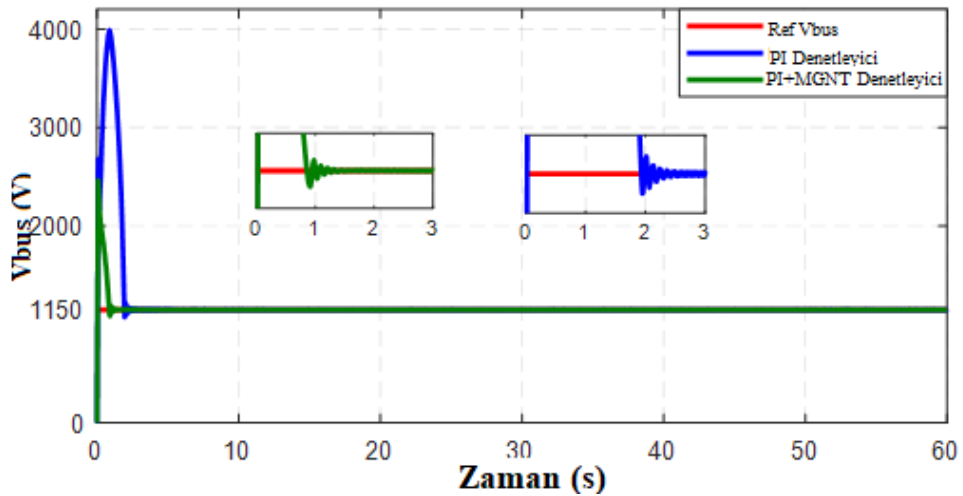


Şekil 5.18. ÇBAJ Tarafından Üretilen Güç

Önerilen sistemimizin rüzgar hızında meydana gelen değişimlere karşı hızlı tepki vermesi ve aynı zamanda kullanılan jeneratörün güç eğrisine uyumlu gücü üretebilmesi gerekmektedir. Şekil 5.5'te verilen jeneratör güç eğrisine göre sistem çalışırken mevcut rüzgar hızına denk gelen güç görülmektedir. Bu güç değeri jeneratörün üretmesi gereken referans güç değeri olarak kabul edilir.

Şekilde görüldüğü üzere, ÇBAJ testin başlangıç koşulunda motor modunda çalışmaktadır ve şebekeden güç çekmektedir. Geleneksel PI denetleyicili sistem, motor çalışma modunda önerilen PI+MGNT denetleyicili sistemden daha fazla güç tüketmektedir. PI denetleyicili sistem maksimum 1.6 MW güç tüketirken, önerilen PI+MGNT denetleyicili sistem maksimum 0.7 MW güç tüketmektedir. Ardından, her iki sistem de güç üretmeye başlar. Her iki denetleyici için rüzgar hızına göre üretilen güç karşılaştırıldığında, MGNT denetleyicili RES'nin ürettiği gücün ÇBAJ'ün güç eğrisi ile tam uyumlu olduğu görülmüştür. PI+MGNT denetleyicili sisteme göre ise değişken rüzgar hızında güç eğrisine göre istenen güç değeri üretilmiştir. ÇBAJ'ün güç eğrisine göre, sistem 12 m/s rüzgar hızında 2.5 MW güç üretmelidir. Simülasyonun 55. Saniyesinde yani rüzgar hızının 12 m/s'ye çıktığında jeneratörün 2.5 MW güç üretmesi gerekmektedir. Önerilen PI+MGNT denetleyici sayesinde 2.5 MW nominal güç üretilirken, geleneksel PI denetleyici kullanılarak 2.35 MW güç üretilmiştir. Ayrıca, önerilen yöntem ile daha düzgün bir güç eğrisi elde edilmiştir. Önerilen kontrol yönteminin geleneksel PI denetleyicili sisteme göre daha iyi sonuçlar verdiği açıkça görülmektedir.

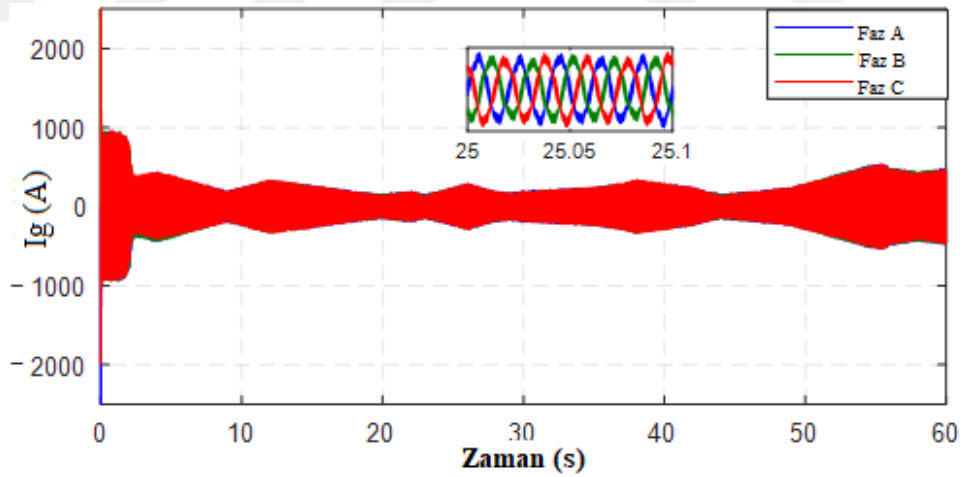
Tasarlanan sistem DA bara gerilimleri açısından da analiz edilmiştir. Tasarlanan sistemin hem geleneksel PI denetleyici hem de önerilen PI+MGNT denetleyici için değişken rüzgar hızında DA bara gerilimi grafiği Şekil 5.19'da verilmiştir.



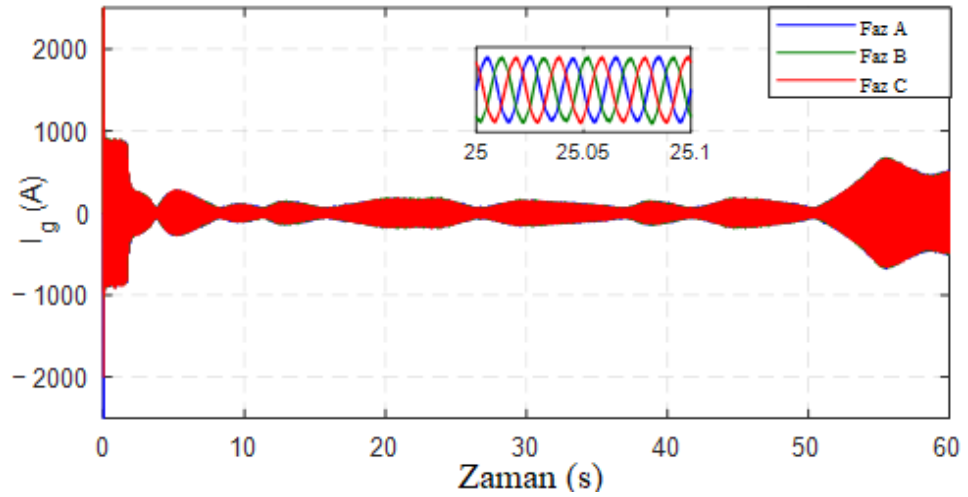
Şekil 5.19. RES'nin DA Bara Gerilimi

Tasarlanan sistemin referans DA bara gerilimi 1150 V'tur. PI denetleyicili sistem referans DA bara gerilimine 1.93 s'de ulaşmış ve 2.4 s'de kararlı hale gelmiştir. PI+MGNT denetleyicili sistem ise referans DA bara gerilimine 0.8 s'de ulaşmış ve 1.1 s'de kararlı hale gelmiştir. MGNT denetleyici içeren sistemin 1150 V DA bara referans gerilimine daha düşük bir aşım ile daha hızlı ulaştığı görülmektedir. RES'nin güvenliği açısından, önerilen PI+MGNT denetleyici daha uygulanabilir ve uygun sonuçlar sağlamaktadır. Literatürde bu alanda yapılmış diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında, önerilen PI+MGNT denetleyicili ÇBAJ tabanlı RES, gerçek değişken rüzgar hızlarında daha hızlı bir tepki süresi ile referans DA bara gerilimini takip etmektedir (87–89). Ayrıca, RES tarafından üretilen güç ÇBAJ'ün güç eğrisi ile daha uyumludur.

Ayrıca, önerilen sistem şebeke 3-faz akımları açısından da analiz edilmiştir. Geleneksel PI denetleyici ve önerilen PI+MGNT denetleyici için Şekil 5.17'de verilen gerçek rüzgar hızı profilindeki şebeke akım grafikleri sırasıyla Şekil 5.20 ve Şekil 5.20'da ifade edilmiştir



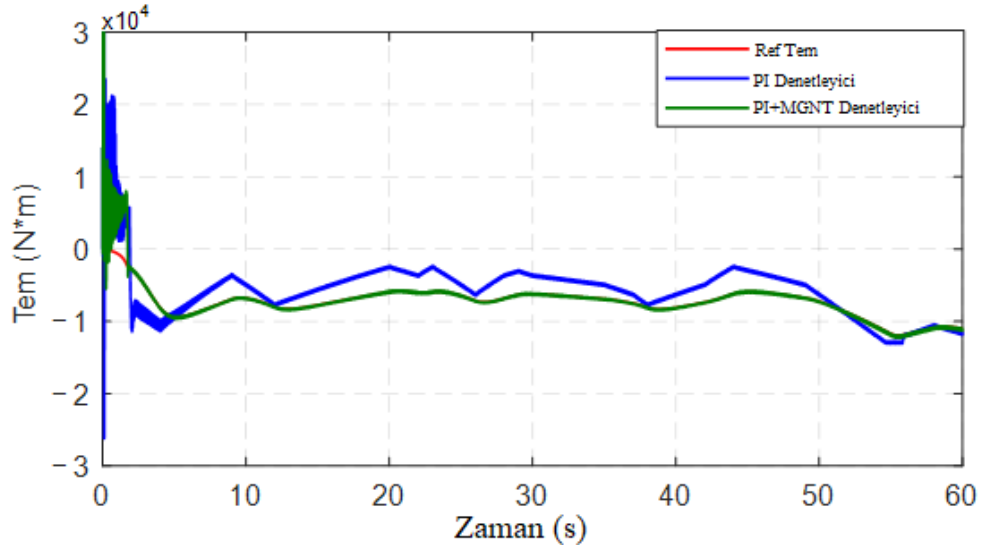
Şekil 5.20. PI Denetleyicili RES'nin Şebeke Akımları



Şekil 5.21. Önerilen Denetleyicili RES'nin Şebeke Akımları

Mevcut grafiklerden görüldüğü gibi, PI denetleyicili sistemin faz akımları başlangıç koşulunda önerilen PI+MGNT denetleyicili sistemden 95 A daha yüksektir. Sonuçlara göre, PI+MGNT denetleyicili RES'nin tepki süresi, rüzgar hızının değişimine göre PI denetleyicili RES'nin tepki süresinden daha iyidir. Önerilen PI+MGNT denetleyicili sistem geleneksel PI denetleyicili sisteme göre daha düzgün sinüzoidal şebeke akımları elde edilmektedir. Şebeke akımları incelenerek, değişken rüzgar hızları altında PI+MGNT denetleyicili sistemin tepki süresinin PI denetleyicili sistem tepki hızından daha iyi olduğu gösterilmiştir.

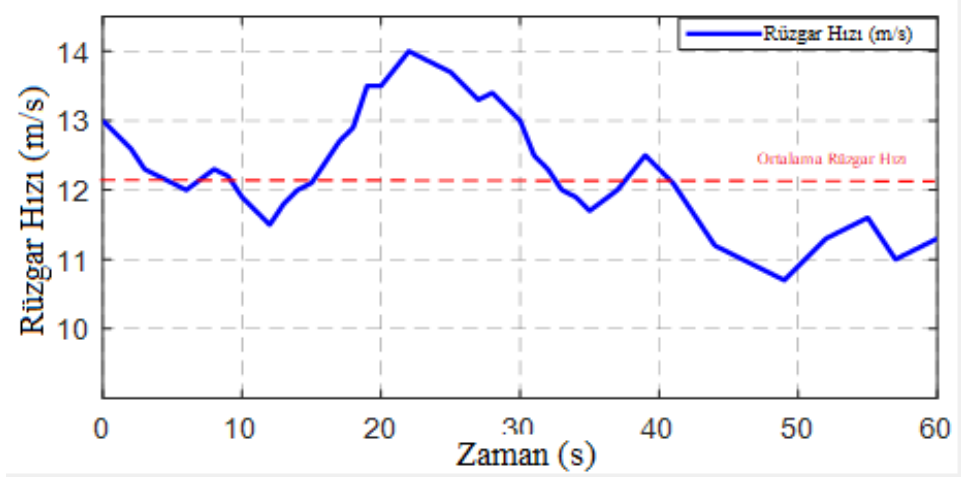
Ayrıca, önerilen sistem elektromanyetik tork (T_{em}) açısından da analiz edilmiştir. Hem PI denetleyici hem de PI+MGNT denetleyici için Şekil 5.17'de verilen hız profili altında elektromanyetik tork (T_{em}) grafiği Şekil 5.22'de gösterilmiştir.



Şekil 5.22. ÇBAJ'ün Elektromanyetik Tork (T_{em}) Grafiği

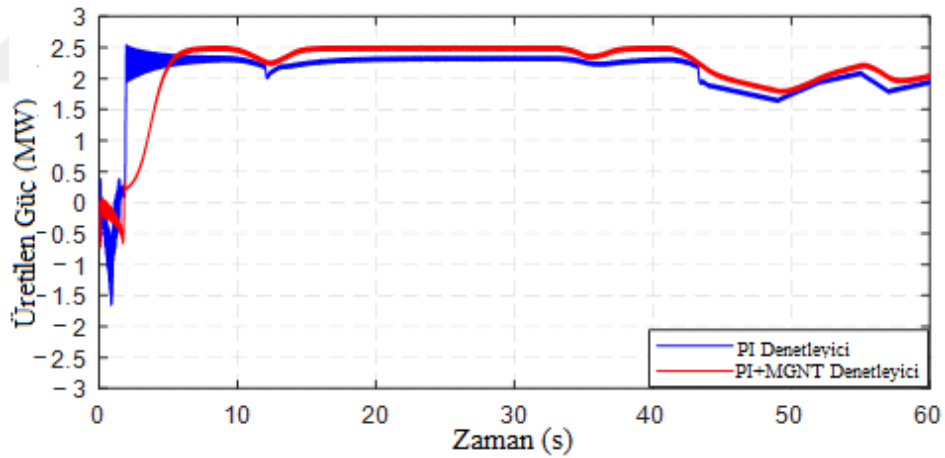
ÇBAJ'ün T_{em} 'i, geleneksel PI denetleyici ile karşılaştırıldığında PI+MGNT denetleyici yardımıyla referans torka daha hızlı ulaşmıştır. Referans tork değeri PI+MGNT denetleyici ile başarılı bir şekilde takip edilmiştir. Ayrıca önerilen yöntem ile daha düzgün bir T_{em} eğrisi elde edilmiştir. Elektromanyetik tork grafiğinin düzgünlüğü önerilen denetleyicinin uygulanabilirliği açısından önemlidir. T_{em} incelenerek, değişken rüzgar hızları altında PI+MGNT denetleyicili sistemin tepki süresinin PI denetleyicili sisteme göre daha iyi olduğu gösterilmiştir.

Önerilen sistem, bu çalışmada kullanılan ÇBAJ'ün nominal hızı altında da test edilmiştir. Türkiye'nin Edremit/Balıkesir bölgesinde 20 Mart günü saat 12.30'da ölçülen gerçek rüzgar hızı profili Şekil 5.23'de gösterilmiştir. Bu hız profilinde ortalama hız 12.15 m/s'dir.



Şekil 5.23. Gerçek Rüzgar Profili (12.15 m/s ortalama hızda)

Hem PI denetleyici hem de PI+MGNT denetleyici için bu hız profilinde üretilen aktif güç grafikleri Şekil 5.24'te gösterilmektedir.

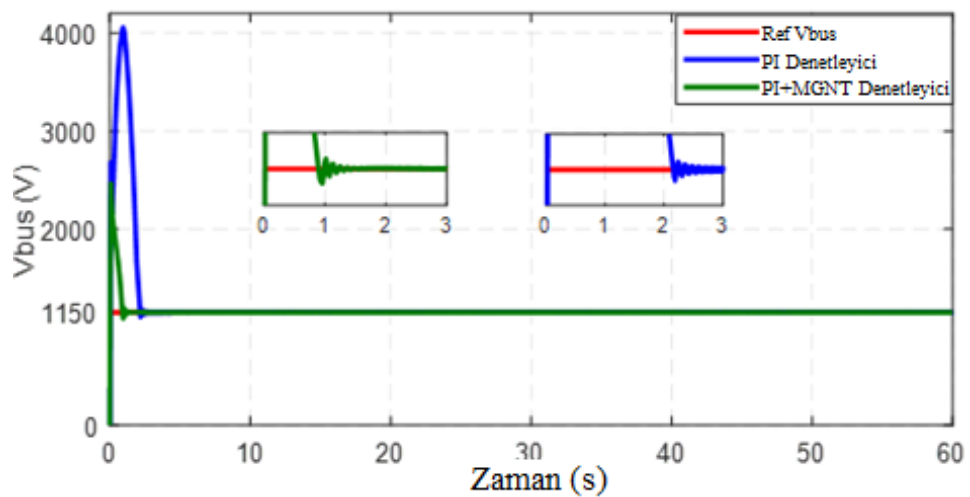


Şekil 5.24. ÇBAJ Tarafından Üretilen Güç

Önerilen sistemimizin rüzgar hızında meydana gelen değişimlere karşı hızlı tepki vermesi ve aynı zamanda kullanılan jeneratörün güç eğrisine uyumlu gücü üretebilmesi gerekmektedir. Şekil 5.5'te verilen jeneratör güç eğrisine göre sistem çalışırken mevcut rüzgar hızına denk gelen güç görülmektedir. Bu güç değeri jeneratörün üretmesi gereken referans güç değeri olarak kabul edilir. Şekilde görüldüğü üzere, ÇBAJ başlangıçta koşulunda motor modunda

çalışmaktadır ve şebekeden güç çekmektedir. Geleneksel PI denetleyicili sistem, motor çalışma modunda önerilen PI+MGNT denetleyicili sistemden daha fazla güç tüketmektedir. PI denetleyicili sistem maksimum 1.7 MW güç tüketirken, önerilen PI+MGNT denetleyicili sistem maksimum 0.75 MW güç tüketmektedir. Daha sonra her iki sistem de güç üretmeye başlamıştır. Her iki denetleyici için rüzgar hızına göre üretilen güç karşılaştırıldığında, MGNT denetleyicili RES'nin ürettiği gücün ÇBAJ'ün güç eğrisi ile tam uyumlu olduğu görülmüştür. PI+MGNT denetleyicili sisteme göre ise değişken rüzgar hızında güç eğrisine göre istenen güç değeri üretilmiştir. ÇBAJ güç eğrisine göre, sistem 12 m/s rüzgar hızında ve daha yüksek rüzgar hızlarında sabit 2.5 MW güç üretmelidir. Önerilen PI+MGNT denetleyici ile 2.5 MW nominal güç üretilirken, 12 m/s rüzgar hızı ve daha yüksek rüzgar hızlarında geleneksel PI denetleyici kullanılarak 2.35 MW güç üretilmiştir. Ayrıca, önerilen yöntem ile daha düzgün bir güç eğrisi elde edilmiştir. Önerilen denetleyici yönteminin geleneksel PI denetleyicili sisteme göre daha iyi sonuçlar verdiği açıkça görülmektedir.

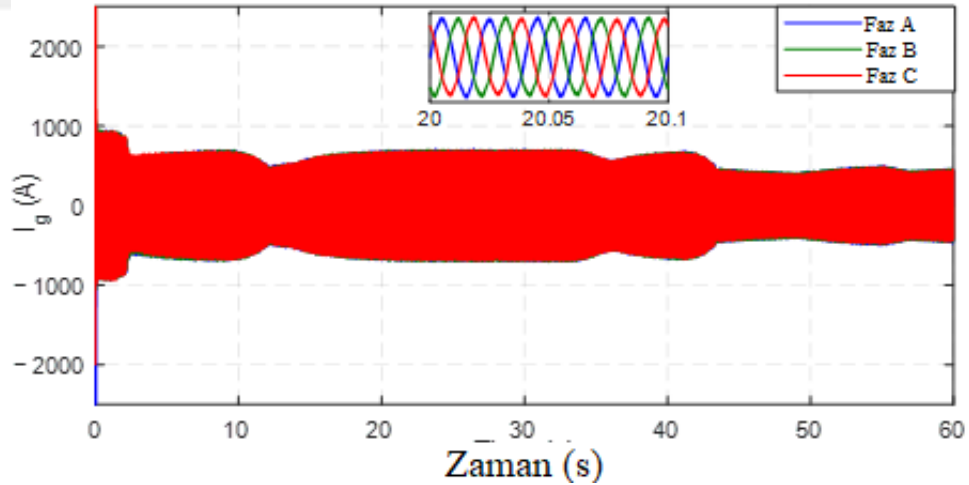
Ayrıca, tasarlanan sistem DA bara gerilimleri açısından da analiz edilmiştir. Değişken rüzgar hızında hem geleneksel PI denetleyici hem de önerilen PI+MGNT denetleyici için tasarlanan sistemin DA bara gerilimi grafiği Şekil 5.25'te gösterilmiştir.



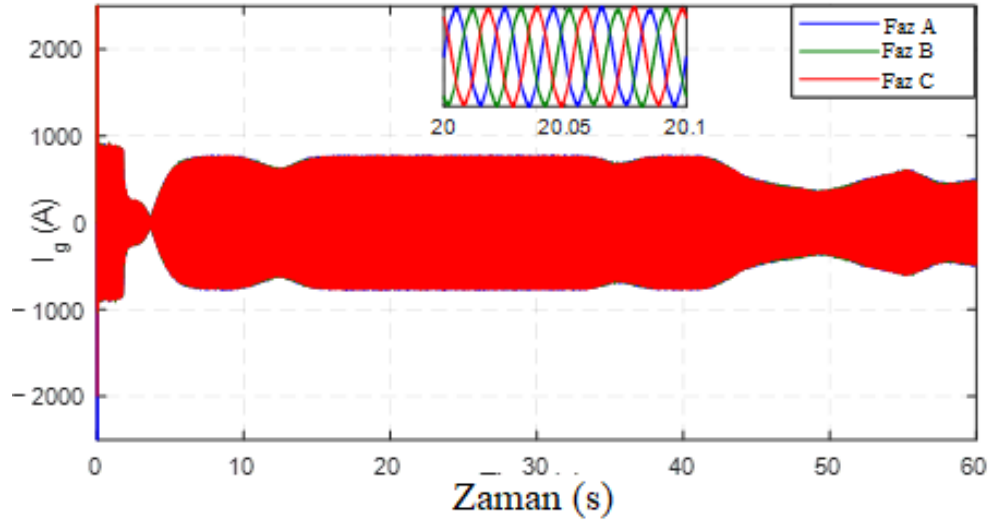
Şekil 5.25. RES'nin DA Bara Gerilimi

Tasarlanan sistemin referans DA bara gerilimi 1150 V'tur. PI denetleyicili sistem referans DA bara gerilimine 2.15 s'de ulaşmış ve 2.4 s'de kararlı hale gelmiştir. Ayrıca, PI+MGNT denetleyicili sistem DA bara gerilimine 0.86 s'de ulaşmış ve 1.1 s'de kararlı hale gelmiştir. PI denetleyicinin gerilim aşımı PI+MGNT denetleyiciye kıyasla oldukça büyüktür. Bu aşım, yüksek gerilim koruma elemanları ile önlenabilir. MGNT denetleyici kullanan sistemin 1150 V DA bara referans gerilimine daha düşük bir aşım ile daha hızlı ulaştığı gözlemlenmiştir. RES'nin güvenliği açısından, önerilen PI+MGNT denetleyici daha uygulanabilir ve uygun sonuçlar vermektedir. Tasarlanan ÇBAJ tabanlı RES'nin gerçek değişken rüzgar hızında referans DA bara gerilimini hızlı bir tepki süresi ile takip ettiği görülebilir.

Ayrıca, önerilen sistem şebeke 3-faz akımları açısından analiz edilmiştir. Geleneksel PI denetleyici ve önerilen PI+MGNT denetleyici için Şekil 5.23'te verilen gerçek rüzgar hızı profilindeki şebeke akım grafikleri sırasıyla Şekil 5.26 ve Şekil 5.27'de ifade edilmiştir.



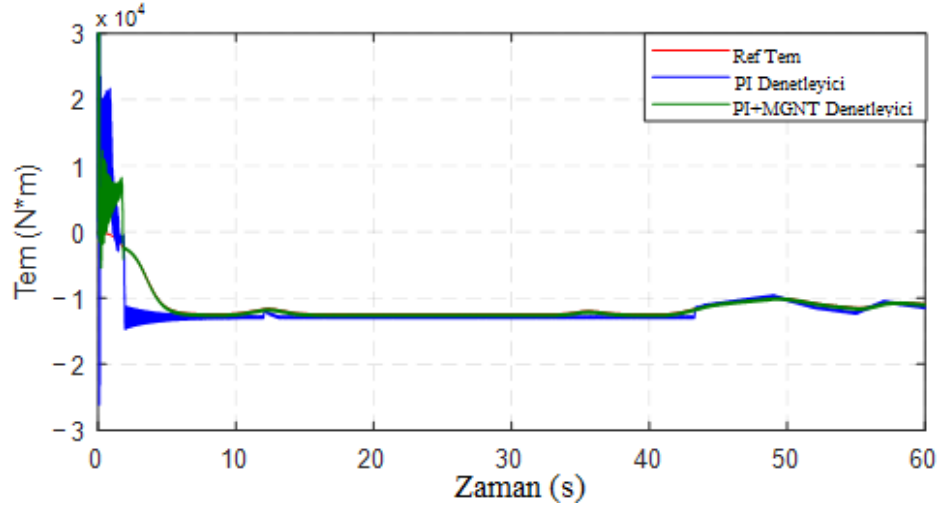
Şekil 5.26. PI Denetleyicili RES'nin Şebeke Akımları



Şekil 5.27. Önerilen Denetleyicili RES'nin Şebeke Akımları

Şebeke akım grafikleri incelendiğinde, PI denetleyicili sistemin faz akımları başlangıç koşulunda önerilen PI+MGNT denetleyicili sistemden 145 A daha yüksektir. Grafiklere göre, rüzgar hızının değişimine göre PI+MGNT denetleyicili RES'nin tepki süresi PI denetleyicili RES'nin tepki süresinden daha iyidir. Şebeke akımları incelenerek, değişken rüzgar hızları altında PI+MGNT denetleyicili RES'nin tepki süresinin PI denetleyicili sistemden daha iyi olduğu gösterilmiştir.

Ayrıca, önerilen sistem elektromanyetik tork (T_{em}) açısından da analiz edilmiştir. Hem PI denetleyici hem de PI+MGNT denetleyici için Şekil 5.23'te verilen hız profili altındaki elektromanyetik tork (T_{em}) grafiği Şekil 5.28'te gösterilmiştir.



Şekil 5.28. ÇBAJ'ün Elektromanyetik Tork (T_{em}) Grafiği

ÇBAJ'ün T_{em} 'i, geleneksel PI denetleyici ile karşılaştırıldığında PI+MGNT denetleyici yardımıyla referans torka daha hızlı ulaşmıştır. Referans tork değeri PI+MGNT denetleyici ile başarılı bir şekilde takip edilmiştir. Ayrıca önerilen yöntem ile daha düzgün bir T_{em} eğrisi elde edilmiştir. Elektromanyetik tork grafiğinin düzgünlüğü önerilen denetleyicinin uygulanabilirliği açısından önemlidir. T_{em} grafiği incelenerek, değişken rüzgar hızları altında PI+MGNT denetleyicili RES'nin tepki süresinin PI denetleyicili RES'ne göre daha iyi olduğu gösterilmiştir.

Grafiklerde gösterilen simülasyon sonuçlarını daha anlaşılır kılmak için 20 s'deki test sonuçlarının karşılaştırması Tablo 5.2'de verilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi, PI+MGNT denetleyicisini DA bara geriliminin yakınsama süresi, üretilen gücün güç eğrisi ile tam uyumu ve daha yüksek elektromanyetik tork açısından daha uygulanabilir ve daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

Tablo 5.2. Karşılaştırma Sonuçları (20. saniyede)

		Geleneksel PI Denetleyici	PI+MGNT Denetleyici	Birim
9.40 m/s ortalama rüzgar hızı	Üretilen güç	0.5	0.8	MW
	Elektromanyetik tork	2300	6100	Nm
	Yakınsama süresi	1.93	0.8	s
12.15 m/s ortalama rüzgar hızı	Üretilen güç	2.35	2.5	MW
	Elektromanyetik tork	11,400	12,100	Nm
	Yakınsama süresi	2.15	0.86	s

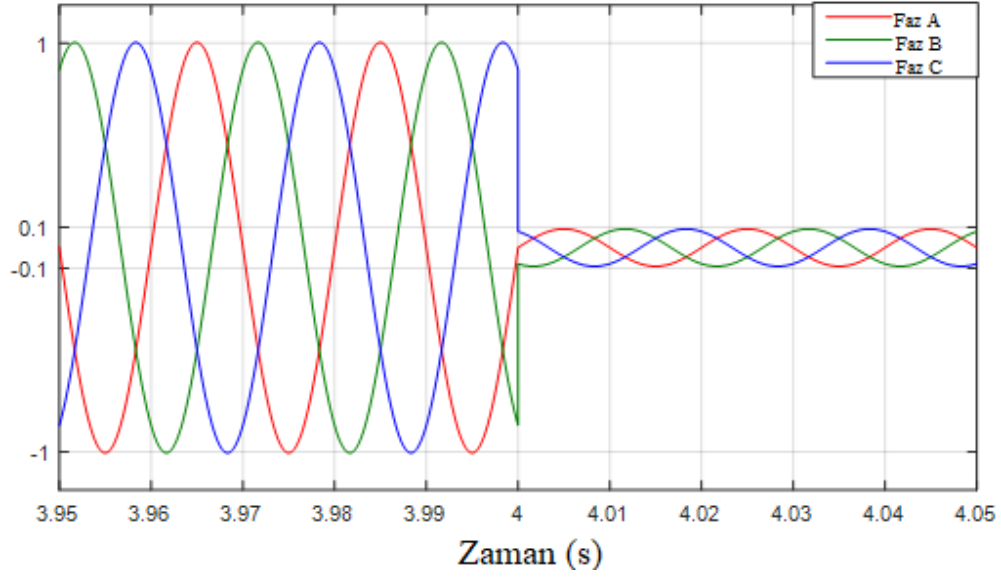
5.10.2 Tasarlanan Sistemin Gerilim Düşümü Sırasında Analizi

Önerilen sistemin uygulanabilirliğini ve tutarlılığını ortaya koymak için Matlab/Simulink ortamında kurulan sistemin performansı arıza sonrası yeniden bağlanma kabiliyeti açısından da incelenmiştir. Tercih edilen ÇBAJ'ün güç eğrisine göre 12 m/s rüzgar hızında 2.5 MW güç üretmektedir. Tasarlanan RES'in HSYB kabiliyeti simetrik/asimetrik şebeke arızaları altında analiz edilmiştir. Öncelikle, tasarlanan ÇBAJ tabanlı RES'nin rotor tarafına bir crowbar koruma devresi eklenmiştir. Önerilen sistem daha sonra $t=4$ s'de 200 ms'lik, 3 fazlı, %90 simetrik gerilim düşüşüne maruz bırakılmış ve RES'nin HSYB kabiliyetini artırmak için crowbar devresine BMD uygulanmıştır. Sonrasında, sisteme $t=3$ s'de 700 ms'lik 2 faz-toprak asimetrik gerilim düşüşü uygulanmış ve simetrik/asimetrik şebeke arızalarının RES'nin HSYB kabiliyeti üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

5.10.3 Simetrik Gerilim Düşümü

İlk durumda, 4s'de 200ms boyunca meydana gelen %90 simetrik gerilim düşümü sırasında önerilen RES'nin HSYB kabiliyeti incelenmiştir. Önerilen ÇBAJ tabanlı RES simetrik şebeke arızasının ciddi etkilerine karşı korumak için RES'nin rotor tarafına bir crowbar koruma devresi eklenmiştir. Daha sonra, sistemin HSYB kabiliyetini artırmak için crowbara BMD bloğu eklenmiştir. DA bara gerilimi (V_{bus}), terminal gerilimi ($V_{terminal}$), elektromanyetik tork (T_{em}), şebeke akımı (I_g) ve crowbar akımı ($I_{crowbar}$) sonuçları elde edilmiştir. BMD'siz ÇBAJ sonuçları ile BMD'li ÇBAJ sonuçları karşılaştırılmıştır.

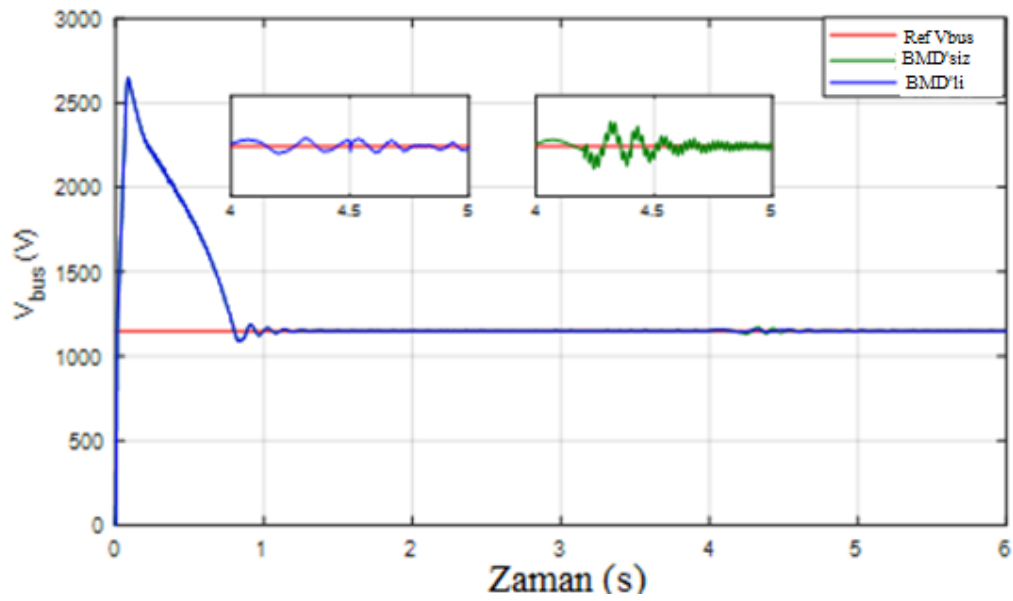
Önerilen RES'e uygulanan simetrik gerilim düşümünün dalga şekli Şekil 5.29'te sunulmuştur.



Şekil 5.29. Simetrik Gerilim Düşümünün Dalga Şekli

Önerilen RES'nin HSYB yeteneği simetrik gerilim düşümü altında incelenmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, $t=4$ s %90 simetrik gerilim düşümü meydana gelmiştir.

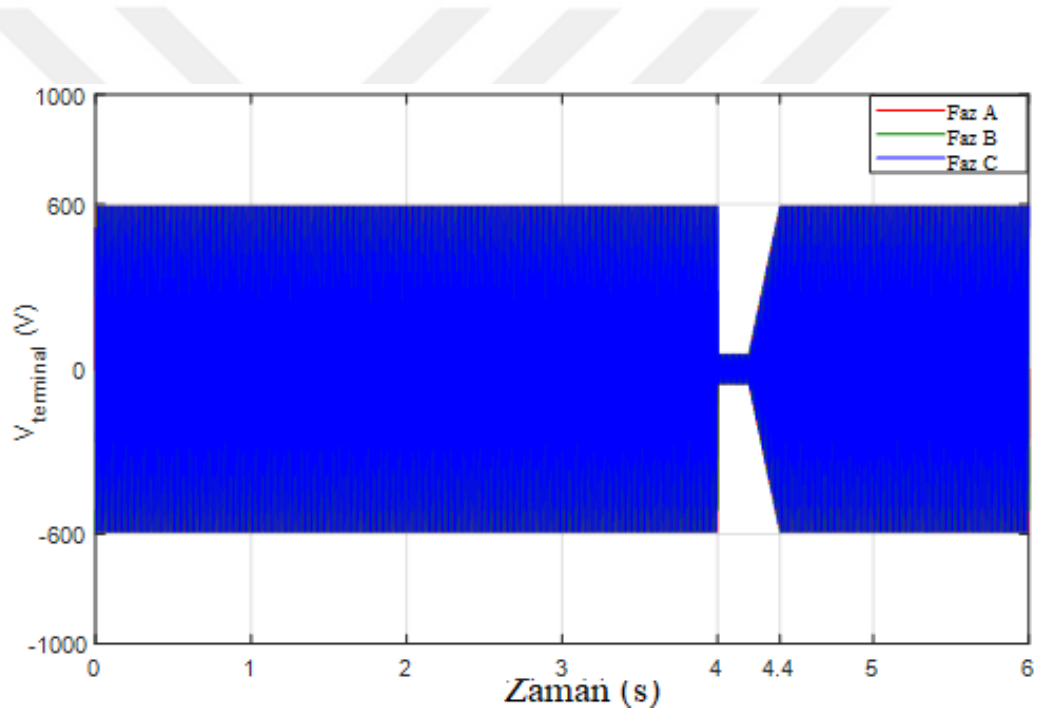
Önerilen BMD'siz ÇBAJ ve BMD'li ÇBAJ'ün 14 m/s rüzgar hızındaki V_{bus} grafiği Şekil 5.30'da verilmiştir.



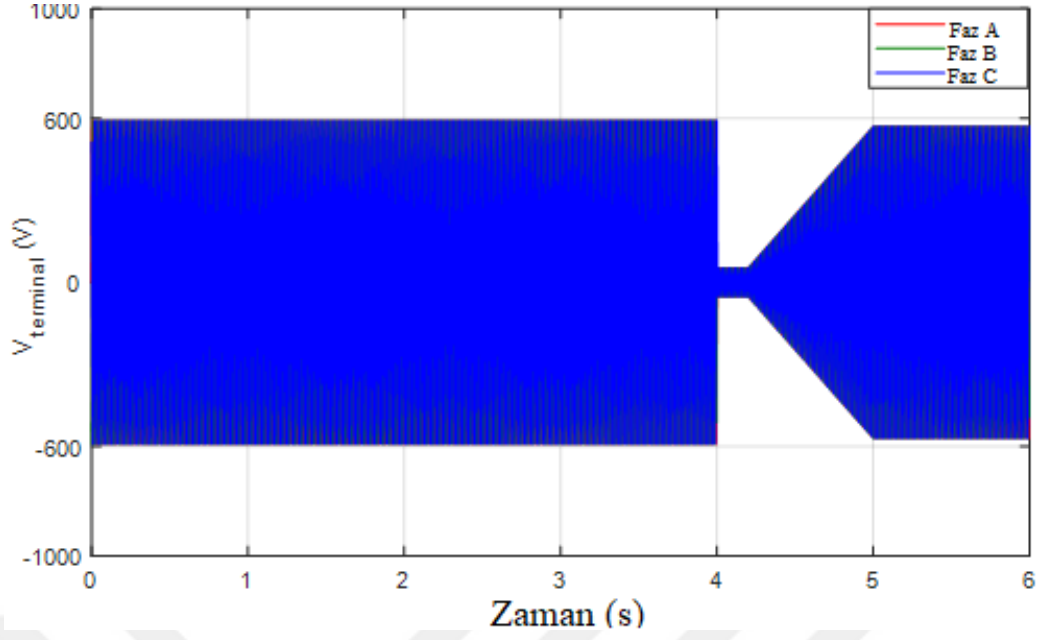
Şekil 5.30. Simetrik Gerilim Düşümü Altında V_{bus}

Önerilen sistemin referans V_{bus} değeri 1150 V'tur. Simetrik gerilim düşümü 4.2 s'de durduktan sonra BMD'siz ÇBAJ 4.8 s'de kararlı hale gelmiştir. Aynı zamanda, BMD'li ÇBAJ simetrik gerilim düşümünden sonra 4.6 s'de referans V_{bus} 'a ulaşmıştır. BMD'li ÇBAJ'ün referans V_{bus} 'a daha hızlı ulaştığı görülebilir. BMD'siz ÇBAJ'ün DA bara gerilim dalgalanması, BMD'li ÇBAJ'ün V_{bus} dalgalanmasından daha fazladır. Simülasyon sonuçları, BMD'li ÇBAJ's'ün V_{bus} açısından daha uygulanabilir olduğunu ortaya koymuştur.

Ayrıca, tasarlanan ÇBAJ tabanlı RES'nin terminal gerilimi de analiz edilmiştir. Önerilen BMD'li ÇBAJ ve BMD'siz ÇBAJ'ün ilgili $V_{terminal}$ grafikleri sırasıyla Şekil 5.31 ve Şekil 5.32'de sunulmuştur.



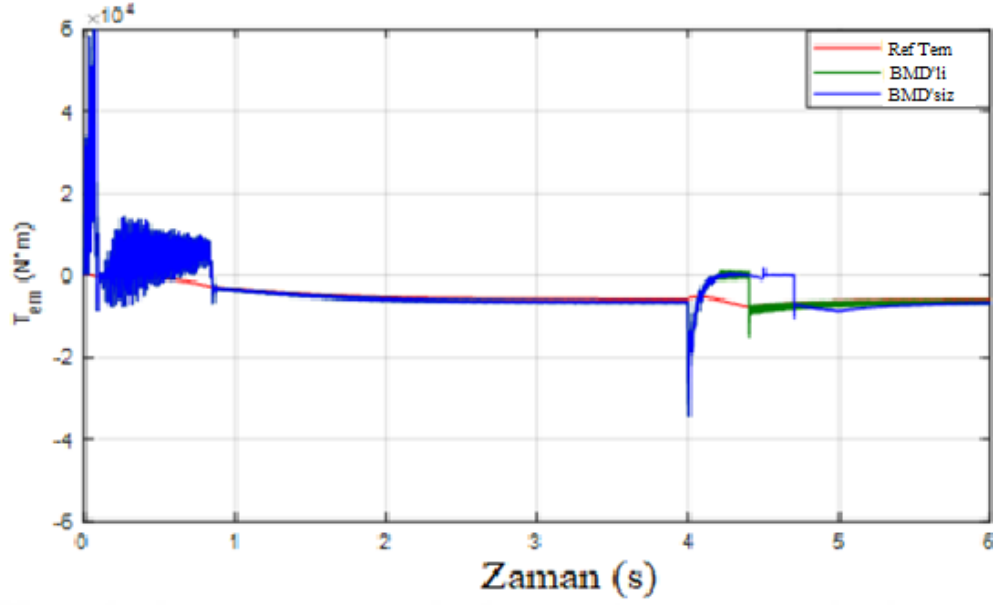
Şekil 5.31. BMD'li Sistemin Terminal Gerilimi



Şekil 5.32. BMD'siz Sistemin Terminal Gerilimi

Grafiklerden görüldüğü üzere, simetrik gerilim düşümü $t=4.2$ s'de ortadan kalktıktan sonra BMD'siz ÇBAJ referans V_{terminal} değerine $t=5$ s'de ulaşırken, BMD'li ÇBAJ istenen V_{terminal} değerine $t=4.4$ s'de ulaşmıştır. RES'nin toparlanma süresi, önerilen RES'nin uygulanabilirliği ve doğruluğu için çok önemlidir. BMD'li ÇBAJ, BMD'siz ÇBAJ'e göre daha hızlı toparlanmıştır. BMD'li ÇBAJ, terminal gerilimi açısından daha uygun sonuçlar ortaya koymuştur.

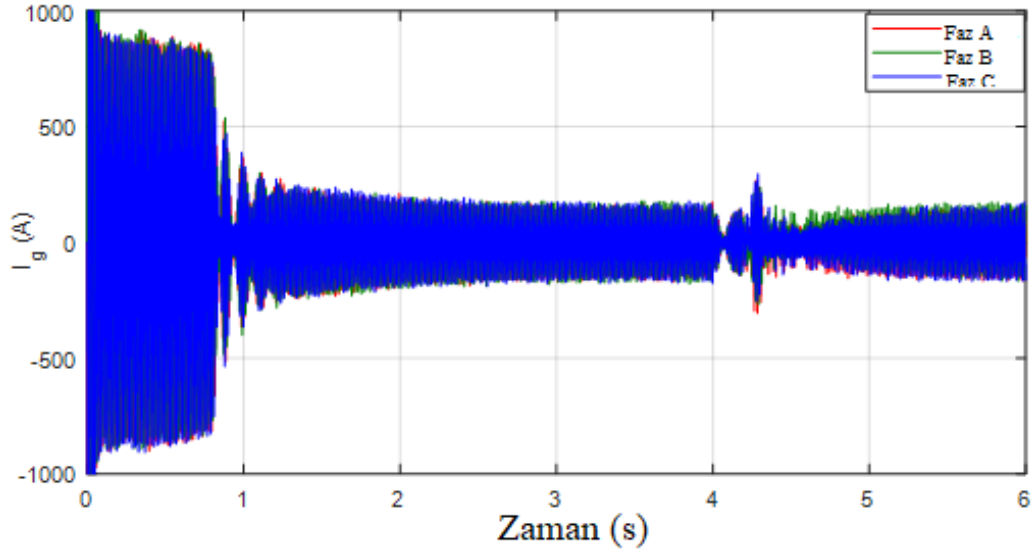
Tasarlanan RES'nin HSYB kabiliyeti elektromanyetik tork açısından da incelenmiştir. Önerilen BMD'siz ÇBAJ ve BMD'li ÇBAJ'ün 14 m/s rüzgar hızındaki T_{em} değeri Şekil 5.33'da gösterilmiştir.



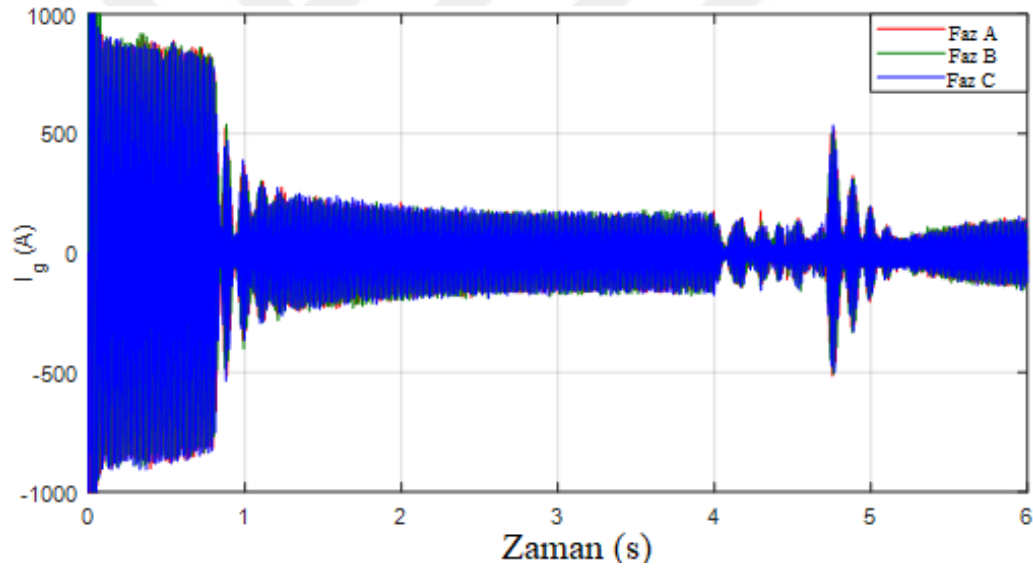
Şekil 5.33. ÇBAJ'ün Elektromanyetik Tork Grafiği

Simetrik gerilim düşümünden sonra referans elektromanyetik torka ulaşma süresi, önerilen ÇBAJ tabanlı RES'nin uygulanabilirliği ve geçerliliği için çok önemlidir. Önerilen ÇBAJ'ün elektromanyetik torku, BMD'siz ÇBAJ ile karşılaştırıldığında BMD sayesinde referans elektromanyetik tork değerine daha hızlı ulaşmıştır. Referans T_{em} de BMD yardımıyla düzgün bir şekilde takip edilmiştir. Simulasyon sonuçları, BMD ile önerilen ÇBAJ'ün T_{em} açısından da geçerli ve sağlam olduğunu göstermiştir.

Ayrıca, önerilen ÇBAJ tabanlı RES, şebeke akımı açısından da test edilmiştir. ÇBAJ'ün şebeke akım grafikleri Şekil 5.34 ve Şekil 5.35'de sunulmuştur.



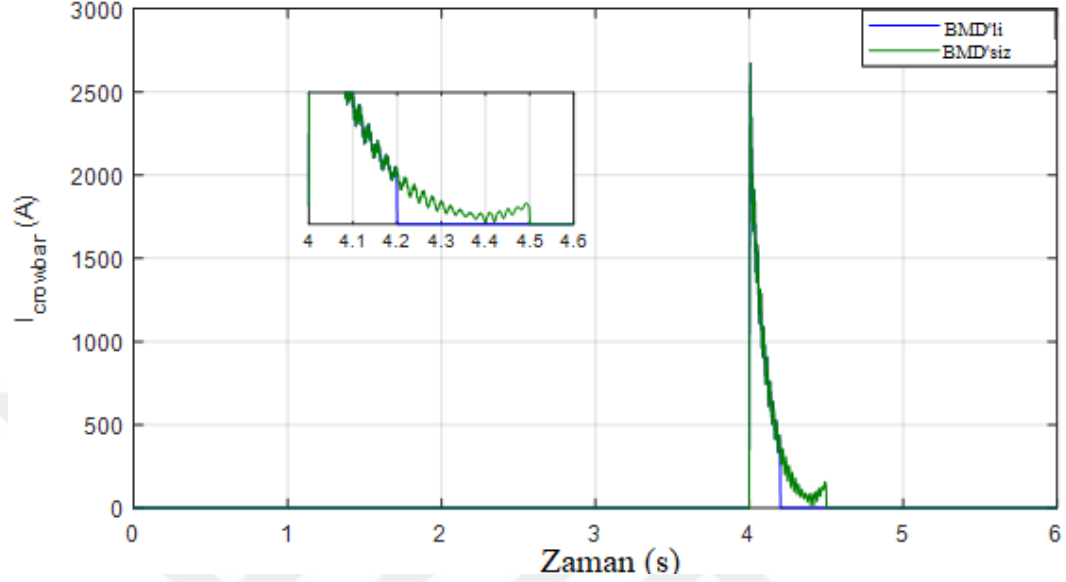
Şekil 5.34. BMD'li Sistemin Şebeke Akımı



Şekil 5.35. BMD'siz Sistemin Şebeke Akımı

Simetrik şebeke arızasından sonra BMD'siz ÇBAJ'ün şebeke akımları BMD'li ÇBAJ'den 150 A daha yüksektir. BMD'li ÇBAJ'ün tepki süresi, simetrik şebeke arızası altında BMD'siz ÇBAJ'ün tepki süresinden çok daha iyidir. Simetrik şebeke arızasından sonra şebeke akımının daha düşük aşımaya sahip olması, şebekeye bağlı RES için çok önemlidir. Grafikler açıkça göstermektedir ki BMD'li ÇBAJ şebeke akımı açısından daha geçerli sonuçlar sunmaktadır.

Önerilen sistem crowbar akımı açısından da incelenmiştir. BMD'li ÇBAJ ve BMD'siz ÇBAJ'ün crowbar akım grafiği Şekil 5.36'de yer verilmiştir.



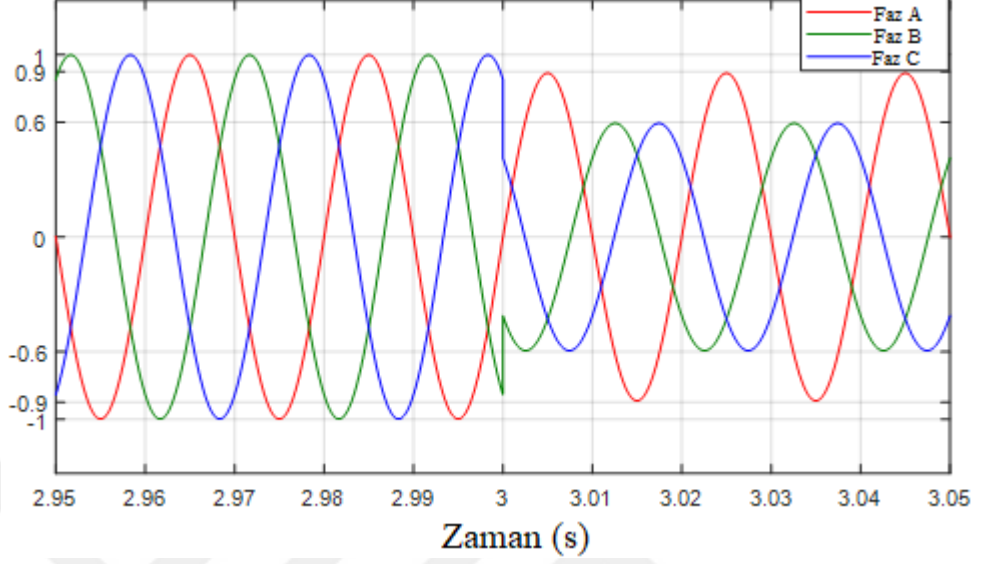
Şekil 5.36. Sistemin Crowbar Akımı

Gerilim düşümü sırasında, rotor sargıları, kapasitörler ve dönüştürücüler crowbar yardımıyla aşırı akıma karşı korunurken, arıza ortadan kalktıktan sonra crowbar devre dışı kalmıştır. BMD'li ÇBAJ ve BMD'siz ÇBAJ durumlarının her ikisinde de crowbar devresi arıza akımını başarılı bir şekilde absorbe etmiştir. BMD'li ÇBAJ'ün bağlantısı $t=4.2$ s'de kesilirken, BMD'siz ÇBAJ'ün bağlantısı $t=4.5$ s'de kesilmiştir. BMD yardımıyla, tasarlanan RES daha uygulanabilir sonuçlar sunmaktadır.

5.10.4 Asimetrik Gerilim Düşümü

Tasarlanan RES'nin güvenilirliğini ve uygulanabilirliğini kanıtlamak için sistemin HSYB kabiliyeti asimetrik gerilim düşüşü altında da test edilmiştir. RES'in asimetrik gerilim düşümü sırasındaki HSYB kabiliyeti, önerilen RES'nin doğruluğu ve uygunluğu için çok önemlidir. 2 faz-toprak asimetrik şebeke hatası, $t=3$ s'den itibaren 700 ms boyunca RES'e uygulanmıştır. Terminal gerilimi, elektromanyetik tork, DA bara gerilimi ve crowbar akımı sonuçları elde edilmiştir. BMD'li RES'nin ve BMD'siz RES'nin sonuçları karşılaştırılmıştır.

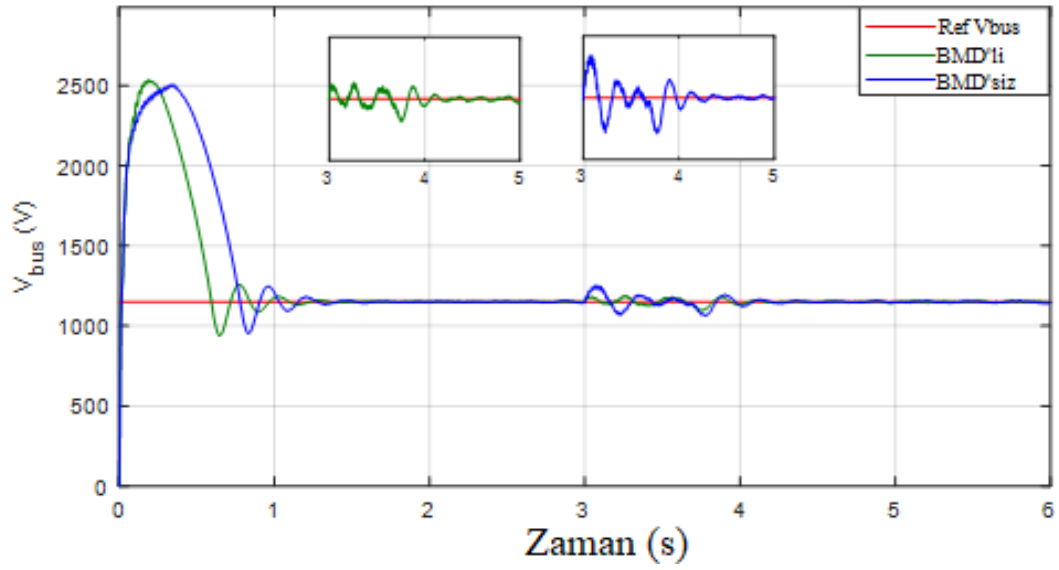
Önerilen RES'e uygulanan asimetrik gerilim düşümünün dalga şekli Şekil 5.37'te gösterilmiştir.



Şekil 5.37. Asimetrik Gerilim Düşümünün Dalga Şekli

RES'nin HSYB kabiliyeti asimetrik şebeke arızası altında da incelenmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, $t=3$ s'de asimetrik 2 faz-toprak gerilimi düşümü meydana gelmiştir.

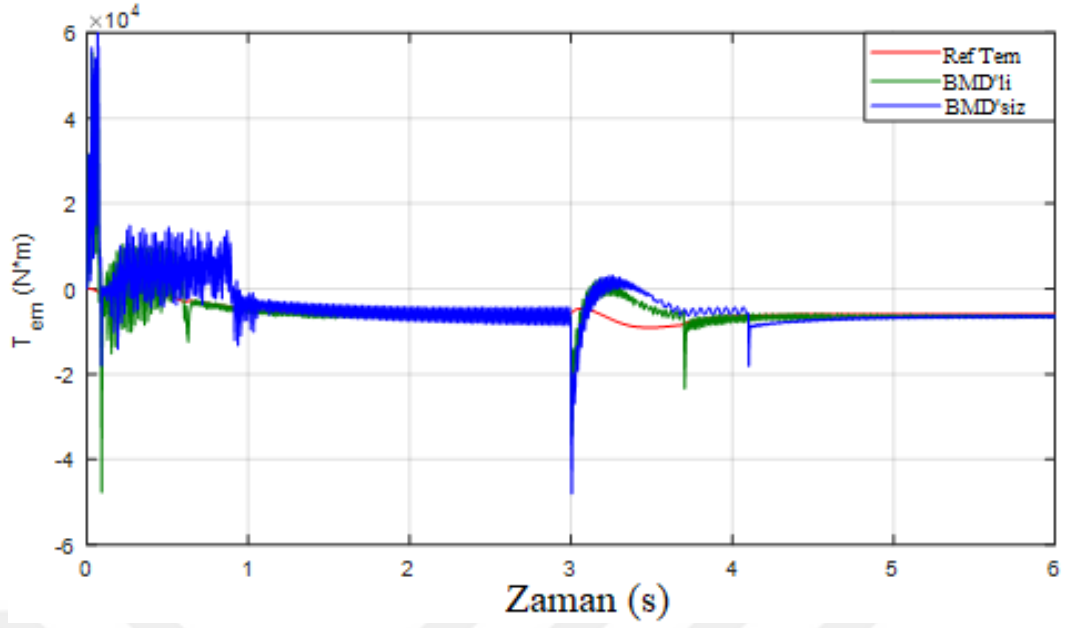
Asimetrik şebeke arızası altında ÇBAJ tabanlı RES'nin DA bara gerilim grafiği Şekil 5.38'te görülmektedir.



Şekil 5.38. Asimetrik Gerilim Düşümü Altında V_{bus}

Tasarlanan sistemin referans DA bara gerilimi 1150 V'tur. BMD'li ÇBAJ referans DA bara gerilimini $t=0.6$ s'de yakalamış ve 1.1 s'de kararlı hale gelmiştir. BMD'siz ÇBAJ referans DA bara gerilimini $t=0.8$ s'de yakalamış ve 1.5 s'de kararlı hale gelmiştir. BMD'li ÇBAJ'ün V_{bus} aşımı, asimetrik gerilim düşümünden sonra BMD'siz ÇBAJ'e kıyasla daha düşüktür. Sonuçlar, BMD'li ÇBAJ'ün asimetrik gerilim düşümü altında V_{bus} açısından daha uygun olduğunu göstermiştir.

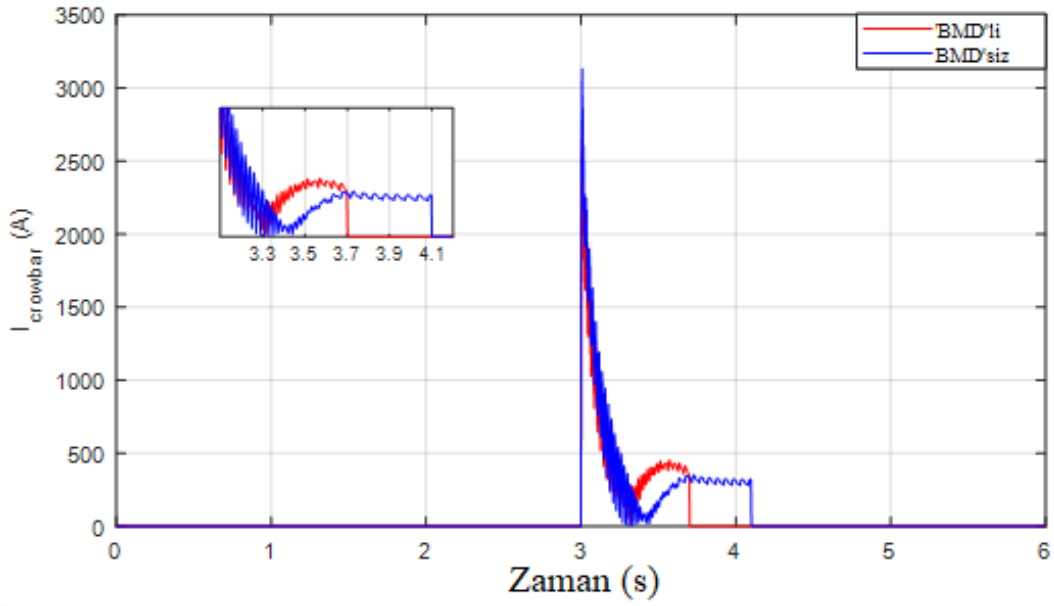
Ayrıca, BMD'siz ÇBAJ ve BMD'li ÇBAJ elektromanyetik tork açısından test edilmiştir. BMD'siz ÇBAJ ve BMD'li ÇBAJ'in 14 m/s rüzgar hızındaki elektromanyetik tork grafiği Şekil 5.39'de gösterilmiştir.



Şekil 5.39. ÇBAJ'ün Elektromanyetik Tork Grafiği

ÇBAJ'ün elektromanyetik tork grafiğinden görüldüğü üzere, BMD'siz sistemin T_{em} aşımı BMD'li sisteme kıyasla oldukça yüksektir. Asimetrik gerilim düşümü ortadan kalktıktan sonra, BMD'li ÇBAJ $t=3.7$ s'de referans T_{em} 'e ulaşırken, BMD'siz sistem $t=4.1$ s'de referans T_{em} 'e ulaşmıştır. BMD ile önerilen sistem daha uygulanabilir elektromanyetik tork sunmaktadır.

Tasarlanan RES'nin hem BMD'siz ÇBAJ hem de BMD'li ÇBAJ için 14 m/s rüzgar hızındaki crowbar akımı Şekil 5.40'de gösterilmiştir.



Şekil 5.40. Sistemin Crowbar Akımı

Gerilim düşümü sırasında rotor sargıları, kapasitörler ve dönüştürücüler crowbar yardımıyla aşırı akıma karşı korunurken, arıza ortadan kalktıktan sonra crowbar devre dışı kalmıştır. BMD'li ve BMD'siz her iki durumda da crowbar devresi arıza akımını başarılı bir şekilde absorbe etmiştir. BMD'li ÇBAJ hata akımını $t=3$ s'den 3.7 s'ye kadar absorbe ederken, BMD'siz ÇBAJ hata akımını $t=3$ s'den 4.1 s'ye kadar absorbe etmiştir. BMD yardımıyla, önerilen sistem BMD'siz ÇBAJ'e kıyasla daha uygun ve geçerli sonuçlar sunmaktadır.

RES'lerinin en önemli gereksinimleri arasında yer alan değişken rüzgar hızı altında sistemin performansının ve simetrik/asimetrik gerilim düşümleri sırasında sistemin HSYB kabiliyetinin iyileştirilmesi konusu ayrıntılı olarak irdelenmiştir. Simülasyon ortamında tasarlanan ÇBAJ tabanlı RES'in bu gereksinimleri başarıyla sağlayabilmesi için bazı çözümler öne sürülmüştür. Önerilen sistemin uygulanabilirliğini artırmak amacıyla piyasada yaygın olarak kullanılan bir jeneratörün gerçekçi parametreleri ile sistemin kurulması planlanan bölgenin gerçekçi rüzgar hız profili kullanılmıştır. Bu koşullar altında tasarlanan sistemin analizi gerçekleştirilerek sonuçlar ayrıntılı olarak yorumlanmıştır. Önerilen ÇBAJ tabanlı RES hem değişken rüzgar hız profili altında hem de şebekede meydana

gelen simetrik/asimetrik gerilim düşümü altında geçerli sonuçlar ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlara göre tasarlanan sistemin uygulanabilirliği ve geçerliliği doğrulanmıştır. Önerilen kontrol yöntemleri yardımıyla RES'lerin en önemli gereksinimlerine güvenilir ve geçerli çözümler önerilmiştir.



6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, şebeke bağlantılı ÇBAJ tabanlı RES'nin Matlab/Simulink ortamında tasarım ve analizi gerçekleştirilmiştir. Rotor tarafı dönüştürücü sayesinde geniş bir rüzgar hızı aralığında çalışabilmesi, verimli bir generatör kontrolü, düşük maliyetli olması ve sadece toplam gücün %25'i oranındaki güçte dönüştürücü kullanılması gibi temel avantajlara sahip olmasına sebebebiyle ÇBAJ RES uygulamalarında kullanılmaktadır. Ancak RES'nin en önemli gereksinimlerinden olan değişken rüzgar hızına tepki kabiliyeti ve ÇBAJ'ün en büyük dezavantajı olan şebeke arızalarından etkilenmesine karşı HSYB kabiliyeti kriterlerinin iyileştirilmesi bu tip jeneratörlerin RES uygulamalarında daha yaygın olarak kullanılmasına yardımcı olacaktır. Tasarlanan sistem REPA raporlarına bakılarak kapasite faktörünün yüksek olduğu Edremit/Balıkesir bölgesi gerçek rüzgar hız verileri ve piyasadanın öncü türbin üreticisi firmalarından olan Nordex'in ürettiği gerçekçi ÇBAJ parametreleri kullanılarak simülasyon ortamına aktarılmıştır.

İlk aşamada, sistemdeki RTD ve ŞTD geleneksel bir PI denetleyici kullanılarak tasarlanmış, seçilen bölgenin gerçekçi değişken rüzgar hızları altında hedeflenen güç değerinin hızlı bir şekilde üretilmesi sağlanmıştır. Daha sonrasında, seçilen ÇBAJ'ün güç eğrisiyle uyumlu aktif güç üretmek ve değişken rüzgar hızına olan tepki süresini iyileştirmek amacıyla RTD'ye bir MGNT denetleyici eklenmiştir. Aynı şekilde belirlenen bölgenin gerçekçi değişken rüzgar hızı profilleri altında tasarlanan analizi yapılmıştır. Önerilen kontrol yöntemi ile elde edilen sonuçlar geleneksel PI denetleyicili sistem ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve literatürdeki çalışmaların sonuçlarıyla da uyumlu olduğu gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, önerilen PI+MGNT denetleyici yönteminin değişken rüzgar hızı koşullarında şebekeye bağlı ÇBAJ tabanlı RES için uygulanabilir, etkili ve güvenilir olduğunu doğrulamaktadır.

İkinci aşamada ise, tasarlanan sistemin şebekede meydana gelen simetrik ve asimetrik gerilim düşümleri durumundaki analizi yapılmıştır. Simetrik ve asimetrik gerilim düşümleri altında ÇBAJ'ün HSYB kabiliyetinin iyileştirilmesi için bir BMD tabanlı crowbar koruma devresi tasarlanmıştır. İlk aşamada olduğu

gibi RES gerçekçi ÇBAJ parametreleri kullanılarak Matlab/Simulink ortamında modellenmiştir. Öncelikle sistem tasarlanırken geleneksel crowbar devresi kullanılarak simetrik/asimetrik şebeke arızaları altında analiz edilmiştir. Ardından tasarlanan sistemin HSYB kabiliyetini artırmak için crowbar devresine BMD eklenerek analizler tekrarlanmıştır. Analiz sonuçları, elektromanyetik tork, kazayağı akımı, şebeke akımları, terminal gerilimi ve DA bara gerilimi gibi parametreler açısından karşılaştırılmıştır. BMD'li ve BMD'siz ÇBAJ'lerin karşılaştırıldığı analiz sonuçları incelendiğinde, önerilen BMD tabanlı crowbar devresi içerek ÇBAJ'ün HSYB kabiliyetinin iyileştirildiği görülmüştür.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında, Türkiye'deki Edremit/Balıkesir bölgesi için şebeke bağlantılı ÇBAJ tabanlı RES tasarımının etkili, uygulanabilir ve güvenilir olduğunu göstermektedir. Hem değişken rüzgar hızları hem de simetrik/asimetrik gerilim düşümleri altında yapılan simülasyonlar ve analizler, önerilen kontrol yöntemlerinin RES'in performansını artırdığı ve güç eğrisine uyumunu iyileştirdiği ortaya konmuştur.

7. KAYNAKLAR

(Bu tez çalışmasında Vancouver atıf sistemi kullanılmıştır.)

1. Hannan MA, Al-Shetwi AQ, Mollik MS, Ker PJ, Mannan M, Mansor M, et al. Wind Energy Conversions, Controls, and Applications: A Review for Sustainable Technologies and Directions. Vol. 15, Sustainability (Switzerland). MDPI; 2023.
2. Gielen D, Boshell F, Saygin D, Bazilian MD, Wagner N, Gorini R. The role of renewable energy in the global energy transformation. Energy Strategy Reviews. 2019 Apr 1;24:38–50.
3. Global Wind Energy Council. Global Wind Report 2022, 2022. [cited 2023 May 29]. Available from: <https://gwec.net/global-wind-report-2022/>.
4. Bekiroglu E, Yazar MD. MPPT Control of Grid Connected DFIG at Variable Wind Speed. Energies (Basel). 2022 May 1;15(9).
5. Bekiroglu E, Yazar MD. Improving Fault Ride Through Capability of DFIG with Fuzzy Logic Controlled Crowbar Protection. In: 11th IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2022. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2022. p. 374–8.
6. Mousa HHH, Youssef AR, Mohamed EEM. State of the art perturb and observe MPPT algorithms based wind energy conversion systems: A technology review. Vol. 126, International Journal of Electrical Power and Energy Systems. Elsevier Ltd; 2021.
7. Abdullah MA, Yatim AHM, Tan CW, Saidur R. A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems. Vol. 16, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. p. 3220–7.
8. Bossoufi B, Aroussi HA, Boderbala M. Direct Power Control of Wind Power Systems based on DFIG-Generator (WECS). In: Proceedings of the 12th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence, ECAI 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2020.
9. Chhipa AA, Kumar V, Joshi RR, Chakrabarti P, Jasinski M, Burgio A, et al. Adaptive neuro-fuzzy inference system-based maximum power tracking controller for variable speed wecs. Energies (Basel). 2021 Oct 1;14(19).
10. Mahvash H, Taher SA, Rahimi M, Shahidehpour M. Enhancement of DFIG performance at high wind speed using fractional order PI controller in pitch compensation loop. International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2019 Jan 1;104:259–68.
11. Zribi M, Alrifai M, Rayan M. Sliding mode control of a variable-speed wind energy conversion system using a squirrel cage induction generator. Energies (Basel). 2017;10(5).
12. Hu L, Xue F, Qin Z, Shi J, Qiao W, Yang W, et al. Sliding mode extremum seeking control based on improved invasive weed optimization for MPPT in wind energy conversion system. Appl Energy. 2019 Aug 15;248:567–75.

13. Yasmine I, Bekkali Chakib E, Badre B. Improved Performance of DFIG-generators for Wind Turbines Variable-speed. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2018 Dec 1;9(4):1875.
14. Saravanakumar R, Jena D. Validation of an integral sliding mode control for optimal control of a three blade variable speed variable pitch wind turbine. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2015;69:421–9.
15. Dahbi A, Nait-Said N, Nait-Said MS. A novel combined MPPT-pitch angle control for wide range variable speed wind turbine based on neural network. *Int J Hydrogen Energy*. 2016 Jun 15;41(22):9427–42.
16. Karakasis N, Tsioumas E, Jabbour N, Bazzi AM, Mademlis C. Optimal Efficiency Control in a Wind System with Doubly Fed Induction Generator. *IEEE Trans Power Electron*. 2018;34(1):356–68.
17. Benzouaoui A, Khoudmi H, Bessedik B. Parallel model predictive direct power control of DFIG for wind energy conversion. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2021 Feb 1;125.
18. Naik KA, Gupta CP, Fernandez E. Design and implementation of interval type-2 fuzzy logic-PI based adaptive controller for DFIG based wind energy system. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2020 Feb 1;115.
19. Chojaa H, Derouich A, Chehaidia SE, Zamzoum O, Taoussi M, Elouatouat H. Integral sliding mode control for DFIG based WECS with MPPT based on artificial neural network under a real wind profile. *Energy Reports*. 2021 Nov 1;7:4809–24.
20. El Qouarti O, Essadki A, Laghradat H, Nasser T. Power Control of DFIG based WECS using SOSMC and PSO algorithm. In: 2022 2nd International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology, IRASET 2022. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2022.
21. Ananth DVN, Nagesh Kumar G V. Tip speed ratio based MPPT algorithm and improved field oriented control for extracting optimal real power and independent reactive power control for grid connected doubly fed induction generator. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2016 Jun 1;6(3):1319–31.
22. Ebrahimkhani S. Robust fractional order sliding mode control of doubly-fed induction generator (DFIG)-based wind turbines. *ISA Trans*. 2016 Jul 1;63:343–54.
23. Chang Y, Mahseredjian J, Kocar I, Karaagac U. Analytical characterization of DFIG response to asymmetrical voltage dips for efficient design. *Electric Power Systems Research*. 2022 Oct 1;211.
24. Tohidi S, Behnam MI. A comprehensive review of low voltage ride through of doubly fed induction wind generators. Vol. 57, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd; 2016. p. 412–9.
25. Haidar AMA, Muttaqi KM, Hagh MT. A coordinated control approach for DC link and rotor crowbars to improve fault ride-through of dfig-based wind turbine. *IEEE Trans Ind Appl*. 2017 Jul 1;53(4):4073–86.
26. Yang S, Zhou T, Sun D, Xie Z, Zhang X. A SCR crowbar commutated with power converter for DFIG-based wind turbines. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2016 Oct 1;81:87–103.

27. Gencer A. Analysis and control of fault ride through capability improvement pmsg based on WECS using active crowbar system during different fault conditions. *Elektronika ir Elektrotechnika*. 2018;24(2):63–9.
28. Gholizadeh M, Tohidi S, Oraee A, Oraee H. Appropriate crowbar protection for improvement of brushless DFIG LVRT during asymmetrical voltage dips. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2018 Feb 1;95:1–10.
29. Gencer A. FRT capability enhancement of wind turbine based on DFIG using machine learning Makine öğrenimi kullanarak ÇBAG’a dayalı rüzgâr türbininin FRT yeteneğinin iyileştirilmesi. *Bilim Derg / NOHU J Eng Sci* [Internet]. 2022;11(4):911–8. Available from: www.dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh/www.dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh
30. Sahoo SS, Chatterjee K, Tripathi PM. A coordinated control strategy using supercapacitor energy storage and series dynamic resistor for enhancement of fault ride-through of doubly fed induction generator. *Int J Green Energy*. 2019 Jun 21;16(8):615–26.
31. Mohammadi J, Afsharnia S, Vaez-Zadeh S, Farhangi S. Improved fault ride through strategy for doubly fed induction generator based wind turbines under both symmetrical and asymmetrical grid faults. *IET Renewable Power Generation*. 2016 Sep 1;10(8):1114–22.
32. Gomis-Bellmunt O, Junyent-Ferré A, Sumper A, Bergas-Jané J. Ride-through control of a doubly fed induction generator under unbalanced voltage sags. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2008;23(4):1036–45.
33. Darvish Falehi A. An innovative optimal RPO-FOSMC based on multi-objective grasshopper optimization algorithm for DFIG-based wind turbine to augment MPPT and FRT capabilities. *Chaos Solitons Fractals*. 2020 Jan 1;130.
34. Döşoğlu MK. Crowbar hardware design enhancement for fault ride through capability in doubly fed induction generator-based wind turbines. *ISA Trans*. 2020 Sep 1;104:321–8.
35. Kenan Döşoğlu M. A new approach for low voltage ride through capability in DFIG based wind farm. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2016 Dec 1;83:251–8.
36. Döşoğlu MK. Enhancement of SDRU and RCC for low voltage ride through capability in DFIG based wind farm. *Electrical Engineering*. 2017 Jun 1;99(2):673–83.
37. Ling Y. The fault ride through technologies for doubly fed induction generator wind turbines. *Wind Engineering*. 2016 Feb 1;40(1):31–49.
38. Kumar D, Chatterjee K. A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems. Vol. 55, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd; 2016. p. 957–70.
39. Xu L. Enhanced control and operation of DFIG-based wind farms during network unbalance. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2008;23(4):1073–81.
40. Colak I, Hossain E, Bayindir R, Hossain J. Design a grid tie inverter for PMSG wind turbine using FPGA & DSP builder. In: *Proceedings - 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, PEMC 2016*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2016. p. 372–7.

41. Petersson Andreas, Chalmers tekniska högskola., Chalmers tekniska högskola. Department of Energy and Environment. Division of Electric Power Engineering. Analysis, modeling and control of doubly-fed induction generators for wind turbines. Division of Electric Power Engineering, Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology; 2005.
42. Ullah NR. Grid Reinforcing Wind Generation [Internet]. 2006. Available from: <http://www.elteknik.chalmers.se/>
43. Hansen LH, Forskningscenter Risø. Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines. Risø National Laboratory; 2001.
44. Cardenas R, Pena R, Alepuz S, Asher G. Overview of control systems for the operation of DFIGs in wind energy applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013;60(7):2776–98.
45. Patil NS, Bhosle YN. A review on wind turbine generator topologies. In: Proceedings of 2013 International Conference on Power, Energy and Control, ICPEC 2013. 2013. p. 625–9.
46. Polinder H, Ferreira JA, Jensen BB, Abrahamsen AB, Atallah K, McMahon RA. Trends in wind turbine generator systems. IEEE J Emerg Sel Top Power Electron. 2013 Sep 1;1(3):174–85.
47. Hansen AD, Iov+ F, Blaabjerg+ F, Hansen LH. Review of Contemporary Wind Turbine Concepts and their Market Penetration. Vol. 28. 2004.
48. Ackermann T. Wind Power in Power Systems. England, Wiley; 2005.
49. Fehmi S. Rüzgâr Enerji Sistemlerinin Şebekeye Senkronize Edilmesi [MSc Thesis]. Konya, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı; Ocak-2016.
50. Eren D. Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Çift Beslemeli Asenkron Generatörlerin Arıza Sonrası Yeniden Bağlanabilme Kapasitesinin Akıllı Kontrol Yöntemleriyle Geliştirilmesi [MSc Thesis]. Bursa, Bursa Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı; Ocak 2022.
51. Manfred S. Green Energy and Technology: Wind Energy Systems for Electric Power Generation. Springer; 2008.
52. Nicolás CV, Blázquez F, Ramírez D, Lafoz M, Iglesias J. Guidelines for the design and control of electrical generator systems for new grid connected wind turbine generators. In: IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference). 2002. p. 3317–25.
53. Hansen LH, Madsen PH, Blaabjerg F, Christensen HC, Lindhard U, Eskildsen K. Generators and power electronics technology for wind turbines. In: IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference). 2001. p. 2000–5.
54. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2017 5th International Conference on Electrical Engineering - Boumerdes (ICEE-B) : 29-31 October 2017, Boumerdes, Algeria.
55. Chang Y, Hu J, Tang W, Song G. Fault current analysis of Type-3 WTs considering sequential switching of internal control and protection circuits in multi time scales during LVRT. IEEE Transactions on Power Systems. 2018 Nov 1;33(6):6894–903.

56. Hu J, Xu H, He Y. Coordinated control of DFIG's RSC and GSC under generalized unbalanced and distorted grid voltage conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2013;60(7):2808–19.
57. Kou P, Liang D, Li J, Gao L, Ze Q. Finite-Control-Set Model Predictive Control for DFIG Wind Turbines. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2018 Jul 1;15(3):1004–13.
58. Müller S, Deicke M, De Doncker RW. Doubly fed induction generator systems for wind turbines. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2002 May;8(3):26–33.
59. Gonzalo A, Jesus L, Miguel AR, Luis M, Grzegorz I. Doubly Fed Induction Machine: Modelling and Control for Wind Energy Generation. IEEE Press, Wiley; 2011.
60. Ahmed SD, Al-Ismail FSM, Shafiullah M, Al-Sulaiman FA, El-Amin IM. Grid Integration Challenges of Wind Energy: A Review. Vol. 8, IEEE Access. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2020. p. 10857–78.
61. Al-Shetwi AQ, Sujod MZ. Modeling and Control of Grid-Connected Photovoltaic Power Plant with Fault Ride-Through Capability. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*. 2018 Apr 1;140(2).
62. Dehong X, Frede B, Wenjie C, Nan Z. Advanced Control Of Doubly Fed Induction Generator For Wind Power Systems. IEEE Press, Wiley; 2018.
63. Makhoba K, Dorrell D. CONSIDERATION OF THE EFFECTS OF SYMMETRICAL AND ASYMMETRICAL VOLTAGE DIPS IN THE CONTROL AND OPERATION OF A GRID-CONNECTED DOUBLY-FED INDUCTION GENERATOR. 2020.
64. Anaya-Lara Olimpo, Campos-Gaona David, Moreno-Goytia Edgar, Adam Grain. Offshore Wind Energy Generation : Control, Protection, and Integration to Electrical Systems. Wiley; 2014. 307 p.
65. Darvish Falehi A, Rafiee M. Optimal control of novel fuel cell-based DVR using ANFISC-MOSSA to increase FRT capability of DFIG-wind turbine. *Soft comput*. 2019 Aug 1;23(15):6633–55.
66. Darvish Falehi A, Rafiee M. Fault ride-through capability enhancement of DFIG-based wind turbine using novel dynamic voltage restorer based on two switches boost converter coupled with quinary multi-level inverter. *Energy Systems*. 2018 Nov 1;9(4):1071–94.
67. Luo J, Zhao H, Gao S, Han M. A Low Voltage Ride Through Strategy of DFIG based on Explicit Model Predictive Control. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2020 Jul 1;119.
68. Kaloi GS, Wang J, Baloch MH. Active and reactive power control of the doubly fed induction generator based on wind energy conversion system. *Energy Reports*. 2016 Nov 1;2:194–200.
69. Gholizadeh M, Tohidi S, Oraee A, Oraee H. Appropriate crowbar protection for improvement of brushless DFIG LVRT during asymmetrical voltage dips. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2018 Feb 1;95:1–10.
70. IEEE Staff, IEEE Staff. 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference.

71. Justo JJ, Mwasilu F, Jung JW. Doubly-fed induction generator based wind turbines: A comprehensive review of fault ride-through strategies. Vol. 45, Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier Ltd; 2015. p. 447–67.
72. Chen L, Chen H, Yang J, Zhu L, Tang Y, Koh LH, et al. Comparison of Superconducting Fault Current Limiter and Dynamic Voltage Restorer for LVRT Improvement of High Penetration Microgrid. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2017 Jun 1;27(4).
73. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası 2023. Available from: <https://repa.enerji.gov.tr/REPA/>.
74. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Atlası 2022. Available from: <https://repa.enerji.gov.tr/REPA/>.
75. Kroposki B, Johnson B, Zhang Y, Gevorgian V, Denholm P, Hodge BM, et al. Achieving a 100% Renewable Grid: Operating Electric Power Systems with Extremely High Levels of Variable Renewable Energy. IEEE Power and Energy Magazine. 2017 Mar 1;15(2):61–73.
76. Blaabjerg F, Teodorescu R, Liserre M, Timbus A V. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems. Vol. 53, IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2006. p. 1398–409.
77. Wang X, Blaabjerg F. Harmonic Stability in Power Electronic-Based Power Systems: Concept, Modeling, and Analysis. IEEE Trans Smart Grid. 2019 May 1;10(3):2858–70.
78. Taul MG, Wang X, Davari P, Blaabjerg F. An Overview of Assessment Methods for Synchronization Stability of Grid-Connected Converters under Severe Symmetrical Grid Faults. IEEE Trans Power Electron. 2019 Oct 1;34(10):9655–70.
79. Lasseter RH, Chen Z, Pattabiraman D. Grid-Forming Inverters: A Critical Asset for the Power Grid. IEEE J Emerg Sel Top Power Electron. 2020 Jun 1;8(2):925–35.
80. High Penetration of Power Electronic Interfaced Power Sources and the Potential Contribution of Grid Forming Converters European Network of Transmission System Operators for Electricity ENTSO-E Technical Group on High Penetration of Power Electronic Interfaced Power Sources [Internet]. Available from: www.entsoe.eu
81. Pan D, Wang X, Liu F, Shi R. Transient Stability of Voltage-Source Converters with Grid-Forming Control: A Design-Oriented Study. IEEE J Emerg Sel Top Power Electron. 2020 Jun 1;8(2):1019–33.
82. Qoria T, Gruson F, Colas F, Denis G, Prevost T, Guillaud X. Critical Clearing Time Determination and Enhancement of Grid-Forming Converters Embedding Virtual Impedance as Current Limitation Algorithm. IEEE J Emerg Sel Top Power Electron. 2020 Jun 1;8(2):1050–61.
83. Wu H, Wang X. Design-Oriented Transient Stability Analysis of PLL-Synchronized Voltage-Source Converters. In: IEEE Transactions on Power Electronics. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2020. p. 3573–89.
84. Chang Y, Hu J, Tang W, Song G. Fault current analysis of Type-3 WTs considering sequential switching of internal control and protection circuits in multi time scales during LVRT. IEEE Transactions on Power Systems. 2018 Nov 1;33(6):6894–903.

85. Xiao XY, Yang RH, Chen XY, Zheng ZX, Li CS. Enhancing fault ride-through capability of DFIG with modified SMES-FCL and RSC control. *IET Generation, Transmission and Distribution*. 2018 Jan 1;12(1):258–66.
86. Hamdan I, Noureldeen O. An Overview of Control Method with Various Crowbar Techniques of Wind Turbines during Power System Faults. *SVU-International Journal of Engineering Sciences and Applications*. 2021 Jun 1;2(1):35–45.
87. Bossoufi B, Aroussi HA, Boderbala M. Direct Power Control of Wind Power Systems based on DFIG-Generator (WECS). In: *Proceedings of the 12th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence, ECAI 2020*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2020.
88. Chhipa AA, Kumar V, Joshi RR, Chakrabarti P, Jasinski M, Burgio A, et al. Adaptive neuro-fuzzy inference system-based maximum power tracking controller for variable speed wecs. *Energies (Basel)*. 2021 Oct 1;14(19).
89. Dahbi A, Nait-Said N, Nait-Said MS. A novel combined MPPT-pitch angle control for wide range variable speed wind turbine based on neural network. *Int J Hydrogen Energy*. 2016 Jun 15;41(22):9427–42.