

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**KALICI MIKNATISLI SENKRON GENERATÖRLÜ RÜZGÂR
ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNDE MAKSİMUM GÜÇ
KONTROLÜNÜN AKILLI YAPI TABANLI MODELLEMESİ**

Hasan Bektaş PERÇİN

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Elektrik Makinaları Bilim Dalı

AĞUSTOS 2021

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**KALICI MIKNATISLI SENKRON GENERATÖRLÜ RÜZGÂR
ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNDE MAKSİMUM GÜÇ
KONTROLÜNÜN AKILLI YAPI TABANLI MODELLEMESİ**

Tez Yazarı
Hasan Bektaş PERÇİN

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Abuzer ÇALIŞKAN

AĞUSTOS 2021
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı: Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatörlü Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemlerinde Maksimum Güç Kontrolünün Akıllı Yapı Tabanlı Modellemesi

Yazarı: Hasan Bektaş PERÇİN

İlk Teslim Tarihi: 28/06/2021

Savunma Tarihi: 02/08/2021

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Abuzer ÇALIŞKAN
Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Başkan: Doç. Dr. Mehmet ÖZDEMİR
Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Ayşe KOCALMIŞ BİLHAN Onayladım
Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatörlü Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemlerinde Maksimum Güç Kontrolünün Akıllı Yapı Tabanlı Modellemesi” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

02.08.2021

Hasan Bektaş PERÇİN



ÖNSÖZ

Yenilenebilir enerji kaynakları için kullanılan enerji dönüşüm sistemlerinde, farklı amaçlara yönelik kontrol yöntemleriyle sistemin en uygun şekilde kullanılması sistemin verimli ve uzun ömürlü kullanımı için önemlidir. Bu sistemlerden biri olan rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinde çeşitli kontrol yöntemlerinin direkt kurulu sistemde denenmesinden önce kontrol amacına yönelik bilgisayar ortamında yapılan bir modelleme, sistem bileşenlerinin çalışma şeklinin anlaşılmasına, farklı yöntemlerin sistem üzerindeki etkisinin görülmesine, değişen çalışma koşullarının sistemdeki etkilerinin görülmesi açısından faydalıdır. Modelleme çalışmasının sağladığı sonuçlar, olası bir eksikliğin önceden görülüp telafi edilmesini sağlayarak olası ek maliyetlerin de önüne geçilmesini sağlar.

Bu tez çalışmasında modelleme araçlarının sağladığı avantajlarla rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinde verimliliğin anlık rüzgâra göre en yüksek seviyede tutulması amacıyla kullanılan maksimum güç noktası izleme yöntemlerinin farklı kriterlere göre en uygun kontrol yönteminin seçimi adına analizler gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında desteğini esirgemeyen başta Ailem ve danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Abuzer ÇALIŞKAN olmak üzere tüm hocalarım ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hasan Bektaş PERÇİN

ELÂZİĞ, 2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xii
SİMGELER	xiii
KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti	1
1.2. Tezin Amacı	4
1.3. Tezin Yapısı.....	5
2. RÜZGÂR ENERJİSİ VE DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ	6
2.1. Dünyada ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi	8
2.2. Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemleri.....	11
2.2.1. Rüzgâr Türbinleri	12
2.2.2. Sürücü Sistemler ve Dişli Kutusu	18
2.2.3. Generatör Yapıları	19
2.2.4. Güç Elektronikği Arayüzleri	25
2.2.5. Şebeke veya Yük Bağlantı Elemanları	27
3. RÜZGÂR ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNİN KONTROLÜ	29
3.1. Türbin Sisteminin Modeli ve Kontrolü.....	29
3.2. Generatör ve Sürücü Sisteminin Modeli ve Kontrolü.....	34
3.3. Güç Elektronikği Arayüzü Modeli ve Kontrolü	37
4. MATERYAL VE METOT	46
4.1. Dolaylı MGNİ Yöntemleri	47
4.1.1. Kanat Uç Hız Oranı Yöntemi	47
4.1.2. Güç Sinyali Geri Besleme Yöntemi	48
4.1.3. Optimal Tork Yöntemi	50
4.2. Doğrudan MGNİ yöntemleri	51
4.2.1. Optimum Bağlantı Tabanlı Yöntem	51
4.2.2. Tepe Tırmanma Yöntemi	51
4.2.3. Artımlı İletkenlik Yöntemi	54
4.3. Akıllı MGNİ Yöntemleri	57
4.3.1. Bulanık Mantık Yöntemi.....	57
4.3.2. Diğer Akıllı MGNİ Yöntemleri.....	61
4.4. Farklı MPPT Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	62
4.5. REDS ve Farklı Kontrol Yöntemlerinin MATLAB/Simulink Ortamında Modellenmesi	64
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	66
5.1. Klasik MGNİ Modelinin Uygulanması	70
5.2. Tepe Tırmanma MGNİ Modelinin Uygulanması	71

5.3. Bulanık Mantık Metodu MGNİ Modelinin Uygulanması	74
5.4. Sistemdeki Çeşitli Büyüklerin Kontrol Yöntemlerine göre Karşılaştırılması.....	77
6. SONUÇLAR.....	95
ÖNERİLER	96
KAYNAKLAR.....	97
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatörlü Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemlerinde Maksimum Güç Kontrolünün Akıllı Yapı Tabanlı Modellemesi

Hasan Bektaş PERÇİN

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos 2021, Sayfa: xiv + 105

Rüzgâr enerjisi, elektrik üretiminde kullanımı giderek artan yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Enerji sisteminin verimliliği, uygun elemanların ve kontrollerin seçimine bağlıdır. Bu şekilde rüzgârdan daha etkin şekilde yararlanılarak daha verimli ve daha az maliyetli enerji üretimi sağlanabilir.

Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinde, değişken hızlı rüzgâr türbinleriyle uyumlu kalıcı mıknatıslı senkron generatörler ön plana çıkmaktadır. Bu tip generatörler elektriksel kayıpları azaltabileceği gibi mekanik bileşenlere bağımlılığı azaltarak genel sistem performansını yükseltir. Uygun kontrol yöntemleri aracılığıyla yüksek verimlilikte çalışabilmeleri rüzgâr enerjisinde kullanımlarını arttırmıştır.

Anlık rüzgâra göre dönüşüm sisteminin çalışma noktası ayarlanarak yapılan kontrol maksimum güç noktası izleme kontrolü olarak tanımlanmaktadır. Temel hedef, anlık rüzgâra göre sistemin verimliliğini en üst düzeyde tutabilmektir. Bilgisayar ortamında yapılan modelleme çalışmaları, farklı kontrol yöntemlerinin analizine ve en uygun kontrol tekniğinin seçimine olanak sağlar.

Bu çalışmada; dönüşüm sisteminin temel bileşenleri, temel kontrol yöntemleri açıklanmış. Farklı maksimum güç noktası izleme kontrolleri MATLAB/Simulink ortamında modellenerek farklı sistem büyüklükleri üzerinden bu yöntemlerin karşılaştırmalı analizleri gerçekleştirilmiştir.

Farklı rüzgâr profillerine göre kontrol yöntemleri uygulanmadığında sistem büyüklüklerinde büyük düşüşler ve düşük üretim performansı gözlemlenmiştir. Kontrol modellemeleri gerçekleştirildiğinde tüm yöntemler için sistemin üretim performansında iyileşme görülürken bu yöntemlerden akıllı kontrol yapısı olarak tanımlanan bulanık mantık kontrolü, rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminin daha kararlı ve daha verimli çalışmasını sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr enerjisi, Kalıcı mıknatıslı senkron generatör, MATLAB/Simulink, Modelleme, Maksimum güç noktası izleme, Bulanık mantık

ABSTRACT

Intelligent Structure Based Modeling of Maximum Power Control in Wind Energy Conversion Systems with Permanent Magnet Synchronous Generator

Hasan Bektaş PERÇİN

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

August 2021, Pages: xiv + 105

Wind energy is an increasingly used renewable energy in electricity production. The efficiency of energy system depends on the selection of appropriate elements and controls. Thus, more efficient, less costly energy production can be achieved by utilizing wind more effectively.

In wind energy conversion systems, Permanent magnet synchronous generators compatible with variable speed wind turbines, stand out. These generators can lower electrical losses and increase the overall system performance by reducing dependence on mechanical components. Their capability to operate with high efficiency through appropriate controls has increased their use in wind energy.

The control performed by adjusting the operating point of the system in conversion systems according to instant wind defined as the maximum power point tracking control. The main aim is to maintain the efficiency of the system at the highest level according to the instant wind. Modelling studies in computer environment provide analysis of different control methods and choosing the appropriate controls.

In this study, basic components of conversion system and basic control methods were explained. Comparative analysis based on different system parameters was carried out by modeling different maximum power point tracking controls in MATLAB/Simulink environment.

According to different wind profiles, when control methods not applied, large reductions in system parameters and low production performance were observed. When they applied, the production performance of the system for all techniques was improved. Among these, fuzzy logic control, defined as intelligent control structure, provided more stable and more efficient operation of the wind energy conversion system.

Keywords: Wind energy, Permanent magnet synchronous generator, MATLAB/Simulink, Modelling, Maximum power point tracking, Fuzzy logic

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Enerji üretiminde kaynakların dağılımı ve gelecekte öngörülen değişimler.....	6
Şekil 2.2.	Yenilenebilir enerji kaynaklarına göre enerji üretiminin yüzdelik dağılımı	7
Şekil 2.3.	Eski zamanlarda kullanılan bir yel değirmeni.....	7
Şekil 2.4.	Rüzgâr enerjisi kurulu güç değişimi	8
Şekil 2.5.	2018-2020 dünya genelinde en büyük üretici ülkelere göre kurulu güç değişimleri	9
Şekil 2.6.	Enerji üretimindeki kaynakların dağılımı	9
Şekil 2.7.	1998-2020 yılları arasında rüzgâr enerjisi kurulu güç miktarları ve değişimleri	11
Şekil 2.8.	REDS için temel dönüşüm şeması	12
Şekil 2.9.	Rüzgâr türbini ve türbindeki temel bileşenler.....	13
Şekil 2.10.	Dikey eksenli rüzgâr türbini örnekleri	15
Şekil 2.11.	Rüzgârı alış şekillerine göre türbin yapıları	16
Şekil 2.12.	Yatay eksenli rüzgâr türbinleri.....	17
Şekil 2.13.	Kara ve deniz üstü rüzgâr türbinleri.....	18
Şekil 2.14.	Dişli kutulu sürücü sistem yapısı	19
Şekil 2.15.	REDS'lerle kullanılabilen genaratörler.....	20
Şekil 2.16.	ÇBAG'li REDS modeli	21
Şekil 2.17.	KMSG'li REDS modeli	23
Şekil 2.18.	Mıknatısların rotor yüzeyindeki konumlarına göre KMSG türleri	24
Şekil 2.19.	Değişken hızlı REDS'lerle kullanılabilen arayüz yapıları	26
Şekil 3.1.	REDS için güç eğrisi grafiği.....	30
Şekil 3.2.	Güç katsayısı- KHO değişim grafiği.....	33
Şekil 3.3.	KMSG kesit görünüşü ve 3 fazlı eşdeğer devre şeması	34
Şekil 3.4.	Yükselten tip (Boost) kıyıcı arayüz şeması	38
Şekil 3.5.	KMSG tek faz eşdeğer devre şeması	38
Şekil 3.6.	Üç fazlı kontrolsüz doğrultucu şeması.....	39
Şekil 3.7.	Yükselten tip (Boost) kıyıcı devre şeması	40
Şekil 3.8.	Anahtarlama durumuna göre endüktans gerilimi ve akımı dalga şekilleri.....	41
Şekil 3.9.	Kıyıcı devresine ait giriş ve çıkış büyüklükleri.....	43
Şekil 4.1.	KHO yöntemi şeması.....	47
Şekil 4.2.	REDS için değişen hızlara göre güç eğrileri.....	48
Şekil 4.3.	Güç sinyali geri besleme yöntemi şeması	49

Şekil 4.4.	Optimal tork yöntemi şeması	50
Şekil 4.5.	Tepe tırmanma yönteminde çalışma noktasının güç eğrisi üzerindeki değişimi.....	52
Şekil 4.6.	Tepe tırmanma yöntemi uygulama şeması.....	53
Şekil 4.7.	Gücün gerilime göre değişim eğrisi	54
Şekil 4.8.	Artımlı iletkenlik yöntemi uygulama şeması	56
Şekil 4.9.	Bulanık mantık temel yapısı	58
Şekil 4.10.	Bulanık mantıkta kullanılan küme çeşitleri	58
Şekil 4.11.	Bulanık mantıklı MGNİ kontrol yapısı	60
Şekil 4.12.	Temel bileşenleriyle YSA yapısı	61
Şekil 4.13.	MATLAB/Simulink ana ekranı ve Simulink uygulama penceresi	64
Şekil 4.14	YSA ve bulanık mantık için hazır kullanıcı arayüzleri	64
Şekil 5.1.	REDS'ye ait genel dönüşüm şeması	66
Şekil 5.2.	REDS Simulink modeli	67
Şekil 5.3.	Rüzgâr türbini modelinin detaylı hali	67
Şekil 5.4.	Güç katsayısı KHO değişimi	68
Şekil 5.5.	Türbin çıkış gücünün rotor hızına göre değişimi	69
Şekil 5.6.	Yükselten tip kıyıcı devre modeli	70
Şekil 5.7.	KHO yöntemi uygulama modeli	71
Şekil 5.8.	Tepe tırmanma MGNİ kontrolü modeli	72
Şekil 5.9.	Tepe tırmanmada giriş değişkenlerine göre değişim eğrisi.....	73
Şekil 5.10.	Bulanık mantık MGNİ kontrol modeli.....	74
Şekil 5.11	Bulanık mantık için değişkenlere göre güç eğrisindeki değişim.....	75
Şekil 5.12.	Bulanık mantık yapısı	76
Şekil 5.13.	Bulanık mantık kontrolüne ait kural tabanı.....	76
Şekil 5.14.	Karesel değişen rüzgâr profili.....	77
Şekil 5.15.	Karesel rüzgârda generatör ve doğrultucu çıkış gerilimleri	78
Şekil 5.16.	Karesel rüzgârda sabit doluluk oranları için güç katsayısı değişimleri.....	78
Şekil 5.17.	Karesel rüzgârda sabit doluluk oranları için hız değişimleri.....	79
Şekil 5.18.	Karesel rüzgârda sabit doluluk oranları için türbin çıkış gücü değişimleri.....	80
Şekil 5.19.	Karesel rüzgârda farklı kontrol yöntemlerine göre KHO değişimleri.....	81
Şekil 5.20.	Karesel rüzgârda farklı kontrol yöntemlerine göre güç katsayısı değişimleri.....	81
Şekil 5.21.	Karesel rüzgârda farklı kontrol yöntemlerine göre türbin çıkış gücü değişimleri.....	82
Şekil 5.22.	Karesel rüzgârda farklı kontrol yöntemlerine göre rotor hızı değişimleri.....	83
Şekil 5.23.	Karesel rüzgârda farklı kontrol yöntemlerine göre kıyıcı çıkış gücü değişimleri	84

Şekil 5.24	Karesel rüzgârda farklı kontrol yöntemlerine göre doluluk oranı değişimleri	85
Şekil 5.25.	Gerçekçi rüzgâr profili.....	85
Şekil 5.26.	Gerçekçi rüzgârda generatör ve doğrultucu çıkış gerilimleri	86
Şekil 5.27.	Gerçekçi rüzgârda sabit kıyıcı doluluk oranları için güç katsayısı değişimleri.....	87
Şekil 5.28.	Gerçekçi rüzgârda sabit doluluk oranları için hız değişimleri	87
Şekil 5.29.	Gerçekçi rüzgârda sabit doluluk oranları için türbin çıkış gücü değişimleri.....	88
Şekil 5.30.	Gerçekçi rüzgârda farklı kontrol yöntemlerine göre KHO değişimleri.....	89
Şekil 5.31.	Gerçekçi rüzgârda farklı kontrol yöntemlerine göre güç katsayısı değişimleri	90
Şekil 5.32.	Gerçekçi rüzgârda farklı kontrol yöntemlerine göre türbin çıkış gücü değişimleri	91
Şekil 5.33.	Gerçekçi rüzgârda farklı kontrol yöntemlerine göre rotor hızı değişimleri	92
Şekil 5.34.	Gerçekçi rüzgârda farklı kontrol yöntemlerine göre kıyıcı çıkış gücü değişimleri	93
Şekil 5.35	Gerçekçi rüzgârda farklı kontrol yöntemlerine göre doluluk oranı değişimleri.....	93

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 4.1. Farklı MGNİ yöntemlerinin birbirlerine göre karşılaştırılması.....	63
Tablo 5.1. Türbin parametreleri	68
Tablo 5.2. KMSG parametreleri.....	69
Tablo 5.3. Kısıyıcı parametreleri	70
Tablo 5.4. Tepe tırmanma metodu değerleri.....	73
Tablo 5.5. Karesel rüzgârda sabit doluluk oranı değerlerine göre ortalama güç değerleri.....	80
Tablo 5.6. Karesel rüzgârda kontrol yöntemlerine göre ortalama güç değerleri	83
Tablo 5.7. Gerçekçi rüzgârda sabit doluluk oranı değerlerine göre ortalama güç değerleri.....	88
Tablo 5.8. Gerçekçi rüzgârda kontrol yöntemlerine göre ortalama güç değerleri	91

SİMGELER

λ	: Kanat Uç Hız Oranı
λ_{opt}	: Optimal Kanat Uç Hız Oranı
λ_r	: Kalıcı Mıknatıs Akısı
β	: Türbin Kanat Açısı
A	: Türbin Kanatlarının Taradığı Alan
B	: Sürtünme (viskoz) Katsayısı
C_p	: Güç Katsayısı
d	: Kıyıcı Doluluk Oranı
$e, \Delta e$	: Hata ve Hatadaki Değişim
E_k	: Kinetik Enerji
f_s	: Generatör Çalışma Frekansı
$I_{g, \phi}$	: Kıyıcı Giriş, Çıkış Akımları
$I_{d,q}$	: Stator Akımlarının d-q Referans Çatıdaki Bileşenleri
I_{dc}	: Doğrultucu Akımı
I_{gen}	: Generatör Akımı
J	: Atalet Momenti
K_{MPPT}	: Maksimum Güç için Katsayı
K_{OPT}	: Sabit Değerler Katsayısı
$L_{d,q}$	: Stator Endüktanslarının d-q referans çatıdaki bileşenleri
m	: metre
P	: Kutup sayısı
P_m	: Mekanik Güç
P_{dc}	: Doğrultucu Gücü
$\rho(p)$	: Hava Yoğunluğu
rpm	: Devir/dakika
R_a	: Faz Başına Sargı Direnci
R_s	: Stator sargı direnci
R_{gen}	: Generatör Direnci
$R_{YÜK}$	: Yük Direnci
sn	: Saniye
T_e	: Elektromanyetik moment
T_M	: Yük (Mekanik) momenti
T_{REF}	: Referans moment
T_s	: Anahtarlama Periyodu
V_w	: Rüzgâr Hızı
$V_{d,q}$	: Stator gerilimlerinin d-q referans çatıdaki bileşenleri
V_{dc}	: Doğrultucu Gerilimi
V_{gen}	: Generatör Gerilimi
$V_{g, \phi}$	: Kıyıcı Giriş, Çıkış Gerilimi
ω_E	: Elektriksel Hız
ω_G	: Generatör Açısal Hızı
ω_M	: Mekanik Açısal Hızı
X_s	: Generatör Reaktansı

KISALTMALAR

AA	: Alternatif akım
ANFIS	: Adaptif nöral bulanık arayüz
ÇBAG	: Çift beslemeli asenkron generatör
DA	: Doğru akım
DHRT	: Değişken hızlı rüzgâr türbini
GSB	: Güç sinyali geri besleme yöntemi
GW	: Gigawatt
KHO	: Kanat uç hız oranı yöntemi
KMSG	: Kalıcı mıknatıslı senkron generatör
MATLAB	: Matrix Laboratory
MİLRES	: Milli Rüzgâr Enerji Sistemleri Geliştirilmesi ve Prototip Türbin Üretimi
MGNİ	: Maksimum güç noktası izleme
KW	: Kilowatt
MW	: Megawatt
OBT	: Optimum bağlantı tabanlı yöntem
OT	: Optimal tork yöntemi
PID	: Oransal integral türev kontrolör
REDS	: Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi
REPA	: Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası
SHRT	: Sabit hızlı rüzgâr türbini
SKAG	: Sincap kafesli asenkron generatör
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TÜREB	: Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği
YSA	: Yapay sinir ağları

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisine ihtiyacın giderek arttığı dünya genelinde, fosil yakıtlı enerji üretim yöntemlerinin dışında yeni enerji üretim yöntemlerine yönelimler görülmektedir. Fosil yakıtlar, kullanımlarıyla açığa çıkan sera gazı salınımı, hava kalitesinde bozulma, su ve çevre kirliliği gibi birçok soruna sebep olmaktadır. Aynı zamanda bu kaynakların tükenebilir yapıda olmaları yenilenebilir, temiz, çevresel etkisi daha az olan enerji kaynaklarına olan ilgi ve yatırımları arttırmaktadır. Yenilenebilir enerji, fosil temelli yakıtlar gibi tükenme riski olmayan kaynakların var olan potansiyellerinin kullanılmasına dayanan enerji olarak tanımlanır. Yenilenebilir enerjide artan nüfus ve gelişen endüstrilere göre oluşan taleplerin karşılanması, çevre dostu olması, üretimin minimum kaynakla maksimum seviyede verimlilikle elde edilmesi temel hedeflerdir. Giderek artan kullanım miktarlarıyla bu tür enerji kaynaklarının yakın gelecekte dünyanın enerji ihtiyacının büyük bir kısmını karşılaması öngörülmektedir [1].

Yenilenebilir enerji türlerinden en çok kullanılanlardan biri rüzgâr enerjisidir. Rüzgâr, yüksek basınca sahip bir alandan alçak basınca sahip alana doğru hareket eden hava kütlesi hareketliliği olarak tanımlanabilir. Rüzgâr enerjisi, yüksek enerji potansiyeline sahip temiz bir kaynak olması, gelişen teknolojiyle birlikte uygun maliyetli enerji dönüşüm sistemleriyle kullanılabilmesi, sıfır sera gazı etkisi gibi birçok avantaja sahiptir. Ancak rüzgârın sabit bir kaynak olmayıp anlık değişkenlik gösteren yapıda olması bu enerji için gelişmiş dönüşüm sistemleri ve bu sistemlerin iyi bir şekilde kontrol edilmesini gerektirir. Rüzgârdan elektrik enerjisi elde etmek için kullanılan rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi (REDS)'ler, rüzgârdaki kinetik enerjiyi önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine dönüştüren yapılardır. REDS'lerin iyi bir verimlilikle kullanılabilmesi hem rüzgârdan maksimum oranda yararlanma hem de sistemin uzun süre kullanılması açısından önemlidir. Bu amaçla, REDS'ler için birçok farklı bileşenin bir araya getirildiği ve farklı amaçlara yönelik kontrol uygulamalarının bir arada kullanılması gerekmektedir. Bu tez çalışmasında verimlilik amacına yönelik olarak başta akıllı yapı olarak tanımlanan yapı olmak üzere farklı yöntemlerin kullanımı ve bu yöntemlerin birbirleriyle karşılaştırılmaları ele alınmıştır.

1.1. Literatür Özeti

REDS'li yapıları esas alan çalışmalarda literatürde genel olarak farklı sistem bileşenlerinin birbirlerine göre kullanım analizleri, kullanılan farklı kontrol yapılarının farklı sistem parametreleri üzerindeki etkisini esas alan birçok çalışma mevcuttur. Bu kontrol yapıları sistemin verimliliğini ayarlama, koruma, üretilen güç kalitesini yükseltme gibi farklı amaçlarda kullanılabilir. Literatürde temel olarak tanımlanabilecek çalışmalarda; sistemi oluşturan mekanik ve elektriksel

bileşenlerin birbirlerine göre farkları, farklı şekilde sistem konfigürasyonlarının artıları ve eksileri gelecekte kullanılması olası REDS ile ilgili yeni teknolojilerin açıklamasına yer verilmiştir [2-5]. Özellikle REDS'lerde değişken hızlı, kalıcı mıknatıslı senkron generatör (KMSG) içeren yapıları esas alan çalışmalarda [6-10] sistem bileşenlerinin çalışma prensibi verilmiştir. Enerji dönüşümü ve dönüşüme uygun kontrol yapıları için matematiksel modellerden yararlanarak farklı kontrol yapılarının ve sistem büyüklüklerinin analizi gerçekleştirilmiştir. Bileşenlerin ve sisteme ait temel büyüklüklerin matematiksel modelleri; modelleme, tasarım ve analiz açısından birçok kolaylık sağlamaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından özellikle rüzgâr ve güneş enerjisi için anlık ortam koşullarına göre üretkenlikleri değişkenlik gösterebilmektedir. Bu değişkenliğe göre üretim verimliliğini en üst düzeyde tutmayı amaçlayan farklı kontrol ve uygulama çalışmaları bulunmaktadır. REDS'ler için üretim verimliliğini esas alan çalışmalarda anlık rüzgârdan maksimum seviyede yararlanabilmek adına kullanılan yöntemler maksimum güç noktası izleme (MGNİ) yöntemleri olarak adlandırılmaktadır. Değişken hızlı REDS'ler için bu yöntemler esasında sistemin çalışma hızını rüzgâr hızına göre ayarlanmasına dayanmaktadır. MGNİ yöntemleri için kullanılan kontrol yapıları REDS'de kullanılan generatör ve yük arasındaki arayüzlere göre farklılık gösterebilmektedir. Temelde iki farklı arayüz yapısından söz edilebilir. Bunlardan birincisi sırt sırta bağlı yapıdan meydana gelen arayüzlerdir. Bu yapı, temelde generatör tarafındaki ve yük tarafındaki iki dönüştürücü kısımdan meydana gelmektedir. Generatör tarafındaki kısmın anahtarlama kontrolüyle MGNİ kontrolü yapılabilmekte kullanılan yöntemin deneysel yâda bilgisayar ortamında modellemeyle analizi yapılabilmektedir. Bu tip dönüştürücüyü esas alan çalışmalarda [11-15] sırt sırta bağlı arayüz üzerinden referans çatı dönüşümü sonucu elde edilen generatör akım bileşenlerinin kontrolünden MGNİ kontrolü ve bu kontrole göre MATLAB/Simulink ortamında sistem büyüklüklerinin analizini gerçekleştirmiştir. Bu arayüzü esas alan farklı bir yaklaşımla yapılan çalışmalarda [16-20] ise şebekeye bağlı sistemi oluşturan temel büyüklüklerin matematiksel ifadeleri kullanılıp farklı kontrol tekniklerinin sistem üzerindeki etkilerinin ve sisteme ait büyüklüklerin grafiksel analizi gerçekleştirilmiştir. Generatör ve yük tarafındaki arayüz kısımları için uygun bilgisayar modellemeleriyle sistem çıkış büyüklüklerinin analizi ve değişim grafiklerinin elde edildiği çalışmalarla [21-26] tasarım sürecine geçilmeden kullanılacak bileşen, kontrol yapısı ve arayüz kullanımı açısından kolaylık sağladığı vurgulanmış, değişen rüzgâr profiline göre seçilen kontrol yöntemlerinin performansları ortaya koyulmuştur. Deneysel ve eğitsel amaçlara uygun şekilde modellemeyi esas alan çalışmada [27] ise istenen parametre değişikliklerinin kolaylıkla yapıldığı belirtilmiş ve değişen rüzgâr hızlarına göre sistem büyüklüklerinin analizi gerçekleştirilmiştir. Sırt sırta bağlı arayüz yapısı için farklı arayüz anahtarlama tekniklerini esas alan çalışmada [28] ise bu tekniklerin genel sistem performansına etkisi incelenmiştir. Bu tür arayüzü esas alan kontrol yapılarında klasik PID tabanlı kontrollerin

çok hızlı değişimler ve nonlinear yapılar için düşük performanslar göstermesi farklı kontrol tekniklerinin farklı amaçlarla kullanımına da zemin hazırlamıştır. Optimum verimliliği sağlayan çalışma yöntemini sisteme ait büyüklükler üzerinden yapılan çalışmalarda [29-30] hem daha hızlı hem de daha verimli çalışma imkânı verdiği gösterilmiştir.

Sırt sırta bağlı arayüz içeren REDS’li sistemler için akıllı yapı olarak da tanımlanabilen bulanık mantık, sinir ağları optimizasyon tekniklerinden yararlanan çalışmalar da mevcuttur. Bu yöntemlerin en önemli üstünlükleri çeşitli ek donanımlara, karmaşık matematiksel modellere ihtiyaç duymadan hızlı ve verimli çalışma imkânı sunabilmeleridir. Bulanık mantık esaslı çalışmalarda kontrol değişkeni sözel olarak ifade edilebilen değişkenler üzerinden üretilerek kontrol işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu yapıların, PID tabanlı yapılara göre daha esnek daha hızlı çalışabilme imkânları vardır. Sırt sırta bağlı yapı içeren sistemlerde bulanık mantık yapısını esas alan çalışmalarda [31-35] bulanık yapı üzerinden tasarlanan kontrollerle MGNİ kontrolünü gerçekleştirilmiştir. Diğer yöntemlere göre üstünlükleri ortaya koyulmuştur. Bulanık mantık yapısının tek başına değil de farklı kontrol yapılarıyla kullanılarak MGNİ kontrolünün sağlandığı çalışmalar da [36-37] mevcuttur. Bulanık mantık dışında canlılardaki sinir ağlarından esinlenerek oluşturulan yapay sinir ağları (YSA) üzerinden yapılan çalışmalarda [38-40] ise sistemde kesin değer gerektiren ölçümlere gerek duymayan dolayısıyla ek donanım ihtiyacını ortadan kaldıran tasarımlarla çalışma sağlanmış. Kullanılan yapının başta sistem verimliliğine etkisi olmak üzere farklı etkileri irdelenmiştir. Doğadan esinlenerek oluşturulan optimizasyon tekniklerini esas alan çalışmada ise kullanılan optimizasyon yöntemlerinin karşılaştırmalı analizi üzerinden üretim performansları irdelenmiştir [41].

REDS’lerle ilgili kullanılan bir diğer arayüz yapısı da kıyıcı arayüzlerdir. Birçok farklı kıyıcı devresiyle kullanılabilen REDS’lerde kıyıcının doluluk oranı üzerinden maksimum gücün anlık olarak ayarlanmasıyla değişken rüzgâr hızlarında MGNİ kontrolü gerçekleştirilebilmektedir. Kullanılan kıyıcı türü, seçilen kontrol parametresi, kontrolde kullanılan yöntemlere göre literatürde birçok farklı çalışma bulunmaktadır. Seçilen yapının performansı, uygun kıyıcı devresinin kurulumu ve seçilen MGNİ tekniğiyle doğrudan ilişkilidir. MGNİ kontrolü için yapılan çalışmalarda [42-44] kıyıcının kontrol edilen parametresiyle sistemin çalışma hızı arasındaki bağıntıya göre çeşitli parametrelerin seçimi ve bunlara uygun tasarım bilgileri sunulmuştur. Aynı arayüz için klasik olarak tanımlanabilecek PID tabanlı çalışmalarda [45-49] kontrol yapısının sistemin anlık çalışma noktasını ayarlayacak şekilde çalışması sağlanmış. Farklı kontrol yapıları için giriş çıkış değişkenlerine göre çalışmalar gerçekleştirilmiştir. PID tabanlı kontrol yapılarının REDS’ler gibi nonlinear kontrol özelliği gösteren yapılarda düşük performans gösterebilmeleri farklı kontrol tekniklerinin kıyıcı arayüzler için kullanımına imkân sağlamıştır. Güneş enerjisi sistemlerinde sıklıkla kullanılan değişkenler arasındaki ilişkiye göre çalışan tepe tırmanma, değiştir ve gözlemle gibi isimlerle anılan yöntemlerin kullanıldığı çalışmalar REDS’lerde MGNİ için de

kullanılabilmektedir. Bu yöntemlerin kullanıldığı çalışmalarda [50-54] belirli adımla seçilen kontrol değişkeninde yapılan değişikliklerin kontrol yapısının çalışma hızını ve performansını etkileyebildiği gösterilmiştir. Seçilen parametrenin belirli bir adım büyüklüğüne göre değiştirerek anlık güç kontrolünü esas alan bu çalışmalarda kullanılan yöntemler matematiksel ve akış diyagramı şeklinde ifade edilerek maksimum güç kontrolü sağlanmış, modellemelerle sistem büyüklüklerinin analizi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan yöntemlerde kontrol değişkeninde yapılan değişikliğin küçük ya da büyük bir değer seçilmesi sistem performansını doğrudan etkilemektedir. Bu değişimlerin kontrol performansına etkisinin analiz edildiği çalışmalarla [55-57] değişikliğin anlık çalışma durumuna göre uyarlanabilir yapıda olması sağlanarak daha hızlı ve az salınımlı kontrol gerçekleştirilebileceği açıklanmıştır. Sırt sırta bağlı arayüzde olduğu gibi bu arayüzde de kullanılabilen bulanık mantık başta olmak üzere farklı akıllı yapı teknikleriyle MGNİ kontrolü gerçekleştirilebilmektedir. Bulanık mantığı esas alan çalışmalarda [58-66] farklı bulanık mantık giriş çıkış değişkenleri, kural yapıları ve kontrol tasarımlarıyla değişken hızlarda MGNİ kontrolü gerçekleştirilmiş, deneysel ve modelleme çalışmaları üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir. Sistemde bulanık mantık çıkışında doğrudan kontrol değişkeninin elde edildiği çalışmaların yanı sıra başka bir kontrol yapısını optimize edecek şekilde kullanılan bulanık mantıklı çalışmalar da mevcuttur [67-69]. Seçilen kontrol yapısına göre bilgisayar ortamında yapılan modelleme çalışmalarında sistem büyüklüklerine göre kısıcının çalışma yapısını ayarlayan ve farklı MGNİ yöntemlerinin başta MATLAB/Simulink ortamı olmak üzere farklı bilgisayar programları aracılığıyla performans açısından karşılaştırmalarının yapıldığı çalışmalar da bulunmaktadır [70-76]. Bu tarz modelleme esaslı çalışmalar; farklı koşullar ve tasarımlara göre kontrol yapılarının, farklı kısıcılı arayüzlerinin özelliklerini ortaya koyarak belirli koşullara uygun bileşen, kontrol seçimlerinin yapımında, daha az maliyetle daha verimli REDS tasarımlarında kolaylıklar sağlamaktadır.

Kullanılan yöntemlerin çeşitli sistem büyüklüklerine göre çalışma performansları, çalışma hızları, ön bilgi ve hafıza gereksinimleri, uygulama kolaylığı, gibi kriterlere göre karşılaştırmalarının yapıldığı çeşitli çalışmalar da [77-84] mevcuttur. Farklı yöntemlerin sahip olduğu artılar ve eksiler bu çalışmalardaki gibi ortaya koyularak uygun seçimler yapılabilir. Bu çalışmalar farklı arayüzler ve REDS uygulamaları için kontrol tasarımlarının seçiminde rehber niteliği görmektedir.

1.2. Tezin Amacı

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgâr enerjisinde temel amaçlardan biri enerji dönüşüm sisteminin daha verimli çalışmasını sağlamaktır. İklim şartları, atmosferik olaylar vb. durumlar rüzgârın anlık ve ani değişimler gösteren bir kaynak olmasının en büyük nedenlerindendir. Bu da rüzgârdan üretilen enerjinin değişken ve süreklilik arz etmeyen yapıda

olmasına neden olur. Bu problemi aşabilmek adına uygun kontrol yapılarıyla anlık rüzgârdan maksimum oranda yararlanabilme adına MGNİ kontrolleri kullanılmaktadır. Çalışma şekilleri birbirinden farklı olan birçok kontrol tasarımı olmasına karşın ortak hedef, enerji sisteminin anlık rüzgâra göre çalışma verimliliğini en yüksek seviyede tutabilmektir.

Bu çalışmada REDS bileşenleri, farklı kontrol yöntemleri açıklanarak bu yöntemlerden sistem verimliliğini yükseltebilmek adına yararlanılan farklı MGNİ yöntemlerinin genel bir dönüşüm sistemiyle birlikte MATLAB/Simulink ortamında modellemesi gerçekleştirilecek. Akıllı yapı olarak kullanılan bulanık mantık yöntemi başta olmak üzere yöntemlerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlarını değerlendirmek ve sistem için en uygun kontrol yapısının seçimi adına çeşitli büyüklükler ve grafikler üzerinden kontrol yapılarının performansının değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

1.3. Tezin Yapısı

Bu tezde; başta rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretimi hakkında bilgiler verilmiş, daha sonra kullanılan sistem bileşenleri ve farklı kontrol yöntemleri açıklanmıştır. Ardından temel REDS modeli MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilerek rüzgâr enerjisi için kullanılabilen farklı MGNİ yöntemlerinin birbirleriyle karşılaştırmaları yapılmıştır. Bu karşılaştırmalar çeşitli sistem büyüklüklerine ait grafiklerle desteklenmiştir.

Tezin ilk bölümünde, rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleriyle ilgili yapılan çalışmalar, tezin amacı ve literatür özetine yer verilmiştir.

İkinci bölümde rüzgâr enerjisinin dünyada ve Türkiye’deki yeri açıklanmış, REDS’yi oluşturan temel bileşenlerin çalışma prensipleri, farklı uygulamaları avantaj ve dezavantajlarına yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde ise dönüşüm sistemlerinde maksimum güç kontrolünün çalışma prensibini anlayabilme adına sistem büyüklüklerinin matematiksel modelleri elde edilmiş, farklı türden kontrol uygulamalarının çalışma şekilleri verilmiştir. Kullanılan yöntemlerin genel sistemi oluşturan bileşenler üzerinden çalışmaları açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde farklı MGNİ kontrol yöntemlerinin çalışma prensipleri verilmiş. Farklı kriterlere göre çalışma performanslarının karşılaştırması ve analizi gerçekleştirilmiştir.

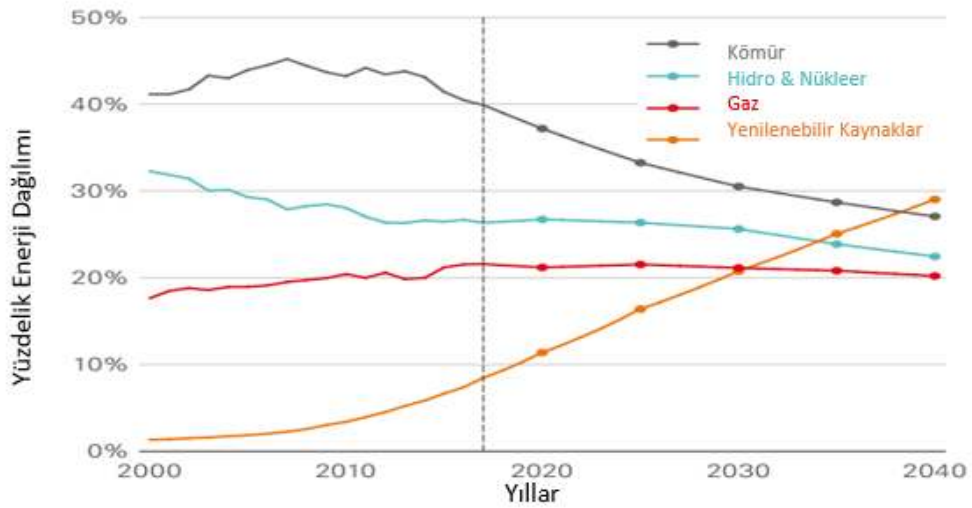
Beşinci bölümde MATLAB/Simulink programı aracılığıyla genel sistem ve farklı maksimum güç izleme kontrol modelleri oluşturulmuş, oluşturulan modeller ayrı ayrı açıklanarak elde edilen sonuçlar tablo ve grafiksel olarak sunulmuştur. Farklı rüzgâr hızı koşullarına göre kontrol yöntemlerinin uygulanmadığı ve uygulandığı durumlara göre karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir.

Son bölümde yapılan çalışmanın sonuçları verilmiş ve bu çalışmaya benzer çalışmaların geliştirilmesine dair öneriler sunulmuştur.

2. RÜZGÂR ENERJİSİ VE DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ

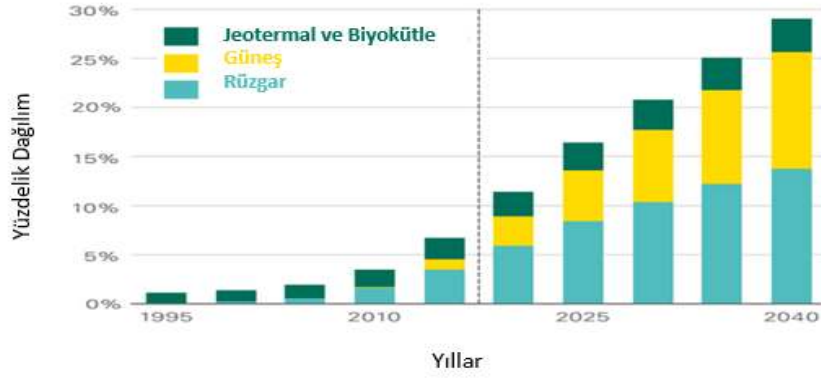
Yenilenebilir enerji, kaynağın kullanılmasıyla beraber enerji kaynağının hızlı bir şekilde tekrar yenilenmesi olarak tanımlanabilir. En bilinen türleri ise rüzgâr, güneş ve hidroelektriktir. Bunların haricinde jeotermal, dalga enerjisi, gelgit enerjisi biyokütle, hidrojen vb. yenilenebilir enerji kaynakları da bulunmaktadır.

Enerji üretiminde yenilenebilir kaynakların sağladığı en önemli avantajlar tükenbilir olmamaları ve kullanımları sonrası çevresel problemlere neden olabilecek atık oluşturmamalarıdır [85]. Gelişen teknoloji ve düşen maliyetlerle birlikte ekonomik açıdan daha rekabetçi hale gelen bu enerji türlerine yapılan yatırımlar yıllık enerji üretimindeki artışın üçte ikisine denk gelmektedir. Tahminlere göre 2040'lı yıllarda elektrik üretiminin çoğunlukla yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanacağı öngörülmektedir. Enerji üretiminde kaynaklara göre geçmişten günümüze dağılım ve gelecekteki olası dağılım Şekil 2.1'de görülmektedir.



Şekil 2.1. Enerji üretiminde kaynakların dağılımı ve gelecekte öngörülen değişimler [86]

Yenilenebilir enerji kaynaklarında kullanılan kaynak türlerine göre dağılım; o kaynak türündeki gelişmeler, düşen maliyetler enerji verimliliğine göre farklılık gösterebilir. Şekil 2.2'de mevcut ve gelecekte öngörülen yenilenebilir enerji kaynaklarına göre elektrik enerjisi üretiminin yüzdelik dağılımları görülmektedir.



Şekil 2.2. Yenilenebilir enerji kaynaklarına göre enerji üretiminin yüzdelik dağılımı [86]

Şekil 2.2’ye göre küresel çapta 2000’li yıllardan itibaren rüzgâr ve güneş enerjisinin çok hızlı bir büyüme gösterdiği ve gelecekte de göstereceği öngörülmektedir. Bu enerji türlerinden rüzgâr enerjisinde görülen bu değişimlerde,

- Devletlerin verdikleri teşvikler
- Dönüşüm sistemlerinin giderek artan verimlilikleri ve düşen maliyetler
- Gelişen kontrol teknolojileri ve daha verimli kontrol yapılarıyla kullanımları etkili olmuştur.

Rüzgâr enerjisinin özellikle güneş enerjisinin tamamlayıcısı rolünde, tükenmez olması ve giderek azalan üretim maliyeti ve artan verimlilikleri rüzgâr enerjisinin sürdürülebilirlik açısından en yenilikçi ve en gelişmiş teknolojilere sahip enerji kaynaklarından biri haline getirmiştir.

Rüzgâr enerjisinin tarihsel gelişimine bakıldığında ilk zamanlarda kullanılan yel değirmenleri vasıtasıyla rüzgâr enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülerek tahıl öğütme, su pompalama gibi işler için kullanılmıştır. Şekil 2.3’te bu amaçlar için kullanılabilen bir yel değirmeni görülmektedir.

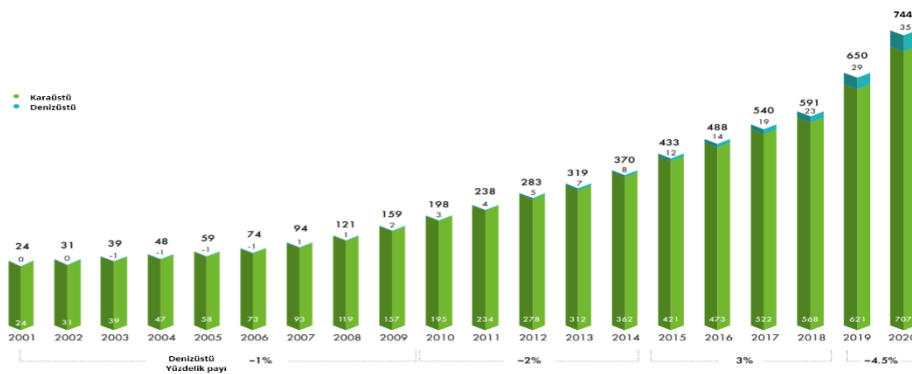


Şekil 2.3. Eski zamanlarda kullanılan bir yel değirmeni [87]

Rüzgâr enerjisi kullanılarak ilk elektrik enerjisi üretim çabaları ise 1887 yılında İngiltere’de James Blyth’ın deneyleriyle başlamıştır. Charles Francis Bush, Amerika Birleşik Devletleri’nde 1888 yılında rüzgâr enerjisini kullanarak elektrik üretmiş ve yıllarca elektrik ihtiyacını bu şekilde karşılamıştır. Bu konuda diğer bir ilerleme ise Danimarkalı mucit Poul La Cour’un 1890 yılında rüzgâr türbinleri inşa etmesidir. Yakın tarihte geçtiğimiz yüzyılın ikinci çeyreğinden itibaren ortaya çıkan yüksek güçlü türbin teknolojileriyle daha büyük çapta elektrik üretiminde de rüzgâr enerjisinden yararlanılmaya başlanmıştır. İlk modern rüzgâr türbinlerinin kullanımı Danimarka’da Kuriant, Vestas, Nordtank ve Bonus firmalarının 1979 yılında seri üretime geçmesiyle başlamıştır. Özellikle 1970’li yıllardan itibaren petrol krizinin de etkisiyle artan petrol, doğalgaz vb. fosil yakıt maliyetleri, artan çevresel bilinç rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklardan enerji üretiminin yaygınlaşmasını sağlamıştır [6, 88-89]. Üretilen ilk sistemler başlarda küçük güçlü olsalar da gelişen teknoloji ve düşen maliyetlerle daha büyük boyutlu ve yüksek güçlerde kullanılabilecek dönüşüm sistemleri farklı ülkelere yayılmıştır [89]. Günümüzde yaşanan bu gelişmeler vasıtasıyla rüzgâr enerjisi fosil ve kimyasal yakıt temelli enerjiler dışında en önemli enerji kaynaklarından biri haline gelmiştir [90].

2.1. Dünyada ve Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi

Bugün itibarıyla küresel rüzgâr enerjisi kurulu gücü 744 bin megawatt (MW)’a ulaşarak toplam elektrik üretiminde yaklaşık %7’lik paya denk gelmektedir. Rüzgâr enerjisine yönelik yatırımlar yıllık enerji yatırımlarının yaklaşık %20’sine denk gelirken rüzgâr enerjisine dayalı enerji yatırımlarının son yıllarda katlanarak artması enerji üretiminde kullanım payı en hızlı artan kaynak olmasını sağlamıştır. Geçtiğimiz yıl itibarıyla ise küresel ölçekte rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi yaklaşık 93 gigawatt (GW)’a yakın artış gösterirken, rüzgâr enerjisi teknolojilerine yönelik yatırım tutarı 99 milyar dolar seviyesinde gerçekleşmiştir. Şekil 2.4’te 40 yılı yakın zaman periyodu süresince rüzgâr enerjisi kurulu gücündeki değişim görülmektedir.



Şekil 2.4. Rüzgâr enerjisi kurulu güç değişimi [91]

Dünya genelinde rüzgâr enerjisinde lider durumdaki ülkeler ve bu ülkelerde rüzgâr enerjisinde meydana gelen kurulu güç değişimleri, Şekil 2.5'te görülmektedir.

Ülkeler	2020	Yeni kurulum 2020	2019	2018
Çin	290'000	52'000	237'029	209'529
ABD	122'328	16'895	105'433	96'363
Almanya	62'784	1'427	61'357	59'313
Hindistan	38'625	1'096	37'529	35'129
İspanya	27'446	1'638	25'808	23'494
Birleşik Krallık	24'167	652	23'515	20'743
Fransa	17'949	1303	16'646	15'313
Brazilya	18'010	2'558	15'452	14'707
Kanada	13'588	175	13'413	12'816
İtalya	10'850	280	10'512	9'958
Türkiye	9'305	1'249	8'056	7'369
Diğer Ülkeler	110'000	14'000	96'035	84'814
Toplam (MW)	744'000	93'000	650'785	589'547

Şekil 2.5. 2018-2020 dünya genelinde en büyük üretici ülkelere göre kurulu güç değişimleri [91]

Ülkelerin rüzgâr enerjisindeki durumları incelendiğinde Çin ve ABD'nin ilk iki sırayı aldıkları ve dünya genelindeki toplam kurulu gücün %50'ye yakınıni oluşturdukları görülmektedir.

Ülkemizde rüzgâr enerjisinin durumunu öğrenebilmek için ülke genelindeki enerji üretim istatistiklerine göre bir değerlendirme yapılabilir. Türkiye elektrik iletim anonim şirketi (TEİAŞ) verilerine göre 2020 yılı aralık ayı sonu toplam elektrik enerjisi kurulu güç 95.000 MW seviyelerine ulaşmıştır Şekil 2.6'daki grafiklerde ülkemizde son iki yıla göre birincil kaynakların enerji üretimindeki dağılımları görülmektedir



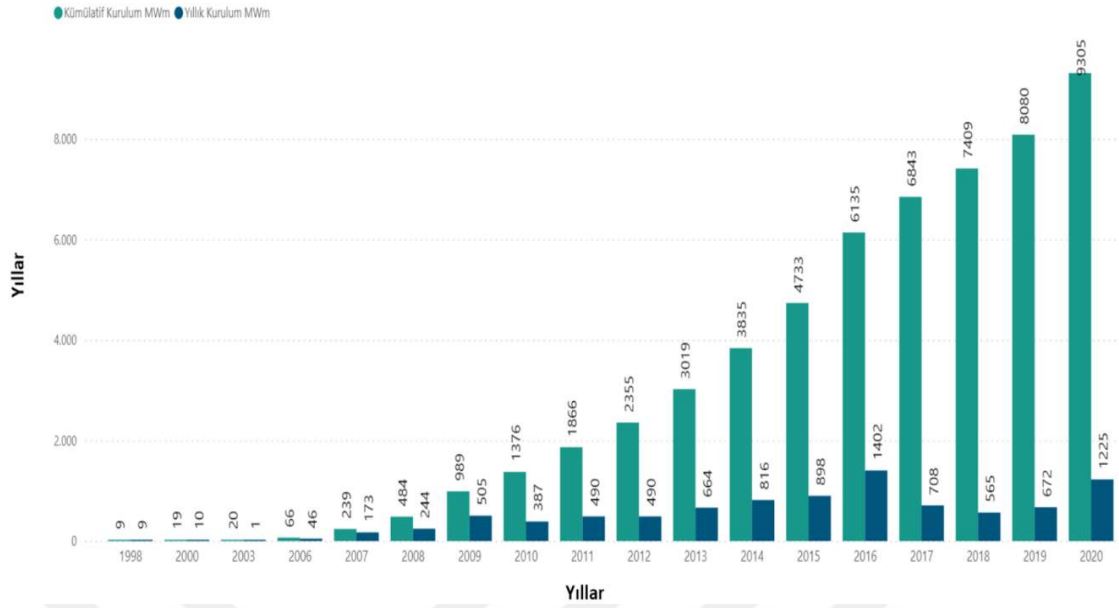
Şekil 2.6. Enerji üretimindeki kaynakların dağılımı (Gwh)

Şekil 2.6’da kaynaklara göre elektrik enerjisi üretimi kurulu gücü verileri incelendiğinde ilk üç sırada hidrolik, yenilenebilir ve doğal gaz yer almaktadır. 2019 ve 2020 Temmuz sonu verilerine göre yüzdelik sıralamanın değişmediği görülmektedir. Fakat üretim yüzdelere bakıldığında yenilenebilir kaynakların ve rüzgâr enerjisinin payının arttığı görülmektedir [92]. Türkiye, Avrupa’da rüzgâr enerjisi potansiyeli bakımından zengin ülkelerden biri olarak görülmektedir. Üç tarafı denizlerle çevrili olan ve yaklaşık 3500 km kıyı şeridi olan Türkiye’de özellikle Ege, Akdeniz, Marmara kıyıları sürekli ve düzenli rüzgâr almaktadır. Bu rüzgârlar hem kara hem deniz üstü uygulamaların yapımına olanak vermektedir. Bunun dışında uygun koşullarda düzenli rüzgâr alan birçok karasal alan da mevcuttur. Türkiye’de yer seviyesinden 50 metre yükseklikte ve 7,5 m/s üzeri rüzgâr hızlarına sahip alanlarda kilometrekare başına 5 MW gücünde rüzgâr santrali kurulabileceği kabul edilmiştir. Bu kabuller ışığında rüzgâr kaynak bilgilerinin verildiği Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) hazırlanmıştır. Bu atlasa göre Türkiye’deki rüzgâr enerjisi potansiyeli 48.000 MW olarak belirlenmiştir. Bu potansiyele karşılık gelen toplam alan Türkiye yüz ölçümünün %1,30’una denk gelmektedir [93].

Bunun dışında daha önce ülkemizdeki enerji üretiminde çok önemsenmeyen, ilgili sektör raporlarında belirtilmemiş deniz üstü ve küçük ölçekli rüzgâr enerjisi potansiyeli ve olası uygulamaları da gündeme gelmeye başlamıştır. Yayımlanan raporlara göre Türkiye kıyılarında 50 metreden az derinliği olan bölgelerde 12.000 MW, 50-1000 metre derinliği olan bölgelerde ise 57.000 MW olmak üzere toplamda yaklaşık 70.000 MW’a yakın bir deniz üstü rüzgâr enerji potansiyeli olduğu tahmin edilmektedir [94].

Ülkemizde rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminin tarihsel gelişimi incelendiğinde, düşük verimli dönüşüm sistemleri, yüksek kurulum maliyetleri ülkemizdeki rüzgâr enerjisinin üretimdeki payının ilk zamanlarda düşük olmasına neden olmuştur. Türkiye’de şebekeye bağlı rüzgâr enerjisi ile elektrik üretimi 90’lı yılların ikinci çeyreğinden itibaren başlamıştır. Özellikle 2005 yılında 5346 sayılı Yenilenebilir Elektrik Kanunu’nun çıkmasından sonra kurulu güç ve enerji üretiminde yıldan yıla büyük artışlar gözlemlenmiştir. Sektörde gelişen teknoloji, düşen maliyetler özellikle son yıllarda yüksek kapasiteli rüzgâr enerjisi santrallerinin kurulmasına ve enerji üretiminde rüzgâr enerjisinin önemli bir paya sahip olmasını sağlamıştır [95].

Yıllara göre ülkemizdeki rüzgâr enerjisi kurulu gücü değişimi Şekil 2.7.’de görülmektedir.



Şekil 2.7. 1998-2020 yılları arasında rüzgâr enerjisi kurulu güç miktarları ve değişimleri [95]

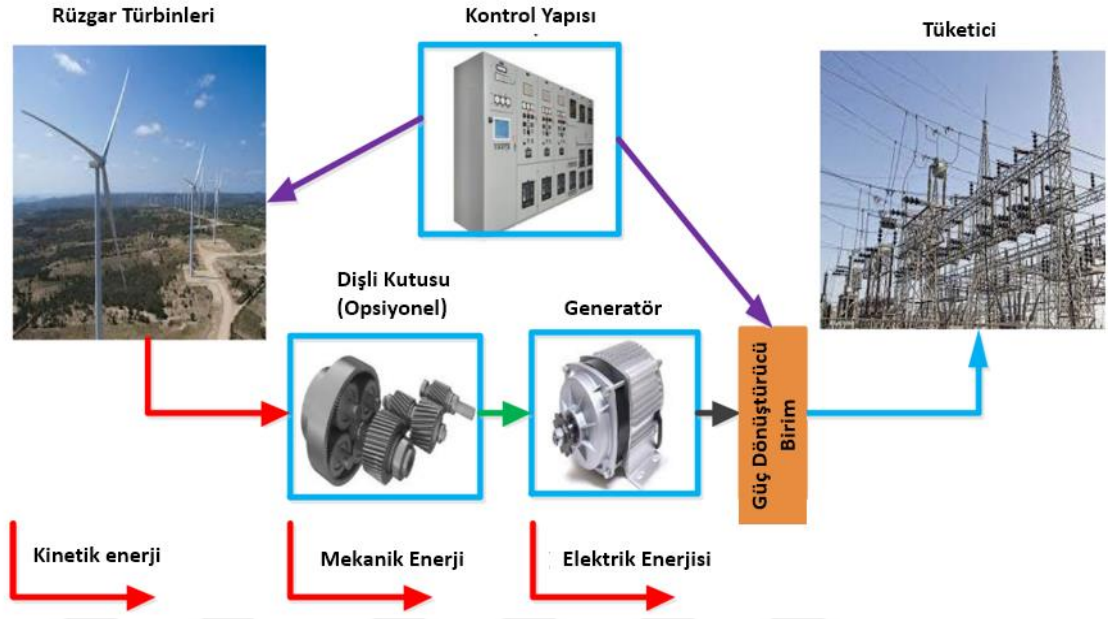
Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği (TÜREB) verilerine göre, Türkiye'nin birçok yerinde 2020 yılında Covid-19 salgınına rağmen 1225 MW'a yakın kurulumla toplamda 9305 MW (mekanik) güç seviyesinde kurulu güç enerji sistemine kazandırılmıştır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının 48,000 MW olarak öngördüğü karasal rüzgâr enerjisi kapasitesinin teknolojik gelişmeler sayesinde daha yüksek seviyelere çıkarılması ve bu kapasiteden daha fazla faydalanılması hedeflenmektedir.

Kurulu güçteki artışın yanında rüzgâr enerjisi sistemlerindeki donanımların ithalatını düşürmek adına donanımların yerli üretimle üretilmesini hedefleyen TÜBİTAK MİRES (Milli Rüzgâr Enerji Sistemleri geliştirilmesi ve Prototip Türbin Üretimi) projesi kapsamında çeşitli çalışmalar devam ettirilmekte olup yerli üretim açısından Türkiye'de 3 yerel ankraj (türbin zemin sabitleyicisi) üreticisi, 8 rüzgâr kulesi, 2 yerli generatör ve 2 dişli kutusu üreticisi bulunmaktadır. Ayrıca, Türkiye'de ilk ve tek türbin fabrikasının önümüzdeki yıllarda hizmete girmesi beklenmektedir [96, 97].

2.2. Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemleri

REDS'ler, yapı itibarıyla rüzgârın sahip olduğu kinetik enerjiyi türbin yapısıyla önce mekanik enerjiye ardından türbine bağlı olan generatör vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştüren bileşenlerden meydana gelmektedir. Elde edilen enerji, çeşitli ara bağlantı yapılarıyla istenirse şebekeye verilebilir. İstenirse de şebekeye uzak noktalarda şebekeden bağımsız lokal (tekil) çalışma moduyla da kullanılabilir.

REDS için enerji dönüşümlerini gösteren şema Şekil 2.8'de görülmektedir.



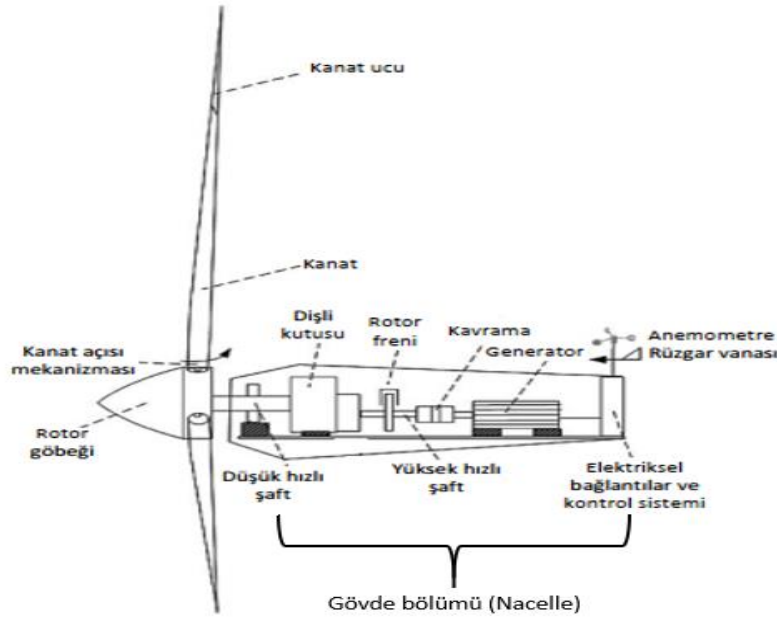
Şekil 2.8. REDS için temel dönüşüm şeması [9]

Sistemin Şekil 2.8’de belirtilen temel bileşenleri dışında kullanım amacına göre diğer ek elemanlar (depolama elemanları, trafo vb.) eklenip çıkarılabilir. Sistemi oluşturan bileşenlerin birbirleriyle uyumlulukları ve kullanılan uygun kontrol yapıları, kullanım ömrünü ve enerji üretim verimliliğini etkileyen önemli faktörlerdir.

2.2.1. Rüzgâr Türbinleri

Türbinler genel olarak buhar, gaz, su ve rüzgâr türbinleri gibi farklı türleri olmakla beraber tüm türbinlerin ortak özellikleri kaynağın sağladığı tahrikle hareketli kısımlarının dönme hareketi sonucunda mekanik enerji üretmesidir.

Rüzgâr türbinleri, rüzgârın sahip olduğu kinetik enerjiyi, mekanik enerjiye çeviren sistemlerdir. Rüzgâr türbinleri, çevredeki engellerin rüzgâr hızını değiştirmeyeceği ve daha yüksek rüzgâr yoğunluğundan yararlanılabileceği belirli bir yükseklikteki bir kule üzerine yerleştirilmiş gövde ve dönme hareketinin olduğu rotordan oluşur. Rotor kısmı, türbin kanatları ve kanatların birleştiği rotor göbeği (hub) ve rotor mili (şaft) kısımlarından meydana gelir. Bu kısımdan üretilen dönme hareketi, daha sonra generatöre aktarılır. Bir rüzgâr türbininin genel görünümü ve temel bileşenleri Şekil 2.9’da görülmektedir.



Şekil 2.9. Rüzgâr türbini ve türbindeki temel bileşenler [99]

Gövde bölümü (nacelle), rüzgâr türbin kulesinin tepesinde durur ve içerisinde dişli kutusunu, düşük ve yüksek hız millerini, generatörü, elektriksel bağlantı ve kontrol sistemi ve diğer mekanizmaları bulundurur. Kontrol ünitesi, rüzgârın hızındaki değişikliklere göre sistemi durdurma veya harekete geçiren sistem olarak tanımlanabilir. Bu harekete geçirme türbinin çalışabileceği hız aralığına göre yapılır. Bir diğer görevi ise türbin yapısının zarar görmeden verimli çalışmasını sağlamaktır. Verimli çalışma türbin çalışma hızını ayarlayarak sağlanabilirken koruma, yüksek rüzgâr hızlarında kanat açısı mekanizmasıyla kanat açısı ayarlanarak sağlanabilir. Elektriksel bağlantı kısmı ise generatör ve diğer elektriksel yapılar (batarya, trafo vb.) arasındaki yapıyı ihtiva eder. Dişli kutusu, düşük hız milini, yüksek hız miline bağlayarak dönüş hızını elektrik üretmek için gerekli olan dönüş hızına çıkartır. Dişli kutusu bir rüzgâr türbininin pahalı ve aynı zamanda ağır bir parçasıdır. Sık sık arızalanmaları ve türbin yapılarında çalışma verimlerini düşürme gibi nedenlerden dolayı günümüzde dişli kutusuna gerek kalmadan doğrudan sürüş özelliğine sahip, düşük hızlarda elektrik üretebilen generatörlerin kullanılmaya başlamasıyla bu yapılar terk edilmeye başlanmıştır. Temelde kullanıldıkları güç seviyelerine göre türbinler [3, 88, 98]

- Küçük güçlü türbinler: Genellikle 0–10 KW gücündeki sistemlerdir.
- Orta güçlü türbinler: Genellikle 10–100 KW arasında olan sistemlerdir.
- Büyük güçlü türbinler: 100 KW'dan daha büyük olan sistemlerdir.
- Megawatt Rüzgâr Türbinleri: 1 MW ve üzerindeki güç seviyesindeki türbinler şeklinde sınıflandırılırlar.

Güç seviyeleri dışında farklı kriter, tasarım ve çalışma şekillerine göre sınıflandırılabilen türbin yapıları temelde aşağıdaki özelliklere göre de sınıflandırılabilirler.

- Çalışma hızlarına göre rüzgâr türbinleri
- Dönüş eksenine göre rüzgâr türbinleri,
- Kuruldukları yerlere göre rüzgâr türbinleri

Bu sınıflandırmalar dışında kanat sayısı, önden veya arkadan rüzgârlı, durdurma ve kanat açısı kontrollerine göre de sınıflandırma yapmak mümkündür.

Çalışma Hızlarına göre Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr türbinleri çalışma hızlarına göre sabit ve değişken hızlı olmak üzere iki şekilde çalıştırılabilirler. İlk tasarımlarda kullanılan Danimarka konsepti olarak da bilinen sabit hızlı rüzgâr türbini (SHRT), rüzgârdan enerji üretiminin başladığı yıllarda düşük maliyetleri ve fazla bakım gerektirmemeleri gibi özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılmıştır. Fakat düşük verimlilik ve güç kalitesinden dolayı anlık değişen rüzgâr hızına göre değişken hızlarda çalışabilen daha yüksek performanslı değişken hızlı rüzgâr türbini (DHRT)'lere geçilmiştir [100]. Bu türbin yapılarında rüzgâra göre anlık türbin hızının ayarlanabilmesi mümkündür. Bu sayede rüzgârdan alınabilecek güç değeri; teorik olarak maksimum, pratikte ise maksimuma yakın seviyelerde tutulabilir [98, 101]. SHRT'lerin sabit hızda dönmesi sadece bir rüzgâr hızında sistemden maksimum güç elde edilmesine izin verir. Bundan dolayı daha düşük verimlidirler. Rüzgârın anlık değişim gösterebilen bir yapıda olmasından dolayı DHRT'ler anlık dönüş hızlarının kontrolüne imkân verebilmelerinden dolayı SHRT'lere göre çok daha verimli çalışırlar. Bir karşılaştırma yapmak gerekirse, DHRT'li sistemlerle aynı rüzgâr koşullarında SHRT'li sistemlere göre %30'lara varan seviyelerde daha fazla elektrik enerjisi elde etmek mümkündür [102-104].

Değişken hızlı yapıların, sabit hızlı türbin yapılarına göre sağladığı diğer avantajlar ise şöyledir.

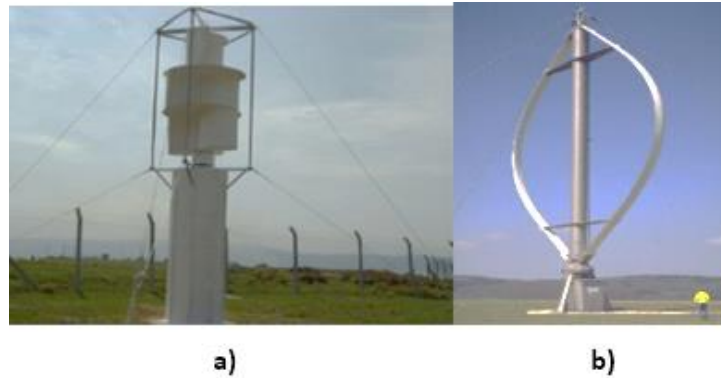
- DHRT'ler düşük hızları da içerecek şekilde çalışabilme imkânı sağlayabilirler. Türbin hızı, çıkış gücünü en üst düzeye çıkarabilecek şekilde rüzgâr hızının bir fonksiyonu olarak ayarlanabildiği için yıllık enerji üretimi artar. Dolayısıyla daha verimli çalışma elde edilir.
- DHRT'li sistemler, gücün en uygun şekilde düzenlenmesine imkân sağladığı için mekanik baskılar azalır.
- DHRT'li yapılarda rüzgârdan kaynaklanan ve çıkış gücünde değişime sebep olan anlık dalgalanmalar önemli ölçüde azalır. Güçteki dalgalanmaların azalması, üretilen gerilimin nominal değerinden uzaklaşmasını da önleyecektir. Bu da rüzgâr gücünün şebekedeki etkisini iyileştirecektir. Türbin ani ve çok kuvvetli rüzgâra maruz kaldığında, mekanik sistemin eylemsizliği rotor hızını artırıp artık enerjiyi emerek, elektriksel sistemin şebekeye sabit güç aktarmasını sağlar.

- DHRT'lerle kullanılan generatörlerde oluşan tork daha kararlı yapıdadır. Bu da tüm sistemin kararlı çalışmasında etkilidir.
- Yerleşim yakınlıklarına kurulan rüzgâr çiftliklerinde gürültü önemli bir problem olmaktadır. Değişken hızlı yapılarda akustik gürültü problemi daha azdır. Bu da bu bölgelerde değişken hızlı türbinlerin kullanımının daha yaygın olmasını sağlamıştır [3, 88, 98].

Sabit hızlı yapılara göre birçok avantajı olmasına karşın değişken hızlı türbinlerin dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar daha fazla bileşene ihtiyaç duyması, kullanılan dönüştürücü yapılarının oluşturduğu kayıplar, karmaşık kontrol yapılarına ihtiyaç duyabilmeleri ve kullanılan donanımların sistemin genel maliyetini arttırması gibidir [103]. Ancak gelişen teknolojiyle beraber daha verimli ve maliyetleri giderek düşen yapıların ortaya çıkmasıyla değişken hızlı türbin yapıları en çok kullanılan türbin tipi haline gelmiştir.

Dönüş Eksenlerine göre Rüzgâr Türbinleri

Rüzgâr türbinleri, dönüş ekseninin rüzgâra göre konumuna bakılarak yatay veya dikey eksenli olarak sınıflandırılabilirler. Yatay eksenli türbinlerde rüzgârın hareket yönü, dönüş eksenine paralel iken dikey eksenli de ise dik konumdadır. Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinin en büyük avantajı rüzgâr yönü fark etmeksizin her yönden rüzgâr alabilen yapıda olmalarıdır. Fakat bu avantaj türbinin verimliliği ve verdiği güç açısından bir dezavantajdır [103,104]. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri, kendi içinde Savonius ve Darrieus olarak iki tipe ayrılırlar. Farklı tasarım yapılarına göre dikey eksenli rüzgâr türbinleri Şekil 2.10'da verilmiştir.

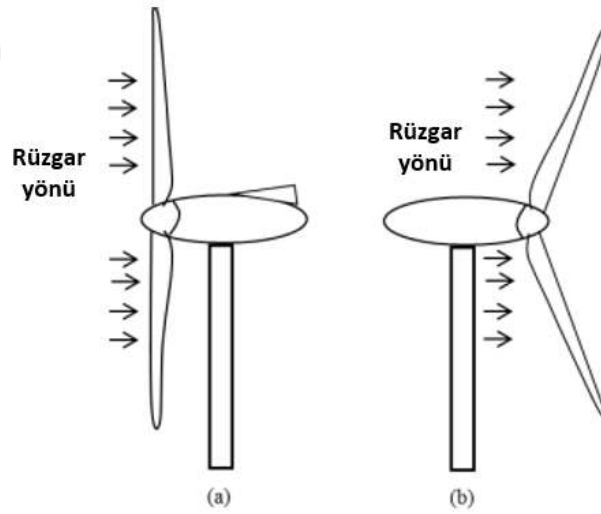


Şekil 2.10. Dikey eksenli rüzgâr türbini örnekleri (a) Savonius tipi (b) Darrieus tipi

Dikey eksenli rüzgâr türbinlerinde; kanatların yere yakın olmasından düşük rüzgâr hızını kullanamamaları verimlerini düşürür. Rüzgârdan kaynaklanan mekanik titreşimler çıkış momentinde büyük dalgalanmalar meydana getirecektir. İlk hareket için bir motora ihtiyaç

duyabilmeleri, sabitlenmelerinde tel ve halat yapılarına ihtiyaç duymaları, kanat sayılarının artmasının sistemin maliyetini ve ağırlığı arttırması gibi dezavantajları vardır [105, 106]

Yatay eksenli türbinlerin dikey eksenlilere göre en önemli avantajları tüm dönüş döngüsü boyunca rüzgârdan yararlanabilirken dikey eksenlilerde böyle bir durum olmadığı için daha yüksek verimliliğe sahip yatay eksenli türbinler daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Yatay eksenli türbinler ayrıca rüzgârı karşılama yönlerine göre kendi içinde ikiye ayrılmaktadır. Rüzgârı önden alan yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde rotor yüzü rüzgâra dönükken, rüzgârı arkadan alan yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde ise rotor kule arkasına yerleştirilmiştir. Rüzgârı önden alan türbinlerde rüzgârın gövde kısmından önce türbine gelmesi önemli bir avantajdır. Fakat bu sistemlerde rotorun rüzgârın yönüne doğru dönebilmesi için kuyruk (yaw) tertibatına gereksinim vardır. Düşük güçlerde bu tertibat pasif bir yönlendirici mekanizması ile kendiliğinden yapılır. Büyük türbinlerde ise aktif, yani elektrik motorlarının konum kontrolü ile yapılır. Rüzgârı arkadan alan yatay eksenli türbinlerde ise rotor rüzgârın yönüne doğru kuyruk tertibatına gerek duyulmadan kendi kendine dönebilmektedir. Bu türbin çeşitlerinde, rüzgârın direğin üstünden geçerek gelmesi sebebiyle güç dalgalanması olayı gerçekleşebilmektedir [98, 104]. Şekil 2.11’de rüzgârı önden ve arkadan alan türbin yapıları görülmektedir.



Şekil 2.11. Rüzgârı alışı şekillerine göre türbin yapıları a) Önden b) Arkadan

Rüzgârı arkadan alan türbinlere göre daha kararlı çalışabilmelerinden dolayı önden alan türbinler rüzgâr enerjisinde daha sıklıkla kullanılmaktadır. Şekil 2.12’de rüzgâr enerjisi uygulamalarında yaygın olarak kullanılan rüzgârı önden alan yatay eksenli türbin örnekleri görülmektedir.



Şekil 2.12. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri

Rüzgâr türbinlerinde kanat sayısının belirlenmesinde ağırlık, gürültü, verimlilik gibi kriterlere göre bir seçim yapılabilir. Türbinlerde kanat sayısı arttıkça performans kriteri olan güç katsayısı da artmaktadır. Bir kanatlıdan iki kanatlıya geçtiğimizde bu katsayı yaklaşık %10, iki kanattan üç kanatlı yapıya geçildiğinde yaklaşık %4, dört kanatlıya geçildiğinde ise %2 ye yakın artış gösterir [107]. Burada türbin kanat sayısı seçiminde verimlilik ve maliyet dengesi göz önünde bulundurularak seçim yapılır. Bu kriterlere göre üç kanatlı yapılar öne çıkmaktadır. Üç kanatlı türbin yapılarında uygun kontrol yapılarıyla yüksek verimli ve uzun ömürlü çalışma sağlanabilir. Sağladıkları avantajlardan dolayı REDS’lerde üç kanatlı değişken hızlı yatay eksenli rüzgâr türbinleri yaygın olarak kullanılırlar [108].

Kuruldukları Yerlere göre Rüzgâr Türbinleri

Kuruldukları yer bakımından türbinler için kara üstü rüzgâr türbinleri ve deniz üstü rüzgâr türbinleri olmak üzere bir sınıflandırma yapmak mümkündür.

Kara üstü rüzgâr türbinleri, konum olarak bir toprak parçası üzerine kurulan türbinlerdir. En önemli avantajları deniz üstü türbinlere göre türbine erişimin daha kolay olması ve maliyetlerinin daha düşük olmasıdır. Karada bulunmaları arıza giderimi ve bakım açısından kolaylık sağlayabilmektedir. Dezavantajları arasında; karadaki rüzgâr yoğunluğunun düşük olması, deniz üstü türbinlerine göre daha fazla kule uzunluğu gerektirmeleri, daha az verimliliğe sahip olmaları, karada toprak işgal etmeleri ve yerleşim yerlerine yakın kurulanların gürültüye sebebiyet vermesi gösterilebilir [103, 104, 106]. Bu dezavantajlarından dolayı gelişen teknolojilerle beraber deniz üstü türbin yapılarının kullanımı artmıştır.

Deniz veya okyanuslar üstünde özel olarak tasarlanmış bir platform üstüne kurulan deniz üstü rüzgâr türbinleri, özellikle kıyı ülkelerinde denizden esen rüzgârın yoğun ve güçlü olması ayrıca karada yoğunlaşan nüfusun kara üstü türbinlerin kullanımını kısıtlamasıyla daha da yaygınlaşmıştır [6]. Kule uzunluğu karadaki rüzgâr türbinlerine göre daha kısa tasarlanabilir.

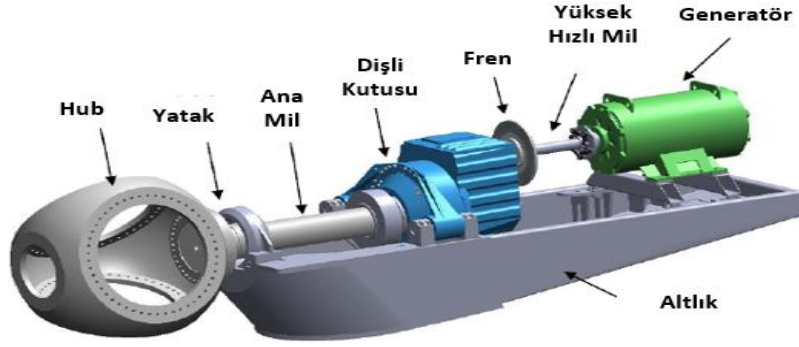
Üretim kapasiteleri karadakilere göre daha yüksektir. Kullanılan platformlar suyun derinliğine göre sabit ya da hareketli olabilir. En önemli dezavantajları ise karaya kurulanlara göre, kurulum ve bakım maliyetlerinin fazla olmasıdır [103, 107]. Herhangi bir olumsuz durumda türbinlere ulaşmak hava ve deniz olaylarından dolayı daha zor olabilmektedir. Bu dezavantajlarına rağmen enerji üretimi açısından sağladıkları üstünlükler, deniz üstü rüzgâr türbinlerinin kullanımlarının yaygınlaşmasını sağlamıştır. Şekil 2.13'te kara ve deniz üstü rüzgâr türbini örnekleri görülmektedir.



Şekil 2.13. Kara ve deniz üstü rüzgâr türbinleri [109]

2.2.2. Sürücü Sistemler ve Dişli Kutusu

Türbinlerde üretilen mekanik enerjinin generatöre aktarılmasında sürücü sistemler kullanılır. Sürücü sistemler, türbin yapısıyla generatör arasında doğrudan bağlı bir milden oluşabileceği gibi farklı hızlarda çalışan miller ve miller arasında hız aktarımını sağlayan dişli kutuları da içerebilirler. Dişli kutuları, türbin milinin hızı generatörün enerji üretebileceği kadar hızlı olmadığı durumlarda tercih edilmektedir. Şekil 2.14'te REDS'de kullanılan dişli kutulu bir sürücü sistem yapısı görülmektedir.



Şekil 2.14. Dişli kutulu sürücü sistem yapısı [110]

Dişli kutusunun görevi, rotorun bağlı bulunduğu milin sahip olduğu düşük dönme hızındaki mekanik enerjiyi, belirli bir dönüşüm oranıyla rüzgâr hızına göre daha yüksek hızlarda çalışabilen generatörün bağlı bulunduğu mile aktarmaktır. Dişli kutuları, rüzgâr hızındaki ani değişimler dolayısıyla değişen mekanik güç titreşimlerine maruz kalması, sahip oldukları hacim ve ağırlıkları, sık sık bakım gereksinimleri, arızalanma ihtimallerinin yüksek olmaları, sistem genel verimliliğini düşürmeleri gibi dezavantajlara sahiptirler. Yapılan çalışmalarda REDS’lerde gerçekleşen arızaların %20’ye yakını, oluşan mekanik kayıpların neredeyse %70’inin dişli kutusu kaynaklı olduğu belirtilmiştir [111, 112]. Bu dezavantajlarından dolayı dişli kutusuz doğrudan türbin bağlantısına uygun generatörlü yapıların REDS’lerde kullanımları yaygınlaşmıştır.

Sürücü sisteminde kullanılan bir diğer eleman olan fren mekanizması ise türbini durdurma ya da çok yüksek rüzgâr hızlarında koruma amacıyla durdurma (park modu) için kullanılabilir. Frenlemede elektromekanik veya hidrolik disk frenlerinden yararlanılabileceği gibi bu mekanizma yerine kullanılabilen kanat pozisyon kontrolünü esas alan kanat açısı (Pitch angle) ya da durdurma (stall) kontrol yapıları da kullanılabilir. Her iki yapıda hız limitinin aşıldığı durumlarda veya acil durumlarda türbinleri güvenli hıza getirme, gerektiğinde durdurma özelliğine sahiptir [11, 12, 100].

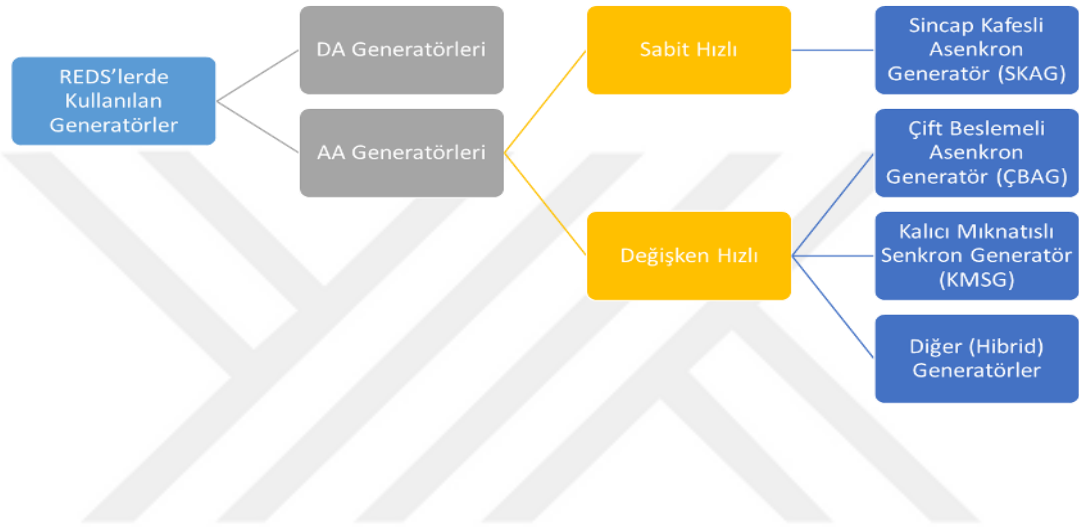
2.2.3. Generatör Yapıları

REDS’de türbinden gelen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren elektrik makinaları generatörlerdir. REDS’de enerji üretiminde kullanılacak generatörün seçiminde birçok kriterle göre seçim yapılabilmektedir. Bu kriterler;

- Çalışma Performansı
- Diğer donanımlarla uyumlulukları
- Maliyetleri
- Bakım gereksinimleridir.

Generatör tipi belirlendikten sonra kullanılacak generatörün anma gücünün belirlenmesinde kullanılacağı türbinin gücü, maliyeti ve elektrik enerjisine dönüşümde kullanılamayan enerji göz önünde bulundurulur [112, 113].

REDS’de kullanılabilecek generatörler çalışma şekilleri, sabit veya değişken hızlı türbinlerle kullanımlarına göre Şekil 2.15’teki gibi bir genel sınıflandırma yapmak mümkündür.



Şekil 2.15. REDS’lerle kullanılabilen genaratörler

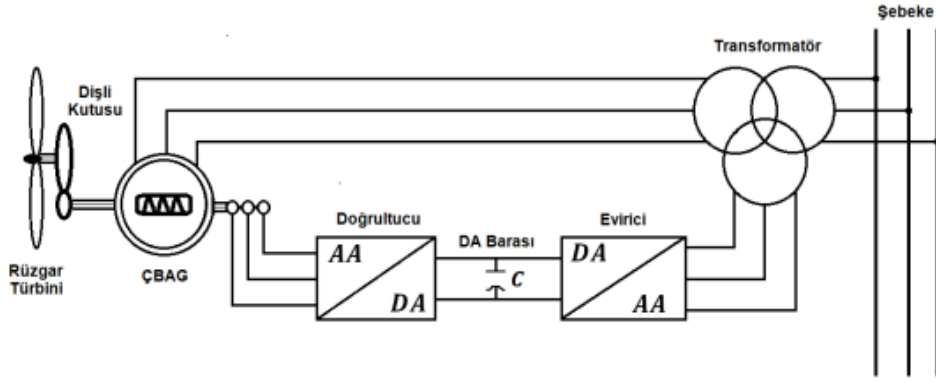
Rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminin ilk zamanlarında özellikle küçük güçlü sistemlerde doğru akım (DA) generatörleri yaygın olarak kullanılmaktaydı. Zamanla artan güç seviyeleri karşısında sahip olduğu fırça bilezik yapısının güvenilirliklerinin düşük olması, çok sık arızalanabilmeleri ve bakım gerektirmeleri gibi dezavantajlarından dolayı yerlerini senkron ve asenkron alternatif akım (AA) generatörleri almıştır. Bu tür generatörlerde kullanıldıkları REDS’nin sabit ya da değişken hızlı olabilmesine göre farklı türleri kullanılabilir.

Sincap Kafesli Asenkron Generatörler

Sabit hızlı türbin yapılarında şebekeye doğrudan bağlanabilmek için çalışan sincap kafesli asenkron generatör (SKAG)’ler sağlam yapıya olmaları, fırça düzeneği gerektirmemeleri, arıza ve bakım açısından avantajlı ve ekonomik olmaları kullanımlarında etkili olmuştur. Ancak kullanılan generatörün çalışma sınırlılıkları, düşük verimlilik, güç kalitesi açısından problemli olabilmeleri ve çalışma sırasında tükettikleri reaktif gücün şebeke entegrasyonu açısından doğurduğu problemler daha yüksek güçlerde ve değişken hızlarda farklı generatör yapılarının kullanımını sağlamıştır.

Çift Beslemeli Asenkron Generatörler

Rotoru sargılı asenkron generatörler rotorunda bilezikli yapı ihtiva eden uyartım düzenine sahip asenkron generatörlerdir. Bu sayede rotor akımının dışarıdan kontrol edilebilme özelliği vardır. Bu tip generatörlerde çift beslemeli tanımı, stator sargılarının da rotor sargılarının da elektriksel kaynağa bağlantısından kaynaklanır. Çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG)'lerde stator sargısı şebekeye doğrudan bağlanırken rotor sargısı bir güç elektroniği arayüzü üzerinden şebekeye bağlanmıştır. Arayüz olarak genellikle sırt sırta bağlı iki adet gerilim kaynaklı darbe genişlik modülasyon tekniğini kullanan, konverterlerden yararlanır [5, 114-116]. Rotor ve şebeke tarafındaki iki kısım olarak ayrılabilen bu yapılarla iki yönlü enerji akışı sağlanabilir. Generatör tarafındaki kısım doğrultma, şebeke tarafındaki kısım evirme işlemi yapacak şekilde çalışır. Aynı zamanda farklı kontrol amaçları için de bu yapılardan yararlanır. Şekil 2.16'da rüzgâr enerjisi sisteminde ÇBAG'li REDS modeli görülmektedir.



Şekil 2.16. ÇBAG'li REDS modeli [11]

Generatör tarafındaki konverter kısmı, elektromanyetik torku regüle ederek generatörün çalışma hızının ayarlanmasını sağlarken makinanın manyetizasyonunu sürdürebilmesi için reaktif güç akışını da kontrol eder. Şebeke tarafındaki kısım ise, konverter kısımları arasında doğrultulmuş gerilimi regüle ederek uygun kararlılıkta çalışmasını ve şebekeye enerji aktarımını sağlar [3, 114, 115]. Generatör hızı, senkron hızın altına düştüğünde bu konverterli yapı üzerinden şebekeden rotora elektriksel güç verilir. Böylece generatör hızının senkron hızı geçmesi ve şebekeye enerji aktarılması sağlanır. Senkron generatörlerle karşılaştırıldığında senkron altı ve senkron üstü hızlarda, sınırlı bir aralıkta değişken hızlı olarak çalışırlar [4].

REDS'lerde kullanılan ÇBAG'lerin sağladığı avantajlar

- Sadece rotorun kayma gücünü kontrol etmeye yarayan güç elektroniği yapısı kullanıldığından, toplam sistem gücünün yaklaşık %25'i oranında bir kısmı güçlü bir yapıyla

kullanılabilirler. Küçük güçlü, düşük maliyetli yapıların kullanılması sistemin maliyetini azaltır.

- Rotorlarında bulundurdıkları sargı ve uyarma akımı üzerinden çıkış gücünün ve geriliminin dolayısıyla güç faktörünün kontrolüne imkân sağlarlar.
- Filtre elemanları güç elektroniği yapısına göre anma gücünün %25'i kadarı olduğu için maliyeti düşüktür. Görülebilecek harmonikler daha zayıftır.
- Konverter tarafından generatöre aktarılan reaktif gücün kontrol edilmesiyle reaktif güç için ek donanım, teçhizat ihtiyacı ortadan kalkar.
- MW seviyesindeki büyük güçlü rüzgâr türbinleri için kullanımları uygundur. Harici bozucu etkilere karşı dayanıklılık ve kararlılıkları yüksektir [3-5].

Senkron hızın altında ve üstünde belirli hız aralığında çalışabilmesinden dolayı değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde çift beslemeli asenkron generatör kullanımı yaygınlaşmıştır. Deniz üstü yüksek güçlü rüzgâr enerji santrallerinde kullanımı uygundur. ÇBAG'lerin için en büyük dezavantajları ise

- Dişli kutulu bağlantı gerektirebilmeleri,
- Bünyesinde periyodik bakıma ihtiyaç duyan bilezik tertibatının bulunması
- Rotordaki sargı yapısının ek kayıplar oluşturması
- Statorunun direkt şebeke bağlantısının olmasından dolayı oluşabilecek arızanın generatöre aksedebilme ihtimalinin olmasıdır.

Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatörler

Senkron generatörlerde enerji dönüşümü için temel koşul generatör rotorunun senkron hızda dönmesidir. REDS uygulamalarında türbine ya direkt bağlı ya da dişli kutulu kullanımları mevcuttur. Rotorda manyetik alanın oluşturulma şekline göre iki farklı senkron generatör tipinden bahsedilebilir.

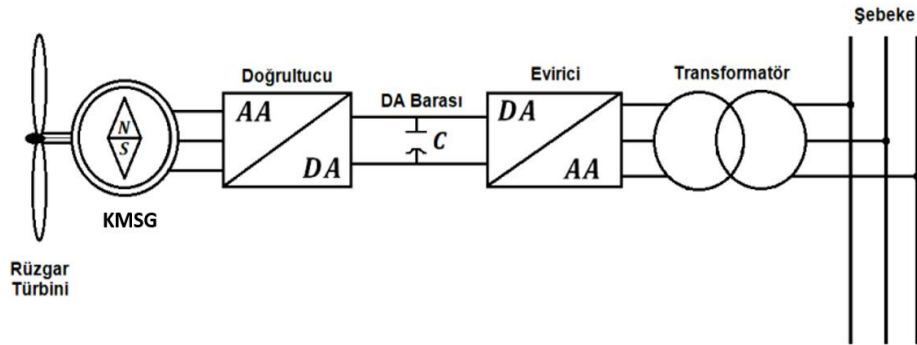
- Rotoru sargılı senkron generatörler
- Kalıcı mıknatıslı senkron generatörler

Rotoru sargılı senkron generatörler, çok kutuplu olarak kullanılırlar ve hızları yavaştır. Dişli kutusu olmadan doğrudan tahrikli olarak kullanılabildikleri gibi dişli kutusuyla da kullanılabilirler. Generatör şebekeden bir arayüz ile ayrıldığından dolayı şebeke bozulmaları generatörü direkt olarak etkilemez, gerilim düşmesi sırasında akım ve tork değişimi ÇBAG'ye göre daha düşüktür ve geçici rejimler daha kısa sürer. Hızın düşük olduğu durumlarda bile geniş hız aralığında çalıştırılabilirler [104, 109, 117]. Ancak bilezikli yapıda kullanımları bakım ve belirli periyotlarla değişim ister. Rotorlarının sargılı olması, uyarım devresiyle kullanımlarıyla ilave bakır kayıpları oluştururlar. Ayrıca yüksek güçlü konverter yapılarına ihtiyaç duymalarından maliyetleri yüksektir. Bu dezavantajlarından dolayı diğer bir senkron generatör yapısı olan KMSG'lerin REDS'lerde

kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Diğer generatörlere göre en önemli farklılıkları rotorlarında bulunan kalıcı mıknatıslarla harici bir uyarıma ihtiyaç duymadan kullanılabilmeleridir. Bu hem fırça bilezik tertibatını ortadan kaldırma hem de uyarma sargısından kaynaklanan kayıpların olmaması adına önemlidir. Sahip olduğu diğer avantajlar ise

- Daha güçlü mekanik karakteristiğe sahip olmaları
- Her hız seviyesinde güç üretebilmeleri
- Asenkron generatörlerin aksine kafessiz bir rotor yapısına sahip olmaları daha küçük eylemsizlik momentine sahip olmalarını sağlamıştır.
- Özdeş güçteki diğer tür generatörlere göre daha yüksek güç yoğunluğuna sahip olup daha küçük boyutludurlar.

Bu generatörlerin çok kutuplu yapıya sahip olacak şekilde tasarlanmasıyla, daha düşük hızlarda dişli kutusuna ihtiyaç duymadan doğrudan türbin bağlantılı olarak kullanılabilirler. REDS'ler için sık sık arızalanan, bakım gerektiren ve sistem verimliliğini düşüren dişli kutusunu ortadan kaldıracak şekilde tasarlanabilmeleriyle bu generatörlerin REDS'lerde kullanımı yaygınlaşmıştır. Şekil 2.17'de KMSG'li REDS modeli görülmektedir.



Şekil 2.17. KMSG'li REDS modeli [11]

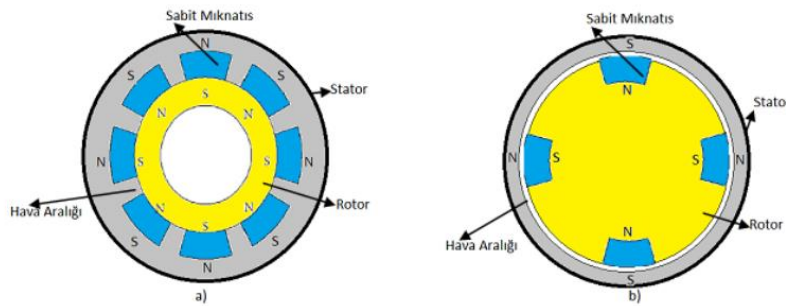
ÇBAG'ler gibi şebeke ya da yük ile generatör arasında kullanılan arayüzlerde generatör tarafındaki kısım çalışma hızının ayarlanmasını sağlarken yük tarafındaki kısım ise, aktarılan gücün kalitesinin ayarlanmasını ve uygun kararlılıkta çalışmayı sağlar. Birçok avantaj sunmasına rağmen KMSG'lerin de sahip olduğu dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar;

- Sistemde kullanılan sabit mıknatısların fiyatlarının yüksek oluşu ve yüksek sıcaklıklarda mıknatısların demagnetize olabilme ihtimalleri vardır.
- Çift beslemelilere göre arayüz yapısının daha yüksek güçlü olması gerekir. Bu da sistem kayıplarını ve maliyetini artırır.

- Rotorlarında sargı bulunmamasından dolayı makinanın güç faktörü doğrudan kontrol edilemez.
- Şebekeye bağlantı ve gerilim regülasyonunu açısından bazı sorunlar çıkartabilir ve birtakım düzenlemeler gerektirir. Asenkron generatörlere göre daha karmaşık kontrol sistemlerine sahiptir.
- Kalıcı mıknatıslı generatörler için kullanılacakları güç seviyesinin artması beraberinde kutup sayısını da artırır. Bu da boyut, ağırlık ve maliyet açısından diğer generatörlerin kullanıldığı DHRT’li sistemlere göre dezavantajlı olmalarına neden olabilir. Bundan dolayı yüksek güç seviyelerinde DHRT’li sistemlerde KMSG’nin kullanımı kısıtlı iken, küçük ve orta ölçekli sistemlerde kullanımı ise daha yaygındır [103, 109, 116].

Gelişen teknolojilerle tasarım, üretim ve kullanıldıkları arayüzlerin giderek maliyetlerinin düştüğü görülmektedir. Bu gelişmelerle daha az maliyetli ve daha verimli KMSG’lerin özellikle bakım yapma veya arızanın giderilmesi için erişimin zor olduğu REDS’lerle kullanımının artacağı öngörülmektedir.

KMSG’ler kendi içlerinde rotordaki mıknatısın konumu, akı yönü, rotor ve statorun konumuna göre sınıflandırılabilirler. Şekil 2.18’de kalıcı mıknatısların rotor yüzeyine ve rotora gömülü olarak yerleştirildiği KMSG yapıları gösterilmektedir



Şekil 2.18. Mıknatısların rotor yüzeyindeki konumlarına göre KMSG türleri a) Yüzey mıknatıslı tip b) Rotora gömülü mıknatıslı tip

Şekil 2.18’e göre yüzey mıknatıslı KMSG’lerde hava aralığı büyük olduğundan endüvi reaksiyonu düşük olmaktadır. Ayrıca rotor pozisyonundan bağımsız olarak farklı referans çatı dönüşümlerinde endüktans bileşenleri birbirlerine eşittir. Rotora gömülü KMSG’lerde ise mıknatıslar rotor yüzeyinde açılan oyuklara yerleştirilir. Bu tip KMSG’ler, yüzeye montajlı senkron makinaya göre mekanik olarak daha sağlam yapıdadır. Ancak makinede rotor pozisyonu değiştiğinde endüktans bileşenleri de değişir. Bu sebeple rotora gömülü KMSG’nin kontrolü yüzey mıknatıslı türlere göre daha zor olmaktadır. Kullanılacak KMSG’nin seçiminde mıknatısların rotordaki

konumu dışında çalışma hızı, anma gücü, maliyet, performans ve kullanım şekli gibi kriterler de esas alınır.

Diğer Generatör Türleri ve Yenilikçi Yaklaşımlar

Yaygın türler dışında REDS'lerle kullanılan farklı generatör tipleri de mevcuttur. Bunlara örnek olarak rotor miline yerleştirilmiş ayarlanabilir harici rotor dirençleri üzerinden çalışabilen optisliip generatörler DA makinalarındaki fırça düzeneğini ortadan kaldıran fırçasız kalıcı mıknatıslı DA generatörler ve anahtarlamalı relüktans generatörlerin de REDS'lerde kullanımlarıyla ilgili çalışmalar mevcuttur.

Bunların dışında mevcut generatörlerin dezavantajlarını ortadan kaldırmaya yönelik olarak fırçasız ÇBAG, süper iletkenli, manyetik uyartımlı generatörlerin REDS'lerde kullanımlarıyla ilgili çalışmalar da yapılmaktadır [2].

Hibrid olarak tanımlanacak generatör kullanımlarında ise büyük güçlü sistemler için gelecekte kullanımı yaygınlaşabilecek bir kavram olup dişli kutusu mil ve generatörü aynı noktada entegre bir şekilde kullanıp boyut ve ağırlık açısından avantaj sağlamak için ortaya konulan bir kavramdır. Örneğin daha az kutuplu KMSG'nin daha az kademeli dişli kutusuyla kullanımları; maliyet, boyut ve performans arasında dengeyi kurabilecek şekilde hibrid kullanımlara örnek gösterilebilir [79, 112, 116].

Sonuç olarak REDS'nin genel performansı; kurulacağı yer, bu yerin rüzgâr özelliği ve türbin tipine göre en uygun generatörün kullanılmasına bağlıdır. Generatör, rüzgârın gösterdiği değişimlere karşı maksimum verimlilikle çalışabilmelidir Küçük ve orta güçlü REDS'lerde hem SKAG hem de KMSG kullanılabilir. SKAG'lerle KMSG'ler stator yapısı açısından benzerlik gösterse de rotor yapılarından dolayı KMSG'ler aynı anma gücündeki SKAG'lere göre daha yüksek verimlidirler. Ancak KMSG'lerin maliyeti daha yüksektir. Büyük güçlü rüzgâr sistemleri için ise hem ÇBAG hem de uyartımlı senkron generatörler tercih edilebilir. Uygun bir güç elektroniği arayüzüyle kullanılan generatörlerin çıkış harmoniklerinin minimize edilmesi de sağlanabilir. Böylece, generatör üzerindeki tork titreşimleri azalır ve çıkış gücünün kalitesi artar [3, 117]. Rüzgâr enerjisi piyasasında kısmi ölçekli anma gücünde konverter yapılarıyla kullanılabilen ÇBAG'li sistemler yaygın olarak görünse de yakın gelecekte gelişen güç elektroniği teknolojisiyle beraber daha az maliyetli tam ölçekli anma gücünde çalışan konverter yapılarıyla kullanılabilen KMSG'li ve hibrid yaklaşımların yaygınlaşacağı tahmin edilmektedir [79, 118].

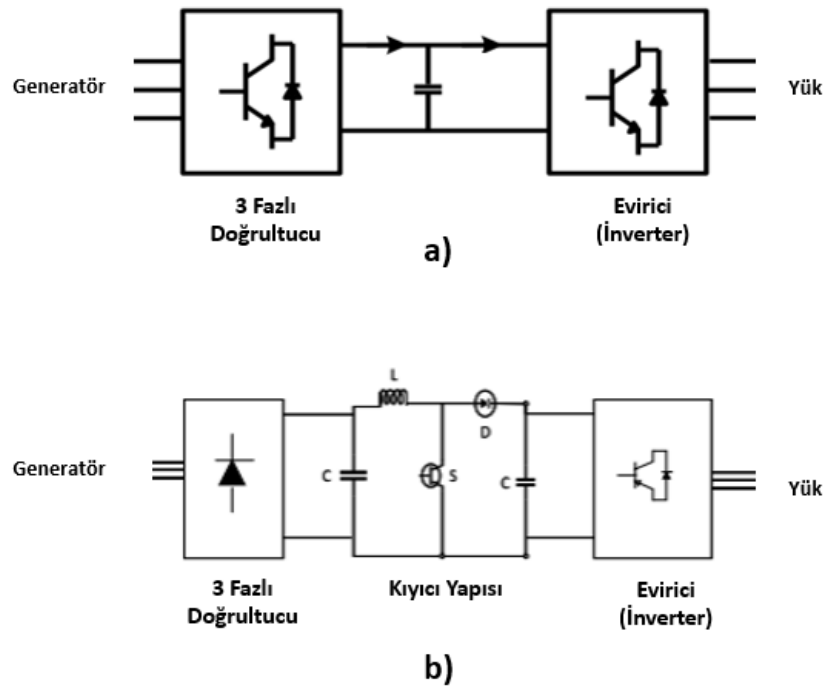
2.2.4. Güç Elektroniği Arayüzleri

Güç elektroniği arayüzleri (konverter yapıları), REDS'lerde sistemle yük ya da şebeke arasındaki bağlantı görevini gören yapılardır. Bu arayüzler, çeşitli elektriksel dönüşüm işlemlerini yerine getirmenin yanında değişen rüzgâr hızlarında anlık rüzgârdan maksimum oranda

yaralanırken yük veya şebekeye uygun genlik ve frekansta enerji alışverişi için farklı kontrol hedeflerini yerine getirmek için de kullanılırlar. Kontrollü ya da kontrolsüz yarı iletken elemanların bir araya getirilmesiyle oluşan bu yapıların REDS'ler için kullanımında iki farklı kriter göz önüne alınmaktadır.

- Kullanıldıkları güç seviyeleri
- Çalışma performansları ve maliyetleridir.

Güç elektroniği arayüzleriyle ilgili literatürde birçok farklı uygulama mevcut olmakla beraber REDS'lerle kullanılan iki farklı yapı öne çıkmaktadır. Bunlardan biri sırt sırta bağlı arayüz yapısı, diğeri ise DA kıyıcı yapıdır. Kullanılan arayüz yapısı hangi tür olursa olsun temel hedef yüksek verimlilikle enerji üretimi ve üretilen enerjinin en yüksek kalitede yüke ya da şebekeye uygun şekilde aktarılmasıdır [119]. REDS'de bu iki yapının kullanım şekilleri, Şekil 2.19'da görülmektedir.



Şekil 2.19. Değişken hızlı REDS'lerle kullanılabilen arayüz yapıları a) Sırt sırta bağlı b) Kıyıcı yapı

Gösterilen arayüz yapıları kullanıldıkları güç seviyeleri, maliyet, kontrol imkânları açısından kullanım farklılıklarına sahiptirler. Şekil 2.19 (a)'da sırt sırta bağlı arayüz yapısı; generatör ve yük tarafındaki kontrollerin birbirlerinden bağımsız ve esnek yapılabilmesi şebeke tarafından gelebilecek bir probleme karşı tampon görevi görebilmeleri gibi avantajları vardır. Generatör ve yük tarafı olarak iki kısma ayırabileceğimiz yapıda generatör tarafında doğrultucu olarak kullanılan

yapı ile generatörden gelen değişken yapıdaki gerilim doğrultularak arada kullanılan kapasitenin de yardımıyla belirli seviyede tutulur. Daha sonra bu gerilim, evirici olarak kullanılan diğer kısım aracılığıyla yüke ya da bağlı olan şebekeye uygun genlik ve frekansta alternatif gerilim için kullanılır. Generatör tarafındaki yapının kontrolü ile maksimum güç izleme kontrolü, yük tarafındaki yapının kontrolü ile de güç aktarımı ve DA bara gerilimini sabit bir değerde tutma hedefleri gerçekleştirilir. Ancak bu arayüz tipinde her iki yapıdaki kontrollü elemanların sayısının artması, maliyet ve kayıpların da artmasına neden olur. Bunlar, kullanıldıkları sistemin daha da yüksek güçlerde ya da daha büyük hız aralığında kullanımlarıyla daha da artar.

Diğer bir arayüz yapısı olan Şekil 2.19 (b)'de görülen kıyıcı yapılar, küçük ve orta güçlü sistemlerde basit yapıları, düşük maliyetleri, kararlı çalışma ve kontrol kolaylığı gibi etkenlerden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır [120]. Bu yapılarda generatör tarafındaki kontrolsüz doğrultucu çıkışında rüzgârdaki değişimlere göre değişken yapıda bir DA gerilim elde edilir. Bu gerilimin şebeke ya da yük tarafındaki yapı için uygun bir seviyede tutulması gerekmektedir. Burada kullanılan DA kıyıcısının türüne göre girişteki değişken yapıdaki doğrultulmuş gerilim düşürülerek ya da yükseltilerek kıyıcı çıkışında belirli bir seviyede tutulur. Bu gerilim de daha sonra evirici tarafından yüke uygun sabit frekanslı alternatif gerilime dönüştürülür. Bu yapıda kullanılacak kıyıcının anlık kontrolü sistemin anlık değişimlere karşı yüksek verimlilikle çalışmasını sağlar. Kıyıcı ve inverter yapısı arasındaki kapasite elemanı ise anlık dalgalanmaları minimize etmek için kullanılabilir.

Bahsedilen iki arayüz yapısı dışında güç elektroniği alanında görülen gelişmelerle anlık değişen rüzgâr enerjisinden daha verimli ve kararlı enerji elde edebilme adına farklı, yeni yapılar ortaya çıkmakta ve maliyetler giderek düşmektedir. Yüksek güç seviyelerinde de kullanılabilen çoklu, matrix, rezonans, ardışık, tandem konverterler gibi yapılar bunlara örnek gösterilebilir [11].

2.2.5. Şebeke veya Yük Bağlantı Elemanları

Şebekeye bağlı sistemlerde inverter çıkışında elde edilen gerilimin güç elektroniği yapılarından kaynaklı harmoniklerle şebekeye verilmesi mümkün değildir. Elde edilen gerilim uygun bir filtre yapısıyla filtrelendikten sonra yükseltici trafolarla şebekeye güç aktarımının yapılması sağlanır. Filtreleme işlemi, endüktans ve kapasite elemanları içeren farklı devre tasarımlarıyla gerçekleştirilebilir [121].

REDS'lerde üretilen enerji, şebekeye verilebileceği gibi dağıtım şebekelerine erişimin olmadığı yerlerde lokal (stand alone) çalışma moduyla da kullanılabilir. Özellikle lokal çalışma moduyla kullanılan REDS'ler birçok yenilenebilir enerji kaynağının aynı şekilde kullanımına göre verimlilik ve maliyet açısından daha avantajlıdır [65]. Ancak rüzgârın anlık değişimine karşı enerji sürekliliğini korumak adına farklı kaynak ve elemanlarla birlikte kullanımları gerekebilir. Lokal çalışma modunda sistem çıkışına elde edilen enerji mevcut talebi karşılamasının yanı sıra kullanılan

batarya gibi depolama sistemleriyle enerjinin depolanması rüzgâr enerjisinin yetersiz olduğu zamanlarda bataryalar üzerinden enerji sürekliliği sağlanabilir. Uygun kontrol yapılarıyla depolama sistemlerinin şarj deşarj ve kapatma durumları anlık kontrol edilebilir [113]. Şebekeye bağlantılı yapılarla depolama sisteminin kullanımlarında ise şarj durumuna göre şebekeye enerji aktarımı sağlanabileceği gibi enerjinin yetmediği durumlarda şebekeden çekilen enerjiyle ihtiyacın karşılanması da sağlanabilir. Bataryalar dışında yakıt hücreleri, süper kapasitörler de depolama amacıyla REDS’lerle kullanılabilir [101, 122-123].



3. RÜZGÂR ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNİN KONTROLÜ

REDS’lerde kullanılan kontrol sistemleri, genel olarak türbin çalışmasının optimize edilmesi, elektriksel gücün kalitesinin en yüksek seviyede tutulması bunlar yapılırken tüm sistemin güvenli bir şekilde çalışmasını hedefler. Özellikle rüzgârın gösterdiği anlık değişimlere göre kullanılan kontrol yapılarının cevap hızları, sistemin çalışma kararlılığını sürdürebilmeleri, üretim maliyetlerini düşürebilmeleri kontrol yapılarının performansını belirleyen kriterlerdir. Kontrol yapıları, kontrol edilecek büyüklük ve kontrol hedeflerine göre REDS’yi oluşturan farklı bileşenler üzerinden uygulanabilirler. Birçok farklı türde kontrol yapısı olmakla beraber REDS’lerde temelde üç kontrol yapısından bahsedilebilir.

- Kanat açısı kontrolü
- Maksimum güç noktası izleme kontrolü
- Yük/Şebeke tarafı kontrol [113]

REDS’nin çalışabileceği hızlardan daha büyük rüzgâr hızlarında mekanik aksanlara ve generatöre zarar vermemek için türbinin yavaşlatılması gerekir. Bu amaçla yapılan kanat açısı kontrolüyle türbin kanat açısı ayarlanarak sistemin anma gücünü ve hızını aşmadan çalışması, gerektiği durumlarda durdurulabilmesi sağlanır.

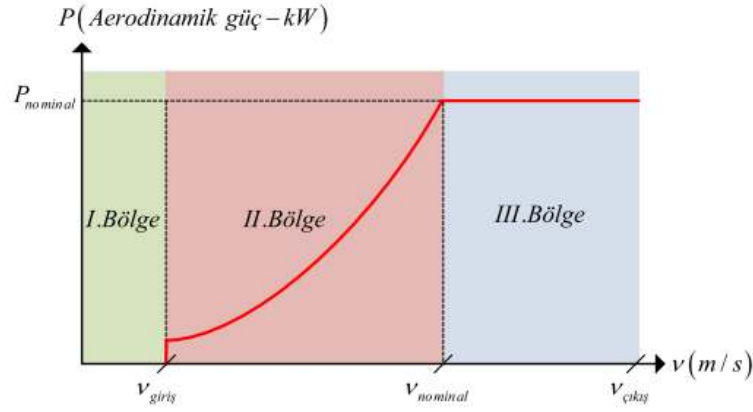
Maksimum güç noktası izleme kontrolünde ise sistemin anma hızından daha düşük hızlarda anlık rüzgâra göre sistem çalışma hızını ayarlayarak anlık verimliliğinin en yüksek seviyede tutulması sağlanır.

Yük/Şebeke tarafındaki kontrolde ise şebeke ya da yüke uygun ve kararlı yapıda enerji aktarımı esastır. Aktarılan gerilimin anlık hız değişimlerinden etkilenmeden istenen genlik ve frekansta verilmesi bu kontrol yapısının çalışmasına örnek gösterilebilir.

Kontrol yapılarının seçiminde ve tasarımında sisteme ait çeşitli büyüklüklerin matematiksel ifadeleri, hangi büyüklüklerin hangi parametrelerle ilişkili olduğunun anlaşılması ve kontrol yapısının analizi ve verimli şekilde oluşturulması açısından önemlidir [104].

3.1. Türbin Sisteminin Modeli ve Kontrolü

Sistemin ilk elemanı olan türbinler, anlık rüzgârdan mekanik gücün elde edildiği yapılardır. Rüzgâr türbinlerinde güç kontrolü, türbinin nominal çalışma hızının altında maksimum gücü elde edebilmesi, nominal hızın üstündeki hızlarda ise türbinin zarar görmesini engelleyecek şekilde generatör anma gücünde çalışmasını sağlayacak şekilde yapılır. Bu iki kontrol hedefi için türbinin güç karakteristiğini gösteren güç eğrisi, kontrol uygulamalarında esas alınır. Şekil 3.1’de değişken hızlı türbin yapısı için güç eğrisi ve çalışma bölgeleri görülmektedir.



Şekil 3.1. REDS için güç eğrisi grafiği [99]

Şekil 3.1’de farklı rüzgâr hızı değerleri arasında farklı renklerle tanımlanan çalışma bölgelerinde farklı kontrol metotlarıyla çalışma sağlanır. REDS’nin çalışmaya başlayacağı rüzgâr hızı $V_{giriş}$ durdurulacağı rüzgâr hızı $V_{çıkış}$ arasında uygun kontrol yöntemleriyle türbinin ürettiği güç kontrol edilebilir.

Rüzgâr hızının $V_{giriş}$ ’ten düşük olduğu I. bölge türbinin sahip olduğu eylemsizlikten dolayı hareket etmesini sağlayamayacağı için türbin çalışması gerçekleşmez. Bu eşik hız değeri aşıldığında bu hız ile sistemin çalışabileceği nominal hız ($V_{nominal}$) aralığındaki II. Bölge, kısmi yük bölgesi olarak tanımlanır. Bu bölgede rüzgârdan maksimum oranda faydalanılmaya çalışılır. Bu anlık değişen rüzgâr hızına göre çalışma hızının kontrolüyle sağlanır. Türbinin herhangi bir problem yaşamadan anma gücünde çalışabileceği $V_{nominal}$ ile $V_{çıkış}$ hızı aralığındaki III. bölge tam yük bölgesidir. Bu hız aralığında uygun kontrolle sistemin anma gücünde çalışması sağlanır. Bu bölgede kanat açısı ayarlanabilir bir türbin yapısında açı kontrolüyle çalışması sağlanabilir. $V_{çıkış}$ hızının üstüne çıkıldığında ise REDS’nin zarar görmemesi adına sistemin çalışmasının durdurulması gerekir.

Bu yük bölgelerinde türbin yapısının kontrolü için üç temel kontrolden bahsedilebilir. Bunlar

- Kanat kontrolü
- Hız kontrolü
- Yön kontrolüdür.

Kanat kontrolünde temel hedef, tam yük bölgesinde generatör anma gücünü aşmayacak şekilde güç kontrolünü yapmaktır. Yüksek rüzgâr hızlarında rotor hızının aşırı yükselmesini engellemek, momenti nominal değerlerinde tutmak amaçlanır. Bu kontrol, kanat açısının ayarlanabildiği (pitch angle) kontrol ile yapılabileceği gibi türbinin hareketini durduracak (stall) kontrolü ile de yapılabilir. Kullanılacak kontrol yapılarının kendiliğinden ya da tahrik sistemleriyle gerçekleştirildiği pasif ya da aktif kontrol yapıları da mevcuttur [99, 107].

Türbinde hız kontrolü, sistemin verimli çalışmasını sağlayacak şekilde özellikle kısmi yük bölgesinde esas alınan kontroldür. Bu kontrol yapısının açıklanmasında sistemde türbinden üretilen mekanik enerjiden yararlanılır. Elde edilen mekanik enerji, türbin kanatlarına giren rüzgârın kinetik enerjisiyle, kanatlardan çıkan rüzgârın kinetik enerjisi arasındaki fark olarak tanımlanabilir [116].

V hızıyla hareket eden m kütleli havanın sahip olduğu kinetik enerji (E_K) Eşitlik 3.1'deki gibidir.

$$E_K = \frac{1}{2} \times m \times V^2 \quad (3.1)$$

Bu enerjinin zamana göre türevi alındığında, birim zamanda aktarılan enerji miktarı, yani rüzgâr gücü ($P_{Rüzgar}$) bulunur. Bu güç ifadesi Eşitlik 3.2'deki gibi ifade edilir.

$$P_{Rüzgar} = \frac{dE_K}{dt} = \frac{1}{2} \times m' \times V^2 \quad (3.2)$$

Yukarıdaki eşitlikte m' , t zamanı boyunca; V hızıyla bir A alanından geçen hava kütlelerinin akış oranı olarak. Eşitlik 3.3'e göre ifade edilir.

$$m' = p \times A \times V_w \quad (3.3)$$

Eşitlikteki p hava yoğunluğu, A türbin kanatlarının taradığı alan, V_w rüzgâr hızı olarak tanımlanır. Kanatların taradığı alan (A) ise yatay eksenli türbinin kanat yarıçapı R 'ye göre Eşitlik 3.4'teki gibi elde edilir.

$$A = \pi \times R^2 \quad (3.4)$$

Yukarıda belirtilen iki eşitlik kullanılarak, rüzgârın sahip olduğu güç Eşitlik 3.5'teki gibidir.

$$P_{Rüzgar} = \frac{1}{2} \times p \times A \times V_w^3 \quad (3.5)$$

Rüzgâr gücü eşitliğine göre rüzgâr gücünün rüzgârın hızının küpüyle orantılı olacak şekilde değiştiği görülmektedir. Rüzgârın hızındaki küçük bir değişim rüzgârın sahip olduğu güçte büyük bir değişiklik meydana getirebilir. Aynı şekilde türbinin taradığı alanla da orantılı olarak güç

değişebildiğinden rotor yarıçapı artırılarak da faydalanılabilecek güç artırılabilir. Türbin güç seviyesi arttıkça türbin kanat boyutlarının da artması bundan kaynaklanır.

Rüzgâr gücünün tamamını mekanik güce dönüştürmek imkânsızdır. Çünkü rüzgâr, enerjisinin tamamı kanatlar tarafından yakalanmadan azalan bir hızla akmaya devam eder. Rüzgârın sahip olduğu güce göre sistemde türbinden elde edilen mekanik güç, Eşitlik 3.6'daki gibi olur.

$$P_{Mekanik} = \frac{1}{2} \times \rho \times C_p \times A \times V_W^3 \quad (3.6)$$

Bu eşitlikte güç katsayısı C_p , REDS'lerde türbindeki mekanik gücün rüzgârın mevcut gücüne oranı olarak tanımlanabileceği gibi rüzgârdan ne kadar oranda faydalanılabildiğini gösteren değer olarak da tanımlanabilir [6, 88, 104]. Bu katsayı iki farklı değişkene göre Eşitlik 3.7'deki gibi ifade edilir.

$$C_p(\lambda, \beta) = \frac{P_{Rüzgar}}{P_{Mekanik}} = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \times \beta - C_4 \right) e^{-(C_5/\lambda_i)} + C_6 \times \lambda \quad (3.7)$$

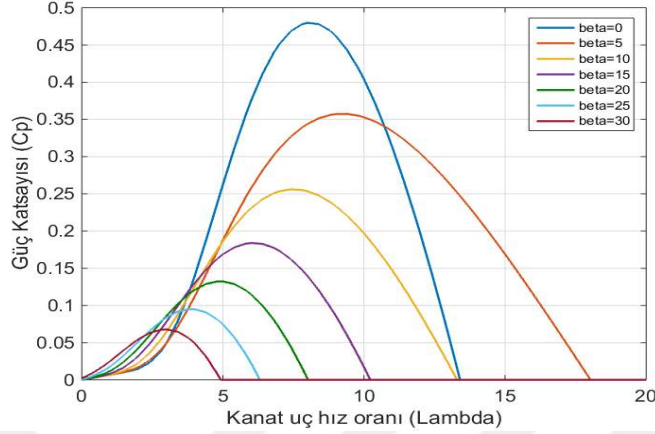
$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (3.8)$$

Eşitliklerdeki C indisi ile ifade edilen parametreler, türbinlerin tasarıma göre elde edilen değerlerdir. Beta (β) ise rüzgâr türbininin yüksek hızlarda zarar görmesini engelleyecek şekilde ayarlanabilen nominal rüzgâr hızının altında minimum değerde tutulan kanat açısı, λ ise kanat uç hız oranı (KHO) olarak tanımlanır. Rüzgâr türbinlerinde KHO, rotor kanat ucundaki hız ile rüzgâr hızı arasındaki oran olarak tanımlanır. Bu oran matematiksel olarak Eşitlik 3.9'daki gibi ifade edilir.

$$\lambda = \frac{\omega_M \times R}{V_W} \quad (3.9)$$

Eşitlik 3.9'da R türbin kanat yarıçapı, ω_M türbinin mekanik açısal hızı, V_W ise rüzgâr hızıdır. Güç katsayısı en optimal KHO ve kanat açısı değerlerinde maksimum 0,5926 değerini almaktadır. Bu maksimum değer aynı zamanda Betz limiti olarak da adlandırılmaktadır. Bu değere göre rüzgârdan elde edilebilecek maksimum mekanik güç teorik olarak rüzgâr gücünün maksimum %59,26'sına denk gelir. Ancak, kayıplar, aerodinamik özelliklerden dolayı günümüzdeki rüzgâr türbinlerinde güç katsayısı 0,4-0,5 arasında değişmektedir. Bu da REDS'nin en ideal şartlarda

verimliliğinin %40 ile %50 arasında olduğunu gösterir [84, 98, 103]. Farklı kanat açısı (β) değerlerine göre güç katsayısı ve KHO arasındaki ilişki Şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.2. Güç katsayısı- KHO değişim grafiği [98]

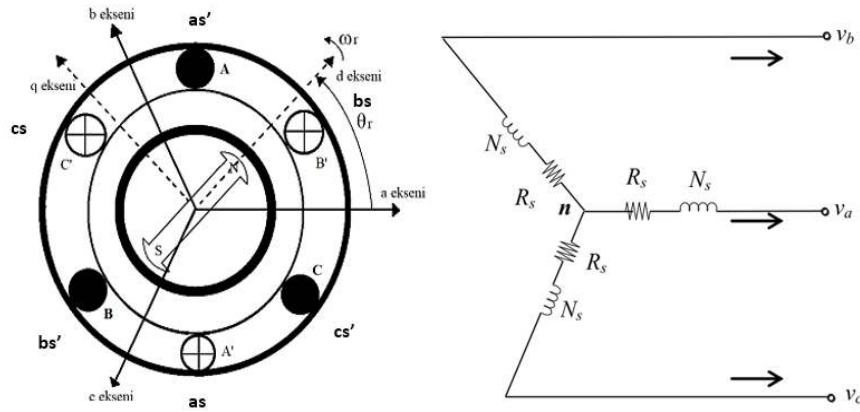
Şekil 3.2’ye göre güç katsayısı C_p ’nin en uygun değerde tutulması, KHO’nun ve kanat açısı (β)’nin uygun değerlerde tutulmasına bağlıdır. Türbinde güç sınırlamasına geçilmesini sağlayan nominal rüzgâr hızı değerinin altında kanat açısı değerinin en küçük değerde, uç hız oranının optimal değerde tutulmasıyla güç katsayısı maksimum değerini almaktadır. KHO denkleminde göre anlık değişen rüzgâr hızlarında KHO’nun uygun değerde tutulması, türbin kanat tasarımı ve mekanik açısal hıza (rotor hızı) bağlıdır. Denkleminde kullanılan türbin kanat yarıçapı, sabit bir değer olduğundan değişen rüzgâr hızlarına göre açısal hızı ayarlamak suretiyle KHO ve güç katsayısını en uygun değerlerde tutma, hız kontrolünün temelini oluşturur. Farklı kontrol metotlarıyla sistemdeki türbin hızının dolayısıyla generatör hızının anlık kontrolü MGNİ kontrolünün temel çalışma prensibidir.

Türbinlerle kullanılan diğer bir kontrol yapısıysa yön kontrolüdür. Dönüş eksenine göre dikey eksenli rüzgâr türbinleri her konumdan gelen rüzgârdan yararlanabilirlerken yaygın olarak kullanılan yatay eksenli rüzgâr türbinlerinde dönme düzleminin rüzgâr yönüne dik olarak konumlanmasıyla rüzgârdan maksimum oranda faydalanılır. Bu durumdan dolayı yatay eksenli rüzgâr türbinleri, bir yönlendirme tertibatı ile birlikte kullanılırlar. Tertibat üzerinden gerçekleştirilen yön kontrolü, genellikle yüksek güçlü türbin yapılarıyla birlikte diğer türbin kontrol yöntemlerine ek olarak kullanılabilir [13].

3.2. Generatör ve Sürücü Sisteminin Modeli ve Kontrolü

Alternatif akım makinalarının sürekli ve geçici durum performanslarının analizinde bu makinaların matematiksel modellerinden yararlanılır. Üç fazlı bir makinada bazı büyüklüklerin zamana bağlı olarak değişim göstermesi makinanın üç fazlı sistemde matematiksel modellerinin elde edilmesini zorlaştırır. Dolayısıyla, referans çatı eksen dönüşümleriyle bu problemin aşılması hedeflenir. REDS’lerde kullanılan KMSG için sabit üç fazlı stator referans çatı yerine belirli bir hızda dönen iki fazlı (d-q) referans çatıya dönüşüm ve bu referans çatıda oluşturulan matematiksel modeller; sistem parametrelerinin birbirlerini etkilemeden bağımsız kontrol yapılarının oluşturulmasına, modelleme ve tasarım süreçlerinin daha hızlı ve daha kolay yapılmasına imkân verir.

Şekil 3.3’te KMSG’nin referans çatı eksenleriyle kesit görünümü ve 3 fazlı eşdeğer devre şeması görülmektedir.



Şekil 3.3. KMSG kesit görünüşü ve 3 fazlı eşdeğer devre şeması [11]

KMSG’nin kesit görünüşünde stator sargıları, aralarında 120° açı farkı olacak şekilde yerleştirilmiştir. Rotorunda kalıcı mıknatıslar bulunmaktadır. Buradaki sabit (a-b-c) stator çatı eksen ve (d-q) rotor referans çatı eksenleri birlikte görülmektedir. Rotor çatı eksen, rotor ve kalıcı mıknatıslarla aynı ω_r açısal hızı ile dönmektedir. Ayrıca θ_r açısı d eksen ile a eksen arasındaki açıyı belirtir. Burada modeli çıkarılacak makinada rotor, senkron hızda döneceğinden (d-q) çatı eksen, senkron referans çatı eksenleri olarak da adlandırılabilir. Mıknatıslanmayı sağlayan manyetik akı d eksen yönünde konumlandırılır. KMSG’de çatı eksen dönüşümü, bazı varsayımlara göre yapılmaktadır. Bunlar;

- Stator sargıları sinüzoidal bir şekilde dağılmıştır.
- Sönümleme sargıları ihmal edilmiştir.

- Fuko ve histeresiz kayıpları ihmal edilmiştir.
- Stator sargılarındaki zıt elektromotor kuvvet sinüzoidaldir [107, 121, 124]

KMSG'nin rotorunda sargılar olmadığı için rotor endüktansı ve rotor ile stator arası ortak endüktansı yoktur. Bu çatı eksen dönüşümünü daha basit ve kolay yapılmasına imkân verir.

KMSG'nin durum uzay denklemlerinden yararlanarak (d-q) referans çatı ekseninde doğru akım makinasına eşdeğer hale getirilmektedir. Doğru akım makinalarında uyartım akımı ile manyetik akı, endüvi akımı ile moment birbirlerinden bağımsız şekilde denetlenebilmektedir. Bu dönüşüm sonucunda KMSG'nin (d-q) eksenlerindeki akım bileşenleriyle de akı ve momentin birbirinden bağımsız kontrolü mümkündür. [22, 101].

Eksen takımları arasındaki dönüşüm için farklı dönüşüm yöntemleriyle dönüşümler sağlanabilir. Eksen takımları arasında üç faz sabit referans çatıdaki değişkenleri doğrudan rotor (d-q) çatı modeline dönüştürmek için clarke ve park dönüşümlerinin her ikisinin birden kullanılması gerekir. Ters clarke park dönüşümüyle (d-q) çatı modelinden tekrar üç faz stator çatı modeline geçilebilir [12, 35, 124]. Eşitlik 3.10 ve 3.11'de bu dönüşümler için kullanılan dönüşüm matrisleri görülmektedir.

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} \cos \theta_R & \cos(\theta_R - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_R + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_R) & -\sin(\theta_R - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_R + \frac{2\pi}{3}) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Clarke Park Dönüşümü

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} \cos \theta_R & -\sin \theta_R & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos(\theta_R - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_R - \frac{2\pi}{3}) & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos(\theta_R + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_R + \frac{2\pi}{3}) & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Ters Clarke Park Dönüşümü

Bu matrislerde belirtilen θ_R açısı değeri, rotorun açısal konumuna göre elde edilen çatı eksenleri arasındaki açı farkı olarak tanımlanabilir. Dönüşüm sonucunda (d-q) çatı ekseninde KMSG için akım ve gerilim büyüklüklerine göre Eşitlik 3.12 ve 3.13 elde edilir.

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} [-(R_s * i_q) - \omega_E (L_d * i_d + \lambda_r) + V_q] \quad (3.12)$$

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} [-(R_s * i_d) + \omega_E (L_q * i_q)] + V_d] \quad (3.13)$$

Makinanın generatör ya da motor olarak çalışmasına göre eşitlikler işaret değiştirebilir. Bu denklemlerle zamana ve rotorun açısal konumuna bağlı değişimlerden etkilenmeyen matematiksel modeller elde edilmiştir. Eşitlik 3.12 ve 3.13’ de kullanılan R_s stator direnci i_q ve i_d stator akımlarının (d-q) referans çatı eksenlerindeki bileşenleri L_q ve L_d generatör endüktansının (d-q) eksenindeki değerleri, λ_r ise rotordaki kalıcı mıknatısların sağladığı akı değeridir. ω_E ise elektriksel açısal hızdır. Elektriksel açı değeri rotorun açısal konumu θ_R üzerinden;

$$\theta_E = \frac{P}{2} \times \theta_R \quad (3.14)$$

$$\omega_E = \frac{d\theta_E}{dt} \quad (3.15)$$

şeklinde elde edilir. Burada P makinanın kutup sayısını gösterir. Elektrik makinalarında mekanik ve elektriksel konum ve hız değerleri arasındaki dönüşümler bu eşitliklere göre yapılır.

KMSG’nin referans çatıdaki bileşenlerine göre ürettiği momentin karşılığı eşitlik 3.16’daki gibidir.

$$T_E = \frac{3p}{2} \left((L_d - L_q) * i_d i_q \right) + i_q * \lambda_r \quad (3.16)$$

REDS için kullanılan KMSG’de rotordaki mıknatısların pozisyonuna göre mıknatısların rotor yüzeyine yerleştirildiği ya da rotora gömülü olduğu KMSG’ler önceki bölümde açıklanmıştı. Mıknatısları rotor yüzeyine yerleştirilmiş generatörün (d-q) eksenindeki endüktans bileşenleri birbirine eşittir. Mıknatısları rotora gömülü generatörlerde ise rotor pozisyonu değiştikçe manyetik akı yolu relüktansı da değişeceğinden endüktansların (d-q) bileşenleri de rotor konumuna göre değişir. Bu yüzden mıknatısları rotora gömülü senkron generatörün matematiksel analizi ve kontrolü, mıknatısları rotor yüzeyine yerleştirilmiş senkron generatöre göre daha zordur [13, 16].

Yukarıdaki moment eşitliğine göre kalıcı mıknatıslı senkron generatör yüzey mıknatıslı olarak alındığında endüktans bileşenlerinin birbirine eşit olmasıyla generatörün ürettiği elektromanyetik moment, Eşitlik 3.17’deki gibi olur.

$$T_E = \frac{3p}{2} \times (i_q \times \lambda_r) \quad (3.17)$$

Generatörün ürettiği momentin (d-q) referans çatıdaki ifadesinin gösterdiği sadelik bu çatı dönüşümünün sağladığı avantajı kanıtlar niteliktedir [101]. Akımın q eksen bileşeni momentin üretiminde, d eksen bileşeni ise mıknatıslanma için gereken akımın oluşumunu sağlar. Akı sabit mıknatıslarla sağlandığından KMSG'nin momentinin kontrolü akımın q eksen bileşeni üzerinden sağlandığı görülebilir.

Elektromanyetik moment, türbinin ürettiği moment, sürtünme ve eylemsizlik momenti değerlerine göre oluşturulan hareket denklemi, sürücü sistemin matematiksel modelini oluşturur. Bu model daha sonra hız kontrolünde kullanılacak parametrelerin ve kontrol yöntemlerinin seçiminde kullanılabilir. REDS'lerde türbin ve generatör arasında enerji aktarımını sağlayan sürücü sistemler, bu çalışmada elektriksel üretime odaklanıldığından analiz kolaylığı açısından tek kütleli yapıda olduğu varsayılmıştır. Bu yapıya göre sisteme ait hareket denklemi, Eşitlik 3.18'de verilmiştir.

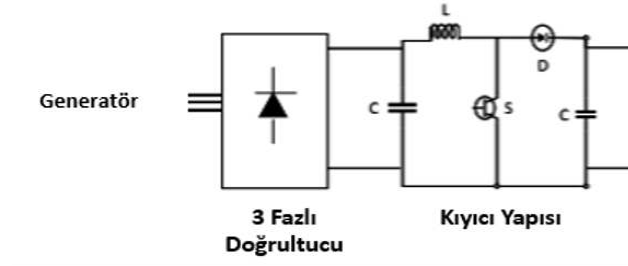
$$\frac{d\omega_G}{dt} = \frac{T_M - T_E}{J} - \frac{B}{J} * \omega_G \quad (3.18)$$

Bu eşitliğe göre ω_G generatörün mekanik açısal hızı, T_E elektromanyetik moment, T_M türbinden aktarılan (mekanik) moment, J eylemsizlik momentini, B ise viskoz (sürtünme) katsayısını ifade eder. Eşitlik 3.17'ye göre generatör akımının q eksen bileşeninin kontrolü elektromanyetik momentin kontrolüne dolayısıyla rotor hızının ayarlanmasını sağladığı Eşitlik 3.18'de görülmektedir. Anlık çalışma hızının generatör akımları üzerinden kontrol edildiği tekniklerde temel hedef, generatör ve türbin momentlerinin uyuşmasını sağlayarak anlık rüzgârdan maksimum oranda yararlanmaktır [68]. Bu uyuşmanın sağlanamaması ya sistemin çalışmasının durmasına ya da düşük verimle çalışmasına neden olabilir. [112].

3.3. Güç Elektronik Arayüzü Modeli ve Kontrolü

Rüzgâr enerjisi kaynağının anlık değişimlerine karşı REDS'de uygun kontrol görevlerini yerine getirme, yüke ya da şebekeye uygun kararlılıkta enerji aktarımı bu yapılarla sağlanmaktadır. Sistemle şebeke ya da yük arasında köprü görevi gören bu yapılarda kullanılan arayüz, güç seviyesi ve kontrol yöntemlerine göre farklılık gösterebilir. REDS bileşenlerinin açıklandığı bölümde iki arayüz yapısının REDS'ler için ön plana çıktığından bahsedilmiştir. Bunlardan sırt sırta bağlı arayüz yapısı, generatörün d-q akım bileşenleri üzerinden akı ve momentin birbirinden bağımsız kontrolüne imkân veren alan yönlendirmeli ya da doğrudan moment kontrolü gibi yöntemlerle kullanılabilirler. Diğer bir yapı olan küçük ve orta güçlü sistemlerde hem ekonomik hem de kararlı çalışma imkânı veren kıyıcı arayüz yapılarında kıyıcının doluluk oranı ve generatör arasındaki ilişkiye göre kontrol sağlanabilir [44]. Bu iki yapıda da generatörden gelen değişken yapıdaki

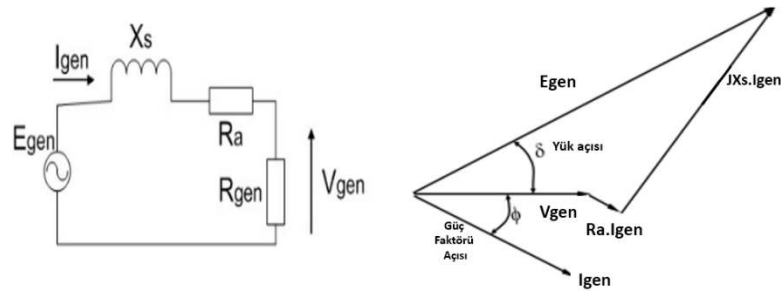
gerilimin doğrultulması ve doğrultulan gerilimin invertere ya da yükün türüne göre belirli seviyede tutularak farklı amaçlar için kullanılması hedeflenir. Bu çalışmada kullanılan kıyıcı arayüz üzerinden çalışma prensibini açıklayabilmek için Şekil 3.4'teki gibi bir arayüz esas alınmıştır.



Şekil 3.4. Yükselten tip (Boost) kıyıcı arayüz şeması

Şekil 3.4'e göre generatör çıkışında değişen rüzgâr hızlarına göre elde edilen değişken yapıdaki gerilim doğrultucuyla doğrultulur. Fakat yine de değişken yapıdaki bu gerilim kıyıcı yapısıyla belirli bir seviyede ayarlanarak yüke ya da evirici yapısına iletilir.

Matematiksel olarak kıyıcı arayüz ve generatör arasındaki ilişkinin incelenebilmesi için KMSG'nin tek faza indirgenmiş eş değer devresinden yararlanılır. Şekil 3.5'te KMSG'ye ait tek faz eşdeğer devresi ve bu devreye ait fazör diyagramı görülmektedir.



Şekil 3.5. KMSG tek faz eşdeğer devre şeması

Şekilde E_{gen} generatörde indüklenen gerilim, I_{gen} generatör akımı, R_a faz başına sargı direnci, R_{gen} ve X_s ise sırasıyla generatör direnci ve reaktansı ve V_{gen} ise çıkış gerilimidir. Bu parametrelere göre çıkış gerilimi Eşitlik 3.19'daki gibidir.

$$V_{gen} = E_{gen} - jX_s I_{gen} - R_a I_{gen} \quad (3.19)$$

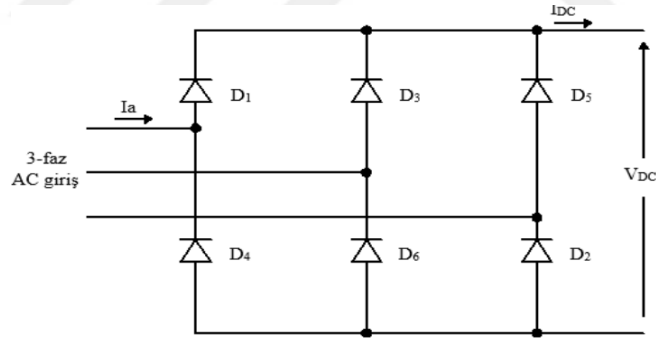
Generatör akımı ise Eşitlik 3.20'ye göre ifade edilir.

$$I_{gen} = \frac{E_{gen}}{(R_{gen} + R_a) + jX_s} \quad (3.20)$$

Generatör çıkış gücü ise akım ve gerilim değerlerine göre Eşitlik 3.21'deki gibi ifade edilir

$$P_{gen} = 3 \times V_{gen} \times I_{gen} \times \cos \varphi = 3 \times R_{gen} \times I_{gen}^2 \quad (3.21)$$

Şekil 3.4'teki arayüz şemasında generatörden sonra gelen doğrultucu yapısı, kontrollü ya da kontrolsüz elemanlarla oluşturulan girişine uygulanan alternatif gerilimi doğru gerilime çevirmek için kullanılırlar. Diyotlar ile oluşturulanları kontrolsüz, MOSFET, IGBT gibi elemanlarla oluşturulanları ise kontrollü doğrultucu olarak tanımlanırlar. Kontrollü elemanlarla oluşturulan doğrultucu yapılarında uygun bir kontrol tekniği ile kontrolsüz doğrultucu yapısına göre daha kaliteli ve daha fazla çıkış verilerek daha verimli çalışma sağlanabilir [125]. Kontrolsüz doğrultucuların basit ve ucuz olmaları küçük, orta güçlü REDS'li yapılarda yaygın olarak kullanılmalarını sağlamıştır. Şekil 3.6'da üç fazlı kontrolsüz doğrultucunun şeması görülmektedir.



Şekil 3.6. Üç fazlı kontrolsüz doğrultucu şeması [117]

3 fazlı doğrultucuların tek fazlı olanlarına göre en önemli üstünlüğü daha düşük harmonikli dalga biçimleri, daha yüksek güç oluşturma kapasiteleri ve daha iyi bir güç faktörüne sahip olmalarıdır. Bu özellikle bazı uygulamalarda çıkışta kullanılan filtre kapasite elemanının küçük değerli olmasını sağlar. Bu da verimlilik ve maliyet adına önemli bir avantajdır [117].

Kontrolsüz doğrultucu çıkışında elde edilen güç, kayıplar ihmal edildiğinde generatör gücüne eşit olacaktır. Bu güç Eşitlik 3.22'deki gibi ifade edilir.

$$P_{gen} = P_{dc} = V_{dc} \times I_{dc} \quad (3.22)$$

Bu eşitlikteki V_{dc} ve I_{dc} sırasıyla doğrultucu çıkışında elde edilen gerilim ve akım değerleridir. Bu değerler generatör akım ve gerilim değeri üzerinden Eşitlik 3.23 ve 3.24'teki gibi ifade edilir [43].

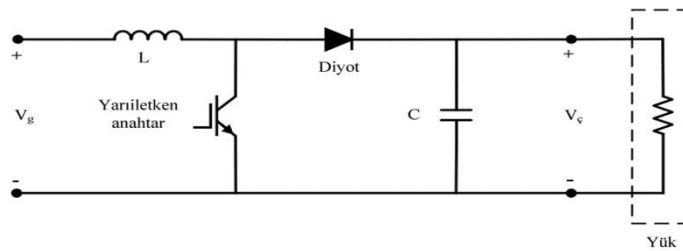
$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_{gen} \quad (3.23)$$

$$I_{DC} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} I_{gen} \quad (3.24)$$

Burada V_{LL} doğrultucu girişine uygulanan hat gerilimini V_{gen} ise generatör faz gerilimini ifade etmektedir. Doğrultucuyla generatör çıkış gerilimi doğrutulsa dahi çıkışında değişken yapıda bir gerilim elde edilir. Elde edilen gerilimin sabit gerilimle beslenen yük, depolama elemanları ya da inverterin uygun şekilde çalışmasını sağlayacak seviyede tutulması gerekir. Bu işlem kullanılan arayüz yapısındaki DA kıyıcılarıyla sağlanır. REDS'ye uygun tasarlanan kıyıcı ile generatör arasındaki bağıntı, seçilen kontrol yöntemine göre sistemde MGNİ kontrolünün temelini oluşturur.

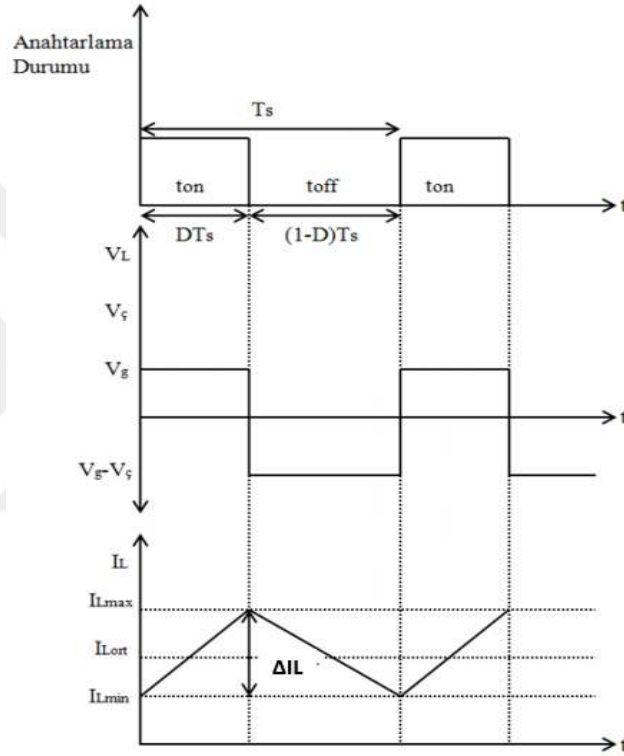
Literatürde farklı türde kıyıcı devreleri, girişine uygulanan gerilime göre çıkışında daha düşük daha yüksek ya da eşit seviyede gerilim sağlayabilir. Değişken hızlı REDS'lerde düşüren (buck) tip, yükselten (boost) tip ya da hem düşüren hem de yükseltici olarak kullanılabilen (buck-boost) tipi kıyıcılar kullanılabilir. Kıyıcılarda çoğunlukla; düşük güç ve yüksek frekanslar için MOSFET, orta güç ve orta frekanslar için BJT, ortanın üzerindeki güç ve frekanslar için IGBT, yüksek güç ve düşük frekanslar için ise SCR tipi yarı iletken anahtarlar kullanılır. Anahtarın yanı sıra bu anahtarla uyumlu olarak çalışan kondansatör, endüktans ve diyot elemanlarıyla birlikte kıyıcı devresi oluşturulur. [88, 104, 106].

Bu çalışmaya konu olan sistem için yükselten (boost) tip kıyıcı esas alınmıştır. Bu kıyıcıyla adından da anlaşılacağı gibi kullanılan anahtarın anlık kontrolüyle REDS'de doğrultucudan gelen gerilime göre çıkışta daha yüksek seviyede bir gerilim elde edilir. Şekil 3.7'de yükselten tip (boost) kıyıcı devre şeması görülmektedir.



Şekil 3.7. Yükselten tip (Boost) kıyıcı devre şeması [126]

Kıyıcı devresinin çalışma prensibi, yarı iletken anahtar iletimde iken, diyodun ters kutuplanması sonucu çıkış devresi girişten ayrılırken giriş devresi üzerinden endüktans enerji depolanır. Anahtar kesime gidince, çıkış devresine hem giriş gerilimi hem de endüktans üzerindeki gerilim uygulanmış olur. Böylece yarıiletken anahtarın iletimde ve kesimde kalma sürelerinin ayarlanmasıyla, çıkış gerilimi (V_c) giriş gerilimi (V_g) ye göre daha yüksek seviyede kalacak şekilde ayarlanabilir. Anahtarın iletime ve kesime girmesine göre anahtarlama durumu ve kıyıcı devresindeki endüktans akım ve geriliminin değişim grafikleri Şekil 3.8’de görülmektedir.



Şekil 3.8. Anahtarlama durumuna göre endüktans gerilimi ve akımı dalga şekilleri [127]

Kıyıcıda kullanılan yarı iletken anahtarın iletim ve kesim sürelerine göre Eşitlik 3.25 ve 3.26 elde edilir.

$$T_s = t_{on} + t_{off} \quad (3.25)$$

$$d = \frac{t_{on}}{T} \quad (3.26)$$

Bu eşitliklere göre T_s anahtarlama periyodunu, t_{on} ve t_{off} sırasıyla anahtarın iletimde ve kesimde kalma sürelerini, d ise anahtarlama sürelerine göre elde edilen görev periyodu (doluluk oranı)'dır. Bu değer 0 ile 1 arasında bir değerdir. Kıyıcının uygun şekilde çalışması doluluk oranının kontrolüyle doğrudan ilgilidir. Doluluk oranı eşitliğine göre anahtarın iletimde ve kesimde kalma süreleri, doluluk oranı üzerinden Eşitlik 3.27 ve 3.28'deki gibi ifade edilir.

$$t_{on} = d \times T_s \quad (3.27)$$

$$t_{off} = (1 - d) \times T_s \quad (3.28)$$

Anahtarın iletimde ve kesimde olmasına göre kıyıcının uygun şekilde çalışması için anahtar iletimdeyken endüktansta depolanan enerjinin tamamının kesimde çıkışa aktarılması yani endüktans geriliminin ortalama değerinin tüm anahtarlama periyodu boyunca sıfır olması gerekmektedir. Şekil 3.8'de endüktans geriliminin değişimi kıyıcı giriş gerilimi V_g ve çıkış gerilimi V_c 'ye göre Eşitlik 3.29'daki gibi ifade edilir.

$$V_g * dT_s + (V_g - V_c)(1 - d)T_s = 0 \quad (3.29)$$

Sadeleştirmelerle bu gerilim ifadesi kıyıcının giriş ve çıkış gerilimleri arasındaki bağıntıyı verir.

$$V_g - V_c * (1 - d) = 0 \quad (3.30)$$

$$\frac{V_c}{V_g} = \frac{1}{1-d} \quad (3.31)$$

Eşitlik 3.26'ya göre doluluk oranı 0 ile 1 arasında olacağından Eşitlik 3.31'de çıkış gerilimi her zaman giriş geriliminden daha yüksek seviyede olacaktır. Yükselten tip kıyıcı olarak adlandırılması bu bağıntıdan anlaşılmaktadır. Girişine uygulanan gerilim sabit ya da değişken olmasına bakılmaksızın görev periyodunun anlık kontrolüyle çıkış gerilimi giriş geriliminden daha yüksek seviyeye ayarlanabilir.

Kıyıcı devresi ideal olarak düşünüldüğünde herhangi bir güç kaybı olmayacağından sistem giriş ve çıkış gücü arasındaki ilişki aşağıdaki Eşitlik 3.32'ye göre elde edilir.

$$V_g * I_g = V_{\zeta} * I_{\zeta} \quad (3.32)$$

Giriş ve çıkış gerilimleri ve güçleri arasındaki bağıntıya göre kıyıcı giriş akımı (I_g) ve çıkış akımı (I_{ζ}) arasındaki bağıntı Eşitlik 3.33'teki gibi ifade edilir.

$$\frac{I_{\zeta}}{I_g} = (1 - d) \quad (3.33)$$

Kıyıcı giriş ve çıkış büyüklüklerinin kıyıcı devresiyle gösterildiği prensip şema Şekil 3.9'da görülmektedir.



Şekil 3.9. Kıyıcı devresine ait giriş ve çıkış büyüklükleri

Değişken hızlı REDS için kullanılan yükselten tip kıyıcıda doğrultucunun çıkışı yani kıyıcı girişiyle kıyıcı çıkışı arasında önceki eşitliklerdeki akım ve gerilim ifadelerine göre Eşitlik 3.34'teki bağıntı elde edilir.

$$R_{DC} = (1 - d)^2 \times R_{YÜK} \quad (3.34)$$

Şekil 3.9'da da gösterildiği gibi R_{DC} ve $R_{YÜK}$ sırasıyla kıyıcı girişindeki (doğrultucu tarafı) ve çıkışındaki direnç değerleri olmak üzere doğrultucuya ait akım gerilim ifadeleri (I_{dc}, V_{dc}) kıyıcı girişine uygulanan giriş akımı ve gerilimi (I_g, V_g) olduğundan Eşitlik 3.34'e göre kıyıcının doluluk oranı üzerinden doğrultucu dolayısıyla generatöre ait büyüklüklerin de ifade edilebileceği görülmektedir. Buna göre generatör çıkışındaki gerilimin ifadesi düzenlendiğinde

$$V_{gen} = E_{gen} - I_{gen} \sqrt{R_a^2 + (p \times \omega \times L_s)^2} \quad (3.35)$$

Eşitlik 3.35 elde edilir. Eşitlik 3.35'e göre generatörün reaktansı, p kutup çifti, ω açısal hızı ve L_s endüktansı üzerinden ifade edilmiştir. Generatör gerilimi ve doğrultucu gerilimi arasındaki bağıntıya göre bu gerilim büyüklüğü Eşitlik 3.36'daki gibi ifade edilir.

$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_{gen} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} (E_{gen} - I_{gen} \sqrt{R_a^2 + (p \times \omega \times L_s)^2}) \quad (3.36)$$

Bu eşitliğe göre elde edilen gerilim aynı zamanda kıyıcının giriş gerilimidir. Kıyıcının REDS'li sistemde temel çalışması çıkış gerilimini belirli bir seviyeye ayarlayacak şekilde çalışmasıdır. Kıyıcının doluluk oranı ve giriş çıkış gerilimleri arasındaki bağıntıya göre doluluk oranı değiştirildiğinde bu gerilim değerleri de değiştirilebilir. Kullanılan kontrol tekniğiyle kıyıcının doluluk oranı ayarlandıkça kıyıcı giriş gerilimi istenen şekilde ayarlanabilirse Eşitlik 3.36'ya göre generatörün hızı da ayarlanabilir. Generatörde indüklenen gerilimle hızın orantılı olduğu düşünüldüğünde anlık doluluk oranı kontrolü, kıyıcı arayüz içeren değişken hızlı REDS'de anlık hızın yani MGNİ kontrolünün temel prensibini oluşturur [43, 62].

Kullanılan kıyıcıda doluluk oranı üzerinden kontrolün sağlanması, kıyıcının kararlı bir şekilde çalışmasını sürdürebilmesi sürekli iletim modu olarak nitelendirilen modda çalışmasıyla sağlanabilir. Bu modda çalışma, kıyıcıda kullanılan endüktans (L) ve kondansatör (C) elemanlarının uygun değerlerde seçilmesiyle sağlanır. Kıyıcıyı sürekli iletim modunda kalmasını sağlayacak kritik L ve C değerleri Eşitlik 3.37 ve 3.38'e göre hesaplanır.

$$L = \frac{V_g * d}{\Delta I_L * f_s} \quad (3.37)$$

$$C = \frac{I_c * d}{\Delta V_C * f_s} \quad (3.38)$$

Bu eşitlikler giriş geriliminin değeri V_g , çıkış akımının değeri I_c , kıyıcının çalışma frekansı, güç ve doluluk oranı eşitliklerine göre elde edilir. Hesaplamalarda kullanılan f_s sistemde kontrol edilen kıyıcının anahtarlama frekansını gösterir. Endüktans akımında dalgalanma miktarı ΔI_L ve kondansatör gerilimindeki dalgalanma miktarı ΔV_C , yüzdesel olarak ne kadarlık dalgalanmaya izin verilebileceğini gösteren değerler olup ΔI_L %10-40 arasında bir değerken, ΔV_C ise %1-5 arasında bir değerdir. Kullanılan devre yapısına uygun değerlerde seçilmeleriyle kıyıcı devresi oluşturan eleman değerleri hesaplanabilir.

Kıyıcı devresinin uygun şekilde tasarlanması ve değişken hızlı REDS'lerde doluluk oranının kullanılan kontrol yöntemleriyle anlık ayarlanmasıyla sistemin anlık rüzgârdan maksimum

seviyede yararlanmasının yanı sıra dönüşüm sisteminin daha kararlı, daha uzun ömürlü kullanımı da mümkündür. .



4. MATERYAL VE METOT

Rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi, sağladığı birçok avantaja rağmen iklim ve ortam koşullarına göre kaynak miktarının değişkenlik gösterebilmesi gibi dezavantajı vardır. Bu değişkenlik sistemin verimliliğini düşüren en önemli nedenlerden biridir. REDS’lerde genel sistem verimliliği, mevcut rüzgâr kaynağının miktarıyla değil aynı zamanda sistem bileşenlerinin uygun seçimi ve sistemin çalışma noktasının anlık rüzgâra göre ayarlanmasına bağlıdır [128]. REDS’lerde verimliliği arttırma adına sistemi oluşturan farklı kısımlar için farklı çalışmalar yapılmaktadır. Türbin-kanat tasarımında yapılan çalışmalar, performans ya da güç katsayısının Betz sınırı olarak bilinen maksimum sınırına olabildiğince yaklaşmasını sağlamak amacıyla yapılan çalışmalar olup daha çok türbin aerodinamiğinin geliştirilmesiyle ilgilidir. MGNİ çalışmaları ise her rüzgâr türbinine ait temel verimlilik kriteri olan güç katsayısının değişen rüzgâr hızına rağmen en uygun değerde tutulması için yapılır. Bu yöntemler mekanik veya elektriksel büyüklükler üzerinden generatör olarak kullanılan makinanın devir sayısının ayarlanması prensibine dayanır. Sistemde kullanılan bileşenlerin gelişen teknolojilerle daha da verimli hale getirilebilmesi sağlansa da kullanılacak uygun MGNİ yöntemi ile sistem verimliliğinin en yüksek seviyede tutulması ve daha fazla enerji üretimiyle maliyetlerin en kısa sürede karşılanması sağlanabilir. Değişken hızlı REDS’lerle kullanılan MGNİ yöntemleriyle generatör hızının anlık rüzgâra göre ayarlanmasıyla sabit hızlı sistemlere göre %50’lere varan seviyelerde daha fazla enerji üretimi mümkündür. [7, 98, 104].

Farklı kriterlere göre REDS’lerle kullanılabilen MGNİ izleme yöntemlerinin sınıflandırılması mümkündür. Ek donanım gerekliliklerine göre, sistem parametrelerinden bağımsız çalışıp çalışmamalarına göre, elektriksel veya mekanik büyüklükler üzerinden çalışıp çalışmamalarına göre sınıflandırmalar yapılabilir. Temelde uygulanma şekillerine göre MGNİ kontrol yöntemleri 3’e ayrılır. Bunlar,

- Dolaylı kontrol yöntemleri
- Doğrudan kontrol yöntemleri
- Akıllı yapı tabanlı yöntemleridir.

Dolaylı kontrol yöntemleri, mekanik büyüklükler üzerinden anlık gücü maksimum seviyede tutacak şekilde çalışarak gücün maksimum seviyede tutulmasını sağlar. Doğrudan kontrol yöntemleri ise sistemde doğrudan elektriksel büyüklükler üzerinden gücün maksimum seviyede tutulmasını sağlayacak şekilde çalışır. Akıllı yapı tabanlılar ise bulanık mantık yapay sinir ağları optimizasyon teknikleri gibi akıllı yapı olarak tanımlanabilecek yapıların MGNİ kontrolü için kullanıldığı yöntemlerdir.

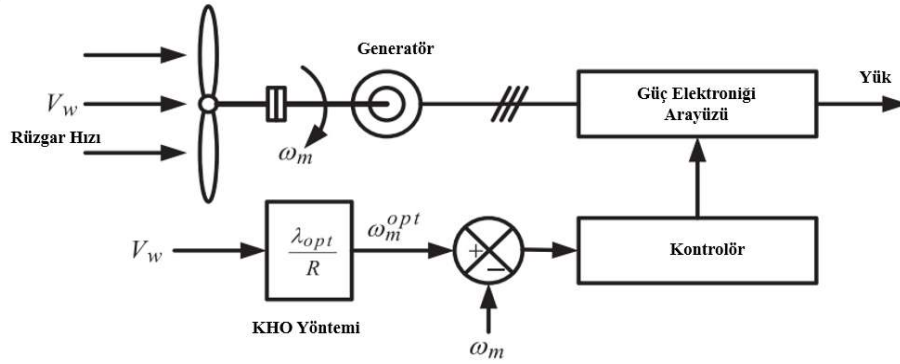
4.1. Dolaylı MGNİ Yöntemleri

Aynı zamanda klasik yöntemler olarak da adlandırılabilen dolaylı kontrol yöntemleri, uygulama kolaylığı açısından avantajlı olsalar da çeşitli algılayıcı ve sensörlerle birlikte kullanılabilmeleri, zamanla kullanıma bağlı olarak değişen sistem parametreleri ve ortam koşullarına bağımlılıkları çalışma performanslarını etkiler. Bu yöntemlerden özellikle değişken hızlı REDS'lerle yaygın olarak kullanılan üç yöntem bulunmaktadır. Bunlar

- Kanat uç hız oranı (KHO) yöntemi
- Güç sinyali Geri Besleme (GSB) yöntemi
- Optimal tork (OT) yöntemidir

4.1.1. Kanat Uç Hız Oranı Yöntemi

KHO yöntemi, rüzgâr türbininde kanat uç hız oranını güç katsayısını uygun seviyede tutacak şekilde ayarlanmasına dayanır. Bu oran, değişken rüzgâr hızı ve rotor hızına bağlı olarak değişmektedir. Anlık değişen rüzgâr hızına göre rotor hızının değiştirilmesiyle bu oran güç katsayısını en uygun değerde tutacak şekilde ayarlanabilir. [79, 130]. Şekil 4.1'de bu yöntemin çalışma şekli görülmektedir.



Şekil 4.1. KHO yöntemi şeması [77]

Kanat uç hız oranı denkleminde göre elde edilen hız eşitliği, Eşitlik 4.1'deki gibidir.

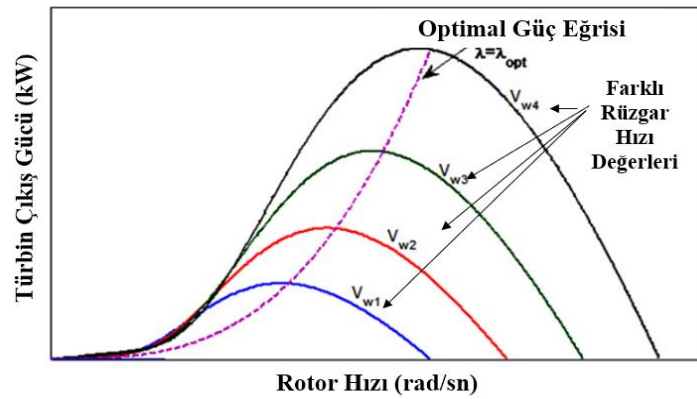
$$\lambda_{opt} = \frac{\omega_{Mopt} \times R}{V_W}, \omega_{Mopt} = \frac{V_W \times \lambda_{opt}}{R} \quad (4.1)$$

Bu eşitlikte anlık rüzgâr hızına göre güç katsayısını maksimuma taşıyacak optimal kanat uç hız oranı (λ_{opt}) üzerinden elde edilen referans hıza (ω_{Mopt}) göre anlık rotor hızının ayarlanmasıyla

MGNİ kontrolü gerçekleştirilmektedir. Kullanılan sistem için optimal kanat uç hız oranı deneysel ya da teorik olarak elde edilebilir. Çalışma yapısı basit olarak görülse de kontrol yapısının çalışmasında hem rotor hızı hem de rüzgâr hızı bilgisine ihtiyaç duyması, bu bilgilerin yüksek doğrulukla elde edilebilmesinin zor olması, kullanılan ek donanımların sistemin maliyeti ve karmaşıklığını arttırması gibi dezavantajları vardır [128].

4.1.2. Güç Sinyali Geri Besleme Yöntemi

KHO metodunun farklı bir versiyonu olan GSB yönteminde sistemin değişen rotor hızlarına göre sistemin çalışma noktasının optimal (maksimum) güç eğrisini takip edecek şekilde çalıştırılması esas alınır. Güç eğrilerini esas alan bu yöntemde değişen rotor ve rüzgâr hızlarına göre optimal güç değerleri deneysel ya da teorik olarak elde edilir. Elde edilen güç değerlerine göre sistemin güç eğrileri çıkarılır. Farklı rüzgâr hızlarına göre değişken hızlı REDS için örnek güç eğrileri Şekil 4.2’de görülmektedir.



Şekil 4.2. REDS için değişen hızlara göre güç eğrileri

KHO’nun optimal değerine eşit olduğu ($\lambda = \lambda_{opt}$) eğri sistemde MGNİ için takip edilmesi gereken eğridir. Amaç, değişen hızlarda bile sistemin çalışma noktasının bu eğri üzerinde kalmasını sağlamaktır.

Teorik açıdan anlık rüzgârdan elde edilebilecek optimal güç ($P_{M opt}$), önceki bölümlerde verilen mekanik güç eşitliğine göre güç katsayısı maksimum değeri aldığıında Eşitlik 4.2’deki gibidir

$$P_{M opt} = \frac{1}{2} \times C_P \times \rho \times A \times V_W^3 \quad (4.2)$$

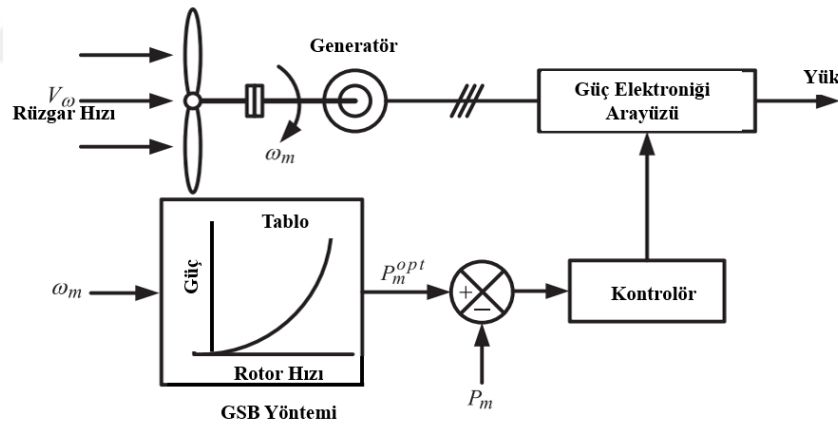
Bu eşitlikte rüzgâr hızı (V_W)'nin yerine kanat uç hız oranı denklemine göre rotor hızı ifadesi kullanıldığında elde edilen güç ifadesi Eşitlik 4.3'teki halini alır.

$$P_{M opt} = \frac{1}{2} \times C_P \times \rho \times A \times \frac{\omega_M^3 \cdot R^3}{\lambda^3} \quad (4.3)$$

Rotor hızı dışında diğer değerler genel olarak sabit olacağından rotor hızına göre optimal güç değeri aşağıdaki Eşitlik 4.4'deki gibi ifade edilebilir.

$$P_{M opt} = K_{OPT} \times \omega_M^3 \quad (4.4)$$

Yukarıdaki eşitlikteki tüm sabit değerleri, K_{OPT} terimi temsil etmektedir. GSB yönteminde değişen rotor hızlarına göre elde edilen optimal güç değerleri bir tablo şeklinde kaydedilir. Türbin çıkış gücünün kaydedilen değerlerle karşılaştırılması ve bir fark varsa bunun kontrolör tarafından minimum seviyeye indirilmesini amaçlayan bir yol izlenir. Şekil 4.3'te bu yöntemin çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 4.3. Güç sinyali geri besleme yöntemi şeması [77]

Bu yöntemde mekanik gücün yanı sıra ve farklı parametrelere göre gücün optimal seviyede tutulduğu MGNİ uygulamaları da mevcuttur. Bu yöntemin en önemli dezavantajı ise optimum güç eğrisinin bilinmesini gerektirmesidir. Bu eğrinin teorik ya da deneysel olarak çıkarılması da zaman alıcıdır. Aynı zamanda kullanılan güç ifadesi, üçüncü dereceden bir matematiksel ifade olduğu için kübik fonksiyon kullanılarak bu eğriyi uydurmak gerekir. Bu da kullanılan yapının kullanımını zorlaştıran nedenlerden biridir [77-79, 128].

4.1.3. Optimal Tork Yöntemi

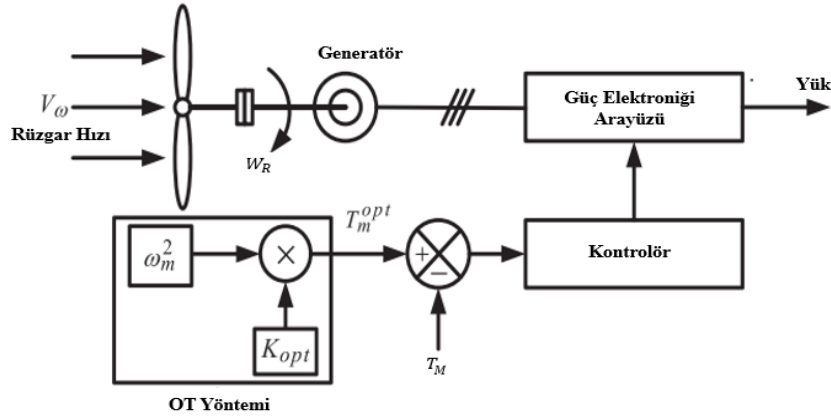
Bu kontrol yönteminde rüzgâr hızındaki anlık değişimlere göre rüzgâr türbininin gücünü optimal seviyede tutacak momentte çalışması sağlanarak MGNİ kontrolü gerçekleştirilir. Sistemde türbinden elde edilebilecek optimal moment değeri, optimal güç eşitliğine göre Eşitlikler 4.5-4.7'deki gibi ifade edilir.

$$P_{M\ opt} = K_{OPT} \times \omega_M^3 \quad (4.5)$$

$$P_{M\ opt} = T_{M\ opt} \times \omega_M \quad (4.6)$$

$$T_{M\ opt} = K_{OPT} \times \omega_M^2 \quad (4.7)$$

Bu eşitliklerde kullanılan $T_{M\ opt}$ türbinden elde edilen optimal momenti göstermektedir. Kontrol yöntemi, optimal moment değerini anlık moment değeriyle karşılaştırıp ikisi arasındaki hata değerine göre sistemin anlık momentini optimal seviyede tutarak MGNİ kontrolü gerçekleştirilir [77, 130]. Şekil 4.4'te bu yöntemin çalışma şeklini gösteren şema görülmektedir.



Şekil 4.4. Optimal tork yöntemi şeması [77]

Kullanılan yöntem diğer klasik yöntemlerdeki gibi basit ve etkili görünse de sistem parametreleri ve ortam koşullarına bağlı çalışmaları yöntemin çalışma performansını etkiler. GSB yöntemiyle çalışma prensibi ve performansı açısından bir fark yoktur. KHO yöntemindeki gibi rüzgâr hızının doğrudan değil de rotor hızı üzerinden dolaylı olarak kullanılması rüzgardaki

değişimlere karşı kontrol sisteminin yavaş kalmasına neden olur. Bu da bu kontrol yapısının hızlı değişimler karşısında çalışma verimliliğini düşürür [128].

4.2. Doğrudan MGNİ Yöntemleri

Değişken hızlı REDS'lerde kullanılan dolaylı kontrol yöntemlerinde maksimum güç noktasının ayarlanması için mekanik büyüklüklerin çeşitli algılayıcılar ve ek donanımlarla ölçülmesine ihtiyaç duyulması, sistem karmaşıklığını ve genel maliyeti artırır. Aynı zamanda bu yöntemlerin sistem parametrelerine ve ortam koşullarına bağımlılıkları, çalışma kararlılıklarını ve verimliliklerini düşürür. Bu dezavantajlarından dolayı sistem parametreleri ve ortam koşullarından bağımsız, sisteme ait elektriksel büyüklükler üzerinden çalışan MGNİ kontrolü yöntemleri geliştirilmiştir [128-130]. Doğrudan olarak tanımlanmalarının altında yatan neden ise direkt elektriksel büyüklüklerle çalışabilmelerinden kaynaklanır.

Doğrudan yöntem olarak REDS'lerde kullanılan 3 farklı yöntem öne çıkmaktadır. Bunlar;

- Optimum bağlantı tabanlı yöntem
- Tepe Tırmanma yöntemi
- Artımlı iletkenlik yöntemidir.

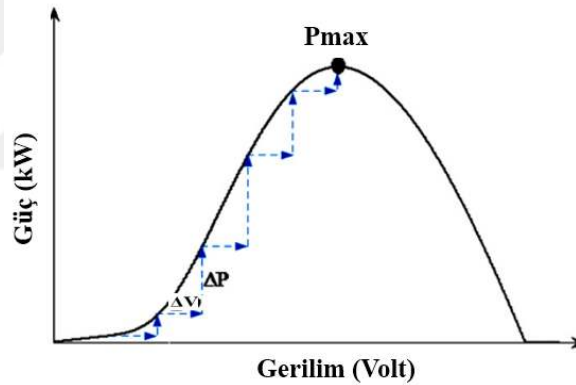
4.2.1. Optimum Bağlantı Tabanlı Yöntem

Optimum bağlantı tabanlı (OBT) yöntemi, herhangi bir mekanik hız yada konum algılayıcısına ihtiyaç duymadan sistemdeki çeşitli büyüklükler arasındaki bağıntıya göre oluşturulan bir sistem eğrisi üzerinden çalışır. Bu büyüklükler; arayüz akımı, arayüz gerilimi, türbin çıkış gücü vb. büyüklükler olabilir. Örneğin kıyıcı kullanılan bir REDS'de kıyıcı akımı ile sistemdeki farklı bir büyüklük arasındaki bağıntıya göre akımın anlık rüzgardan maksimum enerjiyi sağlayacak değerde tutulmasıyla MGNİ sağlanabilir. Bu yöntemin en önemli eksikliği bağıntının tam olarak tanımlanmasının zaman alabilmesi ve nonlinear özellikteki yapılarda bunun daha da zor olmasıdır. Ayrıca seçilen büyüklüklerin yüksek doğrulukla çalışan elemanlar gerektirebilmesi de bu yöntemin karmaşıklığını ve maliyetini artırır [77].

4.2.2. Tepe Tırmanma Yöntemi

Matematiksel olarak maksimumu bulmak amacıyla kullanılan bir optimizasyon tekniğini esas alan bir yöntemdir. Literatürde birçok çalışmada tepe tırmanma yöntemi, değiştir ve gözlemle yöntemiyle aynı olarak görülse de bu iki yöntem birbirlerinden farklı hızlarda ve farklı parametreler üzerinden çalışma şekilleriyle ayrılırlar [131]. Ancak her iki yöntem de benzer çalışma prensiplerine sahiptir. Tepe tırmanma yönteminin çalışma prensibi, seçilen parametrelerde yapılan belirli büyüklükteki değişimlerin, hedef parametrede meydana getirdiği değişimlerin izlenmesine

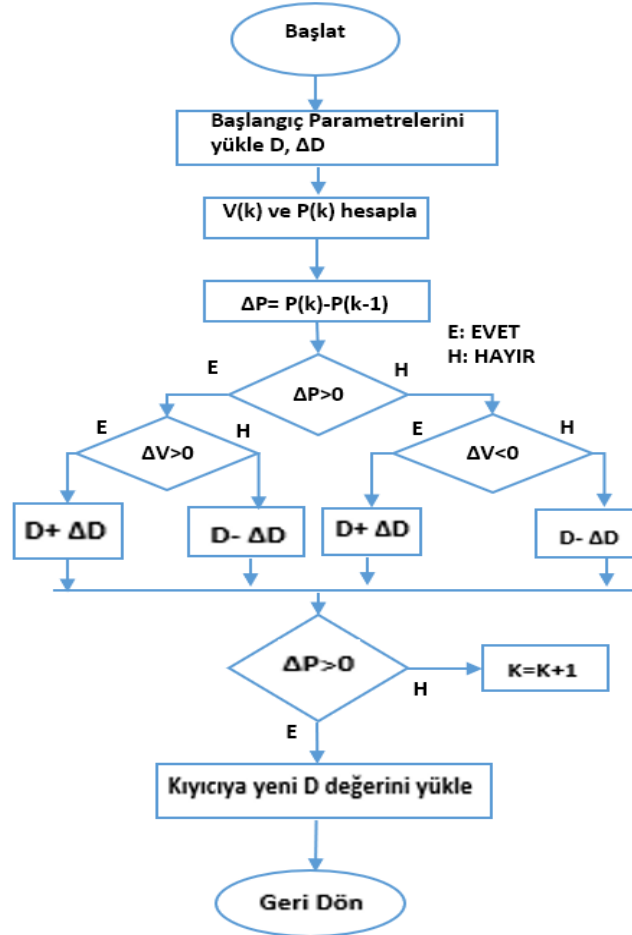
dayanmaktadır. Değişiklik yapabileceğimiz parametreler, REDS'deki akım veya gerilim değerleri, bunların dışında farklı elektriksel ya da mekanik büyüklükler olabilir. Hedef parametre ise sistemden elde edilen güç ya da bu gücü değiştirebilen bir parametre olabilir. REDS'lerde MGNİ kontrolünde bu yöntem ile seçilen parametrelere göre değişim eğrisinde gücün maksimum olduğu yani gücün seçilen parametrelere göre eğiminin sıfır olduğu noktada sistemin çalışmasını sürdürecektir. Anlık değişimlere göre bu yöntem sistemin çalışması boyunca devam eder. Giriş parametrelerinde belirli adımlarla yapılan değişikliğin çıkış parametresinde meydana getireceği değişimlere göre değişimin yönü ve büyüklüğü güncellenebilir. Bu yöntemin diğer yöntemlere göre önemli üstünlüğü sistemin ek donanımlarla elde edilen yüksek doğruluk gerektiren büyüklüklerden ve ortam koşullarından bağımsız çalışabilmesidir. Özellikle elektriksel büyüklüklerin kullanıldığı uygulamalarda mekanik algılayıcılara veya ölçüm aletlerine ihtiyaç duymaması, daha kararlı ve düşük maliyetli çalışma imkânı sunar [128]. Şekil 4.5'te bu yöntemin kullanıldığı durumda sistemin çalışma noktasının gücün gerilime göre elde edilen eğrisi üzerindeki değişimi görülmektedir.



Şekil 4.5. Tepe tırmanma yönteminde çalışma noktasının güç eğrisi üzerindeki değişimi [130]

Şekle 4.5'teki örnekte kıyıcı arayüzde gücün giriş gerilimine göre değişiminde gerilimi, maksimum gücü (P_{max}) sağlayan değerde tutma hedeflenir. Gerilimle sistemin çalışma hızı arasındaki ilişkiye göre yapılan ΔV kadar yapılan değişikliklerle (yatay oklar) güçte de ΔP kadar değişiklikler (dikey oklar) meydana gelir. ΔV 'lik bir artışta ΔP kadar güçte bir artış meydana geliyorsa arttırmaya devam ettirilir. Aksi durumda değişiklik azaltılarak devam edilir. Yapılan değişikliğin artış ya da azalışı anlık çalışma noktasının eğrinin sol ya da sağında olmasına göre değişiklik gösterir. Bu işlemler, gücün maksimum olduğu noktaya kadar devam ettirilir. REDS'lerde bu yöntemin kullanımında doğrudan gerilim parametresiyle değişiklikler yapılabileceği gibi dolaylı yoldan gerilimi ayarlayabileceğimiz kıyıcı doluluk oranıyla ya da doğrudan rotor hızını esas alan yöntemler de kullanılabilir [80, 131-132]. Seçilen büyüklüklere göre

değiştir ve gözlemle yönteminde REDS'nin maksimum güç üreteceği gerilim değeri tespit edilerek, bu gerilim değerine göre çalışma sağlanırken tepe tırmanma yönteminde ise gerilimin artışı ya da azalışını sağlayan kırıyıcı doluluk oranına göre çalışma sağlanmaktadır. Şekil 4.6'da tepe tırmanma yönteminin uygulama şeklini gösteren diyagram görülmektedir.



Şekil 4.6. Tepe tırmanma yöntemi uygulama şeması

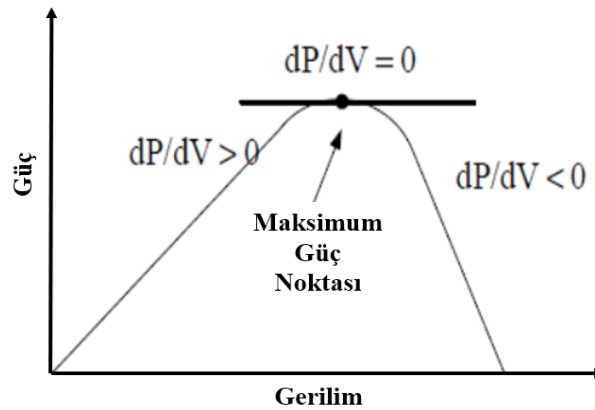
Doluluk oranına göre çalışmanın başlangıcında başlangıç parametreleri doluluk oranı (d), bunda meydana getirilecek değişiklik (Δd), gerilim ve güç değerleri alınır. Ardışık iki zaman değeri olan (k) ve (k-1) anındaki güç değerlerine göre güçteki değişim (ΔP) hesaplanır. Bu değişim ve gerilimdeki değişim (ΔV)'ye göre seçilen kırıyıcının doluluk oranı değiştirilerek MGNİ kontrolü gerçekleştirilir. Bu işlem anlık değişimlere göre çalışma boyunca devam ettirilir. Bu duruma göre üretilen yeni çıkış gücünün her zaman en üst değere ulaşmasını sağlayacak şekilde çıkış gerilimi veya akımı yükseltilmekte ya da düşürülmektedir [74] Basit yapısı, doğrudan çalışması gibi avantajlara karşın bu yöntemin de bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bunlardan biri seçilen parametre için değişim (adım) büyüklüğünün seçimidir. Adım büyüklüğünün büyük olması

sistemin çalışma hızını artırırken çalışma performansını düşürerek maksimum güç noktasında osilasyonlara neden olabilir. Küçük adım büyüklüğü ise çalışma performansını artırırken çalışma hızını düşürmektedir. Bu problem, hız ve performans arasındaki dengeyi sağlayacak şekilde anlık çalışma noktasının maksimum güç noktasına uzak olduğunda büyük, yakın olduğunda ise küçük adım büyüklüğünü sağlayacak şekilde adım büyüklüğünün ayarlanabildiği tasarımlarla aşılabılır [128, 132-133].

Bu yöntemin bir diğer dezavantajı ise adım büyüklüğünün işaretinin önceki adımdaki değişime göre belirlenmesidir. Rüzgârın gösterdiği ani değişimler sonucunda kontrol yapısı bunu bir artış ve azalış olarak algılayıp maksimum güç noktasına yaklaşmaktansa daha da uzaklaşmasına neden olmaktadır. Bu problem özellikle eylemsizliğinin yüksek olduğu büyük güçlü sistemlerde çalışma performansını daha da düşürmektedir. Bundan dolayı genellikle bu yöntem küçük güçlü sistemler için daha uygundur. Özellikle büyük güçlü sistemlerde yöntemin düşük performans gösterebilmesi daha hızlı çalışma sağlayan klasik MGNİ yöntemlerinin tercih edilebilmesini sağlamıştır [129-133].

4.2.3. Artımlı İletkenlik Yöntemi

Tepe tırmanma yöntemindeki gibi sistem parametreleri, hız ve konum bilgileri gerektirmeden çalışan bu yöntem, anlık akım ve gerilim artışlarına göre REDS'li sistemde iletkenliğin gözlemlenmesi esasına göre çalışmaktadır. Yöntemin çalışmasını anlayabilmek adına gücün gerilime göre değişimini gösteren örnek eğri Şekil 4.7'de görülmektedir.



Şekil 4.7. Gücün gerilime göre değişim eğrisi

Şekil 4.7'deki gücün gerilime göre değişim eğrisinde maksimum gücün sağlandığı tepe noktası için gücün gerilime göre değişimi (dP/dV) sıfırdır. Bu yöntem bu bilgiye dayanarak değişken hızlı REDS'de anlık akım ve gerilim bilgisine göre gücün gerilime göre eğiminin yani

türevinin sıfır olduğu maksimum güç noktasını arayan yöntemdir [77, 132]. Gücün gerilime göre değişim eğrisinde maksimum güç noktası, matematiksel olarak; Eşitlik 4.8'deki gibi ifade edilir.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (4.8.)$$

Gücün akım ve gerilim cinsinden ifadesi yukarıdaki eşitlikte yerine yazılırsa; Eşitlik 4.9'daki halini alır.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \times I)}{dV} = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} = 0 \quad (4.9.)$$

Bu eşitlikte, $\frac{I}{V}$ anlık iletkenliği, $\frac{dI}{dV}$ ise iletkenlikteki değişimi (artımlı iletkenliği) ifade eder. Bu yöntemin çalışması da bu ifadelerin karşılaştırılmasına dayanır [79-80].

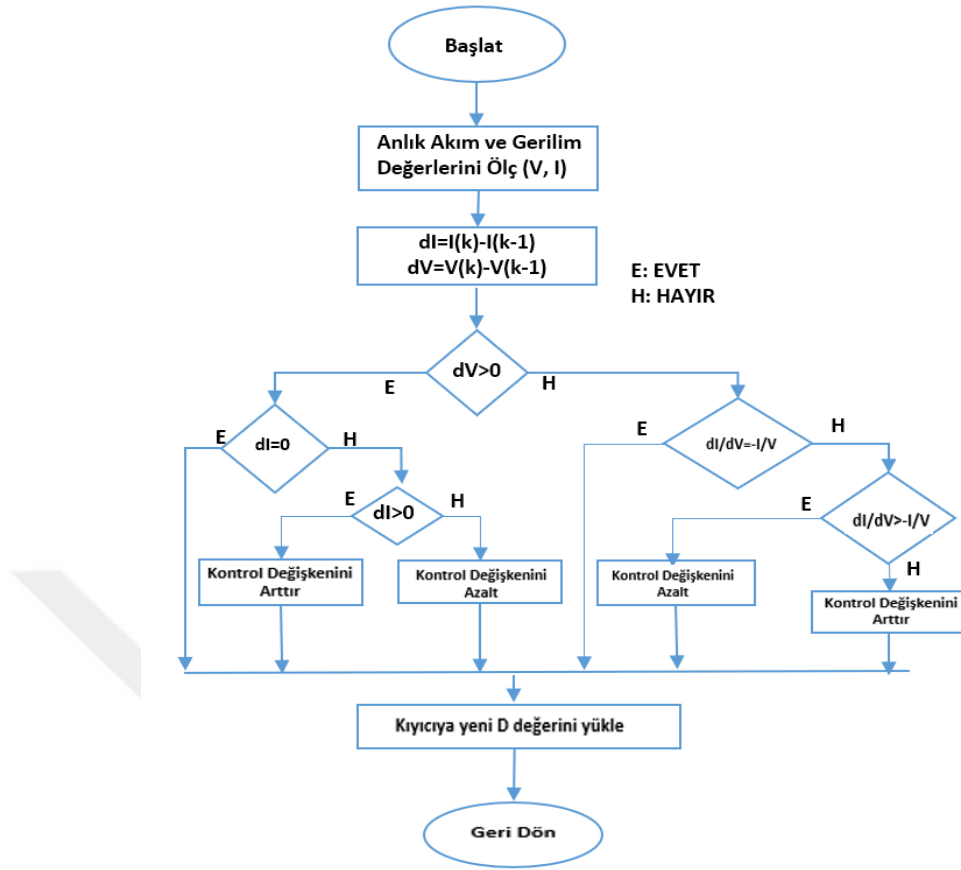
Eğim ifadesi ($\frac{dI}{dV}$). Eşitlik 4.9'a göre eğrinin solu, sağ ya da maksimum güç noktasına göre Eşitlik 4.10-4.12'deki gibi ifade edilir.

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \text{ (Eğrinin Sol tarafı)} \quad (4.10)$$

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \text{ (Maksimum Güç Noktası)} \quad (4.11)$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \text{ (Eğrinin Sağ tarafı)} \quad (4.12)$$

Eğim değerinin 0'dan büyük olduğu eğrinin sol tarafında ya da küçük olduğu sağ tarafında REDS'li sistemdeki dolaylı yoldan kıyıcının doluluk oranı değiştirilerek maksimum güç noktasına erişilmeye çalışılır [74, 133]. Şekil 4.8'de bu yöntemin uygulama şeklini gösteren diyagram görülmektedir.



Şekil 4.8. Artımlı iletkenlik yöntemi uygulama şeması

Çalışma hızı ve kararlılık açısından bu yöntem iyi bir performansa sahiptir. Yöntemin sağladığı avantajlar; çalışma koşullarına bağlı olarak değişebilecek büyüklüklerin yerine kullanılan parametrelerin verimli ve kararlı bir çalışma imkânı sunması, nonlinear sistemlerle uyumlulukları, dinamik yapıyla çalışabilmeleridir [78]. Bu yöntem, tepe tırmanma yöntemine göre hızlı değişimlerden daha az etkilenecek yanlış yönelme gibi problemlerin görülmemesi, maksimum güç noktasında daha az osilasyonlu ve hızlı çalışma imkânı verir. [77,133]. Ancak kullanılan yöntemin tepe tırmanma yöntemine göre daha karmaşık ve daha maliyetli olması gibi dezavantajları bulunmaktadır. Hem anlık akım hem de anlık gerilim bilgisine ihtiyaç duyması ve bu bilgiler için kullanılacak ek donanımlar bu dezavantajları kanıtlar niteliktedir. Bu dezavantajların aşılabilmesi adına farklı yöntemlerle bir arada kullanıldıkları hibrid yöntemler literatürde mevcuttur [56, 80, 84, 132].

Hibrid yöntemler farklı yöntemlerin sahip olduğu eksiklikleri giderecek şekilde birden fazla yöntemi bir araya getiren genellikle doğrudan ya da dolaylı MGNİ yöntemlerinin bir arada kullanılmasıyla ortaya çıkan yöntemlerdir. Doğrudan yöntemlerin sistem parametrelerinden bağımsız çalışabilmelerine rağmen hızlı değişiklik gösteren ataleti büyük olan sistemlerde düşük performanslarından dolayı çalışma hızı açısından daha avantajlı olan dolaylı MGNİ yöntemlerinin

avantajlarından yararlanılarak bu yöntemler geliştirilmiştir. Örneğin OT kontrolünün tepe tırmanma tekniğiyle kullanılarak hız ve yanlış yönelim problemlerinin aşılabilmesi ya da KHO, GSB ve değiştir gözlemle yapılarının birlikte kullanıldığı çalışmalar hibrid kullanımlara örnek gösterilebilir [80, 132, 134].

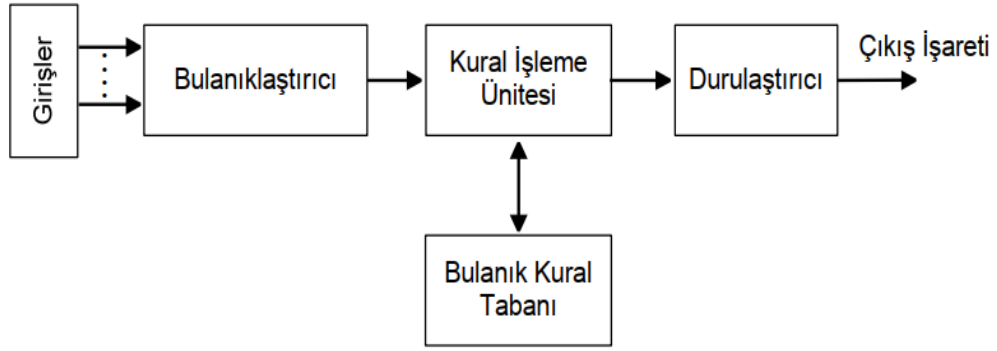
4.3. Akıllı MGNİ Yöntemleri

Önceki başlıklarda verilen MGNİ yöntemlerinin sistem dahilinde kesin bir matematiksel model gerektirmeleri, ek donanım ihtiyaçları, karmaşık tasarımları, yavaş çalışma hızları gibi dezavantajları, kontrol özelliği açısından nonlinear özellik gösteren REDS gibi sistemler için akıllı yapı olarak adlandırılan MGNİ yöntemlerinin kullanımına zemin hazırlamıştır. Akıllı olarak nitelendirilmelerinde kullanıldıkları koşul ve parametrelere göre uyarlanabilir, esnek performans göstermelerinden kaynaklanır. Başta bulanık mantık, yapay sinir ağları (YSA) ve çeşitli optimizasyon teknikleri gibi yöntemler; kullanıldığı sistemlerin herhangi bir matematiksel modeline ihtiyaç duymadan kullanılabilmesi, hızlı çalışmaları değişken hızlı REDS’lerde sadece MGNİ için değil aynı zamanda farklı kontrol amaçları için kullanımlarını yaygınlaştırmıştır [77-80, 132]. Diğer yöntemlere göre ek donanım ihtiyacını da azaltabilmeleri maliyet açısından da avantajlı olduklarını göstermektedir [84, 130, 132].

4.3.1. Bulanık Mantık Yöntemi

REDS’lerle uyumlu şekilde kullanılabilen akıllı yapıları birçok MGNİ kontrol yöntemi literatürde mevcut olmakla beraber bunlardan bulanık mantık yöntemi, 1960’lı yıllarda Dr. Lofti Zadeh’in geliştirdiği teoriye göre ortaya çıkmıştır. Bu yöntem, mantıksal algoritmalarla farklı kontrol amaçlarının gerçekleştirilmesini esas alır. Sayısal değişkenlerden çok sözel (dilsel) değişkenler üzerinden çalışan bu yapılar birçok farklı kontrol uygulamasıyla kullanılabilir.

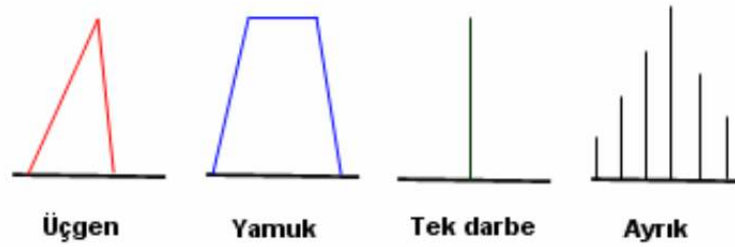
Bulanık mantık, temelde uzman bilgisi ve buna göre oluşturulan dilsel olarak ifade edilen değişkenler (Küçük, orta, büyük vb.) üzerinden farklı aşamalardan oluşmaktadır. Kullanılacağı yapılarda sistemin tam matematiksel modelini gerektirmeden gürültülü yapılarla kararlı çalışabilmeleri kullanımlarını yaygınlaştırmıştır [77, 84, 128]. Şekil 4.9’da bir bulanık mantık kontrol yapısının çalışma prensibini gösteren şema görülmektedir.



Şekil 4.9. Bulanık mantık temel yapısı

Bulanık mantık yapıların en önemli farkı insan deneyimlerinin ve sözel verilerin bulanık modele katılması ile çözümün elde edilebilmesidir. Şekil 4.9'dan da görüldüğü gibi bulanık mantık yapısı farklı birimlerden meydana gelmektedir.

Bu birimlerden bulanıklaştırıcı, sayısal olarak ifade edilen giriş değerlerini bulanık mantığa uygun dilsel değerlere dönüşümünü sağlamaktadır. Bu dönüşüm kullanılan belirli bulanık kümeler ve üyelik derecelerine göre yapılmaktadır. Bulanık mantık uygulamalarında farklı geometrik şekillerle ifade edilen bulanık kümeler (üyelik fonksiyonları) kullanılabilir. Şekil 4.10'da bulanık mantık uygulamalarında kullanılabilecek çeşitli bulanık küme örnekleri görülmektedir.



Şekil 4.10. Bulanık mantıkta kullanılan küme çeşitleri [137]

Matematiksel bir küme için bir nesne kümenin elemanı ise "1", değilse "0" değerini almaktadır. Bulanık kümede ise her bir nesnenin üyelik derecesi bulunmaktadır. Nesnelerin üyelik dereceleri 0 ile 1 aralığında herhangi bir değer olabilmektedir. Bu üyelik dereceleri, sözel bilgilerin, problemlerin çözümünde sayısal verilerle birlikte kullanımını mümkün kılmaktadır.

İkinci aşamada kullanılan kural (bilgi) işleme ünitesi girişinden gelen verileri kural tabanına göre işleyerek bulanık sonuçlar elde edilir. Kural (Bilgi) tabanı ise kuralları ve değişkenlere göre oluşturulan bağıntıları ve kuralları içermektedir. "Eğer İse" yapısına göre oluşturulan kurallar,

temel ve sonuç kısmı olmak üzere 2 yapıdan oluşmaktadır. Temel kısımda sonuca sebep olan giriş değişkenleri ve bunlar arasındaki mantıksal ilişkiler, sonuç kısmında ise bu giriş değişkenlerine bağlı olarak ortaya çıkan sonuç değişkenleri yer alır. Bu kurallar ile bulanık sonuçlar elde edilir Genel olarak bulanık kurallar aşağıdaki örneklerdeki gibi ifade edilebilir.

Kural 1: Eğer $x=A1$ ve $y=B1$ İse $z=N1$

Kural 2: Eğer $x=A2$ ve $y=B2$ İse $z=N2$

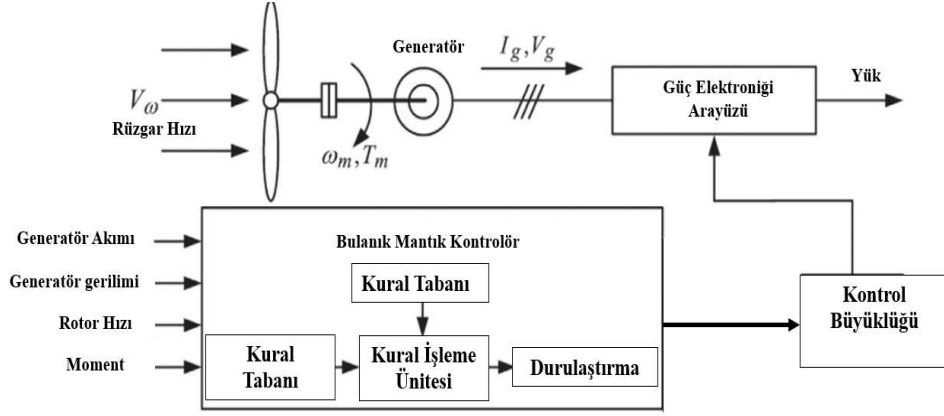
Bulanık mantıkta karar verme mantığı, bu şekilde oluşturulan kural tabanlarına göre çalışmaktadır. Burada tanımlanan A, B, N gibi ifadeler dilsel değerler olup farklı değerlere göre oluşturulan varyasyonlar ile kural tabanı oluşturulabilir.

Son aşama olan durulaştırıcı birimi ise dilsel değerlerden tekrar sayısal kesin değerlere ters dönüşümü sağlar. Farklı şekillerde birçok durulaştırma yöntemi olmakla beraber temel amaç kontrol yapısına uygun bir çıkış üretebilmektir [138].

Değişken hızlı REDS'lerde MGNİ kontrolü için bulanık mantık yapılarının kullanımının sağladığı en önemli avantajlar; rüzgârın doğası gereği hızlı değişimlere karşı kontrol yapısının hızlı ve sistem büyüklüklerinden bağımsız bir şekilde çalışabilmesi, diğer metotlara göre daha esnek yapıda kullanılabilmesi ve kontrolü zor nonlinear sistemlerle kullanımlarıyla yüksek performans verebilmeleridir [135].

Özellikle dolaylı olarak tanımlanabilecek MGNİ yöntemlerine göre kural tabanından dolayı daha esnek yapıda çalışabilirler. Ayrıca sistem parametrelerine ihtiyaç duymadan çalışabilmeleri de daha verimli çalışmalarını sağlar [36, 84]. Tepe tırmanma, artımlı iletkenlik gibi doğrudan yöntemlere göre ise adım büyüklüğünün sistemin anlık çalışma noktasının maksimum güç noktasına uzaklığına göre daha ayarlanabilir yapıda olması, bu yöntemlere göre bulanık mantık yapısının daha hızlı çalışmasını sağlar. Maksimum güç noktasında görülen osilasyonlar bulanık mantık yapısında daha azdır. Dolaylı ya da doğrudan MGNİ yöntemlerinde düşük ya da yüksek rüzgâr hızlarında kullanılan yöntemlerin performansı değişiklik gösterirken bulanık mantık yöntemlerinin düşük ya da yüksek rüzgâr hızlarında aynı performansı verebilmesi REDS'lerin daha geniş hız aralıklarında daha verimli çalışabilmelerini sağlar [139, 140].

Bulanık mantıklı MGNİ yapıları, genellikle çok girişli ve tek çıkışlı olarak tasarlanmaktadır. Bu parametreler akım, gerilim, güç veya rotor hızının tek başına kullanıldığı parametreler olabileceği gibi bu büyüklüklerin birbirlerine göre değişimleri de alınabilir. REDS'li sisteme ait mekanik ya da elektriksel büyüklükler üzerinden çalışan yapıya ait örnek bir kontrol şeması Şekil 4.11'deki gibidir.



Şekil 4.11. Bulanık mantıklı MGNİ kontrol yapısı [77-78]

Önceki bölümlerde maksimum güç noktasında gücün çalışma gerilimine göre değişiminin sıfır olduğu şekil üzerinden gösterilmişti. Örneğin bulanık mantık yapısında maksimum güce göre gerilimin değişimi bir giriş değişkeni olarak alınırken bu değişimin eğimi (türevi) ikinci giriş değişkeni olarak alınabilir. Örnek giriş değişkenleri matematiksel olarak Eşitlik 4.13 ve 4.14'teki gibi ifade edilebilir.

$$e = \frac{P_K - P_{K-1}}{V_K - V_{K-1}} \quad (4.13)$$

$$\Delta e = e_K - e_{K-1} \quad (4.14)$$

K ve $K-1$ ardışık iki zaman anını göstermek üzere gücün gerilime göre değişiminin sıfır olduğu maksimum güç noktası dışında e değeri sıfırdan farklı değerler alacağından bu parametre hata, Δe ise hatanın değişimi olarak adlandırılabilir. Bulanık mantıklı kontrolün çıkışında ise giriş değişkenlerine göre oluşturulan üyelik fonksiyonları ve kural tabanına göre kıyıcı doluluk oranı, referans gerilim, moment gibi büyüklükleri anlık olarak ayarlayarak sistemin anlık çalışma noktasını maksimum güç noktasına çekecek bir çıkış elde edilebilir.

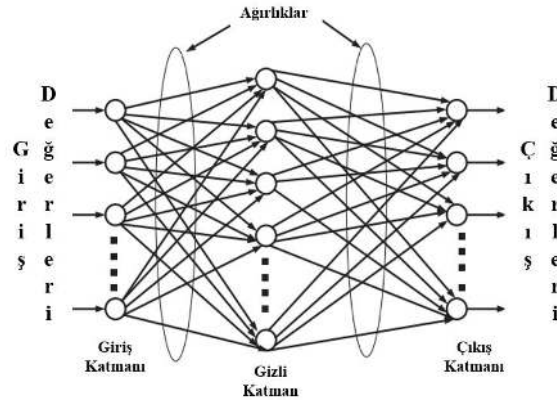
Bulanık kontrol yapısının performansı; temel bileşenler ve giriş çıkış parametrelerine göre sistem verimliliğini en yüksek seviyede tutabilmesi; sistem hakkında kullanıcının bilgisi, bulanık yapıda kullanılan üyelik fonksiyonlarının şekil ve sınırlarının belirlenmesi, kural tabanlarının uygun bir biçimde oluşturulmasına bağlıdır. Bunların yanı sıra bulanık yapıda giriş ve çıkış değişkenleri için gerektiğinde kullanılabilen kazanç terimleri sistemin yapısını değiştirmeden sistemi optimize etmek suretiyle daha hızlı ve hassas çalışma imkanı sunar. Kullanılan üçgen bulanık kümeler REDS gibi hızlı değişimlere maruz kalan yapılar için hızlı ve kararlı çalışabilme

imkanı verir. Giriş ve çıkış değişkenleri için aynı sayı ve yapıda üyelik fonksiyonlarıyla oluşturulan yapıların daha kararlı çalışma imkanı vermesi de bulanık mantıklı yapılarda kararlılıklarını ve verimliliklerini yükseltme adına kullanılabilecek farklı yaklaşımlardır [136, 140].

Birçok avantajına rağmen bu tip kontrol yapıları da bazı dezavantajlara sahiptir. Bunlar; istenen sonucu elde edebilmek adına kullanılacak üyelik fonksiyonlarının ve kural tabanının elde edilmesi için sistem hakkında elde edilecek uzman bilgisinin zaman gerektirebilmesi, bazı durumlarda optimize edilebilmelerinin deneme yanılma yöntemine ihtiyaç duyabilmesi, hafıza gereksinimleri, kullanılan parametre sayısının artmasıyla yapının karmaşılaşabilmesi olarak gösterilebilir.

4.3.2. Diğer Akıllı MGNİ Yöntemleri

MGNİ kontrolü için literatürde bulanık mantık dışında farklı akıllı yapıların kullanıldığı yöntemler de bulunabilmektedir. Bunlardan biri olan yapay sinir ağları (YSA), biyolojik sinir ağlarından esinlenerek oluşturulan girişine uygulanan değişkenlere göre bu ağ yapısından uygun bir çıkış elde edilmesini sağlayan yapılardır. Bu yapılarda gerçek sinir ağını oluşturan sinir hücreleri (nöronlar)'a benzer yapıların oluşturduğu katmanlar, bunların birbirleriyle sahip olduğu bağlantılar ve bu bağlantıların sahip olduğu ağırlık değerleri üzerinden çalışma sağlanır. Şekil 4.12'de YSA'nın temel bileşenleriyle yapısı görülmektedir.



Şekil 4.12. Temel bileşenleriyle YSA yapısı

Kullanım amacı ne olursa olsun YSA'da değişen koşullara göre nöronlar arasındaki bağlantı ağırlıkları anlık olarak güncellenerek çalışma sağlanır. Kullanılan güncelleme mekanizmasına göre birçok farklı yapıda YSA bulunmaktadır [141]. YSA yapı olarak giriş, gizli ve çıkış katmanlarından oluşur. Kullanım amaçlarına göre birden fazla sayıda gizli katman içeren YSA da bulunabilir. REDS'lerde kullanılan YSA için girişte rotor hızı, rüzgâr hızı, gerilim değeri, akım değeri gibi

parametrelerden yararlanılarak çıkışta MGNİ kontrolü için referans hız, güç, moment, kıyıcı doluluk oranı, gibi değerler vasıtasıyla sistemin maksimum güç noktasında çalışması sağlanabilir.

YSA'nın performansını kullanan nöronların arasındaki ağırlıklar, oluşturulan ağı yapısı, ağı ağırlıklarının güncellemesi (ağı eğitilmesi) için kullanılan yöntem belirler. Eğitime için kullanılacak verinin miktarı ve uygun eğitime yöntemi sistemin performansını her ne kadar iyi yönde etkilese de verinin boyutu arttıkça eğitime sürecinin uzaması, kullanılan parametre sayısının artmasıyla yapının karmaşılaşabilmesi YSA'nın başlıca dezavantajlarıdır [84, 142].

MGNİ için kullanılan bir diğer yöntem ise adaptif nöral bulanık arayüz (ANFIS) yapılarıdır. Bu yapı YSA, bulanık mantık ve uzman sistem yapılarının iyi özelliklerini birleştirerek kullanılan yapılardır. YSA'nın öğrenme kabiliyeti, bulanık mantığın karar verme mekanizması ve uzman bilgisi yeteneğini birlikte kullanarak çalışırlar. Bu yapılarla kullanılan YSA, bulanık mantık yapısındaki üyelik fonksiyonları parametrelerini ayarlayacak şekilde çalışır. Tanım olarak yapay sinir ağı mimarisinde olup bulanık mantık yapısıyla çalışan akıllı kontrol yapısı olarak da ifade edilebilirler [143, 144].

Genel olarak giriş ve çıkış katmanlarıyla beraber çok katmanlı olarak tasarlanan bu kontrol yapılarında uyarlanabilir ağı yapısı, anlık değişimlere karşı kontrol edilen sistem için kararlı çalışma imkânı sunabilmektedir. REDS için MGNİ kontrolünde kullanılan bu yapılar diğer akıllı yöntemler gibi uygun giriş değişkenleri ile uygun çıkış değerleri elde edilebilir. YSA'daki gibi eğitime için uygun veri ve algoritmayla yapının eğitilmesi başka bir algoritmayla ise elde edilen çıkışa göre kontrol edilen büyüklükteki hatanın minimize edilmesi sağlanır. Öğrenme kabiliyeti, paralel bilgi işleme, diğer yapılarla entegrasyon kolaylığı gibi avantajları olsa da kullanılan ağı yapısının ve yöntemlerin kontrol yapısının çalışmasını karmaşılaştırması gibi dezavantajları da vardır [143-145].

4.4. Farklı MGNİ Yöntemlerinin Karşılaştırılması

REDS'lerde kullanılabilen MGNİ yöntemlerinin karşılaştırması birçok kritere göre yapılabilir. Karşılaştırmalarda yaygın olarak kullanılan kriterler; başta maliyet olmak üzere, kontrol yapısının karmaşıklığı, çalışma hızı, ek donanım gerektirebilecek büyüklük bilgilerine ihtiyaç duyabilmesi, hafıza ve eğitim gereksinimleri gibi örnek verilebilir [77-79]. Yapılan karşılaştırmalar, kullanılan sistem için en uygun MGNİ kontrol yöntemi seçiminin daha kolay olarak yapılabilmesine olanak sağlar. Örneğin sistemde kullanılan dolaylı kontrol yöntemlerinden KHO yöntemi, basit ve hızlı çalışmasına karşın rüzgâr hızı, rotor hızı gibi bilgilere ihtiyaç duyabilmesi, bu bilgiler için de yüksek doğrulukta çalışan ek donanım ihtiyacının olması bu yöntemin uygulama maliyetini artırır. Aynı zamanda çalışmada gerek duyduğu bilgilerin kesin doğrulukta elde edilme zorluğu da bu yöntemin performansını düşürür. Rüzgâr hızına doğrudan ihtiyaç duymadan kullanılan GSB ve OT gibi yöntemler ise rüzgâr hızı bilgisine direkt ihtiyaç

duymadan kullanılsa da rüzgârın hızı bilgisinin dolaylı olarak kullanıldığı güç, moment gibi büyüklükler üzerinden çalışabilmeleri ani ve hızlı rüzgâr değişimleri karşısında yavaş kalmalarına neden olur. Doğrudan MGNİ yöntemlerinde ise uygulama kolaylığı, kontrol esnekliği ve daha az hafıza gereksinimleri sürekli maksimum güç noktasını arayacak şekilde çalışmaları gibi avantajları vardır. Dolaylı yöntemlere göre en önemli üstünlükleri hız, konum bilgisi gibi büyüklüklere ihtiyaçları yoktur. Ancak ani ve hızlı değişimler karşısında düşük performans gösterebilmeleri, maksimum güç noktasına yaklaştıkça görülen osilasyonlar gibi dezavantajlara sahiptirler. Bu sorunu aşabilmek adına diğer metotlarla kullanılabildikleri hibrid yapılar literatürde mevcuttur [79, 128].

Bulanık mantık, YSA, ANFIS, optimizasyon teknikleri gibi yapıları esas alan akıllı MGNİ yöntemleri ise ek donanımsız çalışma, değişken hızlı REDS gibi yüksek nonlinear özelliğe sahip sistemlerde yüksek performans gösterme gibi avantajları vardır. Bulanık mantıklı yapıların tasarımcının sistem hakkında sahip olduğu bilgiye göre performansları değişiklik gösterebilir. YSA'lı yapılar özellikle sistemin kullanım ömrünün artması ve yıpranmasına rağmen belirli aralıklarla ağın eğitilmesiyle yüksek performans verebilirler. Burada YSA'da ağı eğitmede kullanılacak verinin niteliği, ağı karmaşıklığı, kullanılan YSA'nın performansını doğrudan etkilemektedir. Kullanılabilecek başlıca MGNİ yöntemlerinin farklı kriterlere göre performans değerlendirmeleri Tablo 4.1'de görülmektedir.

Tablo 4.1. Farklı MGNİ yöntemlerinin çeşitli kriterlere göre karşılaştırılması

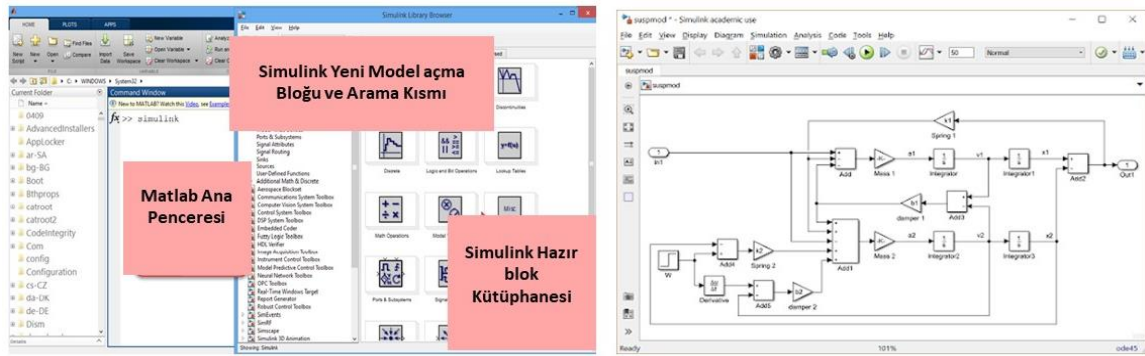
MGNİ YÖNTEMİ	Karmaşıklık	Çalışma Hızı	Değişen Rüzgâr Hızlarında Performansı	Ön bilgi Eğitim İhtiyacı
KHO	Düşük	Yüksek	Düşük	Yok
OT-PSF	Düşük	Yüksek	Düşük	Yok
HCS-P&O	Orta	Düşük	Orta	Yok
Adaptif HCS-INC	Orta	Orta	Yüksek	Yok
Bulanık Mantık	Orta	Orta	Yüksek	Yok
YSA	Yüksek	Orta	Yüksek	Var

Tablo 4.1'de belirtilen yöntemlerin dışında farklı MGNİ kontrolü uygulamaları da mevcuttur. Kullanılacak kontrol yöntemi için maliyet ve performans arasında dengeyi de göz önünde bulundurarak yapılacak kontrol yöntemi seçimi, REDS'nin kullanım ömrü, verimliliği, genel maliyeti açısından büyük önem teşkil etmektedir [129].

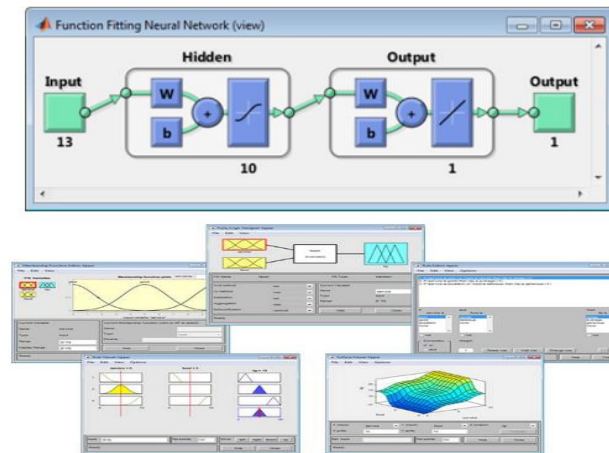
4.5. REDS ve Farklı Kontrol Yöntemlerinin MATLAB/Simulink Ortamında Modellenmesi

REDS’lerde üretim sürecinden önce tasarımların, kontrol yapılarının bilgisayar ortamında modellenmeleri, sistem üzerinde çalışmanın kısıtlı ya da zor olduğu durumlarda çeşitli büyüklüklerin analizine, üretim aşamasına geçilmeden değişikliklerin yaratabileceği sonuçlara göre oluşabilecek problemler ve ek maliyetlerin önüne geçilerek daha verimli tasarımların daha düşük maliyetlerle gerçekleştirilmesine olanak verir [146].

Modelleme çalışmaları için birçok farklı modelleme uygulaması olmakla beraber bunlardan MATLAB/Simulink programı ön plana çıkmaktadır. Bu program, sunduğu kolay anlaşılabilir arayüz, hazır modelleme blokları ve farklı akıllı yapılar (YSA Bulanık mantık, Optimizasyon vb.) için sunduğu ek arayüzler REDS gibi karmaşık bileşenler ve kontrol yapıları içeren sistemlerin modellenmesinde önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Şekil 4.13 ve 4.14’te program penceresinin genel görünümü ve farklı arayüzler görülmektedir.



Şekil 4.13. MATLAB/Simulink ana ekranı ve simulink uygulama penceresi



Şekil 4.14 YSA ve bulanık mantık için hazır kullanıcı arayüzleri

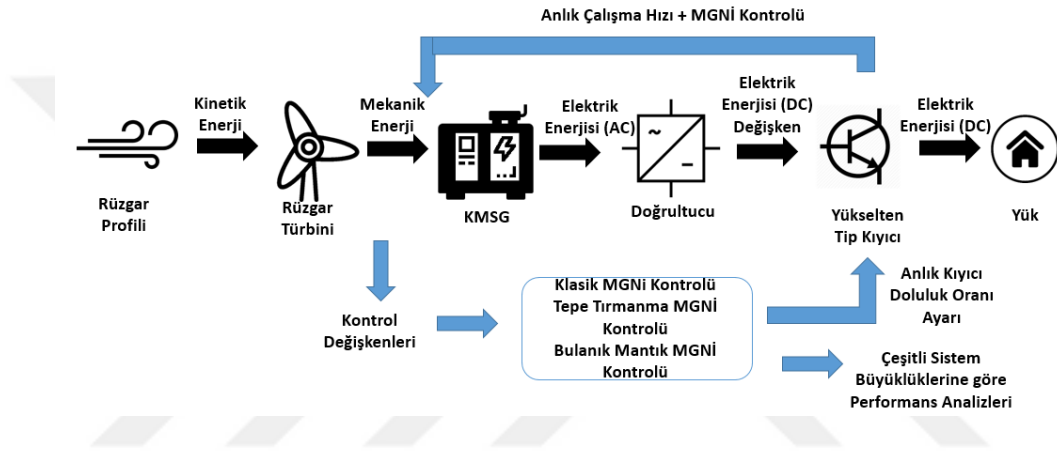
Simulink, kendi bünyesinde bulundurduğu hazır bloklarla modelleme gerçekleştirebileceği gibi matematiksel olarak ifade edilebilen büyüklükler üzerinden de modelleme imkânı sunar.

Bu program ve sunduğu arayüzler vasıtasıyla kullanıcılar; istedikleri değişiklikleri anlık yapabilmekte ve anlık sonuçları elde edebilmekte, birçok farklı parametre ve büyüklüğün sayısal ya da görsel olarak değişimini analiz edebilirler.



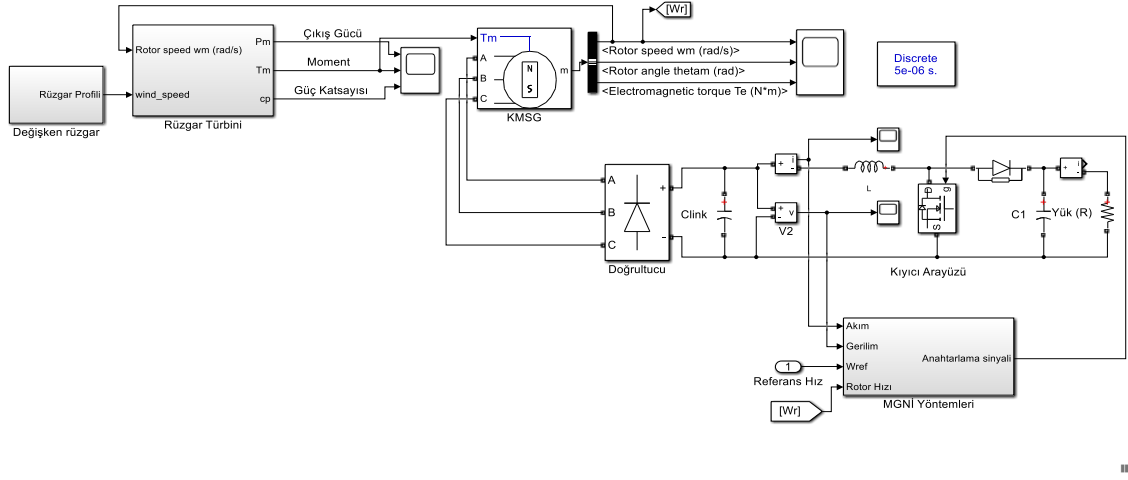
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde değişken hızlı REDS için farklı kontrol yöntemleri üzerinden MGNİ kontrolü gerçekleştirilmiştir. Sistemin genel modeli mekanik ve elektriksel bileşenler bir araya getirilerek oluşturulmuştur. Önceki bölümlerde verilen rotor hızı üzerinden çalışan KHO yöntemi, doğrudan yöntemlerden tepe tırmanma ve akıllı yapı olarak bulanık mantık tabanlı MGNİ kontrollerine göre sistemdeki çeşitli büyüklüklerinin değişimi üzerinden karşılaştırmalar yapılmıştır. REDS'ye ait genel blok şeması Şekil 5.1'de görülmektedir.



Şekil 5.1. REDS'ye ait genel dönüşüm şeması

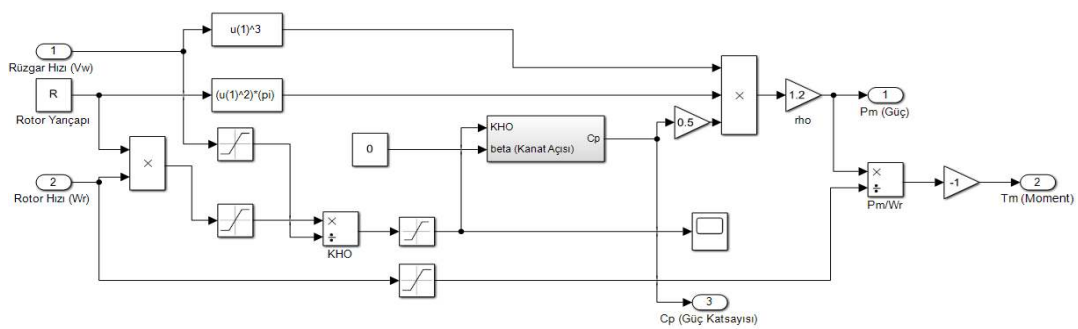
Şekil 5.1'deki temel dönüşüm şemasına göre türbinden yüke kadar meydana gelen enerji dönüşümleri ve büyüklüklere yer verilmiş olup farklı kontrol yöntemleriyle kıyıcı doluluk oranının kontrolüyle MGNİ kontrolü gerçekleştirilmiştir. Genel dönüşümde yer alan her bileşenin MATLAB/Simulink ortamındaki modeline göre analiz gerçekleştirilmiştir. Değişken hızlı REDS için Simulink modeli Şekil 5.2'de görülmektedir.



Şekil 5.2. REDS Simulink modeli

Şekil 5.2'deki modele göre rüzgâr türbini girişine değişken ya da sabit karakteristiğe sahip rüzgâr profili ve KMSG'den alınan rotor hızı girişlerinin uygulanmasıyla türbin çıkışında KMSG'yi tahrik eden moment elde edilir. Sistemde generatör olarak kullanılan KMSG için Simulink kütüphanesinden analiz ve kontrol kolaylığı için hazır blok kullanılabileceği gibi generatörün (d-q) referans çatı modelinde elde edilen matematiksel denklemlere göre de modellenebilir. Türbin bloğu çıkışında güç moment ve MGNI analizi için güç katsayısı (C_p)'nin değişimi Scope ekranından gözlemlenebilir. Generatör çıkışında rüzgârla uyumlu olarak üretilen gerilim kontrolsüz doğrultucu tarafından doğrultulur ve bu gerilim kıyıcı arayüzüne aktarılır. Kullanılan MGNI yöntemine göre üretilen anahtarlama sinyali, kıyıcıdaki anahtara uygulanır. MGNI yöntemleri bloğunun girişleri; kıyıcı girişindeki akım ve gerilim değerleri, anlık ve referans rotor hızı değerleridir. Giriş ve çıkış büyüklüklerinin analizi için Simulink kütüphanesindeki ölçü araçları ve Scope bloğundan yararlanılabilir.

Rüzgâr türbini yapısına ait modelin açık hali Şekil 5.3'te verilmiştir.



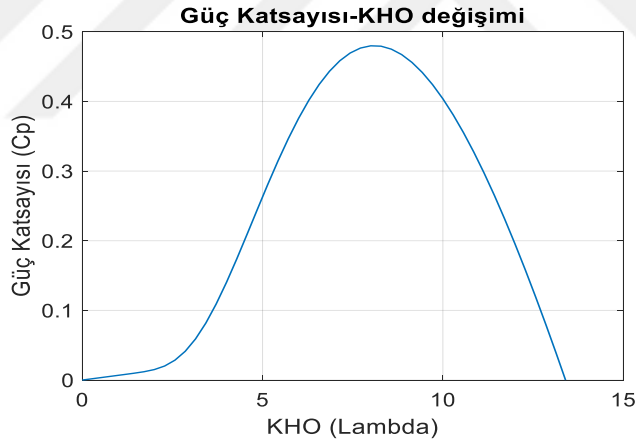
Şekil 5.3. Rüzgâr türbini modelinin detaylı hali

Bu çalışmada kullanılan Şekil 5.3'teki türbin yapısının modellenmesinde türbindeki enerji dönüşümünü meydana getiren KHO, güç katsayısı, güç ve moment denklemlerine göre modelleme gerçekleştirilmiştir. Türbin parametreleri Tablo 5.1'de görülmektedir.

Tablo 5.1. Türbin parametreleri

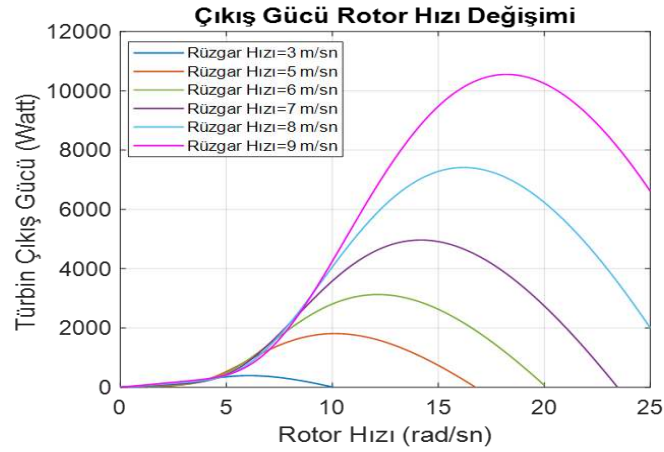
	Değerler	Birim
Rotor Yarıçapı	4	m
rho (Hava Yoğunluğu)	1,2	kg/m ³
Anma Rüzgâr Hızı	7	m/sn
Kanat Açısı (Pitch Angle)	0°	Derece

Bu çalışmada MGNI kontrolüne odaklanıldığından güç katsayısının maksimum değerini elde edebilmek için kanat açısı (beta) değeri türbin modelinde 0° olarak ayarlanmıştır. Seçilen türbin modeli ve Tablo 5.1'deki parametrelere göre güç katsayısının KHO'ya göre değişimi Şekil 5.4'te görülmektedir.



Şekil 5.4. Güç katsayısı KHO değişimi

Şekil 5.4'teki grafiğe göre değişen rüzgâr hızlarında güç katsayısı yani verimliliğin en yüksek düzeyde tutulması KHO'nun da en uygun değerde tutulmasına bağlıdır. Bu değerde önceki bölümlerde verilen rotor hızının ayarlanmasıyla sağlanabilir. Bu çalışmada REDS için KHO'nun en uygun değeri 8,1 güç katsayısının ise bu değere göre 0,48 olduğu belirlenmiştir. Anlık değişebilen rüzgâr hızına göre rotor hızının ayarlanmasıyla güç katsayısının maksimum seviyede tutulması kullanılan yöntemlerin temel hedefidir. Değişen rotor hızı ve rüzgâr hızlarına göre Türbin gücünün değişimi Şekil 5.5'te görülmektedir.



Şekil 5.5. Türbin çıkış gücünün rotor hızına göre değişimi

Şekil 5.5'e bakıldığında değişen rüzgâr hızlarında çıkış gücü, belirli rotor hızlarında maksimum değeri alabilmektedir. Kullanılacak MGNİ yöntemleriyle anlık rotor hızının rüzgâr hızına göre ayarlamasıyla KHO'nun ve güç katsayısının değerleri de anlık rüzgâr hızına göre ideale yakın değerlerde tutulur. Böylece sistem verimliliği maksimum seviyeye çıkarılabilir.

REDS'nin Simulink modeline göre türbin çıkışından kalıcı mıknatıslı senkron generatörün girişine uygulanan momentin işareti negatif ise KMSG generatör, pozitifse motor olarak çalışması sağlanır. Generatör çıkışında elektriksel ve mekanik büyüklüklerin değişimi Scope ekranında gözlemlenebilir. Bu çalışmada kullanılan generatöre ait parametreler Tablo 5.2'de görülmektedir.

Tablo 5.2. KMSG parametreleri

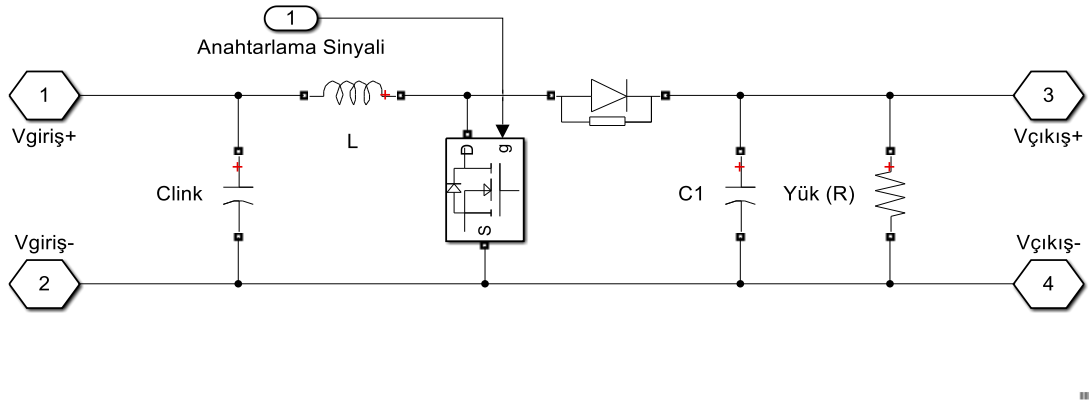
Parametreler	Değerler
Stator Direnci	0,425 Ω
Armatür Endüktansı	0,000835 H
Akı Bağı	0,433 Wb
Atalet (J)	0,01197 kg.m ²
Sürtünme (Viskoz) Katsayısı (B)	0,001189 Nms
Kutup Çifti	8

Generatör çıkışından anlık değişen rüzgâra göre elde edilen gerilim, doğrudan şebeke ya da yüke aktarılmaya elverişli değildir. Bunun için kullanılan doğrultucu-kıyıcı arayüz yapısıyla en uygun şekilde aktarılmaya çalışılır. Bu teze konu olan sistemde kullanılan yapıyla çıkış gerilimi kontrolsüz doğrultucu tarafından doğrultulduktan sonra kullanılan kıyıcı yapısı doğrultucudan gelen değişken yapıda doğrultulmuş gerilimi istenen seviyeye ayarlamak için kullanılır. Çalışmada kullanılan yükselten tip (boost) kıyıcı devresini oluşturan temel elemanların ve parametrelerin büyüklükleri önceki bölümlerde verilen hesaplama kriterlerine göre Tablo 5.3'te belirtilmiştir.

Tablo 5.3. Kıyıcı parametreleri

Parametreler	Değerler
Endüktans (L)	0.1 mH
Kapasiteler (Clink, C1)	1300 uF
Yük (R)	50 Ω
Anahtarlama Sinyali Frekans	10 KHz

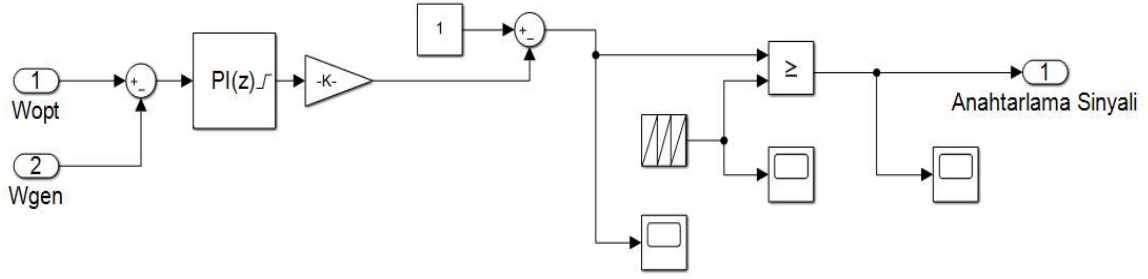
Kıyıcı devresini oluşturan elemanların büyüklüklerinin ve anahtarlama frekansının uygun şekilde seçimleri hem kıyıcı hem de genel sistemin çalışma kararlılığı açısından önemlidir. Kıyıcıya ait modelin detaylı hali Şekil 5.6’da görülmektedir

**Şekil 5.6.** Yükselten tip kıyıcı devre modeli

Doğrultucudan gelen gerilim istenen seviyeye bu kıyıcı devresi tarafından yükseltilerek farklı amaçlara göre kullanılabilir. Kullanılan güç ve frekans seviyelerine göre anahtar türünde değişikliğe gidilebilir. Çalışmada kullanılan MGNİ yöntemleri değişen rüzgâr hızlarına göre kıyıcı doluluk oranının kontrolüyle anlık güç verimliliğinin en üst seviyede tutulması amaçlanmıştır.

5.1. Klasik MGNİ Modelinin Uygulanması

Yapılan modelde klasik MGNİ kontrolü için KHO yöntemine göre güç katsayısını maksimum seviyede tutmayı amaçlayan çalışma yöntemi kullanılmıştır. Şekil 5.7’de bu yöntemle ait Simulink modelinin detaylı hali görülmektedir.



Şekil 5.7. KHO yöntemi uygulama modeli

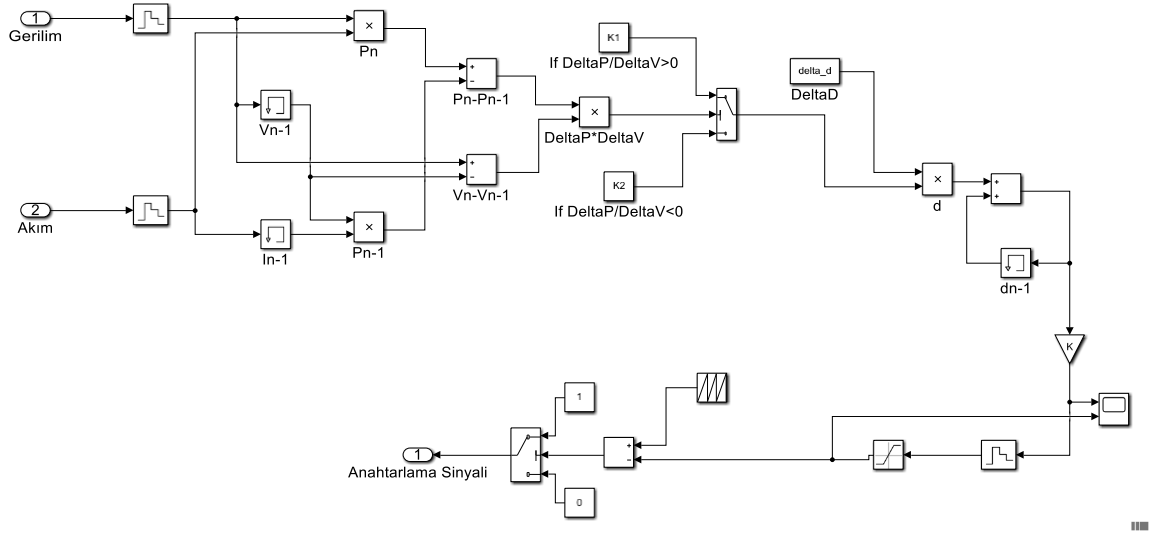
Şekil 5.7’de kullanılan yapıda KHO yöntemine göre hesaplanan anlık rüzgâr hızına göre maksimum gücü sağlayan rotor hızı referans değeri (ω_{opt}), Eşitlik 5.1’deki gibi ifade edilir.

$$\lambda_{opt} = \frac{\omega_{opt} \times R}{V}, \omega_{opt} = \frac{V \times \lambda_{opt}}{R} \quad (5.1)$$

Burada kullanılan optimal KHO değeri (λ_{opt}), güç katsayısı değerini maksimum yapacak şekilde seçilmiştir. Anlık rotor hızı (ω_{gen}) ile referans hız değerinin karşılaştırılmasıyla elde edilen hata değeri PI kontrolör girişine uygulanarak çalışma noktasını maksimum güç noktasına çekecek şekilde kontrol sinyali elde edilmeye çalışılmıştır. PI kontrolde oransal ve integral kazanç değerleri anlık hız hatasını minimize edecek şekilde seçilmiştir. Kontrol çıkışında kullanılan K kazanç değeri, doluluk oranını uygun aralıkta tutmak için kullanılmıştır. Bu değer daha sonra belirli bir anahtarlama frekansı ile kıyıcı devresine uygulanarak MGNİ kontrolü sağlanmıştır.

5.2. Tepe Tırmanma MGNİ Modelinin Uygulanması

Bu metodun çalışmasında seçilen akım, gerilim, güç vb. büyüklüklerin ardışık zamanlardaki değişimi kontrol modelinde kullanılır. Bu büyüklüklerdeki değişimlere göre seçilen kontrol değişkeninde artış ya da azalış şeklindeki değişikliklerle maksimum güç noktasına erişilmeye çalışılır. Yapılan model Matlab ortamında yazılan bir dosya (m-File) üzerinden çalıştırılabileceği gibi Simulink ortamında hazır bloklar kullanılarak da oluşturulabilir. MGNİ kontrolü için oluşturulan bloğun detaylı hali Şekil 5.8’de görülmektedir.



Şekil 5.8. Tepe tırmanma MGNİ kontrolü modeli

Şekil 5.8’de giriş değişkenleri olarak kırıyıcı girişindeki akım ve gerilimlere göre gücün değişimi (ΔP), gerilimin değişimi (ΔV) alınmıştır. Bu büyüklükler Eşitlik 5.2 ve 5.3’teki gibi elde edilmiştir.

$$\Delta P = P(k) - P(k - 1) \quad (5.2)$$

$$\Delta V = V(k) - V(k - 1) \quad (5.3)$$

Ardışık k ve k-1 zamanlarındaki büyüklüklere göre elde edilen bu değişimlerin işaretine göre sistemin anlık çalışma noktasının ayarlanmasında ve kullanılan bu yöntemin anlaşılmasında zincir kuralından yararlanılabilir. Bu kurala göre sistemde maksimum güç noktası için

$$\frac{\Delta P}{\Delta \omega} = 0 \quad (5.4)$$

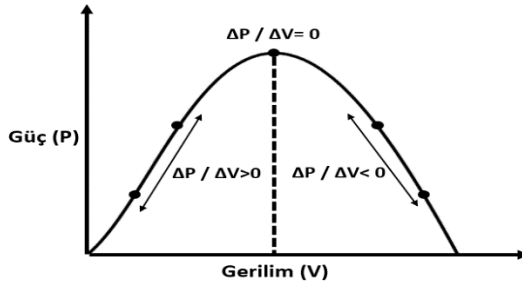
eşitliği yazılabilir. Gücün maksimum olduğu çalışma noktası, anlık güç değişiminin çalışma hızının değişimi ($\Delta \omega$)’ye göre değişiminin sıfır olduğu noktadır. Bu değişim ifadesi güçteki değişim (ΔP), gerilimdeki değişim ifadesine göre açıldığında

$$\frac{\Delta P}{\Delta \omega} = \frac{\Delta P}{\Delta V} \times \frac{\Delta V}{\Delta \omega} = 0 \quad (5.5)$$

eşitliği elde edilir. Eşitlik 5.5'teki ifadede çalışma hızının gerilimle orantılı olduğu düşünüldüğünde eşitliğin maksimum güç şartını sağlayabilmesi Eşitlik 5.6'da görülmektedir.

$$\frac{\Delta P}{\Delta \omega} = 0 \Leftrightarrow \frac{\Delta P}{\Delta V} = 0 \quad (5.6)$$

Yukarıdaki eşitlik gücün gerilime göre değişiminin sıfır olduğu noktanın anlık maksimum gücün elde edildiği çalışma noktasını verdiğini gösterir. Şekil 5.8'deki simülasyon modeline göre, anlık çalışma noktasının maksimum güç noktasının sağında ya da solunda olmasına göre çıkış değişkeni olarak alınan doluluk oranının artırılıp ya da azaltılmasıyla dolaylı yoldan gücün gerilime göre değişiminin kontrolüyle anlık MGNI kontrolü sağlanmıştır Tepe tırmanma yöntemi için gücün gerilime göre değişim eğrisi Şekil 5.9'da görülmektedir.



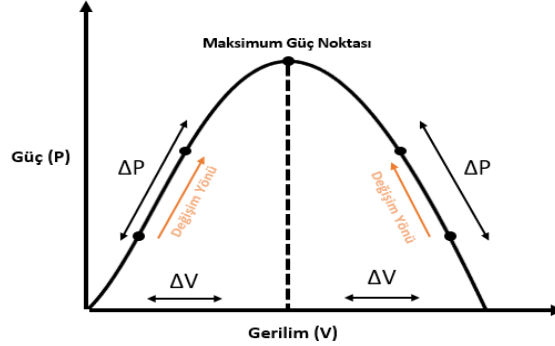
Şekil 5.9. Tepe tırmanmada giriş değişkenlerine göre değişim eğrisi

Şekil 5.9'daki değişim eğrisi incelendiğinde çalışma noktasının eğrideki konumu ve ok yönlerinde belirtilen değişimlere göre gerilimi artırarak ya da azaltılarak maksimum güç noktasına erişilmeye çalışılır. Şekil 5.8'deki tepe tırmanma modelinde anlık güç gerilim değişimlerindeki işaretlerin çarpımına göre, zıt işaretli K1 ve K2 değerleri değişimin yönünü belirlerken anlık doluluk oranı Δd (Delta_d) adım büyüklüğü kadar azaltma ya da artırma yapacak şekilde çalışmıştır. Daha sonra bu doluluk oranı belirli bir anahtarlama sinyaliyle kıyıcı devresine uygulanmıştır. Tepe tırmanma metodu modelinde kullanılan K1, K2 ve Delta_d değerleri, Tablo 5.4'te görülmektedir.

Tablo 5.4. Tepe tırmanma metodu değerleri

Parametreler	Değerler
K1	1
K2	-1
Delta_d	5e-4
Anahtarlama Sinyali Frekansı	10 KHz

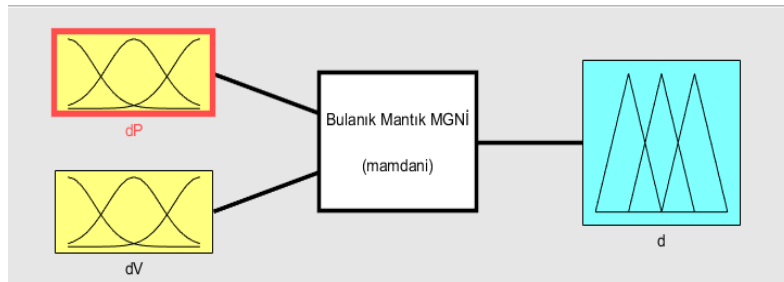
kullanılmaktadır. Kullanılan değişkenlere göre çalışma noktasının değişimi Şekil 5.11’de görülmektedir.



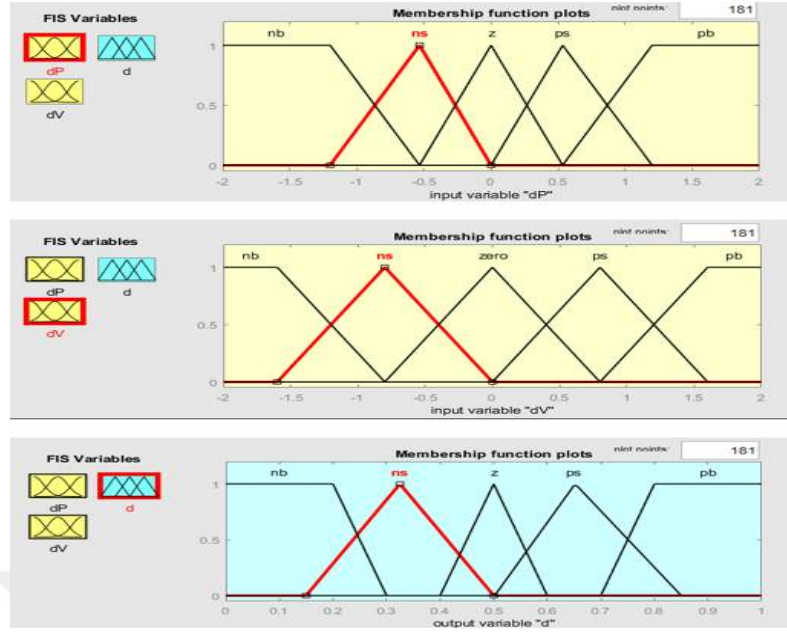
Şekil 5.11 Bulanık mantık için değişkenlere göre güç eğrisindeki değişim

Şekil 5.11’deki eğriye göre güç ve gerilimdeki değişimlerin işareti, çalışma noktasının konumuna göre bulanık mantık yapısıyla kıyıcı doluluk oranı artırılarak ya da azaltılarak maksimum güç noktasına erişilmeye çalışılır. Tepe tırmanmadaki gibi güç eğrisinde çalışma noktasının maksimum güç noktasının solunda ya da sağında olmasına göre doluluk oranı ayarlanmaya çalışılır. Bulanık mantık yapısının tepe tırmanmadan farkı, tepe tırmanmada bu ayarlama belirli adım büyüklükleriyle sağlanırken bulanık mantıkta üyelik fonksiyonları ve kural tabanıyla sağlanmasıdır.

Seçilen giriş değişkenleri güçteki değişim (ΔP) gerilimdeki değişim (ΔV) ve çıkış değişkeni doluluk oranı d ’ye göre oluşturulan üyelik fonksiyonları Şekil 5.12’de görülmektedir.



a)



b)

Şekil 5.12. Bulanık mantık yapısı a) Değişkenler b) Değişkenlere ait üyelik fonksiyonları

Seçilen değişkenler göre oluşturulan bulanık mantık kural tabanı Şekil 5.13'te görülmektedir.

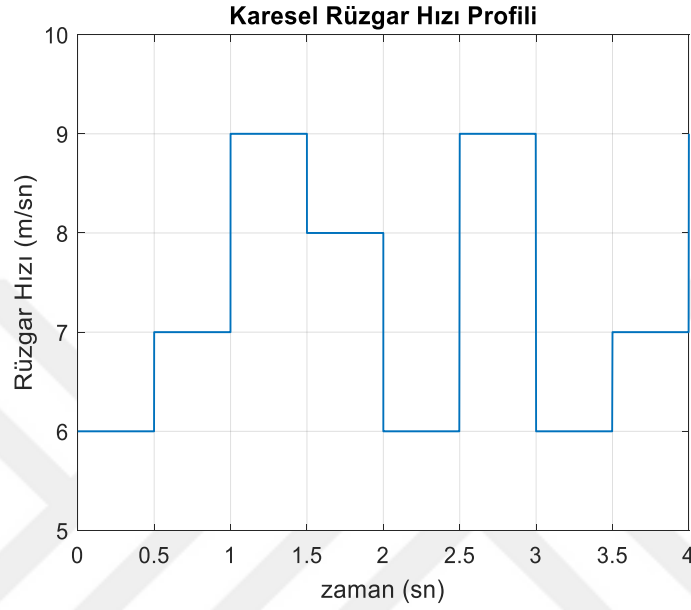
d	ΔV	NB	NS	Z	PS	PB
ΔP						
NB		NB	NS	Z	PS	PB
NS		NS	NS	Z	PS	PS
Z		Z	Z	Z	PS	PS
PS		PS	PS	Z	NS	NS
PB		PB	PS	Z	NS	NB

Şekil 5.13. Bulanık mantık kontrolüne ait kural tabanı

Şekil 5.13'te kural tabanında belirtilen değişkenler, NB (Negatif Büyük), NS (Negatif Küçük), Z (Sıfır), PS (Pozitif Küçük), PB (Pozitif Büyük) şeklindedir. Kural tabanı, güç ve gerilimdeki değişimlerin negatif ya da pozitif olması ve bu değişimlerin büyüklüğüne göre doluluk oranını artıracak ya da azaltacak şekilde oluşturulmuştur.

5.4. Sistemdeki Çeşitli Büyüklerin Kontrol Yöntemlerine göre Karşılaştırılması

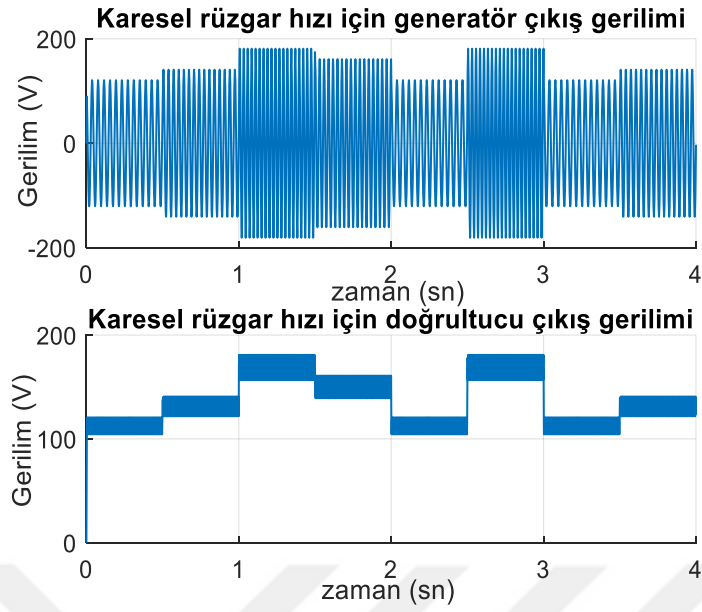
Faklı kontrol yapılarının performansını görebilme adına REDS için iki farklı değişken rüzgâr hızı profiline göre çalışma yapılmıştır. Bu rüzgâr profillerinden karesel olarak değişen rüzgâr profili Şekil 5.14'te görülmektedir.



Şekil 5.14. Karesel değişen rüzgâr profili

Karesel olarak değişen rüzgâr profili, hızlı değişimler karşısında kullanılan MGNİ kontrol yöntemlerinin performansını inceleyebilmek için kullanılmıştır. Türbin girişine uygulanan rüzgâr hızının 6 ila 9 m/sn arasında değiştiği kabul edilmiştir.

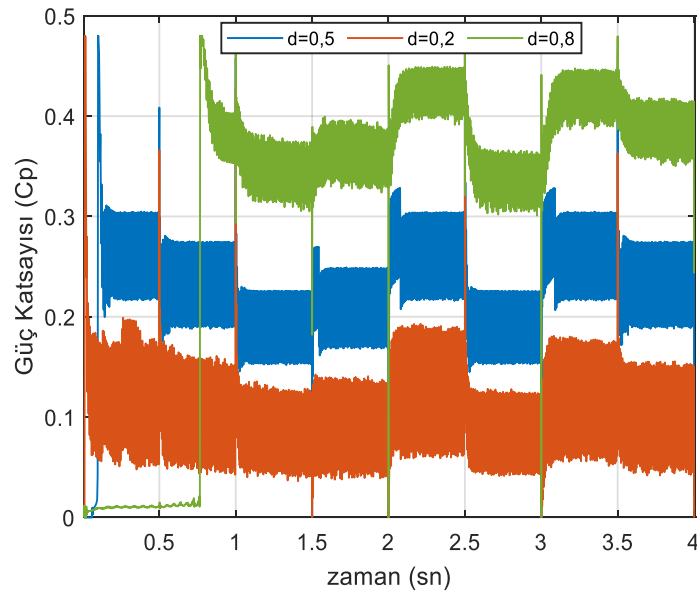
Karesel rüzgâr hızı profiline göre kısıcılı arayüz içeren REDS'de generatör ve doğrultucu çıkışındaki gerilim değişimleri Şekil 5.15'te görülmektedir.



Şekil 5.15. Karesel rüzgârda generatör ve doğrultucu çıkış gerilimleri

Karesel değişen rüzgâr profiline göre Şekli 5.15'teki gerilim değişimleri incelendiğinde rüzgâr hızı değişimleriyle uyumlu değişimler gözlemlenmiştir. Rüzgarla uyumlu bu değişimlere göre en yüksek kararlılık ve verimlilikte güç aktarımı temel hedeftir

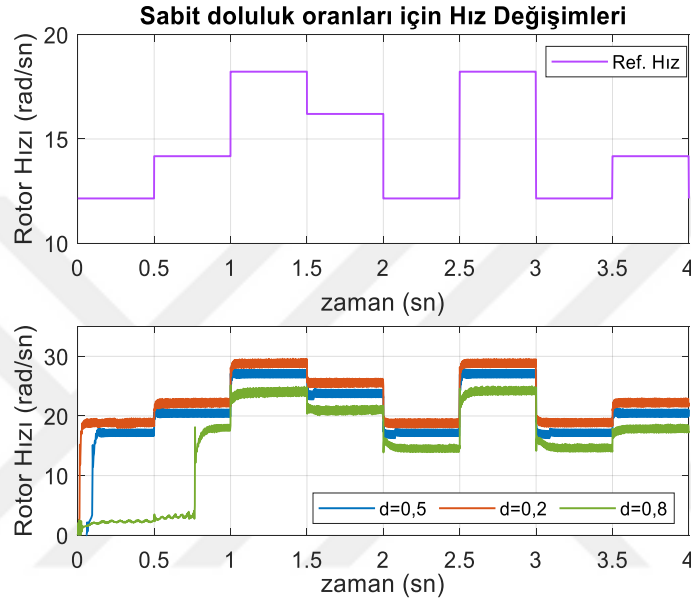
Ele alınan kontrol yöntemleri uygulanmadan önce farklı ve sabit doluluk oranlarına göre REDS için güç katsayısı değişimleri aşağıda Şekil 5.16'da görülmektedir.



Şekil 5.16. Karesel rüzgârda sabit doluluk oranları için güç katsayısı değişimleri

Sabit doluluk oranları için Şekil 5.16'daki değişimler incelendiğinde aşırı düşüşler, dalgalanmalar görülmekte karesel değişen rüzgâr profili için sadece belirli hızlarda yüksek güç katsayısına yakın değerler elde edilmiştir. Ancak aşırı dalgalanmalar ve düşüşler sistem verimliliğini ve çalışma kararlılığını olumsuz yönde etkiler.

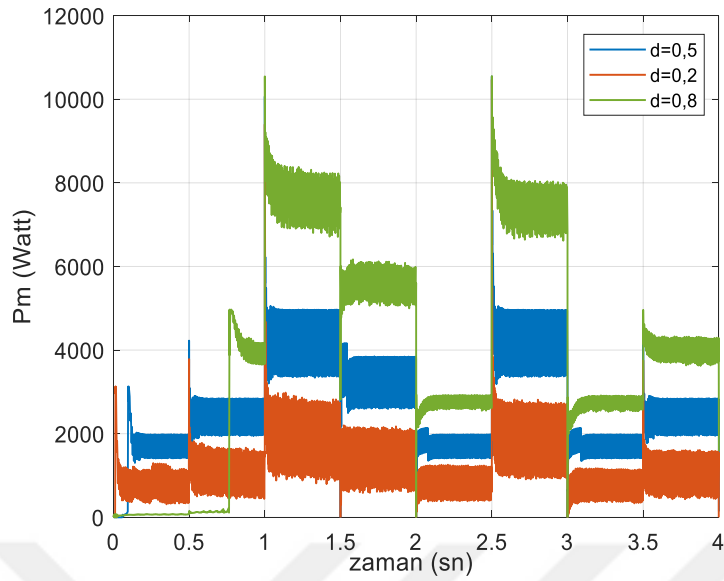
MGNİ kontrolü, REDS'de anlık çalışma hızının rüzgâra göre ayarlanması olduğundan sabit doluluk oranları için rotor hızının referans hıza göre değişimleri Şekil 5.17'de görülmektedir.



Şekil 5.17. Karesel rüzgârda sabit doluluk oranları için hız değişimleri

Şekil 5.17'de çalışma hızları referans hızlarla karşılaştığında doluluk oranı değişimlerindeki gibi hız değişimlerinde de bozulmalar ve düşüşler görülmektedir. Belirli hız değerlerinde referans hız değerine yakın değişimler gözlenirse bile artan doluluk oranı değeriyle bozulma ve referans hıza göre sapmalar daha da artmaktadır. Bu değişimler anlık çalışma hızını referans hıza göre ayarlayan bir kontrol yapısının gerekliliğini gösterir.

Aynı rüzgâr profili için sabit doluluk oranlarına göre türbin çıkış gücü değişimleri Şekil 5.18'de görülmektedir.



Şekil 5.18. Karesel rüzgârda sabit doluluk oranları için türbin çıkış gücü değişimleri

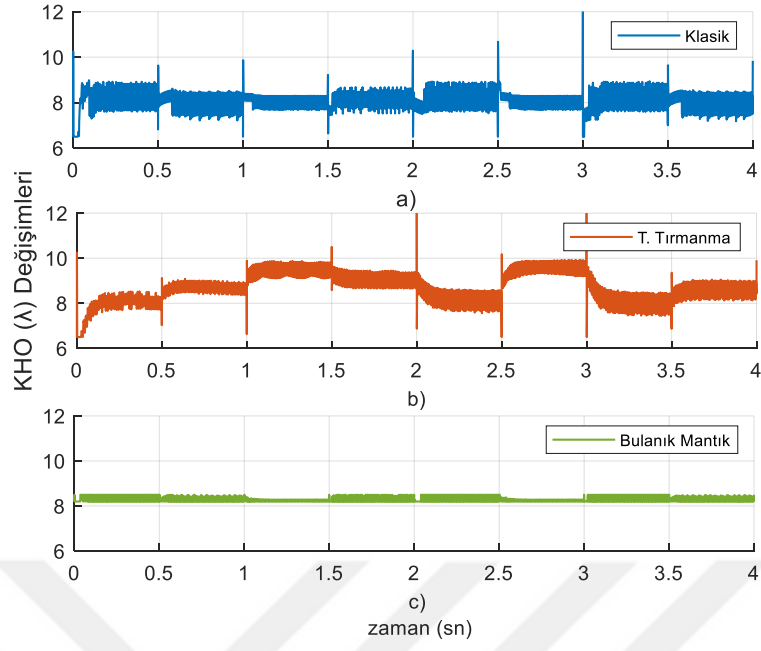
Sabit doluluk oranı için değişimler incelendiğinde değişen rüzgâr şartlarına göre belirli rüzgâr hızları dışında güç değişimlerinde de güç katsayısı, çalışma hızlarındaki gibi dalgalanmalar ve düşüşler görülmektedir. Sabit kıyıcı doluluk değerlerine göre ortalama güç değerleri Tablo 5.5’te görülmektedir.

Tablo 5.5. Karesel rüzgârda sabit doluluk oranı değerlerine göre ortalama güç değerleri

Kıyıcı Doluluk Oranları	Ortalama Güç Değeri (W)
d=0,2	2800
d=0,5	4283
d=0,8	6057

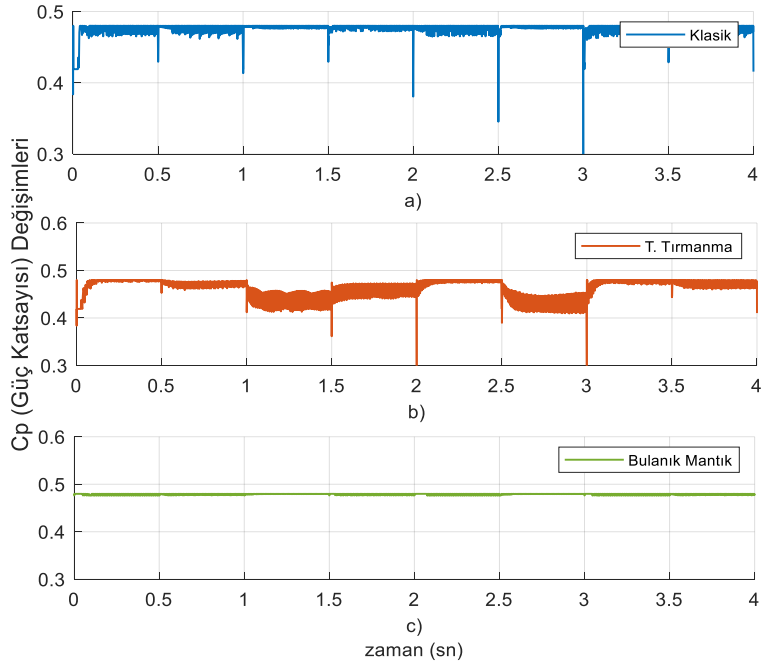
Ortalama güç değerlerine bakıldığında anlık değişen rüzgâr profiline göre sabit doluluk oranlarının artışıyla üretilen güçlerde de artışlar gözlemlenmiştir. Ancak bu değişimler anlık rüzgâra göre elde edilebilecek maksimum güç seviyesinin altında değerlerdir. Bu çalışmada ele alınan MGNİ yöntemleriyle anlık verimliliğin en üst seviyede tutulabilmesi hedeflenmiştir.

MGNİ kontrolü için temel kriterlerden biri olan güç katsayısının değişen rüzgâr hızlarına göre en yüksek seviyede tutulabilmesi, bağlı olduğu parametrelerden KHO’nun güç katsayısını maksimum değerde tutacak şekilde ayarlanmasıyla gerçekleştirilir. Bu çalışmada kullanılan kontrol yöntemlerine göre KHO değişimleri Şekil 5.19’da görülmektedir.



Şekil 5.19. Karesel rüzgârda farklı kontrol yöntemlerine göre KHO değişimleri a) Klasik b) Tepe Tırmanma c) Bulanık Mantık

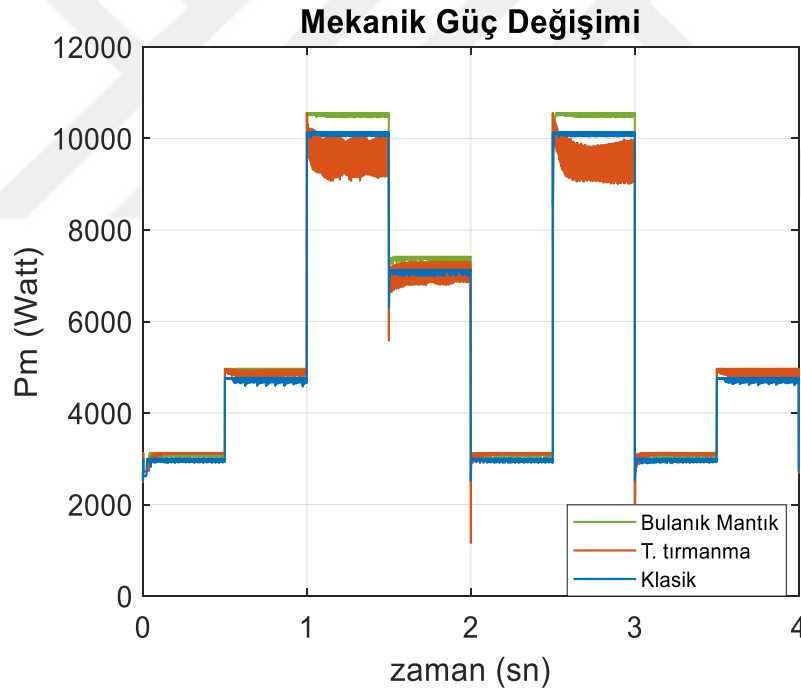
Kullanılan kontrol yöntemlerine göre güç katsayısı (C_p) değişimleri ise Şekil 5.20’de görülmektedir.



Şekil 5.20. Karesel rüzgârda farklı kontrol yöntemlerine göre güç katsayısı değişimleri a) Klasik b) Tepe Tırmanma c) Bulanık Mantık

Kontrol yöntemlerine göre Şekil 5.19 ve 5.20'deki grafiklerdeki değişimler incelendiğinde bulanık mantık tabanlı yapıyla daha kararlı ve düzgün şekilde KHO ve güç katsayısı değişimi elde edildiği saptanmıştır. Bulanık mantıklı yapı dışında diğer iki yöntemde görülen osilasyonlar açısından klasik yapıli kontrol tepe tırmanma metoduna göre daha iyi performans göstermiştir. Klasik yapıda rüzgârdaki değişimler karşısında görülen dalgalanmalar daha az görülürken tepe tırmanmada bu değişimlerin hem daha büyük hem de daha uzun sürdüğü gözlemlenmiştir. Rüzgârda görülen ani değişimler karşısında KHO ve güç katsayısındaki bu değişiklikler tepe tırmanma metodunun daha düşük performansına neden olmuştur. Ancak bu tekniğin klasik yapıdaki gibi ek mekanik donanım ve yüksek doğrulukla ölçülen büyüklük gerektirmemesi gibi avantajı vardır. Bulanık mantıklı yapı grafikteki değişimlere göre hem osilasyon hem de performans açısından diğer yöntemlere göre üstünlük sağlamıştır.

Esas alınan rüzgâr profiline göre REDS'li sistemde kullanılan kontrol yöntemleriyle türbin çıkış gücü değişimleri Şekil 5.21'de görülmektedir.



Şekil 5.21. Karesel rüzgârda farklı kontrol yöntemlerine göre türbin çıkış gücü değişimleri

Şekil 5.21'e göre Bulanık mantıklı yapının çıkış gücünde görülen osilasyonlar açısından diğer iki yonteme göre daha kararlı bir şekilde çalışmasını sürdürdüğü görülmüştür. Özellikle daha yüksek rüzgâr hızlarına göre kullanılan Bulanık Mantıklı MGNİ yöntemi daha yüksek güç üretimini sağlamıştır. Rüzgâr hızındaki ani değişimlerden dolayı özellikle tepe tırmanma

yönteminde daha fazla osilasyonlar görülürken kullanılan bulanık mantık MGNİ yöntemi diğer iki tekniğe göre daha kararlı performans sergilemiştir.

Üretilen güç bakımından kullanılan farklı kontrol yöntemlerine göre elde edilen yaklaşık ortalama güç değerleri Tablo 5.6’da görülmektedir.

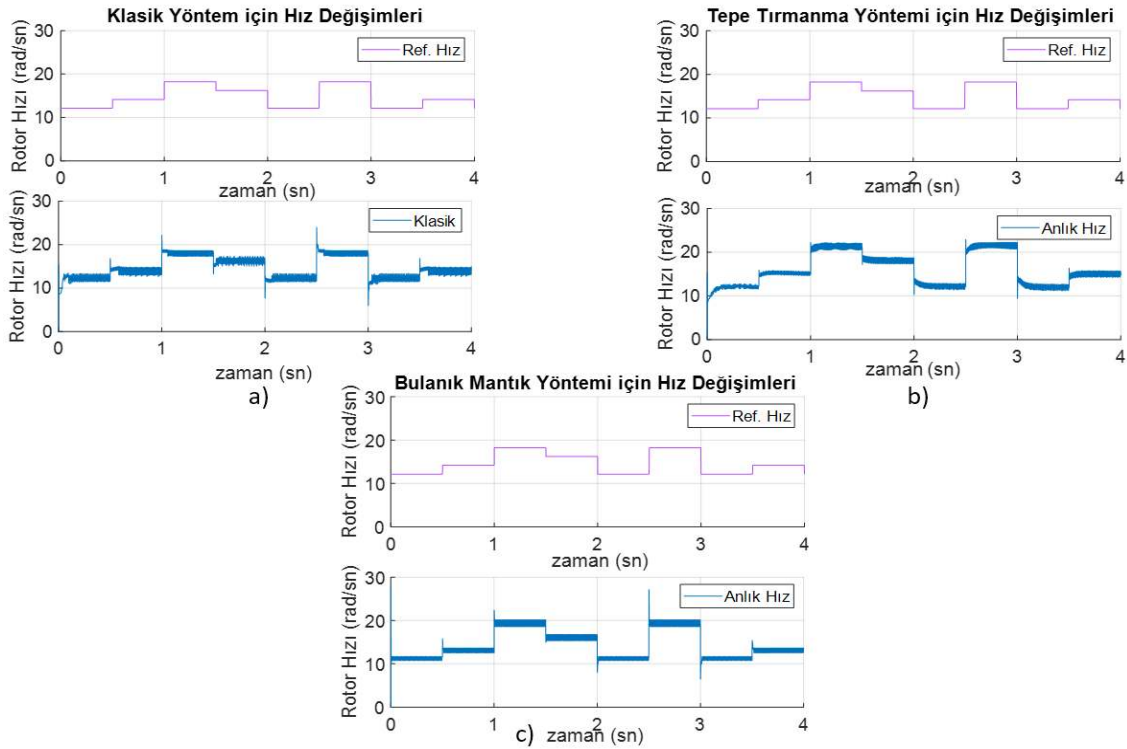
Tablo 5.6. Karesel rüzgârda kontrol yöntemlerine göre ortalama güç değerleri

Kontrol yöntemi	Ortalama Güç Değeri (W)
Klasik Yöntem	6386
Tepe Tırmanma	6122
Bulanık Mantık	6765

Sabit doluluk oranlarına göre verilen Tablo 5.5 ile Tablo 5.6’daki değerler karşılaştırıldığında üretim verimliliğinin her üç MGNİ yöntemi açısından da arttığı belirlenmiştir.

Bu bilgiler ışığında bulanık mantık yapıları kontrolün diğer yöntemlere göre gösterdiği üstünlük güç üretim miktarı açısından da izlenmiştir.

MGNİ kontrolünde temel hedef anlık rotor hızının rüzgâra göre ayarlanması olduğundan kullanılan kontrol yöntemleriyle rotor hızlarının değişimi Şekil 5.22’de görülmektedir.

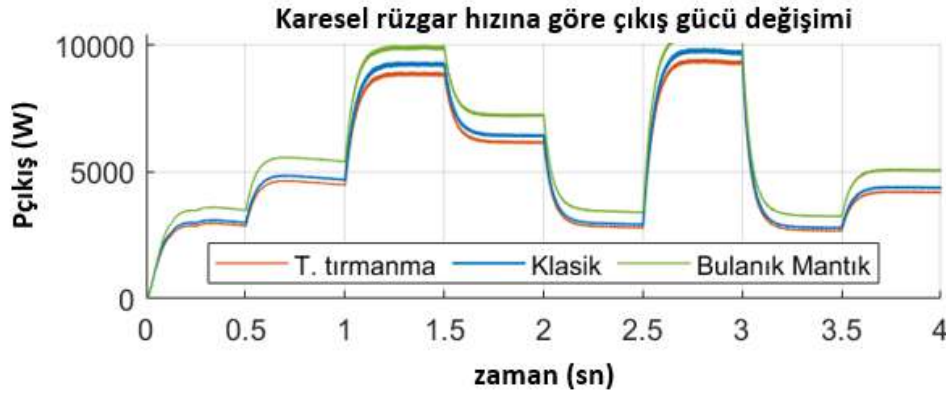


Şekil 5.22. Karesel rüzgârda farklı kontrol yöntemlerine göre rotor hızı değişimleri a) Klasik b) Tepe Tırmanma c) Bulanık Mantık

Şekil 5.22'ye göre rotor hızında kullanılan kontrol yöntemlerine göre rüzgâr hızının artışı ya da azalışıyla bu büyüklüklerin de benzer değişimler göstermesi kullanılan yöntemlerin anlık rüzgâr hızındaki değişimlere göre uyumluluğunu gösterir. Burada dikkat edilmesi gereken oluşan değişimlerin anlık maksimum gücü sağlayacak şekilde kullanılan kontrol yöntemiyle ne ölçüde sağlanabildiğidir. Grafiklerde kullanılan referans hız, optimal KHO değeri ve anlık rüzgâr hızına göre hesaplanmıştır. Yöntemlere göre değişimler incelendiğinde osilasyonlar ve kararlı çalışma açısından bulanık mantıklı yapının daha kararlı hız değişimi gösterdiği görülmektedir. Klasik yöntemle göre maksimum gücü sağlayan hız, referans hızı başlangıçta meydana gelen dalgalanmalarla takip ederken her hız değerinde osilasyonlar görülmektedir. Tepe tırmanma yönteminde özellikle yüksek hız değerlerinde referans hız değeriyle anlık hız değeri arasında fark artmakta klasik yöntemle benzer osilasyonların daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Genel olarak karesel ve ani değişimli rüzgâr profiline göre bulanık mantık yöntemi hem kararlı çalışma hem de performans bakımından diğer iki yöntemle göre daha avantajlı olduğu gözlemlenmiştir.

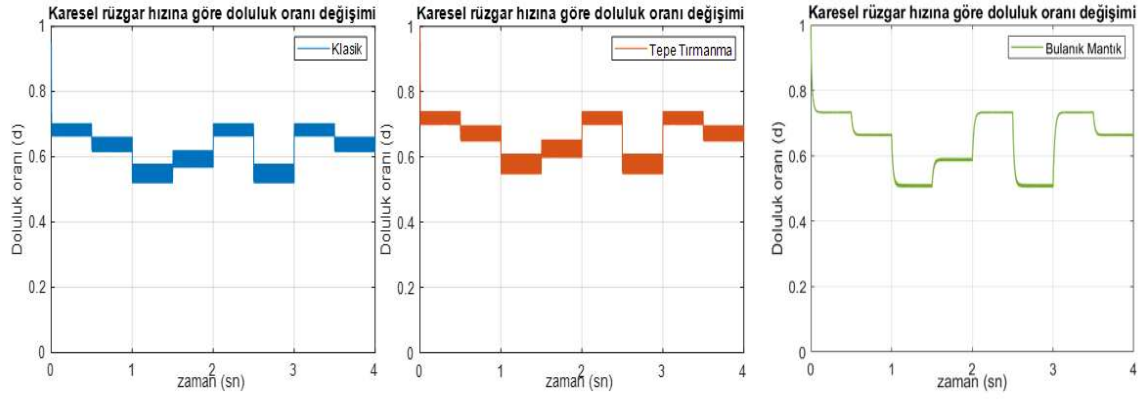
REDS'de kıyıcı çıkışında kullanılan kontrol yöntemlerine göre çıkış gücü değişimi ise Şekil 5.23'te görülmektedir.



Şekil 5.23. Karesel rüzgârda farklı kontrol yöntemlerine göre kıyıcı çıkış gücü değişimleri

Karesel rüzgâr hızıyla uyumlu Şekil 5.23'teki değişimler, mekanik güç değişimlerinde olduğu gibi sistemdeki çıkış gücü için de söz konusudur. Kullanılan kontrol yöntemleri için değişimlere bakıldığında çıkış gücü bulanık mantık yönteminin diğer iki yöntemle göre daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Düşük ve yüksek rüzgâr hızlarında daha fazla güç üretiminin bu yöntemle sağlandığı belirlenmiştir.

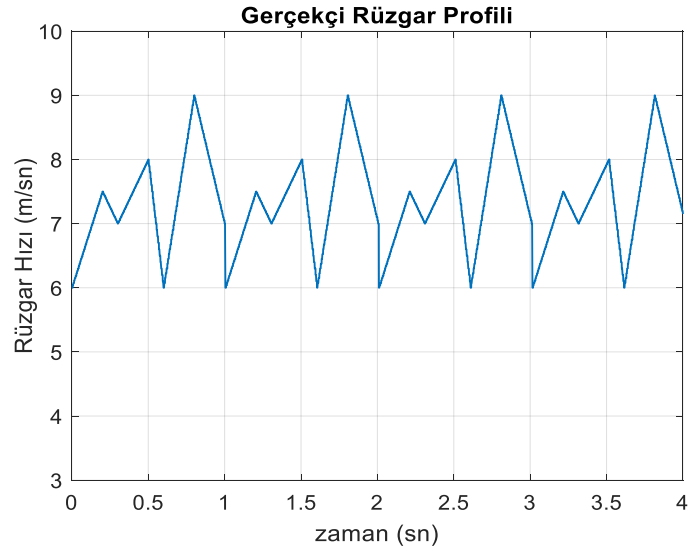
Karesel değişen rüzgârda kullanılan MGNİ yöntemleri için doluluk oranı değişimleri, Şekil 5.24'te görülmektedir.



Şekil 5.24 Karesel rüzgârda farklı kontrol yöntemlerine göre doluluk oranı değişimi

Şekil 5.24'teki değişim incelendiğinde doğrultucudan gelen değişken yapıdaki gerilimi belirli seviyeye ayarlayacak şekilde doluluk oranları değişmektedir. Özellikle bulanık mantıklı yapıdaki doluluk oranındaki değişim, diğer iki yönteme göre daha az salınımlı ve daha kararlı değişim göstererek anlık MGNİ kontrolü performansı daha iyi performans göstermiştir.

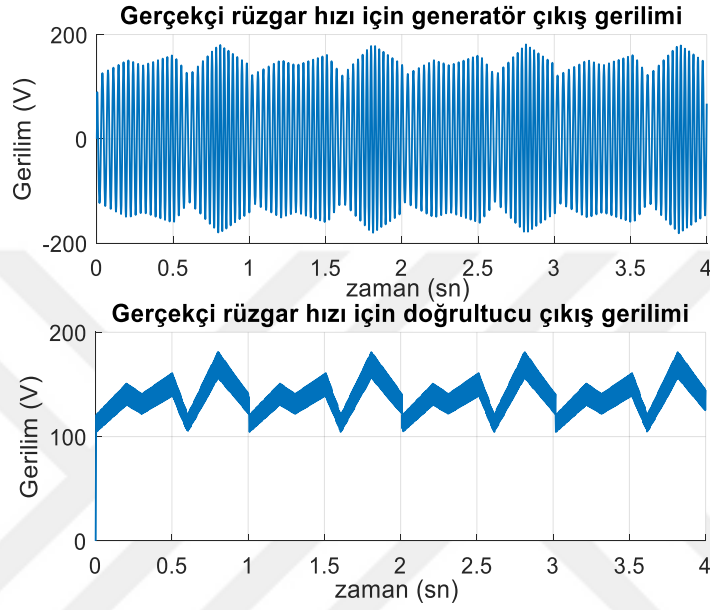
Kontrol yöntemlerinin performansının ölçülmesinde esas alınan diğer bir rüzgâr profili ise sık değişkenlik gösteren yapıda olan gerçekçi rüzgâr profilidir. 6-9 m/sn hızlar arasında değişkenlik gösteren bu rüzgâr profili Şekil 5.25'te görülmektedir.



Şekil 5.25. Gerçekçi rüzgâr profili

Gerçekçi rüzgâr profiline göre analizler, REDS’lerde kurulum aşamasına geçilmeden önce kullanılan yöntemlerin pratik anlamda gerçek rüzgâr değişimine benzer değişimler karşısında performanslarını değerlendirebilme adına önemlidir.

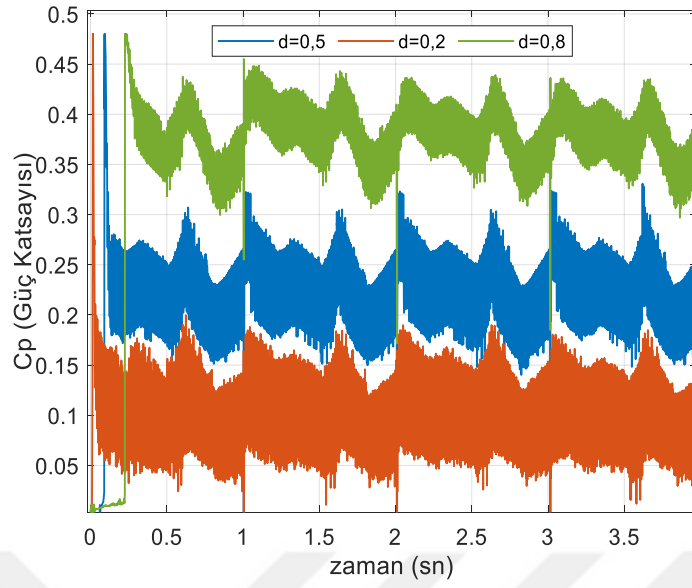
Bu rüzgâr profiline göre kıyıcılı arayüz içeren REDS’de generatör ve doğrultucu çıkışındaki gerilim değişimleri Şekil 5.26’da görülmektedir.



Şekil 5.26. Gerçekçi rüzgârda generatör ve doğrultucu çıkış gerilimleri

Gerçekçi rüzgâr profiline göre Şekil 5.26’daki gerilim değişimleri incelendiğinde rüzgâr hızı değişimleriyle uyumlu değişimler gözlemlenmiştir. Bu değişimler göz önünde bulundurularak sistem çıkışında rüzgârdaki değişimlere göre en yüksek kararlılık ve verimlilikte güç aktarımı temel hedeftir.

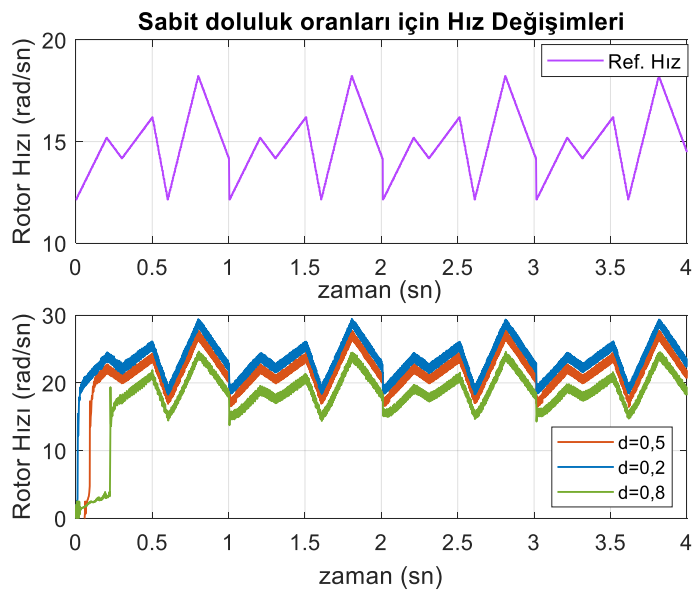
Kontrol yöntemleri uygulanmadan kıyıcı girişine uygulanan sabit doluluk oranları için REDS’deki güç katsayısı değişimleri Şekil 5.27’de görülmektedir.



Şekil 5.27. Gerçekçi rüzgârda sabit kıyııcı doluluk oranları için güç katsayısı değişimleri

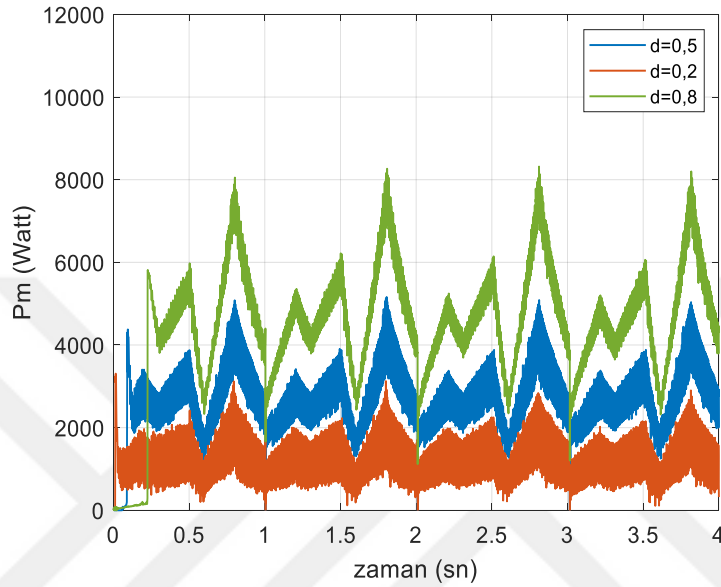
Doluluk oranının kontrol edilmediği durumlarda rüzgâr hızındaki değişimlerle Şekil 5.27’deki güç katsayısında görülen değişimler ve bozulmalar sistem verimliliği adına dezavantajdır. Sistem için anma değerinden uzak değişimler üretim verimliliğinin düşmesine neden olur.

MGNİ kontrol yöntemlerinin uygulanmadığı sabit doluluk oranlarına göre rotor hızının referans hıza göre değişimleri Şekil 5.28’de görülmektedir.



Şekil 5.28. Gerçekçi rüzgârda sabit doluluk oranları için hız değişimleri

Referans hıza göre Şekil 5.28'deki anlık hız değişimleri incelendiğinde anlık hız değerlerinde düşüşler ve bozulmalar görülmüştür. Artan doluluk oranıyla bunların daha da arttığı gözlemlenmiştir. Gerçekçi rüzgâr profilinde sabit doluluk oranları için türbin çıkış gücü değişimleri Şekil 5.29'da görülmektedir.



Şekil 5.29. Gerçekçi rüzgârda sabit doluluk oranları için türbin çıkış gücü değişimleri

Şekil 5.29'daki türbin çıkış gücü için değişimler incelendiğinde her doluluk oranı için bozulmalar ve düşüşler görüldüğü doluluk oranı arttırıldığında artan güç seviyesine rağmen istenen güç seviyesine karesel rüzgârdaki gibi çıkılamamaktadır. Güç katsayısı, anlık rotor hızlarındaki gibi çıkış gücünde de oluşan bu düşüşler üretim verimliliğinin olumsuz yönde etkilendiğini gösterir. Sabit doluluk oranlarına göre türbin çıkış gücü için elde edilen ortalama değerler Tablo 5.7'de verilmiştir.

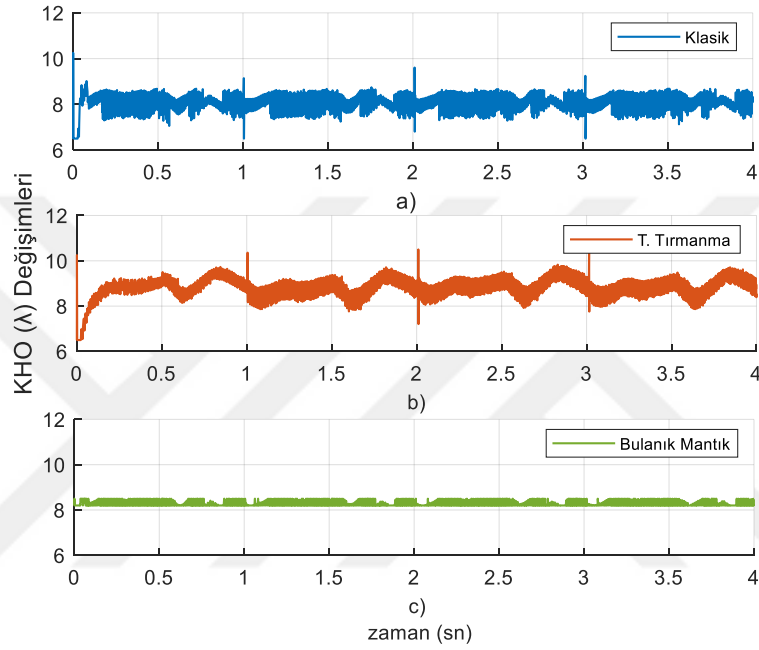
Tablo 5.7. Gerçekçi rüzgârda sabit doluluk oranı değerlerine göre ortalama güç değerleri

Kıyıcı Doluluk Oranları	Ortalama Güç Değeri (W)
d=0,2	1329
d=0,5	2765
d=0,8	4724

Tablodaki ortalama güç değerlerinde artan doluluk oranı ve bozulmalarla üretilen güçte de artışlar yaşanmıştır. Karesel rüzgâra göre gerçekçi rüzgâr profilinde görülen daha sık değişimler üretilen güç değerlerinin daha da düşmesine neden olmuştur. Bu rüzgâr profiline göre REDS'li

sistemde kullanılan MGNİ yöntemleriyle doluluk oranını anlık rüzgâr hızına göre ayarlanmasıyla güç katsayısı, türbin çıkış gücünün en üst seviyede tutulması ve sistemden daha yüksek seviyede güç üretilmesi hedeflenmiştir.

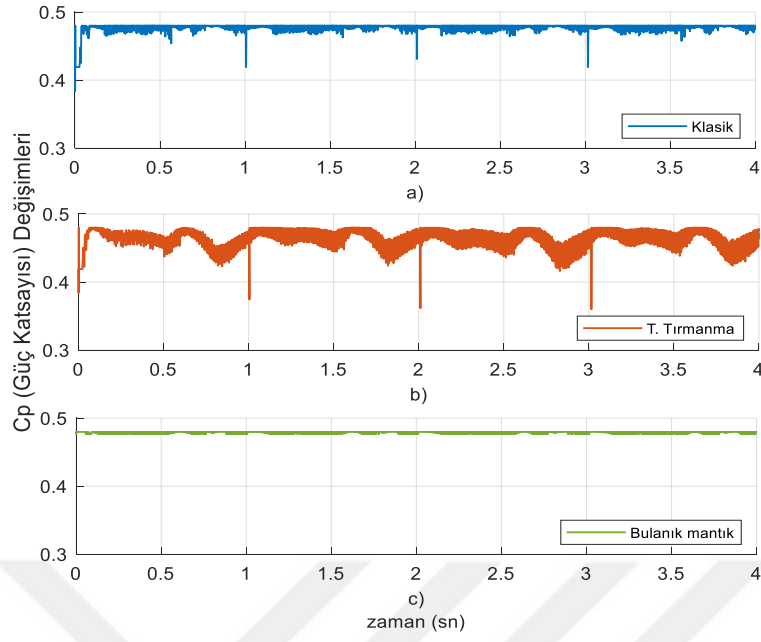
Gerçekçi rüzgâr profilinde de MGNİ performansında KHO değerinin optimal değerine yakın bir değerde tutulabilmesi güç katsayısı dolayısıyla verimliliğin de en üst seviyede tutulmasını sağlar. Kullanılan kontrol yöntemlerine göre KHO değişimleri Şekil 5.30'da görülmektedir.



Şekil 5.30. Gerçekçi rüzgârda farklı kontrol yöntemlerine göre KHO değişimleri a) Klasik b) Tepe Tırmanma c) Bulanık Mantık

Şekil 5.30'a bakıldığında rüzgâr profilindeki değişimlerle paralel ele alınan üç kontrol yönteminde de KHO'da değişimler meydana gelmiştir. Tepe tırmanma yönteminde belirli aralıklarla artışlar meydana gelmiştir. REDS için optimal KHO değerinin 8,1 dolaylarında olduğu düşünüldüğünde bu verimlilik adına dezavantajdır. Sistemde MGNİ için kullanılan bulanık mantık yöntemi özellikle klasik yöntemle göre dağılmadan KHO için 8,1 dolaylarında daha az dalgalanmalı bir değer elde edilmiştir. Bu özellik bulanık mantıklı yapının daha kararlı çalışma gerçekleştirdiğini göstermiştir.

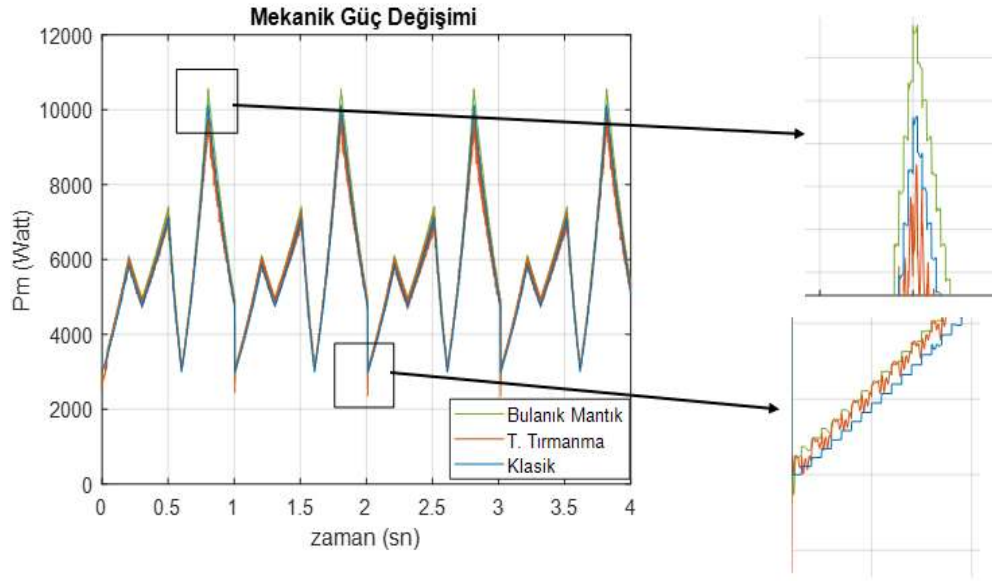
Kullanılan yöntemlere göre güç katsayısı (C_p) değişimleri Şekil 5.31'de görülmektedir.



Şekil 5.31. Gerçekçi rüzgârda farklı kontrol yöntemlerine göre güç katsayısı değişimleri a) Klasik b) Tepe Tırmanma c) Bulanık Mantık

Şekil 5.31’deki güç katsayıları değişimleri incelendiğinde bulanık mantıklı yapı için diğer yöntemlere göre daha kararlı bir değişim gösterdiği saptanmıştır. Güç katsayısında görülen değişim, bu yapı için hem daha az hem de anma değerine yakındır. Tepe Tırmanma yönteminde klasik yapıya göre güç katsayısının daha fazla değişim gösterdiği görülmektedir. Fakat bu yöntemin klasik yapıya göre önceden de belirtildiği gibi mekanik büyüklükler için yüksek doğrulukta çalışan ek donanım gerektirmemesi gibi bir avantajı vardır.

Güç katsayısının değişimlerine göre kullanılan kontrol yöntemleri için türbin çıkış gücü değişimleri Şekil 5.32’de görülmektedir.



Şekil 5.32. Gerçekçi rüzgârda farklı kontrol yöntemlerine göre türbin çıkış gücü değişimleri

Şekil 5.32'deki çıkış gücü değişimlerinde kullanılan kontrol yöntemlerinin tümünde rüzgâr profiliyle uyumlu değişimler gözlemlenmiştir. Kullanılan yöntemlerden tepe tırmanma yöntemi diğer iki yönteme göre daha fazla dalgalanmalar gösterirken bulanık mantık yönteminin klasik yapıya göre en önemli üstünlüğü yüksek hızlarda daha yüksek güç seviyelerinde çalışabilmesidir. Böylece bulanık mantıkla daha kararlı daha yüksek seviyede çalışma sağlanmıştır.

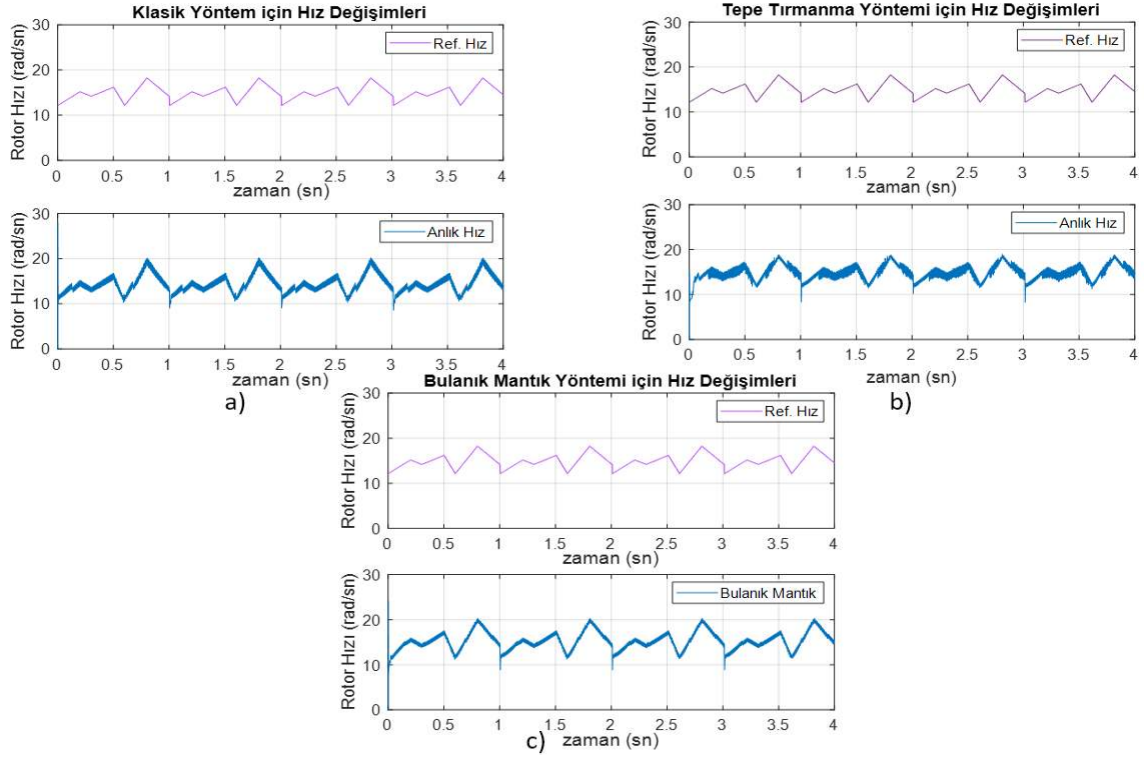
Gerçekçi rüzgâr profili için kontrol yöntemlerine göre elde edilen çıkış gücü değişimleri için hesaplanan ortalama güç değerleri Tablo 5.8'de görülmektedir.

Tablo 5.8. Gerçekçi rüzgârda kontrol yöntemlerine göre ortalama güç değerleri

Kontrol yöntemi	Ortalama Güç Değeri (W)
Klasik Yöntem	5930
Tepe Tırmanma	5742
Bulanık Mantık	6189

Tablo 5.8'e göre Bulanık mantıklı yapıyla diğer iki yönteme ortalama güç değerinin daha yüksek çıkması, bu yöntemin verimlilik adına daha iyi performans verdiğini göstermiştir. Ayrıca sabit doluluk oranlarına göre ortalama güç değerlerinin verildiği tabloyla karşılaştırıldığında üretilen güç miktarının her üç MGNİ yöntemiyle de artırıldığı görülmüştür. Bunda sabit doluluk oranı yerine değişen rüzgâr hızlarına göre doluluk oranının MGNİ kontrol yöntemleri tarafından ayarlanması etkili olmuştur. Böylece sistemden daha fazla güç üretimi sağlanmıştır.

REDS’de anlık rüzgâra göre MGNİ kontrolü, anlık rotor hızının rüzgâra göre ayarlanmasıyla sağlanmaktadır. Gerçekçi rüzgâr profiline göre kullanılan kontrol yöntemleri için rotor hızının referans hıza göre değişimleri Şekil 5.33’te görülmektedir.



Şekil 5.33. Gerçekçi rüzgârda farklı kontrol yöntemlerine göre rotor hızı değişimleri a) Klasik b) Tepe Tırmanma c) Bulanık Mantık

Şekil 5.33’teki rotor hızı değişimlerinin rüzgârda görülen değişimlerle uyumlu şekilde değişmesi MGNİ kontrolünün temel hedeflerindendir. Optimal KHO değerine göre hesaplanan referans hız değeriyle diğer kontrol yöntemlerinin sağladığı rotor hızı değişimleri karşılaştırıldığında Bulanık mantıklı yapı daha kararlı bir değişim sağladığı ani düşüş ve osilasyon açısından diğer yöntemlere göre üstünlük sağladığı belirlenmiştir. Bu da bu yapının diğer yöntemlere göre daha kararlı ve daha verimli çalışma gösterdiğini kanıtlamıştır.

REDS’de sistem çıkışında gerçekçi rüzgâr hızlarında kullanılan kontrol yöntemlerine göre çıkış gücü değişimi ise Şekil 5.34’te görülmektedir.



Şekil 5.34. Gerçekçi rüzgârda farklı kontrol yöntemlerine göre kıyıcı çıkış gücü değişimleri

Şekil 5.34'e bakıldığında mekanik güç değişimlerinde olduğu gibi sistemdeki çıkış gücü için de benzer değişimler söz konusudur. Kullanılan kontrol yöntemleri için değişimlere bakıldığında bulanık mantık yönteminin diğer iki yönteme göre daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Diğer iki yöntem için değişimler birbirleriyle daha uyumluyken belirli hızlarda bulanık mantık yöntemi için güçte belirgin artışlar görülmüştür.

Bu rüzgâr profilinde kullanılan MGNİ kontrol yöntemlerine göre doluluk oranı değişimi Şekil 5.35'te görülmektedir.



Şekil 5.35 Gerçekçi rüzgârda farklı kontrol yöntemlerine göre doluluk oranı değişimleri

Karesel değişen rüzgârda olduğu gibi çıkışta gerilimi belirli bir seviyeye yükseltmek için Şekil 5.35'teki doluluk oranı değişimleri rüzgârdaki ve doğrultucu çıkışındaki gerilim artış ya da azalışına göre kontrol gerçekleştirilmektedir.

Değişken rüzgâr profiline göre klasik yöntem ve tepe tırmanma yöntemindeki değişimler benzer görünse de tepe tırmanmadaki değişim klasik yöntemdeki değişime göre daha düşük değerlerde değişmektedir. Kullanılan bulanık mantık yöntemi için doluluk oranı değişimi ise

karesel rüzgâr profilinde olduğu gibi bu rüzgâr profilinde de daha az salınımlı ve daha kararlı değişim göstermiştir.

Referans alınan her iki rüzgâr profili için sabit doluluk oranı yerine rüzgârdaki değişimlere göre ayarlanabilen doluluk oranı kontrolü, REDS'nin üretim miktarı ve verimliliğinin artmasını sağlayarak anlık rüzgâr hızlarına göre MGNİ kontrolünü sağlamıştır.



6. SONUÇLAR

Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminin önemi giderek artmaktadır. Bu kaynaklarla kullanılan dönüşüm sistemlerinin en uygun verimlilik ve maliyetle kullanılabilmesi adına yenilikçi yaklaşımlar, tasarımlar ve farklı kontrol hedeflerine yönelik kontrol yöntemleriyle ilgili birçok çalışma yapılmaktadır.

Bu enerji kaynaklarından rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminde kullanılan sistemlerde kontrol yöntemleriyle sistem verimliliğinin anlık rüzgâra göre en üst seviyede tutulması sağlanarak kurulum ve üretim maliyetlerinin düşürülmesi daha yüksek verimlilikle enerji üretimi hedeflenmektedir.

Bu tezde, rüzgâr enerjisinin dünyada ve Türkiye'deki yeri, REDS için sistem bileşenleri ve farklı kontrol amaçlarına yönelik kontrol yöntemleri açıklanmış. Farklı rüzgâr koşullarına göre sistemin verimliliğini ayarlayan MGNİ yöntemlerinden klasik, tepe tırmanma ve akıllı yapı olarak tanımlanan bulanık mantıklı kontrollerin MATLAB/Simulink ortamında karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Yapılan analizlerde şu sonuçlara varılmıştır.

- 1) Akıllı yapı olarak alınan bulanık mantık yapısı diğer iki yönteme göre hem daha kararlı hem de daha verimli çalışma sağladığı saptanmıştır. Farklı rüzgâr koşullarına göre diğer yöntemlere göre sağladığı üstünlükler bu yapının REDS için uygunluğunu göstermiştir.
- 2) Kullanılan yöntemlerin herhangi bir kontrolün uygulanmadığı durumlara göre sistemdeki güç üretimi miktarını arttırdığı belirlenmiş, bu sonuç anlık rüzgâra göre bu çalışmada REDS'de kullanılan kıyıcı arayüzünde doluluk oranının kontrolünün gerekliliğini göstermiştir.
- 3) Tepe tırmanma kontrolünde özellikle ani değişimli karesel rüzgârdaki değişimler karşısında düşüş ve osilasyonlar daha belirgin iken gerçekçi rüzgâr için bu yöntemin performansında iyileşmeler gözlemlenmiştir.
- 4) Klasik yöntem için özellikle ani değişimlerde analiz edilen büyüklüklerde ilk anda düşüşler gözlemlenirken bu düşüşlerin tepe tırmanma yöntemine göre daha kısa sürdüğü gözlemlenmiştir.

ÖNERİLER

- 1) Bu çalışmada kullanılan yöntemler dışında yapay sinir ağları, ANFIS ve farklı optimizasyon teknikleri gibi akıllı yapılar, başta MGNİ olmak üzere rüzgâr enerjisi sistemlerinde kanat açısı, yük (şebeke) tarafı kontrolleri için benzer modelleme mantığıyla farklı çalışmalar için kullanılabilir. Farklı kriterler üzerinden analizleri gerçekleştirilebilir.
- 2) REDS'lerde MGNİ çalışmalarında birden fazla kontrol tekniğinin bir arada kullanıldığı hibrid yapıların MGNİ kontrolü için kullanımlarının bilgisayar ortamındaki modellemeleriyle performansları analiz edilebilir.
- 3) REDS çıkışında beslenen yük ya da şebeke için yapılacak kontrol modellemeleriyle üretilen enerjinin istenen kararlılıkta yüke ya da şebekeye aktarımı sağlanabilir.
- 4) Şebekeden bağımsız kullanılan REDS'lerin farklı enerji dönüşüm sistemleri (fotovoltaik, yakıt hücresi vb.) ile birlikte kullanıldığı, farklı enerji depolama elemanları içeren sistemlerde başta üretim verimliliği ve sürekliliği amaçlarına yönelik kontrol yöntemlerinin bilgisayar ortamında modellemeleriyle performans analizleri gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Bektaş, Ö. (2019). *Rüzgar Türbinlerinde Maksimum Güç İzleme Yöntemleri ve Matlab/Simulink Uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [2] Cheng, M., & Zhu, Y. (2014). The State of The Art of Wind Energy Conversion Systems and Technologies: A review. *Energy Conversion and Management*, 88, 332-347.
- [3] Uyar, M., Gençoğlu, M.T., Yıldırım, S., (2005). Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri için Generatör Sistemleri, *YEKSEM 2005 III. Enerji Kaynakları Sempozyumu*, Mersin, 173-178
- [4] Akıncı, F. (2019). *Rüzgar enerjisinde kullanılan jeneratör çeşitleri*, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [5] Marques, J., Pinheiro, H., Gründling, H. A., Pinheiro, J. R., & Hey, H. L. (2003). A survey on variable-speed wind turbine system. *network*, 24, 26.
- [6] Rolan, A., Luna, A., Vazquez, G., Aguilar, D., & Azevedo, G. (2009). Modeling of a variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator. In *2009 IEEE international symposium on industrial electronics*, pp. 734-739.
- [7] Yin, M., Li, G., Zhou, M., & Zhao, C. (2007). Modeling of the wind turbine with a permanent magnet synchronous generator for integration. In *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting* pp. 1-6.
- [8] Karakaya, A., Karakaş, E. (2014). Implementation of neural network-based maximum power tracking control for wind turbine generators. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 22(6), pp. 1410-1422
- [9] Malik M.Z., Baloch M. H., Gul M., et al. (2020), A research on conventional and modern algorithms for maximum power extraction from wind energy conversion system: a review, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, Nov. 2020.
- [10] Varshnry, A., Singh, S., & Gupta, D. (2016). Simulation of Standalone Wind Energy Conversion System using PMSG, (5), 140–145.
- [11] Ulutaş, A. (2019). *Değişken Hızlı Doğrudan Tahrikli Mıknatıs Uyarmalı Senkron Generatörlü Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sisteminin Modellenmesi ve Benzetimi*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [12] Çiftçi, A. (2017). *Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörün Vektör Kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [13] Sampaio, A. C. (2018). *Modeling an Inverter Controlling a Wind Turbine*, Doctoral dissertation, University of Massachusetts, Lowell.
- [14] Mansour, M., Mansouri, M. N., Mmimouni, M. F. (2011). Study and control of a variable-speed wind-energy system connected to the grid. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 1(2), pp. 96-104
- [15] Shadab, M. M., Tariq, A., & Mallick, M. (2013). Simulation and Control of 20 KW Grid Connected Wind System. *International Journal of Electrical and Electronics Engineering Research (IJEER)*, cilt 3(3), ss. 275-284
- [16] Kumar, P., Kumar, R., Verma, A., & Kala, M. C. (2016). Simulation and Control of WECS with Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG). In *2016 8th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)*, (pp. 516-521).

- [17] Bisoyi, S. K., Jarial, R. K., Gupta, R. A., Bisoyi, S. K., Jarial, R. K., & Gupta, R. A. (2014). Modeling and Analysis of Variable Speed wind Turbine equipped with PMSG. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2, pp. 421-426.
- [18] López-Ortiz, E. N., Campos-Gaona, D., Moreno-Goytia, E. L. (2012). Modelling of a wind turbine with permanent magnet synchronous generator. In *2012 North American Power Symposium (NAPS)*, pp. 1-6
- [19] Jansuya, P., & Kumsuwan, Y. (2013). Design of MATLAB/Simulink modeling of fixed-pitch angle wind turbine simulator. *Energy Procedia*, 34, pp. 362-370
- [20] Othmane, Z. (2017). Dynamic modeling and control of a wind turbine with MPPT control connected to the grid by using PMSG. In *2017 International conference on advanced technologies for signal and image processing (ATSIP)*, pp. 1-6.
- [21] Priya, G. J. (2014). Modelling and performance analysis of grid connected PMSG based wind turbine. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, cilt 3(2), pp.155-165
- [22] Gajewski, P., Pieńkowski, K. (2016). Advanced Control of Direct-Driven Pmsg Generator in Wind Turbine System. *Archives of Electrical Engineering*, cilt 65(4), pp. 643-656
- [23] Bhende, C. N., Mishra, S., & Malla, S. G. (2011). Permanent magnet synchronous generator-based standalone wind energy supply system. *IEEE transactions on sustainable energy*, cilt 2(4), pp.361-373
- [24] Ali, R. B., Schulte, H., Mami, A. (2017). Modeling and simulation of a small wind turbine system based on PMSG generator. In *2017 Evolving and Adaptive Intelligent Systems (EAIS)*, (pp. 1-6)
- [25] Singh, N. K., Kumar, D. (2019). Modelling of a PMSG Wind Turbine with Voltage Control.
- [26] Rezaei, N., Mehran, K., & Cossar, C. (2019). A model-based implementation of an MPPT technique and a control system for a variable speed wind turbine PMSG. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, cilt31(1), pp 3-15.
- [27] Vadi, S., Gürbüz, F. B., Bayindir, R., & Hossain, E. (2020). Design and Simulation of a Grid Connected Wind Turbine with Permanent Magnet Synchronous Generator. In *2020 8th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid)*, pp. 169-175
- [28] Atmaca, Ö. (2018). *Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinlerinin Tasarımı Ve Denetimi*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [29] Linus, R. M., & Damodharan, P. (2015). Maximum power point tracking of PMSG based grid connected WECS using quadrature axis current. In *2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, pp. 671-676
- [30] Heshmatian, S., Arab Khaburi, D., Khosravi, M., & Kazemi, A. (2018). Development and analysis of a novel multi-mode MPPT technique with fast and efficient performance for PMSG-based wind energy conversion systems. *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, cilt14(1), pp.37-48.
- [31] Marmouh, S., Boutoubat, M., & Mokrani, L. (2016). MPPT fuzzy logic controller of a wind energy conversion system based on a PMSG. In *2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*, pp. 296-302
- [32] Guo, H. C., Qiu, T. Y., & Jiang, J. C. (2012). Design of fuzzy controller for direct drive wind turbines. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, cilt17(2), pp. 209-214

- [33] Parmar, J. K., & Patel, S. K. D. G. R. (2018). Fuzzy Based MPPT Controller of Wind Energy Conversion System using PMSG. *International Journal of Electrical and Electronics Engineering (IJEET)*, cilt7(3), pp 17-30.
- [34] Javadi, S., & Hazin, M. H. (2014). An improved MPPT method of wind turbine based on HCS method by using fuzzy logic system. *International Journal of Smart Electrical Engineering*, cilt 3(01), pp. 29-35
- [35] Eltamaly, A. M., & Farh, H. M. (2013). Maximum power extraction from wind energy system based on fuzzy logic control. *Electric Power Systems Research*, 97, pp. 144-150
- [36] El Mourabit, Y., Derouich, A., Allouhi, A., El Ghzizal, A., El Ouanjli, N., & Zamzoumyes, O. (2020). Sustainable production of wind energy in the main Morocco's sites using permanent magnet synchronous generators. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, cilt 30(6).
- [37] Amine, H. M., Abdelaziz H, N. E. (2014). Wind turbine maximum power point tracking using FLC tuned with GA. *Energy Procedia*, 62, pp.364-373
- [38] Wei, C., Zhang, Z., Qiao, W., & Qu, L. (2016). An adaptive network-based reinforcement learning method for MPPT control of PMSG wind energy conversion systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, cilt 31(11), pp. 7837-7848
- [39] Zhao, Y., Wei, C., Zhang, Z., & Qiao, W. (2013). A review on position/speed sensorless control for permanent-magnet synchronous machine-based wind energy conversion systems. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, cilt 1(4), pp. 203-216.
- [40] Chaoui, H., Miah, S., Oukaour, A., & Gualous, H. (2014, October). Maximum power point tracking of wind turbines with neural networks and genetic algorithms. In *IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 197-201
- [41] Ali Y. A., M. Ouassaid, "Sensorless MPPT Controller using Particle Swarm and Grey Wolf Optimization for Wind Turbines," in *Proceedings of 2019 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2019*, 2019, vol. 2, no. 3.
- [42] Koutroulis, E., Kalaitzakis, K. (2006). Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications, *IEEE transactions on industrial electronics*, cilt 53(2), pp. 486-494
- [43] Sahu, D. (2013). Maximum power extraction for direct driven variable speed wind turbine system using PMSG and fixed pitch angle. In *2013 International Conference on Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM)*, pp. 1-7
- [44] Putri, R. I., Pujiantara, M., Priyadi, A., Ise, T., & Purnomo, M. H. (2017). Maximum power extraction improvement using sensorless controller based on adaptive perturb and observe algorithm for PMSG wind turbine application. *IET Electric Power Applications*, cilt 12(4), pp. 455-462
- [45] Tammaruckwattana, S., Ohyama, K. (2013). Modeling and simulation of permanent magnet synchronous generator wind power generation system using boost converter circuit. In *2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, pp. 1-10.
- [46] Sharma, H. K., Samaria, A., & Gidwani, L. (2017). Designing and performance analysis of controller for PMSG based wind energy conversion system. In *2017 International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC)*, pp. 1-6. IEEE.
- [47] Abbaker, O. (2017). Control of wind turbine for variable speed based on fuzzy-PID controller. *Journal of Engineering and Computer Science (JECS)*, cilt 18(1), pp. 40-51
- [48] Kareem, P. R. Modelling and Simulation of three phase inverter feed from Wind Turbine based Matlab/Simulink

- [49] Vijayalakshmi, G., & Arutchelvi, M. (2014). Design and development of controller for PMSG based Wind Energy Conversion system. In *2014 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies [ICCPCT-2014]*, pp. 573-578
- [50] Singh, N., & Singh, B. (2016). Design and modeling of wind energy conversion system based on PMSG using MPPT technique. *International Journal of Scientific Research Engineering & Technology (IJSRET)*, 5(2)
- [51] Kumari, S., Kushwaha, V., & Gupta, T. N. (2018). A Maximum Power Point Tracking For a PMSG Based Variable Speed Wind Energy Conversion System. In *2018 International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC)*, pp. 789-794
- [52] Zammit, D., Staines, C. S., Micallef, A., & Apap, M. (2018). Optimal power control for a PMSG small wind turbine in a grid-connected DC microgrid. In *2018 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, pp. 32-37
- [53] Sahin, P., Resmi, R., & Vanitha, V. (2016). PMSG based standalone wind electric conversion system with MPPT. In *2016 International Conference on Emerging Technological Trends (ICETT)*, pp. 1-5
- [54] Rakesh, N., Nitya, A., & Ram, G. (2014). Modelling and simulation of the wind energy electric conversion system to extract the maximum power from the wind using matlab. In *2014 Annual International Conference on Emerging Research Areas: Magnetics, Machines and Drives (AICERA/iCMMD)*, pp. 1-6
- [55] Karthi, K., Radhakrishnan, R., Baskaran, J. M., & Titus, L. S. (2019). Analysis of Adaptive MPPT Control Algorithm for Direct Driven Permanent Magnet Synchronous Generator. In *2019 2nd International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC)*, pp. 140-145
- [56] Akkaya, M. C., Polat, A., & Ergene, L. T. (2019). MPPT Based Adaptive Control Algorithm for Small Scale Wind Energy Conversion Systems with PMSG. In *2019 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2019 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, pp. 517-522.
- [57] Vigneswaran, K., & Kumar, P. S. (2016). Maximum Power Point Tracking (MPPT) Method in Wind Power System. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, cilt 5(1).
- [58] Prajapati, K. R. (2019). Application of fuzzy logic for MPPT control in stand-alone wind energy conversion system with a battery storage system. In *2019 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS)*, pp. 1-6).
- [59] Shahi, A., & Bhattacharjee, C. (2018). A study & analysis of fuzzy based P&O MPPT scheme in PMSG based wind turbine. In *2018 Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP)*, pp. 1-4
- [60] Tiwari, R., & Babu, N. R. (2016). Fuzzy logic based MPPT for permanent magnet synchronous generator in wind energy conversion system. *IFAC-PapersOnLine*, cilt 49(1), ss.462-467
- [61] Trinh, Q. N., & Lee, H. H. (2010). Fuzzy logic controller for maximum power tracking in PMSG-based wind power systems. In *International Conference on Intelligent Computing*, pp. 543-553 Springer, Berlin.
- [62] Putri, A. I., Ahn, M., & Choi, J. (2012). Speed sensorless fuzzy MPPT control of grid-connected PMSG for wind power generation. In *2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, pp. 1-6

- [63] Ngo, Q. V., Yi, C., & Nguyen, T. T. (2020). The maximum power point tracking based-control system for small-scale wind turbine using fuzzy logic. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, cilt 10(4), pp. 3927-3935
- [64] Minh, H. Q., Frédéric, N., Najib, E., & Abdelaziz, H. (2011). Control of permanent magnet synchronous generator wind turbine for stand-alone system using fuzzy logic. In *Proceedings of the 7th Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology*, pp. 720-727). Atlantis Press.
- [65] Putri, R. I., Rifa'i, M., Pujiantoro, M., Priyadi, A., & Purnomo, M. H. (2017). Fuzzy MPPT Controller For Small Scale Stand Alone PMSG Wind Turbine, *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*, cilt12(1), ss.188-193.
- [66] Thanh, S. N., Xuan, H. H., The, C. N., Hung, P. P., Van, T. P., & Kennel, R. (2016,). Fuzzy logic based maximum power point tracking technique for a stand-alone wind energy system, In *2016 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET)* pp. 320-325.
- [67] Asri, A., Mihoub, Y., Hassaine, S., Logerais, P. O., & Allaoui, T. (2019). Intelligent maximum power tracking control of a PMSG wind energy conversion system. *Asian Journal of Control*, 21(4), pp.1980-1990
- [68] Tahiri, F. E., Chikh, K., & Khafallah, M. (2018). MPPT strategy using Fuzzy-PI controller applied to a standalone wind energy conversion system. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Smart City Applications*, pp. 1-7
- [69] Masalha, A. (2017). *Rüzgâr Santrallerinden Maksimum Güç Üretmek için Yeni Bir Kontrol Yaklaşımı*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [70] Kot, R., Rolak, M., & Malinowski, M. (2013). Comparison of maximum peak power tracking algorithms for a small wind turbine, *Mathematics and Computers in Simulation*, cilt 91, ss.29-40
- [71] Zerouali, M., Boutouba, M., El Ougli, A., & Tidhaf, B. (2019). Control of variable speed wind energy conversion systems by fuzzy logic and conventional P&O, In *2019 International Conference on Intelligent Systems and Advanced Computing Sciences (ISACS)*, pp. 1-5
- [72] Zebraoui, O., Bouzi, M. (2018). Comparative study of different MPPT methods for wind energy conversion system, In *International Conference on Renewable Energies and Energy Efficiency (REEE)*.
- [73] Faqirzay, S., Patel, H. D. (2015). Maximum Power Extraction from Wind Generation System Using MPPT Control Scheme through Power Electronics Converters, *International Journal of Innovative Res. in Elect., Electr., Instrumentation and Control Engineering*, cilt 3(3).
- [74] Tüysüz, M. (2018). *Hibrit Güç Sistemlerinde Maksimum Güç Noktası Takibi İçin Bulanık Denetleyicinin Optimizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [75] Abouobaida, H. (2017). New MPPT control for wind conversion system based PMSG and a comparaisn to conventionals approachs, In *2017 14th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, pp. 38-43.
- [76] Yusong, Y., Solomin, E., & Lei, W. (2020). Horizontal Axis Wind Turbine MPPT Control Research. In *2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)* , pp. 1-6
- [77] Kumar, D., & Chatterjee, K. (2016). A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, cilt 55, ss. 957-970

- [78] Ram, J. P., Rajasekar, N., & Miyatake, M. (2017). Design and overview of maximum power point tracking techniques in wind and solar photovoltaic systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, cilt 73, ss. 1138-1159
- [79] Jha, D. (2017). A comprehensive review on wind energy systems for electric power generation: current situation and improved technologies to realize future development. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, cilt 7(4), pp. 1786-1805
- [80] Govinda, C. V., Udhay, S. V., Rani, C., Wang, Y., & Busawon, K. (2018). A review on various MPPT techniques for wind energy conversion system. In *2018 International conference on computation of power, energy, Information and Communication (ICCPEIC)*, pp. 310-326
- [81] Yaylacı, E. K. (2016). Maximum Power Point Tracking Algorithms for the Wind Energy Systems. *Journal of New Results in Science*, cilt 5, ss. 71-80.
- [82] Khan, M. J., & Mathew, L. (2020). Comparative study of optimization techniques for renewable energy system. *Archives of Computational Methods in Engineering*, cilt 27(2), ss. 351-360
- [83] Lalouni, S., Rekioua, D., Idjdarene, K., & Tounzi, A. M. (2014). An improved MPPT algorithm for wind energy conversion system. *Journal of Electrical Systems*, cilt 10(4), ss. 484-494
- [84] Tiwari, R., & Babu, N. R. (2016). Recent developments of control strategies for wind energy conversion system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, cilt 66, ss. 268-285
- [85] Aissaoui, A. G., Tahour, A., Essounbouli, N., Nollet, F., Abid, M., & Chergui, M. I. (2013). A Fuzzy-PI control to extract an optimal power from wind turbine. *Energy conversion and management*, cilt 65, ss. 688-696
- [86] 2019 BP Outlook Energy edition. London, United Kingdom.
- [87] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/da/Rijn_en_Zon.jpg, 12 Ekim 2020
- [88] Patel, M. R. (2005). *Wind and solar power systems: design, analysis, and operation*. CRC press, New York
- [89] Bektaş, Ö. (2018). *Rüzgar Türbinlerinde Maksimum Güç İzlemeyöntemleri Ve Matlab/Simulink Uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [90] Singh, N. K., & Kumar, D. (2019). Modelling of a PMSG Wind Turbine with Voltage Control
- [91] <https://gwec.net/global-wind-report-2021/>, Global Wind Report 2021, Erişim: 15 Nisan 2021.
- [92] <https://www.enerjiportali.com/turkiye-elektrik-enerjisi-uretim-istatistikleri-temmuz-2020> 21 Aralık 2020
- [93] <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-ruzgar>, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 21 ağustos 2020.
- [94] Türkyılmaz O. Bayrak Y., Türkiye'nin Enerji Görünümü (2020), TMMOB Makina Mühendisleri Odası Oda Raporu, ss. 51-80,
- [95] Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu, Ocak 2021 <https://tureb.com.tr/haber/turkiye-ruzgar-enerjisi-istatistik-raporu-ocak-2021/251>, , Erişim: 22 Şubat 2021.
- [96] <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/turkiyenin-ruzgar-enerjisi-karnesi-pekii/1875410>, Erişim: 28 Ağustos 2020.
- [97] Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu Ocak 2020, <https://tureb.com.tr/haber/turkiye-ruzgar-enerjisi-istatistik-raporu-ocak-2020/200>, Erişim: 25 Kasım 2020.
- [98] Ackermann T. (2005). *Wind Power in Power Systems*, John Wiley & Sons, Ltd, United Kingdom
- [99] Nak, H. (2013). *Değişken Hızlı Değişken Açılı Rüzgâr Türbinlerinin kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

- [100] Putri, R. I., Rifa'i, M., Jasa, L., Priyadi, A., Margo, P., & Mauridhi, H. P. (2016). Modeling and control of permanent magnet synchronous generator variable speed wind turbine. In *2016 International Conference on Smart Green Technology in Electrical and Information Systems (ICSGTEIS)*, pp. 16-20.
- [101] Patil, K., & Mehta, B. (2014). Modeling and simulation of variable speed wind turbine with direct drive permanent magnet synchronous generator. In *2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE)*, pp. 1-6
- [102] Mayosky M. A., Cancelo G. I. (1999). Direct adaptive control of wind energy conversion systems using Gaussian networks. *Neural Networks IEEE Transactions on*, cilt 10(4), pp. 898-906.
- [103] Letcher T. M. (2016). *Wind Energy Engineering*, 1st ed., Academic Press, Chennai,
- [104] Wu, B., Lang, Y., Zargari, N., & Kouro, S. (2011). *Power conversion and control of wind energy systems (Vol. 76)*. John Wiley & Sons, New York
- [105] Esen, M. (2013). *Rüzgar Türbini Ve Güneş Pilinden Oluşan Bir Güç Üretim Sisteminin Tasarımı Ve Kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [106] Carriveau, R. (Ed.). (2012). *Advances in wind power*. Intech, Croatia.
- [107] Chowdhury, M. M. (2014). *Modelling and control of direct drive variable speed wind turbine with Interior Permanent Magnet Synchronous Generator*, Doctoral Dissertation, University of Tasmania
- [108] <http://www.resoltenerji.com/ruzgar-turbini-nedir-ruzgar-turbini-cesitleri-nelerdir/>, Erişim: 26 Eylül 2020
- [109] Okedu, K. E. (Ed.). (2018). *Stability Control and Reliable Performance of Wind Turbines*. Intech Open, London UK
- [110] Dong, W., Xing, Y., & Moan, T. (2012). Time domain modeling and analysis of dynamic gear contact force in a wind turbine gearbox with respect to fatigue assessment. *Energies*, 5(11), ss. 4350-4371.
- [111] Ribrant J., Bertling L.M. (2007). *Surevy of failure inwind power systems with focous on swedish wind power plants during 1997-2005, IEEE Trans.Energy Covers.*, vol. 22, no. 1, pp. 167-173
- [112] Polinder, H., De Haan, S. W., Dubois, M. R., & Slootweg, J. G. (2005). Basic operation principles and electrical conversion systems of wind turbines. *Epe Journal*, cilt 15(4), ss. 43-50
- [113] Gour, R., Jain, P., Mittal, R., & Deswal, S. S. (2012). PMSG based isolated wind energy conversion system (WECS) for variable load. In *2012 IEEE 5th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, pp. 1-6
- [114] Dursun E., Binark A. K. (2008)., Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Generatörler, *VII.Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, UTES'2008*, İstanbul, Türkiye
- [115] Apaydın M., Üstün A. K., Kurban M., Filik Ü. B. (2009). Rüzgar Enerjisinde Kullanılan Asenkron Jeneratörler, *5. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, Diyarbakır, Türkiye
- [116] Li, H., Chen, Z. (2008). Overview of different wind generator systems and their comparisons. *IET Renewable Power Generation*, cilt 2(2), ss. 123-138.
- [117] Sevilmiş, F. (2016). *Rüzgâr Enerji Sistemlerinin Şebekeye Senkronize Edilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [118] Blaabjerg, F., Ma, K. (2013). Future on power electronics for wind turbine systems. *IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics*, cilt 1(3), ss. 139-152.

- [119] Soliman, M. M., & El-Saady, G. (2018). A fault ride through strategy for wind energy conversion system based on permanent magnet synchronous generator. In *2018 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE)*, pp. 453-460
- [120] Jafari Nadoushan, M. H., & Akhbari, M. (2016). Optimal Torque Control of PMSG-based Stand-Alone Wind Turbine with Energy Storage System. *Journal of Electric Power & Energy Conversion Systems*, cilt 1(2), ss. 52-59
- [121] Melício, R., Mendes, V. M., & Catalão, J. P. (2011). Wind turbines with permanent magnet synchronous generator and full-power converters: modelling, control and simulation. *Wind turbines*, ss.465-470.
- [122] Mostafazadeh, A. (2013). *Voltage Control Of A Stand Alone Hybrid System Using Fuzzy Logic Controller*, MsC Dissertation, Istanbul Technical University, Graduate School Of Science Engineering And Technology
- [123] Sabbar, N., Vural, A. M. (2019). Study on The Improvement of Permanent Magnet Synchronous Generator Based Wind Energy System by Integration of Ultracapacitor. In *2019 4th International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA)*, pp. 1-6
- [124] Wang, C. N., Lin, W. C., & Le, X. K. (2014). Modelling of a PMSG wind turbine with autonomous control. *Mathematical Problems in Engineering*.
- [125] Dahbi, A., Nait-Said, N., & Nait-Said, M. S. (2016). A novel combined MPPT-pitch angle control for wide range variable speed wind turbine based on neural network. *International Journal of Hydrogen Energy*, cilt 41(22), ss. 9427-9442.
- [126] Çakmak, R. (2012). *Fotovoltaik Güç üretim Sistemleri için Bulanık Mantık Tabanlı Maksimum güç noktası Takip Sistemi*, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [127] Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2003). *Power Electronics: Converters, Applications and Design*. John wiley & sons, New York
- [128] Abdullah, M. A., Yatim, A. H. M., Tan, C. W., & Saidur, R. (2012). A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, cilt 16(5), ss.3220-3227.
- [129] Song, Y. D., Li, P., Liu, W., & Qin, M. (2010). An overview of renewable wind energy conversion system modeling and control. *Measurement and Control*, cilt 43(7), ss. 203-208.
- [130] Thongam, J. S., & Ouhrouche, M. (2011). MPPT control methods in wind energy conversion systems. *Fundamental and advanced topics in wind power*, (1), ss. 339-360.
- [131] Lahari, N. V., & Shetty, H. V. K. (2015). Integration of grid connected PMG wind energy and solar energy systems using different control strategies. In *2015 International Conference on Power and Advanced Control Engineering (ICPACE)*, (pp. 23-27). IEEE.
- [132] Apata, O., & Oyedokun, D. T. O. (2020). An Overview of Control Techniques for Wind Turbine Systems. *Scientific African*, e00566
- [133] Yüksek, G., & Mete, A. N. (2017). A hybrid variable step size MPPT method based on P&O and INC methods. In *2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*,(pp. 949-953)
- [134] Hussain, J., & Mishra, M. K. (2016). Adaptive maximum power point tracking control algorithm for wind energy conversion systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, cilt 31(2), ss.697-705.

- [135] Salem, A. A., Aldin, N. A. N., Azmy, A. M., & Abdellatif, W. S. (2019). A Fuzzy Logic-based MPPT Technique for PMSG Wind Generation System. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, cilt 9(4), ss. 1751-1760.
- [136] Lee, J., Kim, Y. S. (2016). Sensorless fuzzy-logic-based maximum power point tracking control for a small-scale wind power generation systems with a switched-mode rectifier. *IET Renewable Power Generation*, cilt 10(2), ss.194-202
- [137] Teker, A. (2008). *Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor'un Bulanık Mantık ile Hız Kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [138] Balasundar, C., Sudharshanan, S., & Elakkiyavendan, R. (2015). Design of an optimal tip speed ratio control MPPT algorithm for standalone WECS. *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol*, cilt 3, 442-450.
- [139] Li, X. P., Fu, W. L., Shi, Q. J., Xu, J. B., & Jiang, Q. Y. (2013). A fuzzy logical MPPT control strategy for PMSG wind generation systems. *Journal of Electronic Science and Technology*, cilt 11(1), ss.72-77.
- [140] Simoes, M., Bose, B. K., & Spiegel, R. J. (1997). Design and performance evaluation of a fuzzy-logic-based variable-speed wind generation system. *IEEE Transactions on Industry Applications*, cilt 33(4), ss. 956-965.
- [141] Öztemel, E., (2012). *Yapay Sinir Ağları*, Papatya Yayıncılık Eğitim, İstanbul.
- [142] Mishra, S., Shukla, S., Verma, N. (2015). Comprehensive review on maximum power point tracking techniques: wind energy. In *2015 Communication, Control and Intelligent Systems (CCIS)*, pp. 464-469
- [143] Biswas, D., Sahoo, S. S., Tripathi, P. M., Chatterjee, K. (2018). Maximum power point tracking for wind energy system by adaptive neural-network based fuzzy inference system. In *2018 4th International Conference on Recent Advances in Information Technology (RAIT)*, pp. 1-6
- [144] Asghar, A. B., & Liu, X. (2018). Adaptive neuro-fuzzy algorithm to estimate effective wind speed and optimal rotor speed for variable-speed wind turbine. *Neurocomputing*, 272, ss.495-504.
- [145] Nguyen, H. M., Naidu, D. S. (2011). Advanced control strategies for wind energy systems: An overview. In *2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition* (pp. 1-8). IEEE
- [146] Premkumar, T. M., Adapa, H., Pushpak, V., Seralathan, S., Kumar, M. V., Hariram, V., & Nakandhrakumar, R. S. (2020). Modeling and simulation of pitch controlled FRP material based horizontal axis wind turbine system to extract maximum power. *Materials Today: Proceedings*.

ÖZGEÇMİŞ

Hasan Bektaş PERÇİN

Category	Value
Category 1	Value 1
Category 2	Value 2
Category 3	Value 3
Category 4	Value 4
Category 5	Value 5
Category 6	Value 6
Category 7	Value 7
Category 8	Value 8

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

☐	[REDACTED]	[REDACTED]
☐	[REDACTED]	[REDACTED]
☐	[REDACTED]	[REDACTED]

© 2006 The Authors

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]