T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

RÜZGAR ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNİN MPPT KONTROLÜ İLE ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Emre Hasan DURSUN

DOKTORA TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos-2020
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Emre Hasan DURSUN tarafından hazırlanan "Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemlerinin MPPT Kontrolü ile Enerji Verimliliğinin İyileştirilmesi" adlı tez çalışması 31/08/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	**İmza**
Başkan Prof. Dr. Ramazan AKKAYA	……..
Danışman Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ	……..
Üye Prof. Dr. Ahmet KARAARSLAN	……..
Üye Prof. Dr. Ömer AYDOĞDU	……..
Üye Dr. Öğr. Üyesi Hulusi KARACA	……..

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 2211-C programı kapsamında desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Emre Hasan DURSUN

Tarih: 31/08/2020

ÖZET

DOKTORA TEZİ

RÜZGAR ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNİN MPPT KONTROLÜ İLE ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Emre Hasan DURSUN

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ

2020, 138 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ
Prof. Dr. Ramazan AKKAYA
Prof. Dr. Ahmet KARAARSLAN
Prof. Dr. Ömer AYDOĞDU
Dr. Öğr. Üyesi Hulusi KARACA

Enerji talebinin her geçen gün artmasına ve geleneksel enerji kaynaklarına ilişkin açığa çıkan sorunlara yenilenebilir enerji kaynakları temelli güç üretim sistemleri bir çözüm olabilmektedir. Bu kaynaklar arasında ciddi bir potansiyele sahip olan rüzgar enerjisinin kullanımı ise, son yıllardaki gelişen teknoloji sayesinde, dünya çapında hızlı bir büyüme göstermekte ve popülerlik kazanmaktadır.

Belirli dönüşüm aşamaları üzerinden enerjinin elde edildiği Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemleri (REDS)'nden maksimum gücün daha etkin yakalanabilmesi ve bu sayede de enerji verimliliğinin iyileştirilmesi, en çok önem verilen araştırma konularından biri olmaktadır. Bu noktada literatürde ve endüstriyel uygulamalarda geleneksel yöntemler kullanılabilmiş olsa da, daha etkin ve yenilikçi kontrol stratejileri ve algoritmalara gereksinimler de bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasında, kontrolsüz doğrultucu ve yükseltici tip DC-DC dönüştürücü içeren güç dönüştürme topolojili kalıcı mıknatıslı senkron generatör temelli REDS'lerden hem maksimum mekanik gücün hem de maksimum elektriksel gücün yakalanması konusu detaylıca ele alınmıştır. Sistemin maksimum güçte çalışması için optimum çalışma noktasının belirlenmesinde çeşitli Maksimum Güç Noktası İzleme (MPPT) algoritmaları kullanılmış ve ayrıca bu noktaya sistemi getirmek amacıyla önceden bu bakış açısıyla uyarlanmamış olan çeşitli kayan kipli kontrolörler de tasarlanmıştır. Bunlara ek olarak, güncel optimizasyon tekniklerinin MPPT metotlarına entegre edilmesi üzerine de çalışılmıştır. Kaotik temelli parçacık sürü optimizasyonunun iki türevinin ayrı ayrı optimum ilişki temelli yöntemle birleştirildiği ve kayan kip tabanlı kontrolörün benimsendiği iki adet hibrit tümleşik maksimum güç yakalama çerçevesi de türetilebilmiştir. Oluşturulan farklı rüzgar hızı değişim profilleri altında tüm testler simülasyon ortamında doğrulanmış olup, kontrolörler için kararlılık analizleri de detaylı olarak sunulmuştur. Tüm bu çalışmalar neticesinde, maksimum güç noktasının daha doğru ve kesin olarak tespitinin yanı sıra daha az sürekli hal hatası ve gerilim dalgalılığına ulaşılması sayesinde daha üstün bir izleme performansıyla MPPT sistem verimliliğine katkı sağlandığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatör, Kayan Kipli Kontrol, Maksimum Güç Noktası İzleme, Parçacık Sürü Optimizasyonu ve Kaotik tabanlı Türevleri, Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemi, Tümleşik Maksimum Güç Yakalama Çerçevesi.

ABSTRACT

PhD THESIS

ENERGY EFFICIENCY ENHANCEMENT OF WIND ENERGY CONVERSION SYSTEMS WITH MPPT CONTROL

Emre Hasan DURSUN

Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Electrical-Electronics Engineering

Advisor: Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ

2020, 138 Pages

Jury
Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ
Prof. Dr. Ramazan AKKAYA
Prof. Dr. Ahmet KARAARSLAN
Prof. Dr. Ömer AYDOĞDU
Asst. Prof. Dr. Hulusi KARACA

Renewable energy-based power generation systems can be a solution to the increasing energy demand and the problems that arise regarding conventional energy sources. The use of the wind energy, which has a serious potential among these sources, has been growing rapidly and gaining popularity worldwide thanks to the developing technology in recent years.

Wind Energy Conversion System (WECS) generates energy through certain transformation stages. Extracting the maximum power from WECS more effectively and thus improving the energy efficiency is one of the most important research topics. Although traditional methods have been used in literature and industrial applications at this point, there are also requirements for more effective and innovative control strategies and algorithms.

In this thesis study, the issue of capturing both maximum mechanical power and maximum electrical power from permanent magnet synchronous generator based WECS with power conversion topology including uncontrolled rectifier and DC-DC boost converter is discussed in detail. Various Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms have been used to determine the optimum operating point for the system to operate at maximum power and also different type sliding mode controllers that have not been adapted before from this point of view have been designed to bring the system to this point. In addition to these, it has been worked on integrating current optimization techniques into MPPT methods. Two hybrid unified maximum power extraction frameworks, which combine separately two derivatives of chaotic-based particle swarm optimization with the optimum relation-based method and adopt a controller based on sliding mode control theory, have been derived as well. All tests on designed various wind speed change profiles have been verified in the simulation environment and stability analyzes for controllers are also presented in detail. In consequence of all these studies, it has been observed that the MPPT system efficiency is contributed by more accurate and precise determination of the maximum power point as well as achieving a superior tracking performance with less steady-state error and voltage fluctuation.

Keywords: Maximum Power Point Tracking, Particle Swarm Optimization and Chaotic based derivatives, Permanent Magnet Synchronous Generator, Sliding Mode Control, Unified Maximum Power Extraction Framework, Wind Energy Conversion System.

ÖNSÖZ

Tez çalışmalarımda bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, her konuda desteğini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ hocama, Tez İzleme Komitesi üyeleri Prof. Dr. Ömer AYDOĞDU ve Dr. Öğr. Üyesi Hulusi KARACA hocalarıma, manevi destekleriyle yanımda olan mesai arkadaşlarıma, hayatımdaki en büyük destekçim olan anneme, babama ve kardeşlerime teşekkürü borç bilirim.

Tez çalışmam süresince 2211-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı kapsamında doktora çalışmamı destekleyerek bilimin gelişmesine her daim katkıda bulunan ve araştırmacıların yetiştirilmesi için çaba gösteren Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'na ayrıca teşekkür ederim.

Bu tez çalışmamı; hayatımın her anında yanımda olan, elini her daim üstümde hissettiğim, bugünlere gelmemi sağlayan ve Mart ayında kaybettiğim canım annem Alime DURSUN'a ithaf ediyorum.

Emre Hasan DURSUN
KONYA-2020

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **x**

1. GİRİŞ **1**

1.1. Tez Organizasyonu 5

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **6**

2.1. Rüzgar Enerjisi ve REDS Konfigürasyonları Üzerine Literatür Taraması 6
2.2. MPPT Algoritmaları Üzerine Literatür Taraması 9
2.3. MPPT Kontrolörleri Üzerine Literatür Taraması 12
2.4. REDS'de Kanat Açı Kontrolü, Güç Kalitesi ve Kararlılığı Üzerine Literatür Taraması 17

3. MATERYAL VE YÖNTEM **19**

3.1. Rüzgar Enerjisi 19
3.1.1. Rüzgar enerjisinin dünya ve Türkiye'deki güncel durumu 20
3.1.2. Rüzgar gücü 24
3.2. Rüzgar Türbinleri 26
3.2.1. Rüzgar türbin çeşitleri 26
3.2.2. Yıllara göre türbin güç kapasitesinin evrimi 28
3.3. Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemleri (REDS) 29
3.3.1. Modern REDS konfigürasyonları 31
3.3.1.1. Modern REDS'lerde güç dönüşüm topolojileri 32
3.3.1.2. Modern REDS'lerde kullanılan generatörler 37
3.3.1.3. Kalıcı mıknatıslı senkron generatör (KMSG) 39
3.3.2. Modern REDS'lerde çalışma bölgeleri ve güç kontrol teknikleri 43
3.3.2.1. Modern REDS'lerde çalışma bölgeleri 43
3.3.2.2. Modern REDS'lerde güç kontrol teknikleri 44
3.4. Maksimum Güç Noktası İzleme (MPPT) 46
3.4.1. REDS'lerde MPPT algoritmaları 47
3.4.1.1. P&O yöntemi 47
3.4.1.2. TSR yöntemi 49
3.4.1.3. PSF yöntemi 50
3.4.1.4. OTC yöntemi 51
3.4.1.5. ORB yöntemi 53
3.4.2. REDS'lerde MPPT kontrolörleri 55
3.5. Kayan Kipli Kontrol (KKK) Tekniği 56
3.5.1. KKK tekniğinin teorisi 56

3.5.2. KKK tekniğinin gelişimi 59
3.6. KKK Tekniğinin Çeşitli Tipleri 61
3.6.1. Geleneksel KKK 61
3.6.2. Hızlı terminal KKK 62
3.6.3. İkinci-dereceden KKK 62
3.6.4. İkinci-dereceden hızlı terminal KKK 64
3.7. Optimizasyon 64
3.7.1. Parçacık sürü optimizasyonu ve kaotik türevleri 65
3.7.1.1. GM-CPSO ve CDW-PSO yaklaşımı 67
3.8. Performans Karşılaştırmalarında Kullanılan İndisler 69

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA 70

4.1. MPPT'li KMSG Temelli Değişken Hızlı REDS Sisteminin Tasarımı 70
4.1.1. Rüzgar türbini karakteristiği 70
4.1.2. KMSG ve kontrolsüz doğrultucunun karakteristiği 72
4.1.3. Yükseltici tip DC-DC dönüştürücünün karakteristiği 73
4.2. Geleneksel KKK ve İkinci Dereceden KKK Temelli MPPT Kontrolünün Tasarımı 74
4.2.1. Kontrol edilecek sistemin değişkenlerine ilişkin tanımlamalar 75
4.2.2. Geleneksel KKK temelli kontrolör tasarımı 77
4.2.3. İkinci dereceden KKK temelli kontrolör tasarımı 80
4.2.4. Simülasyon ortamındaki doğrulama testleri ve karşılaştırmalar 83
4.2.4.1. Test senaryosu I 84
4.2.4.2. Test senaryosu II 88
4.2.4.3. Sistem çalışmasına ilişkin diğer analizler 90
4.3. Yeni Bir Tümleşik Güç Yakalama Çerçevesinin Tasarımı 93
4.3.1. Hibrit optimizasyon ve ORB temelli MPPT Yaklaşımı 94
4.3.2. Hızlı terminal KKK temelli kontrolör tasarımı 96
4.3.3. Simülasyon ortamındaki doğrulama testleri ve karşılaştırmalar 98
4.3.3.1. Test senaryosu I 99
4.3.3.2. Test senaryosu II 102
4.3.3.3. Test senaryosu III 105
4.4. İkinci Dereceden Hızlı Terminal KKK temelli MPPT Kontrolünün Tasarımı 108
4.4.1. Kontrolör tasarımı 109
4.4.2. Simülasyon ortamındaki doğrulama testleri ve karşılaştırmalar 110
4.4.2.1. Test senaryosu I 111
4.4.2.2. Test senaryosu II 113
4.5. DC-Bara Besleyen KMSG Temelli REDS için MPPT Kontrolü 115
4.5.1. Sistem konfigürasyonu 115
4.5.2. Kullanılan MPPT metotları 116
4.5.2.1. TSR-PI temelli MPPT kontrolü 116
4.5.2.2. P&O temelli MPPT kontrolü 116
4.5.3. Simülasyon ortamındaki testler ve karşılaştırmalar 117
4.6. Değişken Adım Büyüklüklü P&O Metodu ile MPPT Kontrolü 119
4.6.1. Sistem konfigürasyonu 119
4.6.2. Değişken adım büyüklüklü P&O 120
4.6.3. Simülasyon sonuçları 121

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 123

5.1 Sonuçlar 123
5.2 Öneriler 125

KAYNAKLAR 126

ÖZGEÇMİŞ 136

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a : İvme
A : Rüzgar türbini kanatlarının süpürdüğü alan
B : Sürtünme katsayısı
$C_1, C_2, \ldots, C_6$: Rüzgar türbininin karakteristiği için parametrik katsayılar
c_1, c_2 : PSO yapıları için hızlandırma katsayıları
$C_{P_\max}$: Rüzgar türbini güç katsayısının maksimum değeri
C_P : Rüzgar türbini güç katsayısı
d : Dönüştürücü için çalışma oranı
$D(t)$: Bozucu etki
d, q : Senkron referans çerçeveye ilişkin bileşenler
E : KMSG'nin indüklediği zıt emk
$e(t)$, $\dot{e}(t)$: İzleme hatası ve türevi
E, W : İş ve enerji
F : Kuvvet
f-g $(x(t),t))$: Doğrusal olmayan belirsiz bir sistem için düzgün fonksiyonlar
g : Yer çekimi sabiti
I : Generatör faz akımı
I_L, I_C : Dönüştürücünün indüktör ve kapasitör akımları
i_d , i_q : d, q bileşen stator akımı
J_{top} : Toplam atalet momenti
k : Emk için sabit bir katsayı
k, M_{max} : PSO yapıları için şu anki ve maksimum iterasyon sayıları
k_c : PSO yapılarının hız ve konum sınırlamaları arasında ilişki parametresi
K_p, K_i : PI kontrolörün parametrik katsayıları
K_{p_opt} : Optimal tork için sabit bir katsayı
K_{r_opt} : Bir katsayı
K_{sw} : Anahtarlama kontrol sinyali için kazanç
K_{sw1}, K_{sw2} : İD-HTKKK yapısında anahtarlama kontrol sinyali için kazançlar
k_v : Bir yakınsama sabiti
L, C, R : Dönüştürücünün endüktans, kapasitans ve yük direnci
L_d , L_q : d, q bileşen endüktansı
L_s : Stator faz endüktansı
m : Kütle
$\dot{m}$: Kütle akış hızı
n : Sistemin derecesi
p : Generatörün çift kutup sayısı
P : Güç
p_0 : Standart deniz seviyesindeki atmosferik yoğunluk
P_{em} : Elektromanyetik güç
P_L : Yük üzerine dağıtılan güç
$P_{L_\max}$: Yük üzerine dağıtılan maksimum güç
P_m : Rüzgar türbinlerinden mekanik olarak elde edilebilecek güç
$P_{m_\max}$: Rüzgar türbinlerinden mekanik olarak elde edilebilecek maksimum güç
P_{th} : Kritik güç değeri
P_w : Rüzgar gücü
R : Türbin kanat çapı

r_1, r_2 : PSO yapıları için rastgele değişkenler
R_h : Hava için spesifik bir gaz sabiti
R_L, R_C : İndüktör ve kapasitör direnci
R_S : Stator sargı faz direnci
S : Yarı iletken anahtarlama elemanı
$s(t)$: KKK'de kayma yüzeyi fonksiyonu
$sign$: Signum işaret fonksiyonu
T : Hava sıcaklığı
t : PSO yapıları için iterasyon sayısı
T_{m_opt} : Optimal tork
$u(t)$: Doğrusal olmayan belirsiz bir sistem için kontrol girişi
u, $\overline{u}$: Anahtarlama elemanı için kontrol girişi ve lojik olarak tersi
$u_{eq}(t)$: Eşdeğer kontrol sinyali
$u_{sw}(t)$: Anahtarlama kontrol sinyali
$u_t(t)$: Giriş toplam kontrol sinyali
v : Hız
V : KMSG bir faz gerilimi
$V(t)$: Lyapunov fonksiyonu
v_0 : Hız başlangıç koşulu
$v_{control}$, $\hat{v}_{ramp}$: PWM için kontrol ve rampa sinyalleri
V_d ,V_q : d, q bileşen stator gerilimi
V_{DC} : Doğrultulmuş gerilim
V_{dc} : Generatörün doğrultucu çıkışında oluşturacağı gerilim
V_{DC_opt} : Optimum doğrultulmuş gerilim
$V_i(t)$, $V_i(t+1)$: PSO yapıları için önceki ve sonraki hız değerleri
V_{in}, V_o : Dönüştürücü giriş ve çıkış gerilimleri
V_{min}, V_{max} : PSO yapıları için minimum ve maksimum hız sınır değerleri
V_{ref} : Referans çalışma gerilimi
v_w : Rüzgar hızı
w_i : PSO yapıları için dinamik ağırlık
x : Mesafe
$x(t)$: Doğrusal olmayan belirsiz bir sistem için durum değişkeni
X_1, X_2, $\dot{X}_2$: Kontrol edilen sistem değişkenleri
$X_{gbest}(t)$: PSO yapıları için tüm sürü içerisindeki en iyi (global) konum değeri
$X_i(t)$, $X_i(t+1)$: PSO yapıları için önceki ve sonraki konum değerleri
x_k : PSO yapıları için k. iterasyondaki atalet ağırlığı
X_{min}, X_{max} : PSO yapıları için minimum ve maksimum konum sınır değerleri
$X_{pbest(i)}(t)$: PSO yapıları için i. parçacığa ait en iyi konum değeri
z : Deniz seviyesinden yükseklik
α, γ, θ, p, q : HT-KKK yapısının kayma yüzeyinin tasarımı için katsayılar
β, k_p, k_i, k_d : İD-KKK ve İD-HTKKK'de kayma yüzeyinin tasarımı için katsayılar
β_1, β_2, θ, p, q : İD-HTKKK yapısının kayma yüzeyinin tasarımı için katsayılar
Δ : Değişim operatörü
δ, ε, ϕ : Anahtarlama kontrol sinyali için katsayılar
η_{gen} , η_{conv} : Generatör ve güç dönüştürücünün verimleri
ϑ : İD-HTKKK için bir değişken tanımlaması
κ : Dönüştürücünün dönüştürme oranı
λ, λ_C : Kayma yüzeyi için sabit bir katsayı
λ_1 : İD-KKK yapısında anahtarlama kontrol sinyali için katsayı
λ_{opt} : Optimum TSR değeri

ρ : Hava yoğunluğu
ρ : Kayma yüzeyine ilişkin göreceli derece
τ_{em} : Elektromanyetik tork
τ_m : Mekanik tork
ϕ_d, ϕ_q : d, q bileşen kaçak akı
ϕ_m : Kalıcı mıknatısın kaçak akısı
ω : PSO yapıları için atalet ağırlığı
ω_m : Mekanik açısal hız
ω_{m_opt} : Optimum generatör çalışma hızı
ω_s : Elektriksel açısal hız

Kısaltmalar

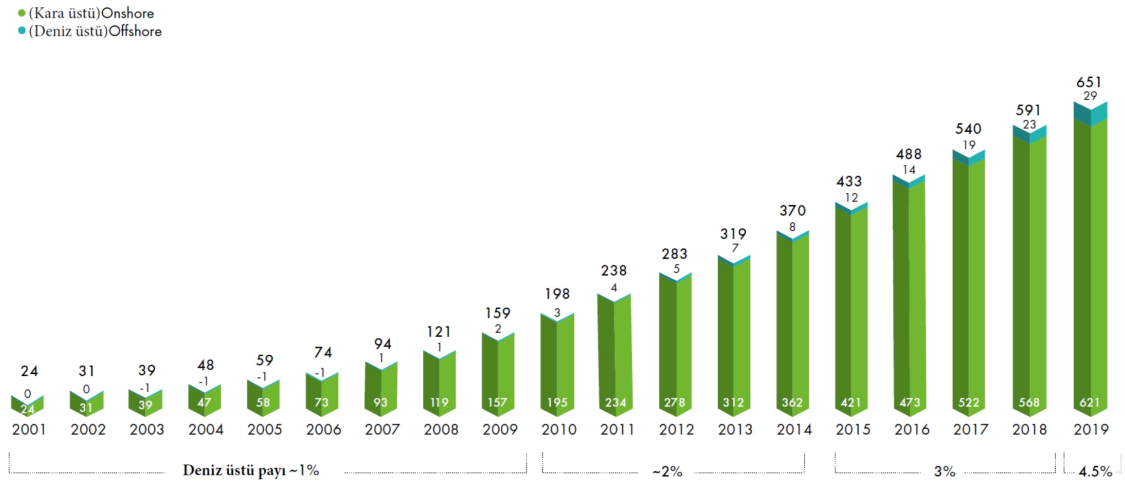
ACO : Karınca Kolonisi Optimizasyonu (*Ant Colony Optimization*)
CDW-PSO : Kaotik Dinamik Ağırlıklı-PSO (*Chaotic Dynamic Weight PSO*)
ÇBAG : Çift Beslemeli Asenkron Generatör
DH-REDS : Değişken Hızlı Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemi
DJOA : Demokratik Ortak Operasyonlar Algoritması (*Democratic Joint Operations Algorithm*)
DW-PSO : Dinamik Ağırlıklı PSO (*Dynamic Weight PSO*)
FLC : Bulanık Mantık Kontrol (*Fuzzy Logic Control*)
GA : Genetik Algoritma (*Genetic Algorithm*)
G-KKK : Geleneksel Kayan Kipli Kontrol
GM-CPSO : Gauss Haritası Temelli-Kaotik PSO (*Gauss map based chaotic PSO*)
GSC : Şebeke Tarafı Dönüştürücü (*Grid Side Converter*)
GWEC : Global Rüzgar Enerjisi Konseyi (*Global Wind Energy Council*)
HCS : Tepe Tırmanışı Araması (*Hill Climbing Search*)
HT-KKK : Hızlı Terminal KKK (*Fast Terminal Sliding Mode Control*)
IAE : Mutlak Hatanın Toplamı (*Integral of the Absolute Error*)
IC : Artımlı İletkenlik (*Incremental Conductance*)
IIWO : Geliştirilmiş Yabani Ot Optimizasyon (*Improved Invasive Weed Optimization*)
ISE : Karesel Hatanın Toplamı (*Integral of the Square Error*)
ITAE : Zaman Ağırlıklı Mutlak Hatanın Toplamı (*Integral of the Time Multiplied by the Absolute Value of the Error*)
İD-HTKKK : İkinci Dereceden Hızlı Terminal KKK (*Second-Order Fast Terminal Sliding Mode Control*)
İD-KKK : İkinci Dereceden KKK (*Second-Order Sliding Mode Control*)
KKK : Kayan Kipli Kontrol (*Sliding Mode Control*)
KMSG : Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatör
MEPT : Maksimum Elektriksel Güç Takibi
MPPT : Maksimum Güç Noktası İzleme (*Maximum Power Point Tracking*)
MSC : Makine Tarafı Dönüştürücü (*Machine Side Converter*)
ORB : Optimum İlişki Temelli (*Optimum Relation Based*)
OTC : Optimal Tork Kontrol (*Optimal Torque Control*)
P&O : Değiştir & Gözle (*Perturbation & Observation*)
PCSMC : Pertürbasyon Kompanzasyonu Temelli KKK (*Perturbation Compensation Based Sliding-Mode Control*)
PI : Oransal-İntegral (Proportional-Integral)
PID : Oransal-İntegral-Türev (Proportional-Integral-Derivative)

POSMC	: Pertürbasyon Gözlemci Tabanlı KKK (*Perturbation Observer Based Sliding Mode Control*)
PSF	: Güç Sinyali Geri Besleme (*Power Signal Feedback*)
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu (*Partical Swarm Optimization*)
PV	: Fotovoltaik
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu (*Pulse Width Modulation*)
RBFN	: Radyal Temelli Fonksiyon Ağı
RBFNN	: Radyal Temelli Fonksiyon Sinir Ağı (*Radial Basis Function NN*)
REDS	: Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemi (*Wind Energy Conversion System*)
RNN	: Yinelemeli Sinir Ağı (*Recurrent Neural Network*)
RSAG	: Rotoru Sargılı Asenkron Generatör
RSSG	: Rotoru Sargılı Senkron Generatör (*Wound Rotor Synchronous Generator*)
SH-REDS	: Sabit Hızlı Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemi
SKAG	: Sincap Kafesli Asenkron Generatör
SM-CPSO	: Sinüs Haritası Temelli Kaotik PSO (*Sine Map Based Chaotic PSO*)
SMESC	: Kayan Kipli Ekstremum Arama Kontrolü (*Sliding Mode Extremum Seeking Control*)
T-KKK	: Terminal (Sonlu Zamanlı) KKK (*Terminal Sliding Mode Control*)
TSR	: Uç Hız Oranı (*Tip Speed Ratio*)
TUREB	: Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği
YD-KKK	: Yüksek Dereceden KKK (*High-Order Sliding Mode Control*)
YSA	: Yapay Sinir Ağı (*Artificial Neural Network*)

1. GİRİŞ

Dünya nüfusu her geçen gün artmakta olup, 2050'li yıllara gelindiğinde 9 milyara ulaşacağı öngörülmektedir. Ayrıca toplumların yaşam kalitesi ve gelişmişlikleri ile enerji tüketimi arasında güçlü bir ilişki bulunmaktadır. Dünya nüfusundaki bu artışa, teknolojik gelişmeler ve artan sanayileşmenin de eşlik etmesiyle ülkelerin enerji ihtiyaçları da sürekli olarak artmaktadır. Sanayileşme devriminin başlarından itibaren, özellikle son 20 yıla kadar olan süreç içerisinde enerji üretiminde konvansiyonel enerji kaynakları daha yaygın olarak kullanılmaktaydı. Ancak petrol, kömür veya doğal gaz temelli konvansiyonel enerji kaynakları verimliliklerinin düşük olması, sınırlı düzeyde rezerv kapasitesi olduğundan kullanılabilirliğinin azalması, sera gazı emisyonları ve kirlilik sorunları gibi ciddi çevresel krizlere ve kaygılara neden olabilmektedir (Nguyen ve Fujita, 2016; Kumar ve ark., 2018). Bu yüzden elektrik enerjisi talebinin karşılanabilmesi konusu oldukça önem arz eden bir durum teşkil etmektedir. Enerji problemlerinin çözülebilmesi hususunda öncelikli olarak gelişmiş ülkeler tarafından pek çok girişimde bulunulmaktadır. İnsanoğlu kimi zaman elektrik enerjisi üretiminde nükleer santralleri kullanmayı bir çözüm olarak düşünmüş olmasına rağmen nükleer atıkları bertaraf etmedeki zorluklar ve üretim tesisinin çok güvenilir olmayan davranışsal karakteristiğinden dolayı riskli olarak düşünülebilmektedir (Matayoshi ve ark., 2018). Son yıllarda bu tehditler ülkelerin yenilenebilir enerji tabanlı güç üretim sistemleri arayışına sebep olmuştur (Sitharthan ve ark., 2020). Diğer taraftan alternatif ve yenilenebilir enerji üretim teknolojileri konusu Türkiye'nin de öncelikli teknoloji alanları arasında yer almaktadır. Bu noktada ise güneş, rüzgar, hidroelektrik, biyokütle ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynakları bu sorunlar ile başa çıkmada radikal bir çözüm olarak görülmektedir ve dünya genelinde yenilenebilir enerji tabanlı güç üretim sistemlerinin kullanımı hızlıca artan bir eğilim oluşturmaktadır (Lee ve Kim, 2016). Bu ilginin en büyük destekleyicilerinden birisi de geçtiğimiz birkaç on yıllık dilimde, dünyanın güç elektroniği ve yarı iletken teknolojileri üzerine yeni gelişmelere tanıklık etmiş olmasıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş ve rüzgar enerjisi ise o zamandan itibaren en çok ilgi çekenlerdir. Güneş enerjisi temelli üretim sistemlerinin yakın geçmişte bir miktar daha popüler olduğu söylenebilirken artık bu eğilim de değişmiştir. Sadece güneş ışınlarının yeryüzüne ulaşabildiği belirli zaman aralıklarında, güneş enerjisi sistemlerinden enerji elde edilebiliyorken, gece gündüz fark etmeksizin rüzgar akışının bulunduğu her an enerjinin elde edilebilmesinden ötürü enerjinin bu

tipinin daha avantajlı olduğu belirtilebilir. Rüzgar enerjisi, dünya çapında en yüksek kapasite artış hızına sahiptir. Ayrıca sıfır karbon emisyonlu, temiz, sonsuz ve daha az alan işgal eden bir enerji kaynağı olarak öne çıkmakta olup dünya çapında araştırmacılar ve yatırımcılar tarafından da çok büyük bir ilgi konusu olmaktadır (Hussain ve Mishra, 2016; Asghar ve Liu, 2018; Novaes Menezes ve ark., 2018). Global Rüzgar Enerjisi Konseyi (GWEC)'nin verilerinden; 2001 yılında dünyadaki kurulu rüzgar gücü kapasitesi yaklaşık 24 GW iken, bu kapasitenin 2019 yılı sonu itibariyle 651 GW seviyelerine kadar ulaştığı tespit edilebilmekte olup bu tarihsel gelişim süreci Şekil 1.1'de sunulmaktadır.



Şekil 1.1. Dünyadaki kurulu toplam rüzgar gücünün tarihsel gelişimi (GWEC, 2019)

Kurulu güç odaklı rüzgar enerjisine son 10 yılda yapılan yatırımlar, gelecek enerji politikasında ciddi bir ilginin oluşarak rüzgar enerjisinin daha da etkin bir rol üstleneceğini ispatlar niteliktedir. Rüzgar gücünden elektrik üretimi sadece ekonomik olarak değil, ekolojik çevrenin korunmasına da fayda sağlamaktadır. Diğer taraftan, ülkelerin ham madde ve dış ülkelere enerji bağımlılıklarının azaltılması veya ortadan kaldırılmasında da etken faktörlerden birisi olmaktadır. Büyüyen enerji talebini karşılamak için bu enerji türünün etkin ve verimli bir biçimde kullanılmasının oldukça önemli bir konu olduğu ve literatür çalışmalarında da detaylıca araştırıldığı görülmektedir. Ayrıca rüzgar enerjisinin gelecekte daha da etkin bir rol üstleneceği öngörülmektedir.

Rüzgarın aerodinamik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmek için kullanılan rüzgar türbinleri, enerjinin dönüşüm aşamasında anahtar aygıttır. Rüzgar türbinleri sayesinde elde edilen mekanik enerji, bir elektrik generatörü kullanılarak elektrik

enerjisine dönüştürülür. Üretilen elektrik enerjisi, tüketicinin talebine uygun forma dönüştürülmek için güç ünitesine aktarılmaktadır. Rüzgar enerjisi, bu dönüşüm aşamaları nedeniyle ticari alanda ve bilim dünyasında, Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemi (REDS) olarak da adlandırılmaktadır.

Rüzgar türbinlerinin kontrolü REDS uygulamaları için temel bir problemi teşkil etmekte olup böylece maliyet etkinliği ve yüksek verimlilik sağlanabilmektedir. Rüzgar türbinlerindeki gömülü kontrol sistemlerinin başlıca amacı; üretilebilecek gücü en üst düzeye çıkarmak, dinamik-statik-mekanik yükleri hafifletmek ve şebeke gerekliliklerine göre şebekeye sürekli güç beslemesini garanti etmektir (Novaes Menezes ve ark., 2018). Diğer bir bakış açısıyla, REDS'lere ilişkin literatür çalışmalarında yoğun araştırmaların başlıca üç kategoride yapıldığı tespit edilebilmektedir. Bunlar; REDS'den maksimum gücün yakalanması, yani Maksimum Güç Noktası İzleme (MPPT) kontrolü, rüzgar türbininin kanat açı kontrolü ve frekans düzenlemesi için şebeke entegrasyon kontrolü olmaktadır. Verimlilik açısından rüzgar türbininden maksimum düzeyde gücün elde edilmesinin amaçlanması ise bu üçü arasında en çok önem verilen noktadır. Tam da bu noktada verimlilik söz konusu olduğunda; REDS'de kullanılan rüzgar türbinleri, generatörler, güç dönüştürücü topolojileri ve MPPT'de çalışmayı sağlayacak tasarımların verimliliklerine katkı sağlamaya odaklı geliştirmeler yapılabilir. Bunların her birisi farklı bir tez konusunun içeriğini oluşturabilecektir ve bunların üzerine yapılabilecek bir iyileşme doğrudan bütün sistem verimliliğine bir katkı sunacaktır.

Maksimum gücü elde edebilmek amacıyla MPPT'nin çalışması ise başlıca iki kategoriye ayrılır: 1) optimum çalışma noktasını belirleyecek MPPT arama algoritmaları, 2) belirlenen bu optimum noktaya rüzgar enerjisi sistemini getirecek olan kontrolör tasarımlarıdır. Bahsi geçen, rüzgarın aerodinamik enerjisinden maksimum düzeyde enerji eldesinin sağlanması konusunda REDS'lerin daha ekonomik ve verimli işletilebilmesi amacıyla, anlık rüzgar hızı değişimlerine daha iyi adapte olabilen ve verim artışı sağlayacak yeni MPPT stratejileri ve daha yüksek performanslı kontrolör tasarımlarına yönelik arayışlar sürmektedir.

Maksimum gücün elde edileceği optimum türbin çalışma noktasının daha yüksek doğrulukta ve kesinlikte, daha hızlı bir erişimle ve daha düşük salınımla belirlenmesi için daha gelişmiş MPPT arama algoritmalarına ihtiyaç bulunmaktadır. Ayrıca bu çalışma noktasına daha yüksek izleme doğruluğu ve keskinliğiyle, daha dayanıklı (robust) ve hızlı tepki vermenin yanı sıra aşım gibi kriterler bakımından da daha başarılı sonuçlar sağlayabilen kontrolör tasarımlarına gereklilik bulunur. Bu iki husus üzerine

araştırma yapılması sistem verimliliğini apaçık etkileyen önemli bir konu olduğundan bu tez kapsamında; rüzgar enerjisi ve rüzgar enerjisi dönüşümü üzerine kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

REDS yapıları, sabit veya değişken rüzgar hızlarında çalışabilecek uygun konfigürasyonlarla oluşturulabilmektedir. Bunlar; Değişken Hızlı Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemi (DH-REDS) ve Sabit Hızlı Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemi (SH-REDS)'dir (Youssef ve ark., 2019). MPPT kontrolünün gerçekleştirilmesi ile rüzgar hızı sınır alt değeri (cut-in) ve nominal değeri aralığındaki her hızda maksimum verimlilikte çalışma sadece DH-REDS'de sağlanabilmektedir ve daha verimlidirler. Bu tez çalışmasında da küçük ölçekli bir DH-REDS ele alınmaktadır. Bu tip konfigürasyonlarda ise sincap kafesli asenkron generatörler, çift beslemeli asenkron generatörler ve kalıcı mıknatıslı senkron generatörler tercih konusu olabilmesine rağmen, küçük ölçekli rüzgar enerjisi sistemlerinde avantajlarından dolayı, bu tez çalışması kapsamında Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatör (KMSG) temelli DH-REDS üzerine araştırma yapılarak çalışmalar sürdürülmüştür. Ayrıca REDS'lerde farklı güç dönüşüm topolojilerinden yararlanılabiliyorken burada çalışılan güç dönüşüm topolojisi; küçük ölçekli uygulamalarda verimlilik ve maliyet odaklı avantajları da barındırmasından dolayı doğrultucu ve yükseltici tip bir DC-DC dönüştürücüden oluşmaktadır.

Tez çalışması esnasında, kontrolsüz doğrultucu ve yükseltici tip DC-DC dönüştürücü içeren KMSG temelli bir DH-REDS konfigürasyonunda MPPT algoritmaları ve kontrolörleri üzerine tasarımlar gerçekleştirilmiştir.

Bu tez kapsamında, MPPT algoritması olarak başlıca, sabit ve değişken-adım büyüklüklü değiştir & gözle algoritması, uç hız oranı yöntemi, güç sinyali geri besleme algoritması, optimum ilişki temelli yöntem ve ayrıca kaotik temelli parçacık sürü optimizasyonunun iki türevi ve optimum ilişki temelli yöntemin birleştirilmesiyle oluşturulan hibrit tümleşik bir maksimum güç izleme yaklaşımı üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Diğer taraftan kontrolör tasarımında ise, yüksek dereceli ve karmaşık sistemlerin kontrolünü garanti eden, hızlı ve dinamik tepkilerle yüksek performanslara ulaşılabilen, doğrusal olmayan dayanıklı bir kontrol yaklaşımı olan Kayan Kipli Kontrol (Sliding Mode Control, KKK) yönteminin farklı türevleri bu tez çalışmasında irdelenmiştir. Geleneksel KKK, Hızlı Terminal KKK, PID tip kayma yüzeyi üzerine temellendirilmiş İkinci Dereceden KKK ve ayrıca PID tip kayma yüzeyi üzerine temellendirilmiş İkinci Dereceden Hızlı Terminal KKK yaklaşımları bu tez

kapsamında tasarlanarak kullanılmakta olup, detaylıca analizlerin gerçekleştirilmesi ile sunulmaktadır. Bahsi geçen ve gerçekleştirilen tüm denemeler için rüzgar hızının doğasındaki doğrusal olmayan rastgele değişim göz önüne alınarak testler gerçekleştirilmiş olup, uluslararası saygın dergilerde yayın çalışmalarına da dönüştürülmüştür.

1.1. Tez Organizasyonu

Bu tezin kapsamı beş ana bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde, tezin kapsamı ve çalışılan konu üzerine bir giriş yapılmaktadır.

İkinci bölümde, rüzgar enerjisi ve REDS konfigürasyonları, MPPT algoritmaları, MPPT kontrolörleri, REDS'de kanat açı kontrolü, güç kalitesi ve kararlılığı üzerine detaylı olarak kaynak araştırması sunulmuştur.

Üçüncü bölümde, rüzgar enerjisi, rüzgar türbinleri ve çeşitleri, REDS ve konfigürasyonları, güç dönüşüm topolojileri ve kullanılan generatörler ve KMSG, REDS'ler için çalışma bölgeleri ve güç kontrolünde öncelikli olarak irdelenerek sunulmaktadır. Ardından, MPPT prensibi ifade edilerek, MPPT algoritmalarına ve kontrolörlerine detaylıca değinilmektedir. Bununla birlikte KKK tekniği ile tezde kullanılacak çeşitli tiplerinden, PSO tekniği ile yine yararlanılan iki türevinden ve son olarak da performans karşılaştırmaları amacıyla kullanılan indislere ilişkin bilgilere yer verilmiştir.

Dördüncü bölümde, KMSG temelli DH-REDS tasarımının ve maksimum güç eldesinin gerçekleştirilmesi sunulmaktadır. Ayrıca bu tez çalışmasında geliştirilip simülasyon ortamında geçerliliği test edilen MPPT algoritmaları ve kontrolör tasarımları detaylı olarak teorik esaslar eşliğinde verilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen tüm sonuçlar diğer kullanılan yöntemler ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Son bölümde ise elde edilen tüm sonuçlar yorumlanarak tartışılmakta ve ileride yapılabilecek çalışmalara bazı yönlendirmeler ve öneriler sunulmaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Rüzgar enerjisi ve güç üretim sistemleri hakkındaki literatür çalışmaları incelendiğinde, verimliliğe katkı sağlamak amacıyla; kullanılan rüzgar türbin çeşitleri, generatörler ve güç dönüştürücü topolojilerini içeren Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemi (REDS) konfigürasyonları, ve ayrıca rüzgar türbini generatör tork kontrolü, maksimum güçte çalışmayı sağlayacak MPPT algoritmaları ve belirlenen çalışma noktasına sistemi getirecek olan kontrolör tasarımları başta olmak üzere, rüzgar türbininin kanat açı kontrolü (pitch control) ve frekans regülasyonu için şebeke entegrasyonunun kontrolü üzerine çalışmaların başlıca yer tuttuğu görülebilmektedir.

Bu tez çalışmasında, kaynak araştırması ayrıntılı olarak dört alt bölümde sunulmuştur.

2.1. Rüzgar Enerjisi ve REDS Konfigürasyonları Üzerine Literatür Taraması

Temiz, sonsuz ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olan rüzgar enerjisi, pek çok ülkenin her geçen gün artan enerji ihtiyacını karşılamada çok uygun olduğunun anlaşılmasıyla; üzerine ciddi yatırımlar ve araştırmaların gerçekleştirilmesi ile özellikle son 20 yıl içerisinde dünya genelinde güçlü bir ivmeyle büyüme göstermektedir. Ancak tarihsel gelişimi için Eriksson ve ark. (2008)'nın çalışmasında bahsedildiği gibi, rüzgar enerjisinin çok uzun yıllar öncesinde bile bir enerji kaynağı olarak yelkenli taşımacılıkta kullanıldığı ve daha sonraları, kökeni M.Ö. yaklaşık 900'lü yıllarda Persler tarafından rüzgar değirmenleri kullanımının olduğu bilinmektedir. 20. yüzyılın başlarında ise elektrik üretimi için rüzgar türbinlerinin kullanımı hali hazırda geliştirilebilmiştir.

Günümüzdeki modern rüzgar türbinlerine gelindiğinde; (Ackermann, 2005; Hossain ve Ali, 2015) çalışmalarında, türbin çeşidi olarak yatay eksenli ve dikey eksenli olmak üzere uygulamada başlıca iki tip bulunuyorken, bunların dışında çok nadir görülen ve geleneksel olmayan birkaç tipinin de bulunduğu ancak şu andaki market payının büyük bölümünü çeşitli avantajları sayesinde üç kanatlı yatay eksenli rüzgar türbinlerinin oluşturduğu ifade edilmektedir. Günümüz türbinleri çalışma hızına bağlı yapısal durumu açısından akademik ve ticari uygulamalarda incelendiğinde; (Youssef ve ark., 2019)'nın da çalışmasında belirtildiği gibi, uygun konfigürasyonlarla sabit ve değişken hızlı olarak işletilebildiği lakin kurulu rüzgar türbinleri arasında ise yaygınca değişken hızlı çalışma ile enerji dönüşümünün gerçekleştirilebildiği görülebilir. Bunun

altındaki neden rüzgarın kendi doğasındaki rastgele değişimi ve akış kuvvetinin zaman içerisindeki değişiminden dolayı, değişken hızda çalışma ile MPPT kontrolü gerçekleştirilerek, REDS sisteminin verimliliğine katkı sağlanması ve daha çok enerji yakalama potansiyeline ulaşılmasıdır. İşte tam da bu noktada, rüzgar türbin sistemleri çalışma bölgelerinin önemi açığa çıkmaktadır. (Kumar ve Chatterjee, 2016; Asghar ve Liu, 2018)'nun çalışmalarında, değişken hızlı bir rüzgar türbininin çalışma bölgeleri 4 kısma ayrılarak özetle sunulmuştur. Rüzgar hızının alt değeri (cut-in)'den daha düşük ve üst değeri (cut-out)'dan daha yüksek koşulların türbin için uygun olmadığı ve ayrıca rüzgar hızı alt değeri ile nominal rüzgar hızı (rated) arasındaki bölge kısmi yük rejim bölgesi olarak bilinen ve MPPT kontrolünün gerçekleştirildiği bölge olarak ifade edilmiştir. Nominal üstü rüzgar hızından itibaren sınır üst değere kadar ise, kanat açı kontrolü gerçekleştirilerek güç sınırlandırılmasının yapılması vurgulanmıştır.

Diğer taraftan REDS konfigürasyonlarında, kullanılan generatörlerin çeşitli kategorilerde yer alabildiği, Sincap Kafesli Asenkron Generatör (SKAG), Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG), Rotoru Sargılı Asenkron Generatör (RSAG) ve Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatör (KMSG) gibi farklı tiplerde generatörlerin DH-REDS yapılarında sıklıkla tercih edildiği literatür çalışmalarında görülebilmektedir. Büyük ölçekli rüzgar çiftliklerinde ÇBAG'lerin, diğer yandan ise küçük ve orta ölçekli REDS'lerde KMSG'lerin tercih edilme sebepleri (Linus ve Damodharan, 2015; Yang ve ark., 2016) çalışmalarında da sunulmuştur. REDS'lerde kullanılan güç dönüştürücü topolojiler söz konusu olduğunda ise büyük ölçekli şebeke bağlantılı uygulamalarda peş-peşe dönüştürücü (back-to-back converter) ile generatörün akım ve torkunun kontrolünün esnek bir yol ile sağlanabildiği (Lee ve Kim, 2016)'in çalışmasında belirtilmiştir. (Beltran ve ark., 2012; Yang ve ark., 2016; Youssef ve ark., 2019; Sitharthan ve ark., 2020) gibi yazarlar çalışmalarında şebeke bağlantılı peş-peşe dönüştürücü topolojisini kullanmışlardır. Ayrıca bu tip dönüştürücülü KMSG'li REDS için ise (Bonfiglio ve ark., 2017) çalışmasında KMSG'nin sürekli durumda değerlendirmeleri de yapılmıştır. Lakin rotor konumunun tespiti için hız sensörüne gereksinimi olduğu ve vektör kontrolü için de, daha güçlü anahtarlama elemanları ve sensörlere ihtiyaç duyulması sebebiyle küçük ölçekli uygulamalar için dezavantajlar bulundurduğu belirtilmiştir. Diğer taraftan da verimlilik ve maliyetin ilgi odağı olduğu küçük ölçekli REDS'lerde ise, doğrultucu ve DC-DC dönüştürücü topolojilerinin avantajlı kalacağı (Lee ve Kim, 2016) çalışmasında ifade edilmiş olup anahtarlamalı mod doğrultucu topolojisini kullanmayı çalışmalarında tercih etmişlerdir. Literatürde

pek çok kişi, avantajlarından dolayı yükseltici tip DC-DC dönüştürücü topolojisinden yararlanmıştır. Bu noktada bazı araştırmacılar bir DC-bara veya DC mikro şebeke beslemesini, bazıları yük beslemesini gerçekleştiriyorken, bazılarının ise terminal uca gerilim kaynaklı inverter bağlayarak AC şebeke beslemesini de gerçekleştirdiği görülmektir. Çıkışına inverter bağlı olan doğrultucu ve yükseltici tip DC-DC dönüştürücülü topolojinin bir örneği (Xia ve ark., 2013)'nin çalışmasında yer almaktadır. Öte yandan, (Hui ve ark., 2015; Yin ve ark., 2015; Fathabadi, 2017; Yazici ve Yaylaci, 2017; Abdullah ve ark., 2018; Yazıcı ve Yaylacı, 2019) çalışmalarında, önerilen yaklaşımların geçerliliği yükseltici tip dönüştürücü topolojisi üzerinden yük beslemesinin gerçekleştirilmesi ile sağlanmaktadır. Diğer taraftan (Chen ve ark., 2016; Tiwari ve ark., 2017; Zammit ve ark., 2018) gibi çalışmalar da DC-bara veya mikro şebekesinin örneklerini teşkil etmektedir. (Nayanar ve ark., 2016)'ın çalışmasında ise, düşürücü tip DC-DC dönüştürücü kullanarak DC mikro şebekeyi beslemişlerdir. (Hussain ve Mishra, 2016)'nın çalışmasında, enerji transferindeki verimliliği göz önüne alındığında en yaygın olarak yükseltici tipteki dönüştürücünün kullanıldığı vurgulanarak, çıkış geriliminin giriş geriliminden yüksek olacağı sistemler için enerji transferine olanak sağlayacağı ifade edilmiştir. Lakin çıkış geriliminin giriş geriliminden düşük olacağı bazı sistem konfigürasyonları için alçaltıcı-yükseltici tip DC-DC dönüştürücünün daha makul olduğu vurgulanıp, bu tip dönüştürücüler arasından da SEPIC DC-DC dönüştürücünün daha iyi bir seçim olacağı düşünülerek kullanılmıştır.

Literatürde çalışılan bir başka konu da enerji depolama ve yönetim sistemleridir. Bir kısım çalışmalarda, bahsi geçen topolojilere bu sistemlerin de entegre edildiği görülebilmektedir. (Altin ve Eyimaya, 2018; Bajestan ve ark., 2019)'nin çalışmaları batarya destekli bu tipte çalışma konusuna örnekler olmaktadır.

Buraya kadar irdelenen çalışmalardan bir öz elde edilirse, tasarlanacak REDS'nin çalışma koşulları ve gerekliliklerinin güç dönüşüm topolojisinin seçiminde etken faktör olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, REDS'lerin şebekeye bağlantısının olup olmayacağı veya kullanıcının gerekliliğine göre uygun formda nasıl bir güç beslemesi tipinin sağlanacağı, çalışılan rüzgar türbininin tipi, kurulum bölgesindeki veya uygulama senaryosundaki rüzgar hızı değişiminin profili, alt ve üst rüzgar hızları için türbinden yakalanabilecek güçlerin aralığının tespit edilmesi ve ayrıca bu aralık için dönüştürücü tipinin verimlilik ve maliyet unsurları çerçevesinde uygunca seçilmesi önem arz etmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, tasarım kriterleri detaylıca

değerlendirildiğinde, doğrultucu ve yükseltici tip DC-DC dönüştürücüden oluşan güç dönüştürme topolojisini içeren KMSG'li DH-REDS üzerinde çalışmanın daha uygun olacağı düşünülerek bu tez için seçilmiştir.

2.2. MPPT Algoritmaları Üzerine Literatür Taraması

MPPT algoritmaları, güç yakalaması amacıyla rüzgar gücü üretim sistemlerinden önce fotovoltaik (PV) sistemlerde fazlaca kullanılmıştır. (Kulaksız ve Akkaya, 2012; Kulaksiz ve Aydoğdu, 2012; Radjai ve ark., 2015; Macaulay ve Zhou, 2018)'nin çalışmalarının bu konularda literatüre yer ettiği görülebilir ki bu çalışmaların temellendirildiği P&O, FLC temelli değişken adım büyüklükle P&O ve YSA temelli yaklaşımlar PV sistemlerdeki kullanımının sadece birkaç örneğidir.

Rüzgar enerjisinde MPPT çalışma üzerine literatür incelendiğinde, PV sistemlerdeki kullanıma benzerce, pek çok çeşit metodolojiden yararlanılabildiği görülebilmektedir. Bu konuda, (Kumar ve Chatterjee, 2016; Kumar ve ark., 2018; Novaes Menezes ve ark., 2018)'nın yaptığı literatür değerlendirmelerinin detaylıca irdelenmesi oldukça faydalı olacaktır. Bu çalışmalarda; rüzgar türbinlerinde kullanılan generatörler, türbin kanat açı kontrolü, MPPT stratejileri ve kontrol teknikleri başta olmak üzere son yıllardaki rüzgar türbin sistemlerindeki gelişmeler ve çevresel konuları içeren sürdürülebilir enerjinin geleceği hakkındaki düşüncelere yer verilmektedir.

Rüzgar türbin sistemlerinde, MPPT vasıtasıyla maksimum gücün yakalanması konusunda; verimlilik, düşük maliyet ve güç kalitesi en önemli noktaları oluşturuyorken, bazı avantaj ve dezavantajları da beraberinde getirir. Bu yüzden geleneksel veya yeni, modifiye edilmiş, yapay zeka destekli veya hibritleştirilmiş çeşitli MPPT metotlarının literatürde önerildiği görülebilir. Bunlardan; Artımlı İletkenlik (Incremental Conductance, IC), P&O ve türevleri, Optimum İlişki Temelli (Optimum Relation Based, ORB), Uç Hız Oranı (Tip Speed Ratio, TSR), Optimal Tork Kontrol (Optimal Torque Control, OTC) ve Güç Sinyali Geri Besleme (Power Signal Feedback, PSF) yöntemleri MPPT metotlarının bir kısmını teşkil etmektedir.

ORB temelli yöntemin birkaç örneği (Xia ve ark., 2013; Abdullah ve ark., 2018)'nin çalışmalarında görülebilir. Bu yöntemde MPPT'yi gerçekleştirmek için V_{dc}^2 ve I_{dc} arasında lineer bir ilişki kurulmaktadır. Xia ve ark. (2013) teorik, simülasyon ve deneysel ortamda geçerliliğini doğruladıkları yaklaşımın; geleneksel P&O gibi yöntemlere göre hız ve verimlilik gibi de avantajlar sunduğunu belirtmişlerdir. Barakati

ve ark. (2009) çalışmasında, SKAG ve matris dönüştürücü içeren bir rüzgar türbin sisteminde MPPT kontrolünü gerçekleştirmek amacıyla P&O ve PSF metotlarını araştırmıştır. Önerdikleri mekanik hız sensörsüz PSF yönteminde; değişken rüzgar hızı profili altında dahi başarılı bir izlemenin sürdürülebildiği belirtilmiştir. Ayrıca Nasiri ve ark. (2014) çalışmasında, KMSG temelli REDS'ler için TSR ve OTC yöntemlerinin karşılaştırması, modellemeler ve analizler sunulmuştur. TSR yönteminin rüzgar hızı değişimlerine keskin bir şekilde, hızlıca tepki verdiği ve daha iyi bir izlemeyi garanti ettiği görülebiliyorken, OTC'nin ise güç yumuşatma ve daha yüksek güç elde edebilme ile verimlilik açısından daha performanslı olabileceği sonucuna ulaşılmaktadır. P&O yöntemi, büyük ve orta güçlü rüzgar türbin sistemlerinde kullanıldığı zaman, hızlı değişim gösteren rüzgar koşulları altında, MPPT aramasında tepe noktasına ulaşırken yavaş tepki göstererek sonuçları kötüleştirdiğine de literatürden ulaşılabilmektedir. Bu durum göz önüne alındığında adım büyüklüğünün optimum olarak ayarlanması gerektiği ve küçük adım büyüklüğünde algoritmanın işletilmesi ile tepe noktasının uzun bir zamanda yakalanması söz konusu olacağından MPPT verimini düşürmektedir. Diğer yandan büyük adım büyüklüğünde algoritmanın işletilmesinde ise, tepe noktası etrafında salınım oluşup sistem veriminin kötüleşeceği anlaşılabilmektedir. Literatür çalışmalarından, bu işleyişin optimum ayarlanmasının zor bir görevi teşkil edeceğine de ulaşılabilmektedir. Bu düşünceyi Lee ve Kim (2016) yaptıkları çalışmada desteklemektedir.

Literatürde Bulanık Mantık Kontrol (Fuzzy Logic Control, FLC) ve Yapay Sinir Ağı (Artificial Neural Network, YSA) temelli MPPT yöntemleri de görülebilmektedir. Göreceli olarak karmaşık olmasına rağmen izleme doğruluğu ve kesinliğini artırmak için parametreler kolayca değiştirilebildiğinden dolayı adapte olabilme yeteneğine sahip olabilirler (Aydoğdu ve Akkaya, 2011). Lee ve Kim (2016) çalışmasında, anahtarlamalı mod doğrultucuyu içeren değişken hızlı küçük ölçekli rüzgar enerjisi sistemi için sensörsüz bir MPPT tasarımı önerilerek simülasyon ve deneysel olarak geçerliliği test edilmiştir. Çalışma oranının değiştirilmesi ile MPPT işleyişi sağlanıyorken, sabit adımlı P&O ve FLC temelli değişken adımlı P&O algoritması kullanılarak karşılaştırmalar da sunulmuştur. Önerilen sistemin geleneksel sisteme kıyasla daha ekonomik ve etkili olduğu belirtilmiştir. Ayrıca Liu ve ark. (2017a) çalışması ise, KMSG temelli küçük ölçekli REDS için; histerezis kontrol yapılı dört farklı MPPT yöntemiyle oluşturulan kontrol stratejilerinin geçerli kılınması amacıyla önerilmiştir. MPPT yöntemleri; doğrudan yöntem olan üç farklı P&O algoritması (sabit adımlı P&O, Newton Raphson

temelli değişken adımlı P&O ve FLC temelli değişken adımlı P&O) ve dolaylı yöntem (Look Up Table, LUT)'ndan oluşturulmuştur. Optimum çalışma eğrilerinden elde edilen şaft hızı ile DC bara voltajı arasındaki ilişki LUT içerisindedir. İki adet ideal ve bir adet hızlı değişim gösteren rüzgar hızı profili oluşturularak bir test düzeneği üzerinde çalışılmış olup, LUT temelli MPPT yöntemiyle daha performanslı bir sonuca ulaşılabildiği belirtilmiştir. Diğer taraftan ise doğrudan FLC üzerinden de MPPT arayışı gerçekleştirilebilir ve Yin ve ark. (2015) çalışması bunun bir örneğini teşkil etmektedir. Burada FLC'nin girişleri yükseltici tip DC-DC dönüştürücünün girişinden ölçülen güçteki değişim ΔP_{dc} ve akımdaki değişim ΔI_{dc} olup çıkışı ise V_{dc_opt} olarak belirlenmiştir. Üyelik fonksiyonlarının ve kural tablosunun işleyişinin uygunca belirlenmesi ile FLC temelli MPPT yaklaşımı tasarlanmıştır. (Lee ve Kim, 2016)' in çalışmasında ise FLC'nin giriş değişkeni olarak dönüştürücüdeki çıkış gücü ΔP ve referans çalışma oranındaki değişim ΔD alınırken, çıkış değişkeni ise bulanık çalışma oranındaki değişim olarak ΔD_{fuzzy} belirlenmiş olup geri ve ileri beslemelerden oluşan bir kontrolör yapısı oluşturulmuştur. Diğer yandan, Wei ve ark. (2016) KMSG tabanlı değişken hızlı REDS'ler için YSA tabanlı takviyeli öğrenmeli (Reinforcement Learning, RL) MPPT algoritması önermektedirler. YSA ve Q-Öğrenme (Q-Learning) yöntemi, KMSG 'nin rotor hızı ile çıkış gücü arasındaki optimum ilişkiyi öğrenmek için birleştirilmiştir. Farklı rüzgar profilleri altında, önerilen yapı ve geleneksel P&O metodu ile üretilen güçler üzerine karşılaştırmalar da yapılmaktadır. Öğrenme yeteneğine sahip önerilen bu algoritma yapısının, türbin yaşlanmaları gibi parametrik değişimlerde de başarılı sonuç verebileceği ifade edilmiştir.

MPPT arayışı üzerine literatürde karşılaşılan diğer bir çalışma konusunun, optimizasyon yöntemlerinin MPPT metotlarına entegre edilmesi olduğudur ve aşağıdaki çalışmalar örneklerini teşkil etmektedir. Abdullah ve ark. (2018) çalışmasında, Parçacık Sürü Optimizasyon (Partical Swarm Optimization, PSO) algoritması ile ORB yöntemi birleştirilerek OTC ve ORB yöntemleriyle rüzgar hızı profilleri için karşılaştırmalar yapıldığında, optimizasyon entegrasyonu ile verimliliğe bir artışın sağlandığı ifade edilmiştir. Yine, yapay zeka destekli hibrit bir MPPT yaklaşımı Sitharthan ve ark. (2020) çalışmasında önerilmiştir. Burada, Radyal Temelli Fonksiyon Sinir Ağı (Radial Basis Function Neural Network, RBFNN) ve modifiye edilmiş PSO optimizasyon algoritması entegrasyonu ile TSR yöntemi işletilmektedir. Bu çalışma ile TSR yöntemi için gerekli duyulan rüzgar hızı sensörüne gereksinim ortadan kalkmaktadır.

Literatürde önem arz eden başka bir konu daha vardır ki tezin ilerleyen kısımlarında da yer verilmektedir. REDS'lerde, geleneksel MPPT yaklaşımları kullanılarak maksimum türbin çıkış mekanik gücünün eldesi söz konusuyken, Fathabadi (2017)'nin çalışmasında ise, farklı bir bakış açısı oluşturularak, maksimum elektriksel çıkış gücünün elde edilmesi fikri literatüre katılmıştır. Bu çalışmada, izoleli yüksek verimli özel bir yükseltici tip DC-DC dönüştürücünün eşlik ettiği KMSG'li REDS için Maksimum Elektriksel Güç Takibi (MEPT) fikri önerilmiştir. Daha büyük MPPT verimliliği ve daha kısa sürede yakınsama performansı sunan iki adet MPPT ve MEPT algoritması hem simülasyon hem de deneysel olarak test edilmiş olup ani rüzgar değişimlerinde dahi başarılı olacağı ifade edilmiştir.

Buraya kadarki literatür araştırmasına istinaden bu tez kapsamında; P&O, değişken adımlı P&O, TSR, PSF ve ORB MPPT algoritmaları irdelenmiştir. Diğer taraftan maksimum mekanik gücün yakalanması ve maksimum elektriksel gücün yakalanması konusunda gerçekleştirilen çalışmalar da tezin ilerleyen kısımlarında sunulmaktadır. Ayrıca bu tez çalışması içerisinde, Kaotik-PSO Türevleri (Chaotic PSO derivatives)'nden olan Kaotik Dinamik Ağırlıklı-PSO (Chaotic Dynamic Weight, CDW-PSO) ve Gauss Haritası Temelli-Kaotik PSO (Gauss Map Based Chaotic, GM-CPSO) optimizasyon yöntemlerinin ORB yöntemi ile hibritleştirildiği; iki adet yeni bir tümleşik maksimum elektriksel güç yakalama çerçevesi de önerilmektedir. Bu önerilen yöntem ile optimizasyon desteğinin sayesinde ORB metodunun performansına katkı da sağlanmıştır.

2.3. MPPT Kontrolörleri Üzerine Literatür Taraması

REDS için MPPT algoritmalarıyla belirlenen referans sistem çalışma noktasına sistemi getirecek olan kontrolör tasarımı konusu araştırıldığında, literatürde son zamanlarda çeşitli metotların kullanıldığı tespit edilmiştir. Bunlar; doğrusal kontrol teorisi, zeki kontrol teorisi ve doğrusal olmayan kontrol teorisi olarak başlıca üç sınıfa kategorize edilebilir.

MPPT kontrolörü olarak özellikle tasarımlarının basit ve yalın olmasından dolayı PI (oransal-integral) veya PID (oransal-integral-türev) tipte kontrolörlerin kullanılabildiği görülmektedir. Ayrıca dinamik performanslarını geliştirmek amacıyla bu kontrolörlerin parametreleri de bazen çeşitli optimizasyon teknikleri ile optimize edilmiştir. Yang ve ark. (2018b) çalışmasında, KMSG'li REDS'de PID kontrolörler

kullanılmış olup bu kontrolörlerin parametreleri meta sezgisel bir yaklaşım olan Demokratik Ortak Operasyonlar Algoritması (Democratic Joint Operations Algorithm, DJOA) ile optimize edilmiştir. Bu çalışmada, DJOA ile elde edilen sonuçlar Genetik Algoritma (Genetic Algorithm, GA) ve PSO'nun yanı sıra çeşitli optimizasyon metotlarıyla karşılaştırılarak kapsamlı analizi gerçekleştirilmiştir. Kademeli değişimli, düşük türbülanslı rastgele değişimli ve yüksek türbülanslı rastgele değişimli üç farklı rüzgar profilinde de önerilen yöntemin daha etkin çalıştığı gösterilmiştir. Diğer bir yandan, Mokhtari ve Rekioua (2018)'nın çalışmasında ise MPPT amacıyla kullanılan PI kontrolörün parametreleri Karınca Kolonisi Optimizasyonu (Ant Colony Optimization, ACO) algoritması kullanılarak belirlenmiştir. Lakin doğrusal sistemler ve sınırlı aralıkta çalışan sistemler için bu tip kontrolörler başarılı sonuçlar üretebilmesine rağmen REDS gibi yüksek derecede doğrusalsızlık içeren bir karaktere sahip ve geniş rüzgar hızı bandında çalışan sistemlerde çoğu zaman başarılı sonuçlar veremez. Bu durum; rüzgar türbinlerinin aerodinamiği, güç dönüştürücülerinin karakteristiği ve rüzgar akışının doğasındaki kesikli-rastgele oluştan dolayı oldukça doğrusal olmayan bir davranışın sonucudur (Yang ve ark., 2019). Bundan dolayı daha etkin sonuçlara ulaşılabilmek için bazı çalışmalarda MPPT metotlarından elde edilen referansa sistemi getirebilmek için FLC, PSO ve YSA üzerine temellendirilmiş zeki kontrol metotları önerilmiştir. Ancak zeki yöntemler; hafıza gereksinimi, matematiksel işlem yoğunluğu, uzman bilgisi, ön bilgi gereksinimi ve öğrenme süresi gibi bazı dezavantajları da barındırmaktadır.

Literatürde Geri Adımlama Yaklaşımı (Backstepping Approach) ve Kayan Kipli Kontrol (KKK) tekniklerini temel alan çeşitli doğrusal olmayan kontrol yöntemleri ve türevlerinin, REDS'lerde kullanılmak üzere araştırmacılar tarafından irdelendiği görülmektedir. Wang ve ark. (2018a)'nın çalışmasında, çift döngülü geri adımlama yaklaşımı ile TSR kontrolü yüksek güçlü REDS'ler için önerilmiş olup geçerliliği simülasyon ortamında türbülanslı rüzgar hızı profilinde test edilerek doğrulanmıştır. Ayadi ve Derbel (2017)'in çalışmasında ise doğrusal olmayan adaptif geri adımlama kontrol yaklaşımı KMSG'li REDS için benimsenmiştir. Önerilen yaklaşım, parametrik belirsizliklere ve yük torkundaki bozucu etkilere karşı hassas olduğu ifade edilerek, PI ve geri adımlama yaklaşımı karşılaştırmalar yapılarak simülasyon ortamında geçerliliği test edilmiştir. Ayrıca Wang ve ark. (2019)'nın çalışmasında da, yüksek güçlü KMSG'li REDS'ler için adaptif geri adımlama yaklaşımı önerilmekte olup, stator gerilimlerinin *d*

ve q bileşenlerinin bu yöntemle kontrol edildiği ve stabilitesinin sunulması ile simülasyon ortamında gerçekleştirildiği görülebilir.

Diğer bir yandan ise geçmişte de elektrik motorları, robotik, havacılık ve uzay gibi alanlarda da başarıyla kullanılabilmiş KKK teorisi üzerine gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde; parametrik değişimlere ve bozucu etkilere karşı etkili ve doğrusal olmayan bir yöntem olan KKK metodunun gayet yüksek performanslı sonuçlara ulaşabildiği tespit edilebilmektedir (Durdu ve Dursun, 2019). Literatürde hız, tork, gerilim ve akım gibi çeşitli kontrol parametreleri üzerinden KKK yöntemleri aracılığıyla REDS sistemlerinin kontrollerinin de gerçekleştirildiği görülebilmektedir. Ayrıca sürekli durum hatasını bastırmak amacıyla KKK yöntemine integral terimlerinin eklenmesiyle ortaya çıkan integral KKK ve çift integral KKK (Double Integral-Sliding Mode Control) yöntemleriyle de karşılaşılabilmektedir.

Literatürdeki integral KKK ve çift integral KKK tekniklerin güncel REDS uyarlamaları ise bu kısımda derlenmektedir. Yin ve ark. (2015)'in çalışmasında FLC ile belirlenen optimum DC taraf gerilimini daha az sürekli hal hatası ile izleme sağlamak ve MPPT kontrolünü gerçekleştirmek için yükseltici tip DC-DC dönüştürücünün dinamiği üzerinden ilerlemek suretiyle integral KKK üzerine temellendirilen gerilim kontrolörü tasarlanmıştır. Önerilen yaklaşım, simülasyon ortamında ve deneysel olarak test edildiğinde; geleneksel kontrol yaklaşımına göre daha kesin izleme sağlayıp daha yüksek güç yakalamaya olanak sunabildiği belirtilmiştir. Saravanakumar ve Jena (2015) çalışmasında ise üç kanatlı değişken hızlı değişken kanat açı kontrollü bir REDS için optimal gücün kontrol edilmesinde tork kontrolörü olarak integral KKK yöntemi kullanılmıştır. Diğer taraftan ise Yazici ve Yaylaci (2017)'nin çalışmasında, üç fazlı kontrolsüz doğrultucu ve yükseltici tip DC-DC dönüştürücüden oluşan KMSG temelli REDS sistemi için MPPT kontrolörü tasarlamak amacıyla yeni bir ayrık zamanlı erişim kuralı ve ayrık zamanlı bir integral terminal KKK yaklaşımı önerilmiştir. Bu kontrolör vasıtasıyla yükseltici tip dönüştürücünün anahtarlama sinyali üretilerek çalışma deneysel ortamda doğrulanmıştır. MPPT algoritması olarak da TSR yöntemi benimseniyorken, farklı rüzgar hızları için voltaj dalgalanması ve yerleşme zamanı kriterleri bakımından önerilen yöntem sayesinde geleneksel-KKK ve P&O yaklaşımlarına göre daha etkin sonuçlara ulaşıldığı ifade edilmiştir. Ayrıca yazarların diğer bir çalışmasında (Yaylacı ve Yazıcı, 2018), mekanik sensörsüz bir MPPT yaklaşımı üzerinden belirlenen çalışma noktasına çift integral KKK yaklaşımı kullanılarak yükseltici tip DC-DC dönüştürücünün anahtarlaması ile MPPT çalışma

gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ortamında önerilen yaklaşım test edilerek sunulmuştur. Yin ve ark. (2020)'nın çalışmasında Yinelemeli Sinir Ağı (Recurrent Neural Network, RNN) temelli adaptif integral KKK yöntemi rüzgar güç sistemlerinde güç maksimizasyonu amacıyla önerilmiştir. Önerilen yapıda; belirsizlik içeren rüzgar türbin dinamiklerini tanımlamada kullanılan RNN yapısı aracılığıyla optimum türbin dönüş hızı belirlenerek, integral KKK üzerinden de bu referans takip ettirilmektedir. Bu sayede mekanik sensör gereksinimi olmadan bir işleyişin yanı sıra sürekli durum izleme hatası da önemli ölçüde düşürülmektedir. MPPT algoritması olarak TSR temeli üzerine işleyiş oluşturulmuştur. RNN'nin girişleri çalışma hızı ve generatör gücü, çıkışı ise belirsizliklerin toplamı olarak düşünülmüştür. Kontrolör çıkışından *d, q* ve *α, β* dönüşümleri üzerinden uzay vektör-PWM (Space Vector Pulse Width Modulation) aracılığıyla generatör tarafı dönüştürücü kontrol edilerek MPPT çalışma gerçekleştirilmektedir.

Diğer bir yandan; ikinci dereceden-KKK yöntemini de kapsayan yüksek dereceli KKK yöntemi, daha iyi bir performans ve yumuşak bir kontrolü sağlamak amacıyla kullanılabilmektedir. REDS sistemlerinin verimliliğine katkı sağlamak amacıyla literatürdeki uyarlamaları ise buradaki gibi derlenebilir. Beltran ve ark. (2012)'nın çalışmasında ise ÇBAG temelli REDS'ler için optimum tork izlettirilerek MPPT'yi sağlamak amacıyla tork kontrolörü olarak kullanılmıştır. Weng ve Hsu (2015)'nun çalışmasında ise ÇBAG temelli REDS'de akım regülatörü olarak kullanılmıştır. Sabit katsayılı bir PI regülatörden daha dayanıklı olduğu simülasyon çalışması ile ispat edilmiştir. Liu ve ark. (2017b) simülasyon çalışmasında, rotor hızını en uygun şekilde izleyerek peş-peşe dönüştürücü içeren topolojide güç üretimini en üst düzeye çıkarmak ve rotor akımını kullanarak stator reaktif gücünü düzenlemek amacıyla İkinci Dereceden KKK yöntemini kullanmışlardır. PID kontrol ve geleneksel (birinci dereceden) KKK karşılaştırma yapıldığında, daha dayanıklı olduğu ve çatırtının neredeyse elimine edildiği vurgulanmıştır.

Doğrusal bir kayma yüzeyinden yararlanarak tasarlanan geleneksel KKK'da sürekli durum hatası ve çatırtının oluşması gibi istenmeyen bazı durumlar açığa çıkabilir ve izleme hatasının yakınsamasına sonlu zamanda da erişilemediği durumlara literatürden ulaşılabilir. Bu sebeple sonlu zamanda yakınsama amacıyla doğrusal olmayan kayma yüzeyine sahip terminal KKK geliştirildiği görülebilir. Lakin yüzeyde kesirli fonksiyon kullanılmasından dolayı, içsel tekillik (intrinsic singularity) problemi açığa çıkar ve bu problem ise Hızlı Terminal KKK ile çözülebilir. Yazıcı ve Yaylacı

(2019)'nın çalışmasında, KMSG temelli REDS'lerde verimlilik artışının sağlanması amacıyla ayrık zamanlı integral terminal KKK yaklaşımını sensörsüz bir MPPT metodunu deneysel bir test düzeneğinde işletmişlerdir. Adım tipteki rüzgar değişimleri altında önerilen yöntem PI kontrol ile karşılaştırıldığında yerleşme zamanı ve verimlilik kriterlerine göre daha üstün sonuçların elde edildiği ifade edilmektedir. Bu konuda hatta ikinci dereceden bir Hızlı Terminal KKK yönteminin REDS uyarlamasına da rastlanabilir. Abolvafaei ve Ganjefar (2019) ise rüzgar türbinleri ikinci çalışma bölgesinde işletiliyorken, mekanik stresin azaltılmasını ve maksimum rüzgar gücü yakalanmasını garanti etmek amacıyla PID kayma yüzeyini içeren İkinci Dereceden KKK ve İkinci Dereceden Hızlı Terminal KKK yöntemleri generatör hız kontrolü üzerine odaklanarak tasarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar irdelendiğinde önerilen her iki yaklaşımın da karşılaştırma yapılan yaklaşımlardan daha iyi performans sergilediği ifade edilmiştir.

KKK'nın bahsedilenlerin haricinde de farklı birkaç uyarlamasının daha literatür çalışmalarında yer aldığı tespit edilebilmiştir. Bunlardan birisi de Hu ve ark. (2019)'nın çalışmasıdır ve KMSG temelli REDS'de MPPT kontrolünün sağlanması amacıyla Kayan Kipli Ekstremum Arama Kontrolü (Sliding Mode Extremum Seeking Control, SMESC) önerilmiştir. Ayrıca SMESC kontrolörün parametreleri de Geliştirilmiş Yabani Ot Optimizasyon (Improved Invasive Weed Optimization, IIWO) algoritması ile optimize edilerek, simülasyon ortamında testleri gerçekleştirilmiştir. Diğer birisi olan Yang ve ark. (2018a)'nın çalışmasında ise, ÇBAG içeren REDS'lerde optimal güç yakalamayı sağlayacak bir Pertürbasyon Gözlemci Tabanlı KKK (Perturbation Observer Based Sliding Mode Control, POSMC) tasarlanmış olup dört farklı senaryo eşliğinde simülasyon testleri gerçekleştirilerek vektör kontrol, Geri Beslemeli Doğrusallaştırmalı Kontrol (Feedback Linearization Control) ve KKK arasında performans indislerine göre karşılaştırmaları da sunulmaktadır. Ayrıca yazarlar başka bir çalışmasında Yang ve ark. (2019), benzer bir bakış açısıyla KMSG'li sistemlerde MPPT sağlanması amacıyla Pertürbasyon Kompanzasyonu Temelli KKK (Perturbation Compensation Based Sliding-Mode Control, PCSMC) yöntemini önermişlerdir.

Bu kısımdaki MPPT kontrolörü üzerine gerçekleştirilmiş çalışmalar değerlendirilerek tez kapsamında KKK metodunun çeşitli türevlerinin irdelenmesi ve MPPT izlemesinde bir iyileştirmenin gerçekleştirilmesi sayesinde MPPT verimliliği ve dolayısıyla sistem verimliliğine bir faydanın sağlanması amaçlanmaktadır. Bu yüzden; bu tezde Geleneksel KKK, Hızlı Terminal KKK, İkinci Dereceden KKK ve İkinci

Dereceden Hızlı Terminal KKK yöntemleri ele alınmıştır. Doğrultucu ve yükseltici tip DC-DC dönüştürücüden oluşan güç dönüştürme topolojisini içeren KMSG'li DH-REDS sisteminde çeşitli MPPT algoritmaları ile belirlenen maksimum güçlerin elde edileceği referans dönüştürücü çalışma gerilimlerine sistemi getirebilmek amacıyla MPPT gerilim regülatörleri tasarlanmıştır. Gerilim modlu İkinci Dereceden KKK ve İkinci Dereceden Hızlı Terminal KKK yöntemlerinin bahsi geçen topolojide gerilim regülatörü olarak önceden kullanılmadığı da tespit edilmiştir. Bu yüzden özellikle bu iki doğrusal olmayan yöntemin REDS'lerde bir uyarlaması hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen tasarımlar ve çalışmaların sonucunda ise İkinci Dereceden KKK ve İkinci Dereceden Hızlı Terminal KKK yöntemlerinin kullanılması ile MPPT sistem verimliliğine katkı da sağlanmıştır.

2.4. REDS'de Kanat Açı Kontrolü, Güç Kalitesi ve Kararlılığı Üzerine Literatür Taraması

Literatür araştırmalarıyla ulaşılan başka bir önem arz eden konu başlığı ise değişken hızlı rüzgar enerjisi üretim sistemlerinde kanat açısının kontrolü ve öte yandan güç kalitesi ve kararlılığı konuları üzerine çalışmalar oluşturmaktadır.

(Chiang, 2011; Novaes Menezes ve ark., 2018) çalışmalarında REDS'lerde nominal üstü rüzgar hızı bölgelerinde çalışıldığında türbin gücünün nominal değerine sınırlandırılması gerekliliği, kanat açı kontrolünün geçmişte ve günümüzde nasıl yapılabildiği hakkında bilgilere yer verilmiştir. İlkel türbin sistemlerinde sabit kanat açılı tasarım yapılarak güç sınırlamasının pasif durdurma kontrolü (passive stall control) ile gerçekleştirildiği; daha modern türbin sistemlerinde ise elektrikli veya hidrolik kanat hareketlendiricilerin tasarımıyla aktif kanat açı kontrolü gerçekleştirilmektedir.

Literatürde aktif kanat açışının kontrolünün gerçekleştirildiği birkaç çalışma burada sunulmaktadır. Colombo ve ark. (2020)'nın çalışmasında; değişken rotor hızlı-değişken kanat açı kontrollü rüzgar türbinlerinde nominal üstü rüzgar hızı bölgelerinde çalışıldığında türbin gücünün sınırlandırılması işleminde, karakteristiksel olarak oluşabilecek türbinlerdeki belirsizliklerin göz önüne alındığı ve bahsi geçen sabit nominal değere rotor hızını düzenleyerek ulaşmada kanat açısının kontrolünün dayanıklı bir KKK yöntemini kullanarak gerçekleştirdikleri ifade edilmektedir. Ayrıca Ayadi ve ark. (2015) da kanat açı kontrolü için KKK tekniğini kullanmışlardır. Dahbi ve ark. (2016)'nın çalışmasında ise bahsi geçen problemin çözülmesi için yapay sinir ağları

(YSA) temelli bir yaklaşıma odaklanılmaktadır. (Lin ve ark., 2011) çalışmasında ise çevrimiçi (online) eğitimli yüksek performans bir Radyal Temelli Fonksiyon Ağı (RBFN) kullanılarak türbinin kanat açı kontrolünün gerçekleştirildiği görülebilmektedir. Daha önceki uygulamalarda ise, Uehara ve ark. (2011) çalışmasından da görülebileceği üzere, basitçe bir PI kontrolör tasarlanması aracılığıyla kanat açı kontrolü gerçekleştirilmektedir.

Rüzgar türbinlerinin güç üretim sistemlerine entegrasyonu göz önüne alındığında ise rüzgarın rastgele ve değişken doğasından kaynaklı olarak güç kalitesi ve kararlılığı konusunun çalışılması gereken önemli bir diğer başlığı içerdiği literatür çalışmalarında tespit edilebilir. Çünkü güç sistemlerindeki kararlılık, nominal frekansın düzenlemesini de kapsar. Literatürdeki bazı araştırmacıların reaktif güç kompanzasyonu ve gerilim kontrolü üzerine (Das ve Subudhi, 2018), bazı araştırmacıların ise rüzgar gücünün şebekeye entegrasyonunun her geçen gün artması ile de frekans kararlılığının sağlanması konusunda çalıştığı tespit edilebilmektedir (Choi ve ark., 2016). Lakin tez kapsamında şebeke bağlantısız bir REDS sistemi üzerine odaklanıldığı için belirtilen konular tez kapsamının dışında kalmaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, ilk olarak rüzgar enerjisi, rüzgar enerjisinin kurulu güç kapasitesi bakımından Türkiye ve dünyadaki güncel durumu ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre kurulu güçler açısından karşılaştırma yapılması üzerine bilgiler aktarılmaktadır. Ardından, rüzgar enerjisi temelli güç üretim sistemlerinde kullanılan rüzgar türbini çeşitlerinden ve yıllara göre türbin güç kapasitesinin gelişiminden bahsedilmektedir. Daha sonrasında ise modern Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemleri (REDS)'nin konfigürasyonları, kullanılan generatörler, güç dönüşüm topolojileri, güç kontrol tekniklerine yer verilmiş olup, REDS'lerden maksimum gücün elde edilmesi konusunda MPPT algoritmaları ve kontrolörleri ve ayrıca optimizasyon konusu detaylıca ele anılarak sunulmaktadır.

3.1. Rüzgar Enerjisi

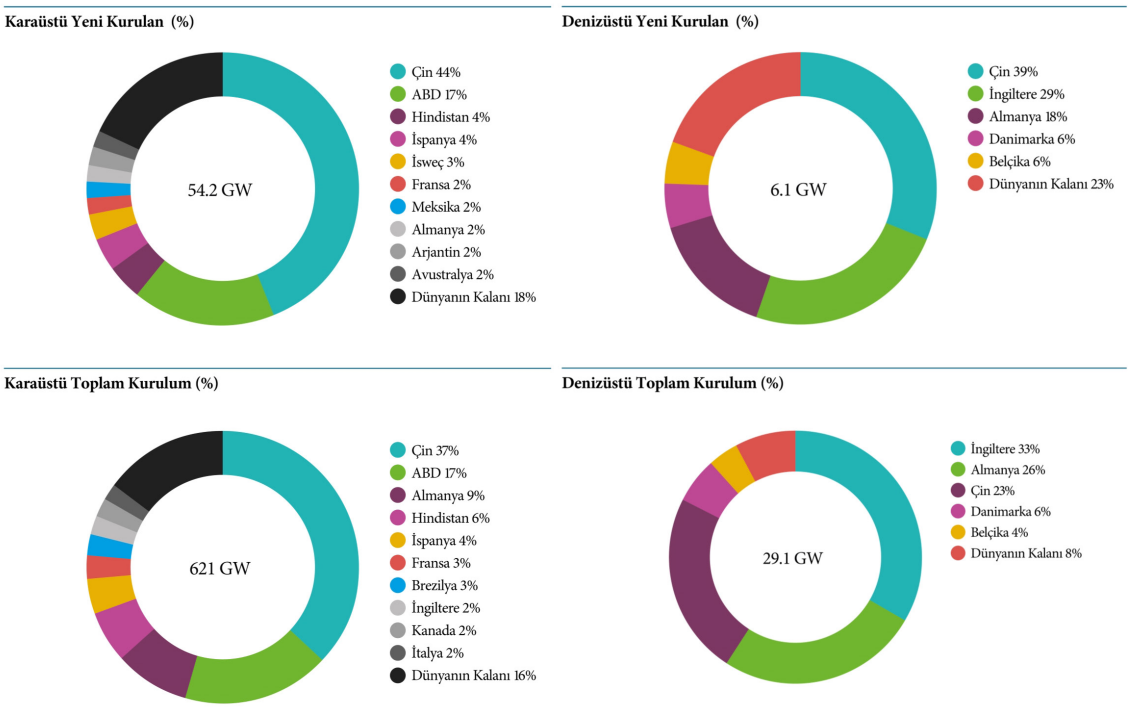
Dünyanın enerji tüketiminin yaklaşık %79.7'sinin fosil yakıtlardan yararlanılarak karşılandığı ve yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam enerji tüketiminin karşılanabilmesindeki payının %18.1 seviyelerinde olduğu öngörülmektedir (REN21, 2019). Her geçen gün artan dünya nüfusuna ve teknolojideki gelişimlere bağlı olarak enerji tüketiminin artması da muhtemel bir gerçektir. Enerji ihtiyacının karşılanmasında fosil yakıtların kullanımından kaynaklı olarak her yıl milyonlarca ton karbondioksit gazının atmosfere salınması ile ciddi bir çevre kirliliği ve iklimsel değişiklikler açığa çıkmaktadır. Sadece bu da değil, bu kaynakların miktarının sınırlı olması ve gün geçtikçe tükenmesi de diğer bir kaygı unsurunu oluşturmaktadır. Bu konuya çözüm bulmak amacıyla ülkeler enerji üretiminde ciddi politik hamleler yaparak elektrik güç üretim sistemlerine yenilenebilir enerjinin daha çok katılımını planlamaktadır. Bu noktada önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olan rüzgar enerjisi, temiz, sonsuz ve çevreye kalıcı etkisi olmayan bir enerji kaynağı olarak özellikle son 10 yılda artan bir ilgiye ev sahipliği yapmaktadır.

Rüzgar; dünyanın dönüşü, sıcaklık ve basınç farklılığından açığa çıkan hava hareketi olarak yorumlanabilmektedir. Rüzgarın bu akışıyla döndürme gücünden yararlanılarak rüzgar gücü ve enerjisi elde edilebilir. Diğer taraftan, iklimsel koşullara bağlı olarak rüzgarın akış yönü ve hızı değişken olduğundan rüzgar enerjisi de kesikli ve rastgele bir doğaya sahiptir. Rüzgar enerjisinin elektrik güç üretiminde

kullanılabilmesi konusunda iki farklı rüzgar gücü üretim sisteminin kurulum yaklaşımı vardır. Bunlar kara üstü (onshore) kurulum ve deniz üstü (offshore) kurulumlardır. Bu konuya ilişkin daha detaylı bilgiler tezin ilerleyen kısımlarında sunulacaktır.

3.1.1. Rüzgar enerjisinin dünya ve Türkiye'deki güncel durumu

Global Rüzgar Enerjisi Konseyi'nin en son yayımlamış olduğu yıllık global rüzgar raporu (GWEC, 2019)'na göre, dünya genelinde şuan bilinen güncel kurulu rüzgar gücünün ülkelere göre market payları Şekil 3.1'deki gibi gösterilebilmektedir. Bu grafikte market payının kara üstü ve deniz üstü olmak üzere toplam kurulu güçleri ve son bir yıl içerinde eklenen yeni kurulum miktarları sunulmuştur. 2019 yılı itibariyle dünya genelindeki 650.1 GW toplam kurulu rüzgar gücünün 621 GW'ı kara üstü kurulumdan sağlanırken, 29.1 GW'ı ise deniz üstü kurulumdan elde edilmektedir. Ayrıca toplam kara üstü rüzgar gücü kurulumunun %37'lik bir oranla en büyük paydaşının Çin olduğu görülebilirken, deniz üstü toplam kurulumda ise %33'lük pay ile İngiltere lider konumdadır. Diğer taraftan, yeni yatırımlar üzerine değerlendirme yapılırsa, kara ve deniz üstü kurulumlarda Çin'in ciddi yatırımlar gerçekleştirerek en büyük pay oranlarına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 3.1. 2019 yılı dünya geneli kurulu rüzgar gücünde ülkelerin toplam market payları (GWEC, 2019)

Şekil 3.1'de sunulan verilere göre bir başka açıdan yorumlama yapıldığında, şimdiye kadar kara üstü kurulumlara daha çok önem verildiği anlaşıldığından hem de 60.3 GW'lık yeni kurulumun da 54.2 GW'ı kara üstünde gerçekleştirildiğinden dolayı bu gidişatın sürdüğü ifade edilebilir.

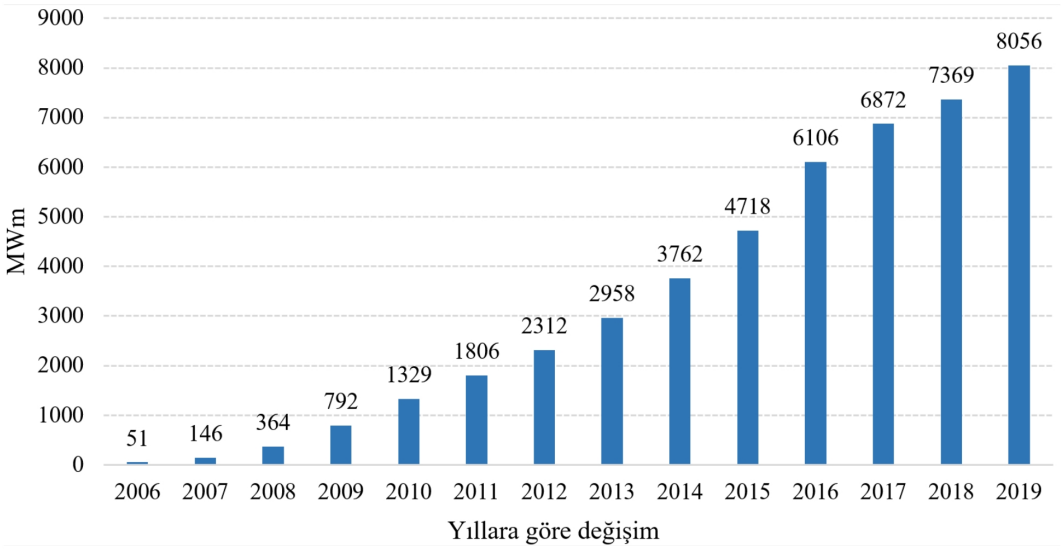
Ayrıca dünya geneli için kıtalar ve ülkeler bazında kara üstü ve deniz üstü rüzgar gücü kurulumlarının 2018 ve 2019 yıllarına ait detaylı istatistiksel verilerine GWEC (2019) raporundan ulaşılabilir ve bu veriler Şekil 3.2'den de görülebilmektedir.

MW, Karaüstü	Yeni Kurulumlar 2018	Toplam Kurulumlar 2018	Yeni Kurulumlar 2019	Toplam Kurulumlar 2019
Toplam	**46,345**	**567,592**	**54,206**	**621,421**
Amerika	11,891	134,843	13,427	148,072
ABD	7,588	96,488	9,143	105,436
Kanada	566	12,816	597	13,413
Brezilya	1,939	14,707	745	15,452
Meksika	929	4,935	1,281	6,215
Arjantin	445	673	931	1,604
Şili	204	1,619	526	2,145
Diğer Amerika	220	3,605	204	3,807
Afrika, Orta Doğu	**970**	**5,728**	**944**	**6,673**
Mısır	380	1,190	262	1,452
Kenya	312	338	0	338
Güney Afrika	0	2,085	0	2,085
Diğer Afrika	278	2,115	682	2,798
Asya-Pasifik	**24,468**	**255,937**	**28,094**	**284,024**
Çin	20,200	205,804	23,760	229,564
Hindistan	2,191	35,129	2,377	37,506
Avustralya	549	5,362	837	6,199
Pakistan	400	1,189	50	1,239
Japonya	261	3,652	274	3,921
Güney Kore	127	1,229	191	1,420
Vietnam	32	228	160	388
Filipinler	0	427	0	427
Tayland	568	1,215	322	1,538
Diğer Asya	140	1,702	123	1,822
Avrupa	**9,016**	**171,084**	**11,741**	**182,652**
Almanya	2,402	52,932	1,078	53,913
Fransa	1,563	15,307	1,336	16,643
İsveç	717	7,216	1,588	8,804
İngiltere	589	13,001	629	13,617
Türkiye	497	7,370	686	8,056
Diğer Avrupa	3,248	75,258	6,424	81,619

MW, Denizüstü	Yeni Kurulumlar 2018	Toplam Kurulumlar 2018	Yeni Kurulumlar 2019	Toplam Kurulumlar 2019
Toplam	**4,348**	**22,997**	**6,145**	**29,136**
Avrupa	**2,658**	**18,280**	**3,627**	**21,903**
İngiltere	1,312	7,963	1,764	9,723
Almanya	969	6,382	1,111	7,493
Belçika	309	1,186	370	1,556
Danimarka	61	1,329	374	1,703
Hollanda	0	1,118	0	1,118
Diğer Avrupa	7	302	8	310
Asya-Pasifik	**1,690**	**4,687**	**2,518**	**7,204**
Çin	1,655	4,443	2,395	6,838
Güney Kore	35	73	0	73
Diğer Asya	0	171	123	292
Amerika	**0**	**30**	**0**	**30**
ABD	0	30	0	30

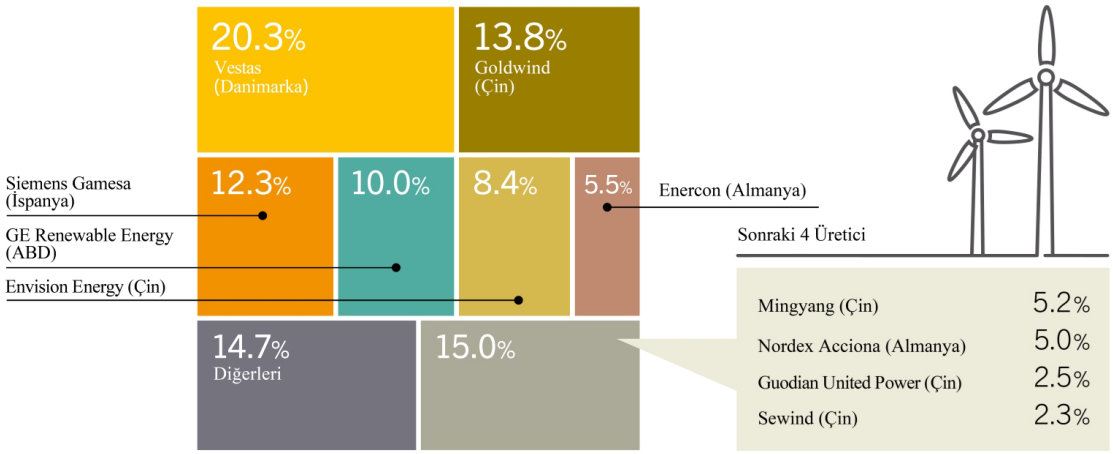
Şekil 3.2. Dünya geneli toplam kurulu rüzgar gücünün 2018 ve 2019 yılında ülkeler bazlı gelişimi (GWEC, 2019)

Türkiye'de ise rüzgar kurulu gücünün 2018 yılında 497 MW kapasitesinde bir yeni kurulum gerçekleştirilmişken 2019 yılında 686 MW seviyelerinde bir yeni kurulumun güç üretimine ilave olduğu anlaşılmaktadır. Diğer taraftan, toplam kurulu güç bakımından Türkiye'deki rüzgar enerjisi santrallerinin 2006 ve 2019 yılları arasındaki tarihsel evrimleşme sürecine; Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği (TUREB, 2020) tarafından yayınlanan 2020 Türkiye rüzgar enerjisi istatistik raporu verilerinden Şekil 3.3'teki gibi ulaşılabilir. 2006 yılında 51 MW'lık kurulu rüzgar gücünün 2015 yılında 4718 MW'a kadar arttığı, 2018 ve 2019 yıllarında ise sırasıyla 7369 MW ve 8056 MW seviyelerine kadar ulaştığı görülebilmektedir.



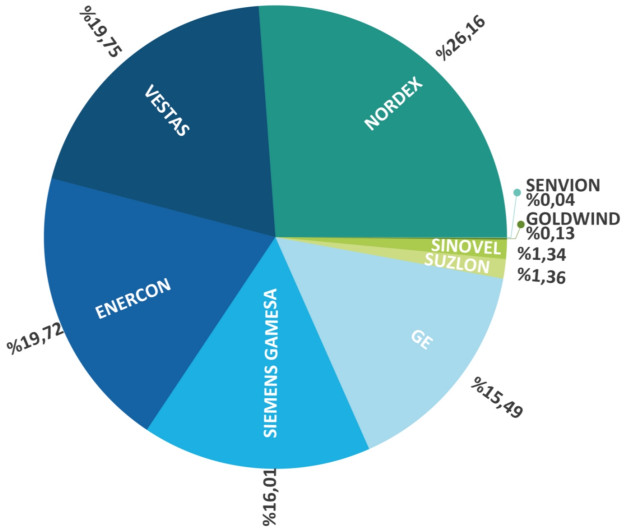
Şekil 3.3. Türkiye'deki rüzgar enerjisi santrallerinin yıllara göre toplam kurulu güç değişimi (TUREB, 2020)

Rüzgar enerjisinin en temel elemanı olan rüzgar türbinleri göz önüne alındığında, 2019 yenilenebilir enerji global durum raporu REN21 (2019)'den Dünya geneli için 2018 yılı içerisindeki yeni kurulum market paylaşımında ilk 10 rüzgar üreticisi firmanın üretim ülkesiyle beraber verileri Şekil 3.4'teki gibi sunulabilmektedir. Burada, rüzgar enerjisindeki türbin gücüne oranlı veriden Danimarkalı Vestas firmasının % 20.3 ile en yüksek paya sahip olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.4. Dünyadaki ilk 10 rüzgar türbini üreticisinin 2018 yılı market paylaşımları (REN21, 2019)

Türkiye tarafındaki durum incelendiğinde ise Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliğinin istatistik raporu (TUREB, 2020)'den işletmede olan türbinlerin üretici firma payları güç üretimleri bakımından Şekil 3.5'teki gibi sunulmakta olup, Nordex firmasının en büyük paya sahip olduğu görülebilmektedir.



Şekil 3.5. Türkiye'deki işletmede olan türbin firmalarının güç paylaşım oranı (TUREB, 2020)

Genel bir çerçeveden dünya çapındaki yenilenebilir enerji kaynaklı güç üretim kapasitesindeki durumlar ise 2018 yılında eklenen ve 2018 yılı sonu itibariyle toplam kurulu güç kapasitelerine (REN21, 2019)'dan Şekil 3.6'daki gibi ulaşılabilir. Buradan rüzgar ve güneş enerjisi üretim sistemlerine özel bir ilginin olduğu ve yatırımlara devam edildiği görülmektedir.

	2018 de eklenen	2018 sonunda var olan
Güç Kapasitesi (GW)		
Bio-güç	8.8	130
Jeotermal güç	0.5	13.3
Hidrogüç	20	1,132
Okyanus gücü	0	0.5
Güneş PV	100	505
Yoğunlaştırıcı güneş termal gücü	0.6	5.5
Rüzgar gücü	51	591

Şekil 3.6. 2018 yılı dünya geneli yenilenebilir enerji toplam güç kapasitesi (REN21, 2019)

3.1.2. Rüzgar gücü

Rüzgar gücünün hesap edilmesindeki teorinin açığa çıkışı şu şekilde ifade edilebilir. Sabit bir ivmelenme koşulunda, kütlesi *m* hızı *v* olan bir nesneyi *F* kuvveti ile *x* mesafesince hareket ettirebilmek için yapılan iş ve enerji (3.1) eşitliği ile gösterilir.

$$E = W = Fx \tag{3.1}$$

Newton kanunundan da *F*, (3.2)'deki gibi yazılırsa ve bu iki eşitlik birleştirilirse (3.3) elde edilir ve burada *a* ivmeyi belirtmektedir.

$$F = ma \tag{3.2}$$

$$E = W = max \tag{3.3}$$

Buradan da (3.4) ile verilen üçüncü hareket kanunundan yola çıkılırsa ve eşitlik yeniden düzenlenirse, başlangıç koşulu için $v_0=0$ alınırsa, (3.5) elde edilir.

$$v^2 = {v_0}^2 + 2ax \quad \rightarrow \quad a = \frac{v^2 - {v_0}^2}{2x} \tag{3.4}$$

$$a = \frac{v^2}{2x} \tag{3.5}$$

Eğer (3.5) eşitliği (3.3)'te yerine koyulursa, hareket halindeki bir nesnenin kinetik enerjisi (3.6)'daki gibidir.

$$E = W = \frac{1}{2}mv^2 \tag{3.6}$$

Birim zamandaki kinetik enerjideki değişim güç ise (3.7)'deki gibi ifade edilir.

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}mv^2\right) \tag{3.7}$$

Türev ifadesi zincir kuralı yardımıyla alınırsa (3.8) eşitliği elde edilir, buradan da sabit rüzgar hızı koşulu için *dv/dt=0* olarak alınırsa güç ifadesi (3.9)'daki gibi olur.

$$P = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}mv^2\right) = \frac{1}{2}\frac{d}{dt}\left(mv^2\right) = \frac{1}{2}\left(2mv\frac{dv}{dt} + v^2\frac{dm}{dt}\right) \tag{3.8}$$

$$P = \frac{1}{2}\dot{m}v^2 \tag{3.9}$$

Eğer hava yoğunluğu ρ (kg/m^3), havanın süpürdüğü alan A (m^2) olarak alınırsa, kütle akış hızı $\dot{m}$ (kg/s) ise (3.10) ile ifade edilir.

$$\dot{m} = \rho A v \tag{3.10}$$

Eşitlik (3.10) Eşitlik (3.9)'da yerine yazılırsa rüzgar gücü (3.11) ile hesaplanabilir (Hau, 2013; Ragheb, 2014).

$$P_w = \frac{1}{2}\rho A v^3 \tag{3.11}$$

Hava yoğunluğu da ayrıca hava basıncına ve sıcaklığına bağlı olarak deniz seviyesine göre yüksekliğine bağlı bir fonksiyonla tanımlanır ve bu ifade (3.12) ile gösterilebilir.

$$\rho = \frac{p_0}{R_h T} e^{\left(\frac{-gz}{RT}\right)} \tag{3.12}$$

Burada, p_0 standart deniz seviyesindeki atmosferik yoğunluğunu (1.225 kg/m^3), R_h hava için spesifik bir gaz sabitini (287.05 J/(kgK)), g yer çekim sabitini (9.81 m/s^2), T sıcaklığı (K) ve z ise deniz seviyesinden yüksekliği belirtmektedir (Ackermann, 2005). Buraya kadarki kısımda teorik olarak rüzgar gücü ifade edilmiştir ancak bu gücün tamamına türbinler aracılığıyla erişilmesi mümkün değildir. Alman asıllı mühendis Albert Betz tarafından 1919 ve 1926 yıllarında ortaya konan ve literatürde Betz limiti veya Betz kanunu olarak bilinen teoriye göre en iyi koşullar için en yüksek olası güç dönüşümünün maksimum ~%59.26 (16/27)'sına kadar erişilebileceğini ifade eder.

Böylece rüzgar türbinlerinden mekanik olarak elde edilebilecek güç ve maksimum güç ifadeleri Eşitlik (3.13) ile sunulmaktadır.

$$\begin{cases} P_m = C_P P_w = \frac{1}{2}\rho A C_P v_w{}^3 \\ P_{m_\max} = C_{P_\max} P_w = \frac{1}{2}\rho A C_{P_\max} v_w{}^3 \end{cases} \tag{3.13}$$

Burada C_P türbin tasarımına bağlı olarak açığa çıkar ve türbin güç katsayısı olarak ifade edilirken, türbin güç katsayısının maksimum değeri $C_{P_\max}$ ile verilir. Türbinlerin aerodinamik tasarımlarındaki geliştirmeler türbin güç katsayısını etkilemektedir. Pratik tasarımlarda, modern yüksek hızlı rüzgar türbinlerinde erişilebilmiş C_P değerleri 0.4-0.5 aralığında iken, düşük hızlı türbinlerde 0.2-0.4 aralığında kalmaktadır (Patel, 2005).

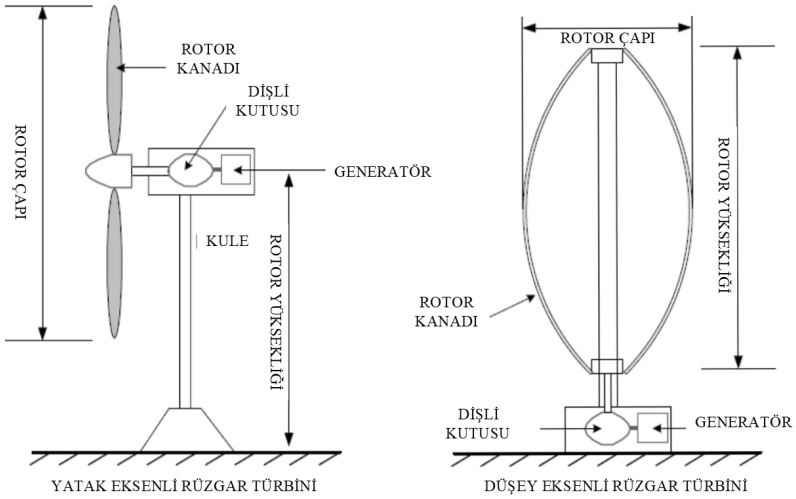
3.2. Rüzgar Türbinleri

Rüzgar türbinleri, kanatlarına çarpan rüzgardan yani rüzgarın akışıyla oluşan döndürme kuvvetinden gücünü alır ve rüzgar enerjisi sistemlerinin temel bir yapıtaşını oluşturmaktadır. Bir başka ifadeyle rüzgar türbinleri, rüzgarın aerodinamik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürür ve REDS'lerden elektrik üretmek için kullanılan generatörleri tahrik eder. Rüzgar türbinlerinin gücü kanat aerodinamik tasarımı, kanat sayısı, kanat açısı, kanat-rotor büyüklüğü, kule yüksekliği ve etkiyen rüzgar hızı gibi parametrelere bağlı olmaktadır. Zaman içerisinde rüzgar türbinleri aerodinamik tasarım ve mekanik sistemler tarafında hem de generatörler, güç elektroniği dönüştürücüleri ve kontrol teorileri üzerine elektriksel bileşenler tarafında çok fazla teknolojik gelişmeyi de yaşamıştır (Yaramasu ve ark., 2015).

3.2.1. Rüzgar türbin çeşitleri

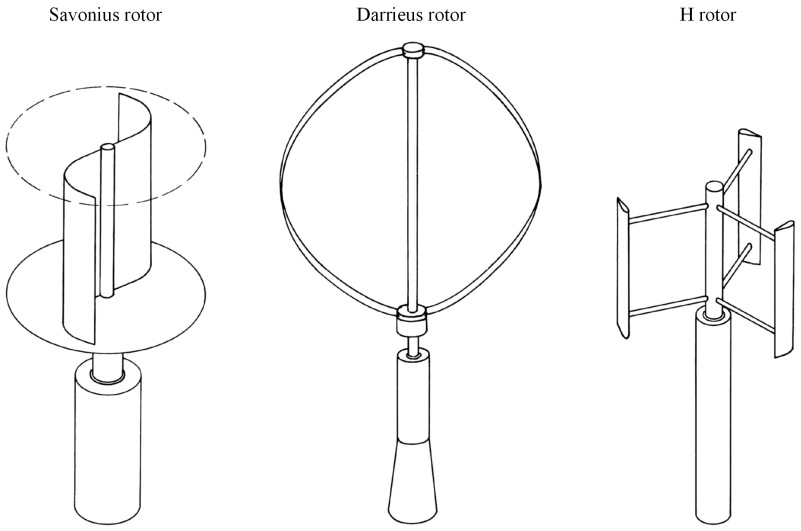
Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemleri (REDS), şebeke bağlantılı - şebeke bağlantısız, kara üstü kurulum - deniz üstü kurulum, sabit hızlı çalışma - değişken hızlı çalışma, generatör tipi, türbin gücü ve türbin yapısal tasarımı gibi çeşitli sınıflandırmalara tabi tutulabilmektedir. Bu kısımda, rüzgar türbinlerinin yapısal tasarım bakış açısıyla rotorun dönüş ekseninin konumuna göre sınıflandırılmasından

bahsedilmektedir. Bunlar düşey eksenli rüzgar türbinleri ve yatay eksenli rüzgar türbinleridir ve yapısal tasarımları Şekil 3.7 ile gösterilebilir.



Şekil 3.7. Yatay ve düşey eksenli rüzgar türbinleri

Düşey eksenli rüzgar türbinleri incelendiğinde; temel olarak daha basit yapısal tasarımlara sahiptirler, ayrıca dişli kutusu ve generatör gibi mekanik ve elektrikli bileşenlerin zemin seviyesinde muhafaza edilmesi bir avantaj sağlar. Ayrıca rüzgarın akışındaki doğrultuya türbin rotorunu yönlendirmeden sorumlu saptırma sistemi (yaw system) bulunmaz. Bunun yanı sıra, düşük TSR oranına sahiptirler ve kanat açı kontrolleri bulunmadığından çıkış gücü kontrol edilemez. Düşey eksenli rüzgar türbinlerinin Savonius rotor, Darrieus rotor ve H-rotor gibi çeşitleri de bulunmakta olup, Şekil 3.8 ile gösterilebilir.



Şekil 3.8. Düşey eksenli rüzgar türbinleri (Hau, 2013)

Modern rüzgar türbinlerinin yapısını oluşturan yatay eksenli rüzgar türbinlerinde ise mekanik ve elektriksel bileşenler kule üzerine konumlandırılmıştır. Herhangi bir arıza oluşması durumunda bu durumdan dolayı onarımı bir miktar zorlu olabilmesi dezavantajını oluşturmasına rağmen pek çok avantaja da sahiptir. Rotor kanat açılarının kontrol edilebilmesiyle rotor hızı ve güç kontrolü gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca düşey eksenlere nazaran daha yüksek rüzgar hızlarında çalışabilirler ve aşırı rüzgar hızlarına karşı rotor kanat açılarının ayarlanması ile kendini korumaktadır.

Mekanik gerilme, akustik ses, maliyet ve yüksek dönüş hızı bakımından günümüzde yaygınca üç kanatlılar tercih edilmekte olup verimlilikleri daha yüksektir. Ayrıca kanatların aerodinamik tasarımının verimlilik üzerine etkisi vardır ve daha iyi tasarımlar elde edilmeye çalışılmaktadır. Modern yatay eksenli rüzgar türbinlerinin bir örneği Şekil 3.9'da sunulmaktadır.

Şekil 3.9. Yatay eksenli rüzgar türbini: Haliade-X 12 MW (GE Renewable Energy, 2020)

3.2.2. Yıllara göre türbin güç kapasitesinin evrimi

Ticari rüzgar türbinlerinin gücü ve rotor çapları bakımından zaman içerisindeki gelişimi Şekil 3.10 ile sunulmaktadır.

Şekil 3.10. Rüzgar türbinlerinin büyüklüğünün 1995'ten itibaren gelişim süreci (DNW GL, 2019)

1995'li yıllarda 47 metrelik rotor çapına sahip türbinlerle yaklaşık 1 MW güç seviyelerine ulaşılabilmişken, 2009'larda 171 metre rotor çapına sahip türbinlerle 5MW seviyeleri elde edilebilmiştir. 2017 yılında 168 metre rotor çapına sahip bir türbinle 8 MW kapasite elde edilmişken, gelişim süreciyle beraber 2018 yılında 164 metre çap ile 9 MW'lara ulaşılmıştır. 2020 yılında ise prototip olarak GE Haliade-X model rüzgar türbini 220 metrelik rotor çapı, 260 metre kule yüksekliği ve 12 MW güç değerine ulaşabildiği ve dünyanın en güçlü deniz üstü kurulum rüzgar türbini olduğu bilinmektedir (Anonymous, 2020; GE Renewable Energy, 2020).

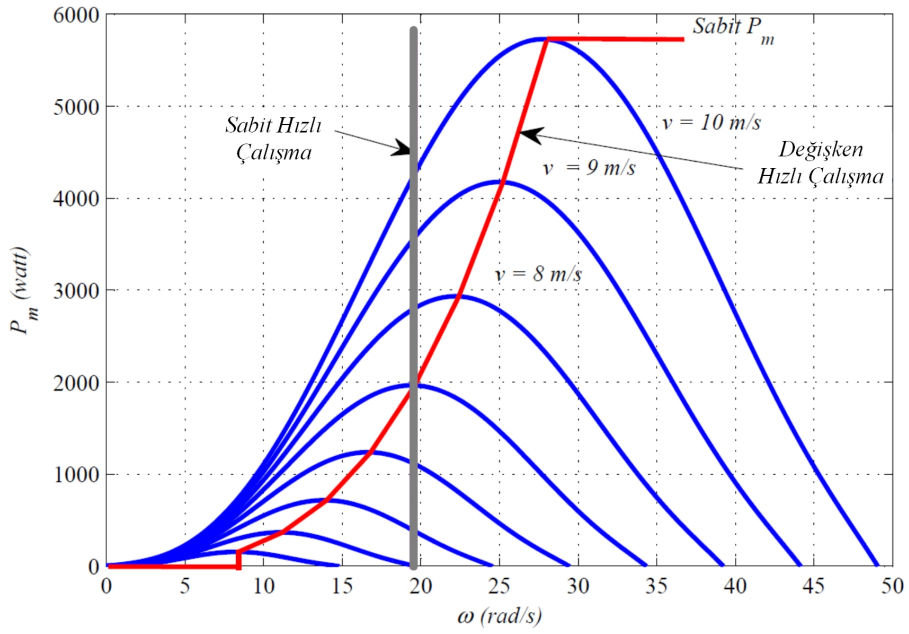
3.3. Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemleri (REDS)

Rüzgar enerjisi, havanın aerodinamik enerjisinin önce mekaniğe sonra ise elektrik enerjisine dönüştürülmesiyle belirli dönüşüm aşamalarından geçtiği için özellikle ticari uygulamalarda Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemi (REDS) olarak adlandırılmaktadır. REDS'deki ana aygıt olan rüzgar türbininin görevi mekanik enerjiye dönüşümü sağlamaktır. Genaratörler aracılığı ile mekanik enerji elektrik enerjisine çevrilir. Lakin rüzgarın hızı, doğası gereği zamana göre değişen, lineer olmayan ve rastgele bir dinamiğe sahiptir. Bu yüzden elde edilen enerji; rüzgar hızındaki dalgalanmalar, türbülanslar ve değişimlerden dolayı arzu edilen formdan daha farklıca oluşabilir. Bu sebeple, tüketicinin ihtiyacına veya bağlantı noktası koşullarına odaklı olarak generatörün elektriksel çıkışı güç dönüştürücü üzerinden uygun forma dönüştürülür. Literatürde yapılarına göre çeşitli REDS yapıları bulunmaktadır ve bunlar başlıca iki sınıfa ayrılabilir: Sabit Hızlı Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemi (SH-REDS) ve Değişken Hızlı Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemi (DH-REDS) (Youssef ve ark., 2019).

SH-REDS'ler basit ve daha ucuz olmalarına karşın, dar bir rüzgar hızı bandında işletilebildikleri için daha düşük verimliliklere sahiptir (Mousa ve ark., 2020). Ayrıca büyük güç dalgalanmaları ve mekanik kısımlarda daha yüksek basınç ve gerilmeler ile yüksek mekanik stresler oluşmaktadır ve bu problem olabilecek önemli bir konuyu da teşkil etmektedir. SH-REDS'ler işletilirken rüzgar hızından ziyade şebeke frekansına bağlı olarak çalıştırıldıklarından yani rotor (çalışma) hızları sabit olacağından çok sınırlı kontrol edilebilirliğe sahiptirler.

Diğer taraftan ise MPPT araması ile rüzgar hızı sınır alt değeri (cut-in) ve nominal değeri aralığındaki her hızda maksimum verimlilikte çalışma sadece DH-REDS'lerle sağlanabilmektedir ve bu yüzden DH-REDS'ler daha verimlidirler. Ayrıca verimlilik açısından da farklı zaman dilimleri için var olan farklı rüzgar hızlarında olabildiğince maksimum güçler alınabilir. DH-REDS'ler mekanik streslerin ve akustik seslerin azaltılmasından dolayı SH-REDS'lere göre de bu konuda da avantaja sahiptir. Fakat daha karmaşık kontrol tekniklerine ve ekstra bileşenlere ihtiyaç bulunması ile bir miktar maliyetlerin de artması söz konusudur. Ancak rüzgar gücü üretim sistemlerinin her zaman odak noktası enerji verimliliği olmaktadır. Bu sebeplerden ötürü modern rüzgar türbin sistemlerinde DH-REDS'ler tercih edilmektedir.

Değişken hızlı çalışma sayesinde sabit hızlı çalışmaya göre daha yüksek güçlerin elde edilebileceğini açıklayan bir grafik Şekil 3.11'de aktarılmıştır.



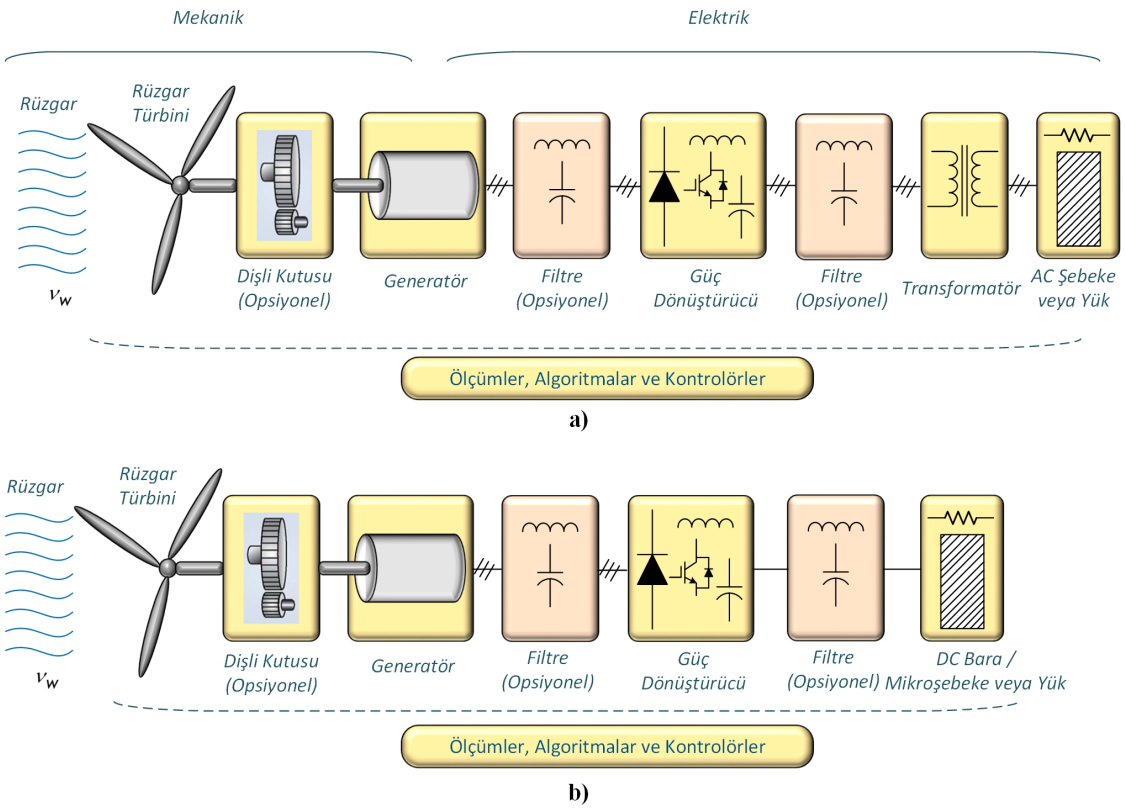
Şekil 3.11. Sabit hızlı ve değişken hızlı çalışma için güç eğrilerinin değişimi grafiği (Aner, 2014)

Bu grafikte her bir rüzgar hızı için rotor hızına ilişkin güç eğrilerinin değişimi verilmekte olup anlaşılacağı üzere DH-REDS yapıları; değişken hızlı çalışma ile (eğrilerdeki) maksimum güç noktalarına karşılık gelen çalışma noktalarında işletilebilir. Lakin sabit hızda işletilmede güç eğrilerindeki maksimum güç noktalarına her rüzgar hızında erişilemeyecektir. Bu yüzden sistem daha düşük verimliliklerde, yani daha düşük güçlerde, çalıştırılmış olacaktır. Bu grafik ve bahsedilen açıklamalar eşliğinde, temel nitelikte olarak DH-REDS yapılarının önemi anlaşılır düzeyde ifade edilmektedir. REDS'lerdeki güç eğrilerinin değişimi ve detaylı analizleri tezin ilerleyen kısımlarında sunulmaktadır.

3.3.1. Modern REDS konfigürasyonları

REDS'lerin ana bileşenleri mekanik, elektriksel ve kontrol sistemleri olarak başlıca üç kısma ayrılmaktadır. Mekanik bileşenler tarafı kule, türbin kanatları, dişli kutusu, kanat açı ve saptırma mekanizmaları, mekanik frenleme birimlerinden oluşur. Elektriksel bileşenler ise elektrik generatörü, güç elektroniği temelli güç dönüştürücülerini, harmonik filtreler, transformatörler, DC bara-DC mikro şebeke bağlantı noktalarını veya üç fazlı bağlantı noktaları veya şebeke bağlantı noktalarını içerebilir. Kontrol sistemleri birimi ise elektronik ölçümleri, mekanik ve elektriksel tarafın kontrolüne ilişkin algoritmalar ve kontrolörleri barındırır.

REDS konfigürasyonları ihtiyaç, maliyet, verimlilik, kolay işletilebilirlik, bakım ve uzun ömürlülük gibi pek çok kıstas da düşünülerek oluşturulmaktadır. O yüzden koşullara bağlı olarak farklı topolojik konfigürasyon şemaları bilim ve endüstri dünyasında da bulunmaktadır. Şekil 3.12 ile REDS'lerin yaygın kullanımında olan tipik bileşenler şemaları sunulabilir. Şekil 3.12 (a) ile gösterilen şemada şebeke bağlantılı veya bağlantısız AC formda çıkış üretilmektedir. Bu REDS yapısının şebeke bağlantılı versiyonu modern yüksek güçlü türbin sistemlerinin temsili olmaktadır (Yaramasu ve ark., 2015; Kumar ve ark., 2018). Ayrıca kara üstüne veya deniz üstüne kurulu bir grup yüksek güçlü rüzgar türbininin geniş bir alan üzerinde birleşimiyle oluşturulan, yüksek güçlü üretim birimlerini oluşturan, rüzgar çiftliklerinde de bu konfigürasyon yapısı kullanılmaktadır. Şekil 3.12 (b) ile gösterilen şemada ise DC mikro şebeke, DC bara veya yük beslemeleri için tercih edilebilen sistem yapısını içermektedir (Hussain ve Mishra, 2016; Tiwari ve ark., 2017; Yazici ve Yaylaci, 2017).



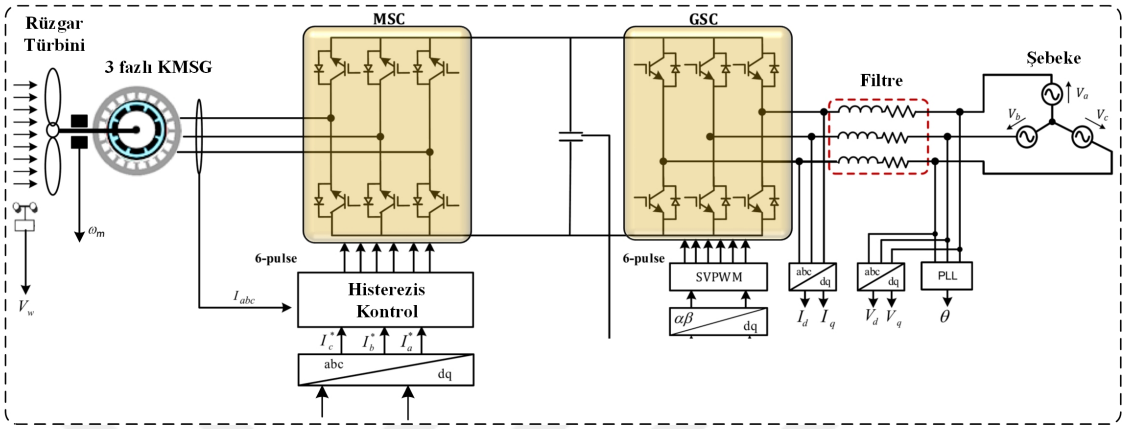
Şekil 3.12. Tipik REDS sistemlerinin bileşenler şemasının genel bir gösterimi
a) AC elektriksel formda çıkış, **b)** DC elektriksel formda çıkış

REDS'lerde değişken hızlı veya sabit hızlı çalışma, AC şebeke bağlantısı olup olmaması ve ayrıca generatör yapıları göz önüne alınarak çeşitli sınıflandırmalara tabi tutabilmektedir. Bu yüzden literatürdeki modern güç dönüşüm topolojileri ve kullanılan generatörlerden bahsedilmelidir.

3.3.1.1. Modern REDS'lerde güç dönüşüm topolojileri

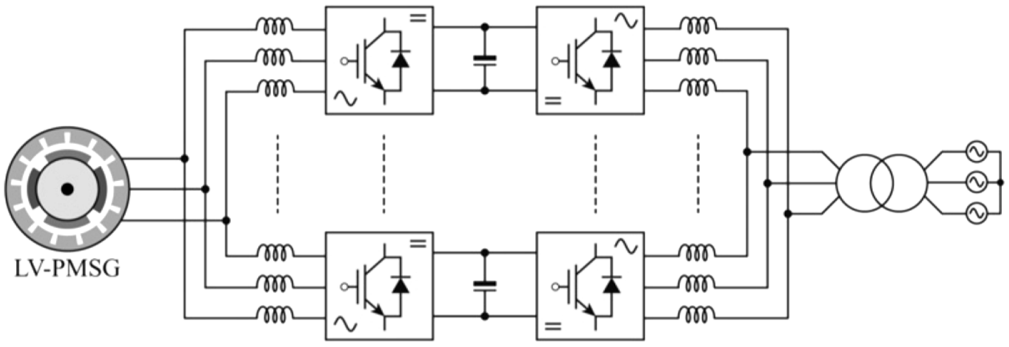
REDS'lerde pek çok farklı tipte güç topolojileri ile karşılaşılabilmektedir. Bunlar başlıca olarak peş-peşe dönüştürücü (back-to-back converter) topolojisi, matris dönüştürücü (matrix converter) topolojisi, doğrultucu ve inverterli topoloji ve ayrıca doğrultucu ve DC-DC dönüştürücü topolojisidir. Büyük ölçekli şebeke bağlantılı uygulamalarda özellikle peş-peşe dönüştürücü yaygınca kullanılırken verimlilik ve maliyetin etkisiyle küçük ölçekli uygulamalarda; doğrultucu ve DC-DC dönüştürücü topolojilerinin kullanımı tercih edilmektedir. Bu topoloji tipinde ise en yaygın kullanım yükseltici tip DC-DC dönüştürücü yapısı olmaktadır.

Şebeke bağlantılı REDS konfigürasyonları için en sıkça tercih edileni; ortak bir DC bağlantı noktasına bağlı olan iki seviyeli PWM (pulse width modulation) modüleli iki adet gerilim kaynaklı dönüştürücüden oluşan peş-peşe dönüştürücü yapısıdır ve kullanımının bir örneği Şekil 3.13'teki gibi gösterilmektedir.



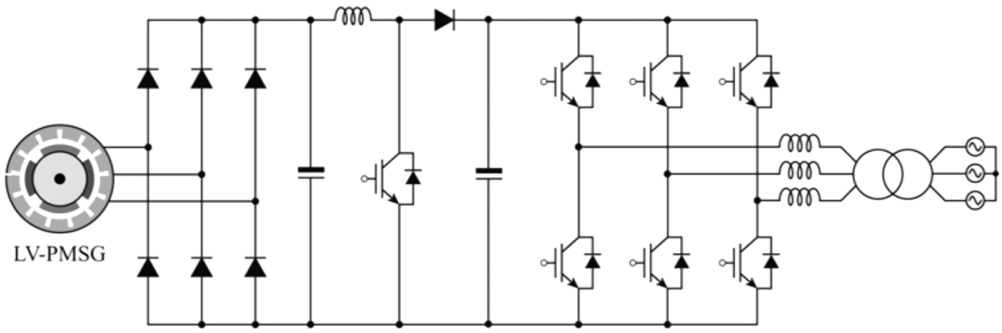
Şekil 3.13. Peş-peşe dönüştürücülü güç dönüşüm topolojisi (Youssef ve ark., 2019)

İki adet gerilim kaynaklı dönüştürücüden rotora bağlı olana genellikle Rotor/Makine Tarafı Dönüştürücü (Rotor Side Converter, RSC; Machine Side Converter, MSC) denilirken, şebekeye bağlı olan dönüştürücü ise Şebeke Tarafı Dönüştürücü (Grid Side Converter, GSC) olarak isimlendirilmektedir. MSC ile AC'den DC forma ve GSC ile de DC'den AC forma dönüşüm gerçekleştirilir. Şebekeye aktarılan aktif ve reaktif gücü kontrol edebilme yetisine sahiptir. Dönüştürücü kapasitesinin desteklediği kadarıyla generatörden şebekeye aktarılan reaktif gücün sıfır olması amaçlanır. Bu yapı; yüksek frekanslı anahtarlamalardan dolayı harmonikler ürettiği için harmonik filtreleme yapılması gerekir (Chen ve ark., 2009). Ortak bir DC bağlantı kurulması sayesinde generatör tarafındaki geçici rejim olaylar şebeke tarafına yansıtılmaz (Yaramasu ve ark., 2017). Göreceli olarak daha basit ve aşırı bileşen içermemesi teknik bir avantaj oluşturmaktadır. Ancak REDS'nin çalışma koşullarına bağlı olarak generatör gerilimindeki değişimlerden kaynaklı büyük anahtarlama kayıplarının zaman zaman oluşması dezavantaj oluşturabilir (Blaabjerg ve ark., 2012). Güç dereceleri 0.75 MW seviyelerinin üzerine çıktıkça akım taşıma kapasitesinin arttırılması amacıyla 3 fazlı 2 seviyeli gerilim kaynaklı dönüştürücüler paralel bağlanmaktadır ve bu konfigürasyonun bir örneği Şekil 3.14'te sunulmuştur (Yaramasu ve ark., 2017). Ancak bu modüler yaklaşımın düşük güçlerde kullanımı yüksek maliyet, karmaşık kontrol ve konfigürasyon sebebiyle çok olası değildir.



Şekil 3.14. Paralel bağlantılı peş-peşe dönüştürücü konfigürasyonu (Yaramasu ve ark., 2017)

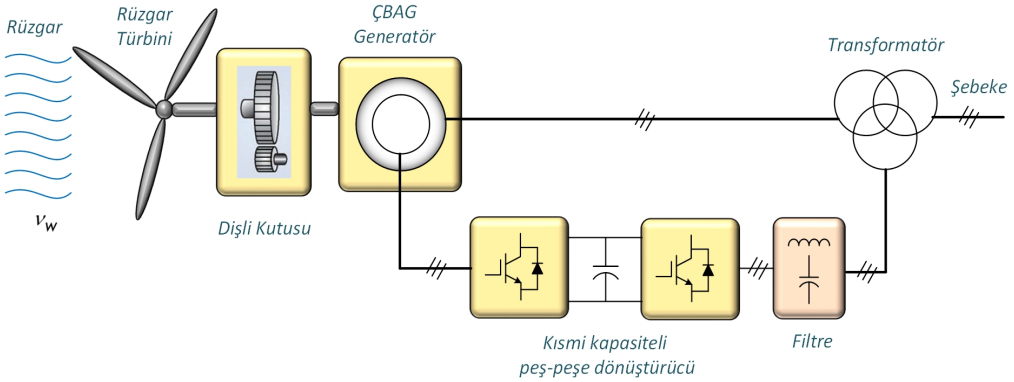
Diğer taraftan; daha ekonomik bir çözüm sunan ve kontrol edilebilirliği artıran diyotlu doğrultucu, yükseltici tip DC-DC dönüştürücü ve iki seviyeli gerilim kaynaklı dönüştürücüden oluşan bir topolojide literatürde ve endüstriyel kullanımda bulunmakta olup Şekil 3.15'te bir örneği verilmiştir.



Şekil 3.15. Doğrultucu, yükseltici tip DC-DC dönüştürücü ve iki seviyeli gerilim kaynaklı dönüştürücüden oluşan topoloji (Yaramasu ve ark., 2017)

Bu topoloji aracılığıyla; öncelikle generatörün değişken çıkış gerilimi diyotlu doğrultucu ile DC forma dönüştürülür ve yükseltici tip DC-DC dönüştürücü ile de bu gerilim inverter için uygun olacak yükseklikte bir seviyeye yükseltilir. Doğrultucunun hemen çıkışında doğrultulmuş gerilimdeki dalgalılığı azaltmak amacıyla genellikle DC bağlantı kondansatörü kullanılmaktadır. Buradaki yükseltici tip DC-DC dönüştürücü MPPT çalışma ile REDS yapılarının değişken hızla çalışmasına da olanak sunar ve bu durum sistem verimliliğini artırmaktadır. Generatör tarafındaki dönüştürücü ile karşılaştırıldığında yarı iletken anahtarlama elemanının sayısı 6'dan 1'e düşmekte, bu da karmaşıklığı ve maliyeti düşürmektedir. Topolojinin güç seviyelerinin artırılması istenildiğinde ise Şekil 3.14'deki gibi paralel bağlı modüler yaklaşım tercih edilmektedir.

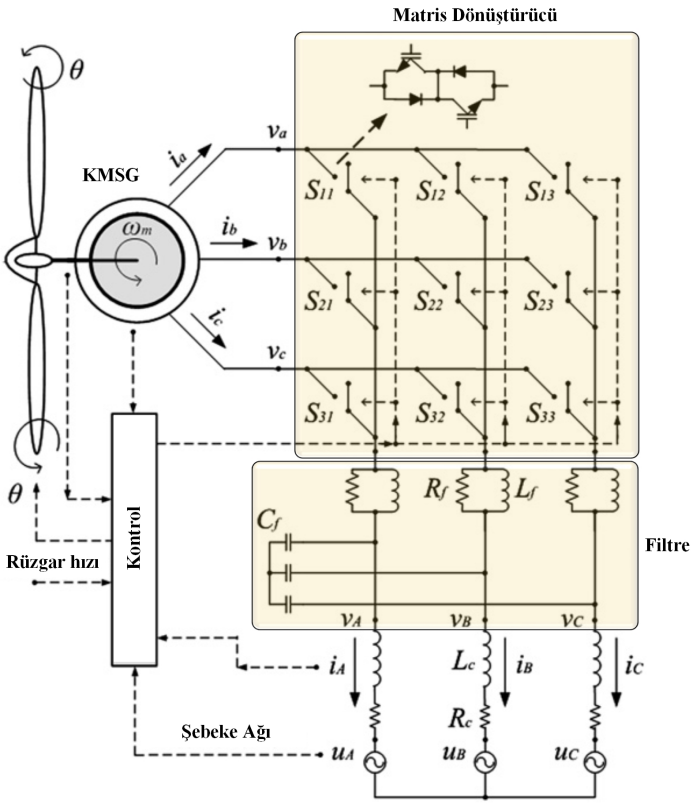
Bir başka güç dönüşüm topolojisi ise Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG)'ler ile birlikte kullanılan kısmi kapasiteli peş-peşe dönüştürücülü topolojisidir ve bir örneği Şekil 3.16 ile sunulmuştur.



Şekil 3.16. Kısmi kapasiteli peş-peşe dönüştürücülü topoloji

Bu dönüştürücü ÇBAG'nin rotor frekansını kontrol ederek rotor hızını ayarlar ve nominal generatör gücünün yaklaşık olarak %30'u kadarlık (kısmi) güç kapasitesine sahiptir. Dahası, REDS bu topoloji ile senkron hızın ±%30 bandında hız aralığında işletilebilmektedir (Blaabjerg ve ark., 2012). Diğer taraftan reaktif güç kompanzasyonu ve yumuşak bir şebeke bağlantısı gerçekleştirilebilir. Dişli kutusu, bilezik ve fırça tertibatlarının bulunması maliyet artışına sebep olur ve bu da düzenli bakım gereksinimini oluşturur.

Farklı bir kullanımı içeren Matris dönüştürücüler ise generatörün değişken frekanslı AC çıkışını şebekenin sabit frekansındaki AC forma doğrudan dönüştürme yetisi olan bir AC-AC dönüştürücü yapısıdır (Melício ve ark., 2010). Başlıca avantajı, tek bir dönüştürücünün kontrol edilmesi ve büyük kapasiteli bir DC bağlantısı gerektirmemesidir. REDS kullanımlarında rüzgar hızına bağlı olarak generatör gerilimindeki hızlı dalgalanmalara hassas ve güç devrelerindeki reaktif bileşenden yoksun olmasından dolayı endüstriyel olarak çok geniş bir kullanıma sahip değildir. Ancak, peş-peşe dönüştürücü yapısına göre daha fazla anahtarlama elemanı içerir ve aynı çıkış güçleri açısından değerlendirilirse, matris dönüştürücünün çıkış akımı peş-peşe dönüştürücü yapısına göre 1.15 kat daha fazladır. Bu da daha yüksek kayıp anlamına gelir. Ayrıca bu tip dönüştürücünün çıkış gerilimi giriş geriliminin %86.6'sıdır (Karaca ve Akkaya, 2011). Şekil 3.17 ile REDS konfigürasyonlarında matris dönüştürücünün kullanımının bir örneği sunulmuştur.

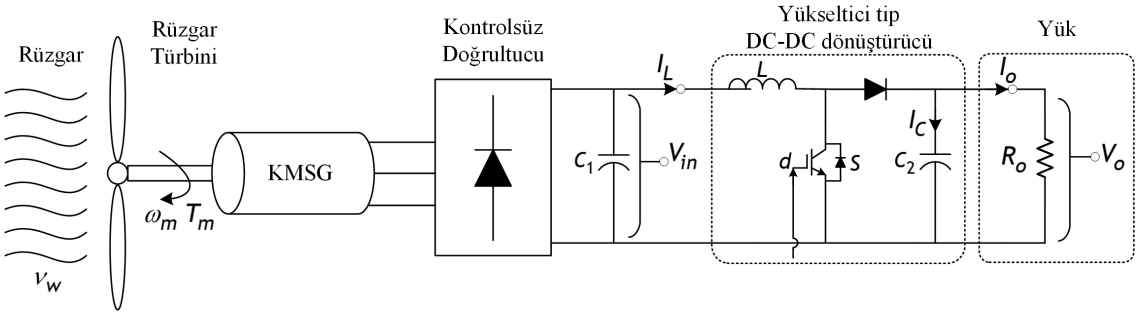


Şekil 3.17. Matris dönüştürücülü güç dönüşüm topolojisi (Melício ve ark., 2010)

Diğer taraftan DC mikro şebeke, DC bara veya yük beslemeleri için oluşturulabilen AC şebeke bağlantısız REDS'ler için de literatürde ve endüstride kullanılan çeşitli güç dönüşüm topolojileri bulunmaktadır. Rotoru Sargılı Senkron Generatörler (Wound Rotor Synchronous Generator, RSSG) ve KMSG'lerde rotor akısı rotor uyartım sargısı ve kalıcı mıknatıslar aracılığıyla üretilmektedir. Bu yüzden generatör tarafındaki dönüştürücü yerine kontrolsüz doğrultucu gibi pasif dönüştürücülerin kullanımı tercih sebebi olmaktadır. Diğer taraftan ÇBAG ve SKAG'ler mıknatıslanma akımı ihtiyaçlarından dolayı bu kullanıma olanak sunamazlar. Verimlilik, yatırım ekonomisi ve kolay kontrol edilebilirliğin ön planda olduğu küçük ve orta ölçekli REDS uygulamalarında; özellikle generatör tarafı dönüştürücülerde pasif elemanlardan oluşan diyot köprülü doğrultucular kullanılmaktadır. Hatta pratik olarak REDS'lerde kullanımı birkaç KW'dan MW'lık kurulu güç mertebelerine kadar da geniş bir skalayı oluşturmaktadır. Bu tip dönüştürücüler PWM dönüştürücülere nazaran daha ekonomik ve güvenilirdir.

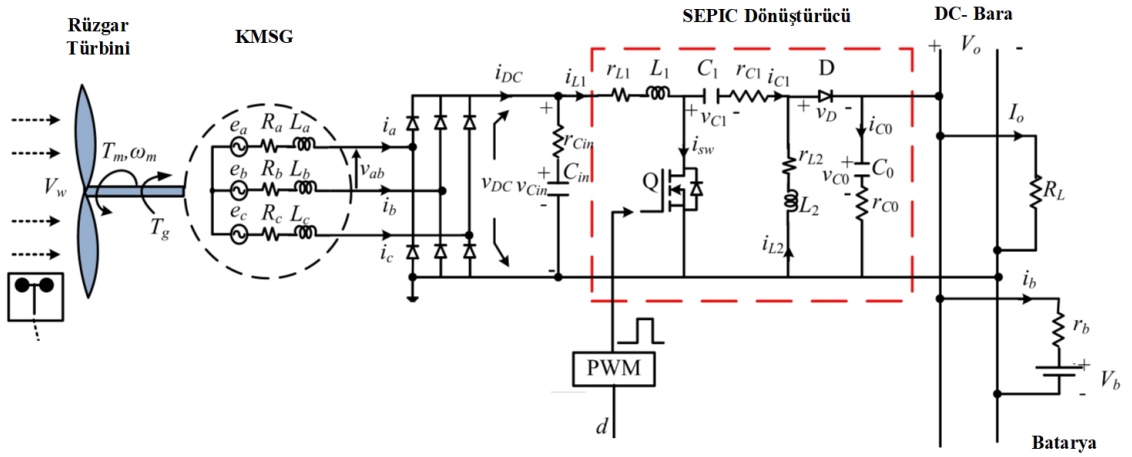
Tezin başlıca konusunu oluşturan REDS'lerde MPPT çalışma ile verimlilik artışı konusu üzerine çalışan algoritma ve kontrolör geliştiricilerin de yaygınca tercih ettiği;

kontrolsüz doğrultucu, filtre kondansatörü, yükseltici tip DC-DC dönüştürücü ve yük beslemesinden oluşan topolojinin bir temsili Şekil 3.18'de sunulmaktadır.



Şekil 3.18. Kontrolsüz doğrultucu ve yükseltici tip DC-DC dönüştürücülü güç dönüşüm topolojisi (Dursun ve Kulaksiz, 2020b)

Ayrıca DC mikro şebeke, bara beslemesi veya batarya şarjı gibi uygulamalarda da bu tip topoloji kullanılabilirken yine bunlara ek olarak yük beslemesini de içerebilen, alçaltıcı tip DC-DC dönüştürücülerde daha az oranda da olsa kullanılabilmektedir. Diğer taraftan da DC bara ve batarya şarjı amaçlı olarak SEPIC tip dönüştürücülü topolojinin bir örneği de Şekil 3.19'da verilmiştir.



Şekil 3.19. SEPIC dönüştürücülü güç dönüşüm topolojisi (Hussain ve Mishra, 2016)

3.3.1.2. Modern REDS'lerde kullanılan generatörler

REDS'lerde mekanik enerjinin elektriksel enerji formuna dönüşümünün gerçekleştirilmesi aşamasında yer verilen generatörler üzerine inceleme yapıldığında, zamanla gelişim teknolojilerine bağlı olarak çeşitli generatör tiplerinden yararlanıldığı görülebilmektedir. Bunlardan bazıları; Sincap Kafesli Asenkron Generatör (SKAG),

Rotoru Sargılı Asenkron Generatör (RSAG), Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG), Rotoru Sargılı Senkron Generatörler (RSSG) ve Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatör (KMSG)'dir. REDS'lerde kullanılan generatörler üzerine; derlenip, detaylandırılarak oluşturulan bir karşılaştırma şeması Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. REDS'ler için generatör tipleri ve karşılaştırılması (Hyong Sik ve Dylan Dah-Chuan, 2010; Alsmadi, 2015; Yaramasu ve ark., 2015)

Genaratör tipi	Avantajları	Dezavantajları	REDS'de çalışma tipi ve hız bandı
SKAG	• Tasarımı, yapısı ve kontrolü kolay • Dayanıklı çalışma • Düşük maliyet	• Düşük enerji verimliliği • Aktif/reaktif güç kontrol imkanı yok • Yüksek mekanik stres • Yüksek dişli kayıpları	• Yumuşak yol verici ve güç faktörü düzenleyici ile sabit hızlı işletme ± % 1 • Tam kapasite dönüştürücü ile % 0-100
KMSG	• En yüksek enerji verimliliği • Daha yüksek aktif/reaktif güç kontrol edilebilirliği • Fırça ve bilezik tertibatı yok, daha az bakım ihtiyacı ve güç kayıpları • Düşük mekanik stres • Rotorda bakır kayıpları yok • Basit kontrol şeması	• KM materyalinin yüksek maliyeti • KM materyalinin manyetik özelliğinin azalması • Karmaşık üretim süreci • Daha yüksek maliyetli güç dönüştürücü • Daha yüksek dönüştürücü kayıpları • Büyük boyut	• Tam kapasite dönüştürücü ile % 0-100 tam değişken hızlı işletme
RSSG	• Yüksek enerji verimliliği • Daha yüksek aktif/reaktif güç kontrol edilebilirliği • Fırça ve bilezik tertibatı yok • Düşük mekanik stres	• Bakır sargılarda daha yüksek maliyet • Daha yüksek maliyetli güç dönüştürücü • Daha yüksek dönüştürücü kayıpları • Büyük boyut	• Tam kapasite dönüştürücü ile % 0-100 tam değişken hızlı işletme
ÇBAG	• Yüksek enerji verimliliği • Yüksek aktif/reaktif güç kontrol edilebilirliği • Daha düşük maliyetli güç dönüştürücü • Daha düşük dönüştürücü kayıpları • Daha az mekanik stres • Kompakt boyut	• Yüksek dişli kayıpları • Fırça ve bilezik tertibatı var, bakır kaybı ve bakım problemi • Daha karmaşık kontrol şeması	• Kısmi kapasiteli dönüştürücü ile ±% 30 ile yarı değişken hızlı işletme
RSAG	• Kısmi değişken hızlı çalışma olanağı • Şebekeden bağımsız çalışmada basit kontrol	• Rotor direncinin ilave bir güç dönüştürücü üzerinden ayarlanması • Rotor direnci ile enerji kayıpları • Dişli, yumuşak yol verici ve reaktif güç kompanzasyonu ihtiyacı • Düşük enerji verimliliği • SKAG'den daha pahalı • Yüksek mekanik stres	• Yumuşak yol verici, güç faktörü düzenleyici ve değişken rotor direnci ile yarı değişken hızlı işletme ± % 10

Çizelge 3.1'deki karşılaştırmalar, literatür bilgileri ve endüstriyel uygulamaların analizi sonucunda; ÇBAG'lerin yüksek güç kurulumlarında tercih edilebildiği görülmektedir. Dişli kutusuz (direct drive) kullanıma olanak sağlama, verimlilik, enerji yoğunluğu, güvenilirlik ve düşük bakım masrafı, harici uyartıma ihtiyaç duyulmaması, güç oranına göre ağırlıkça daha hafif ve tam değişken hızlı işletmeye olanak sunan KMSG'lerin dünya çapında çok fazla ilgi çekmekte olduğu ve özellikle küçük ve orta ölçekli REDS uygulamalarında tercih edildiği tespit edilmiştir. Bu sebeplerden dolayı; bu tez çalışması kapsamında REDS konfigürasyonu KMSG temelli olarak gerçekleştirilmiştir.

3.3.1.3. Kalıcı mıknatıslı senkron generatör (KMSG)

Rüzgar gücünün elektriğe dönüştürülmesinde pek çok tipte generatör kullanılabilse de önceki kısımda detaylıca belirtilen avantajlarından dolayı KMSG'lerin kullanımı daha etkileyici bulunmaktadır. Literatürde yer edinen pek çok çalışmanın incelenmesi ile verimlilik bakımından düşünüldüğünde; REDS'lerdeki trendin değişken hızlı çalışma, türbin şaftına dişli kutusuz doğrudan bağlanabilme (direct-drive) ve KMSG'nin kullanıldığı konseptlere yönelimin olduğu da bilinmektedir. Düşük rüzgar hızlarında işletilmek amacıyla; uygun kutup sayısıyla oluşturulan tasarımlar, doğrudan türbin şaftına bağlı çalışmayı olanaklı kılar. Bu tip generatörler yüksek güç-tork /boyut oranına sahip olmaktadır (Yicheng ve ark., 2005).

KMSG'lerin en çarpıcı özelliği harici uyartım ihtiyacının kalıcı mıknatıslar ile sağlanmasıdır. Kalıcı mıknatısların da pek çok farklı yol ile yerleştirilmesi ile çeşitli akı yönelimleri düzenlenebilir (Yicheng ve ark., 2005; Li ve Chen, 2008; Madani, 2011). Ayrıca radyal akılı (radial flux), eksenel akılı (axial flux), enine akılı (transversal flux), boyuna akılı (longitudinal flux), iç rotor (inner rotor), dış rotor (outer rotor), içten mıknatıslı (interior magnet) ve dıştan mıknatıslı (exterior magnet) makinalar gibi manyetik akı doğrultusu ve yapısına göre çeşitlendirilebilirler.

Radyal akı tasarımı genellikle doğrudan tahrikli (direct-drive) KMSG'lerde kullanılmaktayken enine akılıların market payının çok olmadığı ve eksenel akı tasarımının ise sadece düşük güçlü makinalarda kullanılmakta olduğu söylenebilir (Goudarzi ve Zhu, 2013). Radyal akı tasarımında manyetik akının hava boşluğunu radyal yönde geçecek şekilde kalıcı mıknatıslar düzenlenirken; eksenel akı tasarımında ise manyetik akı hava boşluğunu radyale dik olarak eksenel yönde geçmektedir

(Başkaya, 2018). Radyal akılı KMSG yapısı doğrudan tahrikli REDS'lerde kullanıldığında, geniş hız aralıklarında başarıyla işletilebilirler. Radyal akılı yapıya göre eksenel akılı yapı daha yüksek tork/hacim oranına, basit sargı, düşük gürültü ve kısa eksenel uzunluğa sahip iken; daha düşük tork/kütle oranı, daha büyük dış çap gibi dezavantajları da bulunmaktadır (Li ve Chen, 2008). Eksenel akılı yapının yüksek güçlü REDS'ler için potansiyel olarak daha uygun olabildiği söylenebilir. Diğer taraftan enine akılı yapıda ise manyetik akı yönü rotor dönüş yönüne dik ve yüksek kuvvet yoğunluğuna sahipken; düşük güç faktörlü ve biraz daha karmaşık bir yapıdadır (Bang, 2010). Boyuna akılı yapıda ise manyetik akı yönü ile hareket yönü paraleldir. İç rotor yapısıyla kıyaslandığında ise çevre uzunluğunun artmasından dolayı dış rotor yapısının çoklu kutup tasarımının kolay olabileceği söylenebilir. Mıknatısların yerleştirme şekline ilişkin olarak düşünüldüğünde de, rotor yüzeyi üzerine yerleştirilirse yüzey montajlı olarak atfedilirken, rotorun içine açılan oyuklara yerleştirilirse de rotora gömülü olarak ifade edilmektedir. Gömülü olan yapı daha sağlam olduğundan yüksek hızlı uygulamalar için avantaj sağlayabilse de daha zor bir kontrol gerektirebilir (Bang, 2010). Bu tez kapsamında yapısal tasarımdan ziyade KMSG'nin REDS'lerde kullanımı üzerine çalışılmaktadır. Bu yüzden, burada, KMSG'nin teorik altyapısından bahsedilmektedir.

KMSG'nin matematiksel modeli sürekli durum için çıkarılırken, genellikle bazı kabuller yapılır. Bunlar; stator sargılarının sinüzoidal dağıtımı, elektrik ve manyetik simetri, çekirdek kayıplarının ihmali, manyetik doyumun ihmali gibidir (Munteanu ve ark., 2008; Tobías-González ve ark., 2018). KMSG'nin dinamik denklemleri *d*, *q* senkron referans çerçeveye ilişkin olarak aşağıdaki eşitlikler ile ifade edilebilir (Munteanu ve ark., 2008; Aner, 2014; Al-Toma, 2017). Generatör gerilimi şu şekilde yazılabilir.

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \dfrac{di_d}{dt} - \phi_q \omega_s \\ V_q = R_s i_q + L_q \dfrac{di_q}{dt} + \phi_d \omega_s \end{cases} \tag{3.14}$$

Burada, R_s stator sargı direnci, ω_s elektriksel açısal hız, V_d, V_q d, q bileşen stator gerilimleri, i_d, i_q d, q bileşen stator akımları, L_d, L_q d, q bileşen endüktansları, ϕ_d, ϕ_q ise sırasıyla d, q bileşen kaçak akıyı temsil eder. Benzerce stator akıları ise,

$$\begin{cases} \phi_q = L_q i_q \\ \phi_d = L_d i_d + \phi_m \end{cases} \tag{3.15}$$

ile ifade edilirken, burada ϕ_m ise kalıcı mıknatısın kaçak akısını belirtir. Eşitlik (3.14) ve (3.15) birleştirilirse,

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \dfrac{di_d}{dt} - L_q i_q \omega_s \\ V_q = R_s i_q + L_q \dfrac{di_q}{dt} + \left(L_d i_d + \phi_m\right)\omega_s \end{cases} \tag{3.16}$$

elde edilir. Elektromanyetik güç P_{em} d, q gerilim ve akım bileşenlerinden şu şekilde hesaplanabilir.

$$P_{em} = \frac{3}{2}\left(V_q i_q + V_d i_d\right) \tag{3.17}$$

Burada, V_d, V_q eşitlikleri yerine yazılırsa,

$$\begin{cases} P_{em} = \dfrac{3}{2}\left(\left(R_s i_q + L_q \dfrac{di_q}{dt} + \left(L_d i_d + \phi_m\right)\omega_s\right) i_q + \left(R_s i_d + L_d \dfrac{di_d}{dt} - L_q i_q \omega_s\right) i_d\right) \\ P_{em} = \dfrac{3}{2} R_s {i_q}^2 + \dfrac{3}{2} L_q \dfrac{di_q}{dt} i_q + \dfrac{3}{2} L_d i_d \omega_s i_q + \dfrac{3}{2}\phi_m \omega_s i_q + \dfrac{3}{2} R_s {i_d}^2 \\ \qquad + \dfrac{3}{2} L_d \dfrac{di_d}{dt} i_d - \dfrac{3}{2} L_q i_q \omega_s i_d \\ P_{em} = \overbrace{\dfrac{3}{2}\left(R_s {i_q}^2 + R_s {i_d}^2\right)}^{\text{güç kaybı}} + \overbrace{\dfrac{3}{2}\left(L_q \dfrac{di_q}{dt} i_q + L_d \dfrac{di_d}{dt} i_d\right)}^{\text{manyetik depolanan enerji değişimi}} \\ \qquad + \overbrace{\dfrac{3}{2}\left(L_d i_d \omega_s i_q + \phi_m \omega_s i_q - L_q i_q \omega_s i_d\right)}^{\text{enerji dönüşümü}} \end{cases} \tag{3.18}$$

üç parçadan oluşan bir matematiksel ifade açığa çıkar. Bu ifadenin birinci parçası güç kaybını, ikinci parçası manyetik depolanan enerji değişimi ve son parçası ise enerji dönüşümünün bileşenini ifade eder. Bu son parçadan elektromanyetik tork ifadesi ise şu şekilde türetilebilir.

$$\begin{cases} \tau_{em} = \dfrac{3}{2\omega_m}\left(L_d i_d \omega_s i_q + \phi_m \omega_s i_q - L_q i_q \omega_s i_d\right) \;\; ,\{\omega_s = \omega_m p\} \\ \tau_{em} = \dfrac{3}{2} p\left(\left(L_d - L_q\right) i_d i_q + \phi_m i_q\right) \end{cases} \tag{3.19}$$

Burada, ω_m mekanik açısal hızı ve p generatörün çift kutup sayısını temsil eder. Eğer $L_d = L_q$ kabul edilirse,

$$\tau_{em} = \frac{3}{2} p \phi_m i_q \tag{3.20}$$

olarak hesap edilebilir. Buradan da mekanik eşitlik ise,

$$J_{top} \frac{d\omega_m}{dt} = \left(\tau_{em} - \tau_m - B\omega_m\right) \tag{3.21}$$

olarak yazılabilir. Burada, J_{top} yük ve rotor için toplam atalet momentini, B sürtünme katsayısını ve τ_m ise mekanik torku ifade eder.

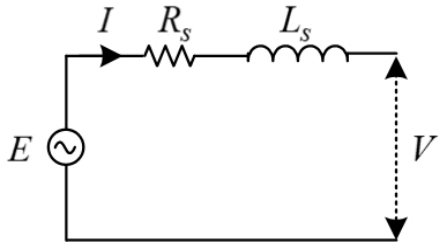
Bu çalışmada, önceki kısımda Şekil 3.18'deki güç topolojisinin kullanılacağı göze alınırsa, KMSG'nin bir fazına ilişkin eşitlikler aşağıdaki gibi çıkarılabilecek olup KMSG'nin bir faz eşdeğeri Şekil 3.20 ile temsil edilir. KMSG'nin indüklediği zıt emk,

$$E = kp\omega_m \tag{3.22}$$

ile ifade edilmekte olup, buradaki k emk için sabit bir katsayıdır. KMSG için bir faz eşdeğer eşitliği ise sürekli halde şu şekilde yazılır.

$$V = E - I(R_s + jp\omega_m L_s) \tag{3.23}$$

Buradaki, I generatör faz akımının, R_s ve L_s sırasıyla stator faz direnci ve endüktansının tanımlamasıdır.



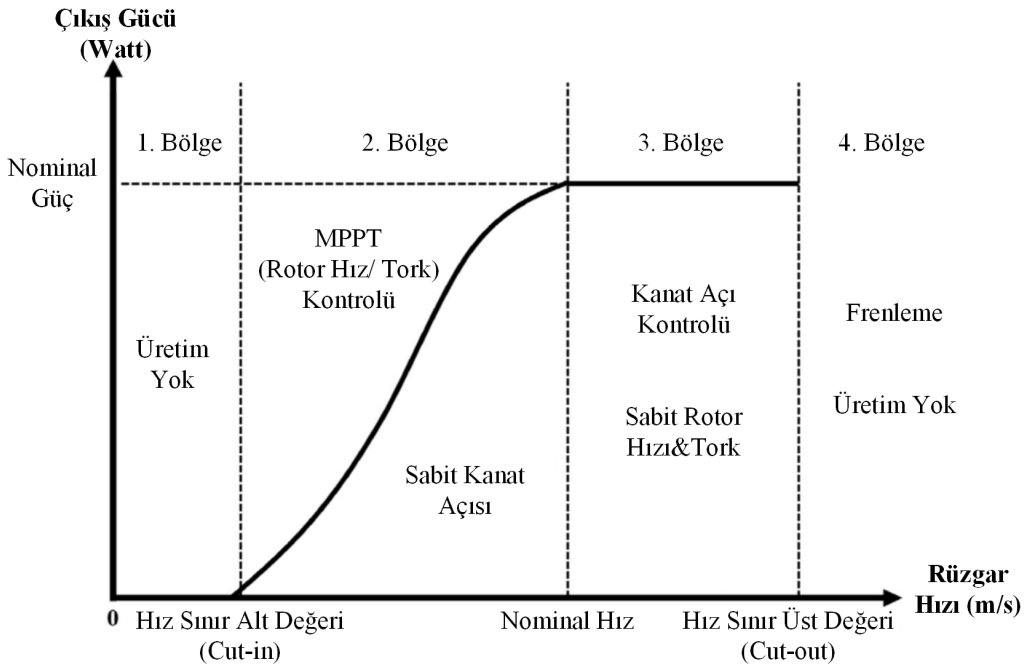
Şekil 3.20. KMSG'nin bir faz eşdeğer devre modeli

3.3.2. Modern REDS'lerde çalışma bölgeleri ve güç kontrol teknikleri

Bu kısımda ilk olarak modern REDS'lerin çalışma bölgeleri ifade edilerek bu bölgelerdeki işletmenin amaçları sunulmaktadır. Diğer yandan ise ikinci olarak, REDS'lerdeki güç kontrol tekniklerine yer verilmektedir.

3.3.2.1. Modern REDS'lerde çalışma bölgeleri

Modern bir REDS'nin rüzgar koşullarına bağlı olarak işletilmesi; dört farklı çalışma bölgesine ayrılmakta olup çalışma bölgeleri Şekil 3.21'deki gibi ifade edilebilmektedir.



Şekil 3.21. REDS sistemlerinin çalışma bölgeleri (Asghar ve Liu, 2018)

Birinci bölge: Rüzgar hızının alt değeri (cut-in)'den daha düşük seviyede kalan kısım birinci bölge olarak temsil edilir ve bu bölgede güç üretimi gerçekleştirilmez. Bu bölge ayrıca park modu (parking mode) olarak da bilinir. Şebekeye bağlı türbin sistemlerinde şebeke bağlantısı kesilir. Bir diğer açıdan da bu bölgedeki üretilebilecek rüzgar güçleri türbin sisteminin içsel kayıplarını karşılamada yeterli değildir. Genellikle iyi ve gelişmiş tasarıma sahip olan bir rüzgar türbini için çalışmaya başlangıç rüzgar

hızı değeri 3,4 m/s olup 4-5 m/s başlangıç hızında aktif olan rüzgar türbin sistemleri literatürde ve endüstride yaygındır (Asghar ve Liu, 2018; Wang ve ark., 2018b).

İkinci bölge: Rüzgar hızı sınır alt değeri (cut-in) ve nominal rüzgar hızı (rated speed) arasındaki kısım ikinci bölge olarak adlandırılmakta olup kısmi yük rejim bölgesi veya MPPT çalışma bölgesi olarak da bilinir. REDS'ler çalışma zamanlarının çoğunda bu bölgede işletilmektedir. Ayrıca bu bölgede sabit kanat açısındayken MPPT algoritma ve kontrol stratejileri işletilerek, olabildiğince maksimum güç ve enerji yakalamaya odaklanılır. Şebeke bağlantılı sistemlerde generatörün şebeke bağlantısı aktif edilir. Literatür ve endüstriyel sistemler incelendiğinde, REDS'lerde nominal rüzgar hızının 11-12 m/s olduğu bilinmektedir.

Üçüncü bölge: Nominal (rated speed) üstü rüzgar hızı ve rüzgar hızı sınır üst değeri (cut-out) arasında kalan rüzgar koşullarına göre belirlenmiş bölgedir. Bu bölgede, durdurma/frenleme (stall) veya kanat açı (pitch) kontrolü gerçekleştirilmekte olup tam yük rejim bölgesi olarak bilinir. Burada ana amaç; mekanik güç üretimini nominal değere sınırlandırmak olup hava koşullarınca oluşan yüksek rüzgar hızlarının türbin sistemine zarar vermesini engellemektir (Kumar ve Chatterjee, 2016). Bu bölgede, türbin sisteminin nominal güç üretimi seviyesinde güç üretimini sağlamak amacıyla ise aktif veya pasif frenlemeler gerçekleştirilmekte olup modern REDS'ler aktif yaklaşım olan kanat-açı kontrollü sistemlerdir. Kanat açı kontrol sistemi sayesinde, kanatlara etkiyen aerodinamik kuvvetler düşürülür ve rotor kanatları da aşırı güçlerden uzak tutulmuş olur (Earnest ve Rachel, 2019).

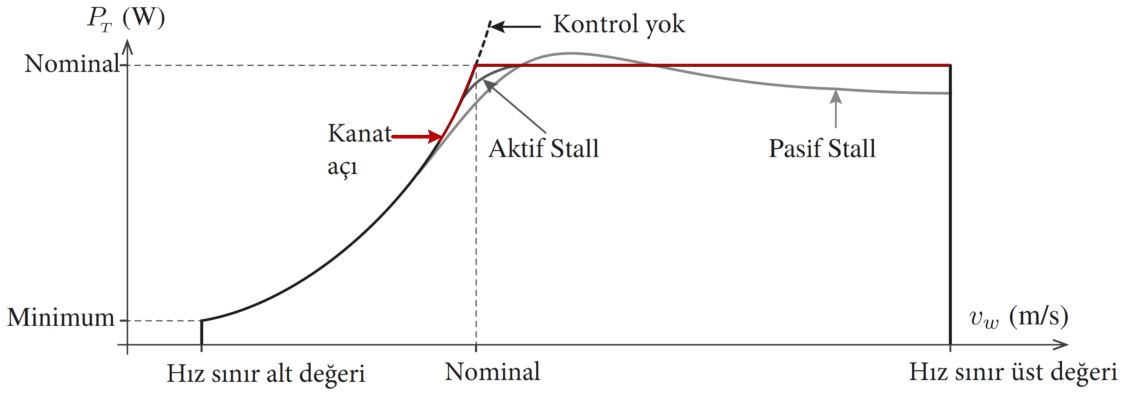
Dördüncü bölge: Rüzgar hızı sınır üst değeri (cut-out)'nden itibaren aşırı rüzgar hızlarının olduğu kısım bu bölgeyi ifade etmektedir. Bu bölgede herhangi bir yapısal zararı önlemek ve güvensiz hava koşullarından uzak tutulmak amacıyla frenlemeler gerçekleştirilerek, türbin sistemleri devre dışı bırakılır, güç üretimi gerçekleştirilmez. Ayrıca şebeke bağlantılı REDS'lerde şebeke bağlantısı da tamamen durdurulur. Bu bölge bir diğer tanımlamayla park modu olarak da ifade edilir. Modern REDS'ler için rüzgar hızı sınır üst değerinin genellikle 25 m/s olarak değerlendirildiği görülmektedir (Asghar ve Liu, 2018; Earnest ve Rachel, 2019).

3.3.2.2. Modern REDS'lerde güç kontrol teknikleri

REDS'ler, çalışma koşullarına ilişkin olarak uygun bir çalışmayı garanti edecek gereklilikleri sağlayan kontrol sistemleriyle tipik olarak donatılırlar. Bu noktada aktif

ve/veya pasif kontrol teknikleri ile gereklilikler sağlanabilir. Bunun bir örneği, güç kontrolünde gücün sınırlandırılması konusunda olmaktadır. Eğer gereklilik arz ediyorsa, türbin sistemi durdurulmalıdır. Yüksek rüzgar hızları için yani nominal rüzgar hızlarının ötesinde, üçüncü çalışma bölgesinde; bütün türbin yapısı üzerine binen yüklenmenin yanı sıra, türbin kanatlarına etkiyen kuvvetin azaltılması ve sonucunda nominal güç üretimine türbin gücünün sınırlandırılması gerekir.

REDS'lerde şu anda kullanılan üç farklı güç sınırlandırma tipi bulunmaktadır. Bunlar; pasif durdurma kontrolü (passive stall kontrol), aktif durdurma kontrolü (active stall control) ve kanat açı kontrolü (pitch control / pitch angle control)'dür. Bu güç sınırlandırma yapılarının bir karşılaştırması Şekil 3.22 ile sunulmuştur.



Şekil 3.22. Üç farklı tipte güç sınırlandırma (Yaramasu ve Wu, 2016)

Pasif durdurma kontrolü; bunlardan en basiti ve en ucuzu olanı olup bu kontrol metodunda kanatlar sabittir. Çalışma prensibi ise güçlü rüzgarların kanat yüzeyinde türbülans oluşturması ile frenleme yaptırılması mantığıdır. Şekil 3.22'deki grafik incelendiğinde, pasif yaklaşımda nominal üstü hıza geçişte öncelikle bir aşma olur ve nominal üstü güç üretilirken sonrasında üretilen güç yavaş yavaş azalır. Bu da daha düşük bir enerji verimliliği oluşturur. Genellikle küçük ve orta ölçekli REDS uygulamalarında kullanılmaktadır. Mekanik bir aktüatör, sensör veya kontrolör olmadığından maliyet odaklıdır.

Aktif yaklaşım, pasif olana göre daha verimli bir işleyiş sağlamakta olup yüksek rüzgar hızlarında nominal güç kapasitesine daha yakın bir çalışmayı sağlar. Ancak daha karmaşık sistemler olmakla birlikte orta ve yüksek güçlü REDS kurulumlarında kullanılabilmektedir. Rotor kanatları küçük bir miktar stall doğrultusunda yönlendirilir. Ancak kanat açı kontrollü sistemlere tam bir alternatif olarak değerlendirilemez.

Kanat açı kontrolünde ise rotor kanatları aktif durma kontrolündekine benzerce ayarlanabilir. Kanat kontrol mekanizması, bir kontrolör üzerinden motor veya hidrolik bir sürücü ile donatılır. Yüksek rüzgar hızı koşullarında elektronik kontrolörün ürettiği sinyal üzerinden motor, rotor kanatlarını açıya uygun pozisyona getirir. Kanatlara etkiyen gücün sınırlandırılması ile türbin gücü düzenlenir. Burada; rüzgarın dışına kanatlar çevrilirken, aktif durdurmada rüzgarın içerisine kanatlar yönlendirilmekte olup kanat açı kontrollü sistemler aktif ve pasif kontrollere göre daha hızlı cevap verirler (Yaramasu ve Wu, 2016). Modern yüksek güçlü rüzgar türbinlerinde genişçe kullanımına yer verilmektedir.

Üç güç sınırlandırma yaklaşımı için kanatlar üzerinde oluşan etkiler ve değişimlerin detaylı görsellerine Earnest ve Rachel (2019)'dan ulaşılabilir.

3.4. Maksimum Güç Noktası İzleme (MPPT)

Önceki kısımlarda bahsedildiği gibi rüzgarın doğası oldukça doğrusal olmayan ve zaman içerisinde değişen bir formdadır. Dolayısıyla her bir rüzgar hızında rüzgar türbin sistemlerinin güç eğrisi karakteristikleri de değişkenlik gösterir. Bu durum Şekil 3.11'de incelenmişti. Bu yüzden, rüzgar akışından o an için maksimum gücün elde edilmesi amacıyla değişken hızlı çalışma olanağı sunan DH-REDS sistemlerinde, Maksimum Güç Noktası İzleme (Maximum Power Point Tracking, MPPT) kontrolü gerçekleştirilmektedir. MPPT kontrolü sayesinde rüzgar hızı zaman içerisinde değişiyorken, her yeni rüzgar hızı için belirlenen optimum/eşsiz bir çalışma noktasında sistemin anlık olarak işletilmesi sağlanır ve bu sayede de rüzgardan yakalanan gücün maksimizasyonu gerçekleştirilir.

MPPT kontrolünün ise başlıca iki spesifik kısımda incelendiği tespit edilebilmektedir. Bunlardan ilki optimum çalışma noktalarının belirlenmesinde kullanılan çeşitli MPPT arama algoritmaları olurken, ikincisi ise bu çalışma noktasına sistemi getirecek kontrolörlerdir (Dursun ve Kulaksiz, 2020b).

Tez kapsamı içerisinde MPPT kontrolü üzerine her iki tarafta da araştırmalar yapıldığından ve bazı karşılaştırmalarda bulunulduğundan dolayı, bu kısımda sırasıyla bazı çeşitleriyle beraber MPPT algoritmaları ve MPPT kontrolörlerine değinilmektedir.

3.4.1. REDS'lerde MPPT algoritmaları

MPPT algoritmaları kendi içlerinde rüzgar hızı, rotor hızı, akımın ve gerilimin ölçülmesi ve belirli parametreler arasında ilişkilerin kurulması gibi durumları barındırdığından pek çok ölçüme de gereksinim duyabilmektedir. Donanımsal ihtiyaçlar sistem maliyetini ve karmaşıklığını artırabilmektedir. Dolayısıyla bu durumların göz önüne alınmasının yanı sıra; sensör ve önbilgi gereksinimi, maliyet, güvenilirlik, işlem yükü, karmaşıklık-uygulanabilirlik düzeyi ve ayrıca optimum çalışma noktasına yakınsama hızı ve doğruluğu gibi kriterler bakımından da her birinin avantajı ve dezavantajı da bulunur.

Bu kısımda REDS sistemlerinde yaygınca kullanılan ve literatürde de yer edinen MPPT arama algoritmalarından bahsedilmekte olup bu yöntemler sırasıyla teorik esasları ve detayları ile de sunulmaktadır.

3.4.1.1. P&O yöntemi

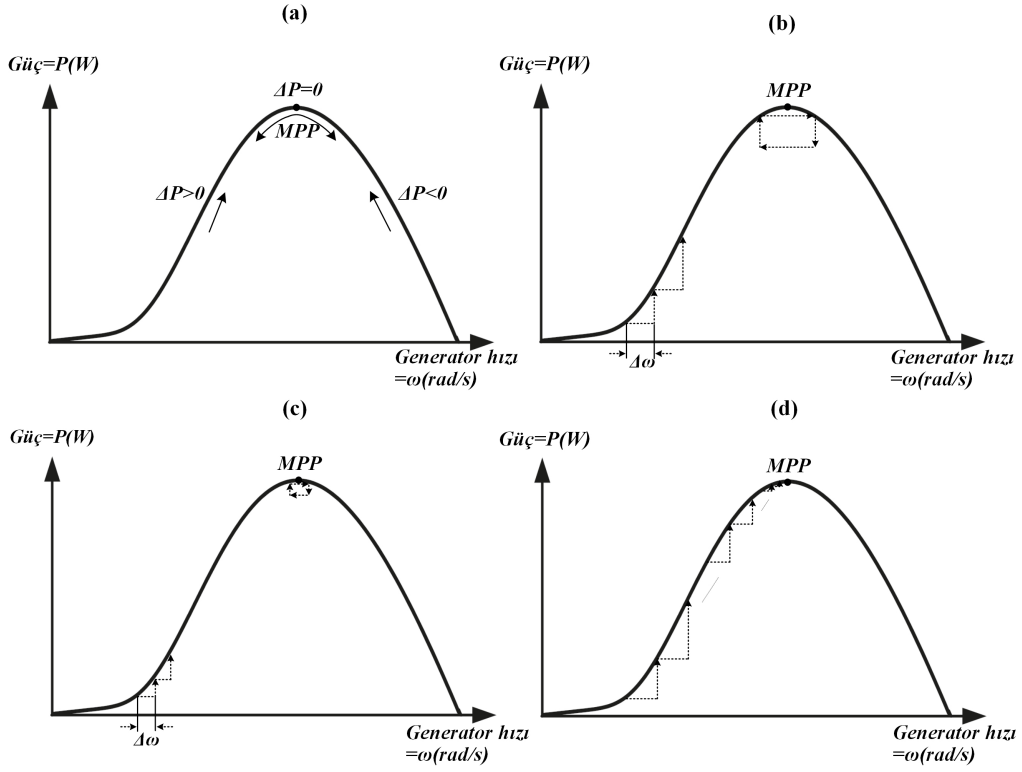
Belirli bir fonksiyonun lokal maksimum noktasının aranmasında kullanılan matematiksel bir optimizasyon tekniği olarak Kumar ve Chatterjee (2016)'da tanımlanan Değiştir & Gözle (Perturbation & Observation, P&O) yöntemi; seçilen bir bilgi sinyalinin değiştirilerek sistem çıkışının gözlenmesi odaklı çalışan, mekanik bir sensör gereksinimi olmayan, düşük maliyetli tasarım sunan güvenilir bir yöntemdir. Literatürde bazen Tepe Tırmanışı Araması (Hill Climbing Search, HCS) yöntemi olarak da bilinmektedir. Donanımsal ve yazılımsal olarak basitçe uygulanabilir ve göreceli olarak düşük maliyetli olmasından dolayı özellikle küçük ve orta ölçekli REDS'lerde yaygınca işletilmektedir.

Bu yöntem, belirli bir andaki rüzgar hızı için türbin güç-hız değişim eğrisinden de anlaşılabileceği gibi, tepe güç noktasını sürekli olarak aramaya çalışan bir algoritmadır. Bu yöntemde tepe araması gerçekleştirilirken değiştirilen referans genellikle generatör hızı, terminal gerilimi veya akımı ve dönüştürücünün çalışma oranı olabilirken; gözlenen bilgi ise, yakalanan güçteki değişim olmaktadır.

Yöntemin çalışma prensibi; generatör hızının değiştirilen bilgi olarak alındığı durum için kısaca şu şekilde ifade edilebilir: Tipik olarak generatör hızı artırılıp veya azaltılıp, anlık olarak gücün ölçülmesi ve bir önceki değerle karşılaştırılmasına ve hıza bağlı olarak gücün değişiminin ($\Delta P/\Delta\omega$) analiz edilmesine dayanmaktadır. Eğer yakalanan güçte artış gerçekleşiyorsa, parametrenin aynı değişim yönünde ilerleyiş

gerçekleştirilir. Aksi durumda güçte bir düşüş gerçekleşiyor ise de değişim yönü tersine çevrilir ve arama devam ettirilir. $\Delta P/\Delta\omega=0$'a ulaşıldığında maksimum güç noktasına erişilmiş olur. Generatör hızı veya dönüştürücünün çalışma oranının ayarlanması ile maksimum güç noktası arayışı gerçekleştirilir. Hızlı değişim gösteren türbülanslı rüzgar koşullarında tepe noktası aramasında yanlış yönlendirme açığa çıkabilir ve sonucunda da performansı kötüleşebilmektedir.

Yöntemin yalın halindeki işleyişinde, değiştirilen bilgi parametresindeki değişim miktarı sabit tutulur ve bu yöntem sabit-adımlı P&O yöntemi olarak bilinir. P&O yöntemi işletilirken adım büyüklüğünün optimum olarak seçilmesi gerekir. Adım büyüklüğü geniş olursa tepe noktası tam olarak bulunamaz ve tepe noktası etrafında salınım fazla olurken, dar adım büyüklüğünde de tepeye yakınsama uzun sürebilmektedir. Bundan dolayı, sabit-adımlı P&O yönteminde yakınsama hızı ve verimlilik düşük olabilmektedir. Bu durum ile adım büyüklüğünün değişken/adaptif olarak uygunca ayarlanması ile başa çıkılabilir. Şekil 3.23 (a) ile geleneksel P&O yönteminin çalışması, Şekil 3.23 (b) ile geniş sabit-adımlı P&O, Şekil 3.23 (c) ile dar sabit-adımlı P&O ve Şekil 3.23 (d) ile de değişken /adaptif-adımlı P&O yöntemlerinin tepe arayışı gösterilmiştir.



Şekil 3.23. a) Geleneksel P&O yönteminin çalışması, **b)** geniş sabit-adımlı P&O **c)** dar sabit-adımlı P&O, **d)** değişken /adaptif-adımlı P&O ile tepe arayışı (Kumar ve Chatterjee, 2016; Youssef ve ark., 2019)

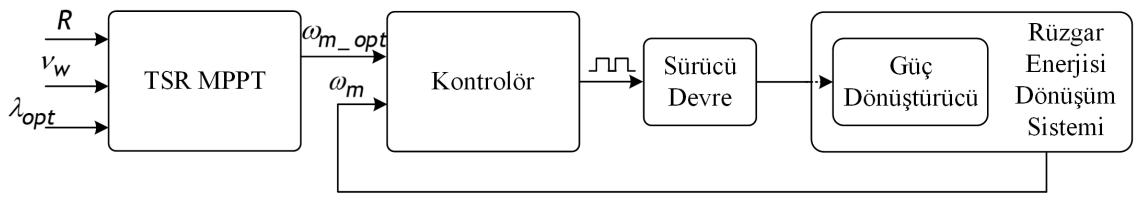
Şekil 3.23 (a-d)'de P&O MPPT yönteminin generatör hızı referanslı olarak işletilmesi ifade edilmiştir. Benzer mantıkla algoritma revize edilerek; yükseltici tip DC-DC dönüştürücünün giriş geriliminin ayarlanması, çalışma oranı veya gerilim referanslı olarak gerçekleştirilebilmektedir. Tezin ilerleyen kısımlarında bu konuda tasarlanan algoritmalar da sunulmaktadır.

3.4.1.2. TSR yöntemi

Uç Hız Oranı (Tip Speed Ratio, TSR) yöntemi; türbin ve rüzgar hızının sürekli olarak sensörler ile ölçüldüğü veya fiziksel parametreler kullanarak tahmin edildiği bir yöntemdir (Fathabadi, 2017). Algoritma rüzgar hızının sürekli değişimine karşın sistemi sürekli olarak optimal TSR değerinde tutmaya çalışır. Eğer TSR optimum değerde sabit bir şekilde sürdürülürse, rüzgar türbini tarafındaki maksimum gücün yakalanması garanti edilebilir ve nominal çalışma hızlarına kadar iyi sonuçlar üretebilen bir yöntemdir. Bu yüzden verimlidir ve hızlı cevaplar verir. Ancak kesin rüzgar hızı ölçümünü sağlayan sensöre gereksinimin bulunması; bu yöntemi daha pahalı bir çözüm yapmaktadır. Ayrıca her rüzgar türbini için eşsiz olan bir optimal TSR bilgisi bu yöntemin dezavantaj oluşturabileceği diğer bir durumdur. Optimal TSR değeri ise rüzgar hızından tamamen bağımsızdır ve değişmez. TSR yönteminin temeli aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir.

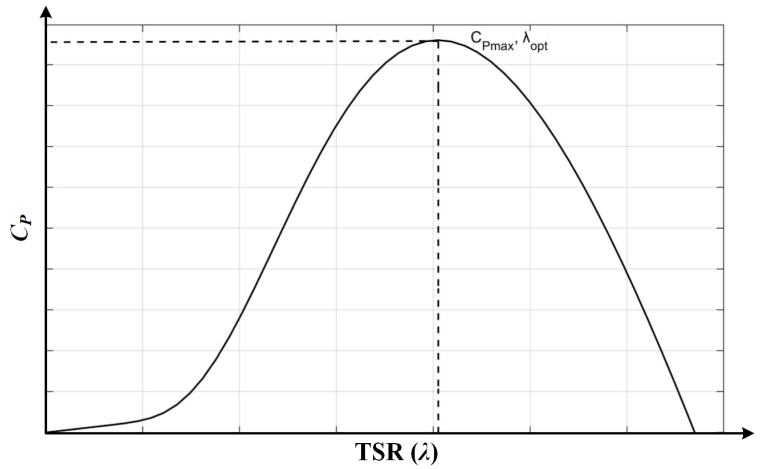
$$\omega_{m_opt} = \frac{v_w \, \lambda_{opt}}{R} \tag{3.24}$$

Burada; v_w rüzgar hızını, λ_{opt} optimum TSR değerini, R türbin kanat çapını ve ω_{m_opt} optimum generatör çalışma hızını temsil etmektedir. Rüzgar hızına bağlı olarak doğrudan türbin çalışma hızının belirlenmesi ile yöntem işletilmekte olup yöntemin genel şeması Şekil 3.24 ile gösterilmektedir.



Şekil 3.24. TSR MPPT yöntemiyle işleyişin genel şeması

Bu işleyiş ile REDS; optimum TSR (λ_{opt}) değerinde çalıştırılırken, türbin güç katsayısı C_P'nin maksimum (C_{P_max})'da tutulması gerçekleştirilmekte olup C_P ile TSR-λ arasındaki ilişki Şekil 3.25'te sunulmaktadır.



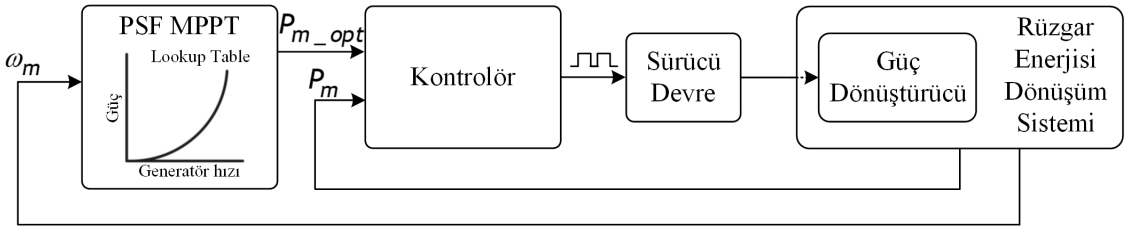
Şekil 3.25. Rüzgar türbini C_P – TSR(λ) karakteristiği

Herhangi bir rüzgar hızı için C_{P_max}'ın garanti edileceği optimum çalışma noktası TSR yöntemi ile aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Linus ve Damodharan, 2015).

$$\omega_{m_optyeni} = \omega_{m_optnom}\left(\frac{v_{wyeni}}{v_{wnom}}\right) \tag{3.25}$$

3.4.1.3. PSF yöntemi

Güç Sinyali Geri Besleme (Power Signal Feedback, PSF) yöntemi; her bir rüzgar türbini için eşsiz olan rüzgar türbininin maksimum güç eğrilerine veya karakteristik denklemlerine ihtiyaç duyan, ancak rüzgar hızı sensörü olmadan MPPT çalışmanın gerçekleştirilebileceği bir yöntemdir (Dursun ve ark., 2020). Bu yöntem için; generatör hızı ile maksimum çıkış gücünün değişiminin eğrileri simülasyon testleri veya deneysel yollar ile elde edilip, genellikle LUT gibi bir tabloda bu veriler saklanarak MPPT çalışma gerçekleştirilir. Bu yöntemde rüzgar türbinlerinin maksimum güç eğrilerinin elde edilmesindeki zorluk bir sınırlayıcı etki oluşturmaktadır (Barakati ve ark., 2009). Diğer açıdan generatör şaft hızının ölçülmesi de bir diğer dezavantaj olarak düşünülebilir. PSF MPPT metodu için blok şema gösterimi Şekil 3.26 ile sunulmaktadır.



Şekil 3.26. PSF MPPT çalışmanın blok şeması (Barakati ve ark., 2009)

3.4.1.4. OTC yöntemi

Optimal Tork Kontrol (Optimal Torque Control, OTC) yöntemi ise her bir rüzgar hızı için maksimum referans tork değerinin mümkün mertebe yakınına generatörün torkunu getirmeye çalışan bir yöntemdir (Kumar ve ark., 2018). Bu yöntemin teorik alt yapısı şu şekilde çıkarılır.

Eşitlik (3.24)'ten rüzgar hızı aşağıdaki gibi çekilirse,

$$v_w = \frac{\omega_m R}{\lambda} \tag{3.26}$$

ve ardından rüzgar türbininin mekanik gücünü veren aşağıdaki eşitlikte yerine yazılıp, türbin kanatlarının süpürdüğü alana göre bu eşitlik düzenlenirse,

$$\begin{aligned} P_m &= \frac{1}{2}\rho A C_P(\lambda,\beta) {v_w}^3 \\ &= \frac{1}{2}\rho A C_P(\lambda,\beta)\left(\frac{\omega_m R}{\lambda}\right)^3 \Leftarrow \left\{A = \pi R^2\right\} \\ &= \frac{1}{2}\rho \pi R^5 C_P(\lambda,\beta)\frac{{\omega_m}^3}{\lambda^3} \end{aligned} \tag{3.27}$$

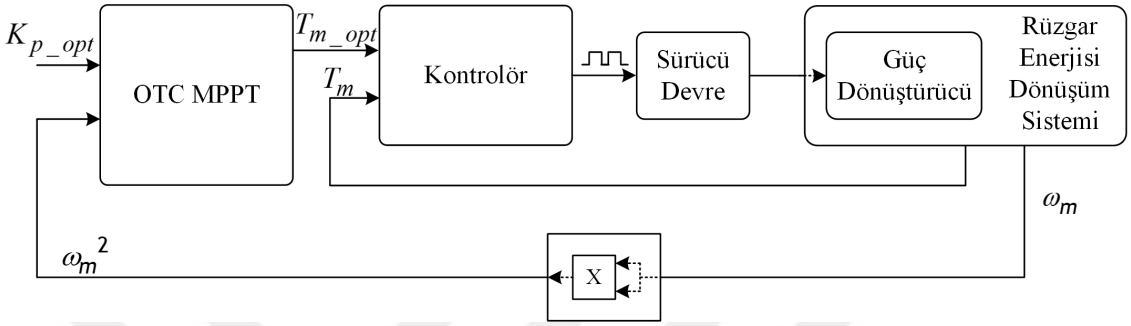
elde edilir. Eğer rüzgar hızına göre rüzgar türbini λ_{opt}'de işletilirse, türbin güç katsayısı $C_{P_\max}$'da tutulacaktır. Böylece, (3.27) düzenlenirse,

$$P_{m_opt} = \frac{1}{2}\rho \pi R^5 C_{P_\max}(\lambda,\beta)\frac{{\omega_m}^3}{{\lambda_{opt}}^3} = K_{p_opt}{\omega_m}^3 \tag{3.28}$$

elde edilir. Buradan da, $T = \frac{P}{\omega}$' den optimal torka geçiş sağlanırsa,

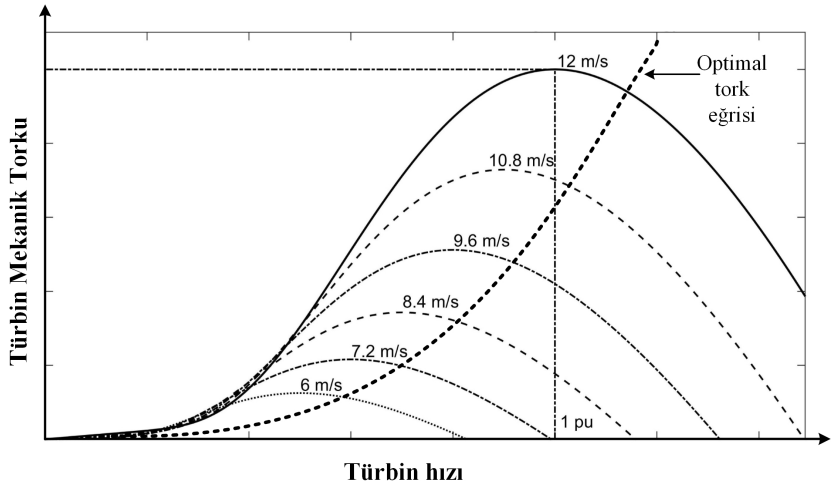
$$T_{m_opt} = \frac{1}{2}\rho\pi R^5 C_{P_\max}(\lambda,\beta)\frac{\omega_m{}^2}{\lambda_{opt}{}^3} = K_{p_opt}\omega_m{}^2 \tag{3.29}$$

elde edilir ve OTC yöntemi için optimal tork, sabit bir K_{p_opt} katsayısı ile $\omega_m{}^2$ 'nin çarpımına bağlı olarak ilişkilendirilir. OTC MPPT yönteminin işleyişine ait blok şema gösterimi Şekil 3.27 ile sunulmaktadır.



Şekil 3.27. OTC MPPT yöntemiyle işleyişin genel şeması

Burada OTC MPPT yöntemiyle referans çalışma torku üretilir ve REDS'nin anlık olarak torku, herhangi bir rüzgar değişimi olsa bile yeni çalışma referans hızından optimum torka geçiş sağlanmaktadır. Kontrolör optimal tork ile sistem geri beslemesi arasındaki farkı minimize etmeye çalışır, böylece MPPT çalışma gerçekleştirilir. Bu yöntem basit ve hızlıdır ancak geri besleme olarak gerçek tork değerine ihtiyaç duyar. Bir diğer taraftan ise hava yoğunluğu ve süreç içerisindeki yaşlanma ile de değişen türbin mekanik parametreleri gibi etkenlere de bağlıdır. OTC eğrileri verimliliği etkiler ve deneysel yollar ile elde edilmek zorunda olup OTC eğrilerinin değişiminin bir temsili Şekil 3.28 ile gösterilebilir.



Şekil 3.28. Farklı rüzgar hızları için türbin hızı - türbin torku karakteristiği (Kumar ve Chatterjee, 2016)

3.4.1.5. ORB yöntemi

Optimum İlişki Temelli (Optimal-Relation-Based, ORB) MPPT yöntemi; çeşitli sistem değişkenleri arasındaki optimum ilişkiler üzerine temellendirilen bir yöntemdir. Bu ilişkiler uygulamalarda genellikle generatör hızı-güç, tork-güç, doğrultulmuş DC gerilim-güç, DC akım-DC gerilim üzerine oluşturulmaktadır (Zhang ve ark., 2011; Dalala ve ark., 2013; Urtasun ve ark., 2013; Xia ve ark., 2013; Dursun ve ark., 2020). Bu yöntem, hız ölçülmesi gibi herhangi bir mekanik sensöre de gereksinim duymaz. Rüzgar hızı değişimlerine ve türbülans etkilerine karşı tepkimesi hızlıdır. Uygulaması kolay ve başarılı dinamik cevaplar üreten bu yöntem diğer yöntemlerle kıyaslandığında, daha yumuşak güç çıkışları elde edilebilmektedir (Tripathi ve ark., 2015). Bir türbin sisteminden başka bir türbin sistemine tamamen değişebilen sistem ön bilgisinin gerekliliği, yöntemin dezavantajını oluşturur.

Şekil 3.18'de önceden sunulmuş olan kontrolsüz doğrultucu ve yükseltici tip DC-DC dönüştürücülü güç dönüşüm topolojisi için ORB ilişkisi; verimlilik adına dönüştürücü giriş voltajı ve yük üzerine dağıtılan güç arasında kurulabilir ve bu ilişkinin tanımlaması teorik olarak şu şekilde kurulabilir:

Eşitlik (3.28)'deki mekanik türbin gücü ifadesi şu şekilde genel formda tanımlanabilir.

$$P_m = K_p \, \omega_m{}^3 \tag{3.30}$$

Buradan yük üzerine doğru ilerleyiş analiz edilirse; generatör ve güç dönüştürücülerdeki kayıpları sabit olmadığı ve çalışma durumuna göre generatörün hızına ilişkin değişkenlik gösterdiği göz önüne alınırsa, yük üzerine dağıtılan güç aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$P_L = \eta_{gen} \eta_{conv} P_m \tag{3.31}$$

Burada η_{gen} ve η_{conv} sırasıyla generatör ve güç dönüştürücünün verimlerini temsil etmektedir. Eğer doğrultucudaki diyot kayıpları ve düşük güçlerdeki yakınsama durumu ihmal edilirse, doğrultulmuş gerilim V_{DC} ve ω_m arasındaki doğrusal ilişki şu şekilde tanımlanabilir (Chen ve ark., 2016).

$$V_{DC} = k_v \omega_m \tag{3.32}$$

Burada k_v bir yakınsama sabitini temsil eder. Buradan da gerekli düzenlemeler yapılır ve denklemlerde yerine yazılırsa, yükün üzerine dağıtılan maksimum güç ifadesi aşağıdaki gibi ilişkilendirilmektedir.

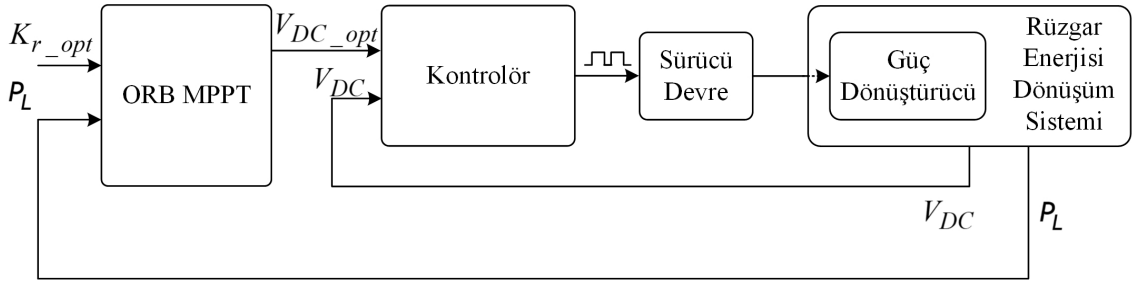
$$\begin{cases} P_{DC} = \eta_{gen} P_m = \eta_{gen} K_p \omega_m{}^3 \\ P_{DC_\max} = \eta_{gen} P_{m_\max} = \eta_{gen} K_{p_opt} \omega_m{}^3 \\ P_{L_\max} = \eta_{conv} P_{DC_\max} = \eta_{conv} \eta_{gen} K_{p_opt} \omega_m{}^3 \\ \qquad = \eta_{conv} \eta_{gen} K_{p_opt} \dfrac{V_{DC_opt}{}^3}{k_v{}^3} = \therefore = K_{r_opt} V_{DC_opt}{}^3 \end{cases} \tag{3.33}$$

Burada K_{r_opt} bir katsayıyı temsil etmekte olup çıkış gücünün V_{DC}'ye bağlı olarak değiştiği analiz edilebilmektedir. Ek olarak; V_{DC_opt} ve $P_{L_\max}$ arasındaki ilişki şu şekilde ifade edilebilir.

$$V_{DC_opt} \cong \sqrt[3]{\frac{P_{L_\max}}{K_{r_opt}}} \tag{3.34}$$

Maksimum elektriksel çıkış gücü V_{DC_opt} referansının takip ettirilmesi ile elde edilebilir. Böylece bu yaklaşım sayesinde, rüzgar hızı gibi çeşitli bilgilerin ölçülmesi için mekanik sensör gereksinimi de elimine edilmektedir. K_{r_opt} katsayılarının değerleri, tanımlanan ilişkiye bağlı olarak hesap edilerek bulunabilir. Ancak her bir rüzgar hızı için bu katsayıların değeri değişkenlik göstermektedir, yani her bir rüzgar hızı için eşsiz bir katsayı vardır. Bu katsayılar simülasyon testleri ve doğrulamaların gerçekleştirilmesi ile elde edilebilir.

Diğer bir taraftan optimizasyon entegrasyonu ile bu katsayıları kesin ve tam değerlerinin çok kısa bir süreç içerisinde belirlenmesi mümkün olabilmektedir. Bu konu üzerine gerçekleştirilen çalışma, bir sonraki bölümde detaylıca sunulacaktır. Burada ifade edilen ORB MPPT yaklaşımının genel bir şeması Şekil 3.29'da verilmektedir.



Şekil 3.29. V_{DC_opt} ve P_{L_max} ilişkili ORB MPPT yöntemiyle işleyişin genel şeması

3.4.2. REDS'lerde MPPT kontrolörleri

MPPT kontrolünün ikinci spesifik başlığı olan MPPT kontrolörleri, MPPT algoritmalarıyla belirlenen sistem çalışma noktasına REDS sistemlerini getirmeyi hedeflerler. Bu noktada başlıca üç sınıf içerisinde kontrolör tasarımları incelenebilir. Bunlar; doğrusal kontrol teorisi, zeki kontrol teorisi ve doğrusal olmayan kontrol teorisi üzerine temellendirilen tasarımlardır (Dursun ve Kulaksiz, 2020b). Ancak aşağıdaki sebeplerden dolayı, REDS'lerde doğrusal olmayan kontrol teorisinin kullanılmasının gereklilikleri bulunmaktadır:

- Rüzgarın doğası yüksek derecede doğrusal olmayan bir karakteristiğe sahiptir (Yang ve ark., 2019).
    1. Hava koşullarına göre rüzgar kesikli ve rastgele değişimleri içerir.
    2. Rüzgar akış kuvvetinin veya rüzgar hızının genliği zaman içerisinde değişir.
    3. Zaman içerisinde türbülanslar olabilmektedir.
- REDS'ler de oldukça doğrusal olmayan bir karakteristiğe sahiptir (Yin ve ark., 2015; Yang ve ark., 2019).
    1. REDS'lerdeki mekanik bileşenlerin doğası doğrusal değildir.
    2. Genellikle çeşitli tiplerde tercih edilebilen doğrultucu, DC-DC dönüştürücü ve inverterlerin kullanıldığı güç dönüşüm topolojileri; yarı iletken anahtarlama elemanlarının ve endüktif / kapasitif depolama elemanlarının kullanılması ile önemli ölçüde doğrusal olmayan ve doğası gereği değişken yapılı sistem birimlerinden oluşur.
- REDS'lerin rüzgarın hızının geniş aralığı için işletilebilmesi, verimlilik açısından gereklidir (Dursun ve ark., 2020; Dursun ve Kulaksiz, 2020b).
- REDS'lerin çalışması esnasında, bazen bozucu etkiler veya sistem belirsizlikleri oluşabilmektedir (Alsumiri, 2015).

Bu yüzden REDS'lerde doğrusal olmayan kontrol teorisi içerisinde yer alan yöntemlerin kullanılması hem gerekli olup hem de performans üzerine de katkı sağlayabilecektir. Tam da bu noktada; doğrusal olmayan kontrol yaklaşımları arasında, REDS'lere uyarlamak amacıyla Kayan Kipli Kontrol tekniği önemli ölçüde ilgi

çekmektedir. Çünkü bu teknik yüksek dayanıklılık (robustness), hızlı cevap, uygulama basitliği ve parametrik değişimlere karşı düşük hassasiyet gibi avantajları barındırmaktadır.

3.5. Kayan Kipli Kontrol (KKK) Tekniği

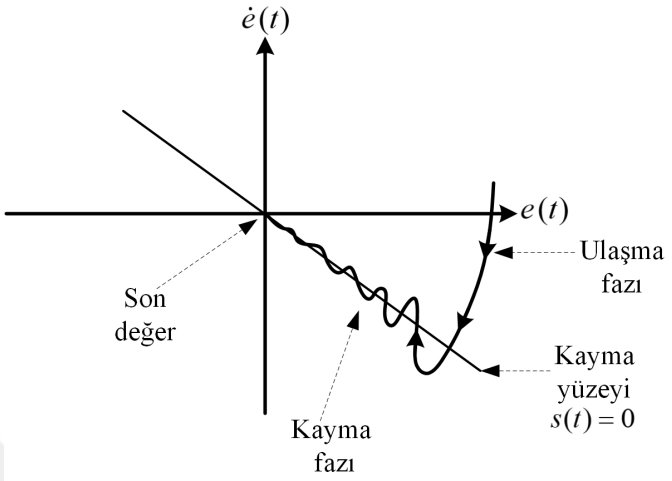
Kontrol sistemlerinin çoğu doğrusal olmayıp pek çok bozucu etki ve belirsizlikler ile zamanla değişen bir davranışsal yapıya sahiptir (Eker, 2010). Son zamanlarda da araştırmacılar böyle sistemlerin kontrolünü gerçekleştirme konusuyla oldukça fazla ilgilenmektedir. Doğrusal olmayan kontrol teorisinin bir türü olan Kayan Kipli Kontrol (Sliding Mode Control, KKK) yöntemi; öngörülemeyen parametrik değişimlere ve harici bozucu etkilere karşı en yüksek performanslı, dayanıklı kontrol yaklaşımlarından birisidir.

KKK teorisi değişken yapılı kontrol teorisinin özel bir tipi olarak düşünülmekte olup doğrusal, doğrusal olmayan veya çok değişkenli sistemlere uyarlanabilmektedir. Ayrıca elektrik motorları ve generatörleri, REDS, güç dönüştürücüleri, reaktif güç kompanzasyon sistemleri, robotik, havacılık ve uzay sistemleri gibi pek çok farklı alanda uygulamada yer bulabilmektedir (Karaarslan ve Iskender, 2012; Köse ve ark., 2014; Mondal ve Mahanta, 2014; Zheng ve ark., 2014; Durdu ve Dursun, 2019; Dursun ve Kulaksiz, 2020b). KKK yöntemi, arzu edilen sistem çıkışını elde etmek amacıyla sistem durumlarının değişimine cevap olarak kontrolörün yapısal değişimi kavramı üzerine teorik olarak temellendirilir. Bu noktada, yüksek hızlı bir kontrol hareketi kontrolörün yapısında anahtarlama eylemi amacıyla kullanılır. Sistem durumları herhangi bir başlangıç durumundan çeşitli tiplerde belirlenebilen kayma yüzeyi üzerine hareket ettirilmeye zorlanmaktadır. Kayma yüzeyi tasarımları doğrusal veya doğrusal olmayan çeşitli tiplerde oluşturularak farklılaştırılabilmektedir. Kayma yüzeyinde hata fonksiyonunun türevine ilişkin çalışıldığından dolayı, kontrolörün derecesi kontrol edilen sistemin derecesine göre daha küçük olur (Edwards ve Spurgeon, 1998).

3.5.1. KKK tekniğinin teorisi

KKK tasarımı iki başlıca aşamadan meydana gelir. Bunlardan ilki, kararlı bir kayma yüzeyinin tasarımını oluşturmaktır. İkincisi ise, sonlu zamanda tanımlanan bu yüzeye sistem durumlarını zorlayacak olan kontrol kuralının optimum tasarımıdır.

KKK tekniğinin faz yörüngesinin bir sunumu Şekil 3.30'da yapılmakta olup görüldüğü gibi kayma kipi fazı (sliding mode phase) ve ulaşma fazı (reaching phase) olarak isimlendirilen iki ana fazdan oluşmaktadır.



Şekil 3.30. KKK tekniğinin faz yörüngesi (Köse ve ark., 2014)

Burada $e(t)$ ve $\dot{e}(t)$ sırasıyla izleme hatası ve türevini ifade ederken, $s(t)$ kayma yüzeyini belirtmektedir. Şekilden anlaşılabileceği üzere, anahtarlama kontrol kuralı ile sistem durumları ulaşma fazı üzerinden kayma yüzeyine getirilir ve sistem durumları bu yüzey üzerinde tutulur. Sistem durumlarının bu yüzey üzerinden son değer orijine kaydırılıyor olmasından dolayı bu aşamaya da kayma fazı denilir. Anahtarlama kontrol kuramının uygunca seçilmesi kontrol edilen sistemin dinamik performansını etkiler.

Geleneksel KKK tasarımının ilk adımı kayma yüzeyinin tasarlanmasıdır. Kayma yüzeyi tasarımı için yaygınca kullanılan ifade Eşitlik (3.35)'teki gibidir.

$$s(t)=\left(\lambda+\frac{d}{dt}\right)^{n-1}e(t) \tag{3.35}$$

Burada $\lambda \in R^{+}$ olup doğrusal kayma yüzeylerinde eğimi belirtirken, n ise sistemin derecesini gösterir ve ayrıca $e(t)=X_r-X$ herhangi bir tanımlı X değişkenine göre izleme hatasını ifade eder. İkinci dereceden bir sistem için düşünülürse, kayma yüzeyi ve türevi aşağıdaki eşitlikteki gibi olur ve $s(t)=\dot{s}(t)=0$ koşulunda sistem kayma fazında olacaktır.

$$\begin{cases} s(t)=\lambda e(t)+\dot{e}(t) \\ \dot{s}(t)=\lambda \dot{e}(t)+\ddot{e}(t) \end{cases} \tag{3.36}$$

Buradan da yöntemin asıl amacı olan kontrol işaretinin üretilmesine geçilirse, kontrol kuralının iki kısımdan oluştuğu ifade edilebilir ve Eşitlik (3.37)'deki gibi verilebilir.

$$u_t(t) = u_{eq}(t) + u_{sw}(t) \tag{3.37}$$

Burada $u_t(t)$ giriş toplam kontrol sinyalini, $u_{eq}(t)$ sürekli formda olan eşdeğer kontrol sinyalini ve $u_{sw}(t)$ ise ayrık formda-doğrusal olmayan anahtarlama kontrol sinyalini ifade eder. Ayrıca $u_{sw}(t)$ genel formda Eşitlik (3.38)'deki gibi seçilebilmektedir.

$$u_{sw}(t) = K_{sw} sign\big(s(t)\big), \qquad sign\big(s(t)\big) = \begin{cases} 1, & s(t) > 0 \\ 0, & s(t) = 0 \\ -1, & s(t) < 0 \end{cases} \tag{3.38}$$

Burada $K_{sw} \in R^+$ olup sistem belirsizliklerini ve bozucu etkilerini bastırmak için yeterince büyük seçilirken, *sign* (*s*(*t*)) ise bilinen signum işaret fonksiyonunu ifade eder. Yüksek frekanslı bu bileşen sinyal yapısından dolayı, kontrol girişinde çatırtı olayı (chattering phenomenon) meydana gelmekte olup bu etkiyi azaltmak amacıyla literatürde farklı anahtarlama kontrol fonksiyonları da türetilebilmiştir.

Özetle; KKK'nın temel prensibi, kontrol edilen sistem değişkenlerinin yörüngesinin arzu edilen denge noktasına doğru yönlendirilebileceği bir referans yol olarak belirli bir kayma yüzeyini işletmektir. Teorik olarak KKK ideolojisi, sadece belirli koşulların mutlak uyumu ile tamamen başarılabilir. KKK'de çalışmanın gerçekleştirilmesi için gerekli olan üç koşul bulunmakta olup bunlar;

- Ulaşma/vurma koşulu (reaching/hitting condition)
- Varlık koşulu (existence condition)
- Kararlılık koşulu (stability condition)

olarak bilinmektedir (Tan ve ark., 2008b). Anahtarlama fonksiyonunun uygunca seçilmesi ile ulaşma koşulu yerine getirilir. Diğer taraftan burada, varlık ve kararlılık konusuna sırasıyla değinilecektir. KKK'de varlık koşulu kayma yüzeyi etrafında konumlanan sistem durumlarının kayma yüzeyine doğru yönlendirilmesini sağlayacak olup, durum yörüngesinin yerel ulaşılabilirlik koşulu aşağıdaki gibi araştırılabilir.

$$\lim_{s\to 0} s.\dot{s} < 0 = \begin{cases} s \to 0^{+}, & \dot{s} < 0 \\ s \to 0^{-}, & \dot{s} > 0 \end{cases} \tag{3.39}$$

Bu ifade yükseltici tip DC-DC dönüştürücü için düşünülürse, kontrol sinyaline göre ilişki aşağıdaki gibi olur.

$$\lim_{s\to 0} s.\dot{s} < 0 = \begin{cases} s \to 0^{+} ve\ \overline{u} = 0, & \dot{s} < 0 \\ s \to 0^{-} ve\ \overline{u} = 1, & \dot{s} > 0 \end{cases} \tag{3.40}$$

Sistem durum ifadesine göre oluşturulan kayma yüzeyinin türevi $\dot{s}(t)$ ifadesi için her iki çözümün sonucu birleştirilerek eşitsizlik türetilir. İleriki bölümde, tasarlanan her bir tipte KKK için varlık koşulunun eşitsizlikleri daha açıkça sunulacaktır.

Diğer bir önemli koşul olan kararlık incelemesine gelindiğinde ise genellikle Lyapunov kararlılık teoremlerinden yararlanılmaktadır. Kararlılığı ispat etmek için Lyapunov fonksiyonu aşağıdaki gibi seçilebilir.

$$V(t) = \frac{1}{2}s^{2}(t) \quad , \{V(0) = 0, V(t) > 0 \quad eğer \quad s(t) \neq 0,\ \dot{s}(t) \neq 0\} \tag{3.41}$$

Burada, $V(t)$ Lyapunov fonksiyonunu ifade etmektedir. Eğer $s(t) \neq 0$ için $\dot{V}(t) < 0$ olursa, uygun sürekli kontrolü sağlayacak olup global asimptotik kararlılık garanti edilecektir. Bu durumun tanımı aşağıdaki eşitsizlikte verilirken, $\dot{V}(t)$ Lyapunov fonksiyonunun türevini temsil etmektedir.

$$\begin{cases} \dot{V}(t) = s(t)\dot{s}(t) \hookleftarrow \\ \mapsto \dot{V}(t) = s(t)\dot{s}(t) < 0 \ \ eğer \ \ s(t) \neq 0 \end{cases} \tag{3.42}$$

Bu sayede bilinmeyen model belirsizlikleri-bozucu etkilerin üst sınırı ve onu bastırabilecek olan K_{sw} belirlenebilecektir. İleriki bölümde, her bir tasarım için KKK kararlılığının ispatı detaylı şekilde sunulacaktır.

3.5.2. KKK tekniğinin gelişimi

Bazı gereksinimler üzerine, KKK teorisinin literatürde farklı tipte tasarımlarının türetildiği görülebilir. Performansı etkileyecek olan sürekli hal hatasının ve çatırtı

miktarının azaltılması konusunun yanı sıra sonlu zamanda yakınsama problemlerinin oluştuğu durumlar da düşünülerek, KKK yöntemi için geliştirmeler konusu açığa çıkmıştır.

Kayma yüzeyinin doğrusal bir fonksiyon olarak tasarlandığı, bazen birinci-dereceden (first-order) KKK olarak da bahsedilen geleneksel KKK (G-KKK) yöntemi irdelendiğinde, uyarlanan alandaki çalışma koşullarına bağlı olarak sürekli hal hatası ve yüksek çatırtının oluşabildiği bilinmektedir. Yakınsama hızı uygun parametrelerin ayarlanması ile keyfi olarak hızlı olabilmesine rağmen dinamik sistemlerin dengelenmesi için sonlu zamanda yakınsamaya her zaman ulaşılamayabilir (Yu ve ark., 2005; Chiu, 2012). Performans artışı için signum tabanlı sabit değişimli anahtarlama kuramı yerine sabit ve oransal değişimli, üstel değişimli, yumuşak saturasyon fonksiyonlu, yumuşak geçişli sigmoid fonksiyonlu ve ayrıca hiperbolik tanjant fonksiyonlu gibi farklı tiplerde anahtarlama kuramları da geliştirilmiştir. Ancak sonlu zaman yakınsaması üzerine gelişmelerden birisi, doğrusal yüzey tasarımından doğrusal olmayan yüzey tasarımına geçişle yani Terminal (Sonlu Zamanlı) KKK (Terminal Sliding Mode Control, T-KKK) geliştirilmesi ile olmaktadır. Ancak sistem durumları denge noktasından uzaklaştıkça T-KKK aynı yakınsama performansını sunamamaktadır (Yang ve Yang, 2011). Buna ek olarak, kayma hiper-düzlemi olarak kesirli fonksiyon yapısının kullanılmasından dolayı T-KKK'de içsel tekillik problemi (intrinsic singularity problem) bulunmaktadır (Chiu, 2012). Bu sebepten denge noktasına hem yakın hem uzak aralıkta hızlı geçici yakınsamayı sağlayan Hızlı Terminal KKK (Fast Terminal Sliding Mode Control, HT-KKK) konsepti önerilmiştir (Yu ve ark., 2005; Yang ve Yang, 2011). Diğer taraftan ise integratör kullanımının izleme hatasını azalttığı bilinen bir gerçektir. Bu noktada kayma yüzeyinde ilave integratör terimlerinin kullanılmasıyla G-KKK'de bulunan çatırtının azaltılması ve sürekli hal hatasının düşürülmesi için İntegral KKK (integral sliding mode control) ve Çift İntegral KKK (double integral sliding mode control) yöntemleri önerilmiş olup çeşitli uygulamalarda başarıyla kullanılabilmiştir (Tan ve ark., 2008a; Saravanakumar ve Jena, 2015; Yaylacı ve Yazıcı, 2018; Yin ve ark., 2020). Bir diğer taraftan Yüksek Dereceden KKK (High-Order Sliding Mode Control, YD-KKK) ve onun özel hali olan İkinci Dereceden KKK (Second-Order Sliding Mode Control, İD-KKK) teorileri etkin kontrol şemaları olarak bilinmektedir. Bu yöntemler daha iyi bir performans ve daha yumuşak bir kontrol elde edebilmek amacıyla türetildiler, ayrıca pek çok uygulamada başarıyla kullanılabildiler (Eker, 2010; Liu ve ark., 2017b; Yi ve Zhai, 2019). Dahası, G-KKK'e göre kararlılık

özelliği korunuyorken, daha iyi bir yakınsama doğruluğu ve daha az çatırtı olanağı sunulabilmektedir (Qiao ve Zhang, 2019). Buna ek olarak HT-KKK ve İD-KKK'nın avantajlarını birleştiren İkinci Dereceden Hızlı Terminal KKK (Second-Order Fast Terminal Sliding Mode Control, İD-HTKKK) yöntemi diğer etkin, gelişmiş ve en güncel tekniklerden birisi olmuştur. Bu yaklaşım; sonlu zamanda yakınsamayı garanti eder, çatırtıyı azaltır ve daha iyi bir izleme doğruluğu sunar (Yi ve Zhai, 2019).

Yukarıda KKK'nın bazı çeşitlerinin gelişiminden ve performansları açısından karşılaştırmasından bahsedilmiştir. Bu yöntemlerden bazılarının daha etkin performans ortaya koyabilmek amacıyla REDS uygulamalarına uyarlandığı bilinirken, bazılarının ise REDS'lere bu tez kapsamındaki gibi bir uyarlanmasının olmadığı da tespit edilebilmektedir.

3.6. KKK Tekniğinin Çeşitli Tipleri

Bu kısımda; yukarıda bahsi geçen çeşitli tiplerdeki KKK tekniklerinden tezde kullanılanları için teorik esaslar kısaca sunulmaktadır. REDS'lere uyarlanması ise bir sonraki bölümde detaylıca aktarılacaktır.

3.6.1. Geleneksel KKK

Geleneksel KKK (G-KKK) için kayma yüzeyi ve anahtarlama kuralının yapısı aşağıdaki eşitlikteki gibi özetlenebilir.

$$\begin{cases} s(t) = \lambda x(t) + \dot{x}(t) & \left\{\lambda \in R^{+}\right\} \\ \dot{s}(t) = \lambda \dot{x}(t) + \ddot{x}(t) & \\ u_t(t) = u_{eq}(t) + u_{sw}(t) & \\ u_{sw}(t) = K_{sw} sign\left(s(t)\right), & \left\{K_{sw} \in R^{+}\right\} \end{cases} \tag{3.43}$$

Çatırtıyı azaltmak amacıyla modifiye edilen hallerinde ise anahtarlama kontrol sinyalinde değişiklik yapılabilmekte olup, birkaç tipi aşağıda verildiği gibi sunulmaktadır.

$$u_{sw}(t) = K_{sw}\left(\frac{s(t)}{|s(t)| + \delta}\right) \qquad ,\left\{K_{sw}, \delta \in R^{+},\ \delta < 1\right\} \tag{3.44}$$

$$u_{sw}(t) = K_{sw} sat\left(\frac{s(t)}{\varepsilon}\right) \quad , \begin{cases} K_{sw}, \varepsilon \in R^{+}, \\ sat\left(\frac{s(t)}{\varepsilon}\right) = \begin{cases} \frac{s(t)}{\varepsilon} & eğer \left|\frac{s(t)}{\varepsilon}\right| \le 1 \\ sign\left(\frac{s(t)}{\varepsilon}\right) & eğer \left|\frac{s(t)}{\varepsilon}\right| > 1 \end{cases} \end{cases} \tag{3.45}$$

$$u_{sw}(t) = K_{sw} \tanh\left(\frac{s(t)}{\phi}\right) \quad , \left\{K_{sw}, \phi \in R^{+},\ \phi < 1\right\} \tag{3.46}$$

3.6.2. Hızlı terminal KKK

Terminal KKK'de kayma yüzeyinin tasarım konsepti aşağıdaki eşitlikteki gibi olmaktadır.

$$s(t) = \dot{x}(t) + \gamma x(t)^{\overbrace{p/q}^{\theta}} \qquad \left\{\gamma \in R^{+}, 0.5 < \theta = p/q < 1\right\} \tag{3.47}$$

Buradan yüzey tasarımında bir farklılık oluşturularak denge noktasından uzaklaştıkça da yakınsamayı sağlamak amacıyla Hızlı Terminal KKK (HT-KKK) literatürde yer edinmiştir. HT-KKK yapısının yüzey tasarımı ve kontrol kuralı, genel teorik esası ile aşağıdaki eşitlikteki gibi özetlenebilir.

$$\begin{cases} s(t) = \dot{x}(t) + \alpha x(t) + \gamma x(t)^{\overbrace{p/q}^{\theta}} & \left\{\alpha, \gamma \in R^{+}, 0.5 < \theta = p/q < 1\right\} \\ \dot{s}(t) = \ddot{x}(t) + \alpha \dot{x}(t) + \gamma\theta \left|x(t)\right|^{\theta-1} \dot{x}(t) & \\ u_t(t) = u_{eq}(t) + u_{sw}(t) & \\ u_{sw}(t) = K_{sw} sign\left(s(t)\right), & \left\{K_{sw} \in R^{+}\right\} \end{cases} \tag{3.48}$$

3.6.3. İkinci-dereceden KKK

KKK teorisinde, kayma kipinin derecesi Levant (2001) tarafından açığa çıkarılmıştır. KKK'nın kaçıncı dereceden olduğunun daha iyi anlaşılabilmesi için Eşitlik (3.49)'daki gibi genel bir doğrusal olmayan belirsiz sistem düşünülsün (Levant, 2001; Tang ve Cai, 2013).

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f\left(x(t),t\right) + g\left(x(t),t\right)u(t) \\ \sigma(t) = s\left(x(t),t\right) \\ \left\{x(t) \in R^n,\ u(t) \in R,\ s\left(x(t),t\right) \in R\right\} \end{cases} \tag{3.49}$$

Burada; $x(t)$ durum değişkenini, $u(t)$ kontrol girişini, $s(x(t),t)$ kayma yüzeyini, $f(x(t),t)$ ve $g(x(t),t)$ uygun boyutlu belirsiz düzgün fonksiyonları temsil ederken, n ise bilinmeyen boyutu ifade eder. Sistemin kayma yüzeyine ilişkin göreceli derecesi ρ, sabit ve bilinen olup ilişkili sıfır dinamiklerin kararlı olduğu kabulü yapıldığında, $x(t)$'nin sürekli fonksiyonları olan zamana göre başarılı türevler aşağıdaki eşitlikteki gibi olmalıdır.

$$s\left(x(t),t\right) = \dot{s}\left(x(t),t\right) = \ddot{s}\left(x(t),t\right) = \ldots = s^{\rho-1}\left(x(t),t\right) = 0 \tag{3.50}$$

Bu eşitliğin anlamı ise ρ'inci-dereceden kayma kipinin var olduğunun söylenebilirliğidir. Yani kayma yüzeyleri ve türevleri için bu koşulun yerine getirilmesi ρ'inci-dereceden varlığı ifade eder. ρ'inci-dereceden KKK uygun bir anahtarlama kuralının tanımlanması ile $s(x(t),t)$ kayma yüzeyini ve ρ-1'inci dereceden zamana göre türevlerini sıfırlamak için sonlu zamanda dengelenmeye izin verecektir.

Yüksek-dereceden KKK (YD-KKK)'nın ana amacı; sistemi yani hatayı kayma yüzeyi $s(x(t),t)$ =0'ye harekete zorlamak ve onun ρ-1'inci ilk türevlerini sıfıra eşitlemek olup çatırtı problemiyle başa çıkmaktır. İkinci Dereceden KKK (İD-KKK) ise YD-KKK'nın özel bir durumunu ifade eder. Buradan $\rho = 2$ için (3.50) eşitliği düzenlenirse,

$$s\left(x(t),t\right) = \dot{s}\left(x(t),t\right) = 0 \tag{3.51}$$

elde edilir ve bu ilişki doğrulanmalıdır. Dolayısıyla kontrolör kayma yüzeyini ve onun zamana göre birinci dereceden türevini sıfıra götürmeyi amaçlar (Mihoub ve ark., 2009; Eker, 2010). Bu kontrol yaklaşımıyla; daha iyi bir performans, daha yumuşak bir kontrol ve daha az çatırtı etkisi gibi avantajlar sunulabilmektedir.

İD-KKK yapısına gelindiğinde ise farklı tiplerde yapılar oluşturulabilirken, bu tez kapsamında yararlanılan PID tip kayma yüzeyi ve anahtarlama kuralının teorisi kısaca aşağıdaki gibi oluşturulabilir.

$$\begin{cases} s(t) = \lambda x(t) + \dot{x}(t) & ,\left\{\lambda \in R^{+}\right\} \\ \sigma = \dot{s}(t) + \beta s(t) = k_p x(t) + k_i \int_0^t x(\tau) d\tau + k_d \dot{x}(t) & ,\left\{\beta, k_p, k_i, k_d \in R^{+}\right\} \\ \dot{\sigma} = \ddot{s}(t) + \beta \dot{s}(t) = k_p \dot{x}(t) + k_i x(t) + k_d \ddot{x}(t) & \\ u_t(t) = u_{eq}(t) + u_{sw}(t) & \\ u_{sw}(t) = \lambda_1 s(t) + K_{sw} sign\left(\dot{s}(t)\right) & ,\left\{\lambda_1, K_{sw} \in R^{+}\right\} \end{cases} \tag{3.52}$$

3.6.4. İkinci-dereceden hızlı terminal KKK

İkinci Dereceden Hızlı Terminal KKK (İD-HTKKK) yapısı için ise; kayma yüzeyi, ikinci dereceden konsepti ile hızlı terminal manifoldu ve ayrıca anahtarlama kuralının teorisi yalın olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{cases} s(t) = \lambda x(t) + \dot{x}(t) & \\ \sigma = \dot{s}(t) + \beta s(t) = k_p x(t) + k_i \int_0^t x(\tau) d\tau + k_d \dot{x}(t) & \\ \sigma = \dot{s}(t) + \beta_1 s(t) + \beta_2 s(t)^{\overbrace{p/q}^{\theta}} & \\ \dot{\sigma} = \ddot{s}(t) + \beta_1 \dot{s}(t) + \beta_2 \frac{p}{q} s(t)^{p/q-1} \dot{s}(t) & \\ \dot{\sigma} = k_p \dot{x}(t) + k_i x(t) + k_d \ddot{x}(t) + \dot{s}(t) \overbrace{\left(-\beta + \beta_1 + \beta_2 \frac{p}{q} s(t)^{p/q-1} \right)}^{\vartheta} & \\ u_t(t) = u_{eq}(t) + u_{sw}(t) & \\ u_{sw}(t) = K_{sw1} \sigma(t) + K_{sw2} sign\left(\sigma(t)\right) & \\ \left\{\lambda \in R^{+}; \beta, k_p, k_i, k_d \in R^{+}; \beta_1, \beta_2 \in R^{+}; 0.5 < \theta = p/q < 1; K_{sw1}, K_{sw2} \in R^{+}\right\} & \end{cases} \tag{3.53}$$

3.7. Optimizasyon

Maksimum gücün yakalanabileceği çalışma noktasının daha doğru ve kesince tespit edilmesinde optimizasyon yöntemlerinin MPPT metotlarına entegrasyonu üzerine çalışıldığından burada optimizasyona yer verilmiştir. Optimizasyon bir fonksiyonu minimize etmek veya maksimize etmek hedefiyle belirli şartlar ve kıstaslar çerçevesinde bir problemin çözülmesi ve en iyi değerlerinin bulunması olarak

tanımlanabilmektedir (Rao, 2019). Yani başka bir deyişle, en optimum sonuca ulaşmak için işletilen algoritmalardır. Bilgisayar ve yazılım sistemlerinin her geçen gün gelişmesinin de etkisiyle, günümüzdeki gerçek dünya problemlerinin optimum çözümünde çeşitli yöntemler geliştirilerek pek çok alanda kullanılagelmişlerdir. Geliştirilen bu yöntemlerin birçoğu ise doğanın içerisindeki işleyişten ilham alarak açığa çıkarılmıştır. Sezgisel optimizasyon algoritmalarının başlıca tipleri biyolojik, sürü ve fizik tabanlı olmak üzereyken daha farklı tipte yaklaşımlar da türetilmiştir. Bu yaklaşımlar, mantıklı bir zaman diliminde en uygun çözümleri bulmak amacıyla arama uzayını verimli bir şekilde araştıran yaklaşımlardır.

Ele alınan amaç fonksiyonları için yakınsama performansının verimli olması beklenilir ve bu yüzden kayda değer sonuçlar için etkin yöntemler gereklidir. Bu noktada, iyi bilinen ve en çok kullanılan optimizasyon tekniklerinden birisi de Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO) olmaktadır (Sahab ve ark., 2013). Ayrıca diğer tekniklere göre daha iyi ve daha doğru yakınsamayı sağlayacak çeşitli türevlerinin düşünülmesi ile PSO'nun çeşitli stratejileri de literatürde yer edinmiştir. Bu tez çalışması kapsamında yeni bir tümleşik güç yakalama çerçevesinin türetilmesi için PSO'nun iki yeni, verimli ve gelişmiş türevlerinden olan Kaotik Dinamik Ağırlıklı PSO (Chaotic Dynamic Weight PSO, CDW-PSO), (Chen ve ark., 2018), ve Gauss Haritası Temelli Kaotik PSO (Gauss Map Based Chaotic PSO, GM-CPSO), (Koyuncu, 2020), stratejilerinden yararlanılmıştır (Dursun ve ark., 2020).

Bu kısımda, sırasıyla PSO ve kaotik türevlerinin kullanımından kısaca bahsedilmektedir.

3.7.1. Parçacık sürü optimizasyonu ve kaotik türevleri

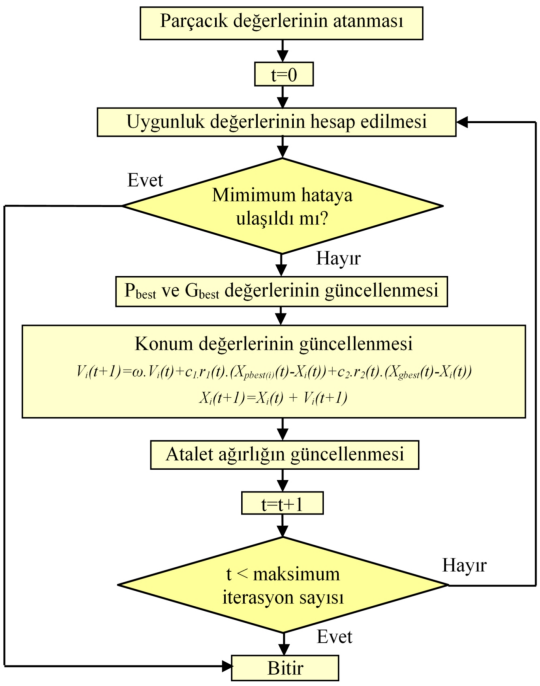
Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO); kuşların ve balıkların sürü davranışı hareketi üzerine temellendirilen, Eberhart ve Kennedy (1995) tarafından geliştirilen ve sürü zekası teknikleri sınıfına ait olan bir popülasyon temelli global optimizasyon yöntemidir. Standart PSO tekniğinde; ayarlanması gereken çok parametrenin olmaması, optimum değerin bulunmasındaki işlem yükünün az olması, hızlı bir yakınsamanın sağlanması ve diğer yaklaşımlara göre uygulanmasının görece kolay olması temel avantajlarındandır. Ayrıca evrimsel programlama teknikleriyle popülasyon üretimi ve jenerasyon güncellemesi gibi arama benzerlikleri olmasına rağmen PSO'da mutasyon ve çaprazlama gibi operatörler bulunmamaktadır.

PSO algoritması, arama uzayındaki her bir farklı çözümü parçacık olarak niteler. Bu noktada her bir parçacığın bir araya gelmesi ile sürü yapısı elde edilir. PSO başlangıç durumunda parçacıkları rastgele değerlerle üreterek, jenerasyonların belirli çerçevede güncellenmesi ile en uygun değeri bulmaya çalışır. Buradaki her bir parçacık kendi hız ve konum bilgisine sahiptir. Belirlenen sınırlar çerçevesinde, her bir parçacık için rastgele hız ve konum değerleri atanır. Her bir parça için uygunluk değeri araştırılır ve lokal sonuçlar tespit edilir. Ardından tüm sürü içerisindeki parçacıkların en iyi değerinin (global) araştırılmasına göre, hız ve konum güncellemeleri aşağıdaki eşitliklerde ifade edildiği gibi yapılır (Koyuncu, 2018).

$$V_i(t+1) = \omega V_i(t) + c_1 r_1(t)\left(X_{pbest(i)}(t) - X_i(t)\right) + c_2 r_2(t)\left(X_{gbest}(t) - X_i(t)\right) \quad (3.54)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (3.55)$$

Burada, ω atalet ağırlığını, c_1 ve c_2 hızlandırma katsayılarını, r_1 ve r_2 [0,1] aralığındaki rastgele değişkenleri, $V_i(t)$, $X_i(t)$ sırasıyla önceki hız ve konum değerlerini, $V_i(t+1)$, $X_i(t+1)$ sırasıyla sonraki hız ve konum değerlerini, $X_{pbest(i)}(t)$ *i.* parçacığa ait en iyi konum değerini ve $X_{gbest}(t)$ ise tüm sürü içerisindeki en iyi (global) konum değerini temsil eder. PSO tekniğinin genel akış şeması ise Şekil 3.31'de ifade edilmektedir (Koyuncu, 2018).



Şekil 3.31. PSO tekniğinin genel akış şeması (Koyuncu, 2018)

3.7.1.1. GM-CPSO ve CDW-PSO yaklaşımı

Diğer tekniklere göre daha iyi yakınsamaya ulaşabilmek amacıyla çeşitli türevlerin düşünülmesi ile PSO'nun çeşitli stratejileri bulunmaktadır. Sinüs Haritası Temelli Kaotik PSO (Sine Map Based Chaotic PSO, SM-CPSO) ve Dinamik Ağırlıklı PSO (Dynamic Weight PSO, DW-PSO), PSO tekniğine dair iki verimli türevdir. Bu iki algoritmanın birleştirilmesi ile dayanıklı bir yapı olarak Kaotik Dinamik Ağırlıklı PSO (Chaotic Dynamic Weight PSO, CDW-PSO) literatürde yer edinmiştir (Chen ve ark., 2018). Bu yapı; temel yaklaşımlar, PSO tabanlı türevler ve kaotik yapılar dahilindeki yirmi optimizasyon algoritmasını geçebilmektedir. Ancak PSO'lar farklı dinamik formülasyonları içerirler ve kaotik tabanlı PSO için gerekli harita farklılık gösterebilir. Bu noktada, Koyuncu (2020)'de PSO için kaotik haritaları araştırarak Gauss Haritası Temelli Kaotik PSO (Gauss Map Based Chaotic PSO, GM-CPSO) yapısını önermiştir. GM-CPSO ve CDW-PSO yaklaşımlarının ürettiği sonuçlar oldukça yakın olabilmektedir. PSO'nun modifiye edilmiş versiyonları olan bu iki yaklaşım, farklı disiplinlerde ispat edilmiş olan üstün ve güncel tekniklerdir. Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen uyarlama, alanında bir ilk olarak düşünülebilir (Dursun ve ark., 2020).

GM-CPSO'da Eşitlik (3.54)'deki ω atalet ağırlığının güncellenmesi, Gauss haritası kullanılarak gerçekleştirilir ve aşağıdaki gibi ifade edilir (Koyuncu, 2020).

$$\omega(i+1)=\begin{cases} 1 & \omega(i)=0 \\ \dfrac{1}{\mathrm{mod}\left(\omega(i),1\right)} & aksi\ halde \end{cases},\ \omega(0)=0.7 \tag{3.56}$$

Burada ağırlığın ilk ataması 0.7 olarak seçilmektedir. Hız değerlerinin sınırları ise aşağıdaki gibi düzenlenir.

$$[V_{\min},V_{\max}]=k_c*[X_{\min},X_{\max}] \tag{3.57}$$

Buradaki $V_{\min},V_{\max}$ minimum ve maksimum hız değerlerini; $X_{\min},X_{\max}$ ise benzerce konum sınır değerlerini ifade eder. Burada k_c ise hız ve konum sınırlamaları arasında ilişki kuran ve genellikle 0.2 alınan bir parametreyi gösterir.

CDW-PSO'ya gelindiğinde ise atalet ağırlığı (3.58) eşitliğinde ifade edilen Sinüs haritası kullanılarak ayarlanır.

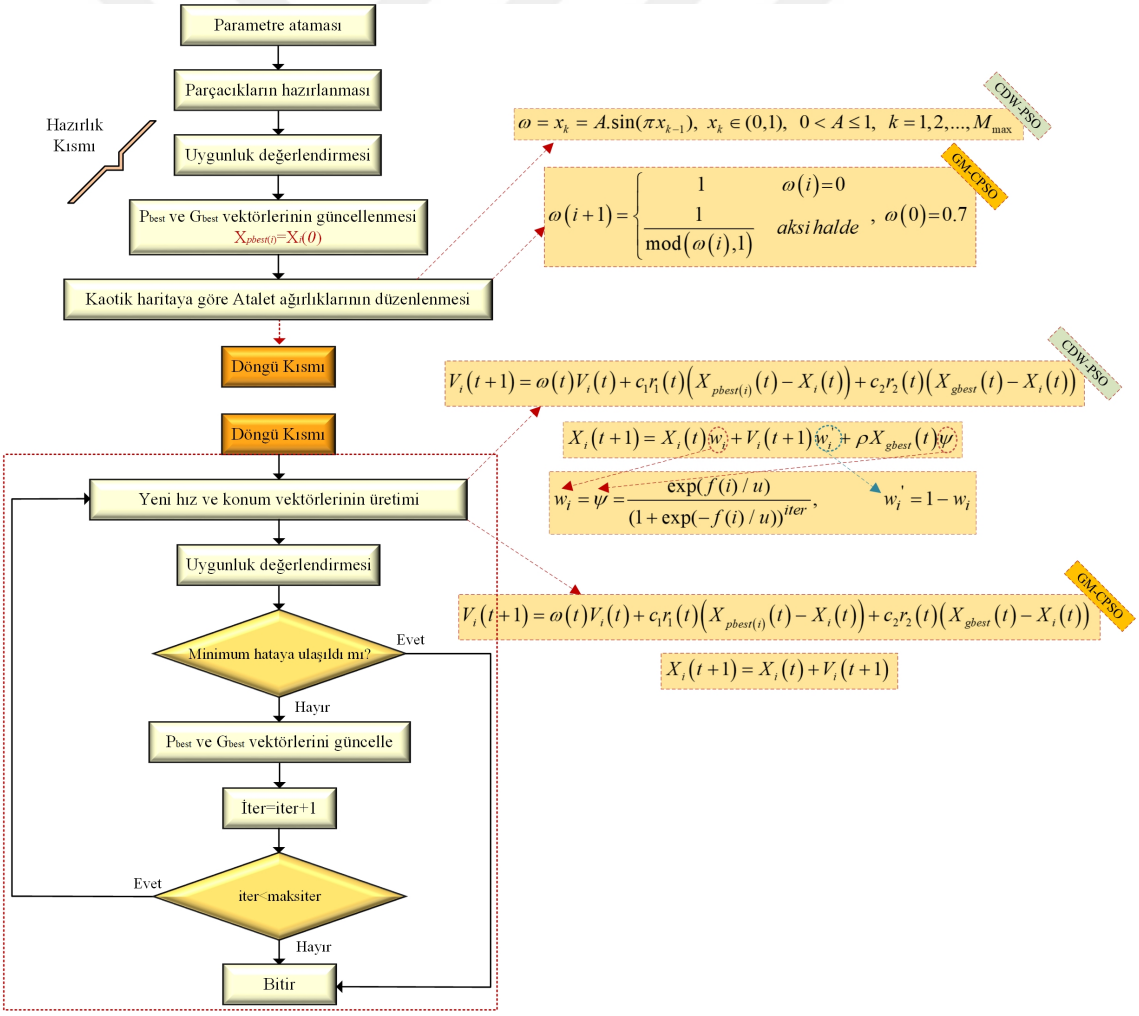
$$\omega = x_k = A.\sin(\pi x_{k-1}),\ \ x_k \in (0,1),\ \ 0 < A \le 1,\ \ k = 1,2,...,M_{\max} \tag{3.58}$$

Burada, k ve M_{max} şu anki ve maksimum iterasyon sayılarını, x_k ise k. iterasyondaki atalet ağırlığını temsil eder. Yeni konumlara ilişkin global en iyi çözümün etkisini arttırmak amacıyla, CDW-PSO'nun konum kavramı aşağıdaki gibi oluşturulur.

$$\begin{cases} X_i(t+1) = X_i(t)w_i + V_i(t+1)w_i^{'} + \rho X_{gbest}(t)\psi \\ \left\{ w_i = \psi = \dfrac{\exp\left(f(i)/u\right)}{\left(1+\exp\left(-f(i)/u\right)\right)^{iter}}, \qquad w_i^{'} = 1 - w_i \right\} \end{cases} \tag{3.59}$$

Burada $w_i = \psi$ ve $w_i^{'}$ dinamik ağırlıkları gösterir.

CDW-PSO ve GM-CPSO metotlarının işleyiş yapısı aşağıdaki gibi sunulabilir.



Şekil 3.32. CDW-PSO ve GM-CPSO metotlarının işleyiş yapısı (Dursun ve ark., 2020)

3.8. Performans Karşılaştırmalarında Kullanılan İndisler

Modern kontrol sistemlerinde, kapalı çevrim kontrol sistemlerinin hem hassasiyet ve doğruluğun hem de izleme performansının değerlendirilmesinde performans indisleri kullanılmaktadır (Shinners, 1998; Durdu ve Dursun, 2019). Bu indisler; yerleşme zamanı, aşım miktarı ve cevap hızı gibi karakteristikleri dolaylı olarak gösterirler. Ayrıca bu indisler, zamanın ve/veya hatanın bir fonksiyonu olarak tipik bir şekilde hesaplanmaktadır. Performans indislerinden birkaçı; Mutlak Hatanın Toplamı (Integral of the Absolute Error, IAE), Karesel Hatanın Toplamı (Integral of the Square Error, ISE), ve Zaman Ağırlıklı Mutlak Hatanın Toplamı (Integral of the Time Multiplied by the Absolute Value of the Error, ITAE)'dır (Eker, 2010). Bu kriterlerin hesaplanmaları sırasıyla aşağıdaki eşitlikler yardımıyla yapılabilir.

$$IAE = \int_0^\infty |e(t)|\, dt \tag{3.60}$$

$$ISE = \int_0^\infty e^2(t)\, dt \tag{3.61}$$

$$ITAE = \int_0^\infty t\,|e(t)|\, dt \tag{3.62}$$

Performans indisleri, tezin sonraki bölümünde yapılan kontrolör tasarımı çalışmalarında karşılaştırmalar yapılırken kullanılacağından teorik esasından burada bahsedilmiştir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Tezin bu kısmında, KMSG temelli Değişken Hızlı Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemi (DH-REDS)'nin tasarımı ve maksimum güç eldesinin gerçekleştirilmesi sunulmaktadır. Ayrıca bu tez çalışmasında geliştirilen ve simülasyon ortamında geçerliliği test edilen MPPT algoritmaları ve kontrolör tasarımları detaylı olarak teorik esaslar eşliğinde verilmektedir. Simülasyon testleri için ise, rüzgar hızına ilişkin performansların değerlendirilmesi amacıyla, çeşitli rüzgar hızı değişim senaryoları oluşturulmaktadır.

4.1. MPPT'li KMSG Temelli Değişken Hızlı REDS Sisteminin Tasarımı

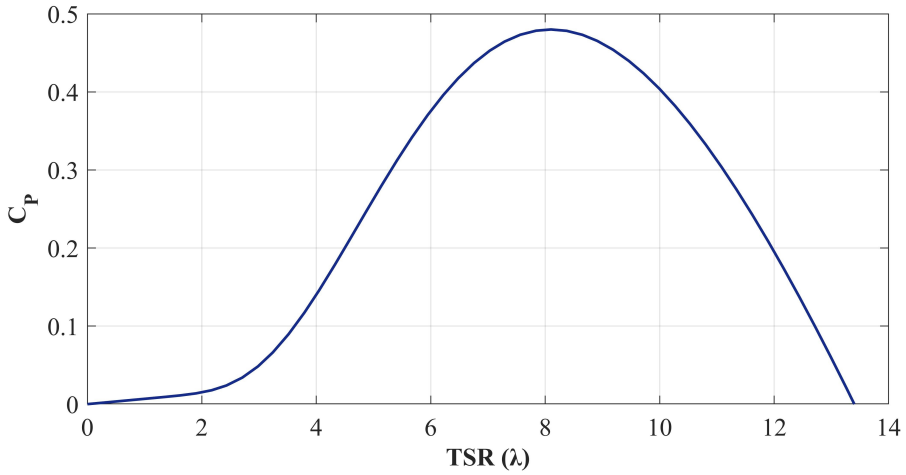
Bu kısımda, REDS sistem konfigürasyonunun başlıca temel yapılarını oluşturan rüzgar türbini, KMSG, kontrolsüz doğrultucu ve yükseltici tip DC-DC dönüştürücünün karakteristikleri irdelenmektedir.

4.1.1. Rüzgar türbini karakteristiği

Bu tez kapsamındaki çalışmalarda kullanılan rüzgar türbininin mekanik karakteristiği $\lambda_{opt} = 8.1$ için $C_{P_\max} = 0.48$ güç katsayısına ulaşmakta olup uç hız oranı (TSR) λ ve kanat açısı β'ya ilişkin olarak bu güç katsayısının matematiksel ifadesi şu şekildedir.

$$\begin{cases} C_p(\lambda,\beta) = C_1\left(\dfrac{C_2}{\lambda_i} - C_3\beta - C_4\right)e^{-(C_5/\lambda_i)} + C_6\lambda \\ \dfrac{1}{\lambda_i} = \dfrac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \dfrac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \tag{4.1}$$

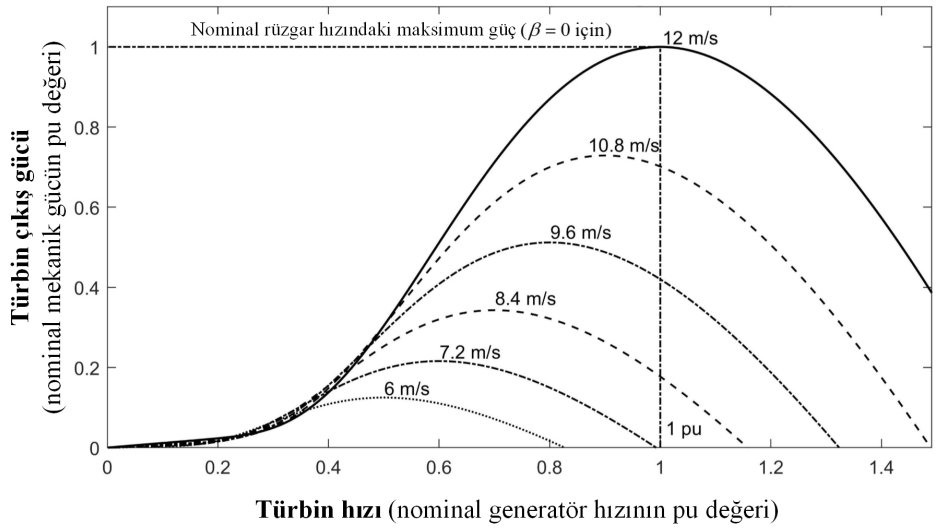
Bu eşitlikteki ifadeler için; C_1 - C_6 parametrik katsayılarının değerleri ise sırasıyla C_1=0.5176, C_2=116, C_3=0.4, C_4=5, C_5=21 ve C_6=0.0068 olarak alınmaktadır. Ayrıca sabit kanat açılı sistemlerde $\beta = 0$ olup C_P sadece λ'ya bağlı olarak değişir. Rüzgar türbininin $C_P - \lambda$ karakteristiği Şekil 4.1'deki gibi olmaktadır.



Şekil 4.1. Rüzgar türbininin $C_P - \lambda$ karakteristiği (Dursun ve ark., 2020)

Rüzgar türbininin mekanik gücünü veren Eşitlik (3.27)'den yararlanarak, türbin (mekanik) çıkış gücü ve türbin çalışma hızı arasındaki ilişki (4.2)'deki gibi oluşturulmakta olup farklı rüzgar hızları altındaki değişim grafiği Şekil 4.2'deki gibi olmaktadır. Şekil 4.2'den anlaşılacağı üzere, her bir rüzgar hızı için maksimum mekanik türbin gücünü sağlayan tek bir çalışma hızı vardır.

$$\begin{cases} P_m = \dfrac{1}{2}\rho A C_P(\lambda,\beta) {v_w}^3, & \left\{ A = \pi R^2,\ v_w = \dfrac{\omega_m R}{\lambda},\ \beta = 0 \right\} \\ \quad = \dfrac{1}{2}\dfrac{\rho \pi R^5 C_P}{\lambda^3} {\omega_m}^3 \end{cases} \tag{4.2}$$



Şekil 4.2. Rüzgar türbini hızına ilişkin çıkış gücünün değişim karakteristiği (Dursun ve Kulaksiz, 2020b)

4.1.2. KMSG ve kontrolsüz doğrultucunun karakteristiği

Rotoruna kalıcı mıknatısların yerleştirilmesiyle kendinden uyarmalı olarak çalışan KMSG'ler; rüzgar türbini tarafından sürülerek, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirirler ve REDS'ler için oldukça cezbedici olmaktadırlar. Bu kapsamda, tez için belirlenen konfigürasyonda KMSG'nin çıkışı, kontrolsüz üç fazlı bir köprü doğrultucuya aktarılmıştır. Doğrultucu çıkışındaki gerilimin hesabı şu şekilde yapılır. Önceki kısımda KMSG'nin indüklediği zıt emk ve bir faz eşdeğer gerilimi Eşitlik (3.22) ve (3.23)'te sunulmuştu. Buradan; generatörün doğrultucu çıkışında oluşturacağı gerilim, diyot kayıpları ihmal edildiğinde, aşağıda verilen eşitlikteki gibi ifade edilir (Mohan ve ark., 2003; Hui ve ark., 2015).

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V - \frac{3}{\pi} p\omega_m L_s I_L \tag{4.3}$$

Ardından Eşitlik (3.22) ve (3.23) burada yerine yazılırsa,

$$\begin{aligned} V_{dc} &= \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V - \frac{3}{\pi} p\omega_m L_s I_L, \quad \left\{ \begin{matrix} V = E - I(R_s + jp\omega_m L_s) \\ E = kp\omega_m \end{matrix} \right\} \\ &= \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \left(E - I(R_s + jp\omega_m L_s) \right) - \frac{3}{\pi} p\omega_m L_s I_L \\ &= \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \left(kp\omega - I(R_s + jp\omega_m L_s) \right) - \frac{3}{\pi} p\omega_m L_s I_L \end{aligned} \tag{4.4}$$

elde edilir. Ayrıca I_L ise;

$$I_L = \frac{\pi}{\sqrt{6}} I \tag{4.5}$$

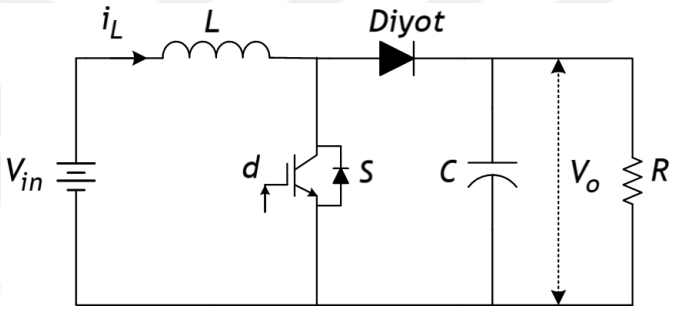
olduğundan dolayı yerine yazılır ve eşitlik düzenlenirse, doğrultucu çıkışındaki gerilim aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{aligned} V_{dc} &= \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \left(kp\omega - I(R_s + jp\omega_m L_s) \right) - \frac{3}{\pi} p\omega_m L_s \frac{\pi}{\sqrt{6}} I \\ &= \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \left(kp\omega_m - I(R_s + jp\omega_m L_s) \right) - \frac{3}{\sqrt{6}} p\omega_m L_s I \\ &= \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \left(\sqrt{\left(kp\omega_m\right)^2 - \left(p\omega_m L_s I\right)^2} - IR_s \right) - \frac{3}{\sqrt{6}} p\omega_m L_s I \end{aligned} \tag{4.6}$$

4.1.3. Yükseltici tip DC-DC dönüştürücünün karakteristiği

Tezdeki konfigürasyonda, kontrolsüz üç fazlı köprü doğrultucunun çıkışı yükseltici tip DC-DC dönüştürücüye bağlanmıştır. Bu topoloji içerisinde bu tip bir dönüştürücünün yer almasının sebeplerinden bazıları; tek bir güç anahtarlama elemanına sahip olması ile daha güvenli, kolay ve basit bir kontrol imkanı sunulabilmesidir. KMSG'nin çıkış geriliminin düzenlenmesi dönüştürücünün anahtarlama elemanı için kontrol sinyalinin ayarlanması ile olur. Bu yüzden; dönüştürücü yapısının, çalışma prensibinin ve dinamik ifadelerinin burada irdelenmesi gerekir.

Yükseltici tip DC-DC dönüştürücünün devre şeması aşağıdaki şekilde sunulmaktadır.



Şekil 4.3. Yükseltici tip DC-DC dönüştürücünün devre şeması

Burada V_{in} ve V_o sırasıyla dönüştürücü giriş ve çıkış gerilimini temsil ederken; L, C ve R endüktans, kapasitans ve yük direncini ifade eder. S ise yarı iletken anahtarlama elemanını göstermektedir. Tez kapsamındaki uygulamalarda, dönüştürücü sürekli iletim modu için tasarlanmış olup dinamiği ise şu şekildedir (Wai ve Shih, 2011; Yazici ve Yaylaci, 2016).

Anahtarlama elemanı iletimdeyken,

$$\begin{cases} \dfrac{dV_o}{dt} = -\dfrac{V_o}{RC} \\ \dfrac{dI_L}{dt} = \dfrac{V_{in}}{L} \end{cases} \quad ,\{u = 1, \overline{u} = 0 \ için\} \tag{4.7}$$

olur ve anahtarlama elemanı kesimde olduğunda ise,

$$\begin{cases} \dfrac{dV_o}{dt} = -\dfrac{V_o}{RC} + \dfrac{I_L}{C} \\ \dfrac{dI_L}{dt} = \dfrac{V_{in}}{L} - \dfrac{V_o}{L} \end{cases} \quad ,\{u = 0, \overline{u} = 1 \; için\} \tag{4.8}$$

olur. Bu iki ifade cebirsel olarak birleştirilirse, aşağıdaki eşitlikte sunulduğu gibi yükseltici tip DC-DC dönüştürücünün dinamiği elde edilir.

$$\begin{cases} \dfrac{dV_o}{dt} = -\dfrac{V_o}{RC} + \overline{u}\dfrac{I_L}{C} \\ \dfrac{dI_L}{dt} = \dfrac{V_{in}}{L} - \overline{u}\dfrac{V_o}{L} \end{cases} \tag{4.9}$$

Burada u, anahtarlama elemanı için kontrol girişini, $\overline{u} = 1 - u$ ise lojik olarak ters kontrol girişini temsil eder. Dönüştürücünün dönüştürme oranı κ ise aşağıdaki gibi ifade edilmekte olup, d [0-1] aralığında değişen çalışma oranını göstermektedir.

$$V_{in} = \kappa V_o \quad ,\{\kappa = 1 - d\} \tag{4.10}$$

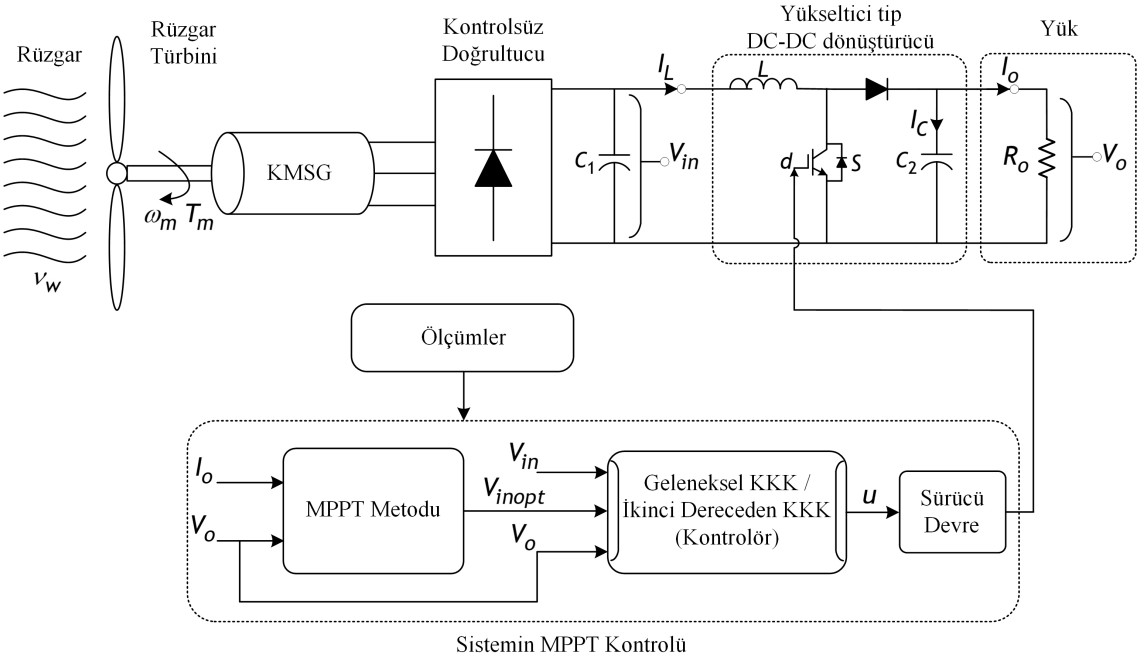
Ek olarak, kontrolör tasarımı için gerekli olabilecek I_C ifadesi ise aşağıdaki gibi olup burada I_L, I_C sırasıyla indüktör ve kapasitör akımlarını temsil eder.

$$I_C = \overline{u}\, I_L - \frac{V_o}{R} \tag{4.11}$$

4.2. Geleneksel KKK ve İkinci Dereceden KKK Temelli MPPT Kontrolünün Tasarımı

Bu kısımda, KMSG temelli değişken hızlı REDS'den maksimum gücün yakalanmasında iyi bir izleme performansının elde edilmesi üzerine çalışılmıştır. MPPT algoritması olarak, rüzgar hızının ölçülmesi gibi mekanik sensör ihtiyacını ortadan kaldıran, ORB tabanlı bir yaklaşım kullanılmaktadır. Bu yaklaşım ile optimum çalışma noktaları belirlenerek kontrolöre aktarılmaktadır. MPPT'yi sağlayan optimal dönüştürücü gerilimine sistemi getirecek olan kontrol sinyalinin üretilmesinde, Geleneksel KKK ve İkinci Dereceden KKK temelli gerilim regülatörleri tasarlanmaktadır. MPPT verimliliğinin iyileştirilmesi gayesiyle, karşılaştırmalı ve

detaylı analizler gerçekleştirilmektedir. Tasarlanan MPPT kontrolünü içeren sistem konfigürasyonu Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4. REDS sistem konfigürasyonu

4.2.1. Kontrol edilecek sistemin değişkenlerine ilişkin tanımlamalar

Kontrolör tasarımının gerçekleştirilmesinde ilk adım, kontrol edilen sistemin durumlarının çıkarılmasıdır. Bu noktada, REDS konfigürasyonundaki KMSG geriliminin regüle edilmesinin sağlanmasında kullanılan yükseltici tip DC-DC dönüştürücü için kontrol edilen sistem değişkenlerinin tanımlaması şu şekilde yazılabilir:

$$\begin{cases} X_1 = V_{in_opt} - V_{in} \\ X_2 = \dot{X}_1 = -\dot{V}_{in} \\ \dot{X}_2 = -\ddot{V}_{in} \end{cases} \tag{4.12}$$

(4.9)'da verilen dönüştürücünün dinamikleri burada yerine yazılırsa V_{in}, $\dot{V}_{in}$ ve $\ddot{V}_{in}$ ifadeleri aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{cases} V_{in} = \kappa V_o \\ \dot{V}_{in} = \kappa \dot{V}_o = \kappa\left(\overline{u}\dfrac{I_L}{C} - \dfrac{V_o}{RC}\right) \\ \ddot{V}_{in} = \kappa \ddot{V}_o = \kappa\left(\overline{u}\dfrac{\dot{I}_L}{C} - \dfrac{\dot{V}_o}{RC}\right) \end{cases} \tag{4.13}$$

(4.9)'dan I_L ifadesi aşağıdaki gibi çekilirse,

$$I_L = \int -\overline{u}\frac{V_o}{L} + \frac{V_{in}}{L}dt \tag{4.14}$$

ardından X_1 tanımlaması $X_1 = V_{in_opt} - V_{in}$ olarak yapılırken, (4.13) ve (4.14) birleştirilirse X_2 ve $\dot{X}_2$ aşağıdaki eşitliklerdeki gibi ilişkilendirilir.

$$\begin{aligned} X_2 = \dot{X}_1 = -\dot{V}_{in} &= -\kappa\left(\overline{u}\frac{I_L}{C} - \frac{V_o}{RC}\right) = -\kappa\left(\frac{\overline{u}}{C}\left(\int -\overline{u}\frac{V_o}{L} + \frac{V_{in}}{L}dt\right) - \frac{V_o}{RC}\right) \\ &= -\kappa\left(\int -\overline{u}\frac{V_o}{LC} + \overline{u}\frac{V_{in}}{LC}dt - \frac{V_o}{RC}\right) = -\kappa\left(\int \overline{u}\left(\frac{V_{in}}{LC} - \frac{V_o}{LC}\right)dt - \frac{V_o}{RC}\right) \\ &= \kappa\left(\frac{V_o}{RC} + \int \overline{u}\frac{V_o - V_{in}}{LC}dt\right) \end{aligned} \tag{4.15}$$

$$\begin{aligned} \dot{X}_2 = \ddot{X}_1 = -\ddot{V}_{in} &= \kappa\left(\frac{\dot{V}_o}{RC} + \overline{u}\frac{V_o - V_{in}}{LC}\right) = \kappa\frac{\dot{V}_o}{RC} + \overline{u}\kappa\left(\frac{V_o - V_{in}}{LC}\right) \\ &, \left\{\begin{array}{l} \kappa\dot{V}_o = \dot{V}_{in} = -X_2 \\ X_1 = V_{in_opt} - V_{in} \rightarrow \left(-V_{in} = X_1 - V_{in_opt}\right) \end{array}\right\} \\ &= -\frac{X_2}{RC} + \overline{u}\kappa\left(\frac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC}\right) \end{aligned} \tag{4.16}$$

Böylece sistemin tüm durum değişkenleri elde edilir ve derlenirse Eşitlik (4.17)'deki gibi olur.

$$\begin{cases} X_1 = V_{in_opt} - V_{in} \\ X_2 = \kappa\left(\dfrac{V_o}{RC} + \displaystyle\int \overline{u}\frac{V_o - V_{in}}{LC}dt\right) \\ \dot{X}_2 = -\dfrac{X_2}{RC} + \overline{u}\kappa\left(\dfrac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC}\right) \end{cases} \tag{4.17}$$

4.2.2. Geleneksel KKK temelli kontrolör tasarımı

Geleneksel KKK için kayma yüzeyi ve onun birinci türevi aşağıdaki gibi belirlenir.

$$\begin{cases} s(t) = \lambda_C X_1 + X_2 \\ \dot{s}(t) = \lambda_C \dot{X}_1 + \dot{X}_2 = \lambda_C X_2 + \dot{X}_2 \end{cases} , \left\{ s(t) = \left(\lambda_i + \frac{d}{dt} \right)^{n-1} e_i(t) \right\} \tag{4.18}$$

Burada, λ_C pozitif bir katsayı olup doğrusal kayma yüzeyinin eğimini ifade eder. Ardından kontrol durum değişkenlerinden olan X_2 ve $\dot{X}_2$, kayma yüzeyinin türevi $\dot{s}(t)$ ifadesinde yerine yazılırsa ve eşitlik düzenlenirse aşağıdaki ifadeye ulaşılır.

$$\begin{aligned} \dot{s}(t) &= \lambda_C X_2 + \dot{X}_2 \\ \dot{s}(t) &= \lambda_C X_2 - \frac{X_2}{RC} + \overline{u}\kappa \left(\frac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC} \right) \\ &= X_2 \left(\lambda_C - \frac{1}{RC} \right) + \overline{u}\kappa \left(\frac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC} \right) \end{aligned} \tag{4.19}$$

Sonrasında $\dot{s}(t) = 0$ için ters kontrol sinyali $\overline{u} = 1 - u$ ve kontrol sinyali u aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{cases} \dot{s}(t) = 0 = X_2 \left(\lambda_C - \frac{1}{RC} \right) + \overline{u}\kappa \left(\frac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC} \right) \\ \overline{u}\kappa \left(\frac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC} \right) = X_2 \left(-\lambda_C + \frac{1}{RC} \right) \\ \overline{u} = \frac{1}{\kappa} \frac{LC}{\left(V_o - V_{in_opt} + X_1 \right)} X_2 \left(-\lambda_C + \frac{1}{RC} \right) \\ u = 1 + \frac{1}{\kappa} \frac{LC}{\left(V_o - V_{in_opt} + X_1 \right)} X_2 \left(\lambda_C - \frac{1}{RC} \right) \end{cases} \tag{4.20}$$

KKK'de toplam kontrol kuralı u_t; önceki kısımda belirtildiği gibi eşdeğer kontrol sinyali u_{eq} ve anahtarlama kontrol sinyali u_{sw} olarak bilinen iki bileşeni içerir. Buradan toplam kontrol kuralı u_t aşağıdaki gibi oluşturulabilir.

$$u_t = 1 + \frac{1}{\kappa}\frac{LC}{\left(V_o - V_{in_opt} + X_1\right)} X_2\left(\lambda_C - \frac{1}{RC}\right) + K\,sign(s) \tag{4.21}$$

KKK'de çalışmanın gerçekleştirilmesi için gerekli olan üç koşuldan birisi olan varlık koşulunun sağlanması için gerekli şart, yerel ulaşılabilirliği garanti etmek amacıyla (3.40)'dan türetilerek aşağıdaki gibi incelenebilir.

$$\begin{aligned}
&i)\begin{cases}\dot{s} < 0 \\ \dot{s}(t) = X_2\left(\lambda_C - \frac{1}{RC}\right) + \overline{u}\kappa\left(\frac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC}\right) \mapsto X_2\left(\lambda_C - \frac{1}{RC}\right) < 0\end{cases} \\
&ii)\begin{cases}\dot{s} > 0 \\ \dot{s}(t) = X_2\left(\lambda_C - \frac{1}{RC}\right) + \overline{u}\kappa\left(\frac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC}\right) \\ \mapsto X_2\left(\lambda_C - \frac{1}{RC}\right) + \kappa\left(\frac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC}\right) > 0\end{cases}
\end{aligned} \tag{4.22}$$

Bu iki koşul birleştirilirse, varlık koşulu için gerek şart aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{cases} X_2\left(\lambda_C - \frac{1}{RC}\right) < 0 < X_2\left(\lambda_C - \frac{1}{RC}\right) + \kappa\left(\frac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC}\right) \\ \mapsto 0 < X_2\left(-\lambda_C + \frac{1}{RC}\right) < \kappa\left(\frac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC}\right) \end{cases} \tag{4.23}$$

Sistemin kararlılığını araştırmak için ise önceki kısımda (3.41) ve (3.42)'de verilen Lyapunov fonksiyonu ve türevinden yararlanılabilir. (4.24)'de sunulan ifade ile Lyapunov fonksiyonunun türevi; $s(t) \neq 0$ için negatif tanımlı olarak $\dot{V}(t) < 0$ olursa uygun sürekli kontrolü sağlayacaktır ve global asimptotik kararlılık garanti edilecektir.

$$\begin{cases} \dot{V}(t) = s(t)\dot{s}(t) < 0 \;\; eğer \;\; s(t) \neq 0 \\ \dot{V}(t) = s(t)\dot{s}(t) = s(t)\left(X_2\left(\lambda_C - \frac{1}{RC}\right) + \overline{u}_t\kappa\left(\frac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC}\right)\right) < 0 \end{cases} \tag{4.24}$$

Bozucu etkilere ve parametrik değişimlere karşı dayanıklılık incelenmek istenildiğinde, $D(t)$ bozucu etkiyi gösterirken, $\dot{X}_2$ ve $\dot{s}(t)$ ifadeleri (4.25) eşitliğindeki gibi yazılır.

$$\begin{cases} \dot{X}_{2new} = -\dfrac{X_2}{RC} + \overline{u}\kappa\left(\dfrac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC}\right) + D(t) \\ \dot{s}(t)_{new} = X_2\left(\lambda_C - \dfrac{1}{RC}\right) + \overline{u}_t\kappa\left(\dfrac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC}\right) + D(t) \end{cases} \tag{4.25}$$

Eğer bu eşitlikte u_t ifadesi yerine yazılır ve (4.24)'teki eşitsizlik çıkarımı sürdürülürse, kararlılık için gerekli koşul (4.26)'da elde edilmiş olur.

$$\begin{aligned} &\dot{V}(t) = s(t)\left(-\kappa K\, sign(s(t))\left(\frac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC}\right) + D(t)\right) = \\ &\mapsto |s(t)|\left(-\kappa K |s(t)|\left(\frac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC}\right) + D(t)\right) < 0 \\ &\mapsto D(t) < \kappa K\left(\frac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC}\right) \end{aligned} \tag{4.26}$$

Üretilen kontrol sinyali, REDS'nin güç dönüştürücüsüne Darbe Genişlik Modülasyon (Pulse-Width-Modulation, PWM) tekniği kullanılarak aktarılabilir (Siew-Chong ve ark., 2006; Yin ve ark., 2015). Bu şekilde yapılarak, KKK doğrudan uygulamak için doğrudan PWM çalışma sinyaline taşınır. Böylece kontrol sinyalinin fonksiyonu PWM'in doğasından dolayı anlık olarak [0-1] aralığında sınırlı olan, PWM'in çalışma oranı fonksiyonu *d* 'ye dönüştürülür. Bahsi geçen durum şu şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{cases} 0 < u_{eq} = 1 + \dfrac{1}{\kappa}\dfrac{LC}{\left(V_o - V_{in_opt} + X_1\right)} X_2\left(\lambda_C - \dfrac{1}{RC}\right) < 1 \\ 0 < u^* = \kappa\left(V_o - V_{in_opt} + X_1\right) + LCX_2\left(\lambda_C - \dfrac{1}{RC}\right) < \kappa\left(V_o - V_{in_opt} + X_1\right) \\ 0 < d = \left(v_{control}\right)\Big/\left(\hat{v}_{ramp}\right) < 1 \\ v_{control} = u^* = \kappa\left(V_o - V_{in_opt} + X_1\right) + LCX_2\left(\lambda_C - \dfrac{1}{RC}\right) \\ \hat{v}_{ramp} = \kappa\left(V_o - V_{in_opt} + X_1\right) \end{cases} \tag{4.27}$$

Burada, $v_{control}$ ve $\hat{v}_{ramp}$ kontrol sinyali ve PWM'in rampa sinyalini göstermekte olup çalışma oranı *d*'nin düzenlenmesiyle PWM çalışma üzerinden tasarlanan kontrolörün ürettiği sinyaller REDS'ye uygulanabilir.

4.2.3. İkinci dereceden KKK temelli kontrolör tasarımı

İlk olarak, geleneksel KKK için kayma yüzeyi aşağıdaki gibi tasarlanır.

$$s(t) = \lambda_C X_1 + X_2 \tag{4.28}$$

Parametrik belirsizlikler ve bozucu etkilere karşı sistemin dayanıklılığını sağlamak ayrıca çatırtıyı azaltmak amacıyla, bir integral teriminin eklenilmesi üzerinden kayma yüzeyinin derecesinin artırılması ile PID tip kayma yüzeyli olan ikinci dereceden kayma yüzeyi aşağıdaki gibi belirlenir (Eker, 2010; Joe ve ark., 2014).

$$\sigma = \dot{s}(t) + \beta s(t) = k_p X_1 + k_i \int_0^t X_1(\tau) d\tau + k_d \dot{X}_1 \tag{4.29}$$

Ardından bu ifadenin her iki tarafının zamana göre türevi alınırsa,

$$\dot{\sigma} = \ddot{s}(t) + \beta \dot{s}(t) = k_p \dot{X}_1 + k_i X_1 + k_d \ddot{X}_1 \tag{4.30}$$

elde edilir. Sistem durumları kayma yüzeyinde ($s(t) = \dot{s}(t) = \ddot{s}(t) = 0$) tutulursa ve bu katsayılar uygunca seçilirse; izleme hatası hızlıca sıfıra yakınsar. Sonrasında sistem durum değişkenleri uygun olarak burada yerine yazılırsa,

$$\begin{cases} \dot{\sigma} = \ddot{s}(t) + \beta \dot{s}(t) = k_p X_2 + k_i X_1 + k_d \left(-\dfrac{X_2}{RC} + \overline{u}\kappa \dfrac{\left(V_o - V_{in_opt} + X_1\right)}{LC} \right) \\ \mapsto \ddot{s}(t) = k_p X_2 + k_i X_1 + k_d \left(-\dfrac{X_2}{RC} + \overline{u}\kappa \dfrac{\left(V_o - V_{in_opt} + X_1\right)}{LC} \right) - \beta \dot{s}(t) \end{cases} \tag{4.31}$$

olur ve $\ddot{s}(t) = 0$ için ters kontrol sinyali buradan şu şekilde üretilir.

$$\overline{u} = \frac{LC}{\kappa k_d \left(V_o - V_{in_opt} + X_1\right)} \left(X_2 \left(\frac{k_d}{RC} - k_p \right) - k_i X_1 + \beta \dot{s}(t) \right) \tag{4.32}$$

Ardından gerekli yerine yazmalar yapılır ve eşitlik düzenlenirse, kontrol kuralı u (4.33) eşitliğindeki gibi türetilir.

$$u = 1 + \frac{LC}{\kappa\left(V_o - V_{in_opt} + X_1\right)}\left(X_2\left(-\frac{1}{RC} + \frac{k_p}{k_d} - \frac{\beta\lambda_C}{k_d} \right) + \frac{k_i}{k_d} X_1 - \frac{\beta}{k_d}\dot{X}_2 \right) \tag{4.33}$$

Daha sonrasında PWM tekniğinin kullanılması üzerinden, üretilen kontrol sinyalinin çalışma oranı d 'ye dönüşümü (4.27)'ye benzer yapıda aşağıdaki gibi uyarlanabilir.

$$\begin{cases} 0 < u = 1 + \dfrac{LC}{\kappa\left(V_o - V_{in_opt} + X_1\right)}\left(X_2\left(-\dfrac{1}{RC} + \dfrac{k_p}{k_d} - \dfrac{\beta\lambda_C}{k_d} \right) + \dfrac{k_i}{k_d} X_1 - \dfrac{\beta}{k_d}\dot{X}_2 \right) < 1 \\ 0 < u^* = \kappa\left(V_o - V_{in_opt} + X_1\right) + \\ \qquad LC\left(X_2\left(-\dfrac{1}{RC} + \dfrac{k_p}{k_d} - \dfrac{\beta\lambda_C}{k_d} \right) + \dfrac{k_i}{k_d} X_1 - \dfrac{\beta}{k_d}\dot{X}_2 \right) < \kappa\left(V_o - V_{in_opt} + X_1\right) \\ 0 < d = \left(v_{control}\right) \Big/ \left(\hat{v}_{ramp}\right) < 1 \\ v_{control} = u^* = \kappa\left(V_o - V_{in_opt} + X_1\right) + \\ \qquad LC\left(X_2\left(-\dfrac{1}{RC} + \dfrac{k_p}{k_d} - \dfrac{\beta\lambda_C}{k_d} \right) + \dfrac{k_i}{k_d} X_1 - \dfrac{\beta}{k_d}\dot{X}_2 \right) \\ \hat{v}_{ramp} = \kappa\left(V_o - V_{in_opt} + X_1\right) \end{cases} \tag{4.34}$$

Kapalı çevrim sistemin hem performansı hem de kararlılığı için kayma yüzeyinin katsayıları dikkatlice seçilmelidir. Bu sistem için (4.28) ve (4.29) birleştirilerek çözüme gidilirse, (4.35) ifadesi elde edilir.

$$\begin{cases} \sigma = \dot{s}(t) + \beta s(t) = k_p X_1 + k_i \displaystyle\int_0^t X_1(\tau)d\tau + k_d \dot{X}_1 \\ \mapsto \dot{s}(t) = k_p X_1 + k_i \displaystyle\int_0^t X_1(\tau)d\tau + k_d \dot{X}_1 - \beta s(t) \\ \qquad = k_p X_1 + k_i \displaystyle\int_0^t X_1(\tau)d\tau + k_d \dot{X}_1 - \beta\left(\lambda_C X_1 + \dot{X}_1\right) \\ \qquad = \left(k_p - \beta\lambda_C\right) X_1 + k_i \displaystyle\int_0^t X_1(\tau)d\tau + \left(k_d - \beta\right)\dot{X}_1 \end{cases} \tag{4.35}$$

Ardından bu ifadenin türevi alınırsa,

$$\ddot{s}(t) = \left(k_p - \beta\lambda_C\right)\dot{X}_1 + k_i X_1 + \left(k_d - \beta\right)\ddot{X}_1$$
$$\mapsto \left(s^2 + \frac{\left(k_p - \beta\lambda_C\right)}{\left(k_d - \beta\right)} s + \frac{k_i}{\left(k_d - \beta\right)} \right) X_1(s) = 0 \tag{4.36}$$

olarak sistem formu elde edilir. Bu durumda, Routh kriterine göre çözümleme yapılabilir. Kararlılığın sağlanması için $\left(k_p - \beta\lambda_C\right)/\left(k_d - \beta\right) > 0$ ve $k_i/\left(k_d - \beta\right) > 0$ koşulları sağlanmalıdır.

Eğer sistem belirsizlikleri ve bozucu etkiler göz önüne alınarak eşdeğer kontrol sinyalinin yeterli olamayacağı düşünülürse; anahtarlama kontrol sinyali şu şekilde seçilebilir ve ardından bozucu etkiler için kararlılık incelenebilir.

$$u_{sw} = \lambda_1 s(t) + K_{sw} sign(\dot{s}(t)) \tag{4.37}$$

Sistem durumları $\dot{X}_2$ ve $\dot{s}(t)$ bozucu etki $D(t)$ eşliğinde aşağıdaki gibi yeniden yazılırsa,

$$\begin{cases} \dot{X}_{2new} = \left(-\dfrac{X_2}{RC} + \overline{u}_T \kappa \left(\dfrac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC} \right) + D(t) \right) \\ \ddot{s}_{new}(t) = \left(k_p X_2 + k_i X_1 + k_d \left(-\dfrac{X_2}{RC} + \overline{u}_T \kappa \dfrac{\left(V_o - V_{in_opt} + X_1\right)}{LC} \right) - \beta \dot{s}(t) + D(t) \right) \end{cases} \tag{4.38}$$

gibi olur ve ardından Lyapunov fonksiyonu aşağıdaki gibi seçilirse,

$$V(t) = \frac{1}{2} s^2(t) + \frac{1}{2} \dot{s}^2(t) \qquad , \{ V(0) = 0,\ V(t) > 0 \ \ for\ s(t) \neq 0, \dot{s}(t) \neq 0 \} \tag{4.39}$$

eşitliğine ulaşılır. Buradan Lyapunov fonksiyonunun türevi negatif tanımlı $\dot{V}(t) < 0$ olduğunda, kararlılık koşulu yerine getirilecektir. Bu yüzden bu ifadenin türevi alınırsa,

$$\dot{V}(t) = s(t)\dot{s}(t) + \dot{s}(t)\ddot{s}(t) < 0 \quad , \{ \dot{V}(t) < 0, \quad s(t) \neq 0, \quad \dot{s}(t) \neq 0 \} \tag{4.40}$$

elde edilir ve $\ddot{s}(t)$ burada yerine yazılırsa, ardından da $\overline{u}_T$ yerine yazılarak düzenlenirse, (4.41)'deki sonuca ulaşılır.

$$\dot{V}(t)=s(t)\dot{s}(t)+\dot{s}(t)\left(\begin{array}{l}k_pX_2+k_iX_1+\\ k_d\left(-\dfrac{X_2}{RC}+\overline{u}_T\kappa\dfrac{\left(V_o-V_{in_opt}+X_1\right)}{LC}\right)-\beta\dot{s}(t)+D(t)\end{array}\right)<0$$

$$\dot{V}(t)=s(t)\dot{s}(t)+\dot{s}(t)\left(\begin{array}{l}-\lambda_1 s(t)\kappa k_d\dfrac{\left(V_o-V_{in_opt}+X_1\right)}{LC}-\\ \kappa k_d K_{sw}sign(\dot{s}(t))\dfrac{\left(V_o-V_{in_opt}+X_1\right)}{LC}+D(t)\end{array}\right)<0$$

$$\mapsto= s(t)\dot{s}(t)-\kappa k_d\frac{\left(V_o-V_{in_opt}+X_1\right)}{LC}\lambda_1 s(t)\dot{s}(t)-$$
$$\kappa k_d\frac{\left(V_o-V_{in_opt}+X_1\right)}{LC}K_{sw}\dot{s}(t)sign(\dot{s}(t))+\dot{s}(t)D(t)<0$$

$$\mapsto= s(t)\dot{s}(t)-\kappa k_d\frac{\left(V_o-V_{in_opt}+X_1\right)}{LC}\lambda_1 s(t)\dot{s}(t)-$$
$$\kappa k_d\frac{\left(V_o-V_{in_opt}+X_1\right)}{LC}K_{sw}\left|\dot{s}(t)\right|+\dot{s}(t)D(t)<0$$

$$\leq\left|\dot{s}(t)\right|\left(s(t)-\kappa k_d\frac{\left(V_o-V_{in_opt}+X_1\right)}{LC}\lambda_1 s(t)-\kappa k_d\frac{\left(V_o-V_{in_opt}+X_1\right)}{LC}K_{sw}+D(t)\right)$$

$$\leq\left|\dot{s}(t)\right|\left(\left|s(t)\right|-\kappa k_d\frac{\left(V_o-V_{in_opt}+X_1\right)}{LC}\lambda_1\left|s(t)\right|-\kappa k_d\frac{\left(V_o-V_{in_opt}+X_1\right)}{LC}K_{sw}+D(t)\right) \qquad (4.41)$$

$$=-\left|\dot{s}(t)\right|\underbrace{\left(\left|s(t)\right|\left(1-\kappa k_d\frac{\left(V_o-V_{in_opt}+X_1\right)}{LC}\lambda_1\right)-\kappa k_d\frac{\left(V_o-V_{in_opt}+X_1\right)}{LC}K_{sw}+D(t)\right)}_{>0}<0$$

Buradan da global asimptotik kararlılık için gerekli koşul aşağıdaki gibi türetilir.

$$\lambda_1>\frac{LC}{\kappa k_d\left(V_o-V_{in_opt}+X_1\right)},\quad K_{sw}>D(t)\frac{LC}{\kappa k_d\left(V_o-V_{in_opt}+X_1\right)} \qquad (4.42)$$

4.2.4. Simülasyon ortamındaki doğrulama testleri ve karşılaştırmalar

Bu kısımda öncelikle iki farklı rüzgar hızı değişimi test senaryosunda doğrulama testleri yapılmaktadır. Birinci senaryo kademeli olarak basamak değişimleri içerirken, rüzgarın doğasındaki doğrusal olmayışın düşünülmesi ile ikinci senaryo hızlı değişim gösteren rastgele rüzgar hızı profilinden oluşmaktadır. Her iki senaryo için de rüzgar hızı aralığı literatürdeki çalışmalardan esinlenerek 5 m/s ile 12 m/s bandında

modellenmiştir. Bahsedilen MPPT yaklaşımı eşliğinde, geleneksel KKK (G-KKK) ve İkinci Dereceden KKK (İD-KKK) temelli kontrolörlerin performansı karşılaştırmalı olarak detaylı analizler ile sunulmaktadır. Ayrıca, sistem çalışmasına ilişkin diğer bazı analizlere de akabinde yer verilmektedir. REDS konfigürasyonunda kullanılan KMSG generatör ve yükseltici tip DC-DC dönüştürücü için veriler ise sırasıyla Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. KMSG generatör için parametreler ve değerleri

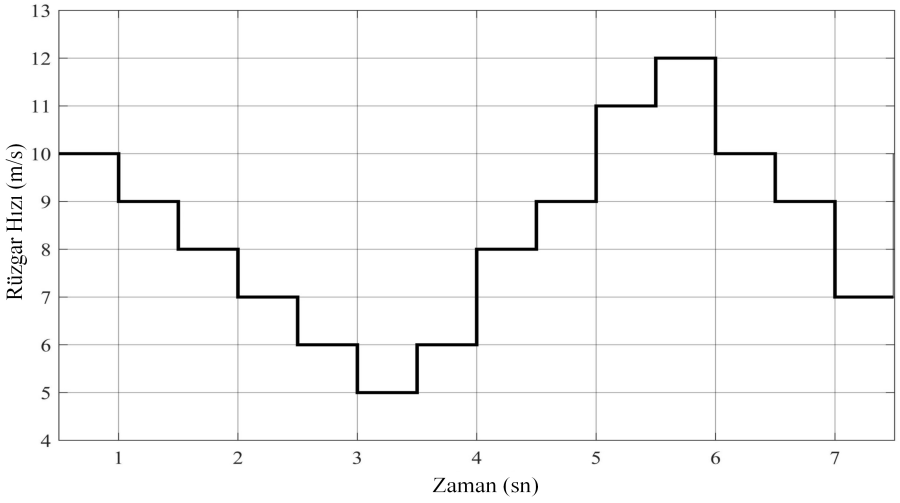
Parametre	Değeri
Faz sayısı	3
Stator faz direnci	1 Ω
Endüvi endüktansı	L_d, L_q = 0.00153 H
Atalet momenti, J	0.013 (kg.m^2)
Viskoz sönümleme, F	0.0425 (N.m.s)
Kutup çifti sayısı, n_p	16

Çizelge 4.2. Yükseltici tip DC-DC dönüştürücü için parametreler ve değerleri

Parametre	Değeri
Anahtarlama frekansı, f_{sw}	5 kHz
İndüktör, L	310 µH
Kapasitör, C	240 µF
İndüktör direnci, R_L	0.15 Ω
Kapasitör direnci, R_C	0.07 Ω
Yük direnci, R	36 Ω

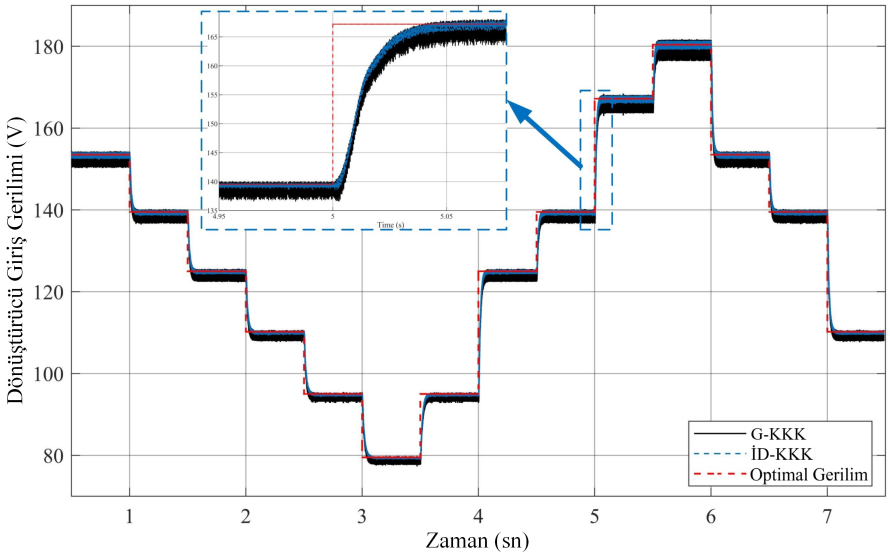
4.2.4.1. Test senaryosu I

Birinci test senaryosu için modellenen kademeli değişimli rüzgar hızı profili, Şekil 4.5 ile sunulmaktadır.



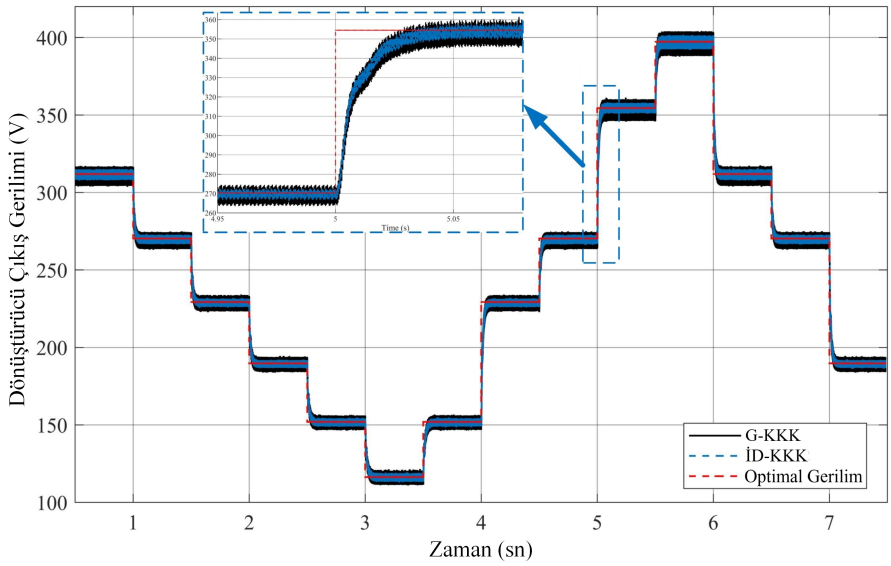
Şekil 4.5. Basamak değişimler içeren rüzgar hızı profili

Bahsi geçen rüzgar hızı profili altında; her iki kontrolör tasarımının verdiği tepkilere ilişkin çıkış (yükün üzerine aktarılan) gücü, çıkış gerilimi, dönüştürücü giriş gerilimi, çıkış gerilimi ve optimal gerilim arasındaki hata ve ayrıca C_P değişimi bakımından analizler yapılmaktadır. MPPT yaklaşımı ile belirlenen maksimum güç yakalamayı sağlayacak olan optimal çalışma gerilim değerleri ve yükseltici tip DC-DC dönüştürücünün girişindeki değişimler Şekil 4.6'da verilmektedir.

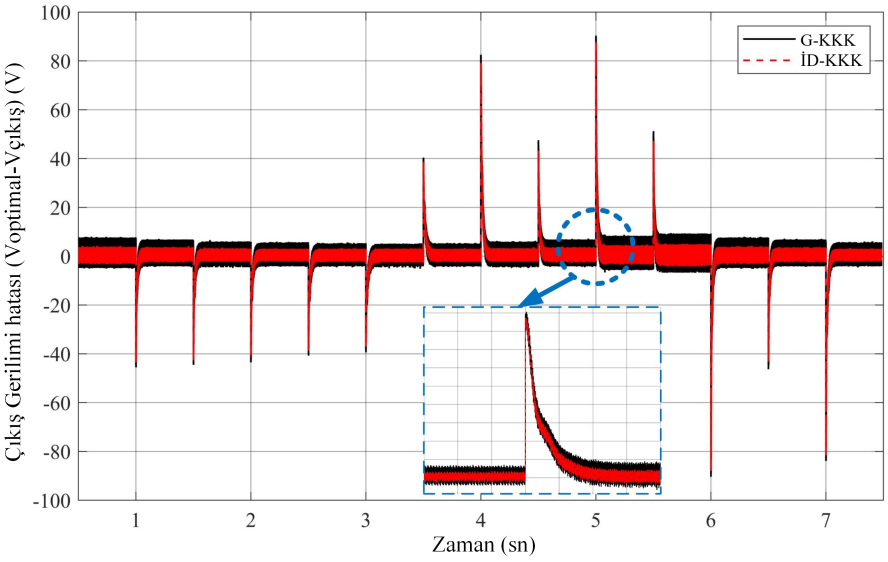


Şekil 4.6. Basamak değişimler içeren rüzgar hızı profili için dönüştürücü giriş gerilimlerinin değişimi

Burada; İkinci Dereceden KKK temelli kontrolör, daha az dalgalanma ve neredeyse sürekli hal hatası olmaksızın iyi bir optimal gerilim izleme performansına sahip olabilmektedir. Ayrıca 5'nci saniye için aynı şekil üzerinde verilen bir yakınlaştırma ile daha açıkça görülebilir. Benzer bir şekilde, dönüştürücü çıkış gerilimi için her iki kontrolörün izleme performansı ve optimal çıkış gerilimi Şekil 4.7 ile gösterilmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere, optimal gerilim izlemesi daha az dalgalanma ve minimum sürekli hal hatası ile İkinci Dereceden KKK temelli tasarımla sürdürülmektedir. Aynı zamanda, Şekil 4.8 ise MPPT'yi sağlayan referans çalışma gerilimine ilişkin kontrolörlerin izleme hatalarının değişimini sunmakta olup, sıfıra daha yakın bir izlemenin söz konusu olduğu buradan da görülebilir. Her iki kontrolör için sürekli durum hatalarına ve yük üzerindeki gerilim dalgalanmalarına ilişkin bütün nümerik veriler Çizelge 4.3'de listelenmiştir. Buradan, elde edilen sonuçlara ilişkin olarak İkinci Dereceden KKK temelli kontrolör tasarımının Geleneksel KKK temelli yapıya göre daha üstün performans gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.7. Basamak değişimler içeren rüzgar hızı profili için dönüştürücü çıkış gerilimlerinin değişimi

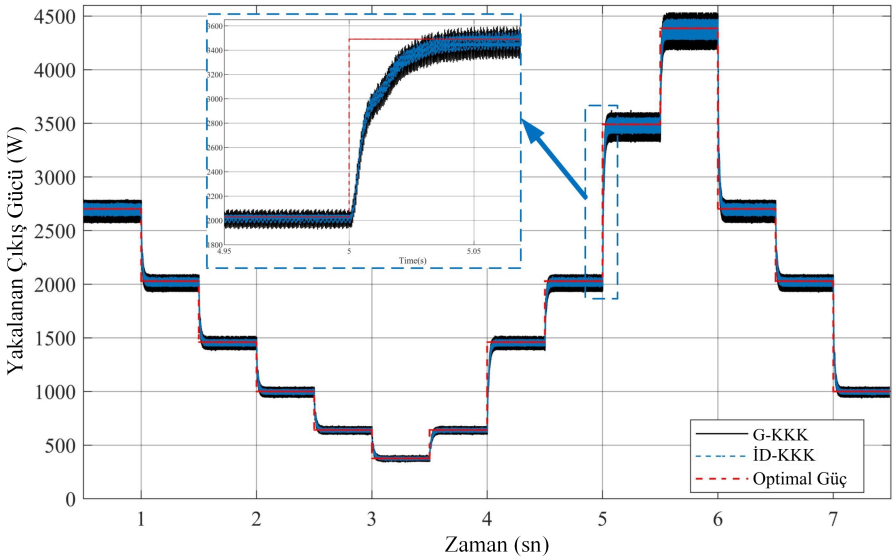


Şekil 4.8. Basamak değişimler içeren rüzgar hızı profili için dönüştürücü çıkış gerilimi hatalarının değişimi

Çizelge 4.3. Tasarlanan kontrolörlerin sürekli durumdaki performansları

Rüzgar hızı	Yükteki gerilim dalgalanması (V)		Yükteki sürekli durum hatası (V)	
Vw (m/s)	G-KKK	İD-KKK	G-KKK	İD-KKK
5	2.5	**0.8**	0.91	**0.17**
6	3.2	**1**	1.02	**0.2**
7	4.3	**1.2**	1.21	**0.22**
8	5	**1.7**	1.29	**0.23**
9	5.5	**2**	1.43	**0.21**
10	6.4	**2.5**	1.63	**0.2**
11	8	**3**	1.64	**0.14**
12	9.5	**3.7**	1.71	**0.19**

Aynı rüzgar profili altında REDS'den yakalanan çıkış gücünün değişimi Şekil 4.9 ile sunulmaktadır. Önceki sonuçlara benzerce yorumlama burada da yapılabilir ve elde edilen nümerik veriler ise Çizelge 4.4 ile ifade edilmiştir.



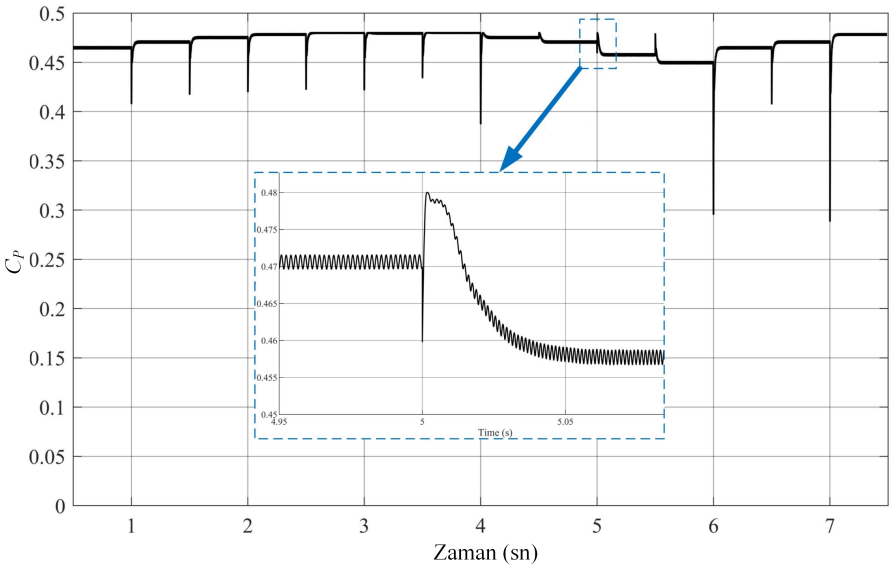
Şekil 4.9. Basamak değişimler içeren rüzgar hızı profili için yakalanan çıkış güçlerinin değişimi

Çizelge 4.4. Tasarlanan kontrolörlerin sürekli durumda yakalanan güç performansları

V_w *(m/s)*	Mevcut P_{max} *(W)*	$P_{L\ G\text{-}KKK}$ *(W)*	G-KKK Verimi *%*	$P_{L\ İD\text{-}KKK}$ *(W)*	İD-KKK Verimi *%*
5	379	374	98.681	**375**	**98.945**
6	643	637	99.067	**640**	**99.533**
7	1001	993	99.201	**998**	**99.700**
8	1461	1451	99.316	**1458**	**99.795**
9	2028	2013	99.260	**2025**	**99.852**
10	2703	2682	99.223	**2700**	**99.889**
11	3490	3465	99.284	**3487**	**99.914**
12	4392	4357	99.203	**4388**	**99.909**

Burada; her iki kontrolörün verimliliği, sürekli durumda ortalama yakalanan çıkış gücü bakımından karşılaştırılmaktadır. Geleneksel KKK ile başarılı sonuçlar üretilebilmesine rağmen İkinci Dereceden KKK temelli tasarımla daha üstün sonuçlar elde edilebilmiştir. Diğer taraftan türbin güç katsayısının değişimi ise Şekil 4.10'daki gibi olmaktadır.

Bu sonuçlara ek olarak, performans indisleri IAE, ISE ve ITAE'ye göre her iki kontrolörün çıkış gerilimi izlemesi için karşılaştırma sonucu Çizelge 4.5 ile verilmiştir. Çizelgedeki veriler değerlendirildiğinde, performans kriterleri bakımından hata hesaplamalarında Geleneksel KKK'e göre daha küçük değerlere ulaşılması ile İkinci Dereceden KKK yaklaşımının daha iyi performans sürdürdüğü anlaşılmaktadır.



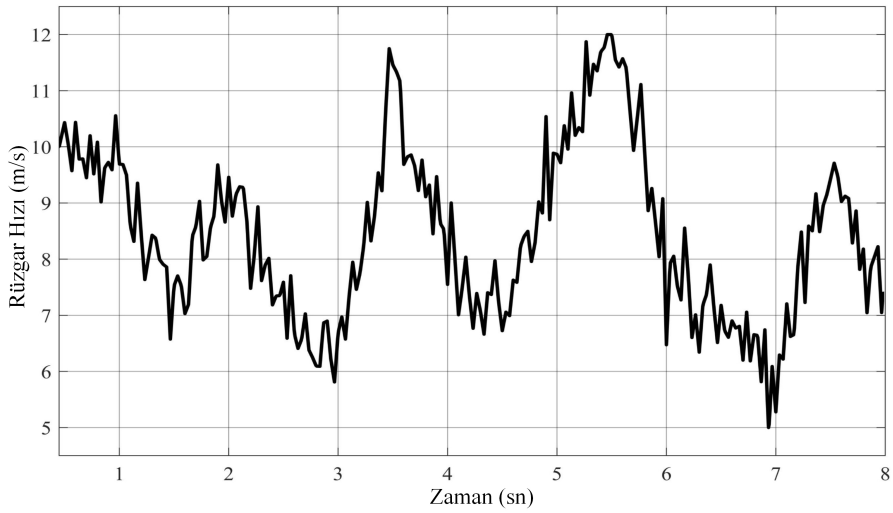
Şekil 4.10. Basamak değişimler içeren rüzgar hızı profili için türbin güç katsayısı C_P'nin değişimi

Çizelge 4.5. Çıkış geriliminin izlenmesinde tasarlanan kontrolörlerin performans indislerine göre karşılaştırması

Kontrolör	IAE	ISE	ITAE
G-KKK temelli	22.86	274.5	95.49
İD-KKK temelli	**15.03**	**226.1**	**63.18**

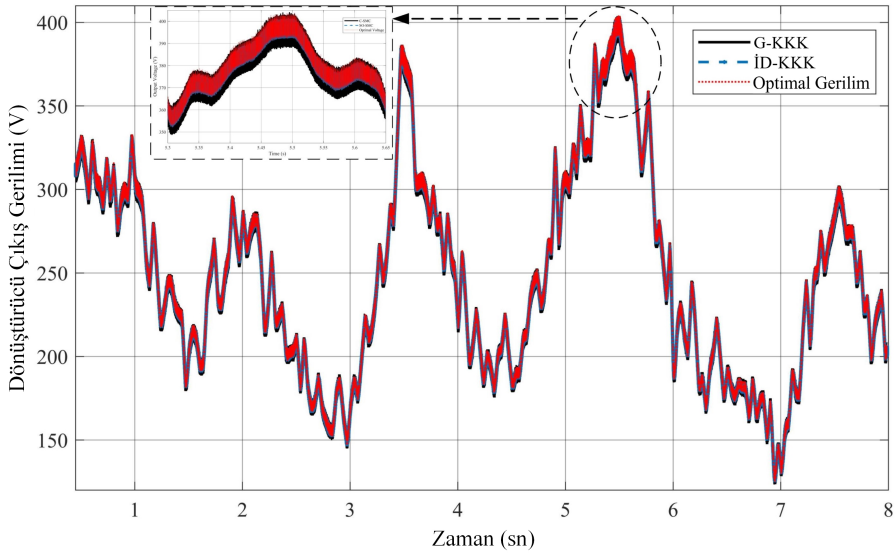
4.2.4.2. Test senaryosu II

Diğer taraftan performans karşılaştırmaları için, rüzgarın doğasındaki rastgele değişkenliğe benzerce bir rüzgar hızı değişim profilinin modellemesi yapılmış olup, Şekil 4.11 ile gösterilmektedir.

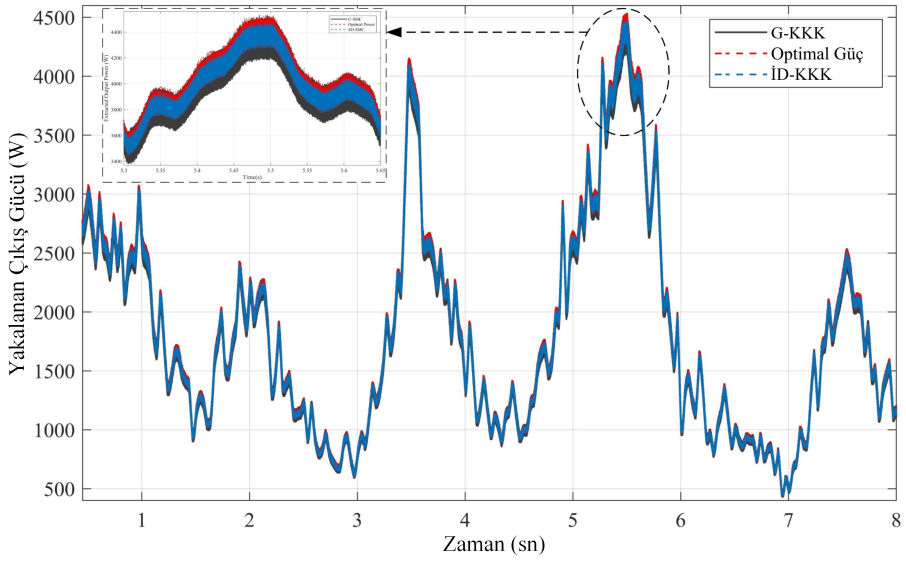


Şekil 4.11. Rastgele değişim gösteren rüzgar hızı profili

Bu rüzgar hızı senaryosunda, çalışma esnasında rüzgar hızı süratlice değişmektedir. Burada, tasarlanan kontrolörlerin cevapları; yakalanan çıkış gücü ve çıkış gerilimi bakımından analiz edilmektedir. Bu senaryo işletildiğinde; dönüştürücü çıkış geriliminin değişimleri Şekil 4.12 ile sunulurken, yakalanan çıkış güçlerinin değişimi ise Şekil 4.13'deki gibi olmaktadır. Geleneksel KKK temelli tasarıma kıyasla, İkinci Dereceden KKK temelli tasarım ile optimal gerilim ve güç değerlerine daha yakın ve daha az dalgalanma içeren bir izleme performansının elde edildiği görülmektedir.



Şekil 4.12. Rastgele değişim gösteren rüzgar hızı profili için dönüştürücü çıkış gerilimlerinin değişimi



Şekil 4.13. Rastgele değişim gösteren rüzgar hızı profili için yakalanan çıkış güçlerinin değişimi

Her iki kontrolör için; ortalama yakalanan çıkış gücü bakımından ve ayrıca çıkış gerilimi izlemesi için performans kriterleri bakımından etkinlik ve verimlilik karşılaştırması sırasıyla Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7'de yapılmaktadır.

Çizelge 4.6. Rastgele değişim gösteren rüzgar hızı profilinde tasarlanan kontrolörler ile yakalanan güçlerin karşılaştırması

Ortalama Mevcut P_{max} *(W)*	Ortalama $P_{L\ G\text{-}KKK}$ *(W)*	G-KKK Verimi *%*	Ortalama $P_{L\ İD\text{-}KKK}$ *(W)*	İD-KKK Verimi *%*
1817	1797	98.789	**1814**	**99.835**

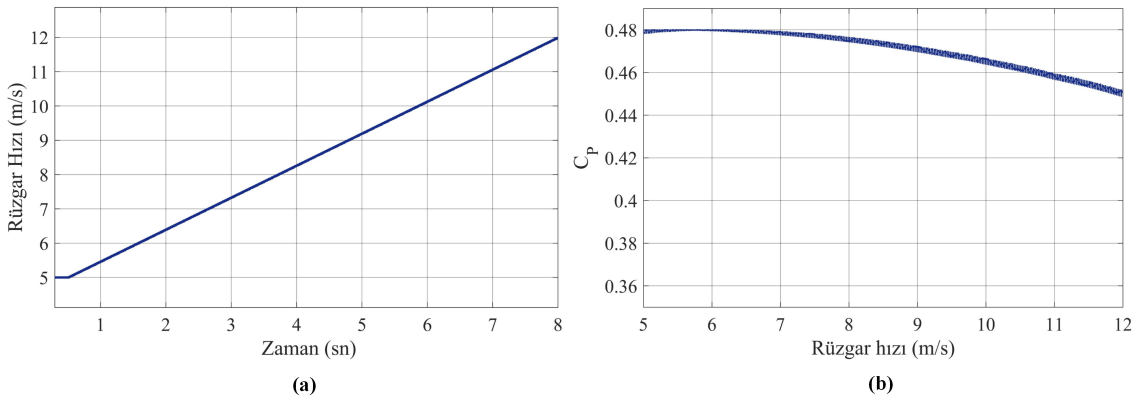
Çizelge 4.7. Senaryo II için çıkış geriliminin izlenmesinde tasarlanan kontrolörlerin performans indislerine göre karşılaştırması

Kontrolör	IAE	ISE	ITAE
G-KKK temelli	14.63	45.64	60.85
İD-KKK temelli	**4.10**	**3.452**	**16.96**

Elde edilen sonuçlara ilişkin olarak, İkinci Dereceden KKK temelli kontrolör tasarımıyla tatminkar olarak hızlı ve dayanıklı bir gerilim izlemesinin gerçekleştirilmesi sağlanmakta olup bu sayede maksimum güç yakalama performansına katkı sağlayabildiği anlaşılabilmektedir. Bu kontrolör yapısı aynı zamanda, rüzgar hızı dalgalanmalarından neredeyse etkilenmeden optimum çalışmayı sürdürmekte oldukça başarılı olmaktadır.

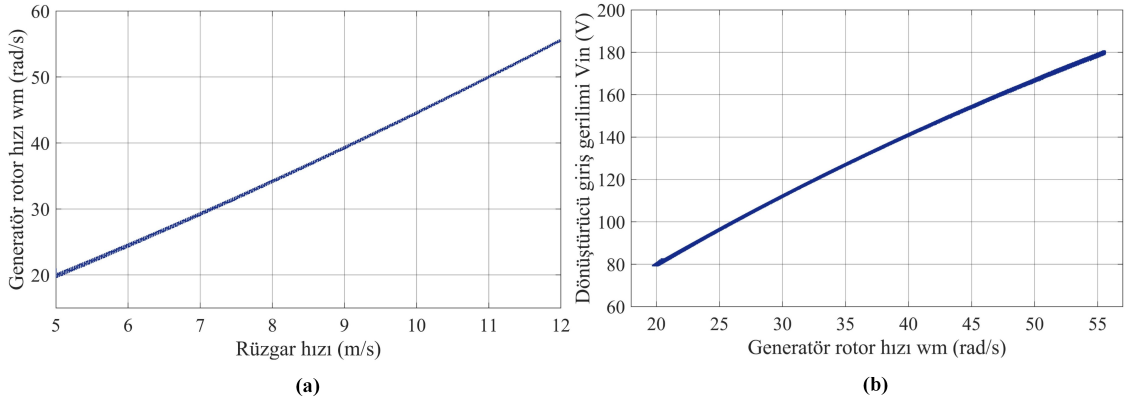
4.2.4.3. Sistem çalışmasına ilişkin diğer analizler

Bu kısımda, şimdiye kadar gerçekleştirilen iki adet test senaryosuna ilaveten ilk olarak sistem çalışmasına ilişkin çeşitli analizlerin yapılması amacıyla yeni bir test gerçekleştirilmektedir. Bu amaçla düşünülen rüzgar hızının zamana göre değişimi Şekil 4.14 (a)'daki gibi sunulmakta olup, bu şekilden 5 m/s ile 12 m/s aralığında doğrusal bir değişimi benimsediği görülebilir. Kullanılan ORB temelli MPPT algoritması ve İD-KKK yapısı eşliğinde bu rüzgar hızı aralığı için maksimum güçlere ulaşılan çalışma noktalarındaki C_P türbin güç katsayının değişimi elde edilip Şekil 4.14 (b)'de verilmektedir. Önceki testlerden farklı bir bakış ile rüzgar hızının daha yüksek seviyeleri için C_P'nin 0.48 seviyelerinden 0.45 seviyelerine doğru bir düşüş sergilediği buradan anlaşılmaktadır. Bunun sebebi rüzgar hızına bağlı olarak işletme koşullarının değişmesine istinaden, generatör ve dönüştürücü kayıplarının değişmesidir.



Şekil 4.14. a) Rüzgar hızının zamana göre değişimi, **b)** C_P güç katsayısının rüzgar hızına göre değişimi

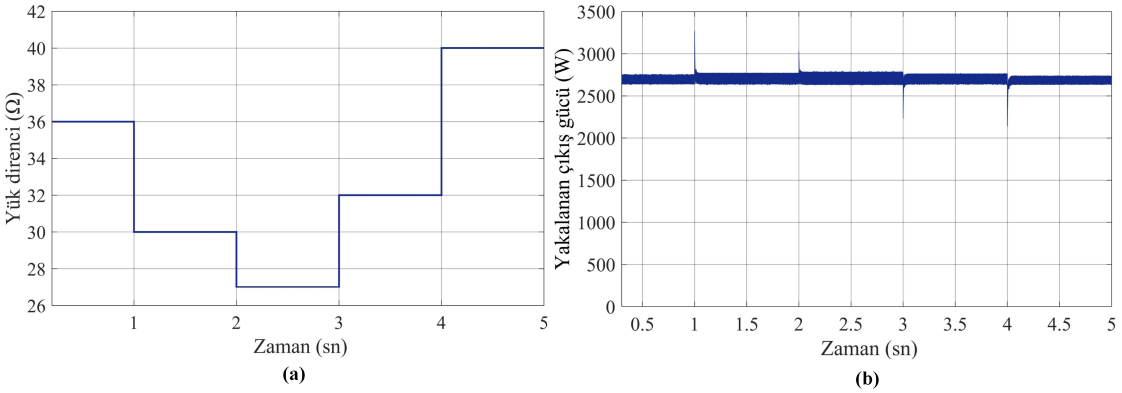
Bir diğer taraftan ise, rüzgar hızına ilişkin olarak generatör rotor hızının değişimi Şekil 4.15 (a)'daki gibi olmaktadır. Ayrıca generatör rotor hızına göre dönüştürücü giriş geriliminin değişimi de Şekil 4.15 (b)'deki gibi elde edilmektedir. Diyot kayıpları ve düşük güçlerdeki yakınsama durumu ihmal edildiğinde, önceki bölümde (3.32) ile ifade edilen, doğrultulmuş gerilim ile generatör rotor hızı arasındaki ilişkinin yaklaşık olarak doğrusal olduğu burada elde edilen şekilden de görülebilmektedir.



Şekil 4.15. a) Generatör rotor hızının rüzgar hızına göre değişimi, **b)** Dönüştürücü giriş geriliminin generatör rotor hızına göre değişimi

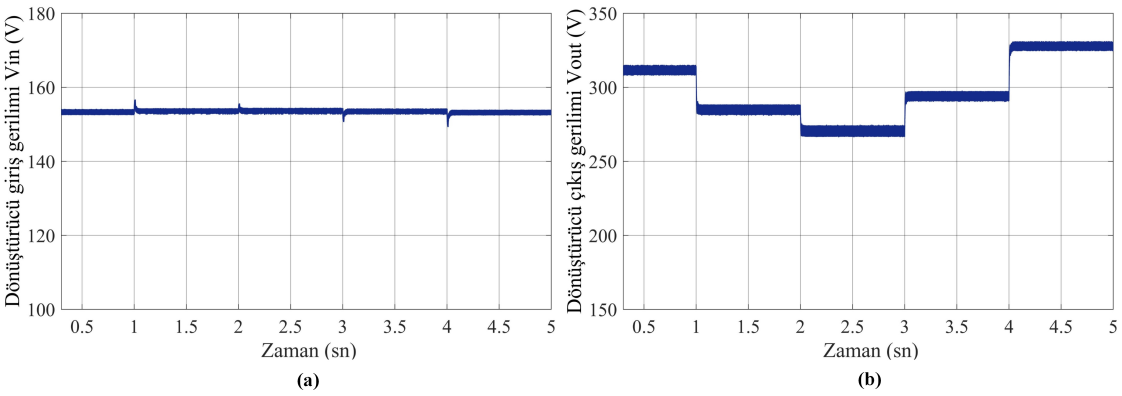
Yapılan analize ek olarak doğrusal olmayan yük koşulları için sistem çalışma performansının ve tasarlanan yapının etkinliğinin değerlendirilmesi amaçlanmış olup kısaca burada analizi gerçekleştirilmektedir. Bu amaç doğrultusunda, daha açık ve anlaşılır olması için 10 m/s'lik sabit bir rüzgar hızında test gerçekleştirilmiştir. Beslenen terminal yükün belirli aralıklar dahilinde değiştirilmesi ile oluşturulan doğrusal olmayan yüklenme koşulu Şekil 4.16 (a)'daki gibi düşünülerek sunulmaktadır. Önceki kısımdaki testlerde yük direnci sabit olarak 36 Ω iken, bu profilde 27 Ω - 40 Ω aralığında

değişimleri içermektedir. Diğer yandan ise, doğrusal olmayan yük profiline ilişkin yakalanan çıkış güçlerindeki değişim Şekil 4.16 (b)'deki gibi olmaktadır.



Şekil 4.16. a) Doğrusal olmayan yük profili, **b)** Yük direncindeki değişimlere ilişkin yakalanan çıkış güçlerinin değişimi

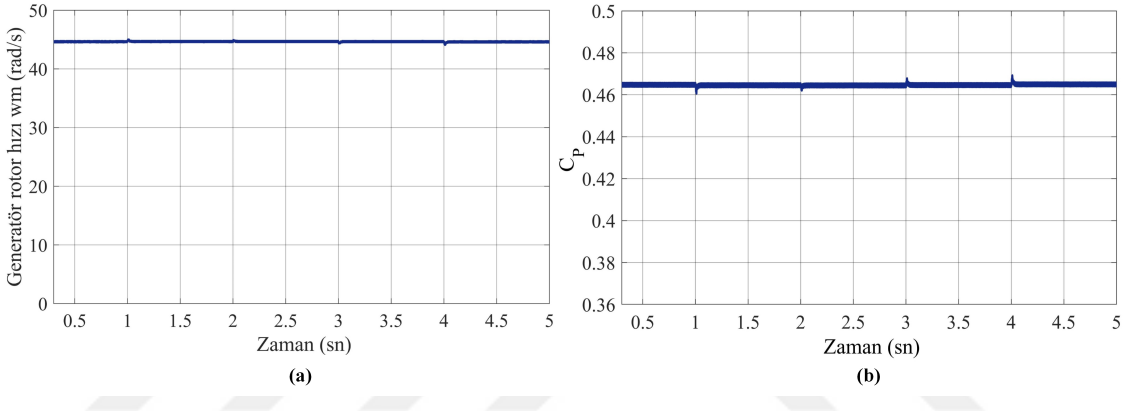
Buradan, doğrusal olmayan yük profili için yakalanan güçlerde minimal düzeyde artışlar ve azalışlar olsa da çıkış güçlerinin hemen hemen aynı seviyede kaldığı gözlemlenebilmektedir. Bu küçük değişimlerin sebebinin her bir farklı yük kademesinde oluşan yeni bir çalışma koşuluna istinaden, dönüştürücü verimindeki küçük miktarda değişikliklerin gerçekleşmesinden kaynaklı olduğu tespit edilmiştir. Diğer taraftan da, güçlerin elde edildiği MPPT çalışma noktaları için dönüştürücü giriş gerilimindeki değişimler ise Şekil 4.17 (a)'da görüldüğü gibi olmaktadır. Benzer bir şekilde optimum çalışma noktalarına ilişkin gerilimlerin hemen hemen aynı seviyelerde belirlendiği anlaşılabilmektedir. Ayrıca, doğrusal olmayan yüklenme koşulları için maksimum güce ulaşılmasını sağlayan çıkış geriliminin değişimi Şekil 4.17 (b)'deki gibi olmaktadır.



Şekil 4.17. a) Dönüştürücü giriş geriliminin değişimi, **b)** Dönüştürücü çıkış geriliminin değişimi

Doğrusal olmayan yüklenme koşulları altında ve sabit 10 m/s'lik rüzgar hızı profilinde maksimum güçlerin elde edildiği çalışma noktalarına ilişkin olarak generatör rotor hızındaki değişimin Şekil 4.18 (a)'daki gibi olduğu ve çalışma esnasındaki güç katsayısı C_P'nin değişiminin ise Şekil 4.18 (b)'deki gibi seyrettiği görülebilmektedir. Ayrıca, yük değişimlerinde de yakalanan gücün neredeyse tamamen aynı seviyelerde tutulduğu C_P değişiminden de anlaşılmaktadır.

Yukarıda bahsedilen analiz ve sonuçlar eşliğinde, tasarlanan MPPT'li REDS yapısının doğrusal olmayan yüklenme koşullarında da performans başarısını sürdürdüğü görülmüştür.



Şekil 4.18. a) Generatör rotor hızının değişimi, **b)** Türbin güç katsayısı C_P'nin değişimi

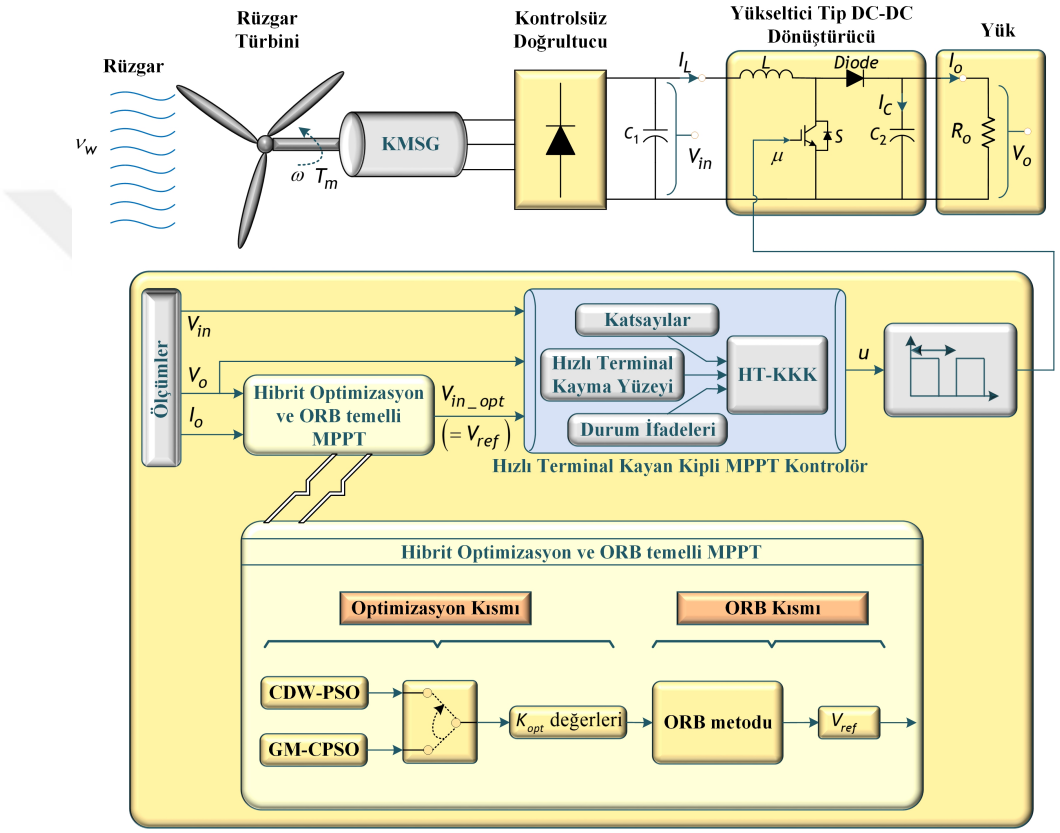
4.3. Yeni Bir Tümleşik Güç Yakalama Çerçevesinin Tasarımı

REDS için MPPT'nin sağlanması amacıyla, literatür çalışmalarının MPPT arama metotları ve kontrolör tasarımları olarak başlıca iki kısımda incelendiğinden bahsedilmişti. Çeşitli MPPT arama metotlarının işletilmesi ile maksimum gücün yakalanabileceği çalışma noktasının daha doğru ve kesince tespitinin gerçekleştirilmesi konusunda burada; optimizasyon yöntemlerinin MPPT metotlarına entegre edilmesi üzerine gerçekleştirilen çalışma sunulmaktadır. Kaotik-PSO türevlerinden olan Kaotik Dinamik Ağırlıklı-PSO (CDW-PSO) ve Gauss Haritası Temelli-Kaotik PSO (GM-CPSO) optimizasyon yöntemlerinin ayrı ayrı ORB MPPT yöntemi ile hibritleştirildiği ve ayrıca kontrolör olarak da Hızlı Terminal KKK yaklaşımının benimsendiği; iki adet yeni bir tümleşik maksimum elektriksel güç yakalama çerçevesi burada türetilmektedir. Bu yapılar sistem parametrelerinin bilinmediği gerçek REDS uygulamalarına kolayca

uyarlanabilir ve göreceli olarak basit yapıdadırlar. Buradaki optimizasyon yönetimi çevrimdışı bir süreci benimserken, MPPT çalışması ise tamamen çevrimiçi bir süreci oluşturur. Dolayısıyla, bütün işlem yükü de önemli ölçüde artmamaktadır.

4.3.1. Hibrit optimizasyon ve ORB temelli MPPT Yaklaşımı

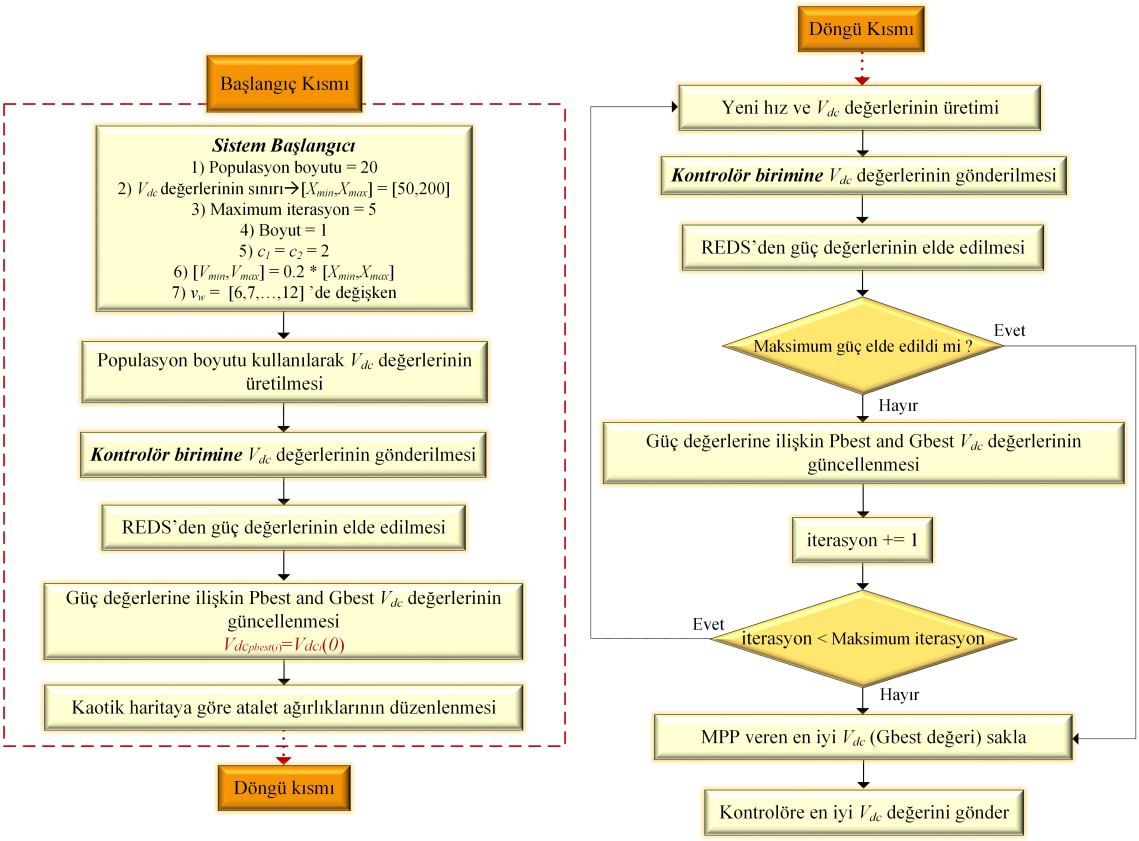
Tasarlanan REDS konfigürasyonunun görsel bir şeması Şekil 4.19'da sunulmaktadır.



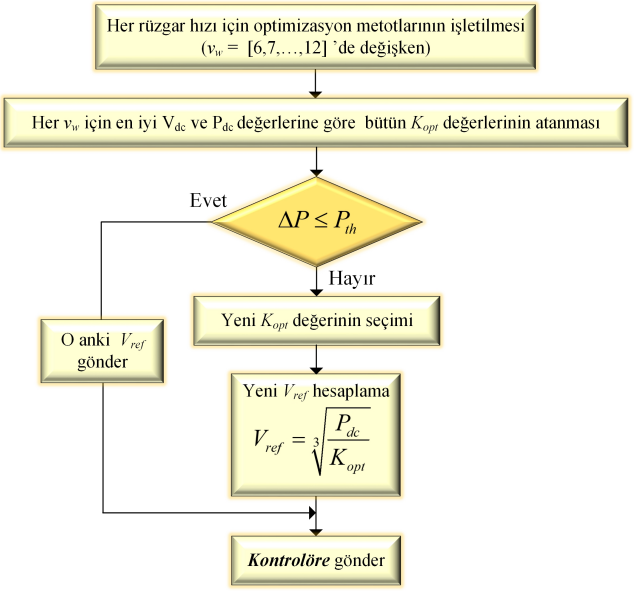
Şekil 4.19. Tasarlanan REDS konfigürasyonunun şeması

Hibritleştirilen MPPT metodu bazı gerilim ve akım sinyallerinin ölçülmesi ile yük üzerine dağıtılan elektriksel gücün maksimizasyonunu amaçlar ve bu sayede optimum çalışma noktası tespit edilir ve kontrolöre aktarılır. Kontrolör de, çalışma gerilimine sistemi getirecek olan dönüştürücü anahtarlama sinyallerini üretir. Normalde ORB MPPT yöntemi çeşitli sistem parametreleri arasındaki optimum ilişkilerle işletilir. Optimum katsayılar K_{opt}'in değerleri tanımlı ilişkiye göre hesap edilebilir. Ancak her bir rüzgar hızı için bu katsayıların değerleri değişmekte olduğundan kesin değerlerinin belirlenmesi zorlayıcı olabilmektedir. Bu nedenle, bu katsayı değerlerinin belirlenmesinde hibrit optimizasyon teknikleri bir çözüm sunabileceğinden tez

kapsamında çalışılmıştır. Anlaşılabileceği gibi, tasarlanan maksimum güç yakalama çerçevesindeki MPPT algoritması iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlar; optimizasyon kısmı ve ORB kısmı olup, akış diyagramları Şekil 4.20 ve 4.21'de sunulmaktadır.



Şekil 4.20. Hibrit çerçevenin optimizasyon kısmı



Şekil 4.21. Hibrit çerçevenin ORB kısmı

Burada, optimizasyon araması ile maksimum gücün elde edildiği çalışma gerilimi V_{DC}'nin belirlenmesi ve optimum ilişki katsayısının bulunması sağlanır. Bütün katsayılar elde edildiğinde de tasarlanan çerçevedeki algoritma ikinci kısım olan ORB'ye geçiş yapar. Dahası; tasarlanan çerçeve, REDS çalışması esnasında gücü de belirli sınırlar dahilinde (ön tanımı kritik güç değeri, P_{th}) takip etmekte olup, gerekliyse uygun en iyi katsayılar arasında da geçişler yapmaktadır. Yani REDS çalışması esnasında yakalanan güçte sınır değer ötesinde bir değişim olduğunda; algoritma güç ve güçteki farkı gözlemekte, rüzgar hızında bir değişim olduğuna karar vermekte ve bu katsayılar arasında geçiş yapmaktadır. Böylece yeni çalışma noktası için çalışma gerilimi V_{ref} belirlenerek kontrolöre aktarılır. Kritik seviye altında kalınan durumlarda K_{opt} katsayı geçişi için herhangi bir değişiklik yapılmamaktadır.

4.3.2. Hızlı terminal KKK temelli kontrolör tasarımı

Kayma yüzeyi manifoldu aşağıdaki gibi seçilmektedir.

$$s = \dot{X}_1 + \alpha X_1 + \gamma X_1^{p/q} \tag{4.43}$$

Zamana göre türevi alınırsa,

$$\dot{s} = \ddot{X}_1 + \alpha \dot{X}_1 + \gamma\theta \left|X_1\right|^{\theta-1} \dot{X}_1 \tag{4.44}$$

olur ve durum ifadeleri burada yerine yazılırsa, bu eşitlik $\dot{s} = 0$ için eşdeğer kontrol sinyali u_{eq} çözümlenirse,

$$\begin{cases} \dot{s} = -\dfrac{X_2}{RC} + \bar{u}\kappa\left(\dfrac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC}\right) + X_2\left(\alpha + \gamma\theta\left|X_1\right|^{\theta-1}\right) = 0 \\ u_{eq} = 1 + \dfrac{LC}{\kappa\left(V_o - V_{in_opt} + X_1\right)} X_2\left(-\dfrac{1}{RC} + \alpha + \gamma\theta\left|X_1\right|^{\theta-1}\right) \end{cases} \tag{4.45}$$

elde edilir. Eşdeğer kontrol sinyali u_{eq}'e anahtarlama kontrol sinyali u_{sw} eklenerek u_t toplam kontrol kuralı aşağıdaki gibi oluşturulur.

$$u_t = 1 + \frac{LC}{\kappa\left(V_o - V_{in_opt} + X_1\right)} X_2\left(-\frac{1}{RC} + \alpha + \gamma\theta\left|X_1\right|^{\theta-1}\right) + K_{sw}\, sign(s) \tag{4.46}$$

Buradan Hızlı Terminal KKK için varlık koşulunun sağlanmasına ilişkin gerekli şart; (3.40)'dan türetilerek aşağıdaki gibi incelenebilir.

$$
\begin{aligned}
&i)\begin{cases}\dot{s}<0\\ \dot{s}=-\dfrac{X_2}{RC}+\overline{u}\kappa\left(\dfrac{V_o-V_{in_opt}+X_1}{LC}\right)+X_2\left(\alpha+\gamma\theta\left|X_1\right|^{\theta-1}\right)=\\ \qquad\qquad\mapsto X_2\left(-\dfrac{1}{RC}+\alpha+\gamma\theta\left|X_1\right|^{\theta-1}\right)<0\end{cases}\\
&ii)\begin{cases}\dot{s}>0\\ \dot{s}=-\dfrac{X_2}{RC}+\overline{u}\kappa\left(\dfrac{V_o-V_{in_opt}+X_1}{LC}\right)+X_2\left(\alpha+\gamma\theta\left|X_1\right|^{\theta-1}\right)=\\ \qquad\qquad\mapsto \kappa\left(\dfrac{V_o-V_{in_opt}+X_1}{LC}\right)+X_2\left(-\dfrac{1}{RC}+\alpha+\gamma\theta\left|X_1\right|^{\theta-1}\right)>0\end{cases}
\end{aligned}
\tag{4.47}
$$

Bu iki koşul birleştirilirse gerek şart,

$$
\begin{cases}X_2\left(-\dfrac{1}{RC}+\alpha+\gamma\theta\left|X_1\right|^{\theta-1}\right)<0<\kappa\left(\dfrac{V_o-V_{in_opt}+X_1}{LC}\right)+\\ \qquad X_2\left(-\dfrac{1}{RC}+\alpha+\gamma\theta\left|X_1\right|^{\theta-1}\right)\\ \mapsto 0<X_2\left(\dfrac{1}{RC}-\alpha-\gamma\theta\left|X_1\right|^{\theta-1}\right)<\kappa\left(\dfrac{V_o-V_{in_opt}+X_1}{LC}\right)\end{cases}
\tag{4.48}
$$

gibi olur. Diğer taraftan da Eşitlik (3.41) ve (3.42)'den yararlanılarak kararlılık incelemesi yapılırsa,

$$
\begin{cases}\dot{V}(t)=s(t)\dot{s}(t)<0 \;\; for\; s(t)\neq 0\\ \dot{V}(t)=s(t)\left(-\dfrac{X_2}{RC}+\overline{u}\kappa\left(\dfrac{V_o-V_{in_opt}+X_1}{LC}\right)+X_2\left(\alpha+\gamma\theta\left|X_1\right|^{\theta-1}\right)\right)<0\end{cases}
\tag{4.49}
$$

elde edilir. Ardından sistem durumları $\dot{X}_2$ ve $\dot{s}(t)$ bozucu etki $D(t)$ eşliğinde yeniden yazılırsa,

$$\begin{cases} \dot{X}_{2new} = \left(-\dfrac{X_2}{RC} + \overline{u}_t \kappa \left(\dfrac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC} \right) + D(t) \right) \\ \dot{s}_{new} = -\dfrac{X_2}{RC} + \overline{u}_t \kappa \left(\dfrac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC} \right) + X_2 \left(\alpha + \gamma\theta \left| X_1 \right|^{\theta-1} \right) + D(t) \end{cases} \tag{4.50}$$

gibi olmaktadır. Lyapunov fonksiyonu için işlem (4.51)'de verildiği gibi sürdürülürse,

$$\begin{cases} \dot{V}(t) = s(t) \left(-\dfrac{X_2}{RC} + \overline{u}_t \kappa \left(\dfrac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC} \right) + X_2 \left(\alpha + \gamma\theta \left| X_1 \right|^{\theta-1} \right) + D(t) \right) < 0 \\ \mapsto \dot{V}(t) = s(t) \left(-K_{sw}\, sign(s) \kappa \left(\dfrac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC} \right) + D(t) \right) < 0 \\ \mapsto \dot{V}(t) = \left(-K_{sw} \left| s(t) \right| \kappa \left(\dfrac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC} \right) + s(t) D(t) \right) < 0 \\ \le -K_{sw} \left| s(t) \right| \kappa \left(\dfrac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC} \right) + \left| s(t) \right| D(t) \\ -\left| s(t) \right| \left(K_{sw} \kappa \left(\dfrac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC} \right) - D(t) \right) < 0 \\ K_{sw} \kappa \left(\dfrac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC} \right) - D(t) > 0 \\ K_{sw} \kappa \left(\dfrac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC} \right) > D(t) \end{cases} \tag{4.51}$$

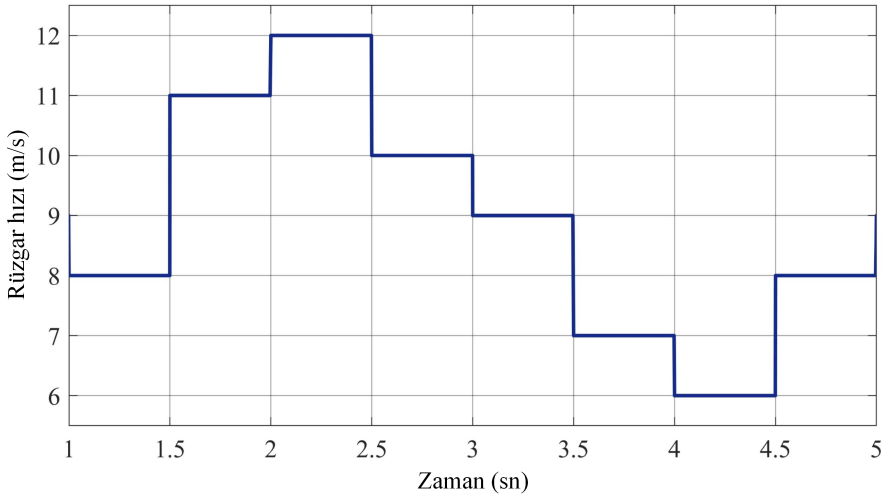
gerekli koşul elde edilmekte olup, bu koşulun sağlanması ile kararlılık garanti edilecektir.

4.3.3. Simülasyon ortamındaki doğrulama testleri ve karşılaştırmalar

Simülasyon ortamında üç spesifik rüzgar hızı değişim senaryosu oluşturularak önerilen yapının geçerliliği doğrulanmıştır. GM-CPSO temelli ORB ve CDW-PSO temelli ORB yaklaşımları bu senaryolar altında ORB ve TSR MPPT yöntemleriyle verim, çıkış gücü, çıkış terminal gerilimi, dönüştürücü giriş gerilimi, C_P ve çalışma oranı (duty ratio) değişimleri gibi kriterler bakımından detaylıca karşılaştırılmıştır.

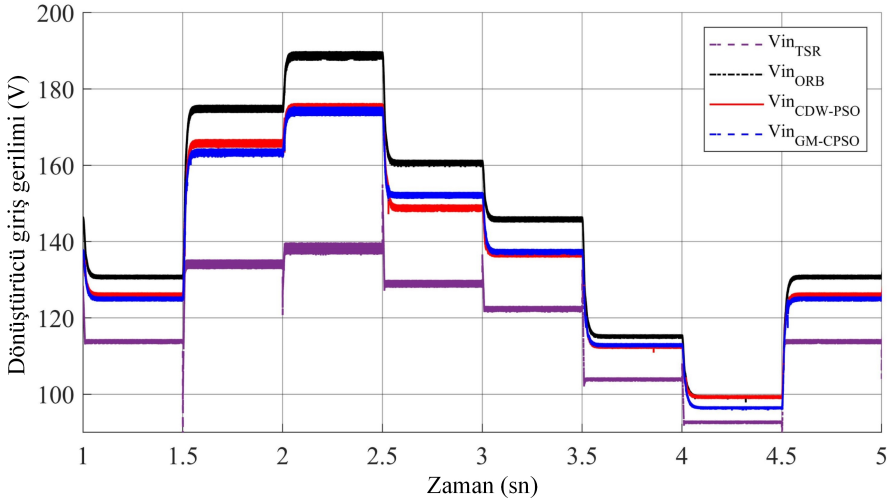
4.3.3.1. Test senaryosu I

İlk senaryo için rüzgar hızı değişimi 6 m/s ile 12 m/s aralığında kademeli olarak değişen bir formda modellenmiştir ve Şekil 4.22 ile gösterilmektedir.



Şekil 4.22. Senaryo I için rüzgar hızı profili

Bu senaryo değişimine karşılık MPPT algoritmaları ile belirlenen yükseltici tip DC-DC dönüştürücü giriş (çalışma) gerilimleri aşağıdaki gibi sunulmaktadır.



Şekil 4.23. Senaryo I dönüştürücü giriş gerilimi değişimleri

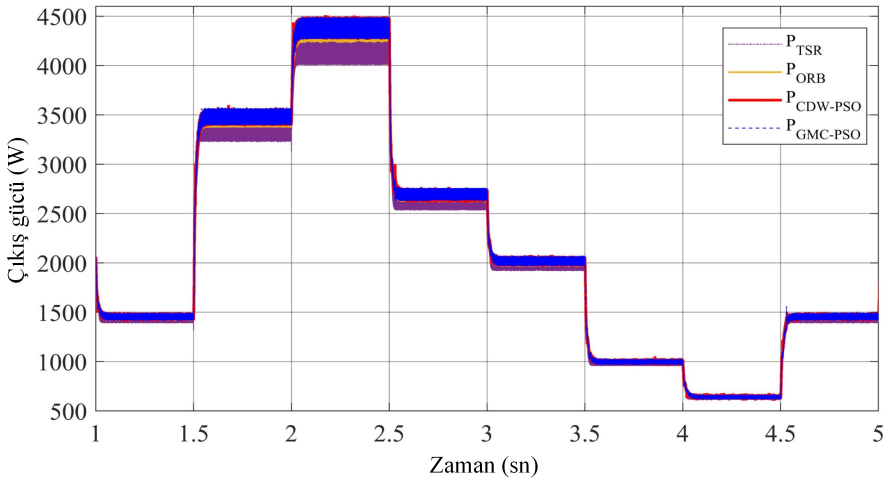
Bu grafikte özellikle yüksek rüzgar hızları için GM-CPSO ve CDW-PSO temelli ORB MPPT yaklaşımlarıyla belirlenen çalışma gerilimlerinden, TSR MPPT yönteminde uzak kalındığı görülebilir. Ayrıca ORB yöntemi aracılığıyla ise bu optimal çalışma noktalarına hafifçe yakın olunmaktadır. Ancak en iyi çalışma noktaları,

optimizasyon yöntemleri temelli olarak elde edilebilmiş olup GM-CPSO ve CDW-PSO için V_{in_best} ve K_{opt} değerleri Çizelge 4.8'de listelenmektedir.

Çizelge 4.8. Optimizasyon metotları ile elde edilen en iyi katsayılar ve değerler

Rüzgar hızı Vw (m/s)	CDW-PSO		GM-CPSO	
	V_{inbest} (V)	K_{opt} (~)	V_{inbest} (V)	K_{opt} (~)
6	100.3912	6.352159e-04	97.5444	6.921807e-04
7	113.6705	6.807221e-04	114.001	6.742761e-04
8	127.1802	7.087597e-04	126.1652	7.262426e-04
9	137.8511	7.718812e-04	138.5222	7.621728e-04
10	149.9471	7.993639e-04	153.3051	7.493665e-04
11	166.9165	7.493850e-04	164.500	7.840210e-04
12	176.1076	8.037671e-04	175.3568	8.148773e-04

Diğer taraftan, bu referans değerlerle yakalanabilen çıkış güçlerinin değişim grafiği Şekil 4.24 ile gösterilmekte olup, çalışma gerilim noktalarının daha doğru ve kesin belirlenmesi sayesinde optimizasyon temelli ORB yaklaşımları diğer iki yönteme göre daha yüksek güçlere ulaşabilmiştir. Yakalanan güç verileri ise, karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.9'da verilmektedir.

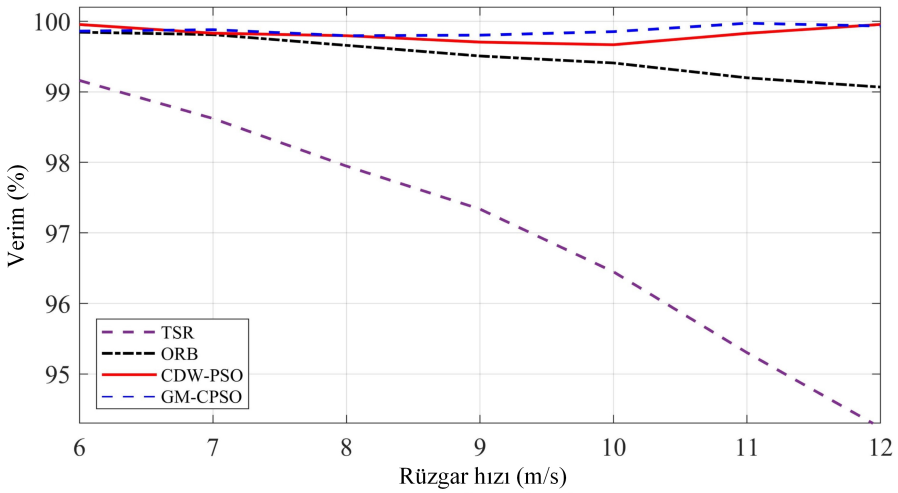


Şekil 4.24. Senaryo I için REDS'den yakalanan çıkış gücünün değişimleri

Çizelge 4.9. Senaryo I için dört MPPT metodunun yakalanan güçler bakımından karşılaştırılması

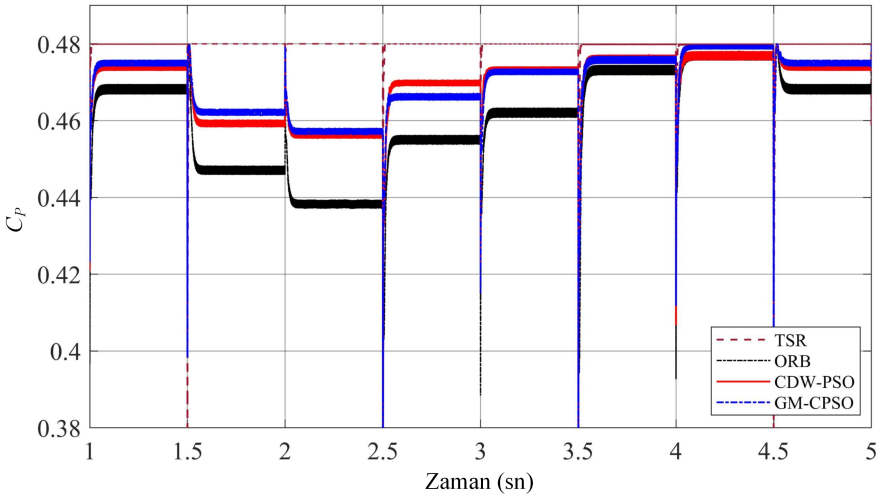
V_w *(m/s)*	Mevcut P_{max} *(W)*	P_{TSR} *(W)*	P_{ORB} *(W)*	$P_{CDW\text{-}PSO\text{-}ORB}$ *(W)*	$P_{GM\text{-}CPSO\text{-}ORB}$ *(W)*
6	643	637.6	642	**642.7**	642.1
7	1001	987.2	999.1	999.3	**999.8**
8	1461	1431	1456	**1458**	**1458**
9	2028	1974	2018	2022	**2024**
10	2703	2607	2687	2694	**2699**
11	3490	3327	3463	3485	**3490**
12	4392	4139	4351	**4390**	4389

Ayrıca test edilen rüzgar hızları için; her bir MPPT yönteminin rüzgar hızlarına ilişkin olarak verimlerinin değişim grafiği Şekil 4.25'de sunulmaktadır.



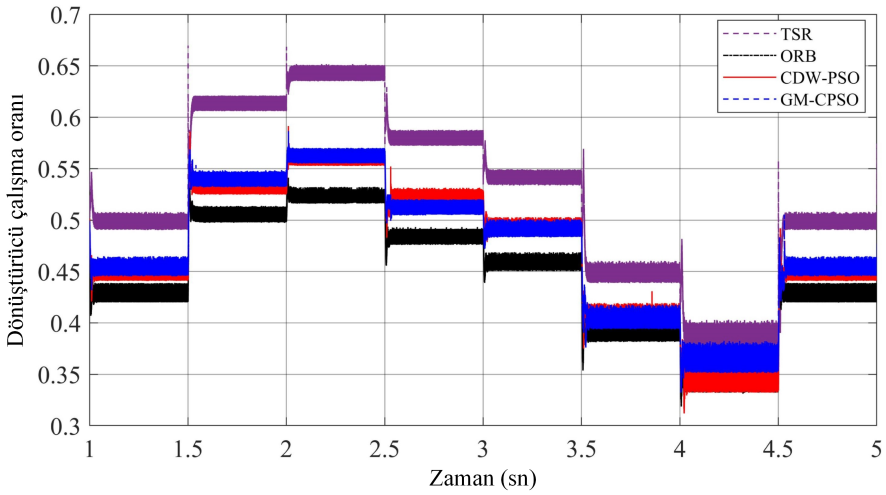
Şekil 4.25. Senaryo I için verimlerin değişimleri

Buradan rüzgar hızlarının artması ile TSR MPPT yönteminde verimin düştüğü yorumlanabilmektedir. Bu düşüşün sebebi ise, rüzgar hızına bağlı olarak generatör çalışma hızının ilişkili olması ve çalışma koşullarına göre de generatör ve dönüştürücü kayıplarının değişkenlik göstermesidir. Bu yüzden de C_P'nin her zaman maksimum değerinde tutulmasının çok anlamlı olmayacağı anlaşılmaktadır. Ancak bilindiği üzere, TSR yöntemi C_P'yi her zaman maksimumda tutmayı amaçlamaktadır ve bu yüzden bu yöntemin verimliliği diğerlerinden düşük kalmaktadır. Maksimum elektriksel çıkış gücüne ulaşılmayı sağlayan çalışma noktaları için C_P değerlerinin değişimleri aşağıdaki gibi oluşmaktadır.

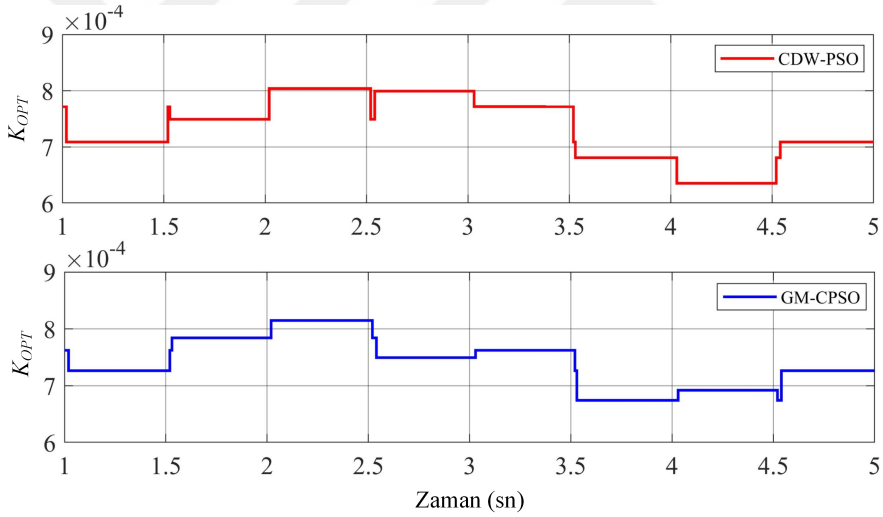


Şekil 4.26. Senaryo I için C_P değerlerinin değişimleri

Diğer taraftan, Hızlı Terminal KKK temelli kontrolör ile üretilen dönüştürücü çalışma oranlarının değişimleri ise Şekil 4.27'de aktarılırken, optimizasyon temelli iki MPPT yöntemi için; K_{opt} katsayıları arasındaki geçişler ise Şekil 4.28'de sunulmaktadır.



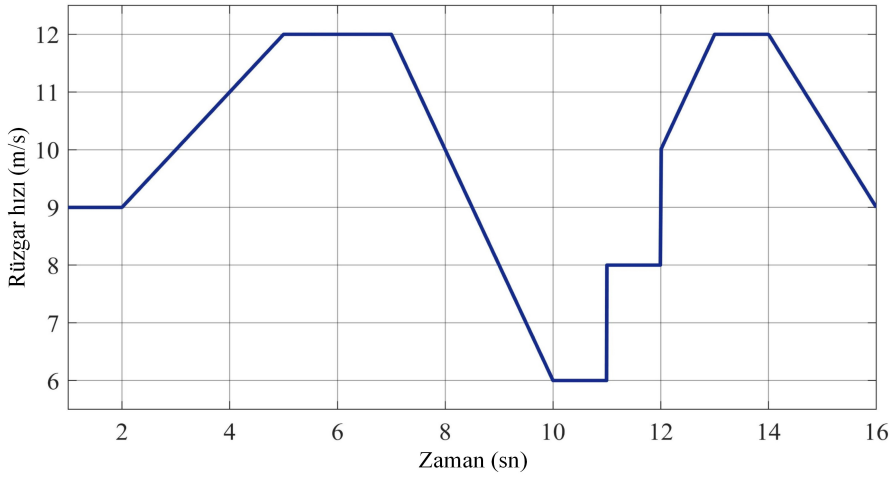
Şekil 4.27. Senaryo I için dönüştürücü çalışma oranlarının değişimi



Şekil 4.28. Senaryo I için K_{opt} katsayılarının değişimi

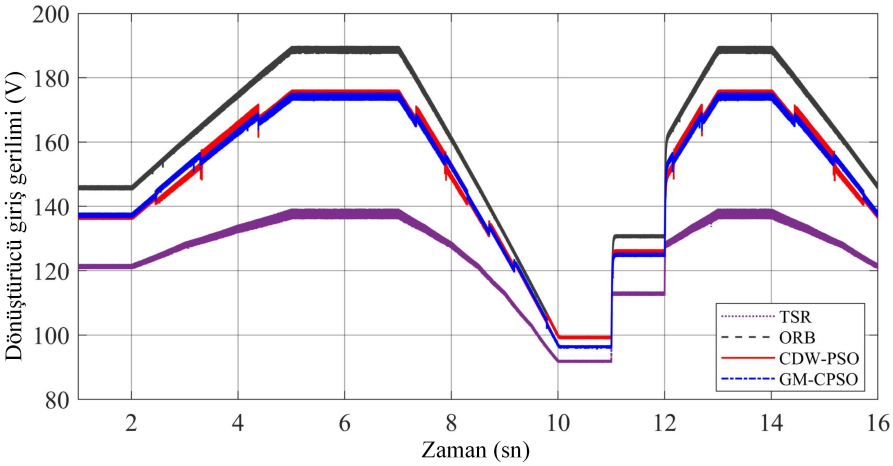
4.3.3.2. Test senaryosu II

İkinci test senaryosu aynı rüzgar hızı aralığı içerisinde, farklı eğimlerde doğrusal değişimleri ve adım değişimleri barındıran bir rüzgar hızı profilinin düzenlenmesiyle Şekil 4.29'daki gibi oluşturulmuştur.

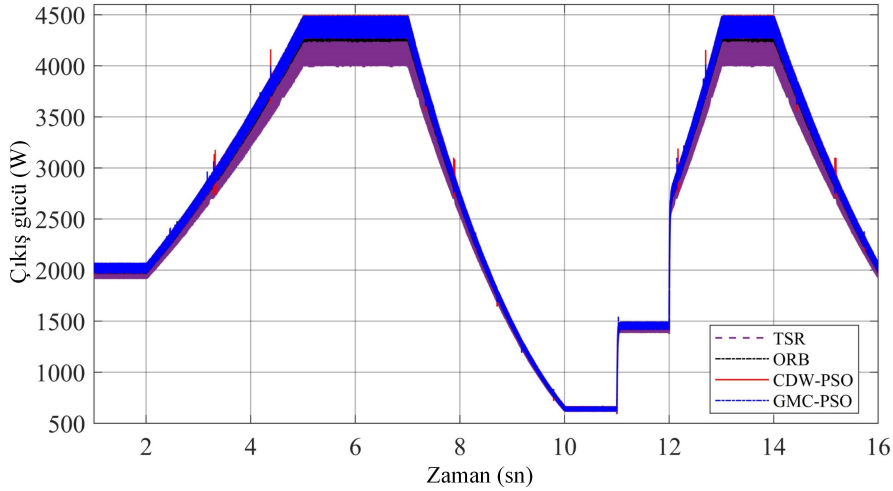


Şekil 4.29. Senaryo II için rüzgar hızı profili

Dört farklı MPPT metodu tarafından belirlenmiş olan yükseltici tip DC-DC dönüştürücünün giriş gerilimlerinin değişimi ve ayrıca REDS'den yakalanan elektriksel çıkış güçlerinin değişimi sırasıyla Şekil 4.30 ve 4.31'deki gibi olmaktadır.

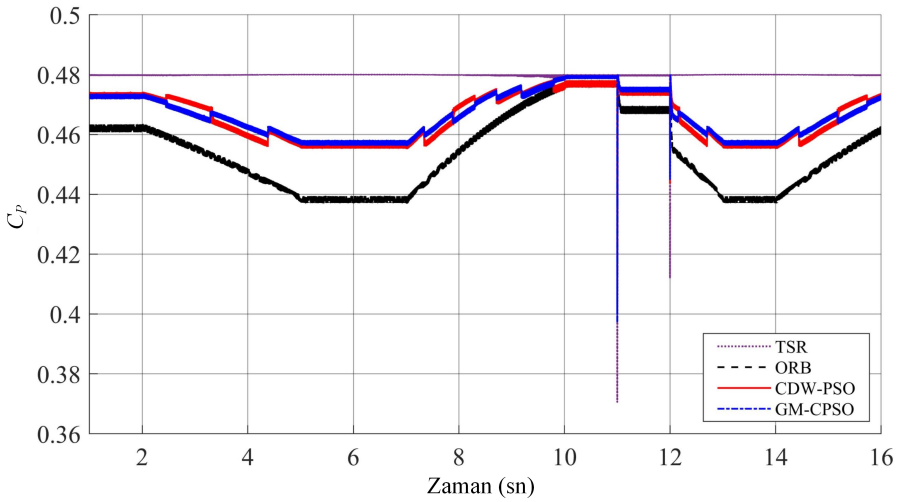


Şekil 4.30. Senaryo II için dönüştürücü giriş gerilimlerinin değişimleri



Şekil 4.31. Senaryo II için REDS'den yakalanan elektriksel çıkış güçlerinin değişimleri

Bahsedilen iki görselden, optimizasyon entegrasyonu sayesinde maksimum güç noktasının belirlenme doğruluğunun artırılması ile referans çalışma gerilimlerinin optimalde tutulduğu ve bu sayede, optimizasyon temelli MPPT yaklaşımlarının diğer metotlardan daha fazla güç yakalamaya olanak verdiği anlaşılmaktadır. İlaveten, her bir yöntem için; maksimum gücün elde edildiği çalışma noktalarına karşılık gelen C_P değerlerinin değişimleri aşağıdaki gibi sunulmaktadır.



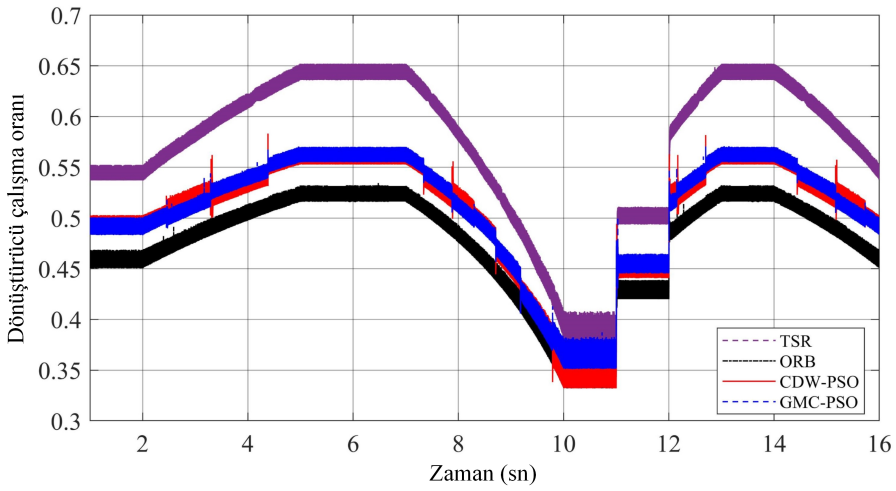
Şekil 4.32. Senaryo II için C_P değerlerinin değişimleri

Burada, TSR yöntemiyle C_P 0.48'de başarıyla tutulmuştur ancak bir önceki senaryodaki açıklamada belirtildiği gibi maksimum gücün her an elde edilebileceği anlamına gelmemektedir. Bu çıkarım hali hazırda Şekil 4.31'den görülebildiği gibi, simülasyon periyodu boyunca yakalanan ortalama güç, toplam enerji ve verimlilik için Çizelge 4.10'da listelenen verilerden de doğrulanmaktadır.

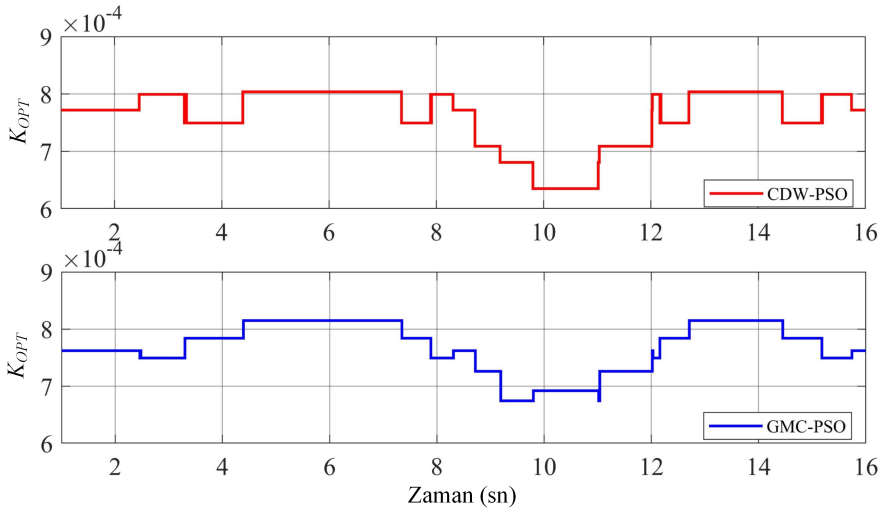
Çizelge 4.10. Senaryo II için MPPT metotlarının yakalanan güçler bakımından karşılaştırılması

	Mevcut P_{max} *(W)*	TSR	ORB	*CDW-PSO-ORB*	*GM-CPSO-ORB*
Ortalama Güç (W)	2902.62	2730.45	2846.98	2863.64	**2863.79**
Toplam Enerji (W.s)	43539.34	40956.71	42704.74	42954.66	**42956.91**
Verim (%)	-	94.0685	98.0831	98.6571	**98.6622**

Bir diğer taraftan, kontrolör tarafından üretilen dönüştürücü çalışma oranlarının değişimleri ve iki optimizasyon temelli yöntem için K_{opt} katsayılar arasındaki geçişler sırasıyla Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'deki gibi sunulmaktadır.



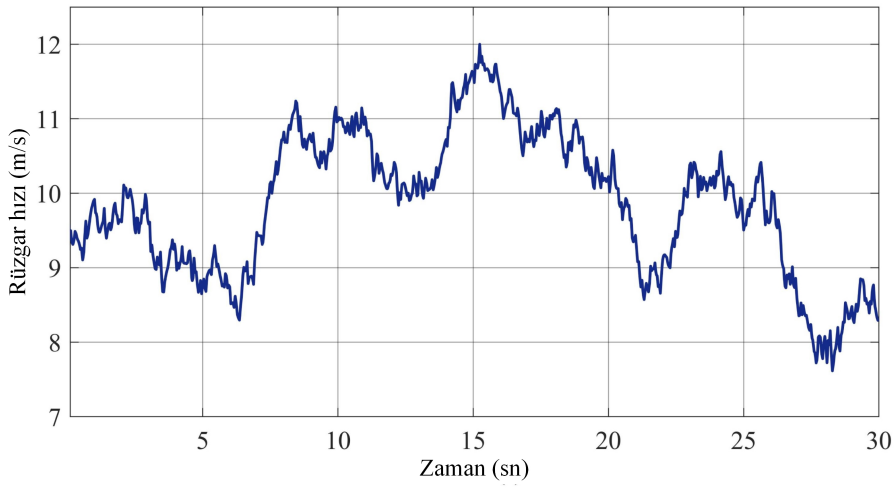
Şekil 4.33. Senaryo II için dönüştürücü çalışma oranlarının değişimleri



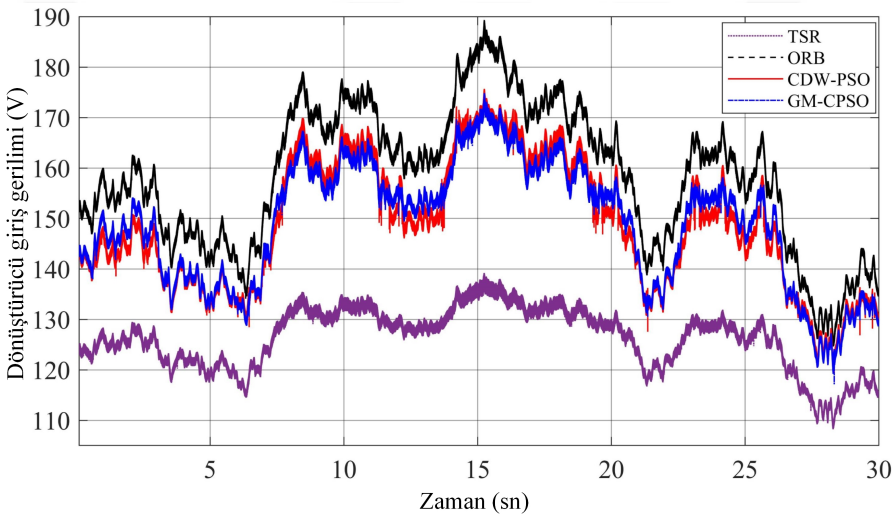
Şekil 4.34. Senaryo II için K_{opt} katsayılarının değişimleri

4.3.3.3. Test senaryosu III

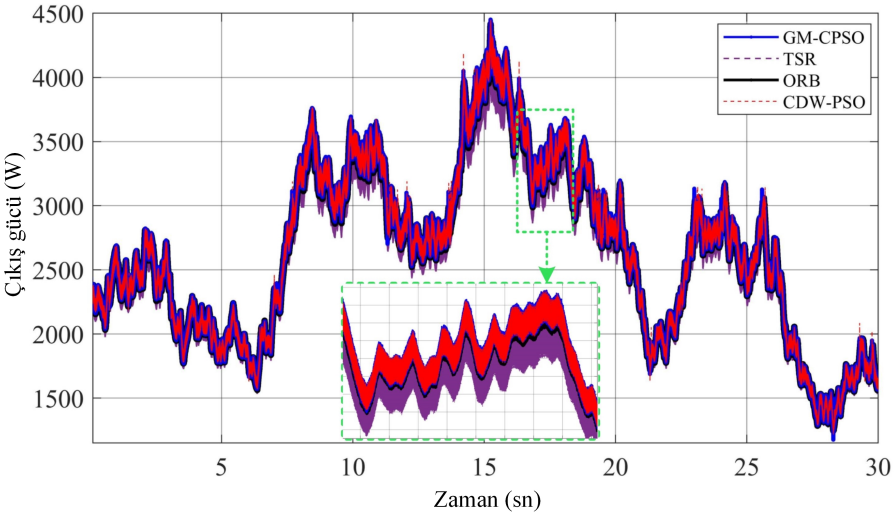
Rüzgarın doğası dinamiktir ve türbülansları barındırdığından dolayı son test senaryo için 7.5 m/s ile 12 m/s arasında rastgele değişim gösteren bir rüzgar hızı profili modellenmiş olup, Şekil 4.35'deki gibi sunulmaktadır. Orta türbülanslı bu rüzgar hızı profilinin ortalama değeri yaklaşık olarak 9.86 m/s'dir. Bu senaryoya ilişkin elde edilen sonuçlar da öncekilere benzer olmakta olup, Şekil 4.36'da dönüştürücü giriş gerilimlerinin değişimi ve Şekil 4.37'de ise REDS'den yakalanan elektriksel çıkış gücünün değişimleri sunulmaktadır. Optimizasyon temelli MPPT yöntemleriyle daha üstün güç yakalama olanağı sunulabildiği buradan açıkça görülebilir. Her bir MPPT yöntemiyle yakalanan ortalama güç, toplam enerji ve verimlilik açısından elde edilen veriler Çizelge 4.11 ile aktarılmaktadır.



Şekil 4.35. Senaryo III için rüzgar hızı profili



Şekil 4.36. Senaryo III için dönüştürücü giriş gerilimlerinin değişimi

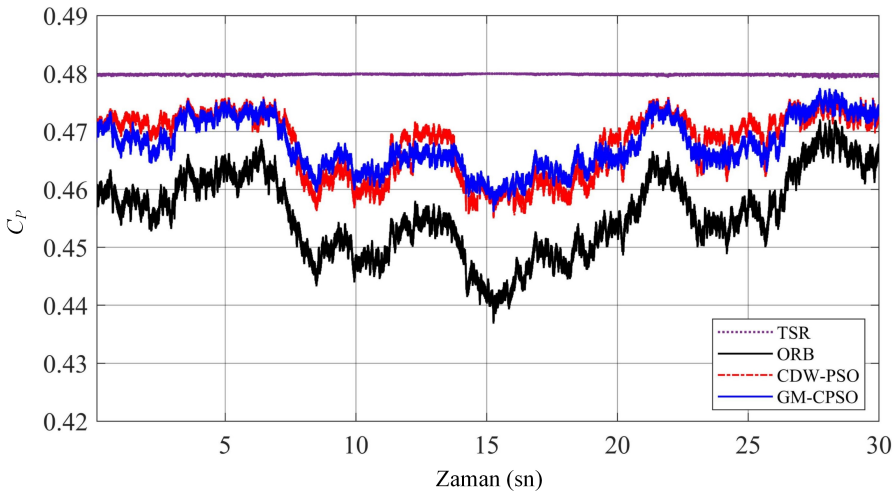


Şekil 4.37. Senaryo III için REDS'den yakalanan elektriksel çıkış güçlerinin değişimi

Çizelge 4.11. Senaryo III için MPPT metotlarının yakalanan güçler bakımından karşılaştırılması

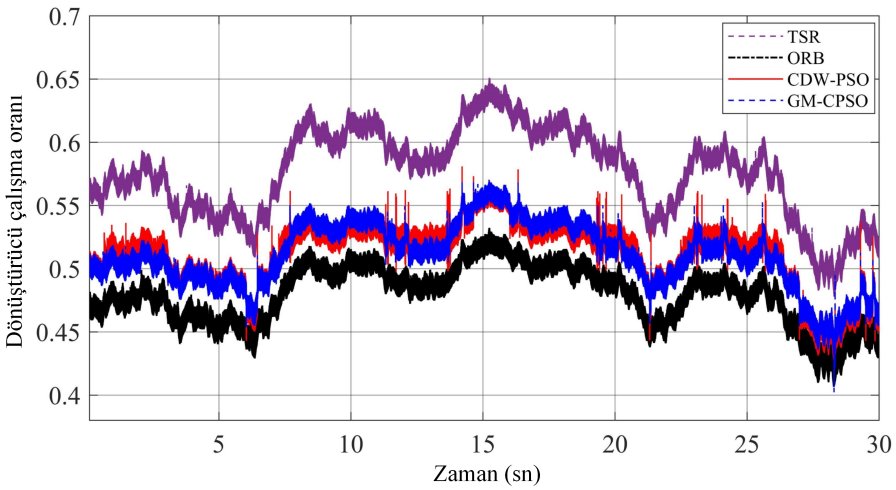
	Mevcut P_{max} *(W)*	TSR	ORB	*CDW-PSO-ORB*	*GM-CPSO-ORB*
Ortalama Güç (W)	2689.98	2547.02	2640.35	2651.13	**2652.22**
Toplam Enerji (W.s)	80430.39	76155.99	78946.46	79268.80	**79301.37**
Verim (%)	-	94.6856	98.1550	98.5558	**98.5963**

Diğer taraftan dört MPPT yaklaşımı eşliğinde bu senaryo için C_P güç katsayılarının değişimi ise Şekil 4.38'deki gibi olmaktadır.



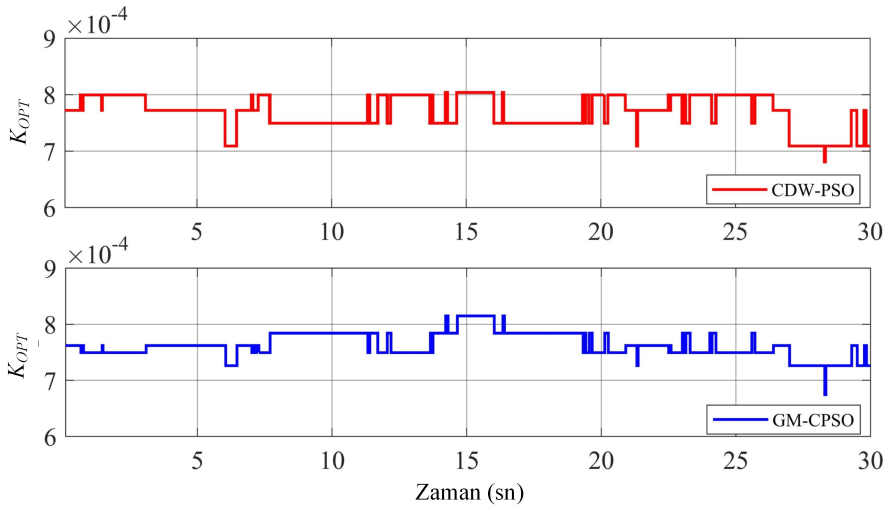
Şekil 4.38. Senaryo III için C_P güç katsayılarının değişimleri

Ayrıca her bir MPPT yaklaşımı için kontrolörün ürettiği dönüştürücü çalışma oranlarının seyri ise Şekil 4.39'daki gibidir. Buradan, optimizasyon temelli metotları ile çalışma oranının 0.44-0.57 aralığındayken, dört yöntem için bu aralığın 0.40-0.65 arasında bulunduğu görülebilmektedir.



Şekil 4.39. Senaryo III için dönüştürücü çalışma oranlarının değişimleri

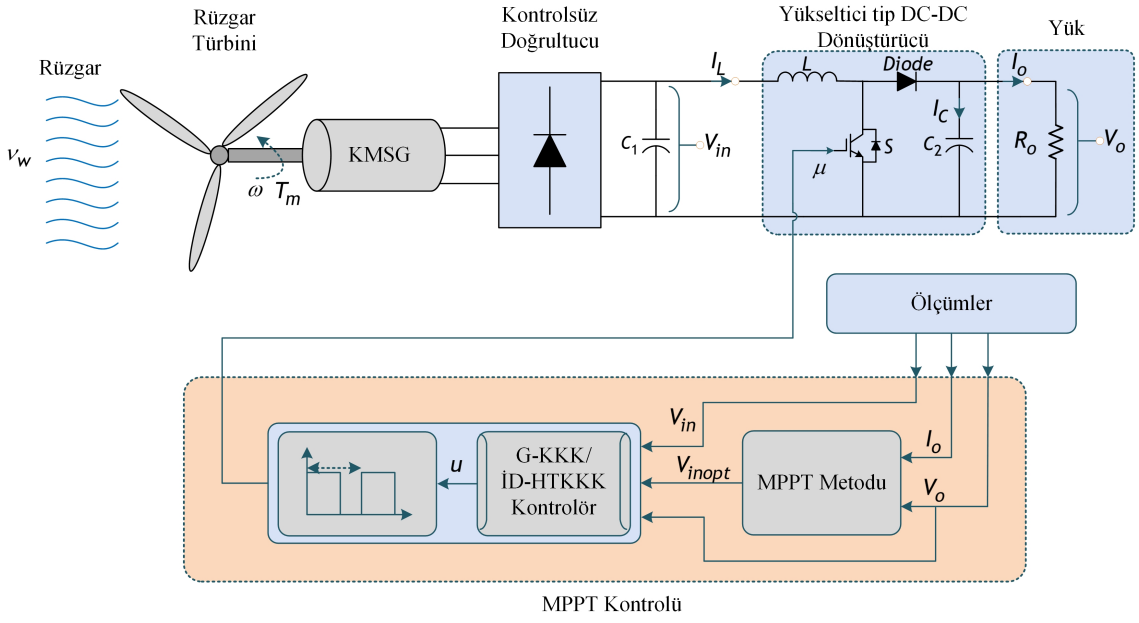
Diğer taraftan güç yakalama çerçevesindeki algoritmik yaklaşım ile K_{opt} katsayıları arasındaki geçişler Şekil 4.40'da sunulduğu gibi olmaktadır.



Şekil 4.40. Senaryo III için K_{opt} güç katsayılarının değişimleri

4.4. İkinci Dereceden Hızlı Terminal KKK temelli MPPT Kontrolünün Tasarımı

Bu kısımda KMSG tabanlı REDS'lerden güç yakalama konusunda daha iyi bir performans elde etmek amacıyla gerilim modlu İkinci Dereceden Hızlı Terminal KKK (İD-HTKKK) temelli MPPT kontrolörünün tasarımı ele alınmaktadır. Burada düşünülen REDS konfigürasyon yapısı aşağıdaki gibi olmaktadır.

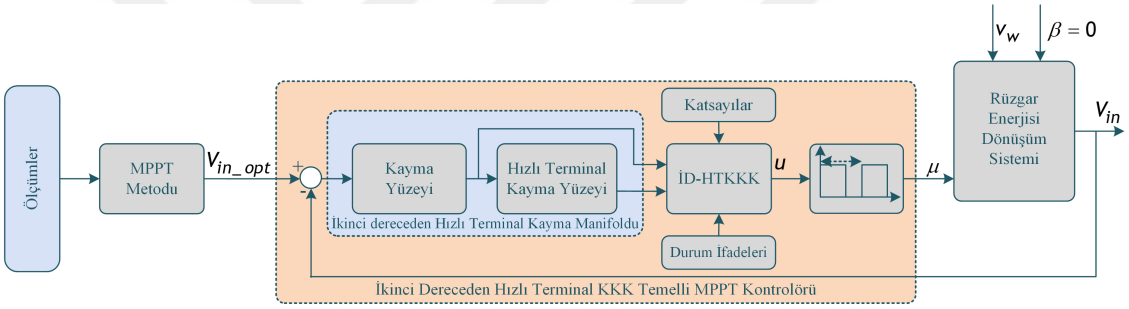


Şekil 4.41. REDS konfigürasyon şeması

Bu tasarımda, MPPT algoritması tarafından belirlenen çalışma noktasına sistemin daha az sürekli hal hatası ve gerilim dalgalılığı ile ulaştırılması ve bu sayede de daha yüksek verimliliğin elde edilmesi amacı güdülmektedir. Oluşturulan iki farklı rüzgar hızı senaryosunda; maksimum yakalanan ortalama güç, çıkış gerilimindeki dalgalılık, sürekli hal gerilim hatası, MPPT verimi ve ayrıca performans indisleri gibi kriterler açısından geleneksel KKK yaklaşımı ile karşılaştırmalı olarak analizler gerçekleştirilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, daha üstün bir performansa bu tasarım sayesinde ulaşılabilmektedir.

4.4.1. Kontrolör tasarımı

İkinci Dereceden Hızlı Terminal KKK temelli olarak tasarlanan MPPT kontrolörün detaylandırılmış blok şeması Şekil 4.42'de verilmektedir.



Şekil 4.42. MPPT kontrolörünün blok diyagramı

Doğrusal kayma yüzeyi aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$s(t) = \lambda_C X_1 + X_2 \tag{4.52}$$

Ardından modifiye edilir.

$$\dot{s}(t) + \gamma s(t) = k_p X_1 + k_i \int_0^t X_1(\tau) d\tau + k_d \dot{X}_1 \tag{4.53}$$

Daha sonra hızlı terminal manifoldu aşağıdaki gibi oluşturulur (Abolvafaei ve Ganjefar, 2019; Dursun ve Kulaksiz, 2020a).

$$\sigma = \dot{s}(t) + \beta_1 s(t) + \beta_2 s(t)^{p/q} \tag{4.54}$$

Sonrasında zamana göre her iki tarafın türevi alınırsa,

$$\begin{aligned}\dot{\sigma} &= \ddot{s}(t) + \beta_1 \dot{s}(t) + \beta_2 \frac{p}{q} s(t)^{p/q-1} \dot{s}(t) \\ &= \ddot{s}(t) + \dot{s}(t)\left(\beta_1 + \beta_2 \frac{p}{q} s(t)^{p/q-1} \right)\end{aligned} \tag{4.55}$$

elde edilir. (4.53) zamana göre türevlenirse ve burada yerine yazılırsa,

$$\dot{\sigma} = K_p \dot{X}_1 + K_i X_1 + K_d \ddot{X}_1 + \dot{s}(t)\overbrace{\left(-\gamma + \beta_1 + \beta_2 \frac{p}{q} s(t)^{p/q-1} \right)}^{\vartheta} \tag{4.56}$$

olmaktadır. Ardından (4.52)'nin türevi alınır yerine yazılırsa ve ayrıca sistem durum ifadeleri buraya yerleştirilirse, aşağıdaki gibi eşitlik türetilir.

$$\dot{\sigma} = \left(K_p + \lambda_C \vartheta - \frac{K_d + \vartheta}{RC} \right) X_2 + K_i X_1 + \bar{u} \kappa \left(K_d + \vartheta \right) \left(\frac{V_o - V_{in_opt} + X_1}{LC} \right) \tag{4.57}$$

Buradan da, kontrol sinyaline geçiş yapılırsa (4.58) ifadesi türetilir.

$$u = 1 + \frac{1}{\kappa \left(K_d + \vartheta \right)} \left(\frac{LC}{V_o - V_{in_opt} + X_1} \right) . \left(\left(K_p + \lambda_C \vartheta - \frac{K_d + \vartheta}{RC} \right) X_2 + K_i X_1 \right) \tag{4.58}$$

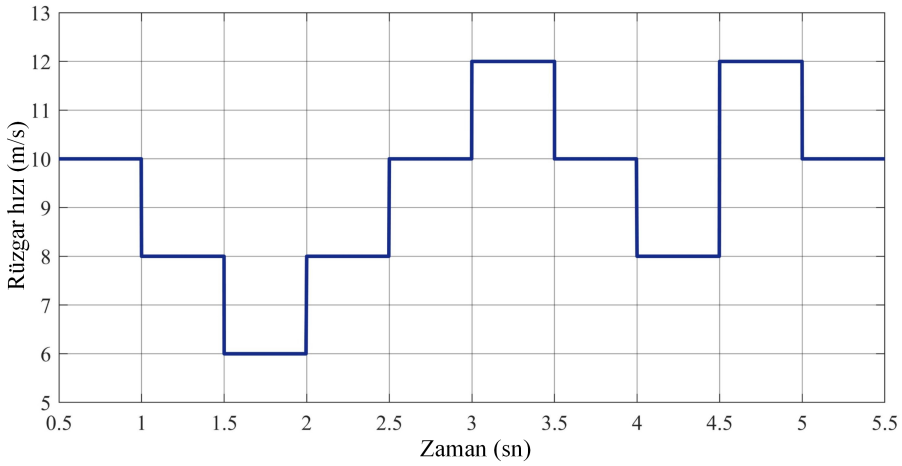
Gereklilik şartlarının öncekilere benzer olarak irdelenmesi ve parametrelerin uygunca belirlenmesi ile bu yaklaşım REDS sistemleri için uygulanabilmektedir.

4.4.2. Simülasyon ortamındaki doğrulama testleri ve karşılaştırmalar

Burada öncelikle 6 m/s ile 12 m/s aralığında değişen, iki farklı rüzgar hızı modellenmiştir. Bunlar; adım değişimli rüzgar hızı profili ve gerçeğe benzer rastgele değişim gösteren rüzgar hızı profilidir. Ardından her iki test senaryosu altında; MPPT verimi, maksimum yakalanan ortalama güç, sürekli durumdaki gerilim hatası, çıkış gerilimindeki dalgalılık ve performans indisleri gibi kriterler bakımından, tasarlanan kontrolörün performansının değerlendirilmesi geleneksel KKK ile karşılaştırmalı olarak yapılmaktadır.

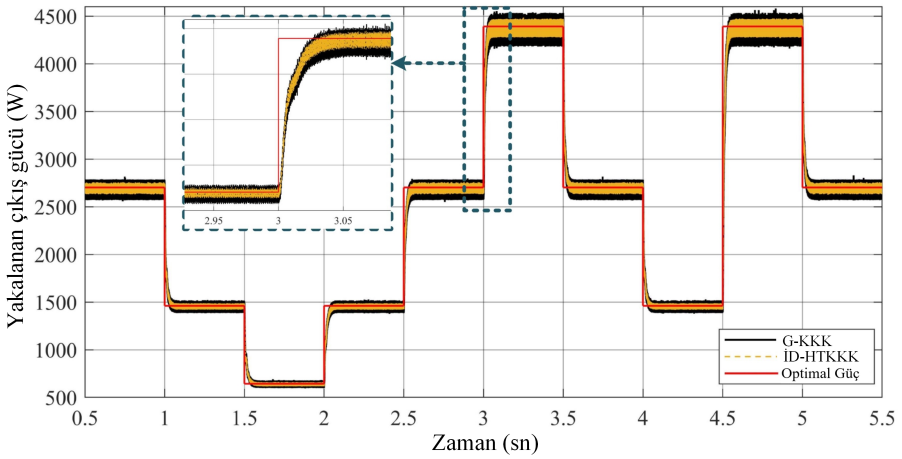
4.4.2.1. Test senaryosu I

Adım değişimleri içeren birinci rüzgar hızı profili modellenerek aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi sunulmaktadır.



Şekil 4.43. Senaryo I için rüzgar hızı değişimi

Bu rüzgar hızı profili altında, her iki kontrolör aracılığıyla REDS'den yakalanan çıkış güçlerinin değişimi ve 3'ncü saniye için yakınlaştırılmış bir hali buraya eklenerek aynı görselde aşağıdaki gibi verilmektedir.



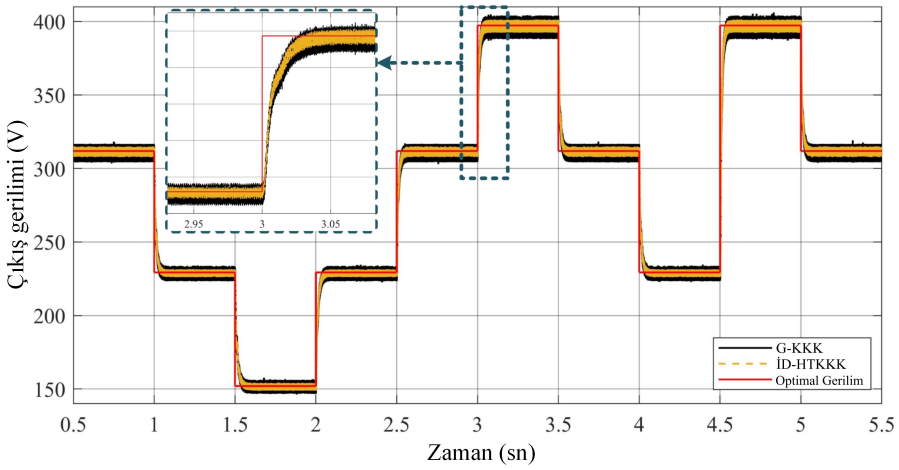
Şekil 4.44. Senaryo I için yakalanan çıkış güçlerinin değişimi

Buradan anlaşılabileceği gibi, İD-HTKKK aracılığıyla G-KKK'a nazaran güçte daha az dalgalanmanın elde edildiği ve optimal değere daha yakın bir izlemenin gerçekleştirildiği söz konusudur. Dahası bahsi geçen rüzgar hızı profilinde, yakalanan güç için elde edilen nümerik veriler Çizelge 4.12'de listelenmektedir.

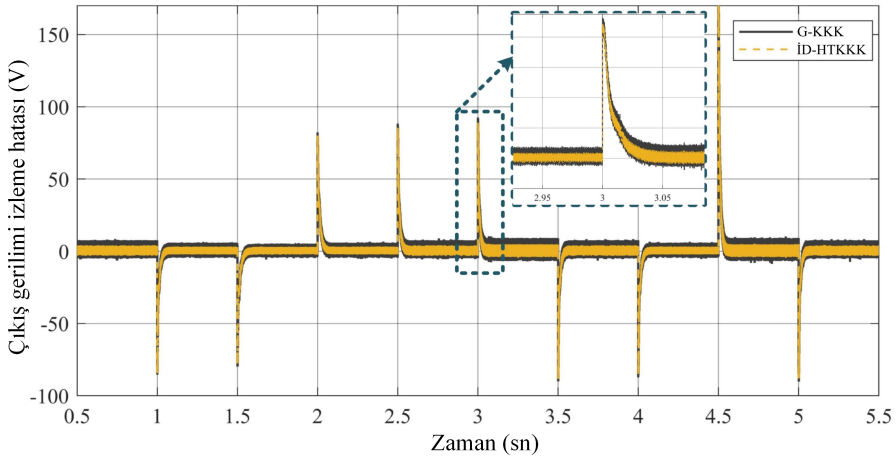
Çizelge 4.12. Senaryo I için kontrolörlerin güç ve verim bakımından karşılaştırması

Vw (m/s)	Mevcut P_{max} (W)	Ortalama Güç (W)		Verim (%)	
		G-KKK	İD-HTKKK	G-KKK	İD-HTKKK
6	643	637	**640**	99.067	**99.533**
8	1461	1451	**1457**	99.316	**99.726**
10	2703	2682	**2699**	99.223	**99.852**
12	4392	4357	**4385**	99.203	**99.841**

Diğer taraftan yüke transfer edilen dönüştürücü çıkış geriliminin değişimi Şekil 4.45'deki gibi elde edilirken, Şekil 4.46'da ise çıkış geriliminin izleme hatası verilmektedir. Ayrıca Çizelge 4.13'de gerilim dalgalanması ve sürekli hal hatası bakımından karşılaştırmalar listelenerek sunulmaktadır. Buradan da G-KKK temelli tasarıma göre, İD-KKK temelli tasarım ile daha minimal gerilim dalgalanmasının elde edildiği ve izleme hatasının sıfıra daha yakın tutulduğu anlaşılabilir.



Şekil 4.45. Senaryo I için çıkış gerilimlerinin değişimi



Şekil 4.46. Senaryo I için çıkış gerilimi izleme hatalarının değişimleri

Çizelge 4.13. Senaryo I için kontrolörlerin gerilim açısından karşılaştırılması

Vw (m/s)	Gerilim Dalgalanması (V)		Sürekli hal gerilim hatası (V)	
	G-KKK	İD-HTKKK	G-KKK	İD-HTKKK
6	3.2	**2**	1.02	**0.29**
8	5	**2.5**	1.29	**0.27**
10	6.4	**4.2**	1.63	**0.17**
12	9.5	**6.1**	1.71	**0.03**

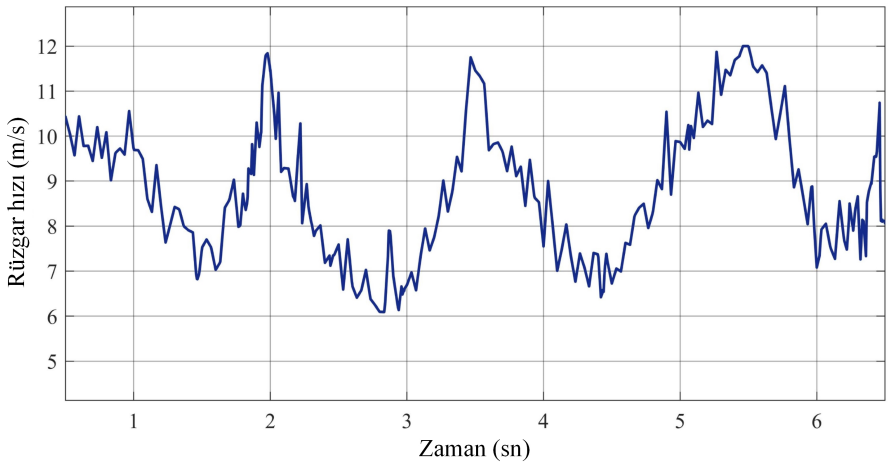
Ayrıca kontrol sistemlerinde yaygınca kullanılan IAE, ISE ve ITAE performans indislerine ilişkin sonuçlar Çizelge 4.14'de aktarılmakta olup G-KKK'a kıyasla İD-HTKKK ile daha minimal hata toplamlarına ulaşılmıştır.

Çizelge 4.14. Senaryo I için kontrolörlerin performans indislerine göre karşılaştırılması

Kontrolör	IAE	ISE	ITAE
G-KKK temelli	11.37	41.5	36.08
İD-HTKKK temelli	**3.509**	**3.848**	**11.39**

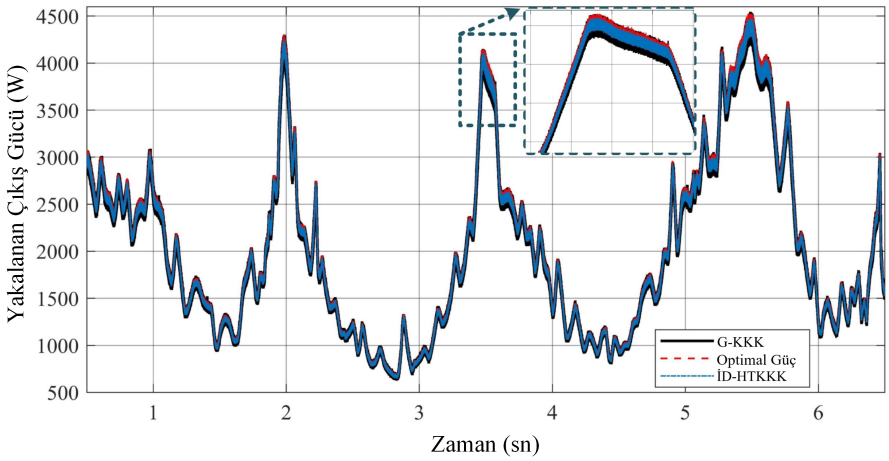
4.4.2.2. Test senaryosu II

Aynı rüzgar hızı aralığında güçlüce rastgele değişimleri içeren rüzgar hızı profili, ikinci senaryo için tasarlanarak Şekil 4.47'deki gibi gösterilmektedir.

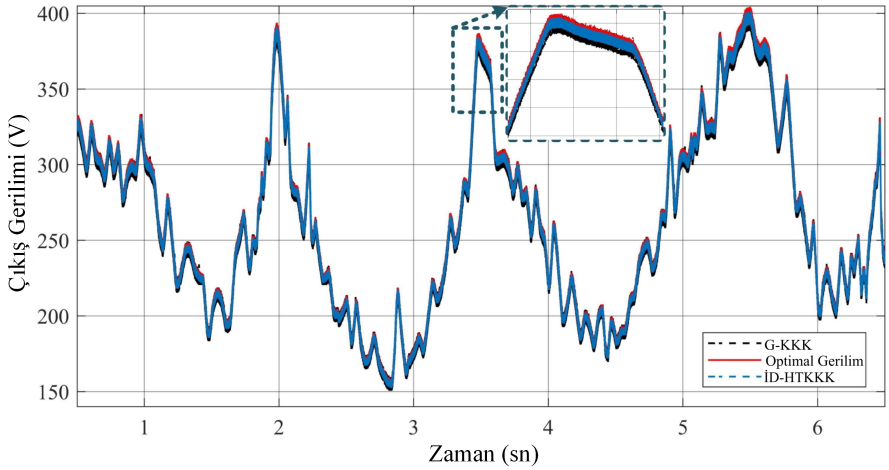


Şekil 4.47. Senaryo II için rüzgar hızı değişimi

Bu rüzgar hızı profili altında; yakalanan çıkış gücü ve dönüştürücü çıkışında yüke transfer edilen gerilimin değişimleri sırasıyla Şekil 4.48 ve 4.49'da sunulmaktadır.



Şekil 4.48. Senaryo II için yakalanan çıkış gücünün değişimi



Şekil 4.49. Senaryo II için çıkış geriliminin değişimi

Bu iki şekilden görülebileceği üzere; İD-HTKKK temelli kontrolör, güç ve gerilimi optimal değerine oldukça yakın takip ettirmektedir. Bunun yanı sıra her iki kontrolör için simülasyon periyodu boyunca yakalanan ortalama güç ve verim açısından elde edilen veriler Çizelge 4.15'e eklenmiştir.

Çizelge 4.15. Senaryo II için kontrolörlerin güç ve verim açısından karşılaştırılması

Kontrolör	Ortalama Mevcut Güç (W)	Ortalama Güç (W)	Verim (%)
G-KKK temelli	**2011**	1996	99.254
İD-HTKKK temelli		**2008**	**99.851**

Diğer bir taraftan ise, performans indislerine göre kontrolörlerin karşılaştırılması Çizelge 4.16'daki gibi yapılmakta olup önceki test senaryosuna benzerce yorumlanabilmektedir.

Çizelge 4.16. Senaryo I için kontrolörlerin performans indislerine göre karşılaştırılması

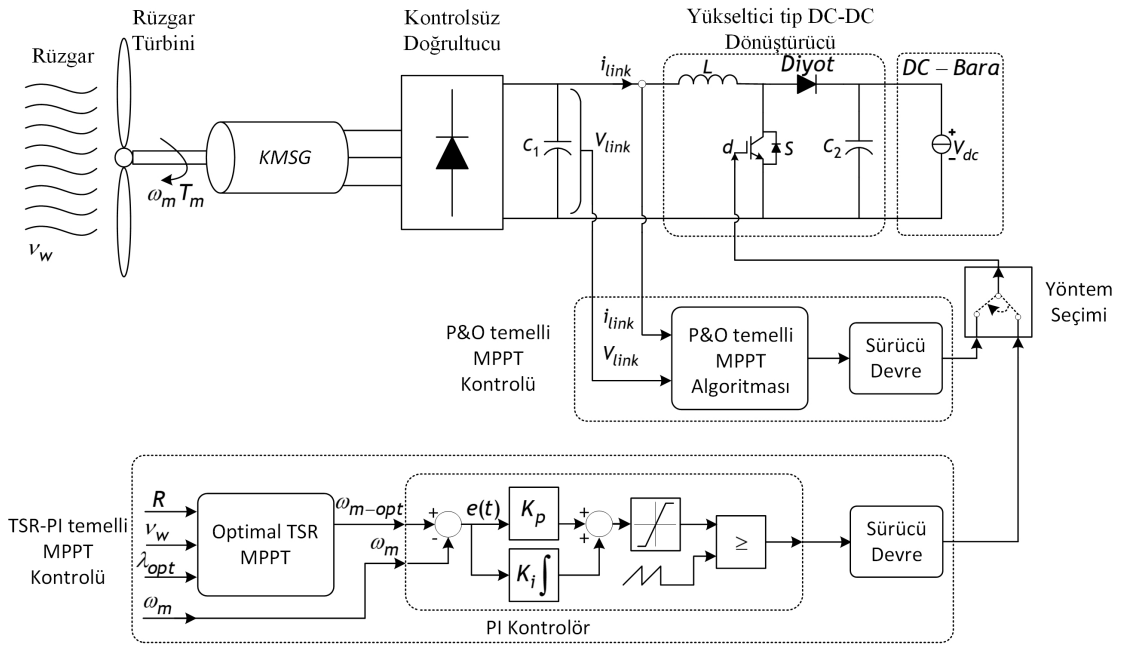
Kontrolör	IAE	ISE	ITAE
G-KKK temelli	12.32	40.40	43.76
İD-HTKKK temelli	**3.575**	**3.341**	**12.81**

4.5. DC-Bara Besleyen KMSG Temelli REDS için MPPT Kontrolü

Bu kısımda yapılan çalışma, MPPT sağlanarak DC mikro şebekenin KMSG temelli REDS üzerinden beslenmesine yani DC-Bara beslemesinin yapılması üzerinedir. MPPT kontrolü hem P&O temelli hem de TSR-PI temelli olarak gerçekleştirilmekte olup, rastgele değişim içeren rüzgar hızı senaryosu için test edilmektedir. Elde edilen sonuçlar; grafikler ve nümerik veriler üzerinden yorumlanmaktadır.

4.5.1. Sistem konfigürasyonu

Burada DC-Baraya maksimum gücün aktarılması amacıyla düşünülen REDS konfigürasyonunun yapısı aşağıdaki gibi oluşturulmaktadır.



Şekil 4.50. REDS konfigürasyon şeması

Diğer taraftan, kullanılan KMSG generatör ve yükseltici tip DC-DC dönüştürücü için parametrik veriler Çizelge 4.17'de verildiği gibidir.

Çizelge 4.17. KMSG ve DC-DC dönüştürücü için parametrik veriler

KMSG		DC-DC dönüştürücü	
Parametre Tanımı	Değeri	Parametre Tanımı	Değeri
Faz sayısı	3	Anahtarlama frekansı	10 kHz
Rotor tipi	Silindirik	İndüktör	35 mH
Stator faz direnci	1.95 Ω	Kapasitör	550 µF
Endüvi endüktansı	0.00190 H	İndüktör direnci	0.002 Ω
Gerilim sabiti	1697	Kapasitör direnci ESR	0.03 Ω
Atalet momenti	1 (kg.m^2)		
Viskoz sönümleme	0.0243 (N.m.s)		
Kutup çifti sayısı	15		
Nominal Hız	200 (rpm)		

4.5.2. Kullanılan MPPT metotları

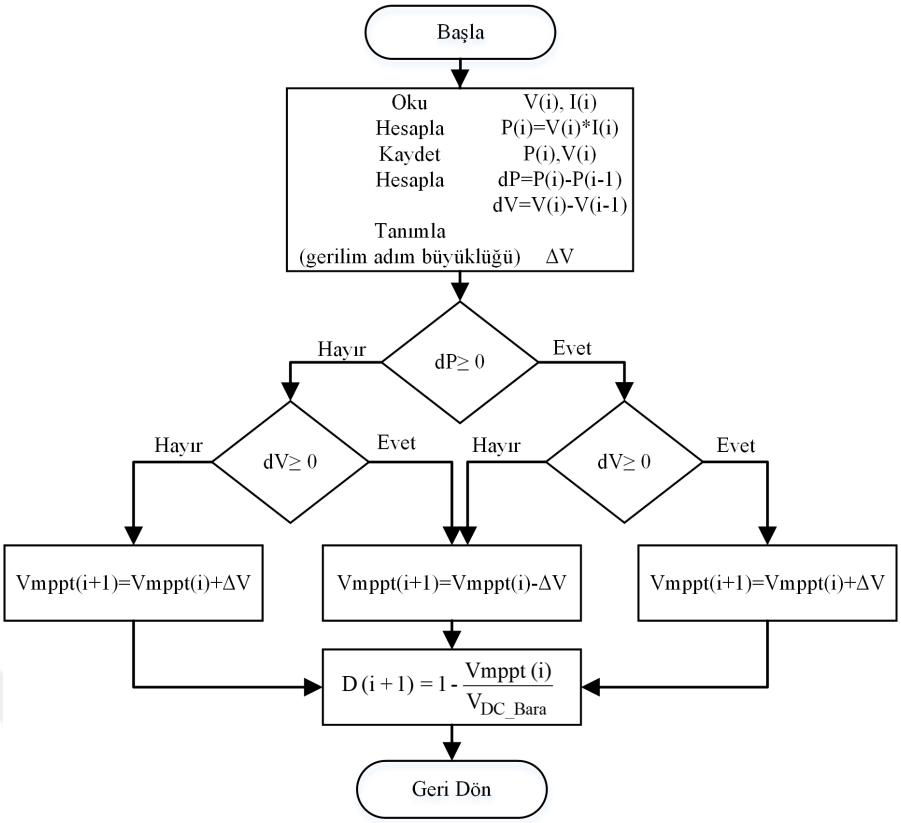
Bu kısımda, TSR-PI ve P&O üzerine temellendirilen iki farklı yaklaşım ile MPPT kontrolünün gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

4.5.2.1. TSR-PI temelli MPPT kontrolü

Bu tasarım; Eşitlik (3.24)'teki formülasyondan yararlanarak optimum generatör çalışma hızı ω_{opt}'in belirlenmesinde TSR yöntemini kullanırken, bu belirlenen noktaya ulaşılmasında kontrolör olarak da PI (oransal-integral) yapısını kullanmaktadır. PI kontrolör çıkışında bir sınırlayıcı kullanıldıktan sonra testere dişi bir sinyal ile karşılaştırma yapılarak, dönüştürücü çalışma oranının eldesi gerçekleştirilir. Ardından, uygun bir frekansta anahtarlama palsleri sürücü devre aracılığıyla dönüştürücünün anahtarlama kapısı üzerinden sisteme aktarılır. PI kontrolörün parametrik katsayıları K_p ve K_i'nin optimum olarak belirlenmesi performansı etkileyeceğinden dikkatle seçilmelidir.

4.5.2.2. P&O temelli MPPT kontrolü

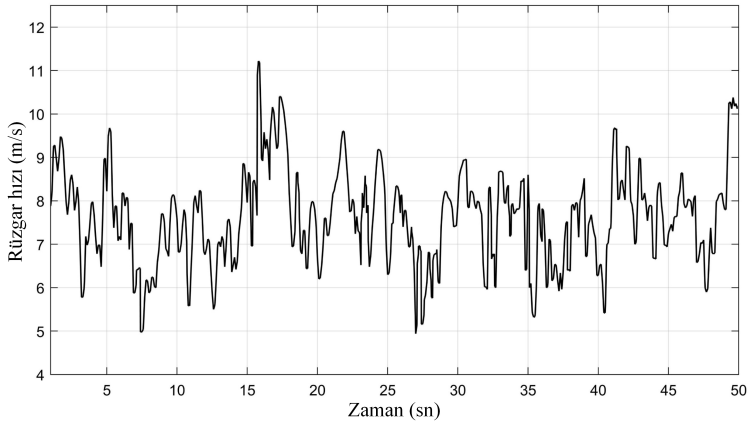
P&O algoritmalarından bilindiği üzere, tepe araması gerçekleştirilirken değiştirilen referans bilgi generatör hızı, gerilim/akım ve dönüştürücü çalışma oranı olabilmektedir. Burada değiştirilen referans olarak dönüştürücü giriş gerilimi alınmakta olup gözlenen bilgi ise, yakalanan güçteki değişim olarak düşünülmüştür. Algoritmanın akış şeması Şekil 4.51'deki gibi verilmektedir.



Şekil 4.51. P&O temelli MPPT için akış şeması (Zammit ve ark., 2018)

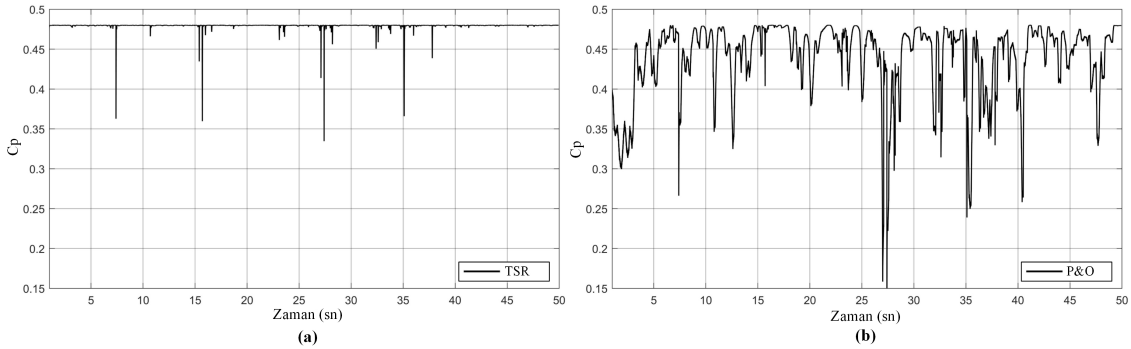
4.5.3. Simülasyon ortamındaki testler ve karşılaştırmalar

Bu kısımda, ani değişimler içeren rüzgar hızı profili Sitharthan ve ark. (2020) çalışmasındaki ortalama rüzgar hızı modeline benzerce 50 saniyelik periyot için ortalama hızı yaklaşık olarak 8 m/s düşünülerek oluşturulmakta olup, Şekil 4.52'deki gibi gösterilmektedir.



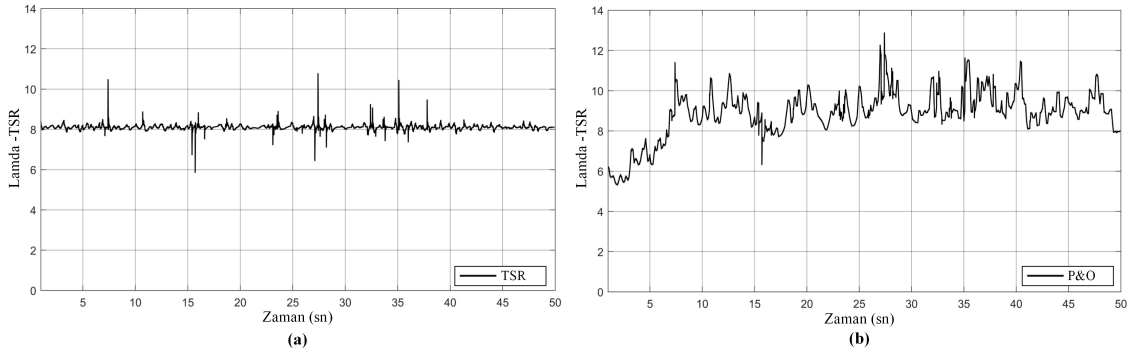
Şekil 4.52. Rastgele rüzgar hızı profili

Bu rüzgar hızı profili altında, her iki yöntem için C_P eğrilerinin değişimi Şekil 4.53 (a) ve (b)'deki gibi olmaktadır. Burada, TSR temelli yaklaşım ile çalışma periyodu boyunca daha az dalgalanma ile C_P'nin 0.48'de tutulduğu görülebilmektedir. Ancak, belirli zamanlarda diğer yöntem için C_P değerlerinde önemli ölçüde düşüşlerin oluştuğu yani rüzgar hızı değişimlerine çok fazla adapte olamadığı anlaşılmaktadır.

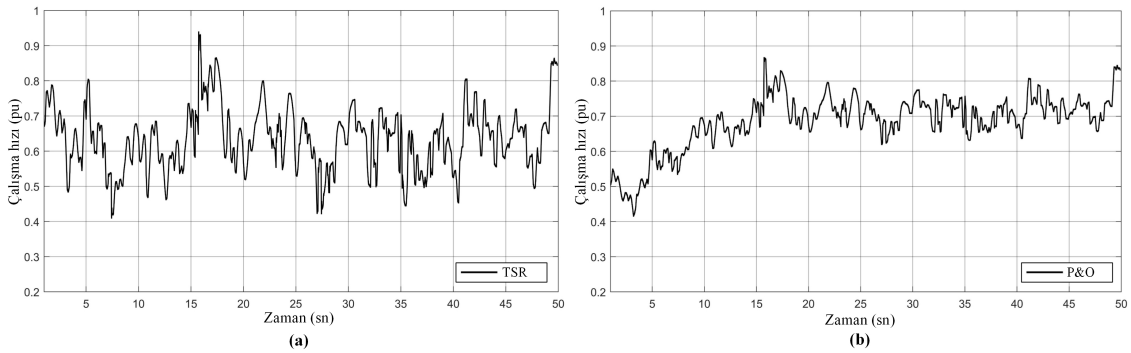


Şekil 4.53. a) TSR- PI temelli MPPT ile C_P değişimi, **b)** P&O temelli MPPT ile C_P değişimi

Bir diğer taraftan TSR- λ değişimleri Şekil 4.54 (a) ve (b)'den gözlemlendiğinde, TSR yönteminin gereği olarak optimal değeri 8.1'de genellikle tutulduğu anlaşılırken, diğer yöntemde daha geniş bir aralığa yayılmıştır. Başka bir açıdan, generatör rotor çalışma hızlarının değişimi ise Şekil 4.55 (a) ve (b)'deki gibi olmaktadır.

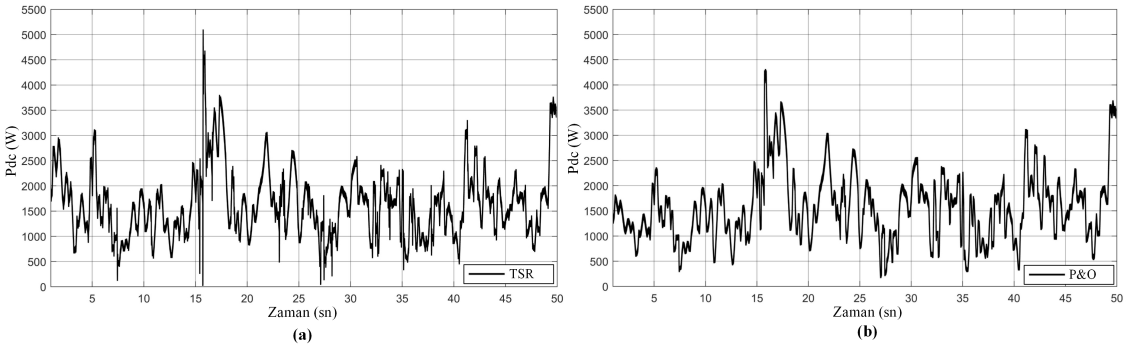


Şekil 4.54 a) TSR- PI temelli MPPT ile *TSR-λ* değişimi, **b)** P&O temelli MPPT ile *TSR-λ* değişimi



Şekil 4.55. a) TSR- PI temelli MPPT ile çalışma hızının değişimi, **b)** P&O temelli MPPT ile çalışma hızının değişimi

DC-Baraya enjekte edilen güçlerin yöntemlere göre değişimi, aşağıdaki gibi olup, bazı noktalar için TSR temelli yaklaşımla daha yüksek güçlere ulaşılabildiği bu senaryo için anlaşılmaktadır.



Şekil 4.56. a) TSR- PI temelli MPPT ile enjekte edilen gücün değişimi, **b)** P&O temelli MPPT ile enjekte edilen gücün değişimi

Yakalanarak enjekte edilen ortalama güç ve toplam enerji açısından elde edilen sonuçlar Çizelge 4.18'de listelenmektedir. Bu sonuçlardan da, bahsi geçen senaryo altında, TSR-PI temelli yaklaşımın daha yüksek güç enjekte edebildiği, diğer yöntemin ise rüzgar hız değişimlerine uyum sağlamada bir miktar başarısız olabildiği anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.18. MPPT yaklaşımlarının toplam enerji ve ortalama güce göre karşılaştırılması

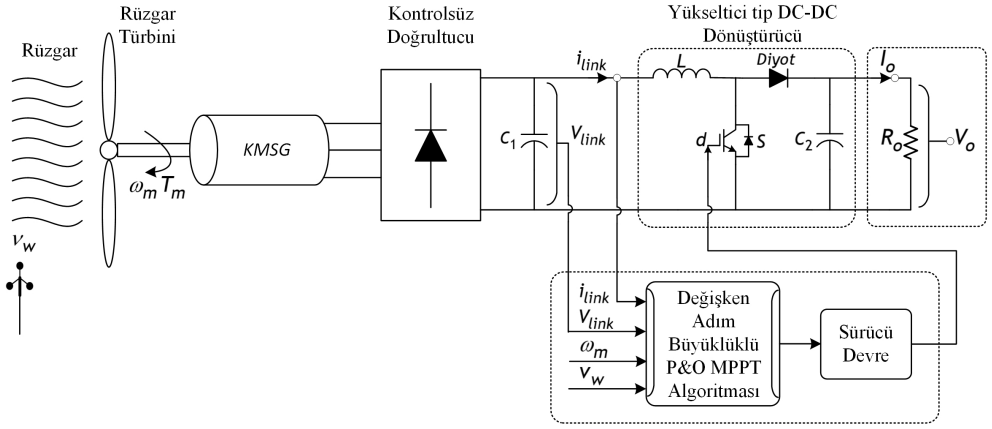
MPPT yöntemi	Toplam enerji (W.s=J)	Ortalama güç (W)
TSR-PI temelli	≈ 80419	≈ 1641.2
P&O temelli	≈ 76783	≈ 1567

4.6. Değişken Adım Büyüklüklü P&O Metodu ile MPPT Kontrolü

Bu kısımda geleneksel P&O metodundan bir kısım farklılıklar eşliğinde oluşturulan, değişken adım büyüklüklü P&O algoritmik yapısı ile KMSG temelli REDS için MPPT kontrolünün gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Basamak değişimleri içeren bir rüzgar hızı profili tasarlanarak, kullanılan yaklaşım test edilmektedir. Buradaki senaryo eşliğinde elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

4.6.1. Sistem konfigürasyonu

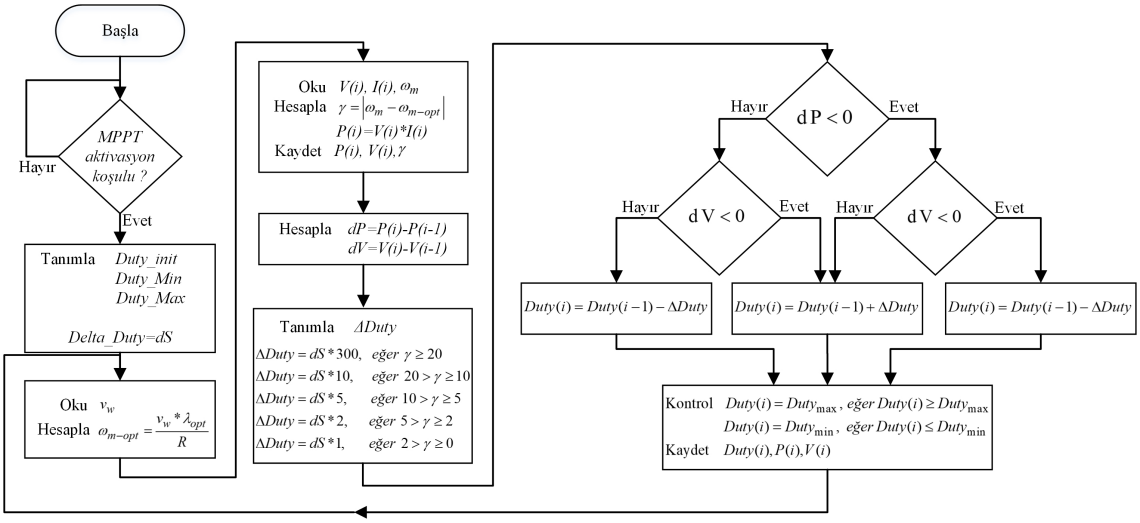
Burada değişken adım büyüklüklü P&O temelli MPPT kontrolü gerçekleştirilen KMSG'li REDS için tasarlanan sistem konfigürasyonu Şekil 4.57'de gösterilmektedir.



Şekil 4.57. Değişken adım büyüklüklü P&O temelli MPPT'li REDS'nin konfigürasyon şeması (Dursun ve Kulaksiz, 2019)

4.6.2. Değişken adım büyüklüklü P&O

Burada bahsedilen algoritmanın akış şeması Şekil 4.58'de verilmiştir. Akış şeması incelendiğinde, MPPT çalışmasının aktive edileceği gerekliliğin yerine getirilmesi beklenmektedir. Bu koşul sağlandıktan sonrasında çalışma oranına ilişkin başlangıç - sınır değerler ve adım büyüklüğü için bir *dS* oranı tanımlanması öncelikle gerçekleştirilir. Daha sonra, rüzgar hız bilgisinin kullanılmasıyla ω_{opt} hesap edilip V_{in}, I_{in} ve ω_m verileri okunur. Eldeki bilgiler eşliğinde anlık güç P_{in} ve hız değişimi için tanımlanan γ sırasıyla hesap edilmektedir. Sonrasında, bir önceki çalışma bilgisine ilişkin olarak güçteki ve gerilimdeki değişim miktarı hesaplanır ve γ miktarına bağlı olarak değişken adım büyüklüğü belirlenir. Buradan itibaren geleneksel P&O işlem akışı sürdürülür.

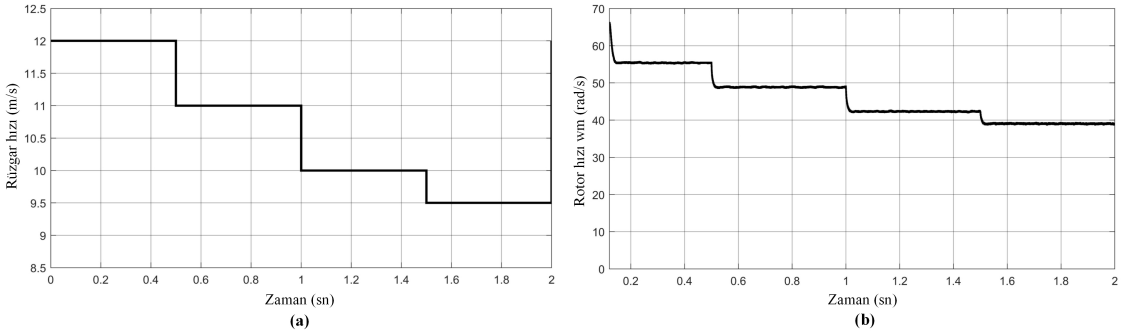


Şekil 4.58. Değişken adım büyüklüklü P&O temelli algoritmanın akış şeması (Dursun ve Kulaksiz, 2019)

4.6.3. Simülasyon sonuçları

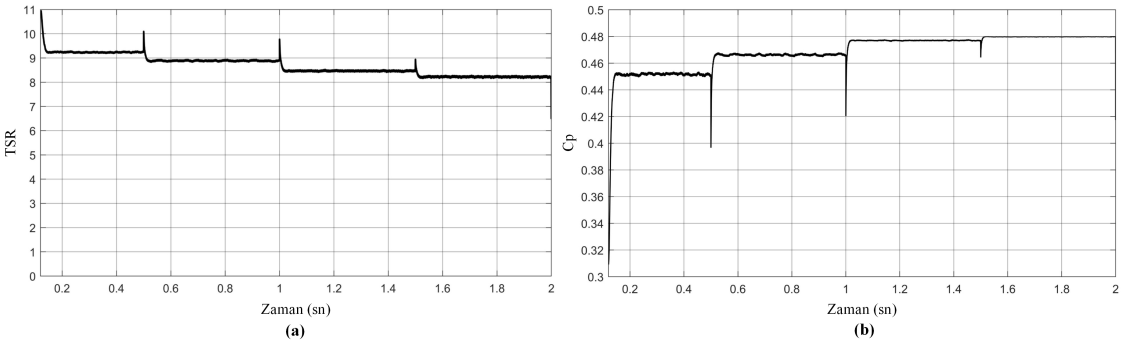
Bu kısımda, Şekil 4.59 (a)'da verilen 9.5 m/s ile 12 m/s arasında basamak değişimleri içeren rüzgar hızı profili için algoritma test edilmekte olup; rotor hızı, TSR, C_P, dönüştürücü giriş ve çıkış gerilimleri ve ayrıca yük üzerine aktarılan akım ve gücün zamana göre değişimleri analiz edilmiştir.

Algoritmada belirtilen MPPT'yi devreye alma zamanı olarak 0.12 sn belirlenmiş olup, test senaryosu altında rotor hızındaki değişim Şekil 4.59 (b)'deki gibi olmaktadır.



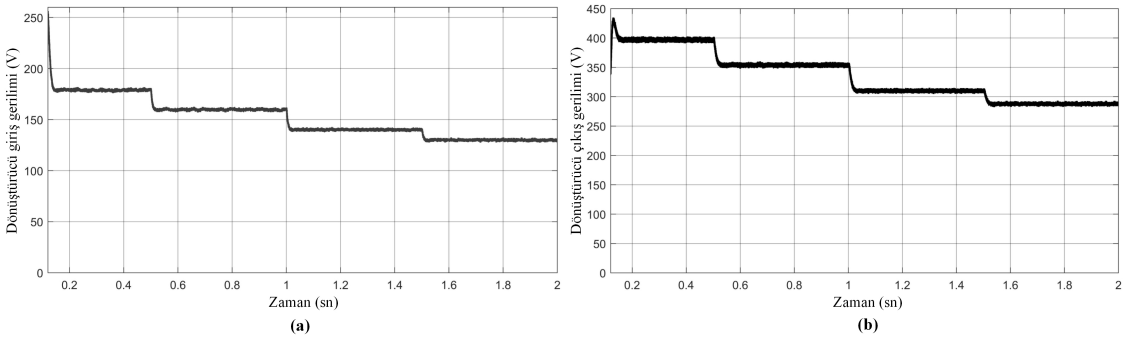
Şekil 4.59. a) Rüzgar hızı profili, **b)** Rotor hızının değişimi

Bu çalışmaya istinaden TSR ve C_P için değişimler Şekil 4.60 (a) ve (b)'de sırasıyla sunulmaktadır. Görülebileceği üzere, sürekli hal için C_P 0.45-0.48 bandında değişim göstermektedir.

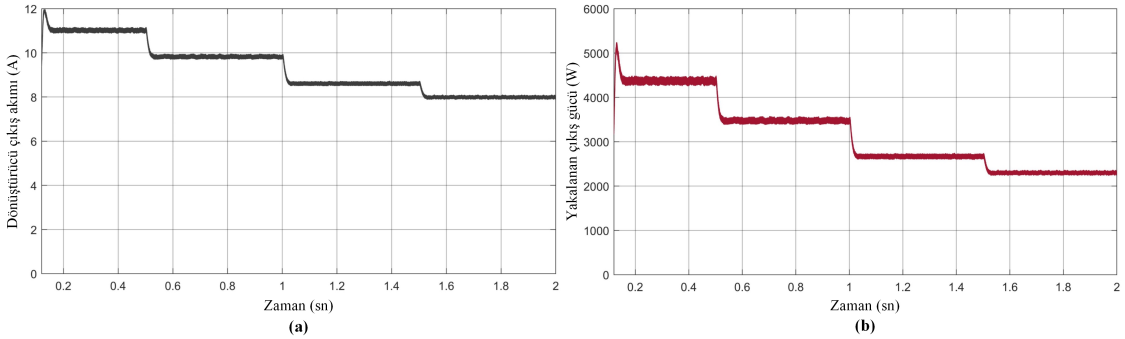


Şekil 4.60. a) TSR değerlerinin değişimi, **b)** C_P değerlerinin değişimi

Diğer taraftan dönüştürücü giriş ve çıkış gerilimlerinin değişimi ise Şekil 4.61 (a) ve (b)'deki gibidir. Aynı zamanda dönüştürücü çıkışında yüke aktarılan akımın değişimi Şekil 4.62 (a)'da ve yakalanarak yüke aktarılan çıkış gücünün değişimi ise Şekil 4.62 (b)'deki gibi sunulmaktadır. Anlaşılabileceği gibi, yaklaşık olarak 2300 W – 4350 W aralığında güç yakalama gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.61. a) Dönüştürücü giriş geriliminin değişimi, **b)** Dönüştürücü çıkış geriliminin değişimi



Şekil 4.62. a) Dönüştürücü çıkış akımının değişimi, **b)** Yakalanan çıkış gücünün değişimi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Dünya nüfusunun artması ve teknolojik gelişmelere eşlik eden sanayileşmenin ilerlemesiyle enerji ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır. Ancak bu ihtiyacın karşılanmasında başlıca kullanılan geleneksel tabanlı enerji kaynakları üzerine kaygıların bulunduğu ve çevreye zarar verdiği bilinmektedir. Bu noktada yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimine katkı sağlaması bir çözüm niteliği oluşturabildiğinden önem arz eden bir konudur. Ayrıca son yıllarda, güneş ve rüzgar enerjisi tabanlı güç üretim sistemlerinin kullanımı üzerine ilginin de bulunduğu, literatür çalışmalarının yanı sıra endüstriyel yatırımlar ve uygulamalardan da görülmüştür. Güç üretiminde rüzgar enerjisinin kullanımının ise avantajlarından dolayı ilerleyen zamanlarda, en uygun maliyet-güç oranına sahip olacağı da düşünülmektedir. Bu sebeplerden dolayı verimlilik açısından rüzgardan daha fazla yararlanılması amacıyla maksimum gücün yakalanmasında MPPT kontrolü en çok önem arz eden araştırma konularından birisidir. Bu sebeplerden dolayı bu tezin başlıca kapsamını etkin bir MPPT kontrolünün sağlanması üzerine araştırmalar ve çalışmalar oluşturmaktadır.

Bu tez kapsamında, ilk olarak rüzgar enerjisi, rüzgar enerjisinin kurulu güç kapasitesi üzerine güncel durumlar ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre kurulu güçler açısından bilgilere yer verilmiştir. Daha sonra, rüzgar türbinleri ve çeşitlerine değinerek, modern REDS'lerin konfigürasyon yapıları irdelenmiştir. Güç dönüştürücü topolojileri kendi aralarında kıyaslandığında; peş-peşe dönüştürücü yapısının büyük ölçekli şebeke bağlantılı uygulamalar için avantaj sunduğu diğer yandan verim ve maliyet odak noktası olan küçük ölçekli uygulamalarda ise doğrultucu ve DC-DC dönüştürücülü topolojilerin tercih sebebi olduğu görülmüştür. Generatörler bakımından ise ÇBAG'lerin rüzgar çiftliği gibi büyük ölçekli uygulamalarda daha çok yer bulduğu görülebiliyorken, küçük ve orta ölçekli uygulamalarda KMSG'nin daha avantajlı bulunduğu tespit edilebilmektedir. Ayrıca, çalışma hızı açısından REDS'ler incelendiğinde de; sabit hızlı çalışmanın dar bir rüzgar hızı bandında gerçekleştirilebildiği, ancak MPPT çalışmanın da eşliğinde değişken hızlı çalışmanın farklı zaman dilimleri için var olan farklı rüzgar hızlarında geniş bir rüzgar hızı bandında işletilebildiği anlaşılmaktadır. REDS'lerden maksimum gücün elde edilmesi üzerine MPPT kontrolünün gerçekleştirilişi konusu hem MPPT algoritmaları hem de

MPPT kontrolörleri bakımından detaylı olarak irdelenmektedir. Dahası bu noktada maksimum gücün yakalanabileceği çalışma noktasının daha doğru ve daha kesin şekilde tespit edilmesinde optimizasyon yöntemlerinin MPPT metotlarına entegrasyonu üzerine de çalışılmıştır.

Bu tez çalışmasında, bahsi geçen sebeplerden dolayı küçük ölçekli AC şebeke bağlantısız bir tasarım anlayışı benimsenerek, kontrolsüz doğrultucu ve yükseltici tip DC-DC dönüştürücülü güç dönüşüm topolojisini içeren KMSG'li DH-REDS üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. MPPT algoritmaları ve kontrolörlerinin performanslarının test edilmesi amacıyla, simülasyon çalışmaları için çeşitli tiplerde rüzgar hızı değişimlerini içeren senaryolar da tasarlanmıştır. Dahası bu açıdan teorik esaslarıyla çeşitli analizlere de yer verilmiştir. Ek olarak, REDS sisteminin çalışmasına ilişkin bazı analizlerin yanı sıra doğrusal olmayan yük koşulları için sistem çalışma performansının ve tasarlanan yapının etkinliği de değerlendirilmiştir.

MPPT algoritmaları üzerine gerçekleştirilen bu tezde; sabit ve değişken adımlı P&O, TSR, PSF, ORB yöntemlerinin yanı sıra, Kaotik-PSO türevlerinden olan CDW-PSO ve GM-CPSO optimizasyon yöntemlerinin ayrı ayrı ORB MPPT yöntemi ile hibritleştirilmesiyle oluşturulan yaklaşıma da yer verilmiştir. Ayrıca, yakalanan güçler başlıca olmak üzere performans kriterleri bakımından da yöntemlerin birbirleriyle karşılaştırmaları sunulmuştur.

MPPT kontrolörleri bakımından ise, doğrusal olmayan kontrol tekniklerinden KKK temelli çeşitli kontrolör tasarımlarına yer verilmiştir. Bu noktada tasarlanan G-KKK, HT-KKK, İD-KKK ve İD-HTKKK temelli kontrolörler için optimum referans çalışma noktasına ulaşma durumları, bu nokta etrafındaki dalgalılık ve sürekli hal hatası ve izleme hatalarının değişimi gibi kriterler bakımından karşılaştırılmış ve değerlendirmeler yapılmıştır. Bu bağlamda, İD-KKK ve İD-HTKKK temeli üzerine gerçekleştirilen kontrolör tasarımlarıyla G-KKK temelli tasarıma nazaran daha etkin sonuçlara ulaşılabildiği de görülmüştür. Bunlara ek olarak kontrolörler için kararlılık kriterleri de teorik esaslarıyla göz önüne alınmıştır.

Diğer taraftan literatürde yapılan çalışmalardan daha farklı bir bakış açısı benimsenerek tümleşik bir maksimum elektriksel güç yakalama çerçevesinin tasarımı bu tez kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu noktada, optimizasyon yöntemlerinin yaygınca PID (oransal-integral-türev) gibi kontrolör yapılarındaki parametrik katsayıların en uygunca belirlenmesinde kullanıldığı bilinirken, bu çalışmada bundan ziyade MPPT algoritmasıyla tercih edilen optimizasyon yöntemlerinin hibritleştirilmesi

bir farklı düşünceyi oluşturabilmektedir. Bu çalışma içerisinde yukarıda bahsedildiği gibi hibrit MPPT yaklaşımı HT-KKK ile de desteklenmiştir. Bu tümleşik yapı ile hem daha doğru ve kesin olarak optimum çalışma noktalarının belirlenmesi sağlanmış hem de dayanıklı ve hızlı tepki veren etkin bir kontrol gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada optimizasyon çevrimdışı bir süreç iken MPPT çalışma ise tamamen çevrimiçi bir süreci oluşturmaktadır. Bu yüzden uygulamalarda önemli bir işlem yükünü de açığa çıkarmaz. Ayrıca, bu çerçevenin göreceli olarak basit bir tasarım ilkesini benimsemesinden dolayı sistem parametrelerinin bilinemediği gerçek REDS'ler için de kolayca uyarlanabilir olduğu da düşünülmektedir.

5.2 Öneriler

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen tüm çalışmalar küçük ölçekli KMSG temelli DH-REDS üzerinde incelenmiştir. Ancak büyük ölçekli REDS yapıları için araştırmalar ve testler de gerçekleştirilebilir.

Diğer taraftan her geçen gün MPPT algoritmaları ve MPPT kontrolörleri üzerine güncel yeni tasarımlar literatüre eklenmektedir. Bu noktada uyarlanmamış teknikler üzerine araştırmaların yapılması ve verimlilik açısından daha tatminkar sonuçlar üretebilen hibrit yapıların oluşturulması üzerine de çalışılabilir. Ayrıca çeşitli kontrolör tasarımlarının bu yapılar içerisine dahil edilmesi üzerine araştırmalar yapılabilir. Daha etkin bir performans elde etmek gayesiyle, tasarlanan kontrolörlerin parametrelerinin optimizasyon teknikleriyle optimum olarak belirlenmesi konusunda güncel optimizasyon teknikleri denenip test edilebilir.

Bu tez dahilinde oluşturulan tasarımların geçerliliği simülasyon ortamında sağlanmıştır. Ancak uygun deneysel test düzeneklerinin oluşturulması ile bu teknikler gerçek zamanlı olarak araştırılıp performans değerlendirmeleri de yapılabilir.

Bunlara ilaveten, REDS'lerden rüzgar hızının ölçülmesi yerine belirli parametreler üzerinden değerlendirmeler ve çıkarımlar yapılarak rüzgar hızının kestirimi sağlanabilir. Bu noktada regresyon tabanlı yapılar veya tam değer kestirimi yapabilen hibrit yaklaşımlar araştırılabilir.

Son olarak da, büyük ölçekli aktif kanat açı kontrollü şebeke bağlantılı REDS'ler için güç kontrolünde; kanat açılarının düzenlenmesi konusunda doğrusal olmayan gelişmiş kontrol tekniklerinden yararlanılabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Abdullah, M. A., Al-Hadhrami, T., Tan, C. W. ve Yatim, A. H., 2018, Towards Green Energy for Smart Cities: Particle Swarm Optimization Based MPPT Approach, *IEEE Access*, 6, 58427-58438.

Abolvafaei, M. ve Ganjefar, S., 2019, Maximum power extraction from a wind turbine using second-order fast terminal sliding mode control, *Renewable Energy*, 139, 1437-1446.

Ackermann, T., 2005, Wind power in power systems, John Wiley & Sons, p. 742.

Al-Toma, A. S. H., 2017, Hybrid control schemes for permanent magnet synchronous generator wind turbines, *Brunel University London*.

Alsmadi, Y., 2015, Modeling, Advance Control, and Grid Integration of Large-Scale DFIG-based Wind Turbines During Normal and Fault Ride-Through Conditions, Doctor of Philosophy, *The Ohio State University*, ProQuest LLC., 413.

Alsumiri, M., 2015, Sliding mode control of renewable energy generation systems, Ph.D. thesis, *University of Liverpool*, 177.

Altin, N. ve Eyimaya, S. E., 2018, A Combined Energy Management Algorithm for Wind Turbine/Battery Hybrid System, *Journal of Electronic Materials*, 47 (8), 4430-4436.

Aner, M., 2014, Improved MPPT Dynamics for Starting and Power Extraction of a Small Wind Turbine Employing a PMSG and a VSMC.

Anonymous, 2020, List of most powerful wind turbines, https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_most_powerful_wind_turbines: [30.05.2020].

Asghar, A. B. ve Liu, X., 2018, Adaptive neuro-fuzzy algorithm to estimate effective wind speed and optimal rotor speed for variable-speed wind turbine, *Neurocomputing*, 272, 495-504.

Ayadi, M., Salem, F. B. ve Derbel, N., 2015, Sliding mode approach for blade pitch angle control wind turbine using PMSG under DTC, *2015 16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, 758-762.

Ayadi, M. ve Derbel, N., 2017, Nonlinear adaptive backstepping control for variable-speed wind energy conversion system-based permanent magnet synchronous generator, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92 (1), 39-46.

Aydoğdu, Ö. ve Akkaya, R., 2011, An effective real coded GA based fuzzy controller for speed control of a BLDC motor without speed sensor, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 19 (3), 413-430.

Bajestan, M. M., Madadi, H. ve Shamsinejad, M. A., 2019, Control of a new stand-alone wind turbine-based variable speed permanent magnet synchronous generator using quasi-Z-source inverter, *Electric Power Systems Research*, 177, 106010.

Bang, D., 2010, Design of Transverse Flux Permanent Magnet Machines for Large Direct-Drive Wind Turbines.

Barakati, S. M., Kazerani, M. ve Aplevich, J. D., 2009, Maximum Power Tracking Control for a Wind Turbine System Including a Matrix Converter, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24 (3), 705-713.

Başkaya, A., 2018, Design of a modular, axial-flux direct drive permanent magnet generator for wind turbines, Master of Science, *Middle East Technical University*, Ankara, 176.

Beltran, B., Benbouzid, M. E. H. ve Ahmed-Ali, T., 2012, Second-Order Sliding Mode Control of a Doubly Fed Induction Generator Driven Wind Turbine, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27 (2), 261-269.

Blaabjerg, F., Liserre, M. ve Ma, K., 2012, Power Electronics Converters for Wind Turbine Systems, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48 (2), 708-719.

Bonfiglio, A., Delfino, F., Gonzalez-Longatt, F. ve Procopio, R., 2017, Steady-state assessments of PMSGs in wind generating units, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 90, 87-93.

Chen, J., Lin, T., Wen, C. ve Song, Y., 2016, Design of a Unified Power Controller for Variable-Speed Fixed-Pitch Wind Energy Conversion System, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63 (8), 4899-4908.

Chen, K., Zhou, F. ve Liu, A., 2018, Chaotic dynamic weight particle swarm optimization for numerical function optimization, *Knowledge-Based Systems*, 139, 23-40.

Chen, Z., Guerrero, J. M. ve Blaabjerg, F., 2009, A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24 (8), 1859-1875.

Chiang, M.-H., 2011, A novel pitch control system for a wind turbine driven by a variable-speed pump-controlled hydraulic servo system, *Mechatronics*, 21 (4), 753-761.

Chiu, C.-S., 2012, Derivative and integral terminal sliding mode control for a class of MIMO nonlinear systems, *Automatica*, 48 (2), 316-326.

Choi, J. W., Heo, S. Y. ve Kim, M. K., 2016, Hybrid operation strategy of wind energy storage system for power grid frequency regulation, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10 (3), 736-749.

Colombo, L., Corradini, M. L., Ippoliti, G. ve Orlando, G., 2020, Pitch angle control of a wind turbine operating above the rated wind speed: A sliding mode control approach, *ISA Transactions*, 96, 95-102.

Dahbi, A., Nait-Said, N. ve 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*, 41 (22), 9427-9442.

Dalala, Z. M., Zahid, Z. U., Yu, W., Cho, Y. ve Lai, J., 2013, Design and Analysis of an MPPT Technique for Small-Scale Wind Energy Conversion Systems, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 28 (3), 756-767.

Das, S. ve Subudhi, B., 2018, A H∞ Robust Active and Reactive Power Control Scheme for a PMSG-Based Wind Energy Conversion System, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33 (3), 980-990.

DNW GL, C., 2019, Development of wind turbine sizes, https://www.dnvgl.com/expert-story/maritime-impact/Offshore-wind-power-expands-globally.html: [30.05.2020].

Durdu, A. ve Dursun, E. H., 2019, Sliding Mode Control for Position Tracking of Servo System with a Variable Loaded DC Motor, *Elektronika ir Elektrotechnika*, 25 (4).

Dursun, E. H. ve Kulaksiz, A. A., 2019, Maximum Power Extraction from PMSG based VS-WECS by using Variable Step-Size P&O Method, *2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, 1-5.

Dursun, E. H., Koyuncu, H. ve Kulaksiz, A. A., 2020, A novel unified maximum power extraction framework for PMSG based WECS using chaotic particle swarm optimization derivatives, *Engineering Science and Technology, an International Journal*.

Dursun, E. H. ve Kulaksiz, A. A., 2020a, Second-Order Fast Terminal Sliding Mode Control for MPPT of PMSG-based Wind Energy Conversion System, *Elektronika ir Elektrotechnika*, 26 (4), 39-45.

Dursun, E. H. ve Kulaksiz, A. A., 2020b, Second-order sliding mode voltage-regulator for improving MPPT efficiency of PMSG-based WECS, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 121, 106149.

Earnest, J. ve Rachel, S., 2019, Wind power technology, *Delhi-110092*, PHI Learning Pvt. Ltd., p. 496.

Eberhart, R. ve Kennedy, J., 1995, A new optimizer using particle swarm theory, *MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 39-43.

Edwards, C. ve Spurgeon, S., 1998, Sliding mode control: theory and applications, Crc Press, p.

Eker, İ., 2010, Second-order sliding mode control with experimental application, *ISA Transactions*, 49 (3), 394-405.

Eriksson, S., Bernhoff, H. ve Leijon, M., 2008, Evaluation of different turbine concepts for wind power, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12 (5), 1419-1434.

Fathabadi, H., 2017, Novel Maximum Electrical and Mechanical Power Tracking Controllers for Wind Energy Conversion Systems, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 5 (4), 1739-1745.

GE Renewable Energy, 2020, Haliade-X 12 MW offshore wind turbine platform, https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine: [30.05.2020].

Goudarzi, N. ve Zhu, W. D., 2013, A review on the development of wind turbine generators across the world, *International Journal of Dynamics and Control*, 1 (2), 192-202.

GWEC, 2019, Annual Global Wind Report 2019, *Global Wind Energy Council*.

Hau, E., 2013, Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics, Springer Science & Business Media, p.

Hossain, M. M. ve Ali, M. H., 2015, Future research directions for the wind turbine generator system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 481-489.

Hu, L., Xue, F., Qin, Z., Shi, J., Qiao, W., Yang, W. ve Yang, T., 2019, Sliding mode extremum seeking control based on improved invasive weed optimization for MPPT in wind energy conversion system, *Applied Energy*, 248, 567-575.

Hui, J. C. Y., Bakhshai, A. ve Jain, P. K., 2015, A Sensorless Adaptive Maximum Power Point Extraction Method With Voltage Feedback Control for Small Wind Turbines in Off-Grid Applications, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3 (3), 817-828.

Hussain, J. ve Mishra, M. K., 2016, Adaptive Maximum Power Point Tracking Control Algorithm for Wind Energy Conversion Systems, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 31 (2), 697-705.

Hyong Sik, K. ve Dylan Dah-Chuan, L., 2010, Wind energy conversion system from electrical perspective—a survey, *Smart Grid and Renewable Energy*, 2010.

Joe, H., Kim, M. ve Yu, S.-c., 2014, Second-order sliding-mode controller for autonomous underwater vehicle in the presence of unknown disturbances, *Nonlinear Dynamics*, 78 (1), 183-196.

Karaarslan, A. ve Iskender, I., 2012, Average sliding control method applied on power factor correction converter for decreasing input current total harmonic distortion using digital signal processor, *IET Power Electronics*, 5 (5), 617-626.

Karaca, H. ve Akkaya, R., 2011, Modelling and simulation of matrix converter under distorted input voltage conditions, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19 (2), 673-684.

Koyuncu, H., 2018, BT görüntülerinden sürrenal lezyonların belirlenmesi ve sınıflandırılması, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 47/150.

Koyuncu, H., 2020, GM-CPSO: A New Viewpoint to Chaotic Particle Swarm Optimization via Gauss Map, *Neural Processing Letters*.

Köse, E., Kizmaz, H., Abaci, K. ve Aksoy, S., 2014, Control of SVC based on the sliding mode control method, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 22 (3), 605-619.

Kulaksiz, A. A. ve Aydoğdu, Ö., 2012, ANN-based maximum power point tracking of photovoltaic system using fuzzy controller, *2012 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications*, 1-5.

Kulaksız, A. A. ve Akkaya, R., 2012, A genetic algorithm optimized ANN-based MPPT algorithm for a stand-alone PV system with induction motor drive, *Solar Energy*, 86 (9), 2366-2375.

Kumar, D. ve Chatterjee, K., 2016, A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 957-970.

Kumar, M. B. H., Saravanan, B., Sanjeevikumar, P. ve Blaabjerg, F., 2018, Review on control techniques and methodologies for maximum power extraction from wind energy systems, *IET Renewable Power Generation*, 12 (14), 1609-1622.

Lee, J. ve Kim, Y., 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*, 10 (2), 194-202.

Levant, A., 2001, Universal single-input-single-output (SISO) sliding-mode controllers with finite-time convergence, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 46 (9), 1447-1451.

Li, H. ve Chen, Z., 2008, Overview of different wind generator systems and their comparisons, *IET Renewable Power Generation*, 2 (2), 123-138.

Lin, W.-M., Hong, C.-M., Ou, T.-C. ve Chiu, T.-M., 2011, Hybrid intelligent control of PMSG wind generation system using pitch angle control with RBFN, *Energy Conversion and Management*, 52 (2), 1244-1251.

Linus, R. M. ve Damodharan, P., 2015, Maximum power point tracking method using a modified perturb and observe algorithm for grid connected wind energy conversion systems, *IET Renewable Power Generation*, 9 (6), 682-689.

Liu, H., Locment, F. ve Sechilariu, M., 2017a, Experimental analysis of impact of maximum power point tracking methods on energy efficiency for small-scale

wind energy conversion system, *IET Renewable Power Generation*, 11 (2), 389-397.

Liu, X., Han, Y. ve Wang, C., 2017b, Second-order sliding mode control for power optimisation of DFIG-based variable speed wind turbine, *IET Renewable Power Generation*, 11 (2), 408-418.

Macaulay, J. ve Zhou, Z., 2018, A fuzzy logical-based variable step size P&O MPPT algorithm for photovoltaic system, *Energies*, 11 (6), 1340.

Madani, N., 2011, Design of a permanent magnet synchronous generator for a vertical axis wind turbine, Master of Science Thesis, Sweden.

Matayoshi, H., Howlader, A. M., Datta, M. ve Senjyu, T., 2018, Control strategy of PMSG based wind energy conversion system under strong wind conditions, *Energy for Sustainable Development*, 45, 211-218.

Melício, R., Mendes, V. M. F. ve Catalão, J. P. S., 2010, Power converter topologies for wind energy conversion systems: Integrated modeling, control strategy and performance simulation, *Renewable Energy*, 35 (10), 2165-2174.

Mihoub, M., Nouri, A. S. ve Abdennour, R. B., 2009, Real-time application of discrete second order sliding mode control to a chemical reactor, *Control Engineering Practice*, 17 (9), 1089-1095.

Mohan, N., Undeland, T. M. ve Robbins, W. P., 2003, Power electronics: converters, applications, and design, John wiley & sons, p. 103-108.

Mokhtari, Y. ve Rekioua, D., 2018, High performance of Maximum Power Point Tracking Using Ant Colony algorithm in wind turbine, *Renewable Energy*, 126, 1055-1063.

Mondal, S. ve Mahanta, C., 2014, Adaptive second order terminal sliding mode controller for robotic manipulators, *Journal of the Franklin Institute*, 351 (4), 2356-2377.

Mousa, H. H. H., Youssef, A.-R. ve Mohamed, E. E. M., 2020, Hybrid and adaptive sectors P&O MPPT algorithm based wind generation system, *Renewable Energy*, 145, 1412-1429.

Munteanu, I., Bratcu, A. I., Cutululis, N.-A. ve Ceanga, E., 2008, Optimal control of wind energy systems: towards a global approach, Springer Science & Business Media, p. 297.

Nasiri, M., Milimonfared, J. ve Fathi, S. H., 2014, Modeling, analysis and comparison of TSR and OTC methods for MPPT and power smoothing in permanent magnet synchronous generator-based wind turbines, *Energy Conversion and Management*, 86, 892-900.

Nayanar, V., Kumaresan, N. ve Gounden, N. A., 2016, A Single-Sensor-Based MPPT Controller for Wind-Driven Induction Generators Supplying DC Microgrid, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31 (2), 1161-1172.

Nguyen, D. ve Fujita, G., 2016, Analysis of sensorless MPPT method for hybrid PV–Wind system using DFIG Wind Turbines, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 5, 50-57.

Novaes Menezes, E. J., Araújo, A. M. ve Bouchonneau da Silva, N. S., 2018, A review on wind turbine control and its associated methods, *Journal of Cleaner Production*, 174, 945-953.

Patel, M. R., 2005, Wind and solar power systems: design, analysis, and operation, CRC press, p.

Qiao, L. ve Zhang, W., 2019, Adaptive Second-Order Fast Nonsingular Terminal Sliding Mode Tracking Control for Fully Actuated Autonomous Underwater Vehicles, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 44 (2), 363-385.

Radjai, T., Gaubert, J. P., Rahmani, L. ve Mekhilef, S., 2015, Experimental verification of P&O MPPT algorithm with direct control based on Fuzzy logic control using CUK converter, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 25 (12), 3492-3508.

Ragheb, M., 2014, Wind energy conversion theory, betz equation, *Wind Energie*.

Rao, S. S., 2019, Engineering optimization: theory and practice, John Wiley & Sons, p.

REN21, 2019, Renewables 2019 Global Status Report.

Sahab, M. G., Toropov, V. V. ve Gandomi, A. H., 2013, 2 - A Review on Traditional and Modern Structural Optimization: Problems and Techniques, In: Metaheuristic Applications in Structures and Infrastructures, Eds: Gandomi, A. H., Yang, X.-S., Talatahari, S. ve Alavi, A. H., *Oxford*: Elsevier, p. 25-47.

Saravanakumar, R. ve Jena, D., 2015, Validation of an integral sliding mode control for optimal control of a three blade variable speed variable pitch wind turbine, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 69, 421-429.

Shinners, S. M., 1998, Modern control system theory and design, John Wiley & Sons, p.

Siew-Chong, T., Lai, Y. M. ve Tse, C. K., 2006, A unified approach to the design of PWM-based sliding-mode voltage controllers for basic DC-DC converters in continuous conduction mode, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 53 (8), 1816-1827.

Sitharthan, R., Karthikeyan, M., Sundar, D. S. ve Rajasekaran, S., 2020, Adaptive hybrid intelligent MPPT controller to approximate effectual wind speed and optimal rotor speed of variable speed wind turbine, *ISA Transactions*, 96, 479-489.

Tan, S., Lai, Y. M. ve Tse, C. K., 2008a, Indirect Sliding Mode Control of Power Converters Via Double Integral Sliding Surface, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23 (2), 600-611.

Tan, S., Lai, Y. M. ve Tse, C. K., 2008b, General Design Issues of Sliding-Mode Controllers in DC–DC Converters, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55 (3), 1160-1174.

Tang, W. Q. ve Cai, Y. L., 2013, High-order sliding mode control design based on adaptive terminal sliding mode, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 23 (2), 149-166.

Tiwari, R., Padmanaban, S. ve Neelakandan, R. B., 2017, Coordinated control strategies for a permanent magnet synchronous generator based wind energy conversion system, *Energies*, 10 (10), 1493.

Tobías-González, A., Peña-Gallardo, R., Morales-Saldaña, J., Medina-Ríos, A. ve Anaya-Lara, O., 2018, A state-space model and control of a full-range PMSG wind turbine for real-time simulations, *Electrical Engineering*, 100 (4), 2177-2191.

Tripathi, S. M., Tiwari, A. N. ve Singh, D., 2015, Grid-integrated permanent magnet synchronous generator based wind energy conversion systems: A technology review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1288-1305.

TUREB, 2020, Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu 2020, *Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği*.

Uehara, A., Pratap, A., Goya, T., Senjyu, T., Yona, A., Urasaki, N. ve Funabashi, T., 2011, A coordinated control method to smooth wind power fluctuations of a PMSG-based WECS, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 26 (2), 550-558.

Urtasun, A., Sanchis, P., San Martín, I., López, J. ve Marroyo, L., 2013, Modeling of small wind turbines based on PMSG with diode bridge for sensorless maximum power tracking, *Renewable Energy*, 55, 138-149.

Wai, R. ve Shih, L., 2011, Design of Voltage Tracking Control for DC–DC Boost Converter Via Total Sliding-Mode Technique, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58 (6), 2502-2511.

Wang, J., Bo, D., Ma, X., Zhang, Y., Li, Z. ve Miao, Q., 2019, Adaptive back-stepping control for a permanent magnet synchronous generator wind energy conversion system, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (5), 3240-3249.

Wang, L., Cao, L. ve Zhao, L., 2018a, Non-linear tip speed ratio cascade control for variable speed high power wind turbines: a backstepping approach, *IET Renewable Power Generation*, 12 (8), 968-972.

Wang, X., Li, L., Palazoglu, A., El-Farra, N. H. ve Shah, N., 2018b, Optimization and control of offshore wind systems with energy storage, *Energy Conversion and Management*, 173, 426-437.

Wei, C., Zhang, Z., Qiao, W. ve Qu, L., 2016, An Adaptive Network-Based Reinforcement Learning Method for MPPT Control of PMSG Wind Energy

Conversion Systems, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31 (11), 7837-7848.

Weng, Y. ve Hsu, Y., 2015, Sliding mode regulator for maximum power tracking and copper loss minimisation of a doubly fed induction generator, *IET Renewable Power Generation*, 9 (4), 297-305.

Xia, Y., Ahmed, K. H. ve Williams, B. W., 2013, Wind Turbine Power Coefficient Analysis of a New Maximum Power Point Tracking Technique, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60 (3), 1122-1132.

Yang, B., Jiang, L., Wang, L., Yao, W. ve Wu, Q. H., 2016, Nonlinear maximum power point tracking control and modal analysis of DFIG based wind turbine, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 74, 429-436.

Yang, B., Yu, T., Shu, H., Dong, J. ve Jiang, L., 2018a, Robust sliding-mode control of wind energy conversion systems for optimal power extraction via nonlinear perturbation observers, *Applied Energy*, 210, 711-723.

Yang, B., Yu, T., Shu, H., Zhang, X., Qu, K. ve Jiang, L., 2018b, Democratic joint operations algorithm for optimal power extraction of PMSG based wind energy conversion system, *Energy Conversion and Management*, 159, 312-326.

Yang, B., Zhong, L., Yu, T., Shu, H., Cao, P., An, N., Sang, Y. ve Jiang, L., 2019, PCSMC design of permanent magnetic synchronous generator for maximum power point tracking, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 13 (14), 3115-3126.

Yang, L. ve Yang, J., 2011, Nonsingular fast terminal sliding-mode control for nonlinear dynamical systems, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 21 (16), 1865-1879.

Yaramasu, V., Wu, B., Sen, P. C., Kouro, S. ve Narimani, M., 2015, High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies, *Proceedings of the IEEE*, 103 (5), 740-788.

Yaramasu, V. ve Wu, B., 2016, Model predictive control of wind energy conversion systems, *Hoboken, New Jersey.*, John Wiley & Sons, p. 512.

Yaramasu, V., Dekka, A., Durán, M. J., Kouro, S. ve Wu, B., 2017, PMSG-based wind energy conversion systems: survey on power converters and controls, *IET Electric Power Applications*, 11 (6), 956-968.

Yaylacı, E. K. ve Yazıcı, İ., 2018, Sensorless double integral sliding mode MPPT control for the WECS, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 10 (2), 023301.

Yazici, İ. ve Yaylaci, E. K., 2016, Fast and robust voltage control of DC–DC boost converter by using fast terminal sliding mode controller, *IET Power Electronics*, 9 (1), 120-125.

Yazici, İ. ve Yaylaci, E. K., 2017, Maximum power point tracking for the permanent magnet synchronous generator-based WECS by using the discrete-time integral sliding mode controller with a chattering-free reaching law, *IET Power Electronics*, 10 (13), 1751-1758.

Yazıcı, İ. ve Yaylacı, E. K., 2019, Discrete-time integral terminal sliding mode based maximum power point controller for the PMSG-based wind energy system, *IET Power Electronics*, 12 (14), 3688-3696.

Yi, S. ve Zhai, J., 2019, Adaptive second-order fast nonsingular terminal sliding mode control for robotic manipulators, *ISA Transactions*, 90, 41-51.

Yicheng, C., Pillay, P. ve Khan, A., 2005, PM wind generator topologies, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41 (6), 1619-1626.

Yin, X.-x., Lin, Y.-g., Li, W., Gu, Y.-j., Lei, P.-f. ve Liu, H.-w., 2015, Sliding mode voltage control strategy for capturing maximum wind energy based on fuzzy logic control, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 70, 45-51.

Yin, X., Jiang, Z. ve Pan, L., 2020, Recurrent neural network based adaptive integral sliding mode power maximization control for wind power systems, *Renewable Energy*, 145, 1149-1157.

Youssef, A.-R., Ali, A. I. M., Saeed, M. S. R. ve Mohamed, E. E. M., 2019, Advanced multi-sector P&O maximum power point tracking technique for wind energy conversion system, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 107, 89-97.

Yu, S., Yu, X., Shirinzadeh, B. ve Man, Z., 2005, Continuous finite-time control for robotic manipulators with terminal sliding mode, *Automatica*, 41 (11), 1957-1964.

Zammit, D., Staines, C. S., Micallef, A. ve Apap, M., 2018, Optimal Power Control for a PMSG Small Wind Turbine in a Grid-Connected DC Microgrid, *2018 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, 32-37.

Zhang, H., Fletcher, J., Greeves, N., Finney, S. J. ve Williams, B. W., 2011, One-power-point operation for variable speed wind/tidal stream turbines with synchronous generators, *IET Renewable Power Generation*, 5 (1), 99-108.

Zheng, E.-H., Xiong, J.-J. ve Luo, J.-L., 2014, Second order sliding mode control for a quadrotor UAV, *ISA Transactions*, 53 (4), 1350-1356.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Emre Hasan DURSUN
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Meram / Konya 06.03.1990
Telefon : 0332 205 1729
Faks : -
E-Posta : ehdursun@ktun.edu.tr

EĞİTİM

Derece		Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	:	Özel Lale Lisesi, Meram, Konya	2007
Üniversite	:	Sakarya Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Serdivan, Sakarya	2011
Yüksek Lisans	:	Selçuk Üniversitesi, FBE, Elektrik-Elektronik Mühendisliği A.B.D., Selçuklu, Konya	2016
Doktora	:	Konya Teknik Üniversitesi, LEE, Elektrik-Elektronik Mühendisliği A.B.D., Selçuklu, Konya	2020

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2013-2018	Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü	Arş. Gör.
2018-Halen	Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü	Arş. Gör.

UZMANLIK ALANI

Elektrik Makinaları, Kontrol Sistemleri, Yenilenebilir Enerji, Güç Elektroniği.

YABANCI DİLLER

İngilizce: İyi seviye (YDS: 81.25 puan)

YAYINLAR

SCI, SCI-expanded, SSCI, AHCI'de yer alan ve Impact faktörü 1.0 ve üzeri olan uluslararası dergilerde yayımlanan eserler:

1. **Dursun, E. H.**, ve Kulaksiz, A. A. (2020). Second-order sliding mode voltage-regulator for improving MPPT efficiency of PMSG-based WECS. *International*

Journal of Electrical Power & Energy Systems, 121, 106149. ***(Doktora tezinden yapılmıştır)***

2. **Dursun, E. H.**, Koyuncu H. ve Kulaksiz, A. A. (2020). A novel unified maximum power extraction framework for PMSG based WECS using chaotic particle swarm optimization derivatives. *Engineering Science and Technology, an International Journal, JESTECH,* ***(Doktora tezinden yapılmıştır)***

SCI, SCI-expanded, SSCI, AHCI'de yer alan Impact faktörü 1.0'dan küçük olan uluslararası dergilerde ve ESCI'de yer alan uluslararası dergilerde yayımlanan eserler:

1. **Dursun, E. H.**, ve Kulaksiz, A. A. (2020). Second-Order Fast Terminal Sliding Mode Control for MPPT of PMSG-based Wind Energy Conversion System. *Elektronika ir Elektrotechnika*, *26*(4). ***(Doktora tezinden yapılmıştır)***

2. **Dursun, E. H.**, ve Kulaksiz, A. A. (2020). MPPT Control of PMSG Based Small-Scale Wind Energy Conversion System Connected to DC-Bus. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, *21(2), 20190188.* ***(Doktora tezinden yapılmıştır)***

3. Durdu, A. ve **Dursun, E. H.** (2019). Sliding Mode Control for Position Tracking of Servo System with a Variable Loaded DC Motor. *Elektronika ir Elektrotechnika*, *25*(4), 8-16. ***(Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)***

Diğer uluslararası indekslere giren hakemli dergilerdeki araştırma makaleleri:

1. **Dursun, E. H.**, Levent, M. L., Durdu, A., & Aydoğdu, Ö. (2017). Speed Control of a Variable Loaded DC Motor by Using Sliding Mode and Iterative Learning Control. *International Journal of Electrical Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 22–28, Jan. 2017. ***(Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)***

2. Cimen, H., **Dursun, E. H.**, ve Üney, M. Ş. (2017). ANN based On-Load Tap Changer for Distribution Network with Distributed Generation. *Journal of Communications Technology, Electronics and Computer Science*, *15*, 1-4. ***(Diğer)***

3. **Dursun, E. H.**, ve Durdu, A. (2016). Speed control of a DC motor with variable load using sliding mode control. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, *8*(3), 219-226. ***(Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)***

Tam metinli uluslararası bildiriler (Yabancı dilde sözlü sunulan ve tam metni yayınlananlar):

1. **Dursun, E. H.**, ve Kulaksiz, A. A. (2019). Maximum Power Extraction from PMSG based VS-WECS by using Variable Step-Size P&O Method. Presented at *In 2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative*

Technologies (ISMSIT) (pp. 1-5). IEEE. Ankara, Turkey. ***(Doktora tezinden yapılmıştır)***

2. **Dursun, E. H.**, ve Kulaksiz, A. A. (2017). Three Closed Loop Control of Four Quadrant Chopper Feeding a Separately Excited DC Motor. Presented at *the IATS'17 8th International Advanced Technologies Symposium*.(pp. 1379-1383). Elazığ, Turkey. ***(Diğer)***

3. **Dursun, E. H.**, ve Durdu, A. (2016). Position control by using PD type fuzzy logic: Experimental study on rotary servo system. Presented at *In 2016 8th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)* (pp. 1-6). IEEE. Ploiesti, Romania. ***(Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)***

4. Karakurt, T., Durdu, A., ve **Dursun, E. H.** (2015, July). Petri-net based control of six legged spider robot. *In 2015 International Conference on Advanced Robotics (ICAR)* (pp. 117-122). IEEE. Istanbul, Turkey ***(Diğer)***

Özet metinli uluslararası bildiriler (Yabancı dilde sözlü sunulan ve özeti yayınlananlar):

1. **Dursun, E. H.**, ve Durdu, A. (2016). Speed Control of a DC Motor with Variable Load Using Sliding Mode Control. Presented at *the 2016 2nd International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT 2016)*, Istanbul, Turkey. ***(Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)***

2. **Dursun, E. H.**, Levent, M. L., Durdu, A., & Aydoğdu, Ö. (2016). Speed Control of a Variable Loaded DC Motor by using Sliding Mode and Iterative Learning Control. Presented at *the 9th International Conference on Computer and Electrical Engineering (ICCEE 2016)*, Barcelona, Spain. ***(Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)***

BURSLAR

TÜBİTAK 2211-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı, 1649B031602137, 2016/1, Türkiye (4 yıl)