



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



STATCOM İÇEREN GÜNEŞ-RÜZGAR
HİBRİT MİKROŞEBEKENİN
MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU

Hale BAKIR

DOKTORA TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2021
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Hale BAKIR tarafından hazırlanan “STATCOM İÇEREN GÜNEŞ-RÜZGAR HİBRİT MİKROŞEBEKENİN MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU” adlı tez çalışması 05/07/2021 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

Doç. Dr. Nurettin ÇETİNKAYA

.....

Üye

Doç. Dr. Hulusi KARACA

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mümtaz MUTLUER

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı tarafından 2017-OYP-025 nolu projesi ve TÜBİTAK tarafından 2214/A yurt dışı doktora sırası araştırma burs 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.

HALE BAKIR

Tarih:05.07.2021

ÖZET

DOKTORA TEZİ

STATCOM İÇEREN GÜNEŞ-RÜZGAR HİBRİT MİKROŞEBEKENİN MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU

Hale BAKIR

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

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ

2021, 121 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ

Prof. Dr. Ramazan AKKAYA

Doç. Dr. Nurettin ÇETİNKAYA

Doç. Dr. Hulusi KARACA

Dr. Öğr. Üyesi Mümtaz MUTLUER

Mikroşebekelerin yaygınlaşması ve güneş-rüzgar enerjisi sistemlerinin kurulu güçlerinin artmasıyla şebeke üzerine olumsuz etkileri artmakta, buna yönelik çeşitli önlemlerin alınması için yapılan çalışmalar önem kazanmaktadır. Güneş ışıınımı ve rüzgârın doğal kesintili özelliklerinden dolayı şebekeden bağımsız güneş-rüzgâr gibi yenilenebilir enerji sistemleri, her an değişen yük talebini karşılamada tamamen güvenli olmadığından, güç kararsızlıkları yaşanmaktadır ve reaktif güç kompanzasyonu yapılarak hibrit bir sistem oluşturmak mantıklı bir çözümdür. Bu tez çalışmasında öncelikle çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG) tabanlı rüzgar sistemi ve statik senkron kompanzatör (STATCOM) modellenmiştir. Tüm sistemin simülasyonu, güneş-rüzgar hibrit mikro-şebekenin STATCOM reaktif güç analizi ve performans analizi Matlab/Simulink'te yapılmıştır. STATCOM'un kontrol devresindeki dört adet oransal-integral (PI) denetleyici parametreleri sezgisel algoritma teknikleri kullanılarak optimize edilmiş, gerilim kararlılığı ve reaktif güç kontrolü üzerine tatmin edici sonuçlar alınmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Opal-RT teknolojisi ile fiziksel olarak kurulan çift beslemeli asenkron generatör tabanlı rüzgar enerji sistemine ve bu sisteme STATCOM eklenecek gerçek zamanlı çalışmalar yapılmıştır. Optimizasyon yönteminin etkinliğini değerlendirmek için izleme hatalarına dayanan çeşitli performans kriterleri kullanılmıştır. Ayrıca, geleneksel ayarlama metodu ve genetik algoritma optimizasyonu metodu gerçekleştirilmiş ve sırasıyla doğal su döngüsünü temel alan bir doğadan esinlenmeli optimizasyon algoritması ve bakterilerin yiyecek arama optimizasyonu metodu ile karşılaştırılmıştır. Optimize edilmiş kontrol parametreleri, çift beslemeli bir asenkron generatörü rüzgar enerjisi deney düzeneğinde değerlendirilmiştir. Her bir optimizasyon yönteminin etkinliğini doğrulamak için deneysel sonuçlar sunulmuştur. Optimize edilmiş kontrol parametreleri Opal-RT teknolojisi ile deneysel bir kurulumda sabit ve değişken rüzgar hızı altında test edilmiştir. Farklı optimizasyon yöntemleri ve koşulları için deneysel sonuçlar, su döngüsü optimizasyon yöntemi ve bakteri yemek arama optimizasyon yönteminin etkinliğini doğrulamak için sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Çift Beslemeli Asenkron Generatör, Rüzgar Enerji Sistemi, Gerçek zamanlı simülasyon, Hibrit Sistem, Mikroşebeke, Optimizasyon, STATCOM

ABSTRACT

PhD THESIS

MODELING AND OPTIMIZATION OF A SOLAR-WIND HYBRID MICROGRID WITH STATCOM

Hale BAKIR

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Electrical and Electronics Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ

2021, 121 Pages

Jury

**Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ
Prof. Dr. Ramazan AKKAYA
Assoc. Prof. Dr. Nurettin ÇETİNKAYA
Assoc. Prof. Dr. Hulusi KARACA
Asst. Prof. Dr. Mümtaz MUTLUER**

With the widespread use of micro-grids and the installed power of solar-wind energy systems, their negative effects on the grid increase, and studies to take various precautions are gaining importance. Due to the natural intermittent characteristics of solar radiation and wind, renewable energy systems such as off-grid PV/wind are not completely safe to meet the ever-changing load demand, so power instabilities are experienced and it is a reasonable solution to create a hybrid system by reactive power compensation. In this thesis, first of all, doubly-fed asynchronous generator (ÇBAG) based wind system and static synchronous compensator (STATCOM) are modeled. The simulation of the whole system, STATCOM reactive power analysis and performance analysis of the solar-wind hybrid microgrid were performed in Matlab/Simulink. Four proportional-integral (PI) controller parameters in the control circuit of STATCOM are optimized using heuristic algorithm techniques, and satisfactory results are obtained, results are compared in regard to the voltage stability and reactive power control.

Real-time studies are carried out by incorporating STATCOM to the doubly-fed asynchronous generator based wind energy system and physically implemented by means of Opal-RT technology. Various performance criteria based on monitoring errors have been used to evaluate the effectiveness of the optimization method. In addition, the conventional tuning method and genetic algorithm optimization method are performed and compared with nature-inspired optimization algorithms based on the natural water cycle and the bacteria foraging optimization methods, respectively. The optimized control parameters are evaluated in a doubly-fed asynchronous generator wind energy experimental setup. Experimental results are given to verify the effectiveness of each optimization method. Optimized control parameters have been tested under constant wind speed and variable wind speed in an experimental setup with Opal-RT technology. Experimental results for different optimization methods and conditions are presented to confirm the effectiveness of the water cycle optimization method and bacteria foraging optimization method.

Keywords: Doubly Fed Asynchronous Generator, Wind Energy System, Real-time simulation, Hybrid System, Micro grid, Optimization, STATCOM

ÖNSÖZ

Çalışmalarında değerli katkı ve fikirleri ile beni yönlendiren, teşvik eden daima en iyinin ve doğrunun olması için çalışan ve emeğini esiremeyen danışman hocam Konya Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ'a sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunuyorum. Ayrıca Tez İzleme Komitesi üyeleri Konya Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Nurettin ÇETİNKAYA'ya ve Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Hulusi KARACA'ya teşekkürlerimi ve saygılarımı sunuyorum. Son olarak diğer bölüm hocalarıma ve mesai arkadaşlarıma minnettarlığımı sunarım.

Doktora çalışmam sırasında Kanada Saint Mary's Üniversitesi'ne davet eden ve Laboratuvarında, doktora tezim için verimli ve planlı çalışmalar yapmamıza imkan veren Saint Mary's Üniversitesi öğretim üyesi Doç. Dr. Adel MERABET'e ve laboratuvardaki çalışmalarında yardımını esirgemeyen arkadaşım Rupak Kanti DHAR'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, 2214/A doktora sırası araştırma burs imkanı sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TUBİTAK)'a teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışmam sırasında ve hayatımın her anında yardımını, anlayışını ve desteğini esirgemeyen Konya Say Enerji A.Ş. ortağı Elektrik-Elektronik Mühendisi eşim Cihad BAKIR'a ve bu günlere gelmemi borçlu olduğum babam Hayati TORUN'a, annem Filiz Levent TORUN'a en içten teşekkürlerimi saygılarımı ve minnettarlığımı sunarım.

Doktora tez çalışmamı; hayattaki en önemli varlıklarım, canım oğullarım Zülfü Ali BAKIR ve Ahmet Berat BAKIR'a ithaf ediyorum.

Hale BAKIR
KONYA-2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	7
2.1. Fotovoltaik Sistemler	7
2.2. Rüzgar Enerji Sistemleri	8
2.3. Güneş-Rüzgar Hibrit Mikro-Şebekeler.....	9
2.4. Statik Senkron Kompansatör (STATCOM)	10
2.5. Hibrit Mikro-Şebekelerde Optimize edilmiş STATCOM Kullanılarak Reaktif Güç Kompanzasyonu ve Gerilim Kararlılığı	11
2.6. OPAL-RT Teknolojisi ile ÇBAG Tabanlı Rüzgar Enerji Sisteminin Gerçek Zamanlı Simülasyonu	13
2.7. ÇBAG sistemleri için Kontrol Parametrelerinin Optimizasyonu ve Kontrol Yapılarının Karşılaştırılması.....	13
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	17
3.1. FV Sistemler	17
3.2. Rüzgar Enerji Sistemleri.....	17
3.3. MPPT Tabanlı Fotovoltaik Sistemin Modellenmesi	18
3.4. Çift beslemeli asenkron generatör tabanlı rüzgar türbininin modellenmesi	21
3.5. STATCOM	25
3.5.1. STATCOM konvertörlerin kontrol metotları	27
3.5.1.1. Sinüzoidal PWM (SPWM)	27
3.5.1.2. Uzay vektör PWM (UVM)	27
3.5.1.3. Seçili harmoniklerin eliminasyonu PWM (SHE-PWM)	28
3.5.1.4. Histeresiz Bant PWM (HB-PWM)	29
3.5.2. STATCOM Kontrolü için Gerekli Matematiksel İfadeler.....	29
3.5.2.1. Vektörel dönüşümler.....	30
3.5.2.1.1. Clarke dönüşümü ($a,b,c \rightarrow \alpha,\beta$).....	30
3.5.2.1.2. Park dönüşümü ($\alpha,\beta \rightarrow d,q$).....	30
3.5.2.2. Faz kilitleme döngüsü (PLL-phase locked loop).....	31
3.5.2.3. Oransal-Integral (PI) Kontrolörler	32

3.6. Hibrit Güneş/Rüzgar Sistemi	35
3.7. STATCOM'un optimizasyonu	37
3.8. Genetik Algoritma (GA)	38
3.9. Parçaçık Sürü Optimizasyonu (PSO)	39
3.10. Bakteri Yemek Arama algoritması tabanlı PSO (BF-PSO)	41
3.11. Amaç Fonksiyonunun Formülasyonu	42
3.12. OPAL-RT Teknolojisi	43
3.12.1. RT-LAB Programı	43
3.12.2. OPAL-RT	44
3.12.3. Gerçek Zamanlı İzleme ve Kontrol Donanımı	44
3.12.4. Gerçek Zamanlı İzleme ve Kontrol Yazılımı	45
3.12.5. Simulink'teki modelin RT-LAB modeline dönüştürülmesi	46
3.13. RT-LAB'da Şebeke bağlantılı ÇBAG tabanlı Rüzgar Enerji Sistemi	47
3.13.1. ÇBAG Modellenmesi	47
3.13.2. Şebeke modellenmesi	48
3.13.3. Kontrol Sistemi	49
3.14. Bakteri Yemek Arama Optimizasyon Algoritması	50
3.15. Su Döngüsü Optimizasyon Algoritması	54
3.16. Optimizasyon için Performans Kriterleri	59
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	60
4.1. Reaktif Güç Kompanzasyonu için STATCOM'un Simülasyon Sonuçları	60
4.2. Güneş-Rüzgar Hibrit mikro-şebekenin optimize edilmiş STATCOM ile simülasyon sonuçları	64
4.3. Opal – RT teknolojisi kullanılarak optimize edilmiş ÇBAG tabanlı rüzgar enerji sisteminin gerçek zamanlı simülasyon sonuçları	71
4.3.1. ÇBAG tabanlı rüzgar sistemi için BFA tabanlı optimizasyon yönteminin deneysel sonuçları ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması ve tartışması	71
4.3.1.1. Simülasyon sonuçları	74
4.3.1.2. Deneysel sonuçları	80
4.3.2. ÇBAG tabanlı rüzgar sistemi için WCA Tabanlı optimizasyon yönteminin deneysel sonuçları ve tartışması	91
4.4. ÇBAG tabanlı rüzgar enerji sisteminin gerçek zamanlı akım, gerilim, güç simülasyon sonuçları	101
4.5. Opal – RT teknolojisi kullanılarak ÇBAG tabanlı rüzgar sistemine STATCOM eklenmesi	106
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	108
5.1 Sonuçlar	108
5.2 Öneriler	110
KAYNAKLAR	111
ÖZGEÇMİŞ	119

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Amper
V	: Volt
W	: Watt
km	: Kilometre
VAR	: Volt amper reaktif
pu	: Per unit
H	: Henry
Dev/dk	: Devir/dakika
s	: Saniye
M	: Mega
kg	: Kilogram
t	: Zaman
V_{bus}	: Bara gerilimi
Q	: Reaktif güç
I_a, I_b, I_c	: Üç-faz akım bileşenleri
V_d, V_q	: d-q gerilim bileşenleri
I_q, I_d	: d-q akım bileşenleri
V_w	:Türbin kanatları tarafından süpürülen ortalama rüzgar hızı
P_w	: Rüzgar türbini tarafından üretilen güç
T_t	: Aerodinamik tork miktarı
∂	: Türbin uç hızı
C_p	: Güç katsayısı
β	: Meyil açısı
k	: Rüzgar için sabit katsayı
R	: Metre cinsinden türbin kanat uzunluğu
C_t	: Tork katsayısı
ρ	: Hava yoğunluğu
Ω_t	: Rotorun açısal hızı
A	: Süpürülmüş alan
V_a, V_b, V_c	: Üç-faz gerilim bileşenleri
K_p	: Oransal kazanç sabiti
K_i	: Integral kazanç sabiti
N_s	: Bakteri yüzme adım sayısı
i	: Bakteri indeksi
J	: Optimizasyon için performans kriteri
w	: Ağırlık faktörü
I_{ph}	: Fotovoltaik akım
K	: Boltzmann sabiti
Q	: Elektron yükü
T	: Sıcaklık
n	: Lineer faktörü
R_s	: Hücre seri direnci
R_{sh}	: Hücre şönt direnci
N_s	: Seri FV modül sayısı

V	: Solar hücrenin çıkış gerilimi
I_0	: Saturasyon akım değeri
I	: Solar hücrenin akımı
I_{sh}	: Hücre şönt akımı
I_{sc}	: Kısa devre akımı
V_{oc}	: Açık devre gerilimi
G	: Işınım
$V_{statcom}$	: STATCOM çıkış gerilimi
V_{ac}	: AC sistem gerilimi
α	: Gerilimler arası faz farkı
X	: Trafoların eşdeğer reaktansı
P	: AC sistemden STATCOM'a akan aktif güç
Q	: AC sistemden STATCOM'a akan reaktif güç
m_a	: Modülasyon indeksi
V_{dc}	: DC gerilim
d, q	: Dönen referans büyüklüğü
α, β	: Dikey koordinatlar
θ	: Faz açısı
$u(s)$	: Kontrol edicinin çıkışı
$e(s)$	: Hata sinyali
T_i	: İntegral zaman sabiti
R_1, R_2	: Rastgele sayılar
c_1, c_2	: Parçacıktan bilişsel ve sosyal davranışların ağırlığı için kriterler
k	: Yineleme sayısı
V_i^k	: Parçacık hız vektörü
X_i^k	: Pozisyon vektörü
p_i^{Lbest}	: Parçacık en iyi pozisyon
p_i^{Global}	: Parçacık en iyi global değeri
V_{abc}	: Üç fazlı ac gerilim
V_{dq}	: d-q gerilim
I_{dq}	: d-q akımı
ω_n	: Doğal frekans
t_s	: Yerleşme süresi
ε	: En iyi sönüm
V_{max}	: Bara sonundaki gerilimin maximum değeri
$\delta(n, i)$	: Bir takla için yön
N_c	: Bakteri kemotaksis adımı
N_{re}	: Bakteri üreme sayısı
N_{ed}	: Eliminasyon ve dağılma adım sayısı
T	: İntegralin üst sınırı
S	: Bakteri sayısı
W	: Sabit
$C(i)$	: Rastgele ele alınan adım büyüklüğü
F	: Optimizasyon problemine dayalı fonksiyon
J_i^{health}	: Bakterinin sağlığı
l_b, u_b	: Alt ve üst sınırlar
s	: Kayma
R_s, R_r	: Stator, rotor direnci
L_s, L_r, L_m	: Stator, rotor, kaçak endüktansı
i_{rd}, i_{rq}	: Rotor akımı d-q bileşenleri

V_{rd}, V_{rq}	: Rotor gerilimi d-q bileşenleri
σ	: Kaçak faktörü
w_s	: Senkron açısal hız
w_r	: Rotor hızı
P_s	: Stator aktif gücü
Q_s	: Stator reaktif gücü
w	: Şebeke açısal hızı
R	: Filtre direnci
L	: Filtre endüktansı
ϕ_s	: Stator akısı
P_g	: Şebeke aktif gücü
Q_g	: Şebeke reaktif gücü
e_v, e_d, e_q	: İzleme hatası
N_{st}	: Nehirlere akabilen akarsu
NS_n	: Yağmur damlası akış yoğunluğu
d_{max}	: Nehir ve deniz arası mesafe
max_iter	: Yineleme sayısı
x_i	: Yağmur damlası vektörü
N	: Tasarım değişkenleri sayısı
N_p	: Popülasyon sayısı
X^i	: Yağmur damlasının pozisyonu
C_i	: Yağmur damlaları maliyeti
N_r	: Bir dizi nehir
N_{sr}	: En iyi yağmur damlası sayısı

Kısaltmalar

STATCOM	: Statik Senkron Kompanzatör (Static synchronous compensator)
PI	: Oransal İntegral
PID	: Oransal İntegral Türev
PCC	: Ortak Kublaj Noktası (Point of Common Coupling)
FACTS	: Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (Flexible AC Transmission Systems)
FV	: Fotovoltaik
TCSVC	: Tristör Kontrollü Statik Var Kompanzatör
SSSC	: Statik Senkron Seri Kompanzatör
IPFC	: Hat Arası Güç Akış Kontrolü (Interline Power Flow Controller)
BMD	: Bulanık Mantık Denetleyici
YSA	: Yapay Sinir Ağları
ÇBAG	: Çift Beslemeli Asenkron Generatör (Doubly Fed Asynchronous Generator)
RSC	: Rotor Tarafı Kontrolü (Rotor Side Control)
GSC	: Şebeke Tarafı Kontrolü (Grid Side Control)
SVC	: Statik Var Kompanzatör
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu
TSFL	: Takagi-Sugeno Bulanık Mantık
DVR	: Dinamik Gerilim Restoratörü
GA	: Genetik Algoritma
BFA	: Bakteri Yemek Arama Algoritması (Bacteria Foraging Algorithm)
ACO	: Karınca Koloni Algoritması (Ant Colony Optimizer)
GWO	: Gri Kurt Optimizasyonu (Grey Wolf Optimizer)
VSL	: Gerilim Stabilite Sınırı (Voltage Stability Limit)
HTGA	: Hibrit Taguchi Genetik Algoritması
DC	: Doğru Akım
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)
PLL	: Faz Kilitleme Döngüsü (Phase Locked Loop)
BF-PSO	: PSO Tabanlı Bakteri Yemek Arama Algoritması
ITAE	: İntegral Zaman Mutlak Hatası (Integral Time Absolute Error)
IAE	: İntegral Mutlak Hatası (Integral Absolute Error)
ITSE	: İntegral Zaman Kare Hatası (Integral Time Square Error)
ISE	: İntegral Kare Hatası (Integral Square Error)
RMSE	: Ortalama Kök Kare Hatası (Root Mean Square Deviation)
OPAL-RT	: Gerçek Zamanlı Simülasyon (Real Time Simulation)
RT-LAB	: Gerçek Zamanlı Yazılım
HIL	: Döngü İçi Donanım (Hardware-in-the-loop simulation)
FPGA	: Alan Programlama Kapı Dizisi (Field-Programmable Gate Array)
RCP	: Hızlı Kontrol Prototipi (Rapid Control Prototyping)
SC	: Konsol Alt Sistemi (Subsystem Console)
SM	: Ana Alt Sistemi (Subsystem Master)

ŞEKİLLER LİSTESİ

ŞEKİL 3.1 Fotovoltaik sistem eşdeğer devre şeması.....	18
ŞEKİL 3.2 Değiştir-gözetle (Perturb and Observe) MPPT algoritması akış diyagramı	20
ŞEKİL 3.3. MPPT Tabanlı Fotovoltaik Sistemin Simulink Modeli.....	20
ŞEKİL 3.4. Şebeke tarafı kontrol devresi	21
ŞEKİL 3.5. Rüzgar türbini karakteristikleri (a) λ -CT karakteristiği (b) hız-güç (V-P) karakteristiği	23
ŞEKİL 3.6. Dolaylı (indirect) hız kontrolü.....	23
ŞEKİL 3.7. a)Çift beslemeli indüksiyon jeneratör tabanlı rüzgar türbininin modellenmiş hali b)Şebeke ile senkron çalışan kontrol yapısına sahip rüzgar modeli	25
ŞEKİL 3.8. STATCOM eşdeğer devresi	27
ŞEKİL 3.9. Uzay vektör diyagramı	28
ŞEKİL 3.10. Uzay vektör modülasyon tabanlı STATCOM.....	28
ŞEKİL 3.11. Histeresiz bant modülasyon tabanlı STATCOM.....	29
ŞEKİL 3.12. Clarke dönüşümü fazör diyagramı	30
ŞEKİL 3.13. Park dönüşümü fazör diyagramı.....	31
ŞEKİL 3.14. PLL yapısı.....	32
ŞEKİL 3.15. PI kontrol edici transfer fonksiyonu	32
ŞEKİL 3.16. STATCOM kontrol devresi	33
ŞEKİL 3.17. STATCOM simülasyon modeli.....	34
ŞEKİL 3.18. Simulink'te modellenen STATCOM kontrol devresi	35
ŞEKİL 3.19. Modellenen STATCOM içeren güneş-rüzgar hibrit sistem	36
ŞEKİL 3.20. Modellenen STATCOM içeren güneş-rüzgar hibrit sistem blok şeması .	37
ŞEKİL 3.21. STATCOM'un optimizasyonu için GA akış diyagramı.....	39
ŞEKİL 3.22. STATCOM'un optimizasyonu için PSO akış diyagramı	40
ŞEKİL 3.23. STATCOM'un optimizasyonu için BF-PSO akış diyagramı	42
ŞEKİL 3.24. ITAE için STATCOM'un yeniden modellenen kontrol devresi	43
ŞEKİL 3.25. OPAL-RT-5600	44
ŞEKİL 3.26. ÇBAG tabanlı rüzgar enerji sistemi deney düzeneği.....	45
ŞEKİL 3.27. RT-LAB alt sistemleri	46
ŞEKİL 3.28. OP8600 arayüz sinyal veri toplama bloğu.....	47
ŞEKİL 3.29. ÇBAG rüzgar enerjisi sisteminin rotor ve şebeke tarafları için kontrol sistemi	50
ŞEKİL 3.30. BFA algoritmasının akış şeması	53
ŞEKİL 3.31. WCA algoritmasının akış şeması	58
ŞEKİL 4.1. STATCOM akım, gerilim profili.....	61
ŞEKİL 4.2. STATCOM I_q ve I_{qref} profili.....	61
ŞEKİL 4.3. STATCOM aktif ve reaktif güç profili.....	62
ŞEKİL 4.4. STATCOM DC gerilim profili.....	62
ŞEKİL 4.5. STATCOM modülasyon indeks profili.....	63
ŞEKİL 4.6. STATCOM'suz bara sonu gerilim profili.....	64
ŞEKİL 4.7. STATCOM'lu bara sonu gerilim profili.....	64
ŞEKİL 4.8. ITAE için PSO yönteminin yakınsama eğrisi.....	66
ŞEKİL 4.9. ITAE için optimize edilmiş STATCOM ile bara sonunda gerilim profili (pu)	67
ŞEKİL 4.10. IAE için optimize edilmiş STATCOM ile bara sonunda gerilim profili (pu)	67

ŞEKİL 4.11. ITSE için optimize edilmiş STATCOM ile bara sonunda gerilim profili (pu)	68
ŞEKİL 4.12. ISE için optimize edilmiş STATCOM ile bara sonunda gerilim profili (pu)	68
ŞEKİL 4.13. Oturma zamanının ayarlama yöntemlerine göre performans karşılaştırması	70
ŞEKİL 4.14. Yüzdelik aşma değerinin ayarlama yöntemlerine göre performans karşılaştırması.....	71
ŞEKİL 4.15. Değişken adım referansları altındaki kontrol yanıtı. (a) dc-link voltaj regülasyonu, (b) d-rotor akım regülasyonu, (c) q-rotor akım regülasyonu.....	76
ŞEKİL 4.16. Adım referansları altındaki kontrol yanıtı. (a) dc-link voltaj regülasyonu, (b) d-rotor akım regülasyonu, (c) q-rotor akım regülasyonu	78
ŞEKİL 4.17. Rastgele rotor hızı değişimleri altında kontrol yanıtı. (a) dc-link voltaj regülasyonu, (b) d-rotor akım regülasyonu, (c) q-rotor akım regülasyonu	79
ŞEKİL 4.18. Şebeke akımları için THD analizi.....	80
ŞEKİL 4.19. Farklı optimizasyon yöntemleri altında kontrol yanıtı. DC-link gerilimi için adım yanıtı, (b) d-rotor akımı için adım yanıtı, (c) q-rotor akımı için adım yanıtı.....	83
ŞEKİL 4.20. Adım referansları altında geçici bölge yanıtı. (a) dc-link voltaj regülasyonu, (b) d-rotor akım regülasyonu, (c) q-rotor akım regülasyonu	85
ŞEKİL 4.21. Adım altındaki kontrol yanıtı, rotor hızındaki değişiklikler (a) rotor hız profili, (b) dc-link voltaj regülasyonu, (c) d-rotor akım regülasyonu, (d) q-rotor akım regülasyonu	87
ŞEKİL 4.22. Performans kriterleri için yakınsama oranları karşılaştırması, (a) ITAE. (b) IAE. (c) ITSE. (d) ISE	89
ŞEKİL 4.23. Farklı iterasyonlar altında BFA için kontrol tepkisi. (a) dc-link voltaj regülasyonu. (b) d-rotor akımı regülasyonu. (c) q-rotor akımı regülasyonu	91
ŞEKİL 4.24. Farklı optimizasyon yöntemleri ve sabit rotor hızı altındaki kontrol tepkisi. (a) dc-link voltaj tepkisi. (b) d-rotor akımı tepkisi. (c) q-rotor akımı tepkisi.	95
ŞEKİL 4.25. Farklı iterasyonlarda WCA için kontrol tepkisi. (a) dc-link voltaj cevabı. (b) d-rotor akımı yanıtı. (c) q-rotor akımı tepkisi.	97
ŞEKİL 4.26. Farklı optimizasyon yöntemleri ve değişken rotor hızı altındaki kontrol tepkisi. (a) dc-link voltaj cevabı. (b) d-rotor akım cevabı. (c) q-rotor akımı cevabı	98
ŞEKİL 4.27. Farklı optimizasyon yöntemleri ve değişken rotor hızı altında geçici tepki. (a) dc-link voltaj cevabı. (b) d-rotor akımı yanıtı. (c) q-rotor akımı.	100
ŞEKİL 4.28. WCA altında geçici cevap ve farklı performans kriterleri.....	100
ŞEKİL 4.29. Değişken rotor hızı.....	101
ŞEKİL 4.30. Sisteminin şebeke akımı	102
ŞEKİL 4.31. Sisteminin rotor akımı.....	102
ŞEKİL 4.32. Sisteminin stator akımı.....	103
ŞEKİL 4.33. Sisteminin şebeke gerilimi.....	103
ŞEKİL 4.34. Sisteminin rotor gerilimi.....	104
ŞEKİL 4.35. Sisteminin stator gerilimi.....	104
ŞEKİL 4.36. Sisteminin şebeke için aktif, reaktif gücü.....	105
ŞEKİL 4.37. Sisteminin rotor için aktif, reaktif gücü.....	105
ŞEKİL 4.38. Sisteminin stator için aktif, reaktif gücü.....	106

ŞEKİL 4.39. STATCOM eklenmiş şebeke bağlantılı ÇBAG tabanlı rüzgar enerji sistemi	107
ŞEKİL 4.40. RT-LAB'da modellenen STATCOM modeli.....	107



ÇİZELGE LİSTESİ

ÇİZELGE 4.1. ITAE PERFORMANS KRİTERİNE GÖRE OPTİMİZE EDİLMİŞ STATCOM'UN PI KAZANÇ SABİTLERİ.....	63
ÇİZELGE 4.2. ITAE İÇİN STATCOM'UN KONTROL KAZANÇ SABİTLERİ	65
ÇİZELGE 4.3. IAE İÇİN STATCOM'UN KONTROL KAZANÇ SABİTLERİ.....	65
ÇİZELGE 4.4. ITSE İÇİN STATCOM'UN KONTROL KAZANÇ SABİTLERİ	66
ÇİZELGE 4.5. ISE İÇİN STATCOM'UN KONTROL KAZANÇ SABİTLERİ.....	66
ÇİZELGE 4.6. ITAE İÇİN GELENEKSEL PI KONTROLÖR VE GA, PSO, BF-PSO TABANLI KONTROLÖR İLE SİSTEMİN PERFORMANS KARŞILAŞTIRMASI	69
ÇİZELGE 4.7. IAE İÇİN GELENEKSEL PI KONTROLÖR VE GA, PSO, BF-PSO TABANLI KONTROLÖR İLE SİSTEMİN PERFORMANS KARŞILAŞTIRMASI	69
ÇİZELGE 4.8. ITSE İÇİN GELENEKSEL PI KONTROLÖR VE GA, PSO, BF-PSO TABANLI KONTROLÖR İLE SİSTEMİN PERFORMANS KARŞILAŞTIRMASI	70
ÇİZELGE 4.9. ISE İÇİN GELENEKSEL PI KONTROLÖR VE GA, PSO, BF-PSO TABANLI KONTROLÖR İLE SİSTEMİN PERFORMANS KARŞILAŞTIRMASI	70
ÇİZELGE 4.10. ÇBAG PARAMETRELERİ	73
ÇİZELGE 4.11. BFA İÇİN OPTİMİZASYON SONUÇLARI	73
ÇİZELGE 4.12. HESAPLAMA ZAMANI.....	74
ÇİZELGE 4.13. SİMÜLASYON SONUÇLARI İÇİN DİNAMİK PERFORMANSLAR.....	75
ÇİZELGE 4.14. DENEYSEL SONUÇLAR İÇİN DİNAMİK PERFORMANS	82
ÇİZELGE 4.15. WCA İÇİN OPTİMİZASYON SONUÇLARI.....	92

1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yapılan çalışmalar, özellikle son yıllarda artan bir ivme göstermektedir. Yenilenebilir enerji kaynağı; enerji kaynağından alınan enerjiye eşit oranda veya kaynağın tükenme hızından daha çabuk bir şekilde kendini yenileyebilmesi ile tanımlanır. Mevcut enerji kaynaklarının hızla tükenme eğilimi içine girmesi, hammadde fiyatlarının artması, çevreye ve insan sağlığı üzerine olan olumsuz etkileri, kullanımlarında birtakım zorluklar, yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yapılan çalışmaları artırmıştır. Çeşitli kontrol tekniklerinin kullanılması ile kurulu gücü düşük olan uygulamalar için verimli bir Fotovoltaik (FV) sistem ve rüzgâr enerjisi sisteminden oluşan hibrit yapı oluşturmak mümkündür. Enerji tüketiminin artması, enerji üretim teknolojilerindeki hızlı ilerleme ve çevre koruma için artan halk bilinci, araştırma alanlarını alternatif enerji ve dağıtılmış üretime yönlendirmektedir. Güneş ışıınımı ve rüzgârın doğal kesintili özelliklerinden dolayı şebekeden bağımsız rüzgâr/FV gibi yenilenebilir enerji sistemleri, her an değişen yük talebini karşılamada tamamen güvenli olmadığından, güç kararsızlıkları yaşanmaktadır ve reaktif güç kompanzasyonu yapılarak hibrit bir sistem oluşturmak mantıklı bir çözümdür (A. Gupta, Saini, & Sharma, 2007).

Genellikle, bu tür sistemler rüzgar, güneş, hidro ve / veya dizel veya gaz gibi birden fazla yenilenebilir enerji kaynağından oluşur. Kaynakların mevcudiyetine bağlı olarak, hibrit bir sistemi oluşturmak için uygun bir üretim kullanılabilir. Bu sistemler, çevresel etkiyi ve üretim maliyetini azaltırken gelişmiş verimliliklerle çalışacak şekilde tasarlanabilir. Bununla birlikte, bu tür güç sistemlerinin tasarımı ile ilgili çeşitli zorluklar vardır. Bu bağlamda, gerilim ve frekans kontrol edilmesi gereken en önemli unsurlardır. Buna ek olarak, güç kalitesi sorunları, farklı bileşenler arasındaki koordinasyon, maliyet etkinliği ve optimum çalışma hala önemli konular olan bazı unsurlardır (Mendis, Muttaqi, Sayeef, & Perera, 2010). Rüzgar türbini üreten çeşitli sistemler arasında, Çift Beslemeli Asenkron Generatörü (ÇBAG), yüksek güçlü rüzgar uygulamaları için popüler bir seçim haline gelmiştir

Buna ek olarak, reaktif güç kompanzasyonu ise tüm enerji sistemlerinde bir ihtiyaçtır. Reaktif güç, farklı güç kalitesi problemlerine sebep olduğu gibi kayıpların artmasına da neden olur. Yıllardır kullanılan statik var kompanzatörler ve sabit mekanik anahtarlamalı kondansatör grupları çok geniş bir kullanıma sahiptirler. Bu tip kompanzasyonlar boyutlarının büyük olması, kayıpların fazla olması ve cevap süresinin

yavaş olması gibi bazı dezavantajlara sahiptir. Tristör kontrolüne göre tristör kontrollü statik Var kompanzatör (TCSVC), gerilim kaynağı prensibine göre statik senkron kompanzatör (STATCOM), statik senkron seri kompanzatör (SSSC), hat arası güç akış kontrolü (IPFC) ve birleştirici güç akış kontrolü problemlerini iyileştirmek için önerilmektedir (Hingorani & Gyugyi, 1999). STATCOM genel olarak alternatif akım sistemlerinde güç kalitesi iyileştirici Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS) cihazlarından biridir. STATCOM paralel bağlı invertör tabanlı bir cihazdır. Bu cihaz, enerji sistemlerinde güç faktörü iyileştirme, yük dengeleme, gerilim regülasyonu ve harmonik eliminasyonu gibi görevleri yerine getirmek için kullanılmaktadır. Bu kontrolörler uygun bir şekilde ayarlandığında iletim sistemlerinin kararlı çalışma sınırlarını artırır. FACTS kontrolörlerinin iki temel amacı vardır. Birincisi iletim sistemlerinin güç transfer kapasitelerini artırmak, ikincisi ise tanımlanan iletim rotaları üzerinde güç akışını kontrol etmektir (Mithulanathan, -Yome, & Acharya, 2005).

FACTS sistemlerinin kontrol edilmesinde denetleyiciler kullanılmaktadır. Güç sistemlerinin kontrolünde kullanılan denetleyiciler sistemin istenilen çalışma sınırları içerisinde uygun denetimlerle çalışmasını sağlar. Kullanılan denetleyiciler sistemde otomatik kontrol sağlayarak, insan müdahalesine gerek olmaksızın çalışma şartlarını korumaktadır. Denetleyicinin görevi sistemi belirli limitler içinde tutmaktır. Bütün otomatik kontrol elemanları iç mekanizmalarına göre az değişiklik gösteren belirli genel sistem cevaplarını kullanırlar. Kontrol sistemlerinde kullanılan bazı denetleyiciler, Bulanık Mantık Denetleyici (BMD), Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Oransal-İntegral-Türevsel (PI-PID) denetleyicilerdir.

FACTS güç elektroniği tabanlı bir uygulama olduğu için geleneksel mekanik kontrolörlere (şönt kapasitör, seri kapasitör, faz kaydırıcı vb.) göre daha hızlı cevap verir. Bu kontrolörler uygun bir şekilde ayarlandığı zaman iletim sistemlerinin kararlı çalışmasını artırır. Ayrıca güç sistemlerinde güneş ve rüzgar santrallerinin güç kapasitelerinin hızla artması, büyük güçlü santrallerin güç sistemine etkilerinin incelenmesini gerektirmektedir. Gerilim kararsızlığının temel sebebi yükteki artıştır. Güç sistemlerindeki kararsızlık, FACTS cihazlarının kullanımıyla giderilir veya en azından minimize edilir. Bu çalışmada sistemden ve yenilenebilir enerji kaynaklarından dolayı oluşan gerilim dalgalanmasını azaltmak ve reaktif güç kompanzasyonu için sisteme şönt olarak bağlanan bir FACTS cihazı olan STATCOM eklenerek sistemin kararlı çalışma limitinin artırılması planlanmaktadır (Ertay & Aydoğmuş, 2012).

STATCOM, sistemin gerilimini sabitlemek için hızlı çalışan bir cihazdır. STATCOM, sistem için gerekli olan reaktif gücü, içindeki tetikleme açısını kontrol ederek üretmeye / absorbe etmeye çalışır. Bu, STATCOM'un oransal ve integral kazanç sabitlerinin kontrolü ve optimizasyonu ile daha etkili bir şekilde sağlanabilir.

STATCOM için ayarlama yöntemleri, yüksek genlik bozulmalarının varlığında daha önemli bir sorun olarak görülmektedir. Literatürde, Oransal-integral (PI) kontrol cihazının ayarlanması, temel ayarlama yöntemleriyle tatmin edici bir sonuç vermez ve performans endeksini en aza indirir ve belirsiz dinamikler, zaman gecikmeleri ve doğrusal olmama ile karşı karşıya kalır. Bununla birlikte, yanlış ayarlanmış PI parametrelerinin döngüsel ve yavaş toparlanması için, zayıf kararlılık ve en kötü senaryo, sistemin çalışmasının çökmesine neden olabilir. Bu çıkışlar, yüksek güçlü sistemler için büyük salınımlar ve daha uzun yerleşme süresi sağlar.

Çalışmalarda yeterli bir yanıt almak için PI parametrelerini otomatik olarak ayarlamak gerekir. Bu nedenle, araştırmacılar akıllı kontrolörler aracılığıyla en iyi PI parametrelerini elde etmek için en iyi yöntemi kullanmaya çalışıyorlar. Bu tezde, Bakteri yemek arama algoritması (BFA), Parçacık sürü optimizasyonu (PSO), Genetik algoritma (GA) kullanılarak STATCOM kontrol devresindeki dört adet PI denetleyicisi optimizasyonu ve karşılaştırılması gerçekleştirilmektedir.

Bunlara ek olarak, enerji tüketimini artırmak, çevre koruma konusundaki farkındalığı artırmak ve enerji üretim teknolojilerindeki son gelişmeler, alternatif enerjiye ve dağıtılmış üretime olan ilgiyi artırmıştır. Günümüzde, yüksek enerji çıktısı ve değişken hızda çalışma kabiliyeti gibi avantajları nedeniyle, en çok tercih edilen rüzgar generatörlerinden biri çift beslemeli asenkron generatördür (ÇBAG). Sistem, $\pm\% 40$ hız farkıyla çalışabilen sınırlı değişken hızlara izin verir. Generatör davranışı, güç dönüştürücüleri veya kontrolörleri tarafından hata durumlarında veya normal işletimde yönetilirler (Bakir H., 2019).

ÇBAG rüzgar enerjisi sistemlerinde, güç dönüştürücü birimi, rotor tarafı dönüştürücü (RSC) ve şebeke tarafı dönüştürücü (GSC) olarak adlandırılan iki dönüştürücünün art arda bağlı (back-to back) konfigürasyonuna sahiptir. RSC, stator terminallerinde gerekli mıknatıslanma akımı dalga formlarını rotor sargılarında sağlayarak stator terminallerinde gerekli aktif ve reaktif gücü üretir (Alhato & Bouallègue, 2019). Bu nedenle, rotor akımı bileşenlerini maksimum güç çekimi ve istenen güç faktörü için kontrol ederek statorun aktif ve reaktif gücünün kontrolünü sağlar (Bansal, Bhatti, & Kumar, 2007). GSC, istenen güç faktörü altında rotordan şebekeye

maksimum güç aktarımı için dc-link gerilimini ve şebeke akımı bileşenlerini düzenler. Ayrıca, reaktif gücü telafi etmek veya dengesiz koşullar altında reaktif güç darbesini gidermek için de kullanılabilir (Alhato & Bouallègue, 2019). Birden fazla kontrol cihazı aynı anda çalıştığından, ÇBAG rüzgar enerjisi sisteminin performansı kontrol parametrelerinin seçimine dayanır. PI denetleyici, basitliği ve sıfır kararlı durum hatasının iyi bir şekilde başarılması nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan geleneksel bir kontrol yöntemidir.

Rüzgar enerjisinin üretim karışımına entegrasyonu için artan talep, bu sistemleri daha da katı performans gereksinimlerine tabi tutma ihtiyacı başlamıştır. Endüstride yaygın olarak kullanılmaları nedeniyle Çift Beslemeli Asenkron Generatörü (ÇBAG) tabanlı rüzgar türbinlerine odaklanılmıştır. OPAL-RT'nin eMEGASim® Gerçek Zamanlı Dijital Simülatörünün bileşenleri üzerinde geliştirilmiş ve test edilmeye devam etmektedir.

Kontrol sistemine ve optimizasyona dayanan mikro-şebekenin hızlı kontrol prototiplemesi (Rapid Control Prototyping-RCP), donanımı (OP5600 ve OP8660) kullanılarak yapılmıştır. Gerçek zamanlı dijital simülatör olan OP5600, RT-LAB gerçek zamanlı simülasyon yazılımı platformunu çalıştıran analog ve dijital I/O sinyal modüllerinden, çok çekirdekli bir işlemciden ve FPGA'dan oluşur. En iyi hassasiyeti elde etmek için, düşük zaman adımlı kontrollü mikroşebeke'nin gerçek zamanlı RCP'sini gerçekleştirmeyi sağlar.

RCP ve döngü içi donanım uygulamaları için güçlü bir araç yapan işlemci Intel Xeon QuadCore 2.40 GHz ile donatılmıştır. OP8660, HIL Kontrol Cihazı ve Veri Toplama Arabirimi, güç elektroniği ve güç sistemleri uygulamalarına uyarlanmış çoklu giriş ve çıkış kanalları sağlayarak gerçek zamanlı dijital simülatörün özelliklerini genişleten bir sinyal koşullandırma arayüzüdür. Çekirdeği, akım ve gerilimin $\pm 10V$ 'a dönüştürülmesini sağlayan yüksek akım ve yüksek gerilim giriş şartlandırma modülleri içerir (Software, 2019). ÇBAG konfigürasyonunda farklı algoritmalar farklı rüzgar hızı koşulları için doğru çalışır ve bu nedenle değişken rüzgar hızına karşı sabit frekans çalışmasını gerektiren rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi (REDS) için yararlıdır (Prasad & Mulla, 2020).

OPAL-RT teknolojisi günümüzde en iyi gerçek zamanlı simülatörlerinden biri olarak görülmektedir ve güneş-rüzgar enerji sistemleri gibi çalışmalarda sıklıkla kullanılmaktadır. RT-LAB ile yazılımı gerçekleştirilen ve OPAL-RT cihazları ile deney kurulumu gerçekleştirilen ÇBAG tabanlı rüzgar enerji sistemi üzerine çalışmalar

yapılarak performans analizi, güç kontrolü ve optimal kontrol uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak oransal ve integral parametrelerini seçmek zorlu bir iştir ve belirsiz dinamikler, zaman gecikmeleri ve doğrusallık ile karşı karşıya kaldıklarından geleneksel ayarlama ve performans endeksi yöntemlerini kullanırken tatmin edici sonuçlar vermemektedir. Bu nedenle araştırmacılar gelişmiş sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanarak tatmin edici sonuçlar elde etmektedir. ÇBAG konfigürasyonunda farklı algoritmalar farklı rüzgar hızı koşulları için doğru çalışır ve bu nedenle değişken rüzgar hızına karşı sabit frekans çalışmasını gerektiren rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi (REDS) için yararlıdır (Prasad & Mulla, 2020). OPAL-RT kullanılarak ÇBAG tabanlı REDS için çalışmamızda simülasyon ve deneysel sonuçlar sabit ve farklı rüzgar hızı koşullarında gösterilmektedir. Önerilen algoritmaların etkinliği, deneysel test düzeneğinde optimizasyon sonuçları kullanılarak doğrulanır.

Günümüzde kullanılan hata ve maliyet minimizasyonunda en iyi optimizasyon yöntemlerinden olan Bakteri yemek arama optimizasyonu (BFA) algoritması, E. Coli gibi bakterilerin grup arama davranışlarından esinlenmiştir. Algoritma, yiyecek ararken küçük adımlarla belirli sinyallere doğru veya uzağa doğru hareket eden bakterilerin kemotaksis davranışını takip eder ve dört aşamadan oluşur (Passino, 2002). Diğer bir yöntem olan Su döngüsü optimizasyonu (WCA), su döngüsü olarak bilinen suyun sürekli hareketinden ilham alan bir tekniktir (Eskandar et al., 2012). Bir nehir veya dere oluşturmak için yağmur damlaları veya dağlardaki ya da tepelerdeki karlar dağlardan aşağıya akar. Nehir-akarsu içeriği denizde toplanacak şekilde yolculuğa devam eder. Ek olarak, su buharlaşır ve atmosfere taşınır ve soğuk koşullar altında toprağa yağmur olarak geri dönecek şekilde yoğunlaşacak bulutları oluşturur. Bu işleme su döngüsü denir. Bu iki güçlü yöntem (WCA ve BFA) diğer geleneksel ve GA tabanlı PI denetleyicisi yöntemlerinin dezavantajlarını ortaya koymak için STATCOM ve rüzgar enerji sisteminde kullanılmıştır ve üstünlükleri sonuçlarda ayrıntılı şekilde karşılaştırılmıştır.

Bu bilgiler doğrultusunda bu tez çalışması, dört aşamalı olarak planlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Bu aşamalar sırasıyla şu şekildedir:

- 1) Öncelikle Güneş-Rüzgar Hibrit sistemin Simulink ortamında modellenmesi, sonrasında STATCOM modellemesi gerçekleştirilmiştir. STATCOM varlığında sistem modellemesi ve gerilim kararlılığı üzerine çalışılmıştır. Bazı sezgisel algoritmalar ile STATCOM'un kontrol devresindeki dört adet PI

denetleyicisinin optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve sistemde STATCOM devrede değil iken, STATCOM devrede iken, Matlab/Simulink ortamında denetleyicinin performansları karşılaştırılmıştır. Geleneksel PI ya da GA tabanlı PI kontrolöre göre BFA tabanlı PI kontrolörde; reaktif güç kontrolü ve gerilim kararlılığı üzerine tatmin edici sonuçlar alınmıştır.

- 2) Daha sonraki çalışmada Saint Mary's University'de Control Systems and Mechatronics laboratuvarında OPAL-RT teknolojisi kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. Deney düzeneğinde çalıştığımız çift beslemeli asenkron generatör üzerine optimizasyon algoritmaları uygulanarak çevrimdışı olarak değişken ve sabit rüzgar hızı altında bakteri yiyecek arama algortiması ile geleneksel metotlar karşılaştırılarak kontrol performansını ciddi oranda artırdığı gözlemlenmiştir.
- 3) OPAL-RT teknolojisi kullanılarak çift beslemeli asenkron generatör üzerine Su döngüsü optimizasyon algoritmaları uygulanarak sabit rüzgar hızı ve değişken rüzgar hızı altında sistemin kontrol yapıları karşılaştırılmıştır ve gerçek zamanlı sonuçlarda su döngüsü optimizasyon algoritmasının rotor akımları ve dc link gerilim kontrolü üzerine performans açısından büyük ölçüde etkili olduğu gözlemlenmiştir.
- 4) Daha sonrasında bu sisteme STATCOM eklenmiş, Saint Mary's University'de sınırlı bir periyotta elde edilmiş olan deneysel sonuçlar tatminkar bulunmamıştır. Bu tez çalışması Matlab/Simulink ortamında STATCOM varlığında Güneş-Rüzgar Hibrit sistemlerde oluşan gerilim dalgalanmasının azaltılmasına ve reaktif güç kontrolüne dikkat çekmektedir ve ayrıca OPAL-RT teknolojisi ile gerçek zamanlı rüzgar enerji sistemlerinde en iyi seçilen PI parametrelerin önemini sabit rüzgar hızı ve değişken rüzgar hızı altında gerçek zamanlı göstermektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu çalışmada öncelikle fotovoltaik sistemler, rüzgar enerji sistemleri, hibrit mikro-şebekeler üzerine araştırma yapılmış, daha sonrasında STATCOM üzerine araştırma yapılarak hibrit mikro-şebeke sistemlerinde etkisi ve optimizasyonu üzerine araştırmalar yapılmış ve son olarak OPAL-RT kullanılarak ÇBAG tabanlı rüzgar enerji sistemi ve optimal kontrol üzerine araştırmalar yapılarak, farklı alanlarda yapılan çalışmalar alt başlıklar içinde sunulmuştur.

2.1. Fotovoltaik Sistemler

Bir çok literatür çalışmasında FV sistemlerde maksimum güç noktası takibi (MPPT) üzerine çalışılmalar yapılmakta ve enerji yönetimi, kontrol, optimizasyon kullanılarak çalışmalar geliştirilmektedir. Çalışmalar, iki aşamalı FV-FV yapısı için yeni bir minimum güç izleme (MPT) algoritması sunar; burada her bir FV, merkezi kontrol MPT tarafından kontrol edilirken maksimum güç noktası izleme (MPPT) kontrolü ile uygulanır. Dönüştürücüler daha yüksek verimlilik elde etmek için minimum gücü işlemek üzere özel olarak tasarlanır ve çeşitli koşullar altında mükemmel çalışabileceği açıkça gösterilmektedir (Ye, Wen, Chu, & Li, 2017). Ayrıca, uyumsuz güç kayıplarını ortadan kaldırmak için, yerleşik matematiksel modele göre alt modül düzeyinde bireysel maksimum güç noktası takibi (MPPT) ve modül düzeyinde minimum güç takibi (MPT) eşzamanlı uygulamasına sahip optimize edilmiş bir FV sistemi sunulmaktadır. MPPT birimlerinin sayısını azaltmak için esnek bir zaman paylaşımı algoritması benimsenmiştir. Ayrıca, gerçek MPPT uygulaması ve MPT kontrolü sayesinde sistem verimliliği artırılmıştır. Etkinliği doğrulamak için hem simülasyon hem de deneysel testler yapılmaya devam etmektedir (Chu, Wen, Yang, & Wang, 2020).

Son yıllardaki güncel çalışmalar şebekeye bağlı bir solar fotovoltaik (FV) güç üreten sistemin kontrolü ile ilgilidir. Bir güneş-FV dizisinin maksimum güç izleme kontrolünü elde etmek için çeşitli kontrol yaklaşımları kullanılır. Önerilen yaklaşımlar, değişen yükler ve üretim senaryosu altında sistem parametrelerinin ayarlanması ihtiyacını ortadan kaldırır. Önerilen kontrol stratejilerinin etkinliği, kararlılık analizleri kullanılarak belirlenir. Güneş-FV güç üreten sistemin önerilen kontrol algoritmaları ile performansı, çeşitli çalışma koşulları altında simülasyon ve deneysel çalışmalar kullanılarak gösterilmeye devam etmektedir (Rezkallah, Sharma, Chandra, Singh, & Rousse, 2017).

2.2. Rüzgar Enerji Sistemleri

Rüzgar enerjisi genellikle zayıf, dengesiz güç iletim şebekeleri ile karakterize edilen kırsal, uzak bölgelere kurulur. Asenkron rüzgar generatörlerinde, dengesiz üç fazlı stator gerilimleri aşırı akım, dengesiz akımlar, reaktif güç titreşimleri ve tork titreşimlerinden kaynaklanan mekanik bileşenler üzerindeki stres gibi bir takım problemlere neden olur.

Bu nedenle, belirli bir dengesizliğin ötesinde, asenkron rüzgar generatörleri şebekeden ayrılır. Bu şebekeyi daha da zayıflatabilir. Çift beslemeli asenkron generatörlerinde (ÇBAG'ler), rotor akımlarının kontrolü ayarlanabilir hızda çalışmaya ve reaktif güç kontrolüne izin verir. Çalışmalarda, stator akımlarını dengeleyerek ve tork ve reaktif güç titreşimlerini ortadan kaldırarak dengesiz bir şebekenin neden olduğu sorunları telafi edebilen kontrolörler ile standart hız ve reaktif güç kontrolünü artıran bir ÇBAG kontrol stratejisi sunulmaktadır (Brekken & Mohan, 2007).

Zayıf şebekelere enjekte edilen rüzgar gücünün kullanımını optimize etmeyi amaçlayan rüzgar üretim sisteminin elektrik kısmının güç kalitesi için bir iyileştirme tekniği sunulmaktadır. Şebekeye enjekte edilecek enerjiyi kontrol etmek için bir gerilim yönelimli kontrol (VOC) metodu sunulmaktadır. İnvertör akımı ve gerilimindeki harmonikleri en aza indirmek ve rüzgar enerjisi dönüşüm sisteminin (REDS) zayıf güç kalitesini önlemek için, VOC, VSI ile şebeke arasına bir LC filtresi yerleştirilir. Önerilen teknik, önerilen modelin geçerliliğini doğrulamak ve yenilenebilir enerji uygulamalarında pratik üstünlüğünü göstermek için uygulanmaya devam etmektedir (Amin & Mohammed, 2011). Çift beslemeli asenkron generatörü tabanlı bağımsız rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri son dönemlerde sıklıkla çalışmalarda sunulmaktadır. Bağımsız çalışma için geliştirilmiş bir doğrudan gerilim kontrolü önerilmektedir ve daha iyi performansa sahip olduğunu göstermek için simülasyonda karşılaştırmalar yapılmakta ve etkinliği, değişken hız koşulu altında deney ile daha da doğrulanmaya devam etmektedir (Wei, Cheng, Wang, Han, & Luo, 2016).

Son çalışmalarda, değişken hızlı deneysel rüzgar enerjisi dönüşüm sisteminin generatörünü ve şebeke taraflarını kontrol etmek için kontrol stratejileri sunulmaktadır. Generatör tarafında, maksimum gücün çekilebilmesi için rüzgar türbininin güç eğrisinden üretilen bir profili izlemek için dönüş hızı kontrol edilir. Şebeke tarafında, dc-link gerilimi düzgün bir güç aktarımı için düzenlenir. Önerilen kontrol stratejileri, türbin ve generatördeki parametrik belirsizliklere karşı sağlamlık ve harici bozukluklar gibi ilginç

özellikler sunar. Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemindeki hız ve dc-link gerilim kontrolü için önerilen strateji, OPAL-RT gerçek zamanlı simülatörü (OP5600) tarafından tahrik edilen bir rüzgar türbini üzerinde doğrulanır ve deneysel sonuçlar, önerilen kontrol stratejisinin hız ve dc-link gerilim kontrolü açısından etkili olduğunu göstermektedir (Merabet, Ahmed, Ibrahim, & Beguenane, 2016).

2.3. Güneş-Rüzgar Hibrit Mikro-Şebekeler

Çoğu literatür çalışmalarında güç sistemini basitleştirmek ve maliyeti düşürmek için şebekeye bağlı hibrit fotovoltaik / rüzgar enerjisi sistemi için yeni bir çok yöntem önerilmektedir. FV dizisinin ve rüzgar türbininin çıkış gücü özellikleri tanıtılmaktadır. Değiştir-gözle algoritması yöntemi, giriş kaynakları için maksimum güç noktası izleme algoritmasını gerçekleştirmek için kullanılır. Deneysel sonuçlar, önerilen yöntemlerin istenen özelliklere sahip performansını gösterdiğini kanıtlamaya çalışmaktadır (Y. Chen, Liu, Hung, & Cheng, 2007).

Büyük kapasiteli asenkron generatörü tabanlı rüzgar enerjisi sistemine sahip yeni bir solar fotovoltaik entegrasyon yöntemi üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Önerilen sistemler, FV gücünü şebekeye enjekte etmek için çift beslemeli asenkron generatörünün hem şebeke hem de rotor tarafı güç dönüştürücülerini kullanır. Böylece, FV güç işleme için özel bir dönüştürücü ihtiyacını ortadan kaldırarak FV şebekesi entegrasyonuna uygun maliyetli bir çözüm sunmaktadır. Sistem, geleneksel FV-grid sisteminde kullanılan eşdeğer bir invertere kıyasla şebekeye önemli ölçüde büyük FV gücü besleyebilir. Önerilen sistemler, güneş ışığının mevcudiyeti sırasında eşzamansız çalışmada dolaşan gücü önler. Tüm bu özellikler sistem verimliliğini artırır. Sistem kararlılığı ayrıca türbin ataleti nedeniyle güç şebekesine yüksek FV penetrasyonunu kolaylaştırarak artırılır. Solar FV ve rüzgar enerjisi kaynaklarının aralıklı fakat tamamlayıcı doğası, dönüştürücülerin kullanımını önemli ölçüde geliştirir. Ayrıca, FV güç kontrol algoritmasının uygun şekilde ele alındığı çok nadiren meydana gelen çevresel aksaklıklar haricinde FV ve rüzgar kaynaklarının maksimum güç noktası izlemesini engellemez. Kontrol stratejisini tasarlamak için kapsamlı bir sistem modeli sunulur ve kullanılır. Önerilen sistemler, bir laboratuvar prototipi üzerindeki analizler, simülasyonlar ve deneyler ile desteklenmektedir (Wandhare & Agarwal, 2015).

Kesintili olmaları ve öngörülemezlikleri nedeniyle, yenilenebilir enerji (RE) kaynaklarının güç sistemine penetrasyon düzeyinin artırılması çalışmada zorluklara yol açar. Güvenilir sistem çalışması, RE üniteleri tarafından üretilen gücün kesin olarak tahmin edilmesini gerektirir. Fotovoltaik (FV) ve rüzgar üniteleri, RE kaynaklarının güç sistemine entegre edilen önemli kısımlarıdır. Farklı hava koşullarında iyi tahmin doğruluğu elde etmek için FV ve rüzgar kaynaklı güç için bir tahmin yöntemi önermektedir. Rüzgar ve FV çıkış gücü arasındaki ilişki modellenmekle kalmaz, ısı endeksi (HI) de FV / rüzgar çıkış gücünün 15 dakikalık kesin beklentisini elde etmek için yararlı bir meteorolojik değişken olarak dikkate alınır. Ayrıca, giriş verileri, FV ve rüzgar enerjisi tahmini için en iyi doğruluk elde edilecek şekilde ayrıştırılır. Önerilen yöntemin sonuçlarının gerçek FV ve rüzgar santrallerinde kaydedilen geçmiş verilerle karşılaştırılması, önerilen tahmin yönteminin FV ve rüzgar çıkış gücü tahmininde yüksek doğrulukla sonuçlandığını göstermektedir (Sanjari, Gooi, & Nair, 2020).

Son yıllarda yapılan güncel çalışmalarda, FV / rüzgar / dizel hibrit mikro-şebeke sisteminin çalışmasına yönelik bir simülasyon modeli önerilmiştir. Sistem tarafından sağlanan enerji maliyetini en aza indirmek ve güç kaynağı olasılığı sunduğu sistemin güvenilirliğini ve verimliliğini artırmak için önerilen sistemin optimizasyonu sunulmuştur. Optimize edilmiş mikroşebekenin tasarımı için Balina Optimizasyon Algoritması (WOA), Su Döngüsü Algoritması (WCA), Güve-Alev Optimize Edici (MFO) ve Hibrit parçacık sürü-yerçekimi arama algoritmasının (PSOGSA) yeni optimizasyon algoritmaları uygulanmıştır. Ayrıca, önerilen optimizasyon teknikleri arasında kapsamlı bir karşılaştırma yapılmaktadır (Diab, Sultan, Mohamed, Kuznetsov, & Do, 2019).

Bir diğer çalışma konusu olan güneş-rüzgar şebeke kontrol sistemlerinde çeşitli arıza özellikleri için de geniş çalışmalar yapılmakta ve topraklama yöntemleri tartışılmaktadır ve geleneksel sistemler ile karşılaştırmaları yapılmaktadır (Çetinkaya & Umer, 2017).

2.4. Statik Senkron Kompansatör (STATCOM)

Güneş-rüzgar gibi hibrit mikro-şebekelerin güç kalifikasyonunu ve stabilitesini artırma yöntemlerinin bulunması gerekmektedir. STATCOM, bu rolü yerine getirme konusunda büyük bir potansiyele sahiptir, ancak bu sistemin kontrolünde hala önemli ilerlemeler yapılması gerekmektedir.

Ekonomik açıdan, STATCOM'u istikrarlı durumdaki güç kalitesini iyileştirme görevi için derecelendirmek uygundur. STATCOM'u, şebeke arızaları sırasında geçici aşırı yük kapasitesini aşan büyük miktarlarda ek gücü absorbe edecek şekilde derecelendirmek uygun değildir.

Sabit bir hıza, endüksiyon generatörüne, rüzgar türbinlerine stabilite ve güç kalitesinin iyileştirilmesi bağlamında optimize edilmiş STATCOM kontrol tekniği geliştirilmiş ve tartışılmıştır. Şebeke geriliminin, aktif ve reaktif gücün rüzgar üretimindeki dalgalanma ile değişimi incelenir. STATCOM bir güneş- rüzgar üretim sistemi simüle edilir ve sonuçlar, hibrit sistemler için hem güç kalitesinin hem de istikrar marjının önemli ölçüde iyileştirilebildiğini göstermektedir (Arulampalam, Barnes, Jenkins, & Ekanayake, 2006).

Hibrit sistemlere eklenen STATCOM'un sadece verimliliği ve dalga şekli kalitesini iyileştirmekle kalmayıp aynı zamanda dc gerilimini verilen değerde tutarken reaktif gücü ve negatif sekans akımını telafi ettiği yönleriyle tatmin edici bir performansa sahip olduğunu gösterilmektedir (Du, Liu, Lin, & He, 2013).

Rüzgar enerji santrallerinin enerji sistemlerine entegre edilmesi, günümüzde önemli ölçüde artmaktadır. Bununla birlikte, güç sistemlerinin dinamik performansı, bu yenilenebilir enerji kaynaklarının büyük penetrasyon seviyesinden etkilenecektir. Bu bağlamdan güç sistemi operatörleri ve iletim sistemi operatörleri, rüzgar sistemini daha istikrarlı ve güvenilir tutan limitleri korumak için rüzgar santrallerini zorlamaya devam etmek için düzenleme kuralları koymuşlardır. Bu kurallardan biri, rüzgar santralleri için güç sisteminden ayrılmadan düşük gerilimli bir devre sağlamaktır. STATCOM'un dinamik performansını artırmak için, iki tür optimizasyon metodolojisi önerilir: STATCOM dinamiklerini en iyi şekilde yönetmek için PI denetleyicilerinin katsayılarını hassas şekilde ayarlamak için bakteri yemek arama algortması (BFA) ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) gibi algoritmalar önerilmektedir (Kamel, Diab, Do, & Mossa, 2020).

2.5. Hibrit Mikro-Şebekelerde Optimize edilmiş STATCOM Kullanılarak Reaktif Güç Kompanzasyonu ve Gerilim Kararlılığı

Birçok yeni araştırma çalışması, çeşitli sistemlerin kontrol devrelerinde PI parametrelerinin optimizasyonuna adanmıştır. Statik Var Kompanzatör (SVC) reaktif güç kontrolörünün parametrelerini ayarlamak için üstel bir yük modeli parametrelerini

ayarlamak için yapay sinir ağıları uygulanmıştır ve araştırmalar yapılmaya devam etmektedir (Bansal et al., 2007). Bazı çalışmalar, hibrit güç sistemleri için STATCOM'un optimum kazanç ayarıyla dinamik yanıtı sunmaktadır (Sharma, 2010). Regülatör (AVR), SVC ve Otomatik Gerilim kullanılarak güçlü bir kontrol önerilmektedir. Bir optimizasyon problemini çözmek ve SVC ve AVR'nin PI kontrol parametrelerini elde etmek için genetik algoritma kullanılmaktadır (Vachirasricirikul, Ngamroo, & Kaitwanidvilai, 2010). Takagi-Sugeno bulanık mantığı (TSFL) tabanlı bir kontrol cihazıyla izole edilmiş hibrit güç performans analizi için bir arama optimizasyon algoritması gerçekleştirilir (A. Banerjee, Mukherjee, & Ghoshal, 2013) ve herhangi bir giriş bozulması için reaktif güç dengeleme derecesini gerçek zamanlı olarak takip etmektedir. Kendiliğinden ayarlanan bulanık mantık tabanlı PI denetleyici, merkezi olmayan bir rüzgar-dizel hibrit güç sisteminin reaktif gücünü düzenlemek için geliştirilmiştir (Mohanty, Mohanty, Kishor, & Ray, 2013). STATCOM kullanılarak gerilim profili iyileştirmesi için parçacık sürü optimizasyonu kullanılmıştır. Sonuçlar, IEEE-30 veri yolu sistemi kullanılarak gerilim kararlılığının gelişimi için çeşitli yük koşulları altında elde edilmiş ve gerçek güç kayıpları bir dereceye kadar azaltılmıştır (Kumarasamy & Raghavan, 2012). Gerilim profili iyileştirmesi ile STATCOM'un sisteme eklenmesi ve yerleştirilmesiyle enerji tasarrufu sağlanmış ve güç kayıpları azaltılmaya başlanmıştır. Şebekeyi, optimizasyon algoritması kullanarak dağıtım ağının yükünü artıracak şekilde yeniden yapılandırmak için kullanmışlar ve araştırmacılar, aynı şekilde gerilimi sabit tutmak için şönt kondansatörleri (sürekli değişen reaktif güç üretmez), gerilim regülatörleri (reaktif güç yok) uygulamışlardır ve kabul edilebilir bir aralıkta ve dağıtım sistemlerinde kayıplar azaltılmıştır (A. R. Gupta & Kumar, 2016).

Hibrit mikroşebekelerin talep tarafı enerji yönetimi, sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılarak incelenmiştir (Paliwal, Mohanani, Singh, & Singh, 2016). STATCOM kontrol devresinin AC regülatör kısmında sadece K_p ve K_i değerleri optimize edilmiş ve bazı optimizasyon sonuçları tartışılmıştır (Saxena & Kumar, 2016). Mısır'da bulunan bağımsız bir hibrit yenilenebilir enerji sisteminin (HRES) performansını, Dinamik Gerilim İyileştirici (Vachirasricirikul et al.) optimal bir PI kontrolörünü kullanarak arttırmayı amaçlamaktadır. Önerilen PI-Cuckoo arama optimizasyonu, 2019'da gerilim ve güç dalga formlarının iyileştirilmesinde başarılı olmuştur (Mosaad, 2019). Ayarlamaya dayalı metotlarla yapılan çalışmalar literatürde bulunurken, STATCOM'un kontrol devresindeki dört PI kontrolörünün optimizasyon bazlı ve ayar bazlı metotlarının bir hibrit sistemdeki reaktif güç kompanseörleri ile gerilim kararlılığı

için karşılaştırılması ve dört farklı performans kriterinin karşılaştırılması konusunda literatür taramasında bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Önceki raporlar, STATCOM'un hızlı tepki verdiğini ve özellikle yük talebi ve giriş gücü olanakları gibi yüksek bir değişiklik durumunda, gerilim regülasyonuna daha güçlü tepki verdiğini göstermektedir.

2.6. OPAL-RT Teknolojisi ile ÇBAG Tabanlı Rüzgar Enerji Sisteminin Gerçek Zamanlı Simülasyonu

Rüzgar enerjisinin üretim karışımına entegrasyonu için artan talep, bu sistemleri daha da katı performans gereksinimlerine tabi tutma ihtiyacı ile karşılaştırmıştır. Endüstride yaygın olarak kullanılmaları nedeniyle Çift Beslemeli Asenkron Generatörü (ÇBAG) tabanlı rüzgar türbinlerine odaklanılmıştır. OPAL-RT'nin eMEGASim ® Gerçek Zamanlı Dijital Simülatörünün bileşenleri üzerinde geliştirilmiş ve test edilmeye devam etmektedir (Boakye-Boateng & Ofoli, 2013).

Çalışmalarda, OPAL-RT'nin eMEGASim® gerçek zamanlı dijital simülatörüne dayanan bir dağıtım sistemine bağlı altı ÇBAG'den oluşan bir rüzgar çiftliği için kararlı bir test yatağının modellenmesi ve geliştirilmesini amaçlamaktadır. Bir Simulink modeli, Matlab'ın SimPowerSystem'i kullanılarak tasarlanmış, çünkü rüzgar enerjisi ile ilgili mevcut simülasyon çalışmalarının çoğu esas olarak çevrimdışı simülasyona odaklanmaktadır. Daha sonra model, rüzgar çiftliği performansını gerçek zamanlı olarak aynı hızda test etmek için OPAL-RT'nin eMEGASim® gerçek zamanlı dijital simülatörüne dayanan RT-LAB ortamında yeniden oluşturulmuştur. Modeli eMEGASim® gerçek zamanlı dijital simülatörde çalıştırdıktan sonra, modelin tepkisini test etmek için üç fazdan toprağa arıza ve gerilim düşmesi gibi bazı çalışmalar yapılmıştır (Ofoli & Altmanian, 2017).

ÇBAG konfigürasyonunda bazı algoritmalar farklı rüzgar hızı koşulları için etkili çalışır ve bu nedenle değişken rüzgar hızına karşı sabit frekans çalışmasını gerektiren rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi (REDS) için yararlıdır (Prasad & Mulla, 2020).

2.7. ÇBAG sistemleri için Kontrol Parametrelerinin Optimizasyonu ve Kontrol Yapılarının Karşılaştırılması

(Mishra, Mishra, Tripathy, Senroy, & Dong, 2009) 'de, ÇBAG sisteminin salınım modlarının sönümlenmesini arttırmak için bakteri yemek arama algoritması kullanılmıştır. Hem özdeğer analizi hem de zaman-alan simülasyonunun sonuçları, ÇBAG sisteminde ayarlanan sönümlleme kontrol cihazının etkin olduğunu göstermektedir. (Panda & Tripathy, 2014) 'de, IEEE 30-bara sistemi için optimum bir güç akışı çözümü önerilmiştir. BFA'nın modifiye edilmiş bir versiyonuyla elde edilen optimal çözümün GA'dan daha iyi sonuçlar verdiği bulunmuştur. Optimizasyon sonuçları rüzgar ve termal zamanlamanın toplam sistem maliyeti üzerindeki etkisini göstermiştir. Daha sonra, birkaç test yapıldıktan sonra, BFA ile optimize edilmiş senaryonun karınca kolonisi optimizasyonuna (ACO) üstünlüğü ortaya çıkmıştır, IEEE 30-bara sistemi belirli koşullara maruz kaldığında gerilim korumalı bir şekilde çalışmaktadır (Panda & Tripathy, 2015). PSO ve BFA kullanılarak kontrolör tasarımı ayrıntılı olarak incelenmiştir.

BFA sonuçlarına göre, sistemin mevcut cevabı bir miktar iyileştirilmiştir (Bharti, Saket, & Nagar, 2017). Şebeke tarafı dönüştürücü ve rotor tarafı dönüştürücü için PI optimizasyon prosedürü, gerçek ölçek 2 MW ve aşağı ölçeklendirilmiş 7.5 kW'lık ÇBAG sistemlerinde tartışılmaktadır (Zhou & Blaabjerg, 2017). Daha sonra, diğer kontrol yöntemleri, PI ve kayan kip (Sliding Mode-SM) kontrolleri referans izleme ve sistem performans kararlılığı için karşılaştırılır ve stator akı yönelimli doğrudan vektör kontrol döngüsüne bağlanmaktadır (Hamane, Doumbia, Bouhamida, & Benghanem, 2014). Bu algoritmaların farklı optimizasyon algoritmalarına ve farklı sistemlerde PI kontrolüne uygulanmasına devam edilmiştir. Şebekeden-ÇBAG'ye dönüştürücüler için sönümlendirmeyi artırmak için uygun PI parametrelerinin seçimi, referans noktasına (A. Chen, Xie, Zhang, Gu, & Wang, 2019) dayalı olarak baskın olmayan Sekans Genetik Algoritması (NSGA-III) olan yeni bir optimizasyon modeli sunulmuştur. Rüzgar enerji kontrol sisteminin dinamik davranışını iyileştirmek için Gri Kurt Optimizasyonu (GWO) ve Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritmaları gibi metasezgisel optimizasyon teknikleri uygulanmıştır. Bağımsız ÇBAG sistemlerine uygulanan bu algoritmaların dinamik performansları, farklı koşullar altındaki geleneksel PI kontrolörüyle karşılaştırılmıştır (Soued et al., 2019).

Daha sonra, bir güç ağının gerçek güç kayıplarını ve gerilim kararlılık sınırını (VSL) optimize etmek için bir ağ kullanılır ve diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında, BFA daha iyi sonuçlar vermiştir (Tripathy & Mishra, 2007). ÇBAG'nin salınımlarını azaltmak için rotor-tarafı konvertörü ÇBAG için geliştirilmiştir ve geri bildirim kontrol cihazı uzak sinyaller kullanılarak tasarlanmıştır (Miao, Fan, Osborn, & Yuvarajan, 2009). ÇBAG,

rüzgar üretiminin optimal kontrolünü sağlamak için evrimsel bir algoritma ile entegre yörünge ve frekans alanı bilgisine dayalı bir duyarlılık analizi yaklaşımı önermektedir. Kontrol hedefine ulaşmak için optimum değerleri bulmak için PSO'yu kullanmıştır (Tang, Ju, He, Qin, & Wu, 2013). ÇBAG rüzgar türbini, şebekenin hayati sorunlarının üstesinden gelmek için (FRT) hata geçişi yapılmış ve PSO'ya odaklanarak optimizasyon için yöntemler önerilmektedir (Karaipoom & Ngamroo, 2015).

Çoğu araştırmada, BFA-tabanlı PI kontrolörü, ÇBAG-tabanlı rüzgar enerjisi sistemindeki diğer optimizasyon algoritmalarına kıyasla mevcut veya dc-link gerilim kararlılığında daha iyi sonuçlar vermiştir ve çoğu çalışmada sadece deneysel bir kurulum yerine optimizasyon sağlanmıştır. Bu çalışmalarda, optimizasyon algoritmaları, GSC'deki dc-link gerilim regülasyon döngüsünü incelemeyen, sadece PI kontrolörlerinin aktif ve reaktif güçlerinden (akım regülatörü) kazanç elde etmiştir. Bu nedenle, bu çalışma klasik vektör kontrolünde harici döngüler için PI kontrolörlerinin kazancını optimize etmek için BFA tabanlı bir optimizasyon algoritması uygulamıştır.

Geleneksel olarak, oransal-integral-türev (PID) kontrolör parametreleri, (Li, Zhou, Zhao, & Zhang, 2016) 'ta olduğu gibi klasik Ziegler-Nichols yöntemi veya (S. Banerjee, Kumar, Pal, & Prasad, 2008) 'te önerildiği gibi Kharitonov / Nyquist optimizasyon yöntemleri ile elde edilebilir.

PID kontrolörlerinin optimal parametrelerini bulmak için (Hsieh & Chou, 2007)'de hibrit Taguchi genetik algoritması (HTGA) geliştirilmiştir. AC mikroşebeke sistemlerindeki mevcut en popüler PI bazlı frekans kontrolörleri için, bu akıllı kontrol sentezinin performansı, saf bulanık PI ve Ziegler-Nichols PI kontrol tasarım yöntemleri ile karşılaştırılmıştır (Bevrani, Habibi, Babahajyani, Watanabe, & Mitani, 2012). Diğer çalışmalar, (Hasanien & Muyeen, 2012) 'de olduğu gibi genetik algoritma optimizasyonu (GAO) kullanarak değişken hızlı rüzgar enerji sisteminin frekans dönüştürücüsünde kullanılan PI kontrolörlerinin parametrelerini optimum şekilde tasarlamaya çalışmıştır. Şebeke tarafı gerilim kaynağı kademeli dönüştürücüsünün oransal-integral (PI) kontrolörlerini optimal olarak tasarlamak için bir uyum arama algoritması (HSA) (Ambia, Hasanien, Al-Durra, & Muyeen, 2015) 'de sunulmuştur.

Bu çalışmalar, gelişmiş optimizasyon teknikleri kullanarak sistem gerilimini kabul edilebilir seviyede tutmada başarılı olmuştur (Keshta, Ali, Saied, & Bendary, 2017). Son metotlardan biri, diğer metotlara göre daha verimli ve basit olduğu görülen su döngüsü optimizasyonu (WCA) iyi yakınsama performansı, daha hızlı hesaplama ve daha yüksek hassasiyet göstermiştir (Yang, Long, Liu, Zhang, & Liu, 2018).

WCA algoritmasının PID kontrol cihazlarını ayarlaması önerilmiştir ve (El-Hameed & El-Fergany, 2016) 'de farklı durumlarda rastgele bozulmalara karşı doğrulanmıştır. Mikro şebeke, kontrol devresi, konvertör çalışması gibi güç sistemi, optimum PI kontrol şeması için WCA uygulamasıyla daha da geliştirilmiştir (Hasanien & Matar, 2018).

Bu tezde, WCA ve BFA, bir ÇBAG enerji sistemini çalıştırmak için optimal PI kontrolörlerinde kullanılacaktır. Sistem modellemesi, ana katkılardan biri olarak kabul edilen izleme hatalarına dayanarak maliyet fonksiyonunu en aza indirmek için optimizasyon yöntemine entegre edilecektir. Ayrıca, bu yöntemler geleneksel PI ve GAO tabanlı PI ile karşılaştırılacaktır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. FV Sistemler

Bir fotovoltaiik (FV) sistemi, elektrik üretmek için elektrikli ve mekanik donanımlarla birleştirilmiş bir veya daha fazla güneş panelinden oluşur. FV sistemleri tek başlarına şebekeden bağımsız FV sistemleri olarak çalışabilse de, yardımcı şebekeye bağlı sistemlere veya şebekeye bağlı FV sistemlere de araştırmacılar odaklanmaktadır. Bu sistemlerde güneşten gelen ışık, bir güneş paneline düşer ve fotovoltaiik etki adı verilen bir işlemle bir elektrik akımı oluşturur. Her panel nispeten az miktarda enerji üretir, ancak bir güneş dizisi olarak daha yüksek miktarda enerji üretmek için diğer panellerle birbirine bağlanabilir. Bir güneş panelinden (veya diziden) üretilen elektrik doğru akım (DC) şeklindedir. Birçok elektronik cihaz (telefon, dizüstü bilgisayar vs.) DC elektrik kullanıyor olsa da, alternatif akım (AC) sağlayan (ve gerektiren) elektrik şebekesi kullanarak çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bu nedenle, güneş elektriğinin yararlı olması için öncelikle bir inverter kullanılarak DC'den AC'ye dönüştürülmesi gerekir. İnverterden gelen bu AC elektriği daha sonra elektronik cihazlara yerel olarak güç sağlamak için kullanılabilir veya başka bir yerde kullanılmak üzere elektrik şebekesine gönderilebilir.

3.2. Rüzgar Enerji Sistemleri

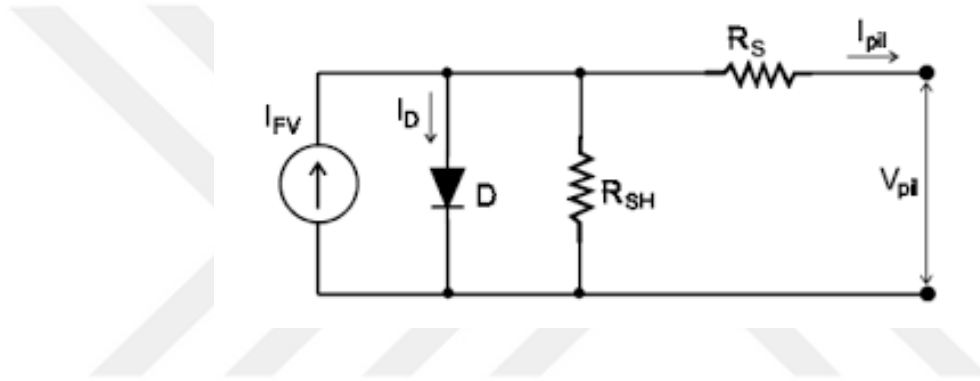
Rüzgar enerjisi, rüzgar türbinleri aracılığıyla mekanik generatörleri elektrik generatörlerine çevirmek ve geleneksel olarak pompalama gibi başka işler yapmak için rüzgarın kullanılmasıdır. Rüzgar enerjisi sürdürülebilir ve yenilenebilir bir enerjidir ve yanan fosil yakıtlara kıyasla çevre üzerinde çok daha küçük bir etkiye sahiptir. Rüzgar çiftlikleri, elektrik iletim şebekesine bağlı birçok rüzgar türbininden oluşur.

Rüzgar, elektrik üretemeyen veya talep üzerine gönderilemeyen kesintili bir enerji kaynağıdır. Ayrıca, yıldan yıla tutarlıdır ancak daha kısa zaman ölçeklerinde büyük ölçüde değişken güç verir. Bu nedenle, güvenilir bir tedarik sağlamak için diğer elektrik güç kaynakları veya depolama ile birlikte kullanılmalıdır.

Bir bölgedeki rüzgar enerjisi oranı arttıkça, onu desteklemek için daha geleneksel güç kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır (fosil yakıt gücü ve nükleer enerji gibi) ve şebekenin iyileştirilmesi gerekmektedir.

3.3. MPPT Tabanlı Fotovoltaik Sistemin Modellenmesi

Fotovoltaik güneş panelleri güneş ışınlarındaki enerjiyi doğru akıma (DC) dönüştürerek elektrik üretilmesini sağlar. Güç çıkışını artırmak amacıyla çok sayıda güneş pili birbirine paralel ya da seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir, bu yapıya güneş pili modülü ya da fotovoltaik modül denir. Güç talebine bağlı olarak modüller birbirlerine seri ya da paralel bağlanarak birkaç Watt'tan Megawatt'lara kadar güç üretmek için sistem oluşturulur. Fotovoltaik hücreye ait saturasyon akımı Denklem (3.1)'de gösterilmiştir (Ozcelik, Yilmaz, Kucuk, & Bayrak, 2015). Şekil 3.1'de fotovoltaik sisteme ait eşdeğer devre şeması verilmektedir.



Şekil 3.1 Fotovoltaik sistem eşdeğer devre şeması

$$I_0 = I_{rs} \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 e^{qEg \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T_K}} \quad (3.1)$$

Ters saturasyon akımı Denklem (3.2)'de gösterilmiştir.

$$I_{rs} = I_{sc} / [e^{\frac{qV_{oc}}{nN_sKT}}] - 1 \quad (3.2)$$

Şönt akım Denklem (3.3)'de gösterilmiştir.

$$I_{sh} = (V + IR_s) / R_{sh} \quad (3.3)$$

Foto akımı Denklem (3.4)'de gösterilmiştir.

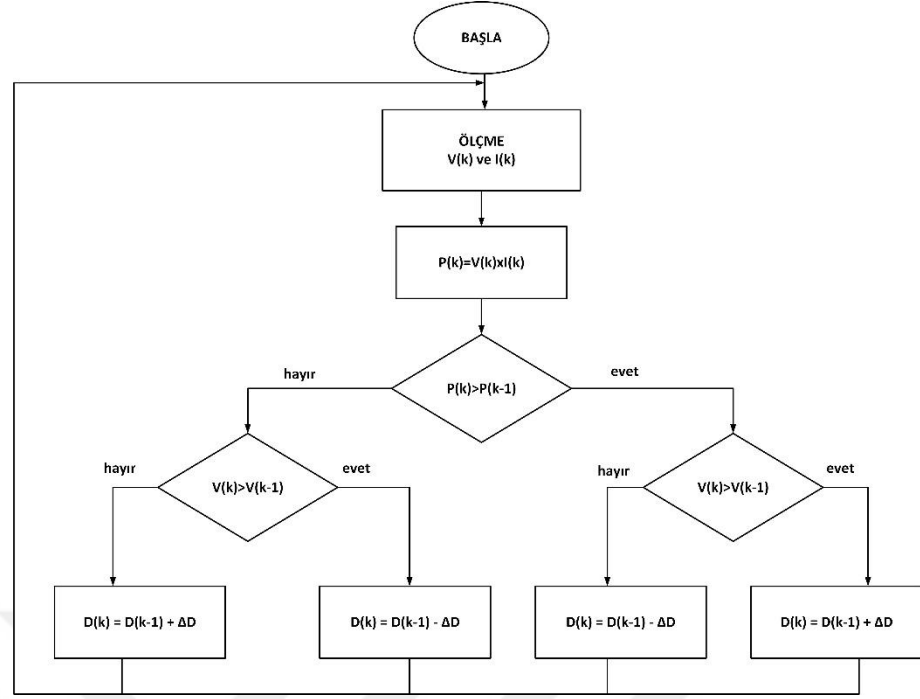
$$I_{ph} = [I_{sc} + \{ki(T - 298)\} \frac{G}{1000}] \quad (3.4)$$

FV-akım Denklem (3.5)'de gösterilmiştir.

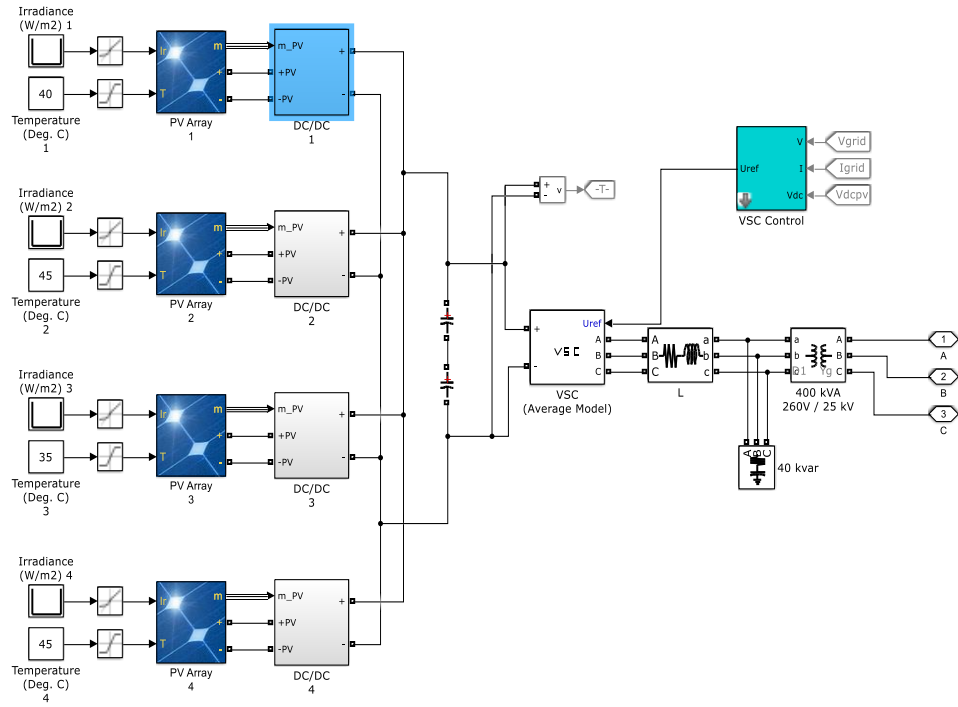
$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{(V+IR_s)q}{nKT N_s}} - 1 \right] - I_{sh} \quad (3.5)$$

Bu ifadelerde I_{ph} ışık tarafından üretilen akım, k Boltzmann gaz sabiti (1.38×10^{-23} J / K), q elektron yükü (1.6×10^{-19} C), T mutlak sıcaklık (Kelvin), n doğrusallık faktörü, R_s hücre seri direnci, G ışınım, R_{sh} hücre şönt direnci, N_s seri FV modül sayısı, V_{oc} açık devre gerilimi, V güneş pilinin çıkış gerilimi, I güneş pilinin akımı, I_{sh} hücre şönt akımı, I_{sc} kısa devre akımı ve I_0 saturasyon akım değerini gösterir.

Denklemler ile fotovoltaiik sistemin matematiksel modeli çıkartılarak ve inverter ve yükseltici dönüştürücü kullanılarak FV sistemin modellenmesi planlanmıştır. Ayrıca maksimum güç noktası izleme (MPPT)–değiştir-gözle (Perturb and observe) algoritması ile maksimum güç noktası izlemesi gerçekleştirilmiş (Duman, 2014) ve değiştir-gözle MPPT algoritması akış diyagramı Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Bu yöntemde öncelikle panel gerilimi ve akımı ölçülerek ilk durumdaki panel gücü hesaplanır. İkinci adımda gerilimdeki veya yarı iletken anahtarın doluluk boşluk oranındaki küçük değişimler göz önüne alınarak panelin gücü yeniden hesaplanır. Elde edilen bu iki güç değeri arasında fark yok ise algoritma başa dönerek yeniden güç hesapları yapar. Eğer aradaki fark sıfırdan büyük veya sıfırdan küçük ise bu sefer algoritma panel geriliminin değişimine bakar. İki gerilim değeri arasındaki farka göre, yarı iletken anahtarın doluluk oranı değiştirilerek maksimum güç noktası takibi yapılmış olur. Şekil 3.3’de her biri 0,1 MW’lık FV modüller kullanılarak ve paralel bağlanarak 0,4 MW’lık MPPT tabanlı FV sistem kullanılmıştır. Üç faza dönüştürmede gerilim kaynaklı bir inverter kullanılmıştır ve sistem, rüzgar sistemiyle senkronize çalışacak şekilde ve ana bara gerilimine eşit olacak şekilde gerilimi dönüştürülerek modele eklenmiştir.



Şekil 3.2 Değiştir-gözle (Perturb and observe) MPPT algoritması akış diyagramı

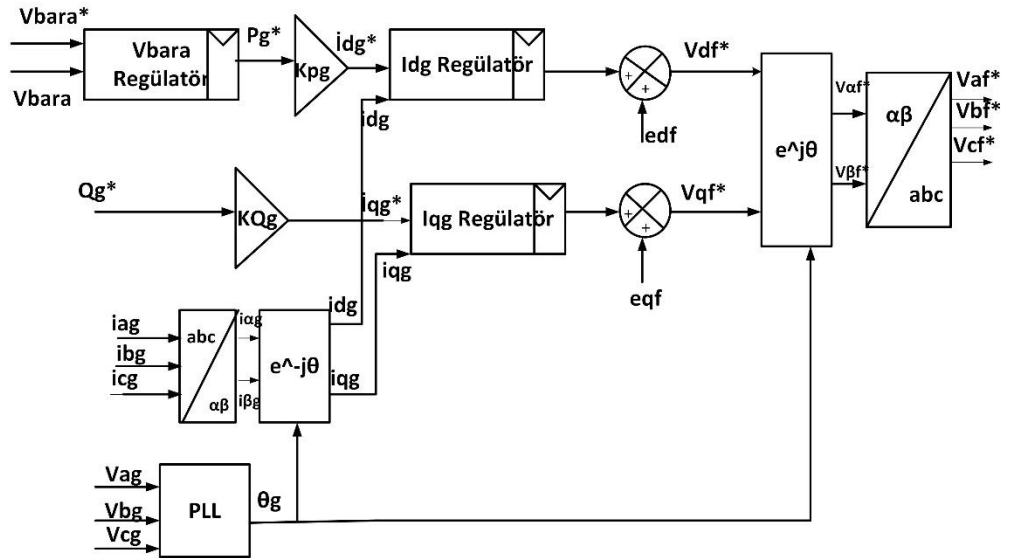


Şekil 3.3. MPPT tabanlı fotovoltaik sistemin Simulink modeli

3.4. Çift beslemeli asenkron generatör tabanlı rüzgar türbininin modellenmesi

ÇBAG günümüzde en çok tercih edilen rüzgar generatörüdür (Birinç, 2008). ÇBAG, stator sargıları direkt olarak sabit frekanslı üç fazlı şebekeye bağlanmış ve rotor sargılarına iki yönlü olarak yerleştirilmiş art arda gerilim kaynaklı dönüştürücülerden meydana gelir. Çift beslemeli terimi; stator geriliminin şebekeden sağlanmasından, rotor geriliminin ise güç dönüştürücüsü tarafından indüklenmesinden doğmuştur. Bu sistem, büyük fakat sınırlı değişken hızlara izin verir ($\pm\%40$ kadar hız farkı ile çalışabilmektedir). Dönüştürücüler, rotora farklı frekanslarda akım enjekte ederek mekanik ve elektrik frekans ayarını yapar. Generatör davranışları normal çalışma veya arıza durumlarında güç dönüştürücülerini veya kontrolörleri tarafından yönetilir (Birinç, 2008).

Güç dönüştürücü ünitesi, iki adet dönüştürücü içerir; rotor tarafındaki doğrultucu ve şebeke tarafındaki inverter, birbirlerini kontrol ederler. Ana fikir; rotor tarafındaki doğrultucunun rotor akım bileşenlerini kontrol ederek aktif ve reaktif güçleri kontrol ederken, şebeke tarafındaki inverter de DA bağlantı gerilimini kontrol eder ve dönüştürücünün çalışmasının güç faktörüyle bütünlük içinde olmasını sağlar. ÇBAG'ün birçok avantajı vardır. Aktif ve reaktif güç, rotor akımı ile kontrol edilebilir (Birinç, 2008). ÇBAG'ün şebeke tarafı kontrolü Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4. Şebeke tarafı kontrol devresi

Kontrol devrelerine göre Simulink ortamında kontrol devresi oluşturulmuştur ve rotor kontrol tarafı bittikten sonra aerodinamik modele geçilmiştir. Aerodinamik model: kanatların üzerinde hava akışının bir fonksiyonu olarak mekaniksel torku hesaplayarak rotorun gücü elde edilir (Abad, 2011). Rüzgar hızı (V_w) kanatlar tarafından süpürülen alan üzerindeki ortalama hız olarak düşünülebilir. Rüzgar türbini tarafından üretilen güç denklemi Denklem (3.6)'da verilmiştir.

$$P_w = \frac{1}{2} C_p \rho A V_w^3 \quad (3.6)$$

Aerodinamik tork miktarı Denklem (3.7)'de verilmiştir (Abad, 2011).

$$T_t = \frac{1}{2} \rho R^3 V_w^2 C_t \quad (3.7)$$

Rüzgar türbini uç hız oranı Denklem (3.8)'de verilmiştir.

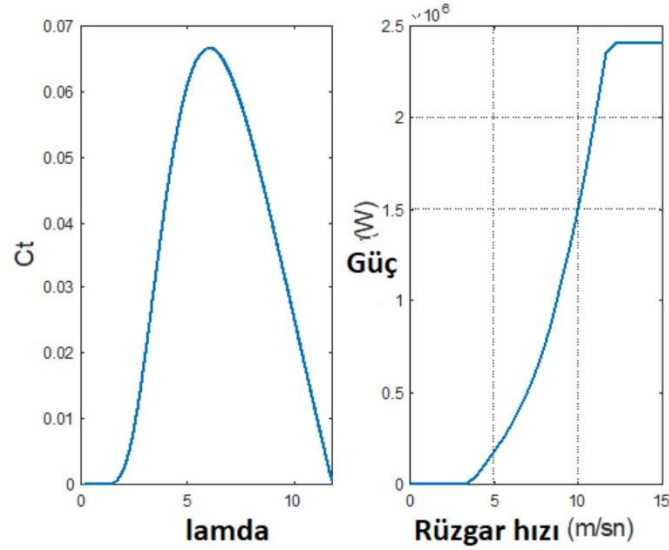
$$\partial = R\Omega_t / V_w \quad (3.8)$$

0.44 olarak kabul edilen güç katsayısı (C_p), eğim açısının (β) ve türbin uç hız oranının (∂) bir fonksiyonu olarak analitik ifadeyi verir, k sabit, R metre cinsinden kanat uzunluğu, C_t tork katsayısı, A süpürülen alan, ρ hava yoğunluğu (1.225 kg / m³), Ω_t rotorun açısal hızıdır. Güç katsayısı denklemi Denklem (3.9) ve Denklem (3.10)'da verilmiştir (Abad, 2011).

$$C_p = k1 \left(\frac{k2}{\partial i} - k3\beta - k4\beta^{k5} - k6 \right) \left(\frac{e^{\left(\frac{k7}{\partial i} \right)}}{1} \right) \quad (3.9)$$

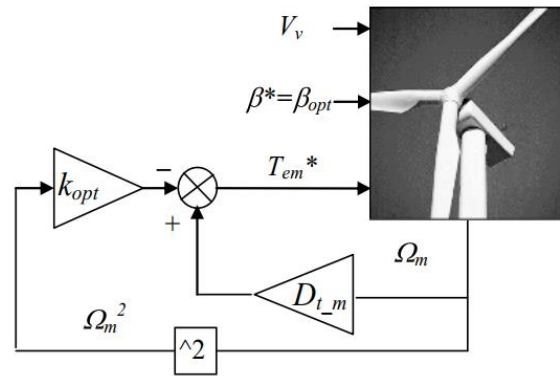
$$\partial i = 1/(\partial + k8) \quad (3.10)$$

Bu denklemler ile Şekil 3.5'deki karakteristikler elde edilmiştir. Görüldüğü üzere rüzgar hızı 12 m/s seçilirse, 12 m/s'de 2 MW değerine ulaşılabilir.



Şekil 3.5. Rüzgar türbini karakteristikleri (a) λ - C_t karakteristiği (b) Hız-Güç (v - P) karakteristiği

Bu güç ve moment denklemlerine göre Şekil 3.6'daki gibi bir dolaylı hız kontrolü maksimum güç noktasını belirlemek için modellenmiştir ve Şekil 3.7 (a)'daki gibi bir rüzgar türbin modeli oluşturulmuştur.

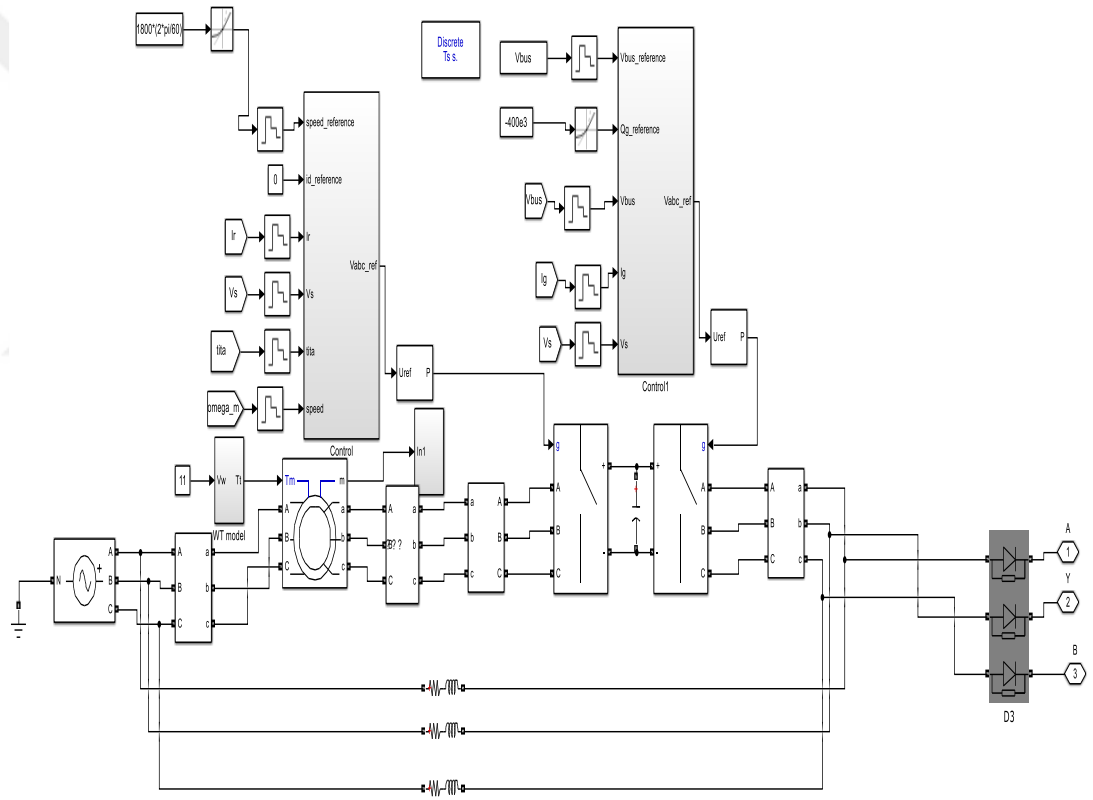


Şekil 3.6. Dolaylı (Indirect) hız kontrolü

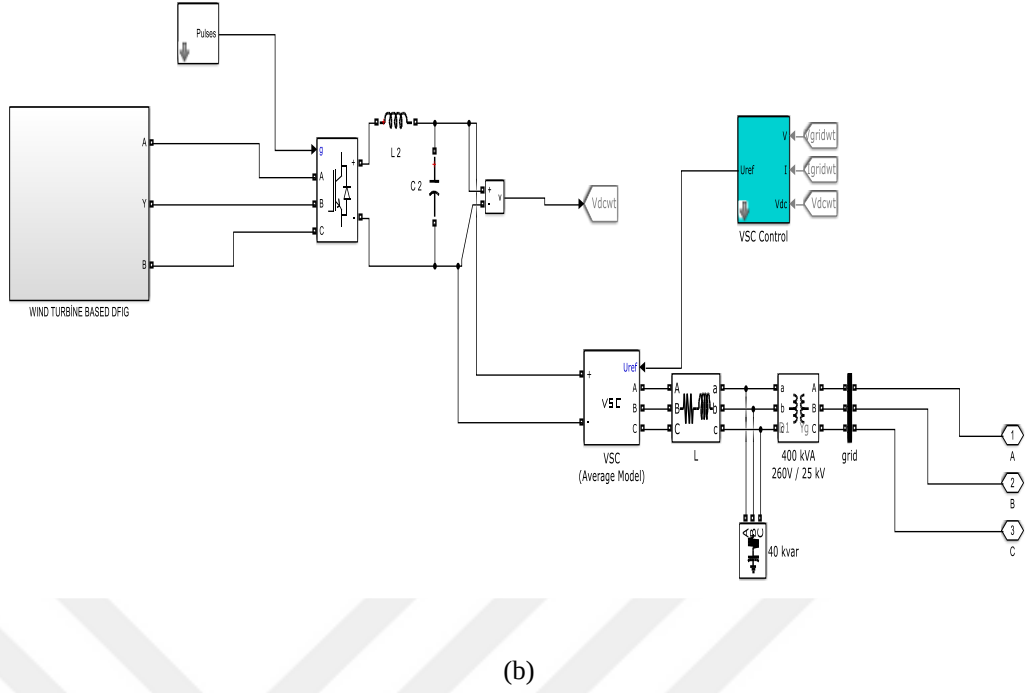
Dolaylı hız kontrolü; Maximum güç eğrisine göre her bir türbin hızı değerine göre referans bir tork miktarı almayla ilişkilidir. Türbinin belirli bir bölgede hız sınırında tutularak maksimum güç noktası belirlenir. Yani bu kontrol rüzgar türbininin ikinci dereceden bir fonksiyonu olarak denklem (3.11)'deki gibi bir optimal moment verir (Abad, 2011).

$$T_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 [R^2 \Omega t^2 \frac{C_{pmax}}{\partial opt^3}] \quad (3.11)$$

Şekil 3.7 (b)'de görüldüğü üzere tüm sistemin kontrolü gerçekleştirilerek 2 MW'lık bir çift beslemeli asenkron generatör tabanlı rüzgar türbin modeli oluşturulmuştur. Sistemde Şekil 3.3' deki şebeke tarafı modeli ve rotor tarafı modeli kullanılarak Park ve Clarke dönüşümü, PLL, transformatör ve dönüştürücüler gibi gerekli yapılar kullanılarak kontrol devreleri oluşturulmuş ve arka arkaya iki dönüştürücüye sahip bir asenkron generatöre indüktör üzerinden çift besleme yapılarak kontrol devreleri ile kontrolü gerçekleştirilmiştir.



(a)



Şekil 3.7. a) Çift beslemeli asenkron generatör tabanlı rüzgar türbininin modellenmiş hali b) Şebeke ile senkron çalışan kontrol yapısına sahip rüzgar modeli

3.5. STATCOM

STATCOM, gerilim kaynaklı DC/AC konvertör üzerine temellendirilmiştir. STATCOM çıkışında şebeke frekansında, kontrol edilebilir genlikte ve faz açısında, dengeli üç faz gerilimler elde edilir. Bu düzenlemede AC sistem ile aygıt arasındaki sürekli durum güç alışverişi genel olarak reaktiftir. STATCOM ve AC sistem arasındaki reaktif güç alışverişi dönüştürücü çıkış geriliminin büyüklüğü ve faz açısı ayarlanarak kontrol edilir. Bunun için STATCOM devresindeki inverterin AC çıkış geriliminin genlik ve frekansının ayarlanması gerekmektedir. Eğer STATCOM çıkış geriliminin büyüklüğü AC sistem geriliminin büyüklüğünü aşarsa ($V_{statcom} > V_{ac}$) I akımı transformatör reaktansı yolu ile STATCOM'dan AC sisteme akar ve cihaz iletim hattı için reaktif güç üretir. Dönüştürücü çıkış akımı iletim hattı geriliminden ileridedir. Bu durumda cihaz kapasitif modda çalışmış olur. Kapsitör, inverter için gerekli DC gerilimi sağlamak için kullanılır. İnverter çıkış gerilimi ile AC sistem gerilimi arasındaki faz farkına bağlı olarak kapasitör şarj veya deşarj olmaktadır. Transformator direncinin ihmal edilmesi durumunda AC sistemden STATCOM'a akan aktif güç (Karataş, 2011);

$$P = \frac{V_{ac} * V_{statcom} * \sin \alpha}{X} \quad (3.12)$$

$\alpha > 0$ ise inverter çıkış gerilimi sistem geriliminden geri fazdadır. $P > 0$ olduğundan kapasitör şarj olur. $\alpha < 0$ ise $P < 0$ olur ve kapasitör deşarj olur.

STATCOM'dan AC sisteme ya da tam tersi durumda AC sistemden STATCOM'a akan reaktif güç ;

$$Q = \frac{V_{ac} * V_{statcom} \cos \alpha - V_{ac}^2}{X} \quad (3.13)$$

V_{ac} , AC sistem gerilimi, $V_{statcom}$, inverter çıkış gerilimi, X , trafoların eşdeğer reaktansı, α , gerilimler arası faz farkıdır. STATCOM'da V_{dc} gerilimi sabit tutularak mi modülasyon indeksinin değiştirilmesi ile inverterin AC çıkış geriliminin genliği hesaplanır.

$0 < mi < 1$ durumunda olan modülasyon indeksi genelde ;

$mi = 0.75$ durumunda herhangi bir güç alışverişi yoktur. $V_{ac} = V_{statcom}$

$mi = 0.65$ STATCOM indüktif modda $V_{ac} > V_{statcom}$

$mi = 0.85$ STATCOM kapasitif modda $V_{statcom} > V_{ac}$

STATCOM'da inverter çıkış gerilimi hesabı;

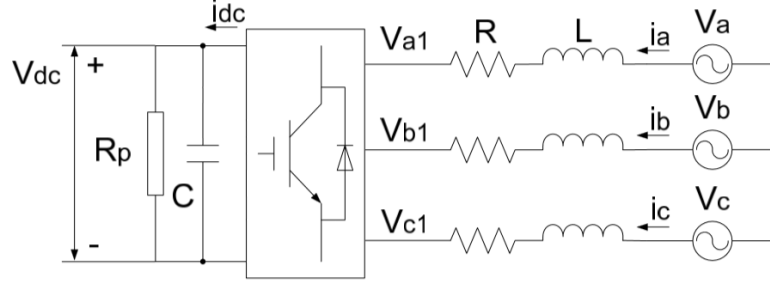
$$V_{statcom} = V_{ef} \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (3.14)$$

$$V_{ef} = V_{dc} \frac{mi}{2} \quad (3.15)$$

Bu denkleme göre DC gerilim sabit tutularak ve mi değeri değiştirilerek STATCOM çıkış gerilimi büyüklüğü değiştirilir ve STATCOM'un kapasitif ya da indüktif modda çalışması ile sistemde reaktif güç kompanzasyonu gerçekleşir. Böylece sistemin aktif ve reaktif gücünü belirli bir değerde tutmaya çalışır, kayıpları önler, gerilim düşmesi yaşanmadan elektrik enerjisinin üretildiği santralden en küçük alıcıya kadar en az kayıpla taşınmasını sağlar.

Sistem için uygun kontrol şeması tasarlanarak dc gerilim kaynaklı üç fazlı inverter modellemesi yapılmış ve hattın gelen akım ve gerilim değerleri sisteme verilerek

uzay vektör dönüşümleri ile STATCOM'un kontrolü inverterin IGBT güç elektroniği elemanları tetiklenmiş ve PWM kontrol tekniği kullanılmıştır. Şekil 3.8'de görüldüğü gibi sisteme reaktörler ile doğrudan bağlanmıştır.



Şekil 3.8. STATCOM eşdeğer devresi (Xu, 2009)

3.5.1. STATCOM konvertörlerin kontrol metotları

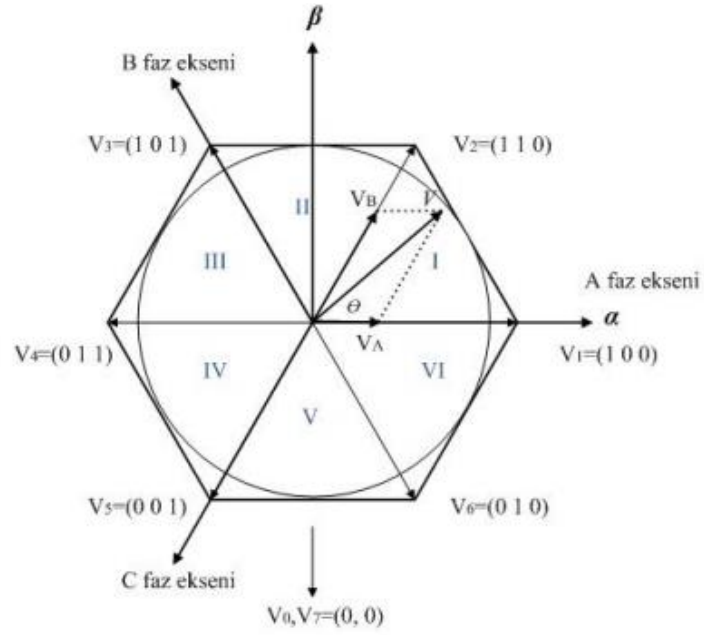
3.5.1.1. Sinüzoidal PWM (SPWM)

En yaygın kullanılan kontrol metotlarından biridir. Gerekli anahtarlama çıkışlarına göre düzenlenen üçgen dalga ile sinüzoidal dalganın karşılaştırılmasına dayalıdır. Modülasyon dalga genliğinin taşıyıcı genliğine oranına modülasyon indeksi denir. STATCOM'un çıkış gerilimi lineer çalışma modunda elde edilir. ($0 < m_i \leq 1$) ve faz gerilim limitlerinin aşıldığı $m_i \geq 1$ aşırı modülasyon mod üzerinde elde edilir. Bu çalışmada bu yöntem kullanılmıştır.

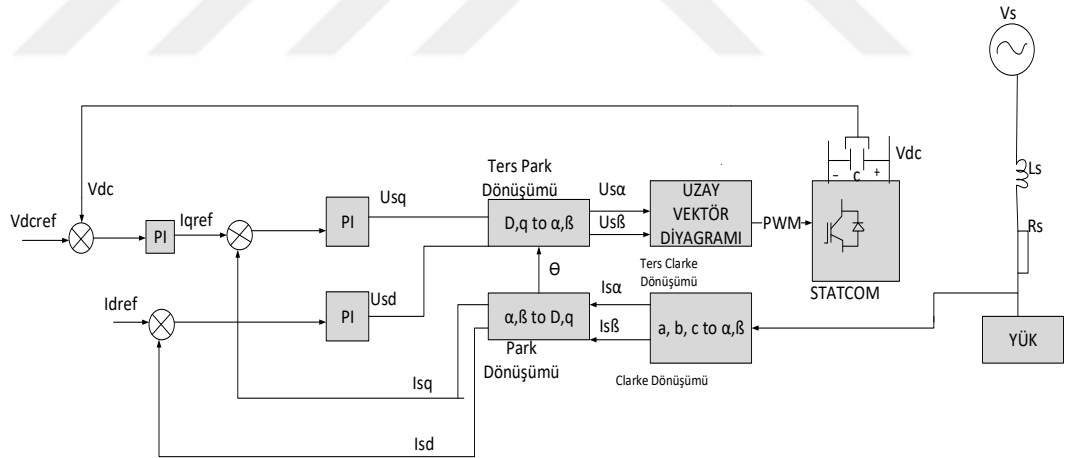
3.5.1.2. Uzak vektör PWM (UVM)

SVM yöntemi, değeri 0,866 olan bir maksimum gerilim aktarım oranı sunar (Karaca & Akkaya, 2014). Diğer metotlarla karşılaştırıldığında %15 daha yüksek çıkış gerilimi üretir. Uzak vektör diyagramı (Şekil 3.9) ile anahtarlama sinyallerinin üretilmesine dayanır (Shahnia, Rajakaruna, & Ghosh, 2015). Şekil 3.10'da uzak vektör tabanlı STATCOM modeli görülmektedir. Sistem üç fazlı bir generatör, alçak geçiren bara filtresi, α - β dönüşümü, α - β vektör sektörü, rampa üretici ve anahtarlama süresi hesaplayıcısı içerir. Üç fazlı generatör, 120° faz kaydırmalı modülasyon sinyalleri üretir ve α - β transformatörü, üç fazdan iki faza dönüşüm gerçekleştirir. Alçak geçiren bara

filtresi, dc bara gerilimi ölçümündeki hızlı geçişleri gidermek için kullanılır. İleri besleme yöntemi, yüklere uygulanan gerilim vektörünü hesaplamak için kullanılır.



Şekil 3.9. Uzak vektör diyagramı



Şekil 3.10. Uzak vektör modülasyon tabanlı STATCOM

3.5.1.3. Seçili harmoniklerin eliminasyonu PWM (SHE-PWM)

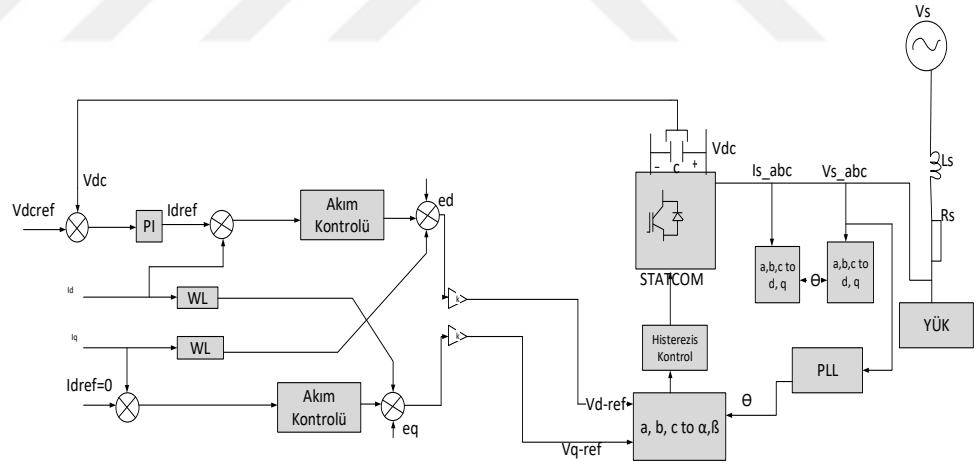
Temel frekans teorisine göre uygulanır. Temel fikir önceden saptanmış harmonikleri elimine etmektir. Newton-Raphson iterasyonu ile anahtarlama açıları elde

edilir. Anahtarlama açıları hızlı bir şekilde elde edilir, böylece şebekeye bağlı fotovoltaik sistem için, çevrimiçi kapalı döngü kontrolü, birim güç faktörü elde etme, sistem kararlılığını geliştirme ve harmonik bozulmayı etkili bir şekilde azaltma gerçekleştirilir.

3.5.1.4. Histeresiz Bant PWM (HB-PWM)

Histeresiz bant kontrolü en basit kapalı-döngü kontrol düzeneğinden biridir. d - q eksen vektörleri SVM modulatörde anahtarlama sinyallerini üretir, histeresiz kontrol edici α - β 'da ölü bandı güçlendirir. Şekil 3.11'de Histeresiz bant modülasyon tabanlı STATCOM gösterilmektedir (Shahnia et al., 2015). Bu işlem, çıkış akımını üst ve alt bant arasında salınım yapmasına izin verilen istenen histeresiz bandında tutmak için VSC'yi uygun şekilde anahtarlayarak gerçekleştirilir. Bu duruma ulaşmak için yük akımları ölçülür ve histeresiz karşılaştırıcıları tarafından referans değerlerle karşılaştırılır.

d eksen ve q eksen vektörleri, SVM modülatöründe yapıldığı gibi anahtarlama sinyallerini üretir ve histeresiz kontrolörü Şekil 3.11'de gösterildiği gibi α - β düzleminde ölü bandı zorlar.



Şekil 3.11. Histeresiz bant modülasyon tabanlı STATCOM

3.5.2. STATCOM Kontrolü için Gerekli Matematiksel İfadeler

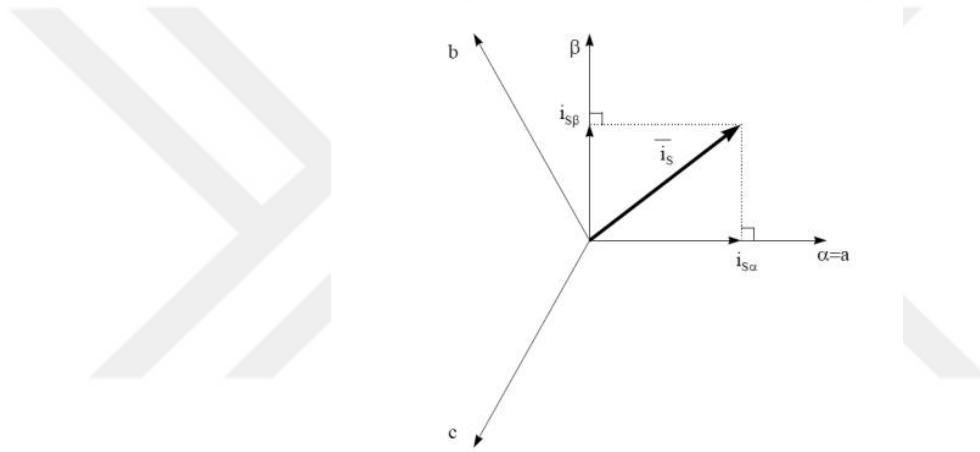
Kontrol edilen STATCOM kontrol mantığının bilinebilmesi ve STATCOM tasarımı yapılabilmesi için matematiksel modelinin ve kullanılan matematiksel ifadelerin bilinmesi gerekir. Burada anlaşılması gereken en önemli konu uzay vektör

diyagramlarıdır. Uzak vektör sisteminde kullanılması gereken koordinat dönüşüm sistemleri d,q ve α,β dönüşümleridir.

3.5.2.1. Vektörel dönüşümler

3.5.2.1.1. Clarke dönüşümü ($a,b,c \rightarrow \alpha,\beta$)

Üç fazlı bir sistemin elektriksel bilgilerinin iki faza dönüştürülmesi sağlanır. Şekil 3.12’de fazör diyagramları gösterilen vektörlerin üç fazdan iki faza dönüşümü gösterilmektedir (Sakarya, 2009).



Şekil 3.12. Clarke dönüşümü fazör diyagramı

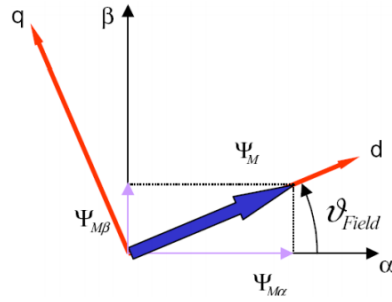
Grafikte, üç faz (a,b,c) vektör bilgisi, iki faz (α,β) vektör bilgisine dönüştürülmüş ve formül ile de dönüşüm gösterilmiştir. Buna göre;

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

3.5.2.1.2. Park dönüşümü ($\alpha,\beta \rightarrow d,q$)

Bu dönüşüm vektör kontrol sisteminin en önemli noktasıdır. Gerçekte, iki-fazlı birbirine dikey koordinatlarda olan (α,β) yı; (d,q) dönen referans büyüklüğe dönüştürür. Eğer d -eksenin rotor akısıyla ayarlandığı düşünülürse, aşağıdaki diyagram akım vektörü

için iki referans çerçevesi arasındaki ilişkiyi gösterir. Şekil 3.13’de dönüşüme ait grafik gösterilmektedir (Sakarya, 2009).



Şekil 3.13. Park dönüşümü fazör diyagramı

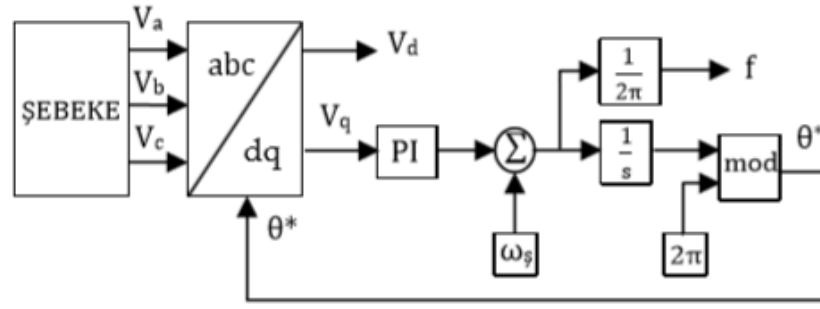
Buna göre denklem 3.17 ile sistem dönüşümü tamamlanmış olur.

$$\begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Aynı şekilde matrislerin transpozeleri alınırsa ters Clarke ve ters Park dönüşümü elde edilir.

3.5.2.2. Faz kilitleme döngüsü (PLL-phase locked loop)

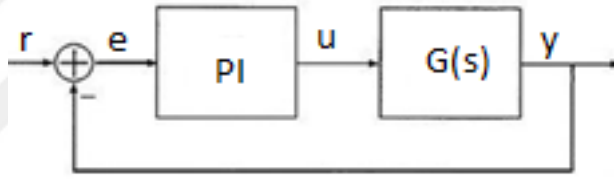
Şebekeye aktarılan akımın şebeke ile uyumlu olması için yani inverterinin şebeke ile senkron bir şekilde çalışabilmesi için şebeke geriliminin faz açısının belirlenmesi gerekir. Bunun için sıfır geçiş belirleme, şebeke gerilimlerinin filtrelenmesi ve faz kilitleme döngüsü yöntemi kullanılır. Faz kilitleme döngüsü rüzgar hızlarında faz açısını hızlı ve doğru şekilde belirler. Faz açısı doğru belirlenmediğinde sistem olumsuz etkileneceğinden bu döngü önemli yere sahiptir. PLL, bir referans veya giriş sinyalinin çıkış sinyali ile frekans ve faz eşitliğini sağlar. Çıkış sinyali ve giriş sinyali arasındaki faz hatasının sıfıra getirilmesi kilitleme olarak adlandırılır. Buna bağlı olarak STATCOM kontrol devresinde genellikle 20 ms geçici durumdan sonra θ faz açısı şebeke fazına kilitlenmiştir. Şekil 3.14’de PLL yapısı gösterilmektedir (Sevilmiş & Karaca, 2017).



Şekil 3.14. PLL Yapısı

3.5.2.3. Oransal-Integral (PI) Kontrolörler

PI kontrolörler geri beslemeli kontrol sistemlerinde en çok kullanılan algoritmalarlardır. Günümüzde çok kullanılan bir kontrol yöntemidir ve geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bir PI kontrolörün transfer fonksiyonu Şekil 3.15'deki formdadır.



Şekil 3.15. PI kontrol edici transfer fonksiyonu

$$G(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (3.18)$$

$u(s)$, kontrolör çıkışı, $e(s)$, hata sinyali, K_p , oransal kazanç, K_i , integral kazancıdır.

Bu eşitlik şu şekilde de ifade edilebilir (Karataş, 2011) :

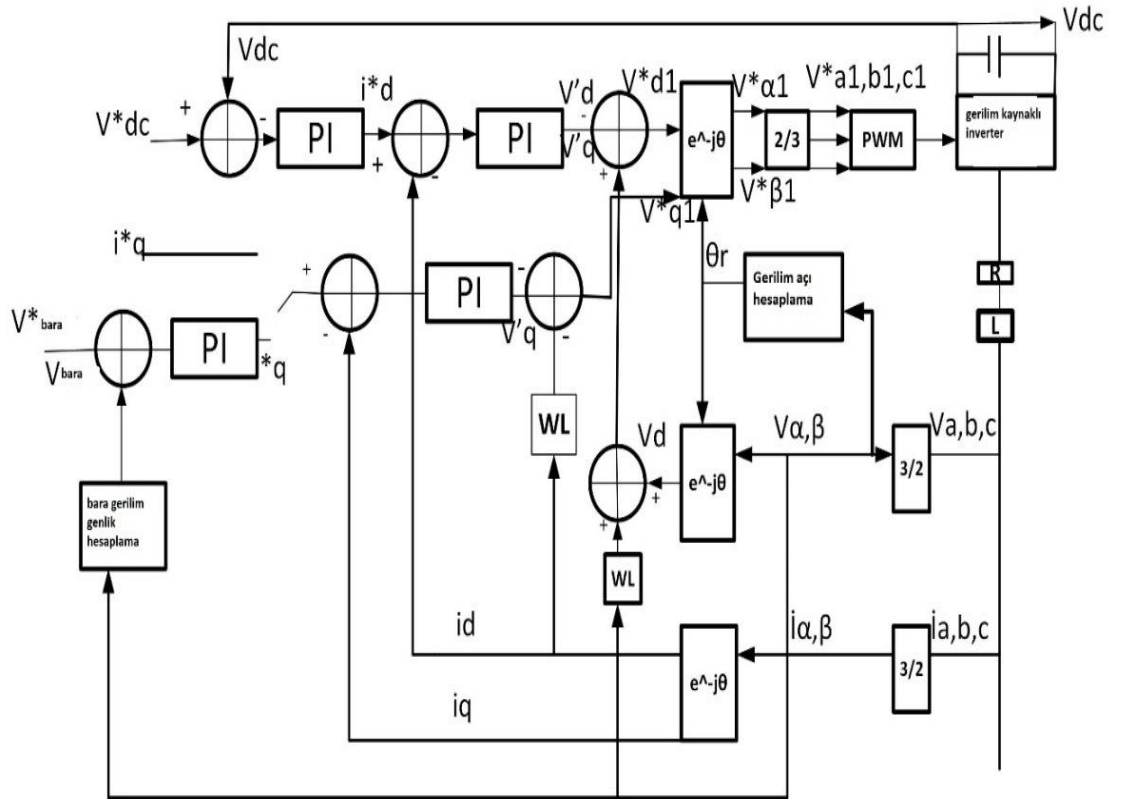
$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_C \left[1 + \frac{T_i}{s} \right] \quad (3.19)$$

$$T_i = \frac{K_i}{K_C} \text{ (integral zaman sabiti)} \quad (3.20)$$

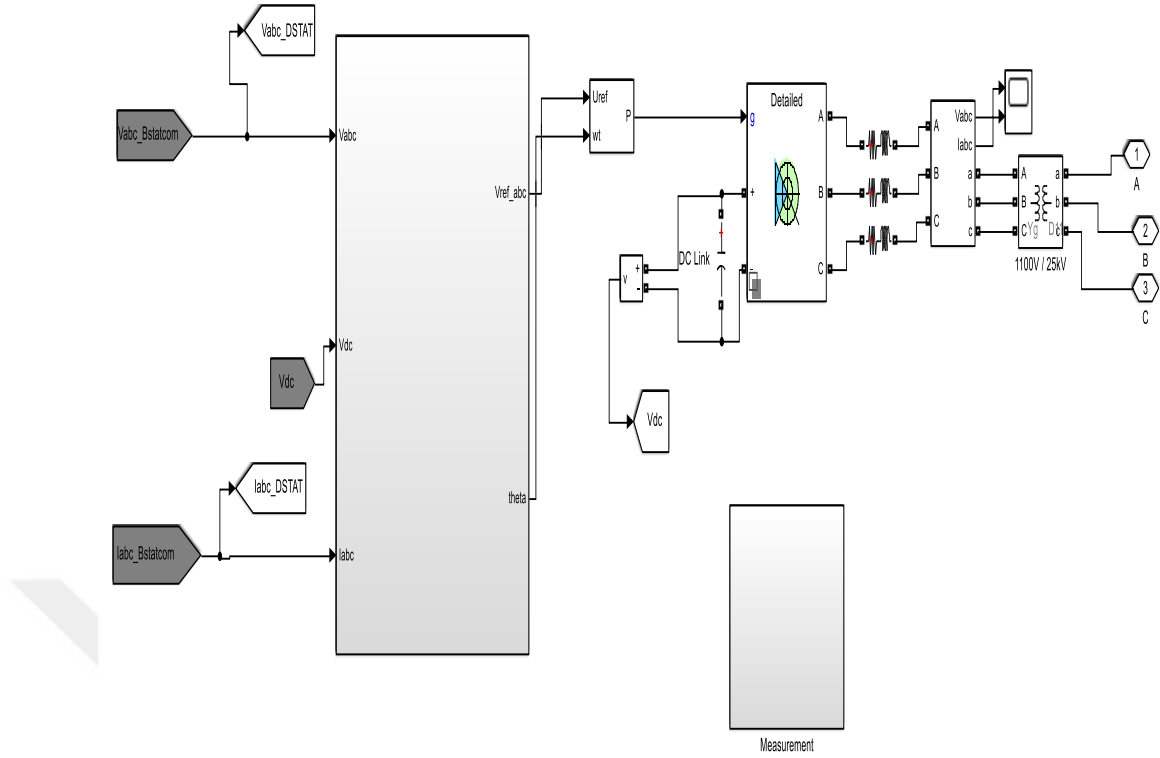
Hata sinyali istenilen giriş değeri ile gerçek çıkış değeri arasındaki farkı gösterir. Hata sinyali PI denetleyiciye gönderilir ve denetleyici bu hata sinyalinin integralini

hesaplar. Denetleyiciden geçen çıkış sinyali; oransal kazanç ile hata değeri, integral kazancı ile hatanın integrali çarpımlarının toplamına eşittir. Çıkış sinyali denetlenen sisteme gönderilir ve yeni çıkış elde edilmiş olur. Çıkış sinyali algılayıcıya geri gönderilerek yeni hata sinyali bulunur. Denetleyici yeni hata sinyaline aynı işlemleri uygular ve bu işlem böyle devam eder.

Şekil 3.16'da STATCOM'a ait bir kontrol devresi verilmiş ve bu kontrol devresine bağlı kalınarak uzay vektör dönüşümleri ve PI, PLL kullanılarak STATCOM Şekil 3.17'de Matlab/Simulink'te modellenmiştir.



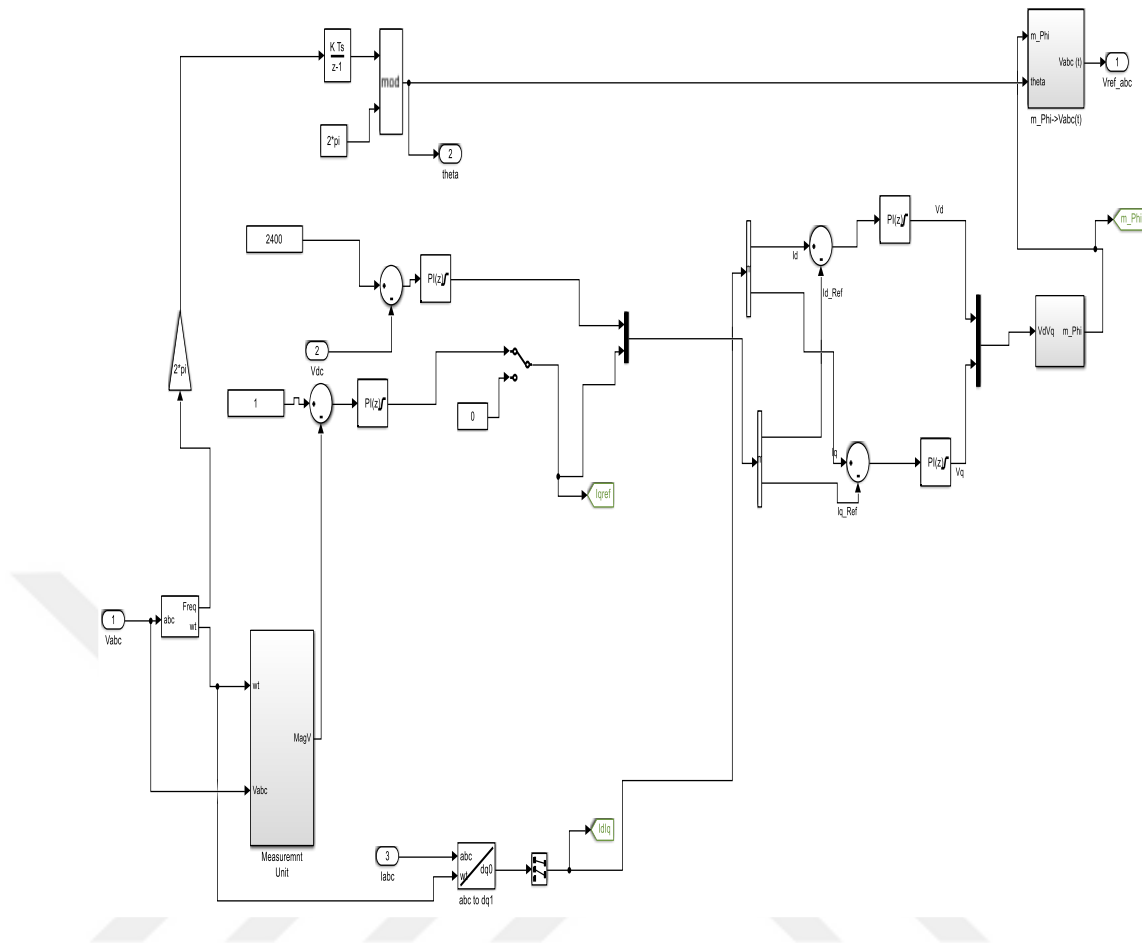
Şekil 3.16. STATCOM kontrol devresi (Xu, 2009)



Şekil 3.17. STATCOM simülasyon modeli

STATCOM kontrol edici birkaç fonksiyondan oluşmaktadır; PLL akım ve gerilim arasındaki faz farkını ölçer ve PI denetleyici ile bu faz farkını sıfıra getirmek için sistemin anahtarlama frekansı yakalanır. PLL, bir referans veya giriş sinyalinin çıkış sinyali ile frekans ve faz eşitliğini sağlar. Çıkış sinyali ve giriş sinyali arasındaki faz hatasının sıfıra getirilmesi kilitleme olarak adlandırılır. İki ölçüm sistemi; PLL tarafından üretilen $\cos\omega t$ ve $\sin\omega t$ ile abc - dq dönüşümü ile d - q unsurlarını saptar.

Bir akım regülatörü; d - q akımlarını kontrol eder ve V_{d-q} değerini V_{abc} 'ye çevirir, DC gerilim regülatörü; dc gerilimi nominal değerde tutmaya çalışır. Bir AC gerilim regülatörü bir PI kontrol edici sisteminde saptanan referans değere eşit birincil gerilimi korumaya çalışır. Bu aşamalar ile Şekil 3.18'de STATCOM kontrol devresi iç yapısı Matlab/Simulink'te modellenmiştir.



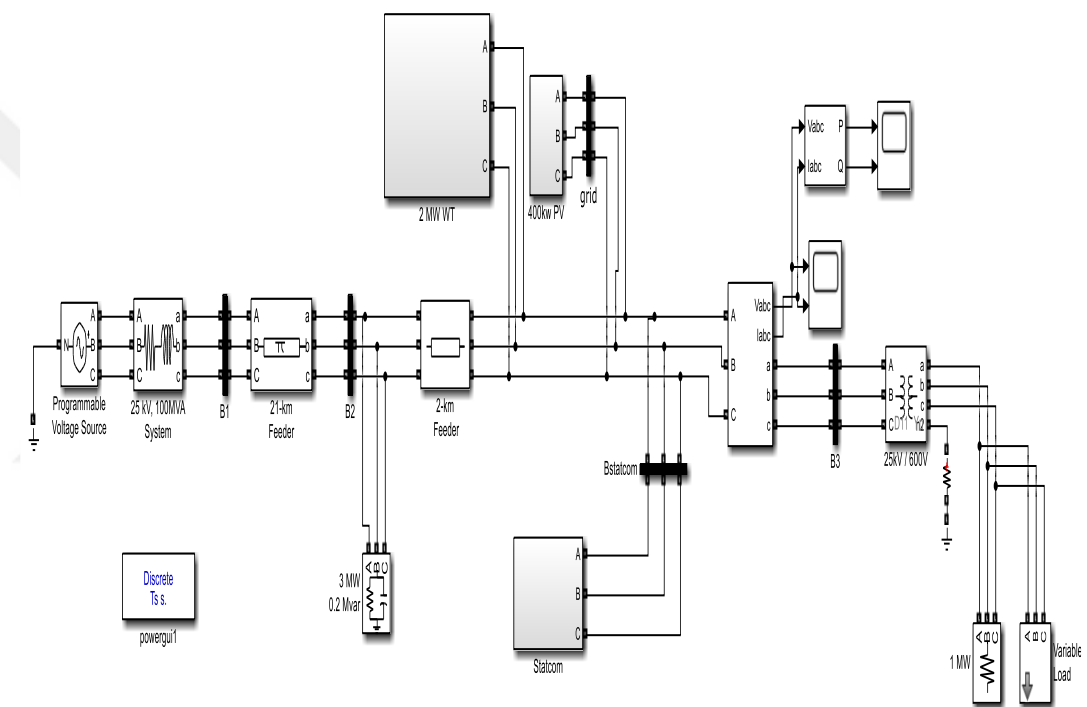
Şekil 3.18. Simulink’te modellenen STATCOM kontrol devresi

3.6. Hibrit Güneş/Rüzgar Sistemi

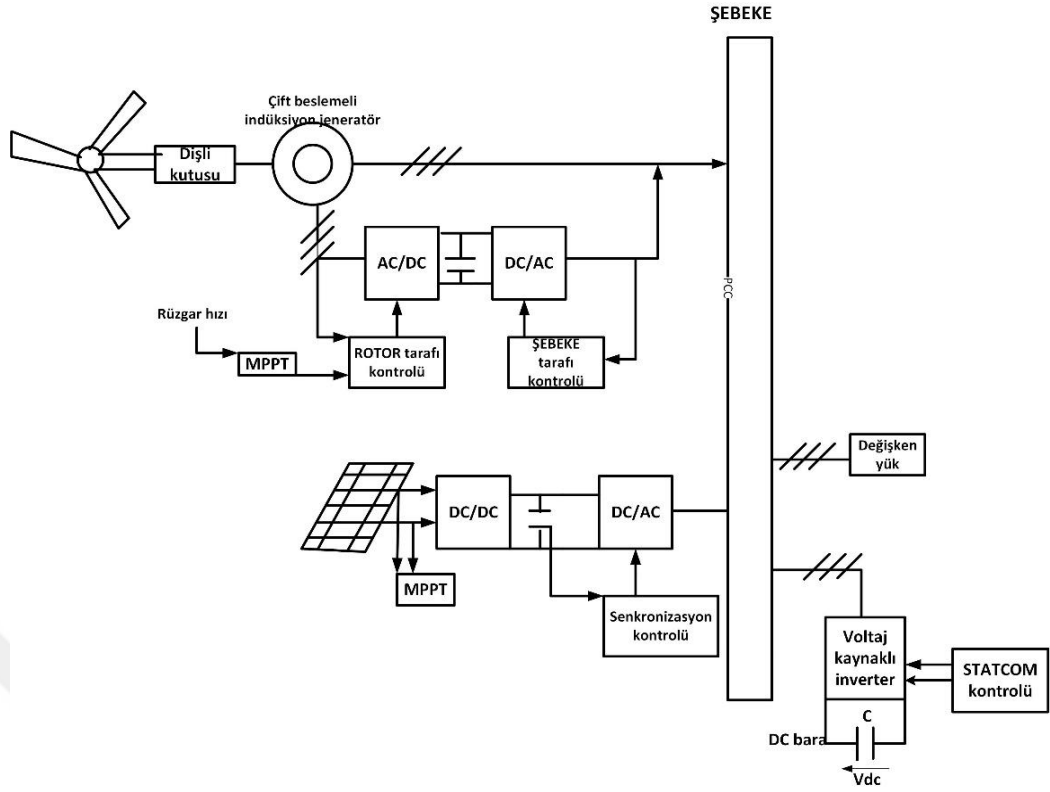
Rüzgar ve güneş sistemlerinin elektrik üretimi, hava şartlarına son derece bağlıdır. Rüzgar hızı ve güneş ışıınımı değişimi gibi doğal değişiklikler, rüzgar ve güneş sistemlerinin çıkışında dalgalanmalara neden olur. Bu sorunları hafifletebilmek için, rüzgar ve güneş kaynakları hibrit topolojileri kullanan diğer alternatif sistemler ile bütünleşebilir. Hibrit güç sistemi, iki veya daha fazla enerji kaynağı, konvertörler ve/veya depolama cihazlarının birleşiminden oluşur. İki sistemin bir arada bulunduğu durumda, tüketiciye sürekli ve güvenilir güç sağlayarak birbirlerinin zaafılarını oldukça iyi şekilde kapatabilirler.

Şekil 3.19’da Simulink’te modellenen Hibrit sistem gösterilmektedir. 25 kV 100 MVA’lık bir dağıtım sistemi kullanılmıştır ve 21 km ve 2 km lik hatlar B2 ve B3’de bağlı yüklere güç iletmek için kullanılmıştır. 0,4 MW gücünde, şebeke ile senkron çalışan PV

sistem ile 2 MW'lık rüzgar enerji sistemi B3 üzerinde ortak kuplaj noktasına (PCC-Point Common of Coupling) bağlanmıştır ve sistemin önce STATCOM yok iken B3 üzerindeki akım, gerilim, aktif, reaktif güç değerleri ölçülmüştür. Aynı ortak noktaya 3 MVAR'lık bir STATCOM ilave edilerek gerilim regülasyonu için kullanılmıştır. STATCOM içeren hibrit sistemde hat sonunda 1 MVA ve 5.2 MVA arasında değişen bir değişken yük akım genişliği kullanılmıştır. STATCOM gerilimi ve referans gerilimi 1 p.u'de tutmak için sistem 1.077 p.u'de programlanmıştır. STATCOM varlığında tüm sistemin blok şeması Şekil 3.20'de verilmiştir.



Şekil 3.19. Simulink’te modellenen STATCOM içeren Güneş-Rüzgar Hibrit Sistem



Şekil 3.20. Modellenen STATCOM içeren Güneş-Rüzgar Hibrit Sistem blok şeması

3.7. STATCOM'un optimizasyonu

PI denetleyicileri, geri bildirim denetleyicilerinde en sık kullanılan algoritmalar. Günümüzde yaygın olarak kullanılan bir kontrol yöntemidir ve geniş bir uygulama alanına sahiptir.

Geleneksel PI kontrol cihazındaki parametreleri hesaplamak için doğal frekans (w_n) elde edilir. Çalışmada w_n değeri için yerleşme süresi (Tsai et al.) 20 ms olarak alınmış ve denklem (3.21) kullanılarak hesaplanmıştır. PI katsayıları denklem (3.22) ve (3.23) kullanılarak elde edilir. En iyi sönüm için $\varepsilon = 0.707$ 'dir. V_{max} bara sonunda gerilim sinyalinin maksimum değeridir (Teodorescu, Liserre, & Rodriguez, 2011).

$$w_n = \frac{4.6}{t_s \varepsilon} \quad (3.21)$$

$$K_p = \frac{2\varepsilon w_n}{V_{max}} \quad (3.22)$$

$$K_i = \frac{w_n^2}{V_{max}} \quad (3.23)$$

Geleneksel PI kontrolörünün performansı belirsiz dinamikler, zaman gecikmeleri ve doğrusal olmayan sistemler için kabul edilebilir değildir. Bu, tatmin edici bir yanıt almak için PI parametrelerinin otomatik olarak ayarlanmasını gerektirir. Bu çalışmada zaman alanı kriteri PI kontrolörünü değerlendirmek için kullanılmıştır. Zaman alanındaki bir dizi iyi kontrol parametresi P, I, tepki süresinin kalmasına ve sabit durum hatasının en aza indirilmesine neden olur. Kontrol sisteminde, kontrol cihazı ayar sabitleri yanlış değer alırsa, sistemin özellikleri bozulabilir ve sistem kararsız hale gelebilir. Bu nedenle, kontrolör parametrelerinin optimum şekilde ayarlanması ve uygun ayar sabitlerinin seçilmesi, bu kontrolün üstün performansında önemli bir role sahiptir.

En yaygın performans kriteri denklem (3.25)'de gösterilen Integral Mutlak Zaman Hatası (ITAE)'dir. Denklem (3.24)'de gösterilen Integral Mutlak Hata (IAE)'nin ve denklem (3.26)'da Integral Kare Hata (Teodorescu et al.) kriterlerinin dezavantajı, en aza indirme işleminin nispeten düşük olmasına rağmen, tepki süresinin uzun olmasıdır. Bunun nedeni, bu performans kriterlerinin tüm hataları zamandan bağımsız olarak eşit olarak yüklemesidir. Bu dezavantaj ITAE ve denklem (3.27)'deki Integral Kare Zaman Hatası (ITSE) kullanılarak giderilir (Hajisalem, 2013).

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (3.24)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (3.25)$$

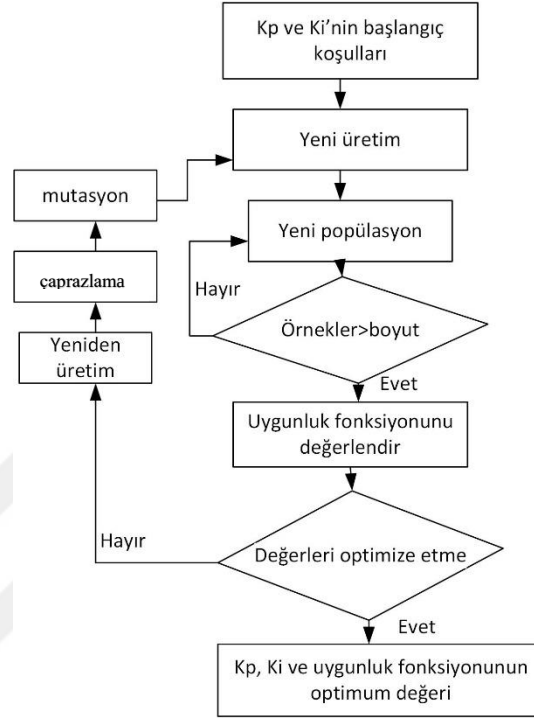
$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (3.26)$$

$$ITSE = \int_0^{\infty} t e^2(t) dt \quad (3.27)$$

3.8. Genetik Algoritma (GA)

Genetik programlama problemleri çözmek için üç temel işlem uygular: Adım1: Bir çözüm grubu (yeni popülasyon) oluşturulur. Adım 2: Her bir kromozomun (bireysel) uygunluk değeri, objektif fonksiyon kullanılarak hesaplanır. Genetik algoritmanın başarısı genellikle bu fonksiyonun tespit başarısına bağlıdır. Bu adımda en iyi birey yerel bir çözüm olarak seçilir ve saklanır. Adım 3: Durma kriteri test edilir. Kriter karşılanırsa, algoritma durdurulur. Kriter karşılanmazsa bir sonraki adım devam eder. Nüfus, geçilecek bireyler yaratırken uygunluk değerlerine dayanır. Seçilen bireyler, yeni bireyler elde etmek için çaprazlanır ve mutasyona uğrattılır ve 2. adıma geri döndürülür. Ardından, en iyi uygunluk değerine göre optimizasyon değerleri bulunur.

GA, PSO gibi optimizasyon teknikleri bir amaç fonksiyon olarak ITAE, IAE, ITSE, ISE'ye göre STATCOM için K_p ve K_i kazanç parametrelerinin optimizasyonuna uygulanır. Şekil 3.21'deki akış şeması GA kullanarak STATCOM için K_p ve K_i kazanç sabitlerinin değerini optimize etme adımlarını göstermektedir (Saxena & Kumar, 2016).



Şekil 3.21. STATCOM'un optimizasyonu için GA akış diyagramı

3.9. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

Sezgisel yöntemlerden biri olan PSO tekniği ilk kez sosyolog-psikolog James Kennedy ve elektrik mühendisi Russel Eberhart tarafından 1995-1996 yılları arasında kuşların ve balık sürülerinin hareketinden ilham alan doğrusal olmayan sayısal problemler için en iyi sonuçları bulmak üzere tanıtıldı (Kennedy & Eberhart, 1995). PSO, çok parametrelili ve çok değişkenli optimizasyon problemlerine çözümler üretmek için kullanılan popülasyona dayalı bir olasılıksal optimizasyon yöntemidir.

Her parçacık bir hız-vektörü V_i^k tarafından temsil edilen bir hıza ve (i , parçacıkların indeksidir) bir X_i^k pozisyon vektörü tarafından temsil edilen bir pozisyona sahiptir. Her parçacık kendi en iyi P_i^{Lbest} pozisyonunu hatırlar. Sürü arasındaki en iyi pozisyon vektörü daha sonra bir P_i^{Global} vektöründe saklanır. Hızın, önceki hızdan yeni

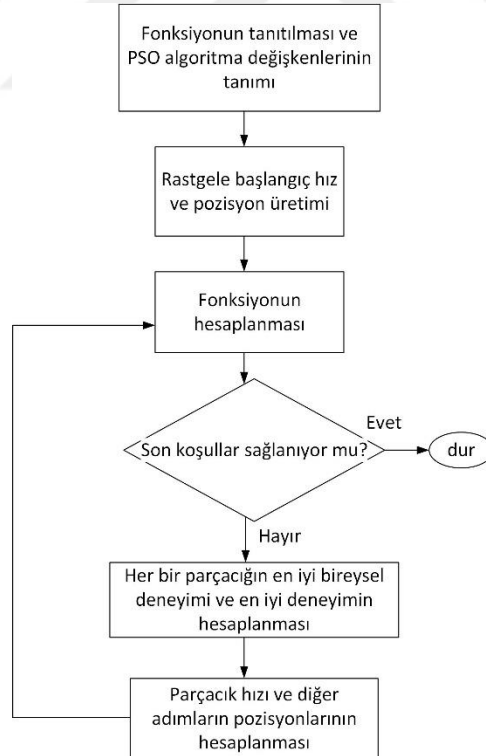
hıza güncellenmesi, yineleme süresi k sırasında belirlenir. Her partikülün mevcut hızı ve pozisyonu denklem (3.28) ve (3.29)'da gösterilen formüller kullanılarak hesaplanabilir.

$$V_i^{k+1} = V_i^k + c_1 * R_1(P_i^{Lbest} - X_i^k) + c_2 * R_2(P_i^{Global} - X_i^k) \quad (3.28)$$

Yeni pozisyon daha sonra önceki pozisyonun toplamı ve yeni hız ile belirlenir.

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (3.29)$$

Burada R_1 ve R_2 rastgele sayılardır. c_1 and c_2 katsayıları, parçacıkların bilişsel ve sosyal davranışlarının ağırlığı için kriterlerdir. Çok sayıda çalışmada değerler 2 olarak alınmıştır. Bir parçacık, en iyi geçmiş konumunun anısı olan kendi deneyimini ve sürünün içindeki en başarılı parçacığın deneyimini göz önünde bulundurarak, bir sonraki yere nereye gideceğine karar verir (Luo & Li, 2009). Şekil 3.22'de, STATCOM için PSO kullanarak K_p ve K_i kazanç sabitlerinin değerini optimize etme adımlarını göstermektedir.



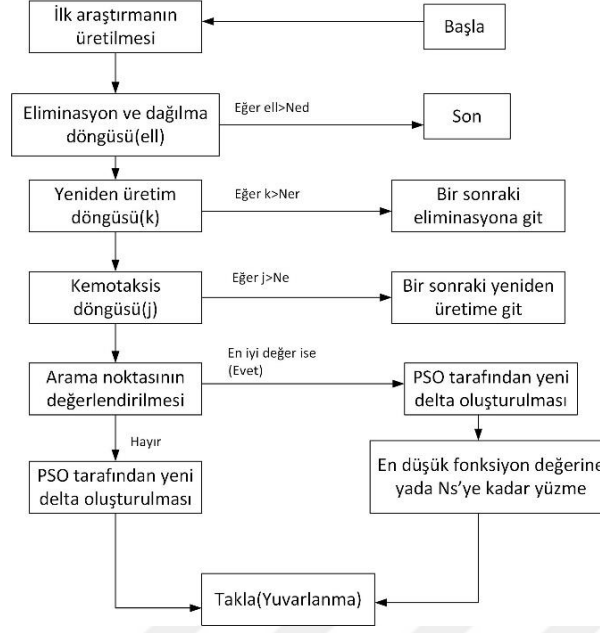
Şekil 3.22. STATCOM'un optimizasyonu için PSO akış diyagramı

3.10. Bakteri Yemek Arama algoritması tabanlı PSO (BF-PSO)

Bakterilerde yiyecek arama temelli PSO Optimizasyonu Algoritması, BFA ve PSO algoritmasının bir kombinasyonundan oluşan hibrit bir algoritmadır. BFA'nın dağınık bir durumda yeni bir çözüme ulaşma kabiliyetini ve artık algoritmanın PSO'nun paralel olarak aranmasını gerektirme yeteneğini kullanarak daha iyi sonuçlar verir. BF-PSO Optimizasyon Algoritması sekiz adımdan oluşur; Adım 1: başlama adımıdır, s , N_c , N_s , N_{re} , N_{ed} , P_{ed} gibi BFA parametreleri ve $c1$, $c2$, w gibi PSO parametreleri girilir ve ilk popülasyon numarası ve limit değişkenleri belirlenir.

w sabittir, N_s bakteri yuvarlama aşamasını verir, s bakteri sayısıdır, N_c bakteri kemotaksisi verir, P_{ed} dağılım olasılık değerini verir, N_{ed} parçalanma bakteri sayısını verir, N_{re} bakteri üreme sayısını verir. Adım 2: $i = 1$: N_{re} için üreme yapılır. Adım 3: Bu adım Kemotaksis'i verir, hedefler $i = 1$: N_c 'yi hesaplamak için çağrılır. Adım 4: Eğer yuvarlanma N_s yuvarlanma adımlarının sayısından az ise, hedefleri PSO'nun mevcut pozisyonunu ve değişkenlerini güncellemek için çağrılır. Adım 5: Dağılma, hedefleri hesaplamak için çağrılır ve $rand > P_{ed}$ tekrar başlangıç noktasını bulur. Adım 6: 3. adıma geri döner ve hız, konum ve yerel optimizasyon güncellenir. Adım 7: Adım 2'ye dönlür.

Adım 8: Sistemin optimizasyon sonuçlarını verir. Amaç işlevinin her başlangıcında veya yeni hızın hesaplanmasında elde edilen güncelleme değerlerinin tümü, değişkenlerin ve hızların üst ve alt değerlerine göre sınırlandırılmıştır (Luo, Chen, & Che, 2010). Akış diyagramı, Şekil 3.23'de STATCOM için BF-PSO kullanılarak K_p ve K_i kazanç sabitlerinin değerini optimize etme adımlarını göstermektedir.



Şekil 3.23. STATCOM'un optimizasyonu için BF-PSO akış diyagramı

3.11. Amaç Fonksiyonunun Formülasyonu

Bu çalışmada ITAE kullanılmakta ve optimizasyon performans kriterleri ' J ' olarak adlandırılmaktadır. ITAE fonksiyonu Denklem (3.30)'da gösterilmektedir.

$$J_{ITAE} = \int_0^T |(error)| td(t) \quad (3.30)$$

İntegralin üst sınırı olarak adlandırılan T , genellikle integralin sabit durum değerine meyilli olduğu yerleşme süresine eşit büyüklükten daha büyük olarak seçilir. STATCOM'un kontrol devresindeki hataların toplamı Denklem (3.31)'deki gibi amaç fonksiyonu olarak kabul edilir.

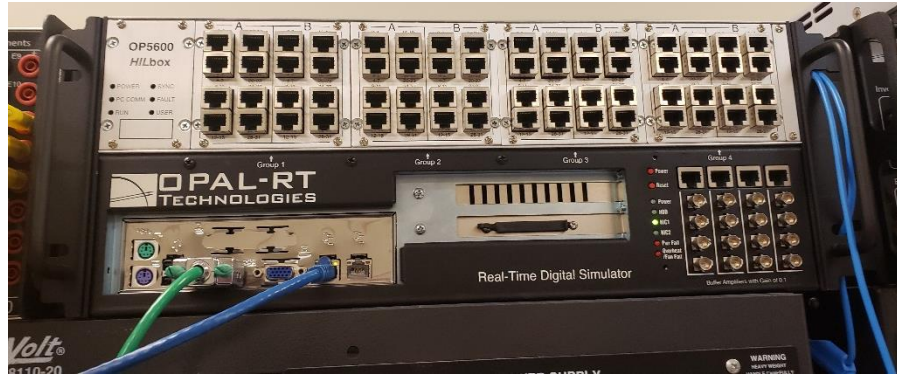
$$OF(X) = w \int_0^T |e_{ac}|td(t) + \int_0^T |e_{dc}|td(t) + \int_0^T |e_{iq}|td(t) + \int_0^T |e_{id}|td(t) \quad (3.31)$$

Burada, $X = [K_{p1} K_{i1} K_{p2} K_{i2} K_{p3} K_{i3} K_{p4} K_{i4}]$ ve w ağırlık faktörüdür. Bu denklem, dc gerilim kontrolörü, ac gerilim kontrolörü, akım kontrolörü (I_d , I_q) optimizasyon ile birlikte düzenlemek için kullanılır. STATCOM'un kontrol devresi, Şekil 3.24'de gösterildiği gibi yapılandırılmıştır. Toplam hata değeri Simulink'teki ITAE formülasyonuna göre hesaplanır ve ITAE formülasyonuna göre optimize edilir. Diğer

Otomotiv, havacılık, güç elektroniği ve güç sistemleri endüstrilerindeki en karmaşık gerçek zamanlı simülasyon uygulamalarını elde etmek için esneklik ve ölçeklenebilirlik sağlar. Yaklaşık 20 yıl önce Kanada Uzay Ajansı'nın Kanada kolunda ilk kez uygulanmasından bu yana RT-LAB, ister yerde ister denizde olsun, sistem mühendisliği dünyasında devrim yaratmıştır. RT-LAB, mühendislerin ve bilim adamlarının yeni prototiplerin geliştirilmesini hızlandırmasını ve yeni ve yenilikçi tarafından istenen en zorlu testleri karşılamalarını sağlar (Software, 2019).

3.12.2. OPAL-RT

Şekil 3.25'deki OPAL-RT, PC / Alan Programlama Kapı Dizisi (FPGA) tabanlı gerçek zamanlı simülatörlerin, Loop Donanım test ekipmanlarının ve kontrol ve korumanın tasarlanması, test edilmesi ve optimize edilmesi için Hızlı Kontrol Prototiplendirme (RCP) sistemlerinin geliştirilmesinde ileri seviyededir. Elektrik şebekelerinde, motor sürücülerinde, otomotivde, trenlerde, uçaklarda ve çeşitli endüstrilerde ve ayrıca Ar-Ge merkezlerinde ve üniversitelerde kullanılan sistemlerdir (Software, 2019).



Şekil 3.25. Opal-RT-5600

3.12.3. Gerçek Zamanlı İzleme ve Kontrol Donanımı

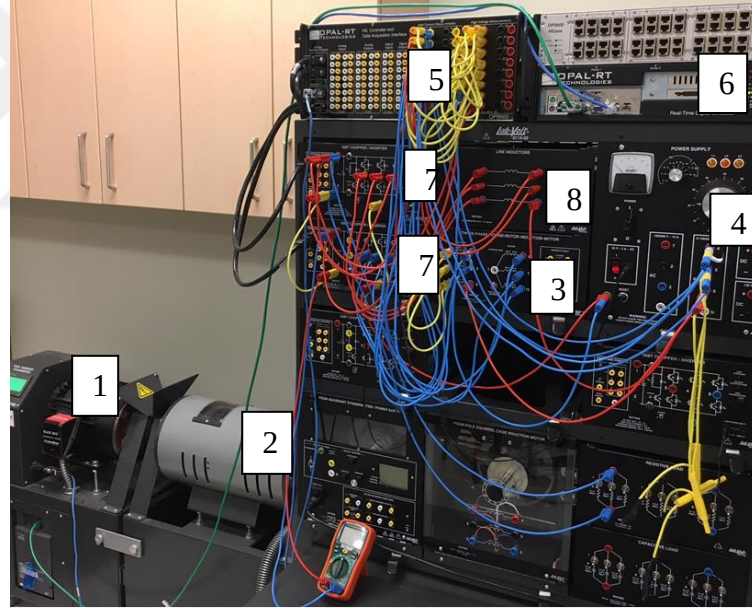
Kontrol sistemine ve optimizasyona dayanan mikro-şebekenin hızlı kontrol prototipleme (Rapid Control Prototyping-RCP), Şekil 3.26'da gösterildiği gibi Opal-RT donanımı (OP5600 ve OP8660) kullanılarak yapılmıştır. Gerçek zamanlı dijital simülatör olan OP5600, RT-LAB gerçek zamanlı simülasyon yazılımı platformunu çalıştıran

analog ve dijital I / O sinyal modüllerinden, çok çekirdekli bir işlemciden ve FPGA'dan oluşur. En iyi hassasiyeti elde etmek için, düşük zaman adımli kontrollü mikroşebeke'nin gerçek zamanlı RCP'sini gerçekleştirmeyi sağlar.

RCP ve döngü içi donanım uygulamaları için güçlü bir araç yapan işlemci Intel Xeon QuadCore 2.40 GHz ile donatılmıştır. OP8660, HIL Kontrol Cihazı ve Veri Toplama Arabirimi, güç elektroniği ve güç sistemleri uygulamalarına uyarlanmış çoklu giriş ve çıkış kanalları sağlayarak gerçek zamanlı dijital simülatörün özelliklerini genişleten bir sinyal koşullandırma arayüzüdür. Çekirdeği, akım ve gerilimin $\pm 10V$ 'a dönüştürülmesini sağlayan yüksek akım ve yüksek gerilim giriş şartlandırma modülleri içerir (Software, 2019).

OP8660, sanal ortam (gerçek zamanlı simülatör OP5600) ile deneysel mikro şebeke sistemi (ÇBAG tabanlı rüzgar sistemi, inverterler, indüktanslar, şebeke) arasındaki bağlantı, Şekil 3.26'de gösterildiği gibidir.

- (1) Dinanometre(W)
- (2) ÇBAG makine
- (3) ÇBAG arayüz
- (4) 3-faz AC gerilim kaynağı
- (5) Veri toplama (OP8660)
- (6) RT kontrol edici (OP5660)
- (7) back to back dönüştürücü
- (8) Hat indüktansı



Şekil 3.26. ÇBAG tabanlı rüzgar enerji sistemi deney düzeneği

3.12.4. Gerçek Zamanlı İzleme ve Kontrol Yazılımı

Ölçüm, test ve kontrol için gerçek zamanlı bir yazılım uygulaması MATLAB / Simulink ortamında geliştirilmiştir ve gerçek zamanlı izleme için RT-LAB'ye entegre edilmiştir. RT-LAB, OP5600'ü kullanarak kontrollü mikroşebekenin gerçek zamanlı RCP'sini gerçekleştirebilen açık bir gerçek zamanlı simülasyon yazılımı ortamıdır.

Modeli farklı hedef işlemcilerde veya düğümlerde yürütmek için Şekil 3.27'deki gibi iki alt sisteme ayrılmıştır:

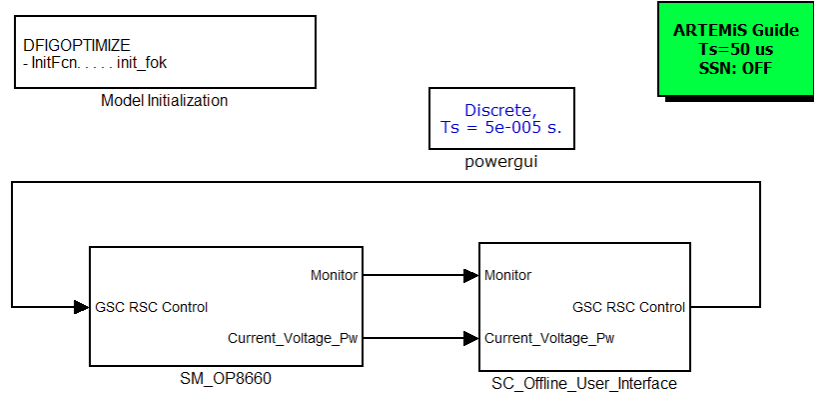
1- Ön eki ile tanımlanması gereken konsol alt sistemi, komut istasyonunda-PC'de yürütülür ve kapsamlar, ekranlar ve başvuru komutu gibi kullanıcı arabirimi blokları içerir;

2- Ön eki tarafından tanımlanması gereken ana alt sistem

OP5600'ün CPU çekirdek işlemcisinde yürütülür ve modelin tüm hesaplama öğelerini, algoritmaların matematiksel işlemlerini ve giriş-çıkış bloklarını içerir.

İki alt sistem farklı hedeflerde veya düğümlerde yürütüldüğü için, aralarındaki iletişim ve senkronizasyon, RT-LAB OpComm blokları vasıtasıyla yapılır. Kontrol sisteminin Simulink modeli RT-LAB üzerinden açılır ve gerçek zamanlı hedefte (OP5600) derlenir, daha sonra ana alt sistem için OP5600'ün CPU çekirdeğine RT-LAB tarafından otomatik olarak yüklenir.

Son olarak, Şekil 3.27'deki modelin alt sistemleri, OP5600'ün CPU çekirdeğinde, SM alt sistemi için ve komut istasyonu PC'de, SC alt sisteminin motoru gerçek zamanlı olarak çalıştırması için tüm sıralama, iletişim ve senkronizasyon işlemlerinde yürütülür, süreçler RT-LAB tarafından yönetilir.



Şekil 3.27. RT-LAB alt sistemleri

3.12.5. Simulink'teki modelin RT-LAB modeline dönüştürülmesi

Kullanılan cihazlar ve RT-LAB 2011 Matlab versiyonuna göre çalışmaktadır, öncelikle 2011 versiyonunda modellenen Simulink modeli için tüm girişler, çıkışlar, inverterlerin darbeleri Şekil 3.28'de gösterilen arayüze girilir. Bu ara yüzde örneğin

$$\begin{cases} \frac{di_{rd}}{dt} = -a i_{rd} + s \omega_s i_{rq} + \frac{R_s b}{\omega_s} V_s + \frac{1}{\sigma L_r} v_{rd} \\ \frac{di_{rq}}{dt} = -a i_{rq} - s \omega_s i_{rd} - b s V_s + \frac{1}{\sigma L_r} v_{rq} \end{cases} \quad (3.32)$$

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$, bir kaçak faktörüdür, $s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$, kaymayı ifade eder, $a = \frac{R_r L_s^2 + R_s L_m^2}{\sigma L_s^2 L_r}$, $b = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}$, R_s ve R_r , sırasıyla stator ve rotor dirençleri, L_s , L_r ve L_m stator, rotor endüktansları, i_{rd} ve i_{rq} , rotor akımının dq bileşenleri, v_{rd} ve v_{rq} , rotor gerilimi dq bileşenleri, ω_s senkron açısal hız, ω_r ise rotor hızıdır.

Rotor akımları ve stator akı oryantasyonu kullanılarak, ÇBAG stator tarafının aktif ve reaktif gücü, yaklaşık olarak;

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} V_s i_{rq} \\ Q_s = \frac{3}{2} \left(\frac{V_s \varphi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} V_s i_{rd} \right) \end{cases} \quad (3.33)$$

φ_s , stator akısıdır. Güç denkleminde, stator aktif gücünün, rotor akımının q bileşeni aracılığıyla doğrudan kontrol edilebildiği ve stator reaktif gücünün, rotor akımının d bileşeni aracılığıyla doğrudan kontrol edilebildiği gözlemlenebilir. Şebeke tarafında, mevcut dinamikler, d-q referans çerçevesi içinde aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L} i_d + \omega i_q - \frac{V_s}{L} + \frac{1}{L} v_d \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L} i_q - \omega i_d + \frac{1}{L} v_q \end{cases} \quad (3.34)$$

R , filtre direnci, L , filtre endüktansı, sırasıyla i_d ve i_q , şebeke akımının d-q bileşenleri, v_d ve v_q , ÇBAG stator gerilimi olan şebeke dönüştürücü geriliminin d-q bileşenleri ve ω şebeke açısal frekansıdır (Merabet et al., 2018).

3.13.2. Şebeke modellenmesi

Şebeke tarafında, vektör kontrolünün d bileşenleri $v_q = 0$ gibi senkronize edilir. Bu nedenle, şebeke tarafındaki aktif güç ve reaktif güç (3.35) ile gerçekleştirilebilir.

$$\begin{cases} P_g = v_d i_d \\ Q_g = -v_d i_q \end{cases} \quad (3.35)$$

Güç denkleminde, şebeke aktif gücünün şebeke akımının d -bileşeni ile doğrudan kontrol edilebildiği ve şebeke reaktif gücünün şebeke akımının q -bileşeni ile doğrudan kontrol edilebildiği görülmektedir. İki dönüştürücü arasındaki dc bağlantısı, (3.36) ile ifade edilen dinamiklere tabidir.

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{v_d}{CV_{dc}} i_d - \frac{1}{C} I_r \quad (3.36)$$

Gerilim dinamiklerinden, dc-link gerilimi, aktif gücün art arda dönüştürücülerden transferini sağlayacak olan şebeke akımının d -bileşeni tarafından düzenlenebilir (Tanvir, Merabet, & Beguenane, 2015).

3.13.3. Kontrol Sistemi

Şebeke tarafındaki dönüştürücüdeki kontrol sistemi, dc-link gerilimini dış kontrol döngüsü boyunca düzenlemeye ve şebeke akımlarını, Şekil 3.29'da gösterildiği gibi iç kontrol döngüsü boyunca düzenlemeye dayanır. Dış kontrol döngüsü bir PI kontrol cihazından oluşur ve referans kimliğini i_d^* sağlar. İç kontrol döngüsü, histerezis kontrol cihazına dayanır. Durum modelinden (3.37) türetilen dc-link gerilim kontrol yasası;

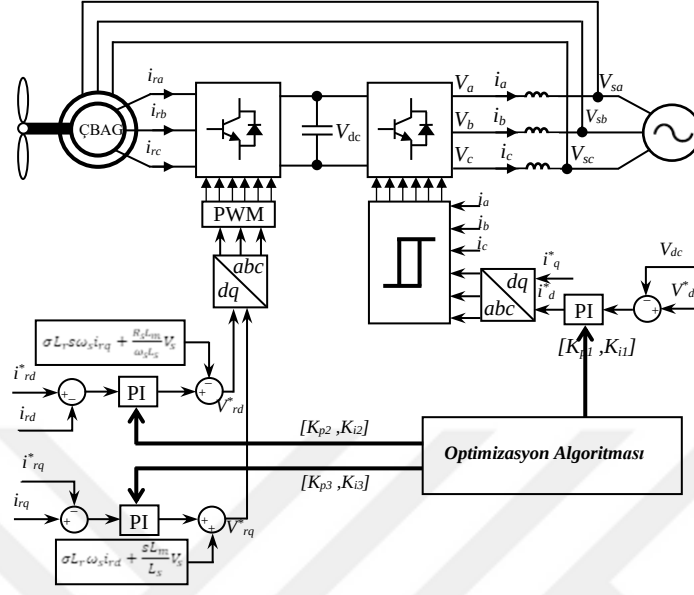
$$i_d^* = K_{p1} e_v + K_{i1} \int e_v d\tau \quad (3.37)$$

$e_v = V_{dc}^* - V_{dc}$, dc-link gerilimi için izleme hatasıdır. Rotor tarafı dönüştürücüsündeki kontrol, ÇBAG statorunun aktif ve reaktif gücünün kontrol edilmesini sağlayan rotor akımlarını düzenlemekten oluşur.

Durum modelinden türetilen kontrol yasası, denklem (3.38)'deki gibi PI kontrolörünü ve kompanzasyon terimini içerir.

$$\begin{cases} v_{rd}^* = K_{p2} e_d + K_{i2} \int e_d d\tau - \left(\sigma L_r s \omega_s i_{rq} + \frac{R_s L_m}{\omega_s L_s} V_s \right) \\ v_{rq}^* = K_{p3} e_q + K_{i3} \int e_q d\tau + \left(\sigma L_r \omega_s i_{rd} + \frac{s L_m}{L_s} V_s \right) \end{cases} \quad (3.38)$$

$e_d = i_{rd}^* - i_{rd}$ ve $e_q = i_{rq}^* - i_{rq}$ rotor akımlarının izleme hatalarıdır, K_p ve K_i , PI kontrol cihazının sırasıyla oransal kazanç ve integral kazancıdır.



Şekil 3.29. ÇBAG rüzgar enerji sisteminin rotor ve şebeke tarafları için kontrol sistemi

3.14. Bakteri Yemek Arama Optimizasyon Algoritması

Bakteri yemek arama optimizasyonu (BFA) algoritması, E. Coli gibi bakterilerin grup arama davranışlarından esinlenmiştir. Algoritma, yiyecek ararken küçük adımlarla belirli sinyallere doğru veya uzağa doğru hareket eden bakterilerin kemotaksis davranışını takip eder (Passino, 2002). Toplama stratejisi dört süreç tarafından yönetilir:

(1) Kemotaksis: Bu işlem, yiyecek zengini yeri arayan bakterilerin flagella yoluyla hareketi ile ilgilidir. Arama, önceki adımın aynı yönünde olduğunda, buna yüzme denir ve arama, önceki adımdan zıt yönde olduğunda, yuvarlanma olarak adlandırılır. Bakteri hareketi (3.39) (Tripathy & Mishra, 2007) ile tanımlanmıştır.

$$P(i, j + 1, k, l) = P(i, j, k, l) + C(i) \frac{\Delta(i)}{\sqrt{\Delta^T(i)\Delta(i)}} \quad (3.39)$$

$P(i, j, k, l)$ j . Kemotaksis'deki i . bakteridir, k . üreme ve l . eliminasyon-dağılma basamağı, $C(i)$, rastgele bir doğrultuda ele alınan adım büyüklüğüdür, $\Delta(i)$, keyfi bir yönü temsil etmek için $[-1, 1]$ 'den alınmış, rastgele sayılardan oluşan bir vektördür. $\Delta(i)$ büyüklüğü optimizasyon problemine bağlıdır.

(2) Yüzme: Bir bakteri ile optimum bir gıda yoluna ulaşıldığında, diğer bakteriler sürüleri adı verilen gruplar tarafından istenen yere ulaşmak için çekilir. Yüzme aşağıdaki denklem tarafından modellenmiştir (Chouhan, Kaul, Singh, & Jain, 2018).

$$J(i, j, k, l) = F(P(i, j, k, l)) \quad (3.40)$$

J , amaç fonksiyonudur, F , optimizasyon problemine dayalı bir fonksiyondur, P , optimize edilecek olan parametredir.

(3) Üreme: Sabit bakteri popülasyonunu korumak için, sağlıklı bakteri ölü sağlıksız bakterilerin yerini almak üzere aynı yönde iki bakteriye ayrılır. Kemotaksis sürecinde her bakteri sağlığı aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$J_{\text{health}}^i = \sum_{j=1}^{N_c+1} J(i, j, k, l) \quad (3.41)$$

J^{health} , bakterinin sağlığıdır ve N_c , kemotaksis basamağıdır. Sıralama sürecinde, daha yüksek maliyet daha düşük sağlık anlamına gelir.

(4) Eliminasyon: Dağılma: Küçük bir olasılığa bağlı olarak, P_{ed} , bazı bakteriler ölebilir veya başka bir bölgeye geçebilir (eliminasyon) ve yerine yeni bakteriler, arama alanındaki rastgele bir noktada ortaya çıkabilir. Bu çalışmada, d-ekseni rotor dc-link gerilimi V_{dc} ve d eksen akımı i_{rd} ve q eksen rotor akımı i_{rq} için izleme hatalarını en aza indirmek için PI kontrol kazançlarını ($\{K_{p1}, K_{i1}\}$, $\{K_{p2}, K_{i2}\}$, $\{K_{p3}, K_{i3}\}$) optimize etmektedir.

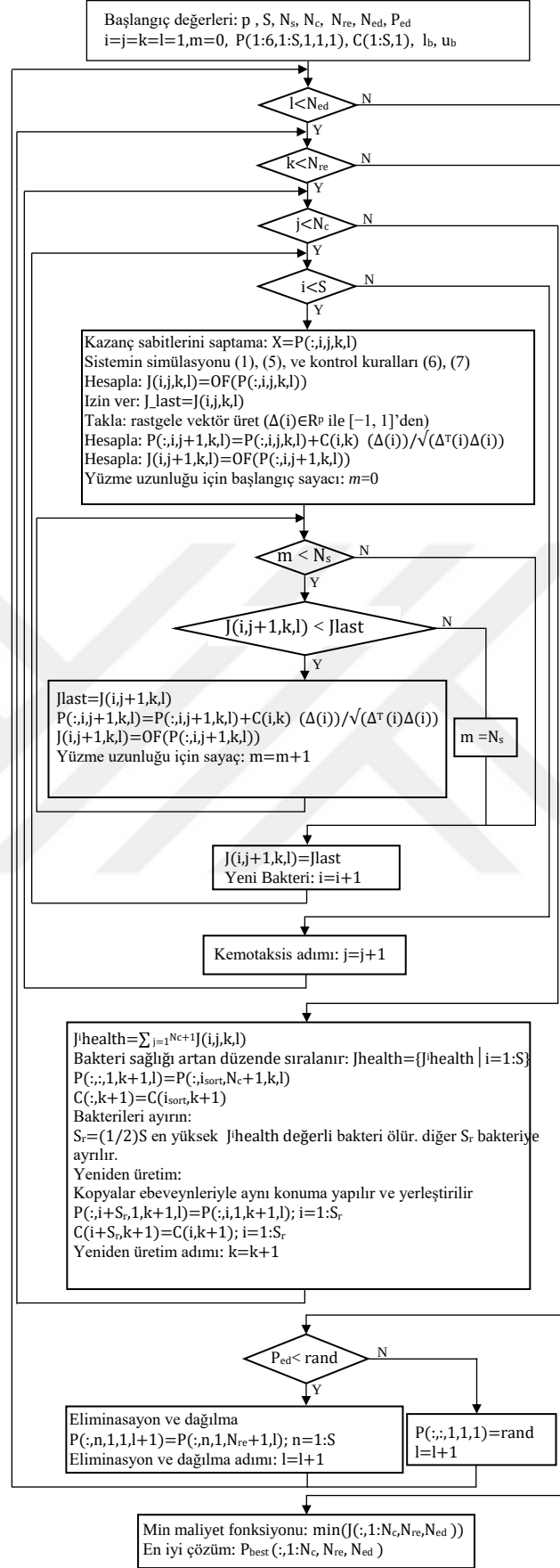
Bu nedenle, bakteri hareketi, aşağıdaki arama alanı boyutunda tanımlanmıştır.

$$P(:, i, j, k, l) = \begin{bmatrix} P(1, i, j, k, l) \\ P(2, i, j, k, l) \\ P(3, i, j, k, l) \\ P(4, i, j, k, l) \\ P(5, i, j, k, l) \\ P(6, i, j, k, l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{p1} \\ K_{i1} \\ K_{p2} \\ K_{i2} \\ K_{p3} \\ K_{i3} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

P parametreleri denklem (3.43)'teki gibi sınırlamalara tabi tutulur.

$$l_b \leq P \leq u_b \quad (3.43)$$

l_b ve u_b , sırasıyla alt ve üst sınırlardır. Amaç işlevinde kullanılacak F işlevi, bir sonraki bölümde açıklandığı gibi izleme hatalarıyla ilgili bir performans kriterine göre tanımlanacaktır. Bakterilerde yiyecek arama optimizasyonunun algoritması, Şekil 3.30'daki akış şemasında detaylarıyla açıklanmaktadır. Sırasıyla N_{ed} , N_{re} ve N_c sınırlarının ortadan kaldırılması, yayılması, çoğaltılması ve kemotaksis işlemleri için üç aşama içerir. Bu işlemler S bakteri sayısı için gerçekleştirilir. Bakteri hareket yolu P , tarif edildiği gibi optimize edilmiş kontrol kazançlarını temsil eder. Amaç J , izleme hatalarına ve ifade edildiği gibi optimize edilmiş parametrelerin değerlerine dayanan bir performans kriteri kullanılarak gerçekleştirilir. Yüzme, bir N_s uzunluğunda gerçekleşir. Üreme, S_r sağlıklı bakterilerin, en yüksek objektif fonksiyonlara dayanarak öldüğü yerde gerçekleştirilir. Bakteri grubunun büyüklüğü S orjinal büyüklüğü ile aynı tutulması için kopyalar üretilir ve ebeveynleriyle aynı yere yerleştirilir. Bu eliminasyon-dağılma işlemi P_{ed} olasılığına dayanır. Son olarak, en iyi çözüm minimum maliyet fonksiyonundan seçilir ve kontrol kazançlarının değerlerini temsil etmek için kullanılır. ÇBAG sistemi bu değerlerle çalıştırılır ve izleme hataları toplanır ve BFA yönteminin performansını değerlendirmek için diğer yöntemlerle karşılaştırılır.



Şekil 3.30. BFA algoritmasının akış şeması

3.15. Su Döngüsü Optimizasyon Algoritması

Su döngüsü optimizasyonu (WCA), su döngüsü olarak bilinen suyun sürekli hareketinden ilham alan bir tekniktir (Eskandar, Sadollah, Bahreininejad, & Hamdi, 2012). Bir nehir veya dere oluşturmak için yağmur damlaları veya dağlardaki ya da tepelerdeki karlar dağlardan aşağıya akar. Nehir-akarsu içeriği denizde toplanacak şekilde yolculuğa devam eder. Ek olarak, su buharlaşır ve atmosfere taşınır ve soğuk koşullar altında toprağa yağmur olarak geri dönecek şekilde yoğunlaşacak bulutları oluşturur. Bu işleme su döngüsü denir.

WCA algoritmasının başlangıcında, optimizasyon problemini çözmek için arama alanı içerisinde yağmur damlaları adı verilen bir başlangıç popülasyonu yaratılır (Sadollah, Eskandar, Lee, Yoo, & Kim, 2016).

En iyi yağmur damlası en uygun çözüm olan deniz olarak seçilir. Yağmur damlası, tek bir çözelti için, denklem (3.44)'deki gibi bir vektördür.

$$\text{Raindrops} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_N] \quad (3.44)$$

N , tasarım değişkenlerinin sayısını temsil eden optimizasyon probleminin boyutudur.

En uygun kontrol seçimi için Yağmur Damlası vektörü, üç PI kontrol cihazının altı parametresini içerir.

Bu nedenle, $N = 6$ ve (3.44) 'deki vektör aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6] = [K_{p1}, K_{i1}, K_{p2}, K_{i2}, K_{p3}, K_{i3}] \quad (3.45)$$

Yağmur Damlası vektörünün x_i ($i = 1-6$) parametreleri, aşağıdaki gibi sınırlamalara tabi tutulur.

$$l_b \leq x_i \leq u_b \quad (3.46)$$

l_b ve u_b sırasıyla sırasıyla alt ve üst sınırdır. Optimizasyon algoritması, bir yağmur damlası popülasyonu üreterek başlar, denklem (3.47)'deki gibi bir büyüklük matrisi ($N_p \times N$) ile temsil edilir;

$$\text{Population} = \begin{bmatrix} \text{Raindrops}_1 \\ \text{Raindrops}_2 \\ \vdots \\ \text{Raindrops}_{N_p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X^1 \\ X^2 \\ \vdots \\ X^{N_p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^1 & \cdots & x_N^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^{N_p} & \cdots & x_N^{N_p} \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

N_p , popülasyonun sayısıdır; X^i , Yağmur Damlası'nın ve $i = 1, \dots, N_p$ 'nin pozisyonudur.

Yağmur damlaları konumu, aşağıdaki gibi rasgele ifadeyle üretilir

$$X^i = l_b + (u_b - l_b) \times \text{rand}(1, N) \quad (3.48)$$

Yağmur damlaları maliyeti, C_i , aşağıdaki maliyet fonksiyonu hesaplanarak elde edilir.

$$C_i = F(X^i) \quad (3.49)$$

F , nesnel fonksiyondur ve $i = 1, \dots, N_p$. Bu çalışmada, optimum kontrolün amacı, gerilim kontrolü ve akım kontrolü için izleme hatalarını (e_v , e_d , e_q) en aza indirmektir. ITSE performans kriteri;

$$F(X^i) = \int_0^T (te_v^2 + te_d^2 + te_q^2) dt \quad (3.50)$$

Amaç fonksiyonunu gerçekleştirmek için, Şekil 3.29'da gösterilen ÇBAG enerji sistemi simüle edilir ve yağmur damlaları pozisyonları $X^i = [x_1^i, x_2^i, \dots, x_N^i]$ değerleriyle çalışır. Örneğin;

$$[K_{p1}, K_{i1}, K_{p2}, K_{i2}, K_{p3}, K_{i3}] = [x_1^i, x_2^i, x_3^i, x_4^i, x_5^i, x_6^i] \quad (3.51)$$

(3.49) 'deki C_i maliyetleri, artan düzende sıralanır. Asgari maliyet değerleri olan en iyi yağmur damlalarının sayısı, N_{sr} , aşağıdaki gibi bir dizi nehre ve bir deniz gibi saptanır.

$$N_{sr} = N_r + \underbrace{1}_{\text{deniz}} \quad (3.52)$$

Deniz, asgari maliyet değerleri arasında en düşük maliyet değerine sahip yağmur damlalarıdır. Optimizasyon probleminde deniz konumu en uygun çözümdür. Kalan nüfus, N_{st} , nehirlere akabilen veya doğrudan denize akabilen akarsuları içerir. Denklem (3.53) tarafından gerçekleştirilir;

$$N_{st} = N_p - N_{sr} \quad (3.53)$$

Sağlanan yağmur damlasının akış yoğunluğuna bağlı olarak denklem 3.54'deki gibi akarsular nehirlere veya denize tahsis edilmiştir.

$$NS_n = \text{round} \left\{ \left| \frac{c_n}{\sum_{i=1}^{N_{sr}} c_i} \right| \times N_{st} \right\}, n = 1, 2, \dots, N_{sr} \quad (3.54)$$

NS_n , belirli nehir ve denizlere akacak olan akarsu sayısıdır. Akarsular nehirlere ve nehirler denize doğru ilerler. Akarsu ve nehirler için güncellenmiş konumlar;

$$\begin{cases} X_{\text{stream}}^{i+1} = X_{\text{stream}}^i + \text{rand} \times C \times (X_{\text{river}}^i - X_{\text{stream}}^i) \\ X_{\text{river}}^{i+1} = X_{\text{river}}^i + \text{rand} \times C \times (X_{\text{sea}}^i - X_{\text{river}}^i) \end{cases} \quad (3.55)$$

$\text{rand} \in [0 \& 1]$ ve C , 1'den büyük bir sayıdır (en iyi değer 2'dir).

Yeni pozisyonların maliyetleri denklemleri kullanılarak gerçekleştirilir. Akarsu maliyetinin nehir maliyetinden düşük olduğu tespit edilirse, pozisyonları değiş tokuş edilir.

Aynı prosedür nehir ve deniz pozisyonları için de geçerlidir. En düşük maliyetle nehir pozisyonu deniz pozisyonu olur. Optimizasyon algoritmasının hızlı yakınsamasını önlemek için, nehirler veya akarsuların denize akması için yer bırakmak amacıyla deniz suyunun buharlaşması işlemi gerçekleşir. Bu işlem aşağıdaki koşula dayanır;

$$\text{if } |X_{\text{sea}}^i - X_{\text{river}}^i| < d_{\max} \quad \text{Buharlaşma ve yağmurlama işlemi yürütmek} \quad (3.56)$$

$i = 1, 2, \dots, N_{sr}-1$ ve $d_{\max}$ küçük bir sayıdır ($\rightarrow 0$). Nehir ve deniz arasındaki mesafe, $d_{\max}$ değerinden daha küçük olup, nehrin denize ulaştığını gösterir. Bu nedenle,

buharlaşma işlemi uygulanabilir ve yeterli buharlaşma sonrasında, yağmurlama işlemi doğada gözlemlendiği gibi başlayabilir.

d_{max} için kk bir değer denize yakın arama yoğunluğunu arttırırken, bk bir değer denize yakın aramaları azaltır. Bu nedenle, deniz kenarına yakın aramanın yoğunluğu (optimal çözüm), aşağıdaki şekilde azalarak güncellenen d_{max} ile kontrol edilebilir.

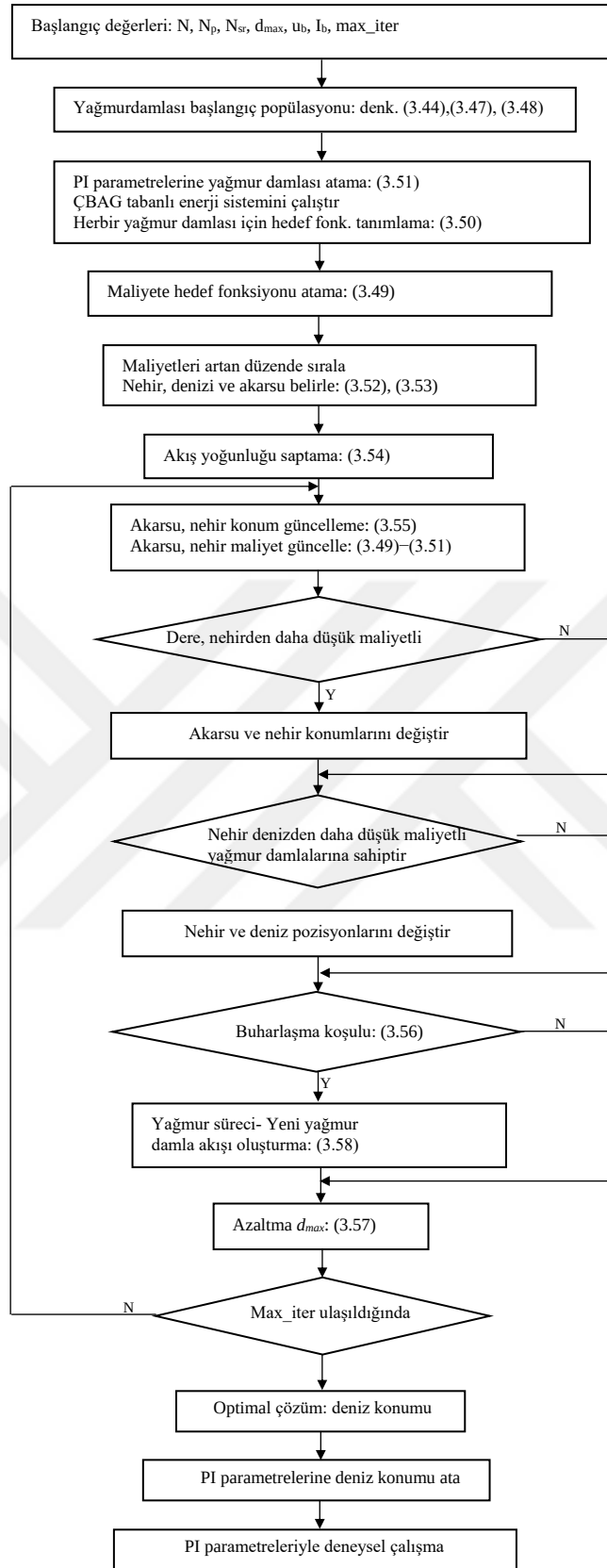
$$d_{max}^{i+1} = d_{max}^i - \frac{d_{max}^i}{max_iter} \quad (3.57)$$

max_iter , yineleme sayısıdır ve $i = 1, 2, \dots, max_iter$ 'dir.

Yağmur yağarken, yeni yağmur damlaları, tarafından belirtilen farklı konumlarda akışları oluşturur;

$$X_{stream}^{new} = l_b + (u_b - l_b) \times rand(1, N) \quad (3.58)$$

Optimizasyon algoritması, arama işleminde durdurma kriterine ulaşana kadar (max_iter) devam edecektir. Son olarak, deniz konumu en uygun çözümdür ve değerleri, PI kontrol parametreleri dc-link gerilimi V_{dc} , d-ekseni rotor akımı i_{rd} ve q-ekseni rotor akımı için izleme hatalarını en aza indirmek için kullanılacaktır. Sıraşıyla, su döngüsü optimizasyon algoritması, şekil 3.31'deki akış şemasında özetlenmiştir.



Şekil 3.31. WCA algoritmasının akış şeması

3.16. Optimizasyon için Performans Kriterleri

Bu çalışmada, ITAE, optimizasyon algoritmaları için bir performans kriteri olarak kullanılmış ve IAE, ISE ve ITSE ile karşılaştırılmıştır. ITSE ve ITAE'nin üstünlüğünü doğrulamak için karşılaştırma yapılır.

Performans kriterlerinin ifadeleri;

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (3.59)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (3.60)$$

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

$$ITSE = \int_0^{\infty} t e^2(t) dt \quad (3.62)$$

Optimizasyon hedefi, PI kontrol kazançlarını izleme hatalarını (e_v , e_d , e_q) en aza indirmek için ayarlamaktır. Amaç, aşağıdaki gibi ITAE kriteri kullanılarak tanımlanır.

$$OF(X) = [w_v \quad w_d \quad w_q] \begin{bmatrix} \int_0^T t |e_v| dt \\ \int_0^T t |e_d| dt \\ \int_0^T t |e_q| dt \end{bmatrix} \quad (3.63)$$

burada, $X = [K_{p1}, K_{i1}, K_{p2}, K_{i2}, K_{p3}, K_{i3}]^T$, kontrol kazançlarının vektörüdür, w_v , w_d ve w_q , ağırlıklandırma faktörleridir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Reaktif Güç Kompanzasyonu için STATCOM'un Simülasyon Sonuçları

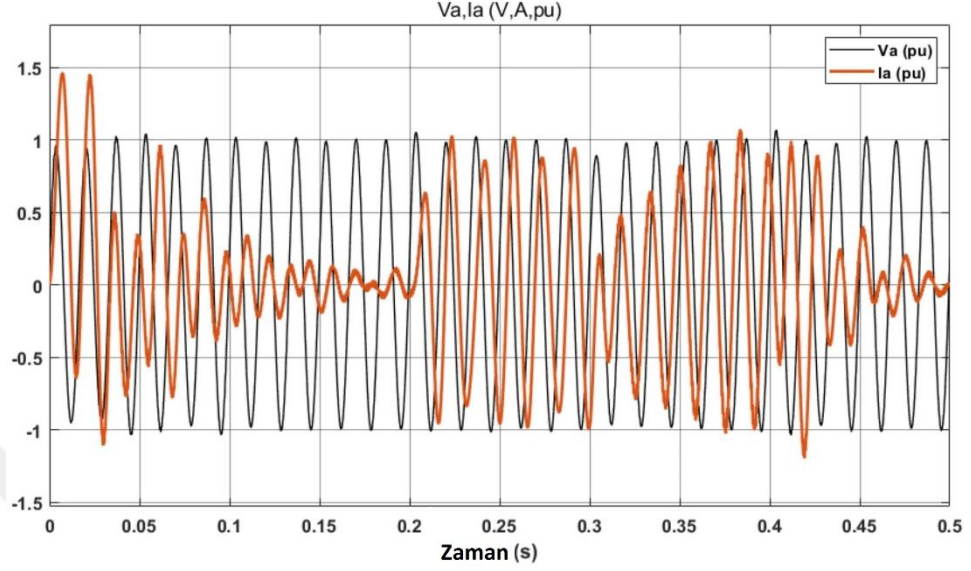
Sistem test edildiğinde, gerilim kaynağının büyüklüğü Şekil 4.1 'de yansıtıldığı gibi 0.2 saniye arttırılmıştır. Endüktif modda azalan ve kapasitif modda artan referans akım ve reaktif akım bileşenleri Şekil 4.2 'de gösterilmiştir. Hibrit sistem durumunda, STATCOM çalışması prensibi gereği çıkış gerilimi hattın geriliminden büyükse kapasitif modda çalışıp sisteme reaktif güç üretecektir, tam tersi durumda reaktif gücü absorbe edecektir. STATCOM'un ve hattın gerilim değerleri ve sonrasında hibrit sisteme göre STATCOM'un reaktif gücü nasıl dengelediği Şekil 4.3'de görülmektedir

STATCOM, +2.7 MVAR reaktif gücü absorbe ederek bu gerilimi telafi eder. Gerilim kaynağının büyüklüğü 0.3 saniyede azaltılmıştır ve STATCOM, reaktif gücü Şekil 4.3 'de gösterildiği gibi +2.7'den -2.7 MVAR'a değiştirerek gerilim değerini koruyarak reaktif güç üretimi yapmıştır. Şekil 4.4.'de gösterildiği gibi, DC gerilimi sabit tutulmaya çalışılır ve modülasyon indeksi Şekil 4.5' de belirtilir. STATCOM, 0.2 saniyeden ($ma = 0.65$) başlayarak endüktif modda çalışırken, reaktif gücün üretildiği kapasitif modda ($ma = 0.85$) 0.3 saniyede çalışır. Hibrit mikro-şebeke sistemi ilk önce STATCOM dahil edilmeden çalışır ve Şekil 4.6'da baranın sonunda gerilim değerinin 1,08 p.u'ya yükseldiği gösterilebilir. 0.2 saniyede azalır ve 0.3 saniyede, 0.92 p.u'ya düşer.

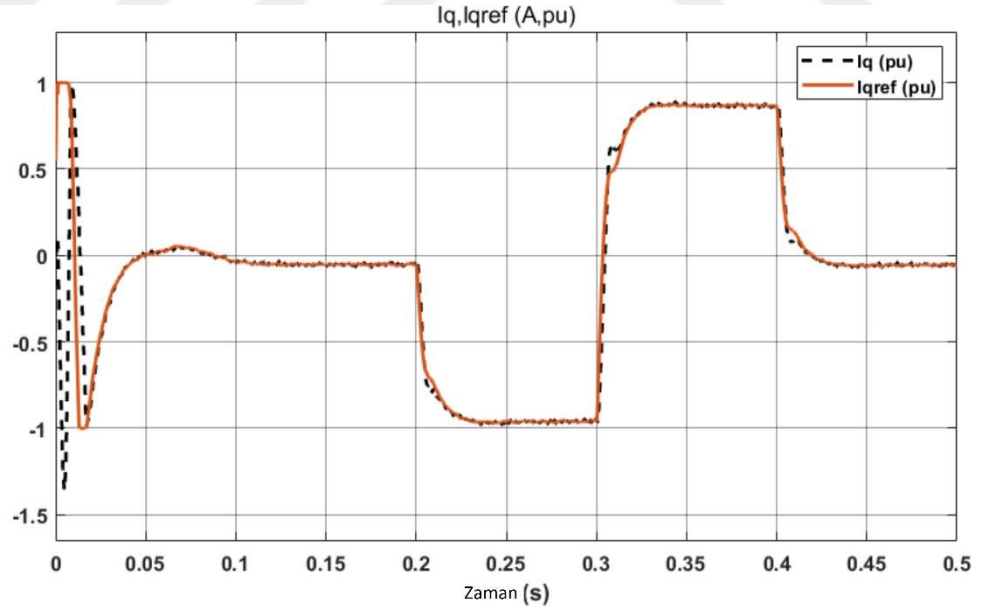
$\pm\% 10$ arasında bir gerilim dalgalanması açıkça görülebilir. STATCOM içeren hibrit sistemde gerilim 1.0 p.u.'da sabit tutulur. Şekil 4.7 'deki tüm noktalarda ve 0.2 ila 0.4 saniye arasındaki dalgalanmayı geleneksel PI kontrolörü için % 8 azaltılır.

Güneş-rüzgar hibrit sistemde STATCOM'un kontrol devresindeki dört adet PI parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.7'de, ITAE performans kriterinin grafikleri, PI kontrolörünün bazı noktalarda en yüksek aşma ve zirveye sahip olduğunu gösterir, GA'nın gerilim profilleri 1 p.u noktasına ulaşır. 0.05 saniyede daha düşük bir hıza sahip ve gerilim dalgalanması en aza indirilmiştir. BFA uygulandığında, gerilim profili 1 p.u.'ya ulaşır. 0,02 saniyede en düşük aşma oranına sahip ve her noktada 1 p.u. göstermektedir. Gerilim dalgalanması GA tabanlı PI denetleyicisi için % 10 ve BFA tabanlı PI denetleyicisi için % 15 azaltılır. Üç yöntem sonucunda gerilim dalgalanmaları ve sistem parametrelerini gerilim yanıtı olarak ayarlama yöntemi açısından karşılaştırılmıştır. Optimizasyon sonucunda bulunan en iyi kazanç sabiti katsayıları Çizelge 4.1'de listelenmiştir.

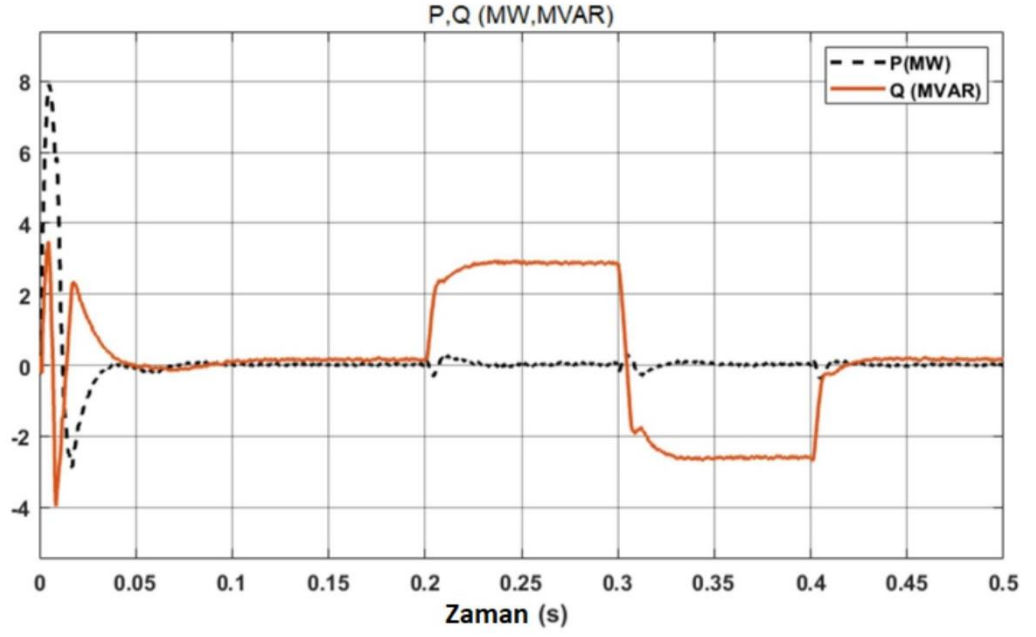
Sonuçlar, kontrolör parametrelerinin optimum ayarının ve uygun ayarlama sabitlerinin seçilmesinin, performansı kontrol etmede önemli bir rol oynadığını göstermektedir.



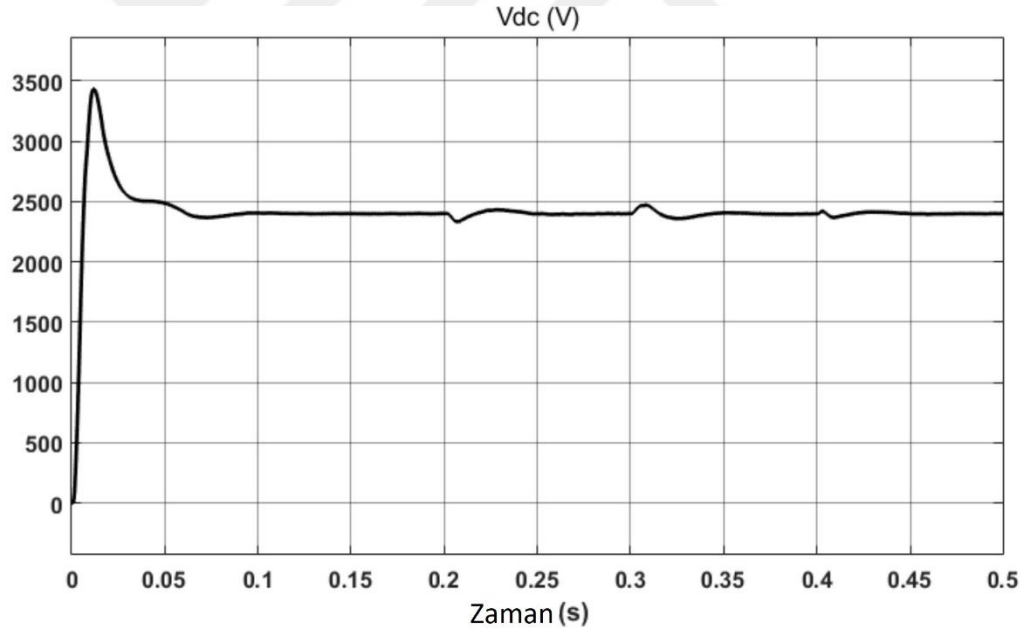
Şekil 4.1. STATCOM akım, gerilim profili



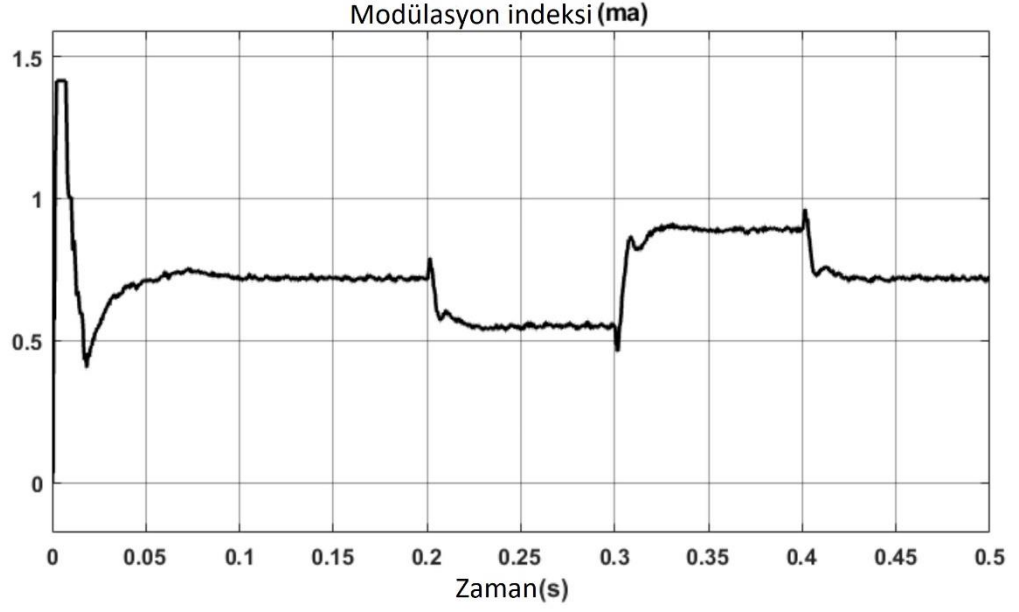
Şekil 4.2. STATCOM I_q ve I_{qref} profili



Şekil 4.3. STATCOM aktif ve reaktif güç profili



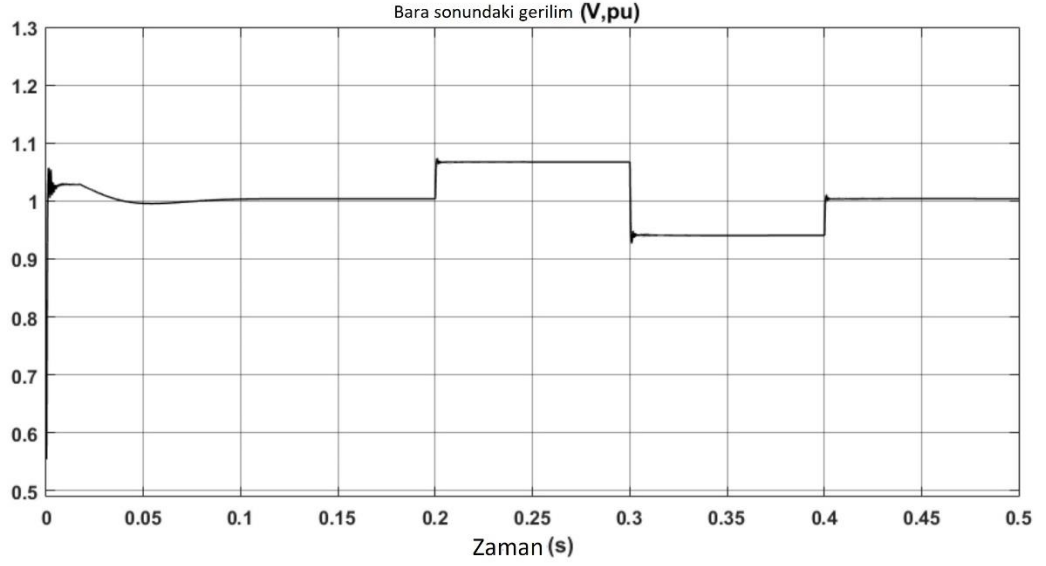
Şekil 4.4. STATCOM DC gerilim profili



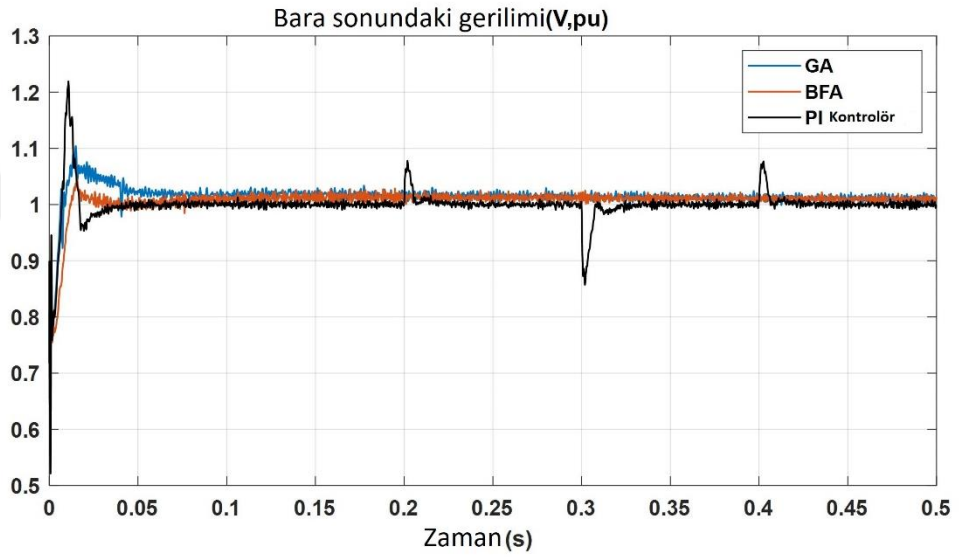
Şekil 4.5. STATCOM modülasyon indeks profili

Çizelge 4.1. ITAE performans kriterine göre optimize edilmiş STATCOM'un PI kazanç sabitleri

ITAE	AC gerilim denetleyici	DC gerilim denetleyici	I_d akım denetleyici	I_q akım denetleyici
PI kazanç sabitleri	K_{p1} K_{i1}	K_{p2} K_{i2}	K_{p3} K_{i3}	K_{p4} K_{i4}
GA sonuçları	0.3747 0.5694	0.0114 0.08051	0.9748 0.3043	0.04292 0.7021
BFA sonuçları	0.8662 0.6752	0.2393 0.0285	0.2639 0.7486	0.4308 0.9502



Şekil 4.6. STATCOM'suz bara sonu gerilim profili



Şekil 4.7. STATCOM'lu bara sonu gerilim profili

4.2. Güneş-Rüzgar Hibrit mikro-şebekenin optimize edilmiş STATCOM ile simülasyon sonuçları

STATCOM kontrol devresindeki dört PI kontrolörünün parametrelerinin optimizasyonu ve ayarlanması GA, PSO, BF-PSO tabanlı olarak yapılmıştır. AC regülatörü, DC regülatörü, (I_d , I_q) akım regülatörü için K_p , K_i değerleri, Çizelge 4.2-4.5'te ve bara sonundaki gerilim profilinde optimizasyonun sonuçları Şekil 4.9-4.12'de

gösterilmektedir. Üç yöntemin sonucu olarak, gerilim dalgalanmaları ve sistem parametrelerini gerilim tepkisi olarak ayarlama yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.8'de görüldüğü gibi, ITAE için PSO yönteminin yakınsama eğrisi en iyi fonksiyon değerini gösterir. Şekil 4.9' da, ITAE performans kriteri grafikleri, geleneksel PI kontrolörünün bazı noktalarda en yüksek aşmaya ve tepe noktalarına sahip olduğunu, GA ve PSO'nun gerilim profillerinin 1.0 p.u. seviyesine ulaştığını göstermektedir. 0.05 s'de ve düşük bir aşmaya sahip ve gerilim dalgalanması en aza indirilmiştir. BF-PSO kullanıldığında, gerilim profili 1.0 p.u'e ulaşır. 0.02 s'de, en düşük aşmaya sahip ve her noktada 1.0 p.u'dedir. Şekil 4.10'de, IAE performans kriteri ITAE'den daha iyi değildir ve BF-PSO, GA ve PSO sonuçları 0.05 s sonra 1.0 p.u'e ulaşmıştır. Geleneksel PI kontrol cihazından daha az aşmaya sahiptir. Şekil 4.11'de, ITSE performans kriterinin sonuçları ITAE'ye benzer, GA, PSO'nun gerilim profilleri 1.0 p.u. 0,05 s'de ve BF-PSO uygulandığında, gerilim profili 1,0 p.u'e ulaşır. 0.02 s'de ve her noktada 1.0 p.u'dedir. Şekil 4.12'de ISE performans kriteri sonuçları IAE performans kriterine benzer, BF-PSO, GA ve PSO'nun gerilim profili 0.05 s sonra 1.0 p.u'ya ulaşır ve gerilim dalgalanması en aza indirilir.

Çizelge 4.2. ITAE için STATCOM'un Kontrol Kazanç Sabitleri

ITAE	AC regülatör	DC regülatör	Id akım regülatör	Iq akım regülatör
PI katsayıları	Kp1 Ki1	Kp2 Ki2	Kp3 Ki3	Kp4 Ki4
GA	0.3747 0.5694	0.0114 0.8051	0.9748 0.3043	0.4292 0.7021
PSO	0.4218 0.9157	0.7922 0.9595	0.6557 0.0357	0.8491 0.9340
BF-PSO	0.8650 0.6760	0.2392 0.0290	0.2649 0.7487	0.4310 0.9503

Çizelge 4.3. IAE için STATCOM'un Kontrol Kazanç Sabitleri

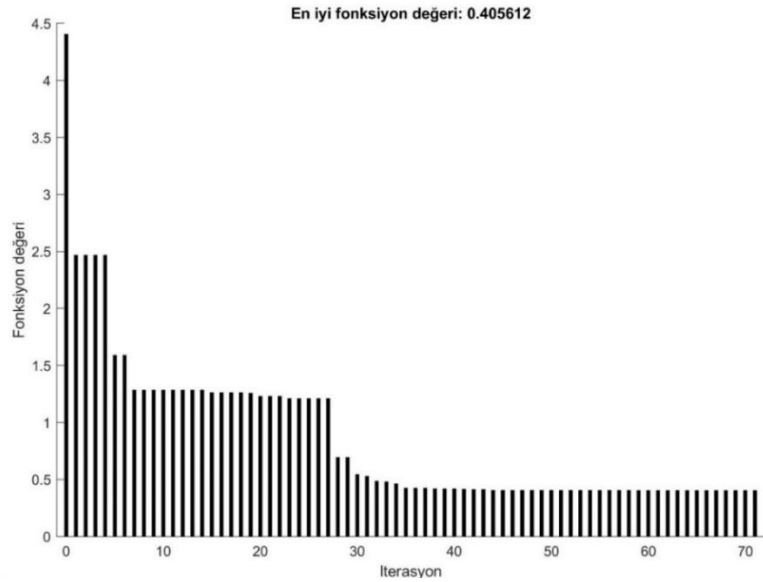
IAE	AC regülatör	DC regülatör	Id akım regülatör	Iq akım regülatör
PI katsayıları	Kp1 Ki1	Kp2 Ki2	Kp3 Ki3	Kp4 Ki4
GA	0.8147 0.9058	0.1270 0.9134	0.6324 0.0975	0.2785 0.5469
PSO	0.9738 0.5121	0.0018 0.4923	0.9679 0.0	0.4685 0.6722
BF-PSO	0.6837 0.1321	0.7227 0.1104	0.1175 0.6407	0.3288 0.6538

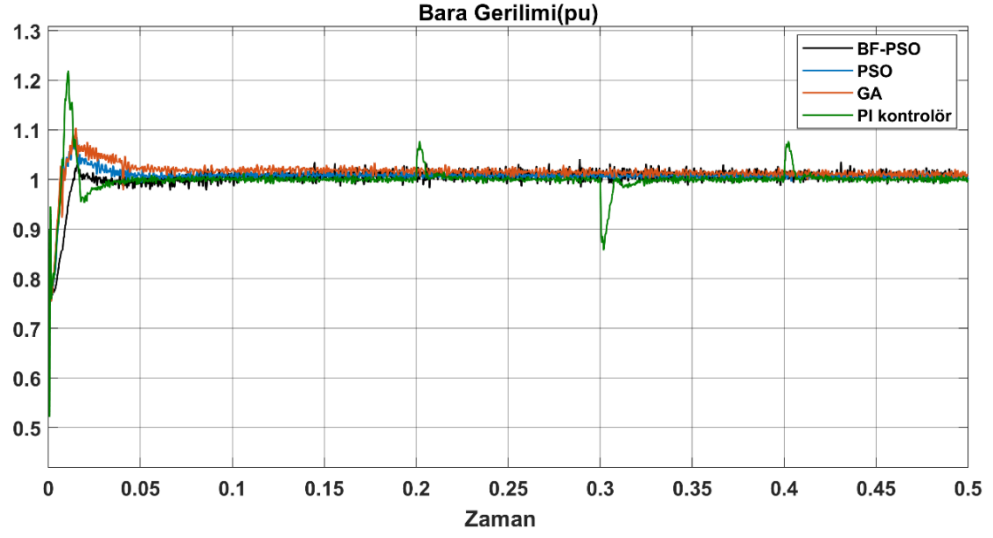
Çizelge 4.4. ITSE için STATCOM'un Kontrol Kazanç Sabitleri

ITSE	AC regülatör	DC regülatör	Id akım regülatör	Iq akım regülatör
PI katsayıları	Kp1 Ki1	Kp2 Ki2	Kp3 Ki3	Kp4 Ki4
GA	0.8150 0.9147	0.1335 0.9234	0.6424 0.0875	0.2785 0.5469
PSO	0.5210 0.9257	0.7531 0.9410	0.6470 0.0311	0.8571 0.9430
BF-PSO	0.6476 0.6790	0.6358 0.9452	0.2089 0.7093	0.2362 0.1194

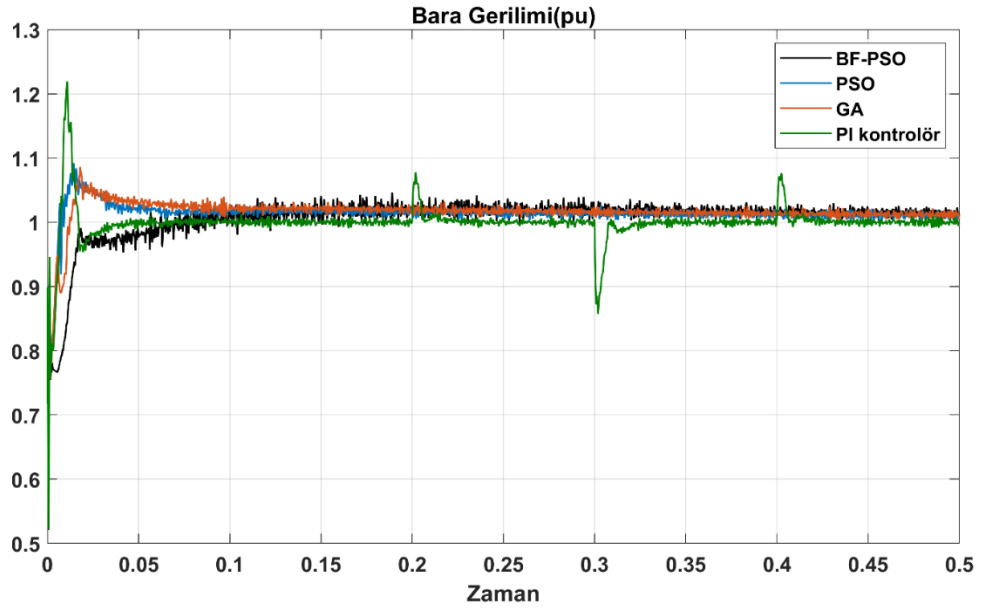
Çizelge 4.5. ISE için STATCOM'un Kontrol Kazanç Sabitleri

ISE	AC regülatör	DC regülatör	Id akım regülatör	Iq akım regülatör
PI katsayıları	Kp1 Ki1	Kp2 Ki2	Kp3 Ki3	Kp4 Ki4
GA	0.6703 0.8845	0.0011 0.8268	0.8772 0.1544	0.8863 0.5098
PSO	0.8458 0.9979	0.0010 0.4379	1 0.0266	0.3606 0.9871
BF-PSO	0.6837 0.1321	0.7227 0.1101	0.1175 0.6407	0.3288 0.6538

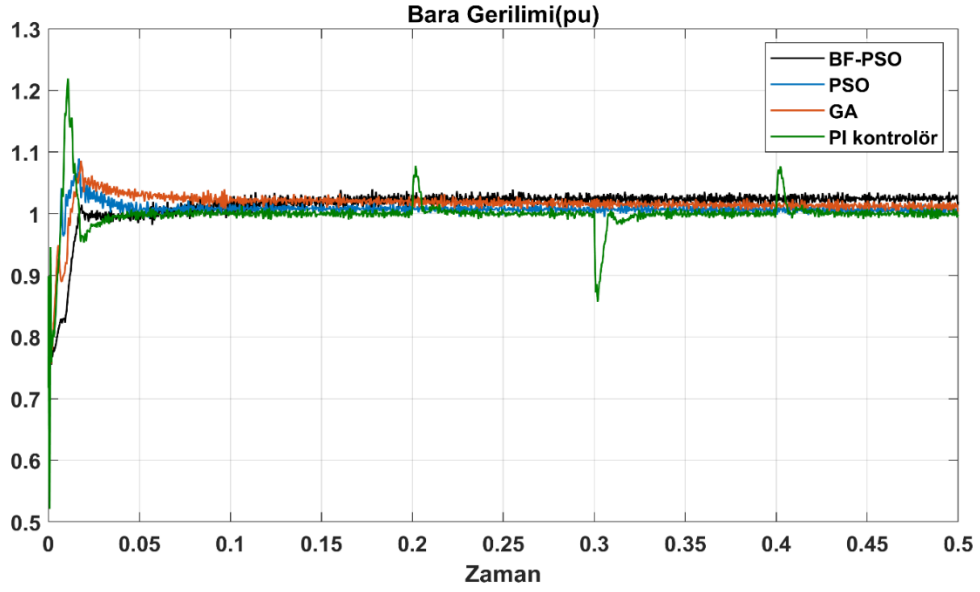
**Şekil 4.8.** ITAE için PSO yönteminin yakınsama eğrisi



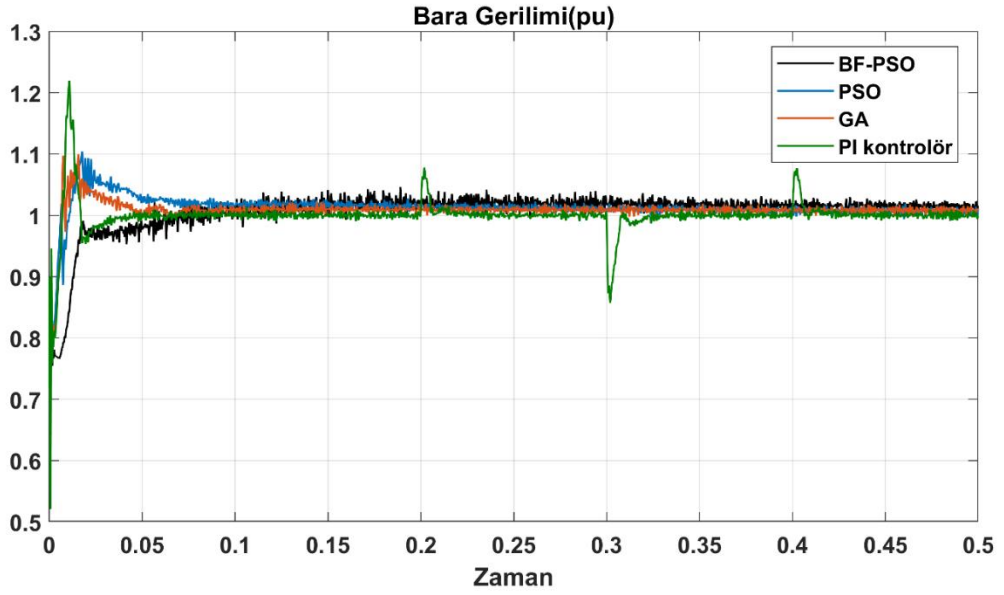
Şekil 4.9. ITAE için optimize edilmiş STATCOM ile bara sonunda gerilim profili (pu)



Şekil 4.10. IAE için optimize edilmiş STATCOM ile bara sonunda gerilim profili (pu)



Şekil 4.11. ITSE için optimize edilmiş STATCOM ile bara sonunda gerilim profili (pu)



Şekil 4.12. ISE için optimize edilmiş STATCOM ile bara sonunda gerilim profili (pu)

Optimizasyonun sonunda, denetleyicilerin aşma, yerleşme süresi, pik değeri, pik süresi ve ortalama kök kare hatası (RMSE) değerleri Çizelge 4.6-4.9'da verilmiştir. Yerleşme süresi değerleri (0,030'dan 0,013'e düşürülmüş), RMSE değerleri (9,995'ten 1,003'e düşürülmüş) ve aşma değerlerinin (%112,5'ten, %2,104'e düşürülmüş), Çizelge 4.6'deki diğer algoritmalarla kıyasla BF-PSO algoritması ile daha da azaltıldığı

görülmektedir. Ek olarak, BF-PSO tabanlı PI-kontrol cihazının performansı, Şekil 4.13-4.14'deki diğer akıllı denetleyiciler ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları, BF-PSO'nun aşma, yerleşme süresi, pik değer, pik zaman ve RMSE açısından daha yüksek dinamik performansa sahip olduğunu göstermektedir. Son olarak, duyarlılık analizi, optimize edilmiş BF-PSO tabanlı PI kontrolörün oldukça sağlam olduğunu ve belirsizlik altında tatmin edici bir performans sağladığını göstermektedir.

Çizelge 4.6. ITAE için geleneksel PI kontrolör ve GA, PSO, BF-PSO tabanlı kontrolör ile sistemin performans karşılaştırması

ITAE	Aşma(%)	Yerleşme zamanı (s)	RMSE	Pik değeri ve Pik zamanı
Geleneksel PI kontrolör	112.5	0.030	9.995e+00	1.219e+00 0.011
GA tabanlı kontrolör	37.805	0.028	1.015e+00	1.104e+00 0.015
PSO tabanlı kontrolör	32.143	0.025	1.007e+00	1.074e+00 0.015
BF-PSO tabanlı kontrolör	2.104	0.013	1.003e+00	1.003e+00 0.013

Çizelge 4.7. IAE için geleneksel PI kontrolör ve GA, PSO, BF-PSO tabanlı kontrolör ile sistemin performans karşılaştırması

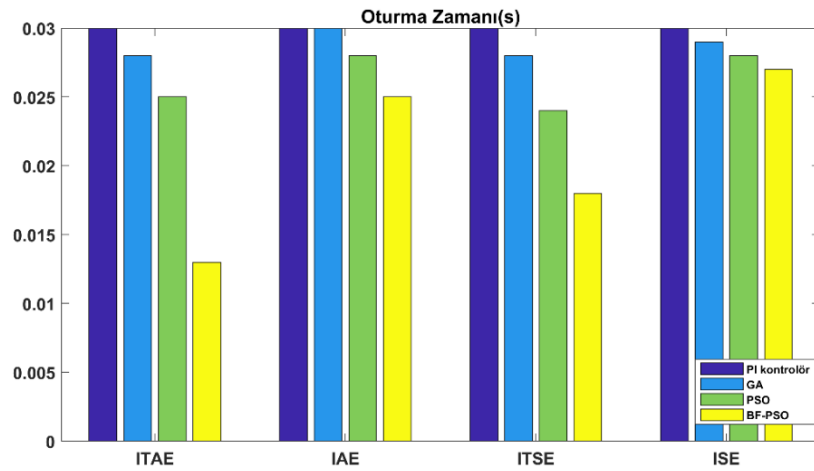
IAE	Aşma(%)	Yerleşme zamanı (s)	RMSE	Pik değeri ve Pik zamanı
Geleneksel PI kontrolör	112.5	0.030	9.995e+00	1.219e+00 0.011
GA tabanlı kontrolör	70.070	0.030	1.017e+00	1.084e+00 0.015
PSO tabanlı kontrolör	43.056	0.028	1.014e+00	1.097e+00 0.013
BF-PSO tabanlı kontrolör	13.830	0.025	1.006e+00	9.734e-01 0.018

Çizelge 4.8. ITSE için geleneksel PI kontrolör ve GA, PSO, BF-PSO tabanlı kontrolör ile sistemin performans karşılaştırması

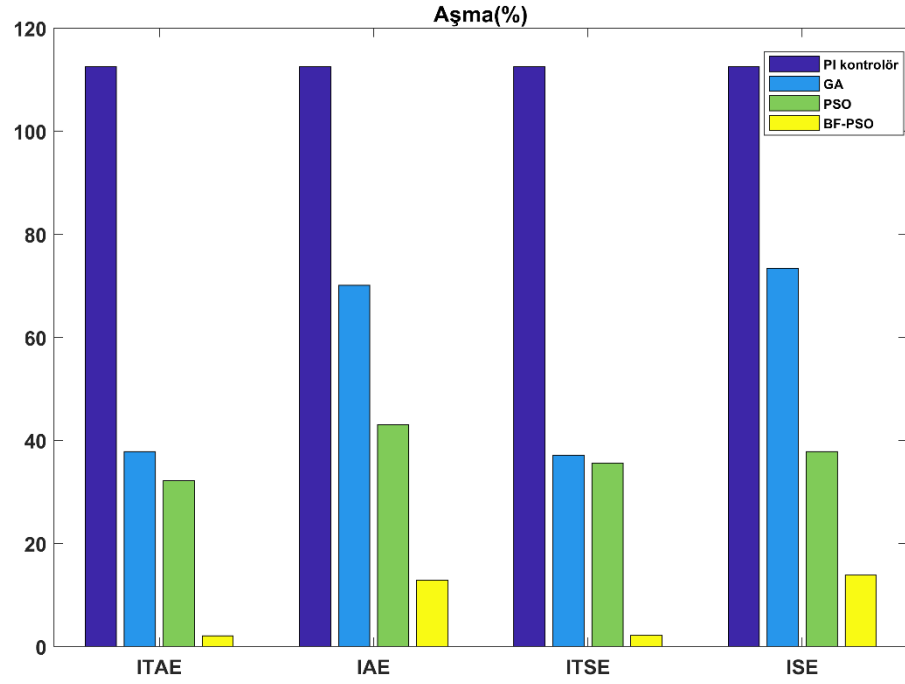
ITSE	Aşma(%)	Yerleşme zamanı (s)	RMSE	Pik değeri ve Pik zamanı
Geleneksel PI kontrolör	112.5	0.030	9.995e+00	1.219e+00 0.011
GA tabanlı kontrolör	37.051	0.028	1.017e+00	1.084e+00 0.016
PSO tabanlı kontrolör	35.526	0.024	1.007e+00	1.077e+00 0.014
BF-PSO tabanlı kontrolör	2.115	0.018	1.006e+00	1.003e+00 0.016

Çizelge 4.9. ISE için geleneksel PI kontrolör ve GA, PSO, BF-PSO tabanlı kontrolör ile sistemin performans karşılaştırması

ISE	Aşma(%)	Yerleşme zamanı (s)	RMSE	Pik değeri ve Pik zamanı
Geleneksel PI kontrolör	112.5	0.030	9.995e+00	1.219e+00 0.011
GA tabanlı kontrolör	73.438	0.029	1.010e+00	1.149e+00 0.015
PSO tabanlı kontrolör	37.805	0.028	1.014e+00	1.096e+00 0.013
BF-PSO tabanlı kontrolör	13.830	0.027	1.006e+00	9.726e-01 0.017



Şekil 4.13. Yerleşme zamanının ayarlama yöntemlerine göre performans karşılaştırması



Şekil 4.14. Yüzdelik aşma değerinin ayarlama yöntemlerine göre performans karşılaştırması

4.3. Opal – RT teknolojisi kullanılarak optimize edilmiş ÇBAG tabanlı rüzgar enerji sisteminin gerçek zamanlı simülasyon sonuçları

4.3.1. ÇBAG tabanlı rüzgar sistemi için BFA tabanlı optimizasyon yönteminin deneysel sonuçları ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması ve tartışması

Simülasyon ve gerçek zamanlı deney, Şekil 3.25' de gösterilen 2 kW prototip ÇBAG tabanlı rüzgar enerjisi sisteminde gerçekleştirilmiştir. Rüzgar türbininin çalışmasını benzetmek için dört kadranlı bir dinamometre kullanılmıştır. OPAL-RT OP5600, gerçek zamanlı kontrol için işlemci olarak kullanılmıştır. Sistem parametreleri Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Veri toplama arayüzü OP8660, ÇBAG sisteminin ölçülen gerilimlerini ve akımlarını toplamak için kullanılmıştır. Gerçek zamanlı simülasyon ve döngü içi donanım, Matlab / Simulink ve RT-LAB yazılım ortamında üretilmiştir. ÇBAG rüzgar enerjisi sistemi, Şekil 3.25' de gösterildiği gibi kontrol edilmiştir. Üç PI kontrolörünün altı parametresi [K_{p1} , K_{i1} , K_{p2} , K_{i2} , K_{p3} , K_{i3}] konvansiyonel, GAO ve BFA yöntemleri ve

ÇBAG sistemi kullanılarak optimize edilmiştir. Optimizasyon, ITAE'nin diğer endekslere göre üstünlüğünü göstermek amacıyla IAE, ITAE, ISE ve ITSE performans endeksleri kullanılarak yapılmıştır. Optimize edilmiş değerler, rotor akımlarının dc-link gerilimini ve $d-q$ bileşenlerini düzenlemek ve deney düzeneğini çalıştırmak için kullanılmıştır. BFA yöntemini doğrulamak ve performans indeksine göre PI kontrolörlerinin konvansiyonel ve GAO ayarlama yöntemlerine göre avantajını göstermek için deneysel sonuçlar verilmektedir. GAO ve BFA için optimizasyon sonuçları Çizelge 4.11'de verilmiştir.

Konvansiyonel ayarlama yöntemi, doğal frekansı (ω_n) ve PI kontrol kazançlarını (K_p , K_i) değerlendirmek için yerleşme süresi (Tsai et al.) ve sönümleme katsayısı (ε) seçilerek ikinci dereceden bir sistemin cevabına dayanmaktadır (Teodorescu et al., 2011).

GAO yöntemi(Hassan, Moghavvemi, Almurib, Muttaqi, & Ganapathy, 2014) 'de detaylandırılmıştır ve uygulaması aşağıdaki parametrelere dayanmaktadır:

Nüfus büyüklüğü: 10

Seçim: Rulet Tekerleği

Çapraz hız: 0.8

Mutasyon oranı: 0.01

Nesiller: 100

Nüfus türü: Çift

BFA yöntemi aşağıdaki parametrelere sahiptir:

Arama alanının boyutu: 6

İterasyon: 100

Bakterilerin Sayısı (S): 10

Kemotaktik adımların sayısı (N_c): 5

Yüzmenin uzunluk sınırı (N_s): 4

Çoğaltma adımlarının sayısı (N_{re}): 4

Eliminasyon dağılımı sayısı: 2

Eliminasyon / dağılım olasılığı (P_{ed}): 0.25

Çizelge 4.10. ÇBAG parametreleri

Nicelikler	Değerler
Güç	2 kW
Stator gerilimi	120 V
Rotor gerilimi	360 V
Stator akımı	10 A
Rotor akımı	3.3 A
Nominal hız	1700 dev/dk
Kutup sayısı (p)	2
Stator indüktansı (L_s)	0.0662 H
Rotor indüktansı (L_r)	0.0662 H
Ortak indüktans	0.0945 H

Çizelge 4.11. BFA için Optimizasyon sonuçları

Performans indeksi	PI kontrol parametreleri	Genetik algoritma opt.	Bakteriyel besin arama opt.
ITAE	dc-link gerilim kontrolör (K_{p1}, K_{i1})	0.8078, 0.3066	0.6424, 0.8781
	d-eksen akım kontrolör (K_{p2}, K_{i2})	0.6689, 0.2795	0.6233, 0.8805
	q-eksen akım kontrolör (K_{p3}, K_{i3})	0.9824, 0.2221	0.7518, 0.2045
	En iyi uygunluk değeri	0.0703	0.06654
	Ortalama en iyi uygunluk	0.0721	0.068
ITSE	dc-link gerilim kontrolör (K_{p1}, K_{i1})	0.8945, 0.6806	0.7482, 0.1864
	d-eksen akım kontrolör (K_{p2}, K_{i2})	0.7715, 0.7582	0.6791, 0.9532
	q-eksen akım kontrolör (K_{p3}, K_{i3})	0.6762, 0.4691	0.9332, 0.1451
	En iyi uygunluk değeri	1.5275	1.4338
	Ortalama en iyi uygunluk	1.5712	1.4791
IAE	dc-link gerilim kontrolör (K_{p1}, K_{i1})	0.8656, 0.7040	0.7687, 0.5431
	d-eksen akım kontrolör (K_{p2}, K_{i2})	0.6662, 0.7220	0.2705, 0.0835
	q-eksen akım kontrolör (K_{p3}, K_{i3})	0.8176, 0.2003	0.7117, 0.0199
	En iyi uygunluk değeri	3.5214	3.3293
	Ortalama en iyi uygunluk	3.5358	3.3294
ISE	dc-link gerilim kontrolör (K_{p1}, K_{i1})	0.6797, 0.5853	0.8172, 0.5302
	d-eksen akım kontrolör (K_{p2}, K_{i2})	0.4450, 0.3035	0.7299, 0.6729
	q-eksen akım kontrolör (K_{p3}, K_{i3})	0.7572, 0.6299	0.7805, 0.1999
	En iyi uygunluk değeri	355.527	340.513
	Ortalama en iyi uygunluk	355.531	340.568

Optimizasyon, Intel (R) Core™ i-5-3317U CPU@1.70 GHz işlem birimi kullanılarak çevrimdışı olarak gerçekleştirilmiştir. GAO ve BFA için hesaplama süresi, aynı durdurma koşulu için GAO'ya kıyasla optimum çözümü sağlamak için BFA'nın daha az zaman gerektirdiği gözlenebilen Çizelge 4.12'de verilmiştir (iterasyon = 100).

Çizelge 4.12. Hesaplama zamanı

	GAO	BFA
Hesaplama zamanı (s)	9020	6250

4.3.1.1. Simülasyon sonuçları

Optimize edilmiş kontrol parametrelerine sahip kontrollü ÇBAG sistemi, yukarı-aşağı adım değişiklikleri için simüle edilmiş ve sonuçlar Şekil 4.15 'de gösterilmiştir. ÇBAG sabit rotor hızında çalışır. BFA kullanılarak dc-link gerilim izlemenin, geleneksel ve GAO yöntemlerine kıyasla, Şekil 4.15 (a)'da gösterildiği gibi geçişlerde daha az aşma meydana geldiği gözlemlenebilir. Şekil 4.15 (b) ve (c)'de gösterilen rotor akımının d-q bileşenleri için, üç yöntemle optimize edilmiş kontrol parametrelerinin BFA yönteminin hafif bir avantajı ile benzer şekilde davrandığı gözlemlenebilir. Şimdi, adım tepkisindeki dinamik performansı değerlendirmek için, ÇBAG sistemi, dc-link gerilimi ve rotor akımının d-q bileşenleri için sabit referanslar kullanılarak sabit rotor hızı altında simüle edilir. Sonuçlar Şekil 4.16'da gösterilmektedir ve üç yöntem için aşma ve yerleşme sürelerine dayanan dinamik performans Çizelge 4.13 'de verilmektedir. Bu sonuçlardan ve geçici tepki dinamiklerinden, BFA kullanılarak optimize edilmiş parametrelerin geleneksel ve GAO yöntemlerine kıyasla aşma, yerleşme zamanı ve pik değer açısından daha iyi tepki sağladığı gözlemlenebilir.

Üç yöntemle optimize edilen kontrolörlerin türbülanslı rüzgar hızlarına karşı performansını değerlendirmek için ÇBAG sistemi rastgele hız değişimleri altında simüle edilmiştir.

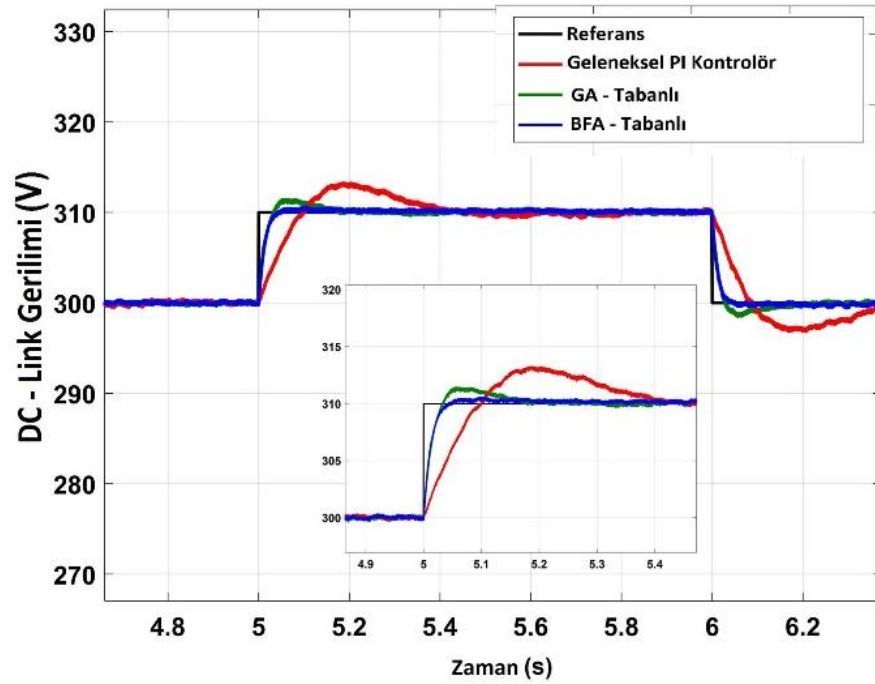
DC-link gerilimi ve dq rotor akımları Şekil 4.17'de gösterilmektedir, burada sistem Şekil 4.17 (a)'da gösterilen dc-link gerilimini BFA tarafından optimize edilmiş kontrolörler kullanılarak iyi düzenlenmiş olduğu gözlemlenebilir. Bununla birlikte, BFA, diğer iki yönteme kıyasla, Şekil 4.17 (b) ve c'de gösterilen rotor akımının d-q bileşenleri için daha iyi akım takibi gösterir.

Şekil 4.17 (c)'de, ÇBAG tarafından rotor hızına karşı üretilen tork üzerindeki etkisi nedeniyle q-akımının hız değişimlerinden daha fazla etkilendiği gözlemlenebilir.

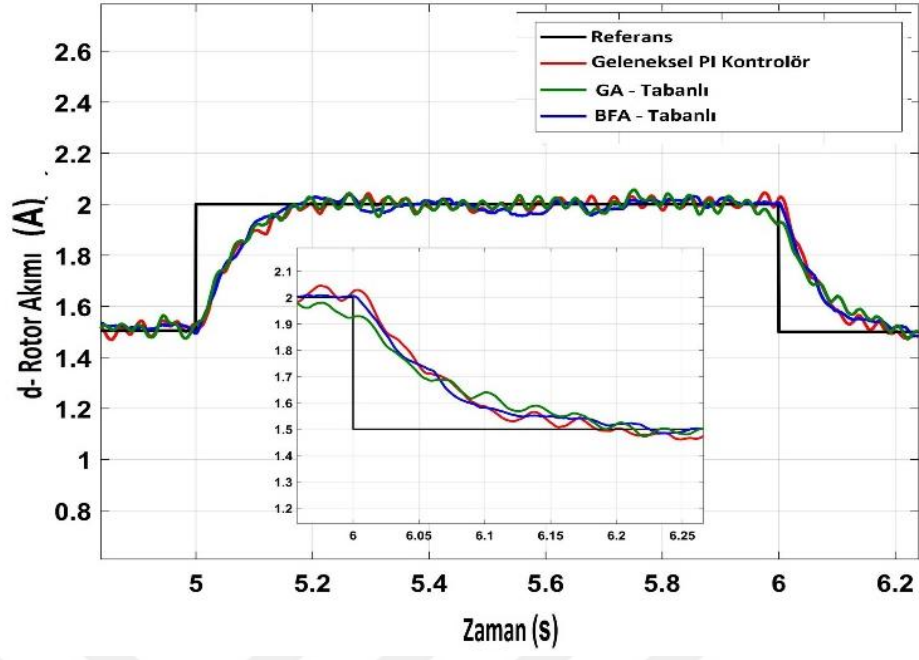
Şebeke akımları için toplam harmonik bozulma (THD) analizi Şekil 4.18 'de gösterilmektedir, burada sınırlar dahilinde olduğu gözlemlenebilir.

Çizelge 4.13. Simülasyon sonuçları için dinamik performanslar

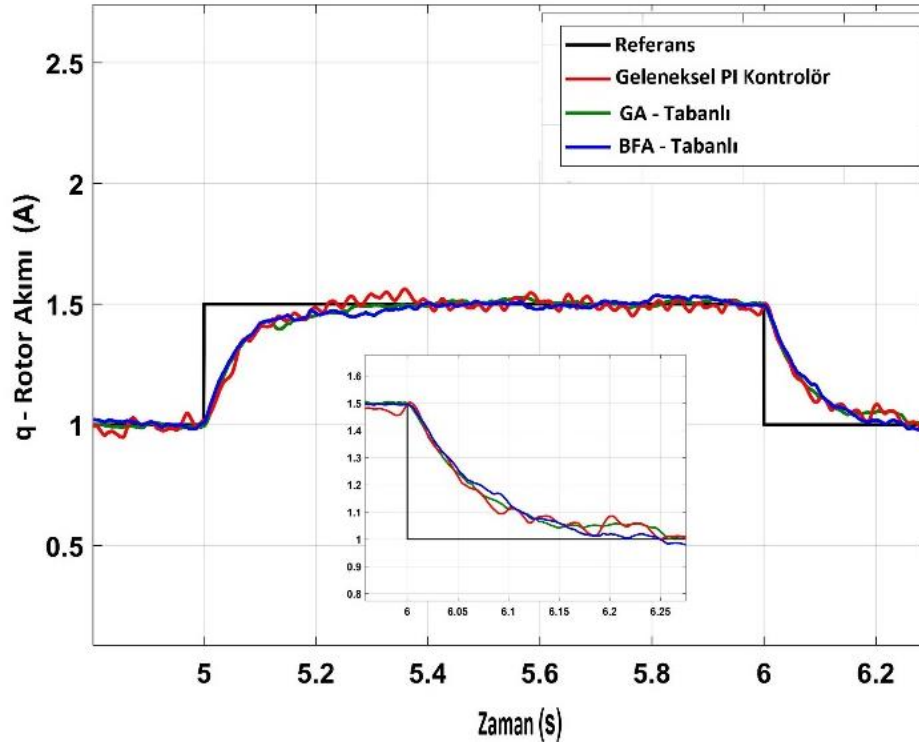
DC-link gerilim kontrolü	Aşma (%)	Yerleşme zamanı (s)	Tepe değer
Geleneksel	47.877	0.989	421.9
GA-tabanlı	25.776	0.329	337.6
BFA-tabanlı	20.566	0.284	331.6
d-rotor akım kontrolü	Aşma (%)	Yerleşme zamanı (s)	Tepe değer
Geleneksel	22.842	1.698	2.714
GA-tabanlı	3.777	2.28	2.128
BFA-tabanlı	2.444	1.327	2.081
q-rotor akım kontrolü	Aşma (%)	Yerleşme zamanı (s)	Tepe değer
Geleneksel	19.439	3.01	2.340
GA-tabanlı	18.383	1.527	2.054
BFA-tabanlı	10.517	1.163	1.628



(a)

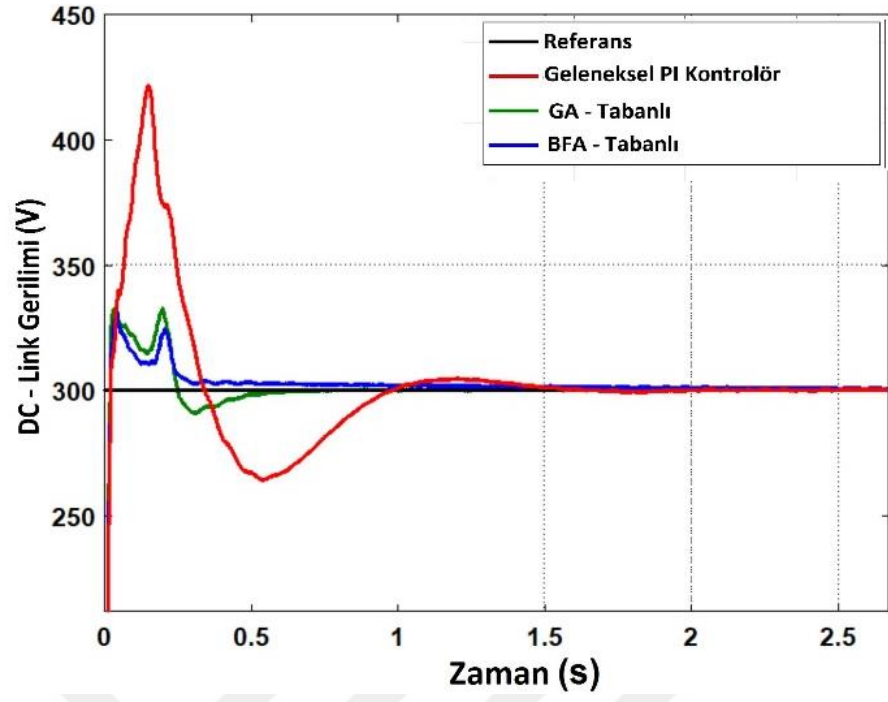


(b)

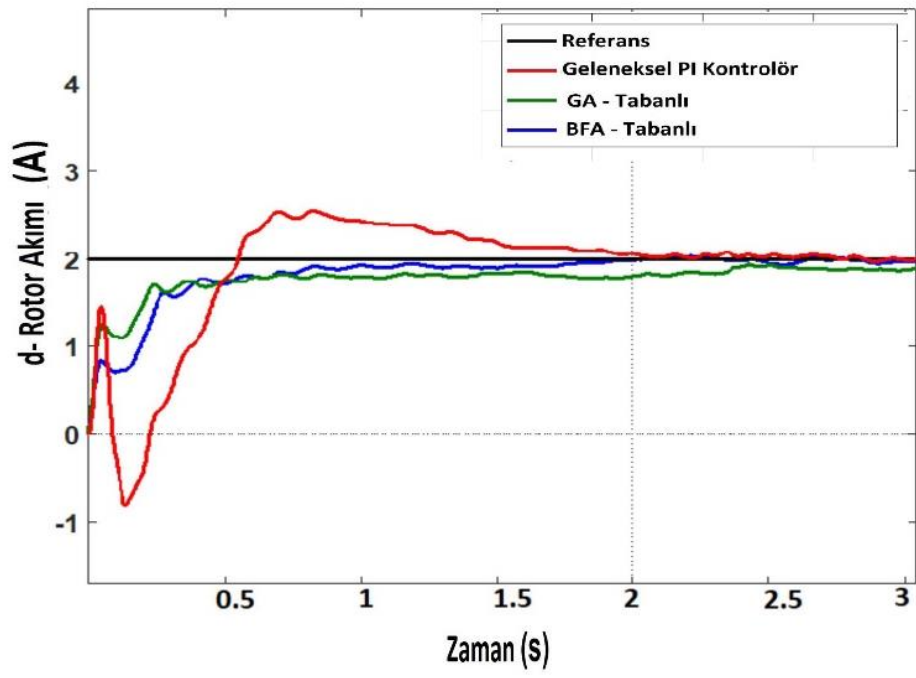


(c)

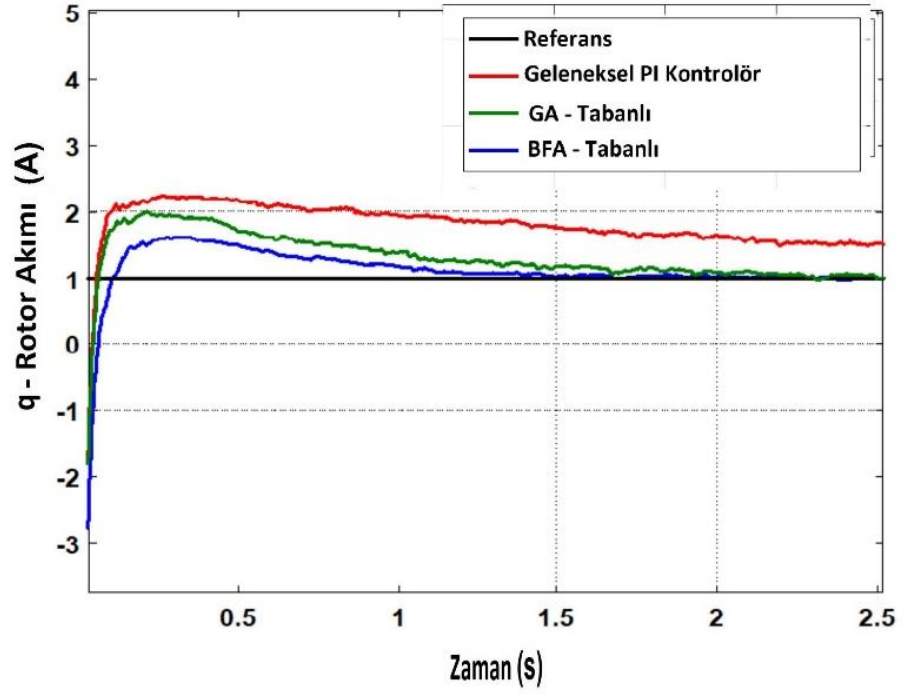
Şekil 4.15. Değişken adım referansları altındaki kontrol yanıtı. (a) dc-link gerilim regülasyonu, (b) d-rotor akım regülasyonu, (c) q-rotor akım regülasyonu



(a)

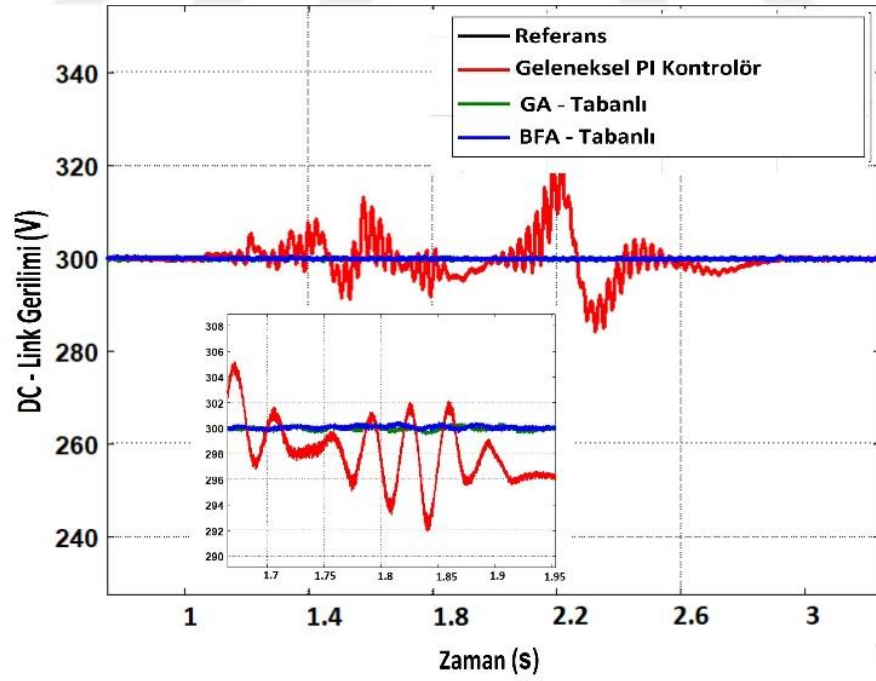


(b)

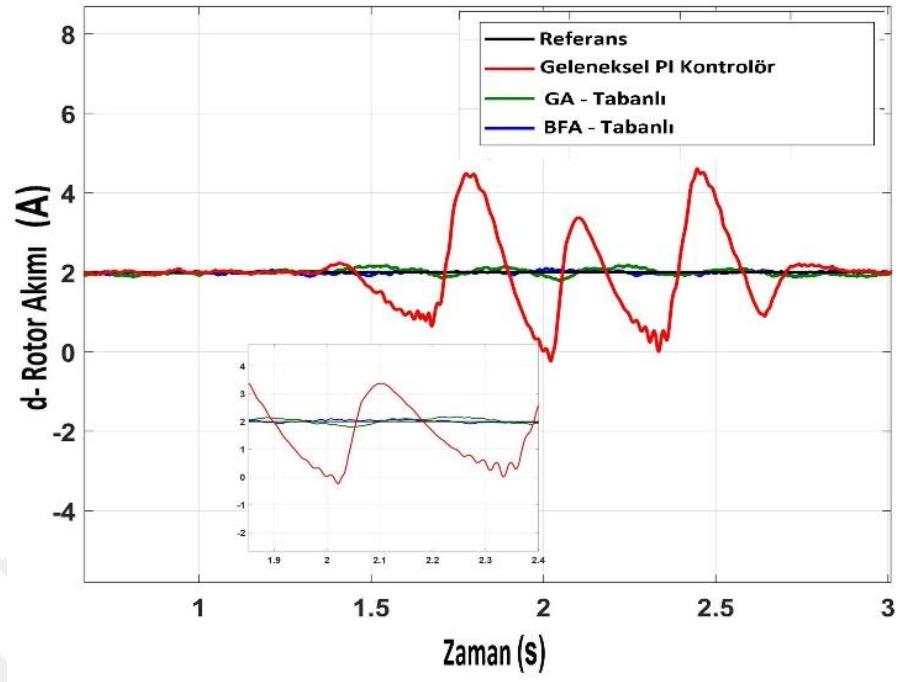


(c)

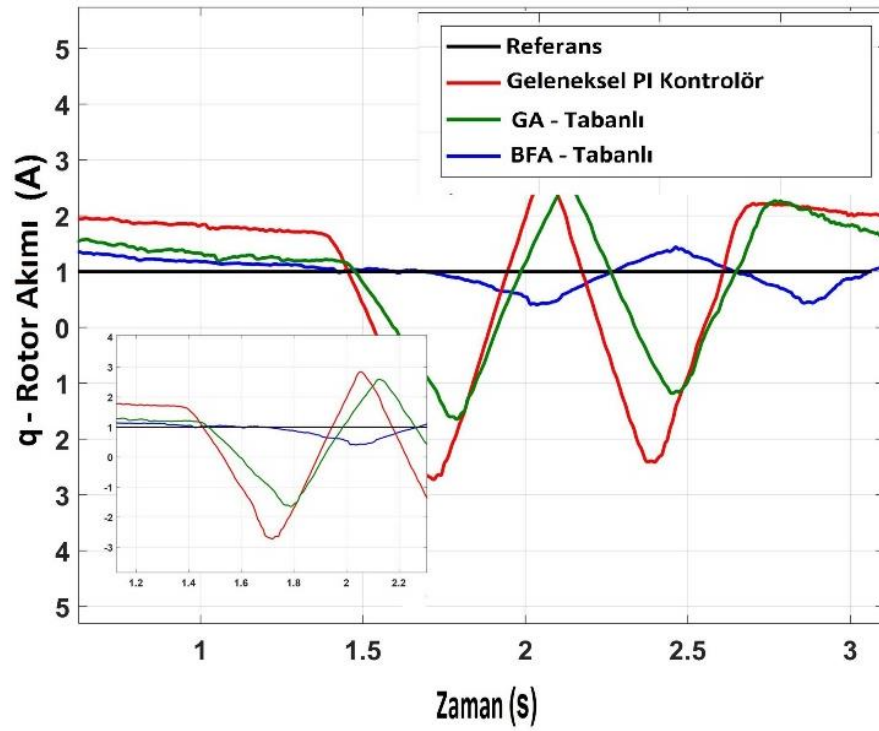
Şekil 4.16. Adım referansları altındaki kontrol yanıtı. (a) dc-link gerilim regülasyonu, (b) d-rotor akım regülasyonu, (c) q-rotor akım regülasyonu



(a)



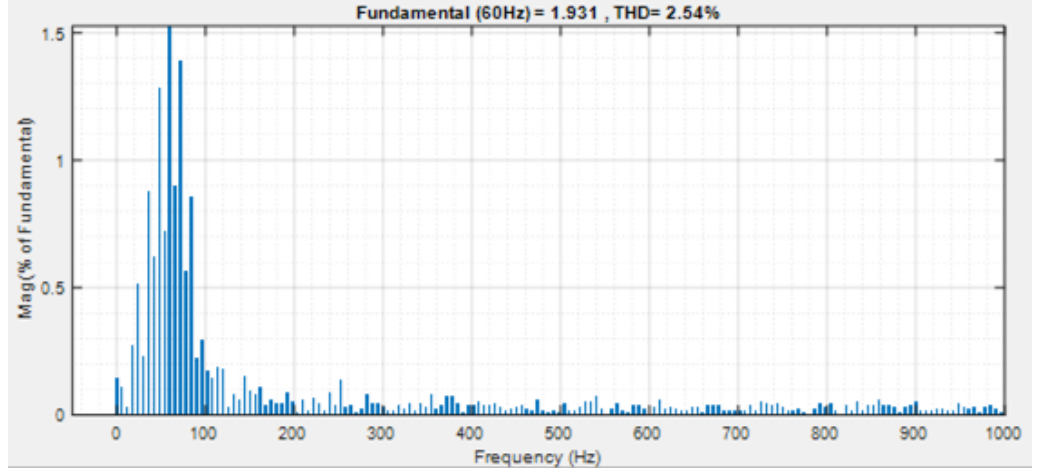
(b)



(c)

Şekil 4.17. Rastgele rotor hızı değişimleri altında kontrol yanıtı.

(a) dc-link gerilim regülasyonu, (b) d-rotor akım regülasyonu, (c) q-rotor akım regülasyonu.



Şekil 4.18. Şebeke akımları için THD analizi.

4.3.1.2. Deneysel sonuçları

Tüm deneylerde geleneksel, GAO ve BFA'dan ITAE performans kriterine sahip optimize edilmiş değerler, farklı koşullar altında gerilim ve akım regülasyonu için deneysel ÇBAG rüzgar enerjisi sistemini PI kontrolörleri ile çalıştırmak için kullanılmıştır.

İlk deneyde, ÇBAG deney düzeneği 1650 d/d sabit rotor hızında çalıştırılmıştır. DC-link gerilim referansı, $t = 50$ s'de 300 V ila 310 V arasında değişmiştir ve d-q rotor akım referansları, üç optimizasyon metodu için adım geçişlerindeki kontrol performansını değerlendirmek için $t = 50$ s (adım yukarı) ve $t = 60$ s (adım aşağı) anlarında değiştirilmiştir.

Rotor akımlarının dc-link gerilimi ve d-q bileşenleri için deneysel sonuçlar Şekil 4.19'da gösterilmektedir. Şekil 4.19a'da gösterilen dc-link gerilim yanıtı için, BFA esaslı kontrolün yerleşme süresinin, geleneksel ve GAO yöntemlerine dayanan kontrol tepkisi süresinden daha az olduğu gözlemlenebilir. Ayrıca, BFA tabanlı izleme yanıtında diğer iki yönteme kıyasla aşma yoktur. Şekil 4.19b'de gösterilen rotor akımlarının d bileşeni için verilmiştir. BFA ve GAO tabanlı kontrolörlerin zaman yanıtında daha hızlı olduğu ve geleneksel yönteme kıyasla aşmalarının olmadığı görülebilir. Aynı gözlem, zaman yanıtı üzerinde, mevcut referansın her iki geçişinde de meydana gelir (yukarı adım ve aşağı adım). Ayrıca, BFA tabanlı kontrol, şeklin büyütülmüş yerinde görülebileceği gibi GAO'dan biraz daha hızlıdır. Şekil 4.19c'de gösterilen rotor akımlarının q bileşeni için verilmiştir. BFA tabanlı kontrolörün daha iyi kararlı durum izleme hatasına ve her iki

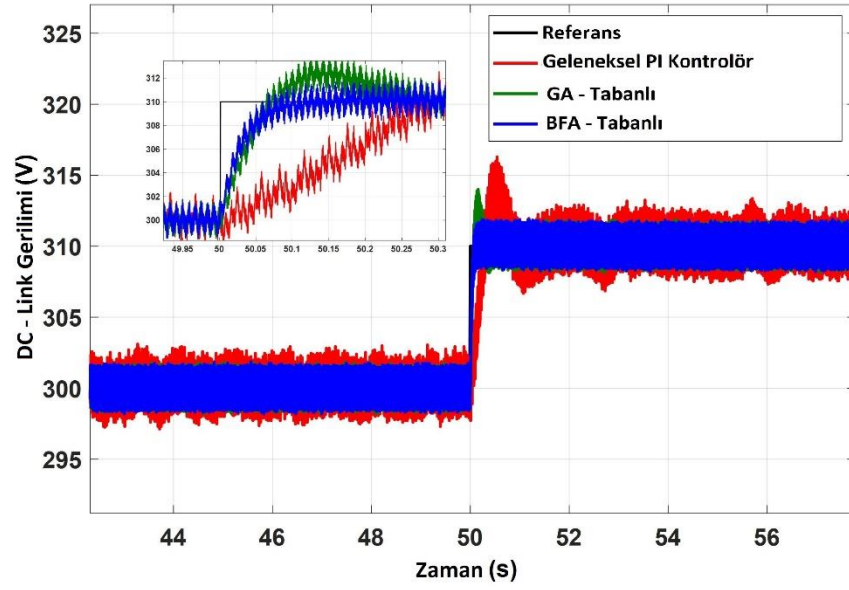
geçişte de en iyi yerleşme süresine sahip olduğu görülmektedir. GAO tarafından optimize edilen kontrol parametrelerinin, aşma ve yerleşme süresi açısından geleneksel yöntemle kıyasla dc-bağlantı gerilimi ve rotor akımının d-bileşeni için çok daha iyi izleme performansı sağladığını belirtmek gerekir. Konvansiyonel optimizasyon yöntemi, bağlantı dinamikleri için dengeleme terimlerini içeren ÇBAG rüzgar enerjisi sistemi için geçerli olmayan doğrusal sistemler için uygun olduğundan bu sonuçlar tahmin edilebilir.

Şekil 4.19'daki 50 saniyede adım geçişi için dinamik zaman tepkileri, aşırı yüklenme ve yerleşme süresine bağlı olarak GAO ve konvansiyonel yöntemlere kıyasla BFA'nun üstünlüğünün görülebildiği Çizelge 4.14'de gösterilmiştir. Geçici rejimler, sabit adım referansları altında, Şekil 4.20'de gösterilmektedir. Yanıtlar arasındaki gecikmelerin, başlangıç işlemi manuel olarak yapıldığından ÇBAG kurulumunun farklı zamanlarda çalıştırılmasından kaynaklandığını belirtmek gerekir. Sonuçlardan, rotor akımının dc-link gerilimi ve d-q bileşenleri için, BFA kullanılarak optimize edilmiş kontrol parametrelerinin, diğer iki yöntemle kıyasla aşma ve yerleşme süresine göre daha iyi bir performans sağladığı gözlemlenebilir. Şimdi, performans Şekil 4.21 (a)'da gösterilen rotor hızındaki adım değişikliğine karşı doğrulanmıştır. Şekil 4.21 (b)'de gösterilen dc-link gerilim regülasyonu, BFA ve GAO tarafından optimize edilmiş kontrol parametreleri kullanılarak iyi bir şekilde elde edilirken, geleneksel yöntemi kullanarak yanıt, rotor hızındaki değişiklikten etkilenir. Rotor akımları, Şekil 4.21 (c) ve (d)'de gösterilen akım tepkileri üzerinde daha az etkisi olan rotor hız değişiminden, aşma ve yerleşme süresi bakımından BFA kullanılarak optimize edilmiş kontrol parametreleri tarafından etkilenir.

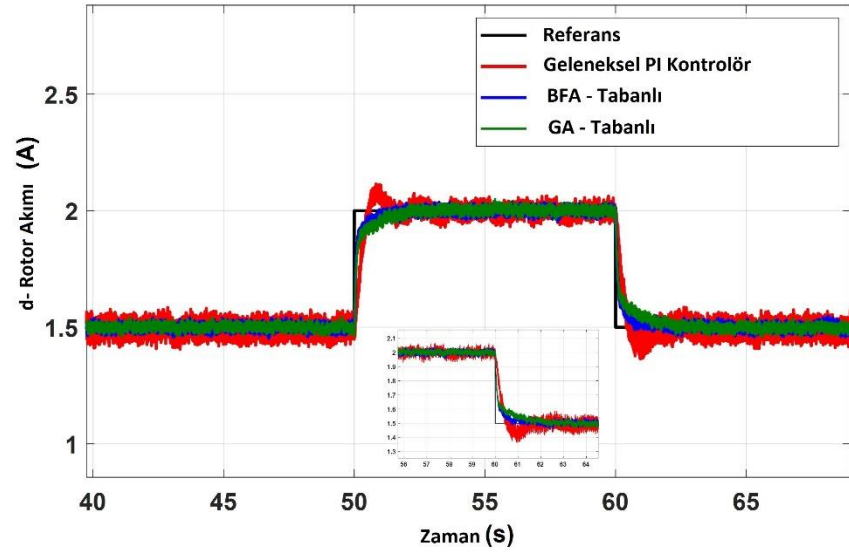
Son olarak, simülasyon sonuçlarının BFA'nun konvansiyonel ve GAO'ya kıyasla dinamik performans açısından üstünlüğünü gösteren deneysel sonuçlarla örtüştüğü gözlemlenebilir.

Çizelge 4.14. Deneysel sonuçlar için dinamik performans

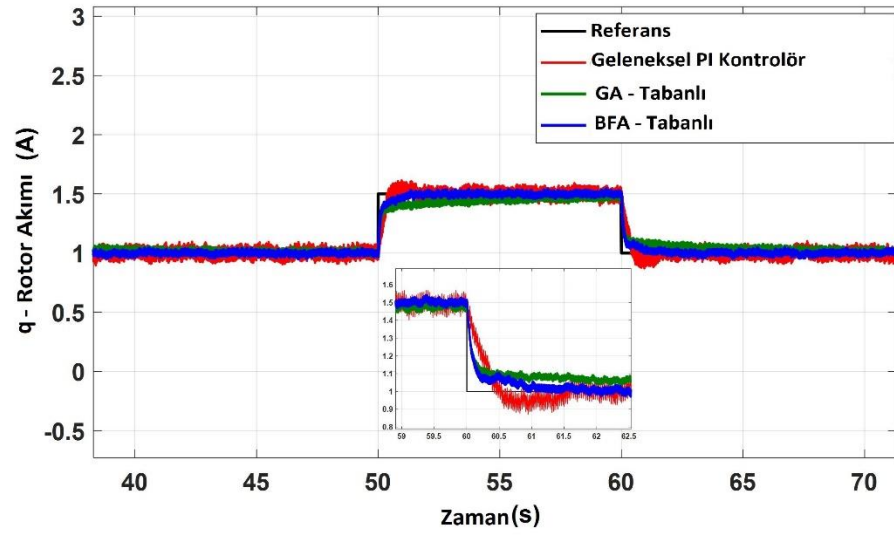
DC-link gerilim kontrolü	Aşma (%)	Yerleşme zamanı (s)	Tepe değer
Geleneksel	61.07	0.340	316.1
GA-tabanlı	30.05	0.240	313.4
BFA-tabanlı	13.04	0.058	311.4
d-rotor akım kontrolü	Aşma (%)	Yerleşme zamanı (s)	Tepe değer
Geleneksel	12.01	1.33	2.12
GA-tabanlı	2.025	1.18	2.025
BFA-tabanlı	1.2	0.95	2.01
q-rotor akım kontrolü	Aşma (%)	Yerleşme zamanı (s)	Tepe değer
Geleneksel	11.87	1.32	1.61
GA-tabanlı	3.02	1.05	1.53
BFA-tabanlı	1.07	0.57	1.51



(a)



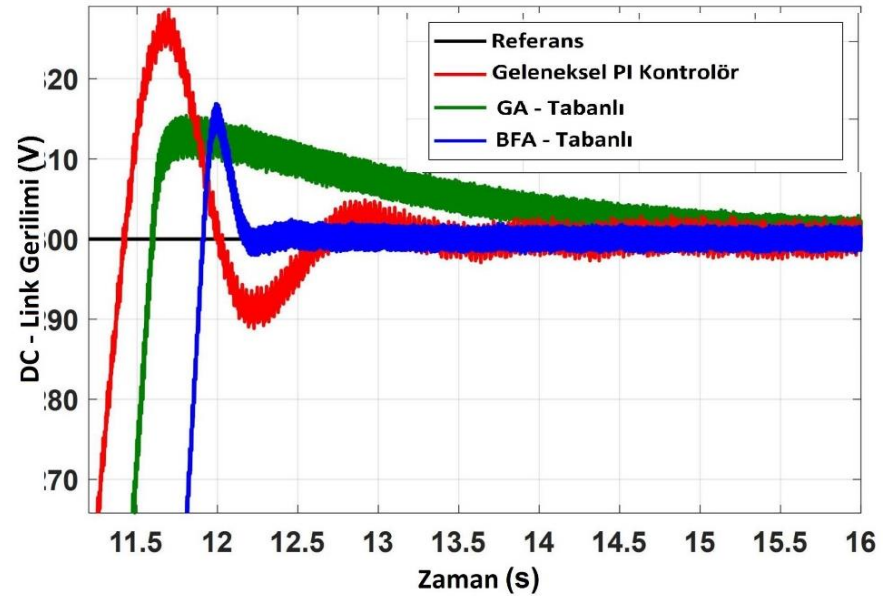
(b)



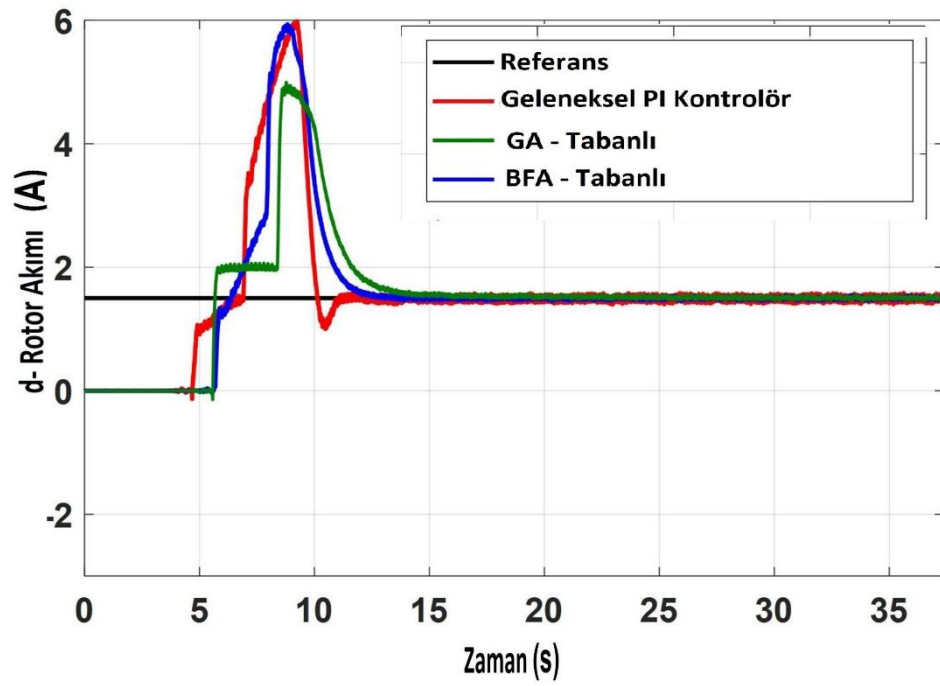
(c)

Şekil 4.19. Farklı optimizasyon yöntemleri altında kontrol yanıtı.

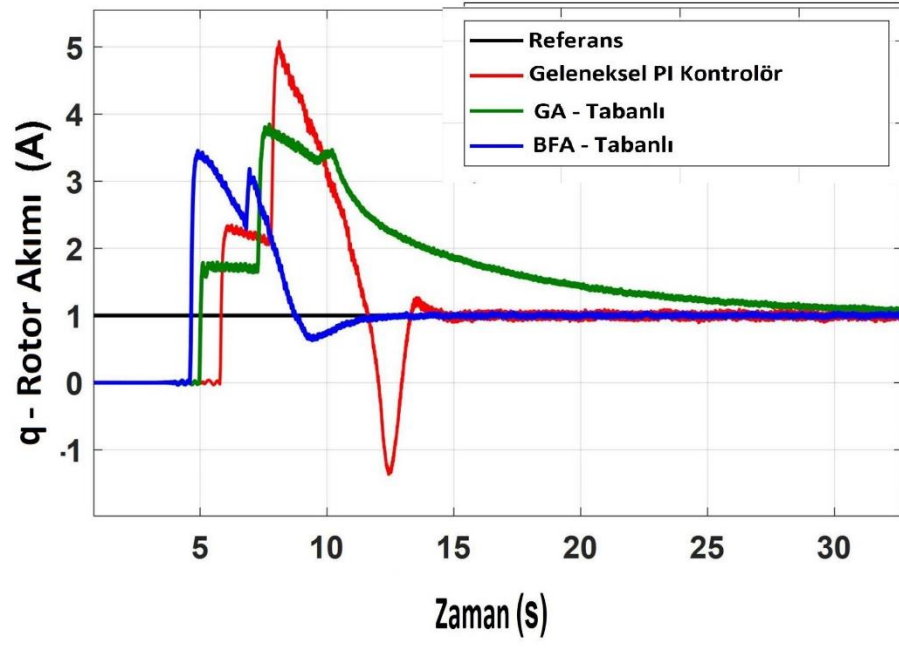
(a) DC-link gerilimi için adım yanıtı, (b) d-rotor akımı için adım yanıtı, (c) q-rotor akımı için adım yanıtı



(a)



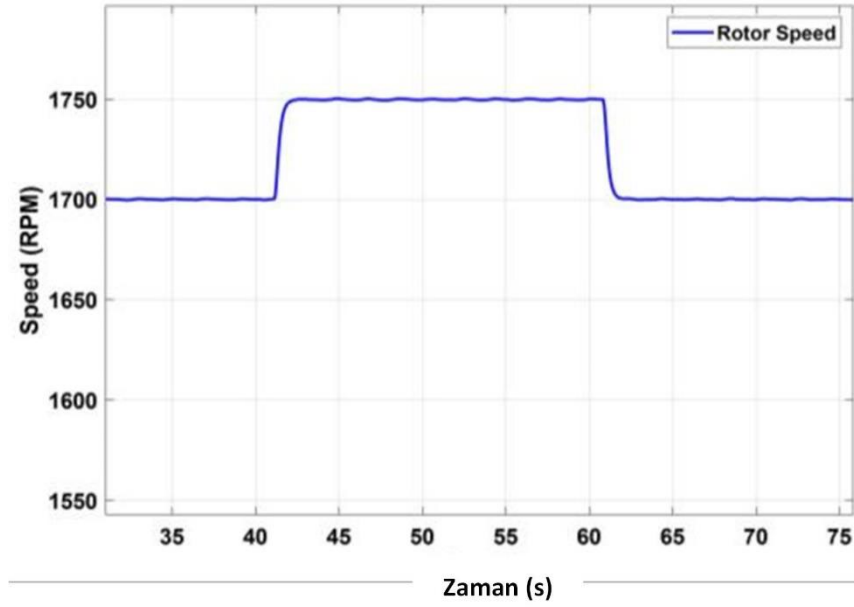
(b)



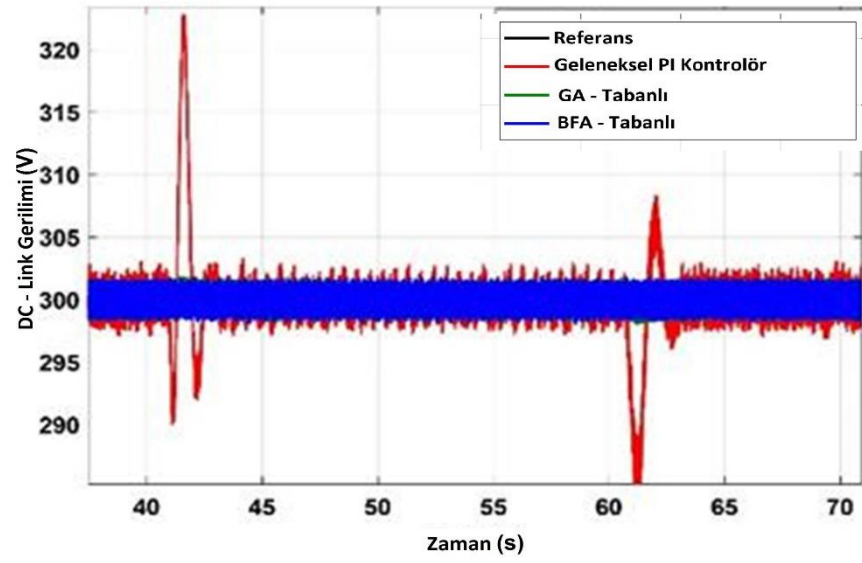
(c)

Şekil 4.20. Adım referansları altında geçici bölge yanıtı.

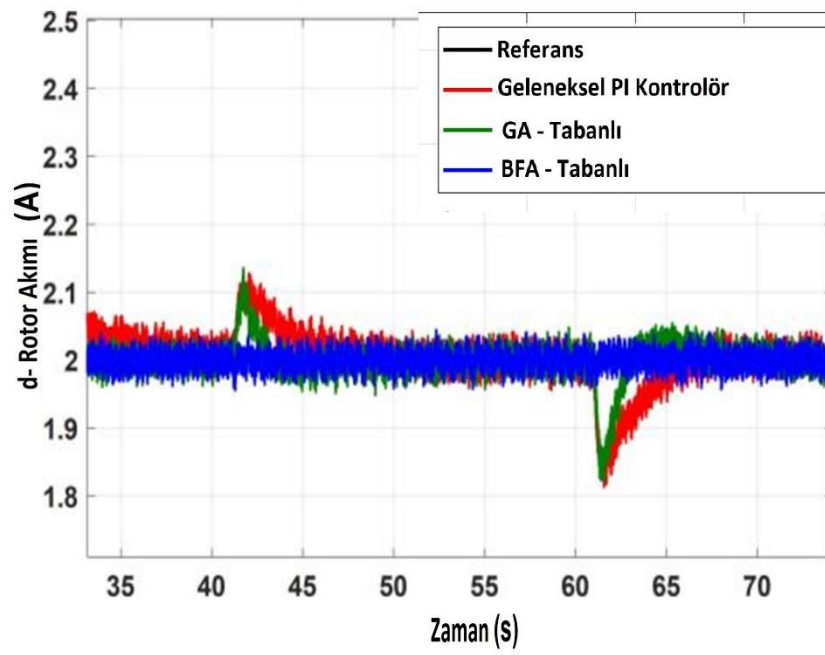
(a) dc-link gerilim regülasyonu, (b) d-rotor akım regülasyonu, (c) q-rotor akım regülasyonu.



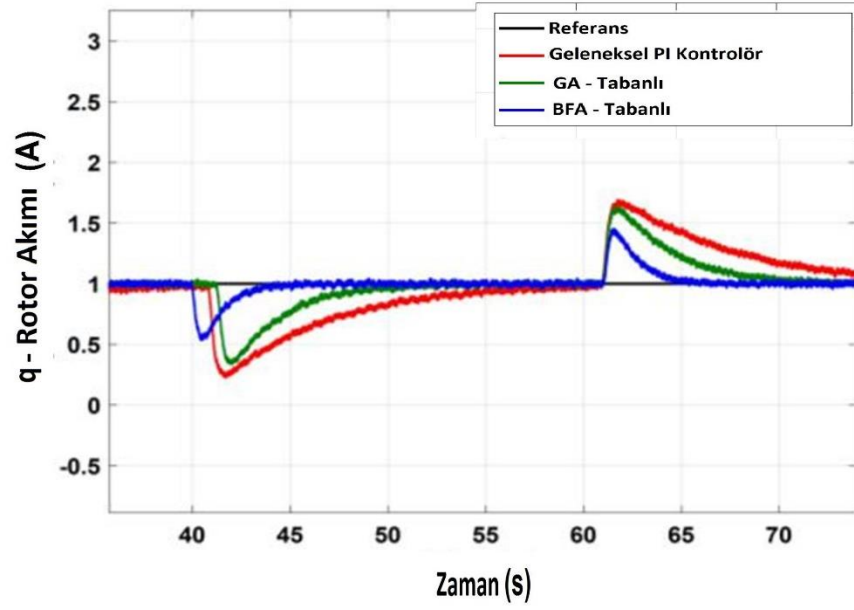
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.21. Adım altındaki kontrol yanıtı, rotor hızındaki değişiklikler.

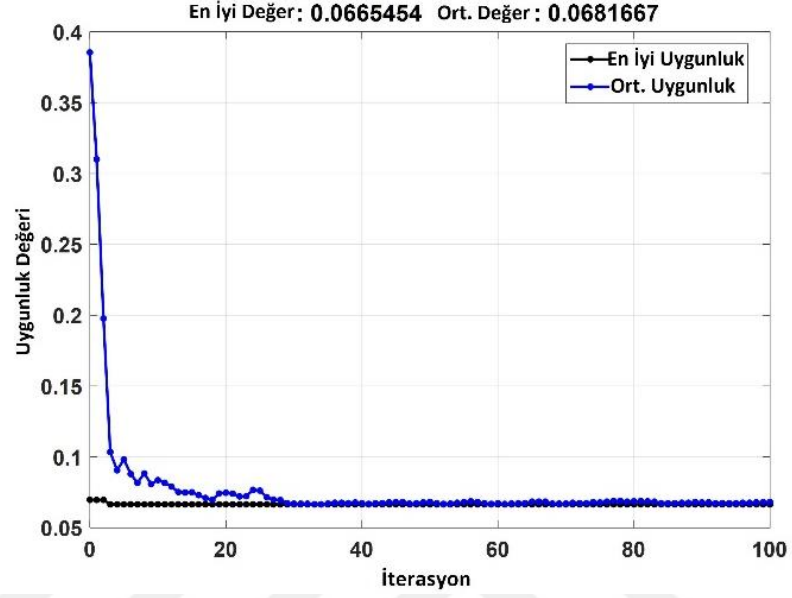
(a) rotor hız profili, (b) dc-link gerilim regülasyonu, (c) d-rotor akım regülasyonu, (d) q-rotor akım regülasyonu

Şekil 4.22, IAE, ISE, ITAE ve ITSE kriterleri için ortalama ve en iyi uygunluk fonksiyonlarının yakınsama geçmişlerini göstermektedir. BFA'nın, yerel minimumları ve çözüm kalitesini önleyerek hızlı yakınsama açısından dört endeksi göz önünde bulundurarak GAO'dan üstünlüğü görülmektedir. Ayrıca, ITAE kriteri için BFA yöntemi en iyi çözümü sunar. Konvansiyonel, GAO ve BFA'dan ITAE performans endeksine sahip optimize edilmiş değerler deneysel ÇBAG rüzgar enerjisi sistemini PI kontrolörleri ile çalıştırmaktadır.

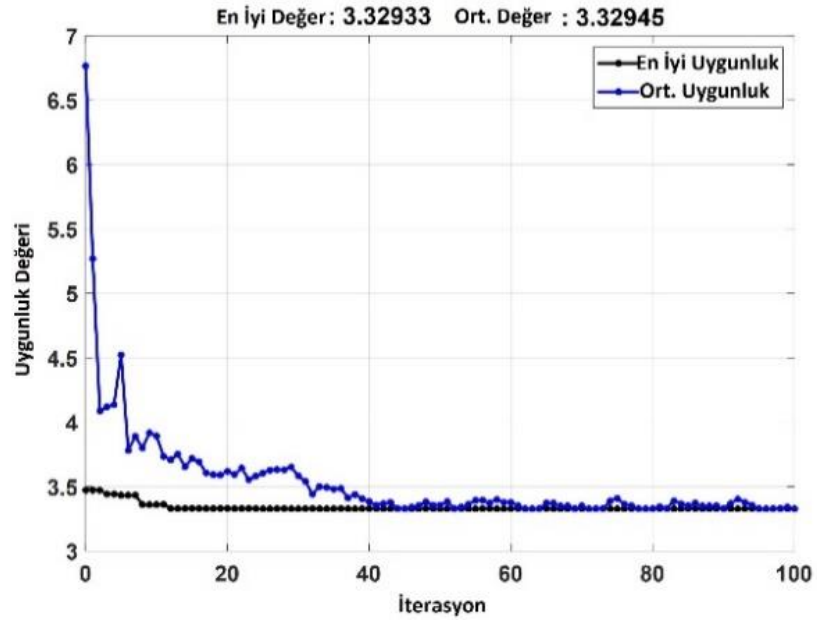
Bir sonraki deneyde, BFA bakteri popülasyonu (S) ile karakterize edilen iterasyon sayısına dayanarak değerlendirilir. Optimizasyon yöntemi 10, 50 ve 100 iterasyon için yapılmıştır. Her yinelemeye dayanarak optimize edilmiş değerler, kontrolörleri ÇBAG enerji sisteminde çalıştırmak için kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, Şekil 4.23'de gösterilmektedir.

Şekil 4.23 (a)'da gösterilen dc-link gerilim regülasyonu ile ilgili olarak, yineleme sayısının artırılmasının aşmayı ve yerleşme süresini azalttığı gözlemlenebilir. Şekil 4.23 (b) ve (c)'de gösterilen rotor akımının d-q bileşenleri için, daha fazla yineleme daha iyi takip tepkisi gösterir.

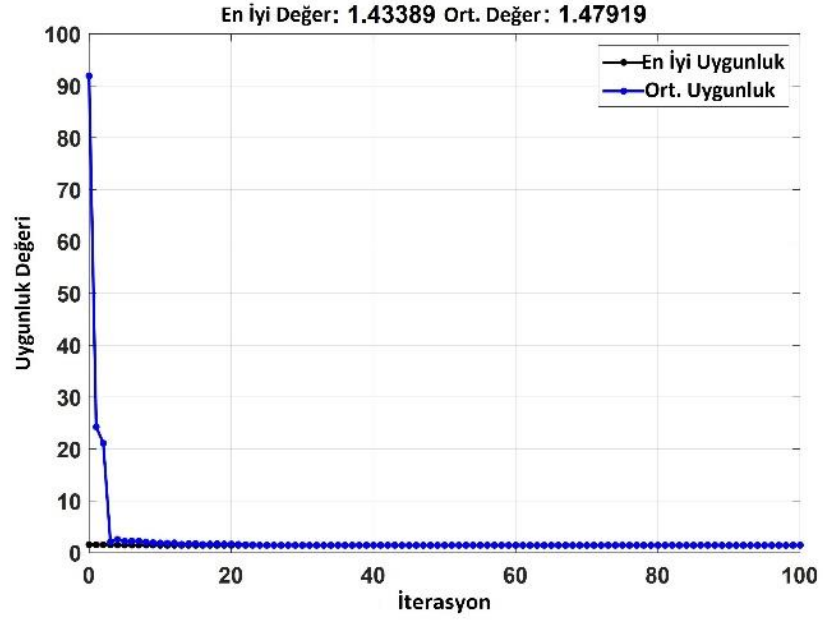
Bu nedenle, maliyet fonksiyonunun optimizasyonu, daha fazla yinelemenin minimum performans endeksi sağladığı iterasyon sayısı ile ilgilidir. Dezavantajı, optimizasyon algoritmasının yürütme süresindeki artış olacaktır. Bu nedenle, süreci optimize etmek için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.



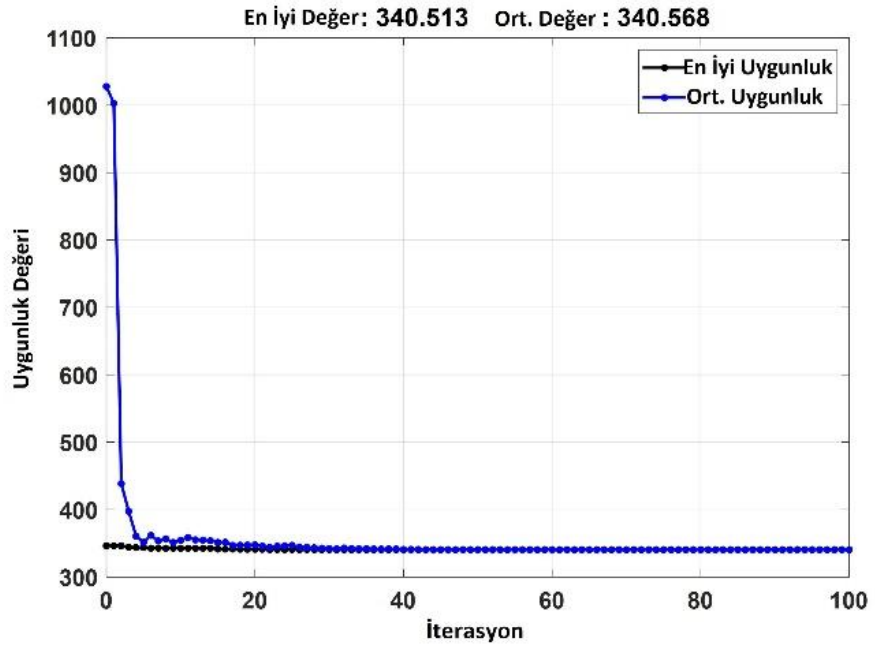
(a)



(b)

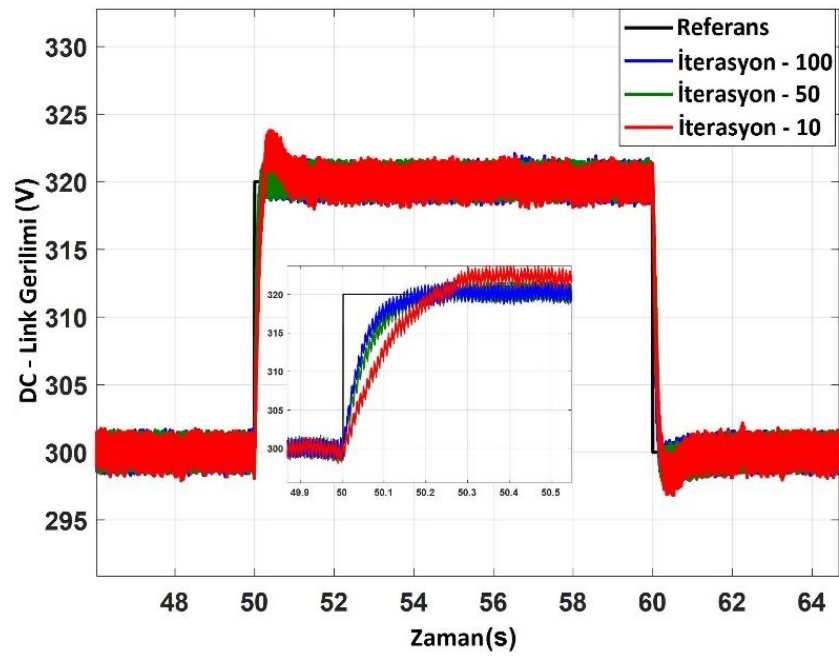


(c)

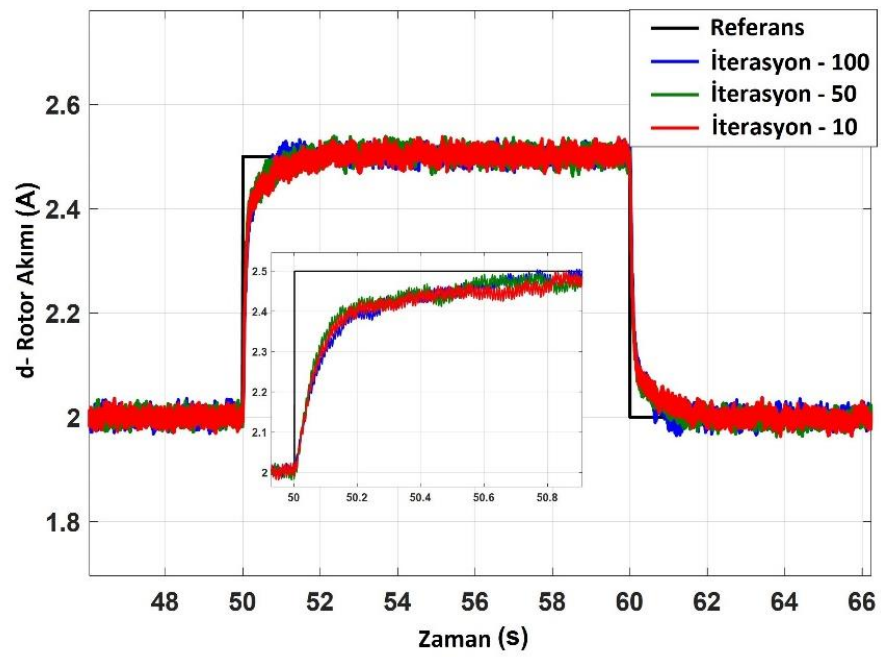


(d)

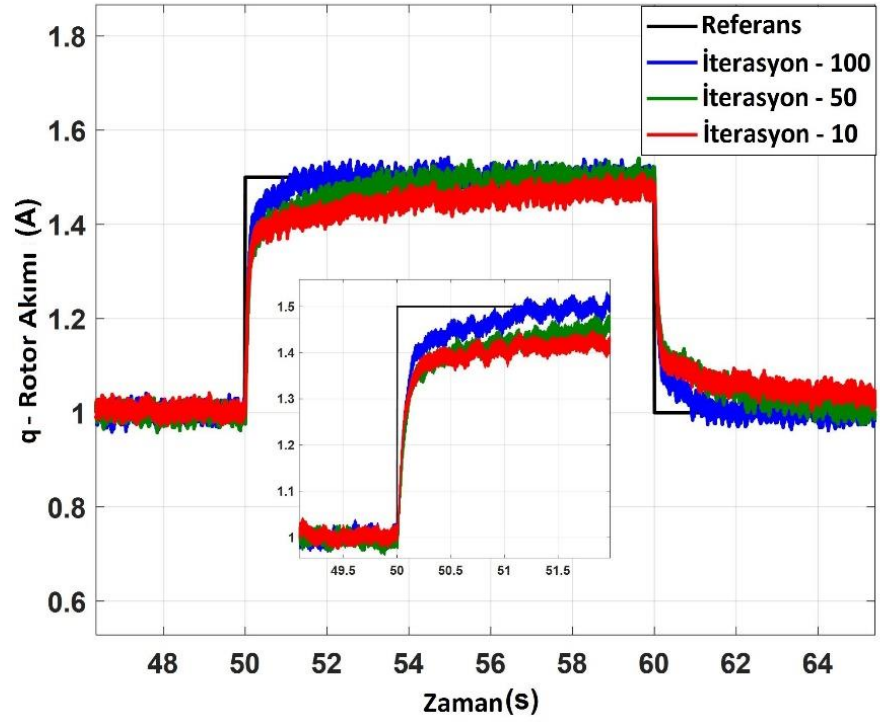
Şekil 4.22. Performans kriterleri için yakınsama oranları karşılaştırması, (a) ITAE. (b) IAE. (c) ITSE. (d) ISE.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.23. Farklı iterasyonlar altında BFA için kontrol tepkisi. (a) dc-link gerilim regülasyonu. (b) d-rotor akımı regülasyonu. (c) q-rotor akımı regülasyonu.

4.3.2. ÇBAG tabanlı rüzgar sistemi için WCA Tabanlı optimizasyon yönteminin deneysel sonuçları ve tartışması

Deney, Şekil 3.25'de gösterilen 2 kW ÇBAG enerji sisteminde yapılmıştır. Ana taşıyıcı dört kadranlı bir dinamometredir ve OP5600 gerçek zamanlı kontrol için işlemci olarak kullanılır. Sistem parametreleri Çizelge 4.10'da verilmiştir. Gerilim ve akımlar OP8660 veri toplama arayüzü tarafından ölçülür. Gerçek zamanlı simülasyon ve döngü içi donanım, Matlab/Simulink ve RT-LAB yazılım ortamında üretilmiştir.

PI kontrol parametreleri, konvansiyonel, GAO ve WCA yöntemleri kullanılarak optimize edilir ve değerleri, dc-link gerilimini ve d-q eksenli rotor akımlarını düzenlemek ve deney düzeneğini çalıştırmak için kullanılır. Optimizasyon performans kriterleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir: integral mutlak hata (IAE), integral zaman mutlak hata (ITAE), integral kare hatası ve integral zaman kare hatası (ITSE). WCA yöntemini doğrulamak ve PI kontrolörlerini ayarlamak için geleneksel ve GAO yöntemlerine göre

avantajlarını göstermek için deneysel sonuçlar verilmektedir. Çizelge 4.15 için WCA ve GAO için optimizasyon sonuçları verilmiştir.

GAO yöntemi için aşağıdaki parametreler kullanılarak uygulanır:

Nüfus büyüklüğü: 50

Değişken sayısı: 6

Çapraz hız: 0.8

Mutasyon oranı: 0.01

Nesiller: 10, 100

WCA yöntemi aşağıdaki parametrelere sahiptir:

Değişken sayısı (N): 6

Nüfus sayısı (N_p): 50

Nehir sayısı + deniz (N_{sr}): 4

Buharlaştırma koşulu sabiti (d_{max}): 10^{-16}

Yineleme sayısı (maks_iter): 10, 100

Optimizasyon İşlemci Intel (R) Core (TM) i-5 3317U [CPU@1.70GHz](#) işlemcili bir bilgisayarda, performans kriterleri (ITAE, ITSE, IAE ve ISE) ve 10'a eşit iterasyon sayısı için GAO ve WCA yöntemleri uygulanmıştır. Optimizasyon sonuçları Çizelge 4.15'de verilmektedir.

Çizelge 4.15. WCA için optimizasyon sonuçları

Performans kriteri	PI kontrol parametreleri	Genetik algoritma optimizasyonu	Su Döngüsü Optimizasyonu
ITAE	dc-link gerilim kontrolör (K_{p1}, K_{i1})	0.901810, 0.084212	0.824910, 1
	d-eksen akım kontrolör (K_{p2}, K_{i2})	0.917121, 0.670713	0.631795, 0.813323
	q-eksen akım kontrolör (K_{p3}, K_{i3})	0.926244, 0.487437	0.789344, 0.324237
	En iyi uygunluk değeri	0.06980	0.063385
	Ortalama en iyi uygunluk	0.08640	0.064210
	Optimizasyon zamanı (s)	13812.12	16987.4339
ITSE	dc-link gerilim kontrolör (K_{p1}, K_{i1})	0.905712, 0.934021	0.655728, 0.849184
	d-eksen akım kontrolör (K_{p2}, K_{i2})	0.950231, 0.636311	0.822872, 0.146304
	q-eksen akım kontrolör (K_{p3}, K_{i3})	0.959714, 0.95931	0.959712, 0.459390
	En iyi uygunluk değeri	1.5660	1.406088
	Ortalama en iyi uygunluk	1.87196	1.4791
	Optimizasyon zamanı (s)	12950.32	16730.1059
IAE	dc-link gerilim kontrolör (K_{p1}, K_{i1})	0.681474, 0.131560	0.792706, 0.029003
	d-eksen akım kontrolör (K_{p2}, K_{i2})	0.669862, 0.439013	0.592603, 0.499241
	q-eksen akım kontrolör (K_{p3}, K_{i3})	0.754817, 0.156626	0.787434, 0.000874
	En iyi uygunluk değeri	3.407847	3.30265
	Ortalama en iyi uygunluk	3.66189	3.32941
	Optimizasyon zamanı (s)	131221.43	16936.8080
ISE	dc-link gerilim kontrolör (K_{p1}, K_{i1})	0.665711, 0.859105	0.603819, 0.791254
	d-eksen akım kontrolör (K_{p2}, K_{i2})	0.823506, 0.157321	0.517939, 0.408270
	q-eksen akım kontrolör (K_{p3}, K_{i3})	0.948731, 0.478309	0.998447, 0.006517
	En iyi uygunluk değeri	342.7157	340.24297
	Ortalama en iyi uygunluk	354.531	342.568
	Optimizasyon zamanı (s)	142311.35	17615.40295

WCA performansının ortalama hataya dayanarak GAO'dan daha iyi olduğu görülebilir. Ayrıca, tüm performans kriterleri için daha iyi cevap vermiştir. Bununla birlikte, WCA yöntemi bu performansı elde etmek için daha fazla yürütme süresi gerektirir. Deneysel kurulum performansını test etmek için, GAO ve WCA yöntemleri, performans kriteri ITSE ve 100'e eşit iterasyon kullanılarak yapılmıştır.

Optimizasyon yönteminde kullanılan ÇBAG enerji sistemi modeli, öncelikle 1650 dev/dk sabit hızda çalıştırılmıştır. PI kontrol parametreleri için optimize edilmiş değerler, Şekil 3.28'de gösterildiği gibi vektör kontrol sisteminde kullanılmıştır. Tüm deneyler için aynı değerler kullanılmıştır.

Optimizasyonun amacı, yanıt süresini en aza indirmek, yerleşme süresini en aza indirmek ve aşmaları azaltmaktır. Bu deneyde, ÇBAG sistemi 1650 dev/dk sabit rotor hızında çalıştırılmıştır.

DC-link gerilim referansı, $t = 50$ s zamanında 295 V ila 305 V arasında değişmiştir ve d-q rotor akımı referansları, $t = 50$ s (yükseltme) ve $t = 60$ s (düşürme) zamanlarında değiştirilmiştir. Optimizasyon yöntemleri için geçişlerdeki performans cevabı kontrol edilmiştir. Kontrol amacı, dc-link gerilimi ve d-q eksen rotor akımı için belirtilen referansların izlenmesidir. İzleme cevapları, Şekil 4.24'de gösterilmektedir. Konvansiyonel ve GAO bazlı PI kontrolünün Şekil 4.24 (a)'da gösterilen gerilim tepkilerine göre, bir WCA bazlı PI kontrolünün daha iyi bir yerleşme süresi ile daha az bir aşmaya maruz kaldığı gözlemlenebilir. d-q eksenleri için Şekil 4.24 (b)-(c)'de gösterilen rotor akımları ve WCA'ya dayanan yanıt, diğer yöntemlere kıyasla, yerleşme süresi konusunda etkilidir.

Şekil 4.25, dc-link gerilimi ve d-q eksen rotor akımı için farklı sayıdaki yinelemelerde (max_iter) WCA bazlı optimal kontrol performansını göstermektedir.

Şekil 4.25 (a)'dan itibaren düşük sayılarda gerilim tepkisinin zayıflatıldığı ve sayının 50 ve 100'e yükselmesinin, iyileştirilmiş yerleşme süresi ile üst üste geldiği görülmektedir. Şekil 4.25 (b) ve (c)'de gösterilen rotor akımlarında, iterasyon sayısının artması ile yerleşme süresi azalır.

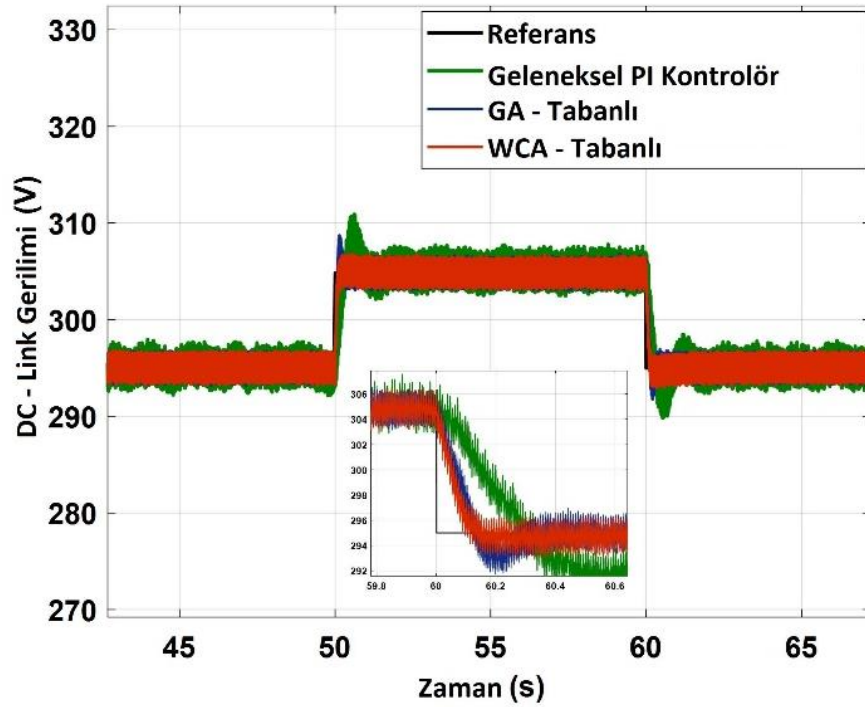
Daha sonrasında, bu deneyde, optimize edilmiş PI parametreleri, deneysel ÇBAG enerji sistemini değişken rotor hızı altında çalıştırmak için kullanılmıştır.

ÇBAG sistemi Şekil 4.29'daki gibi değişken rotor hızı altında ([0 20] s'de 1650 dev/dk, [20 40] s'de 1700, [40 60] s'de 1750, [60 80] s'de 1700 ve [80 90] s'de 1650) çalıştırılmıştır.

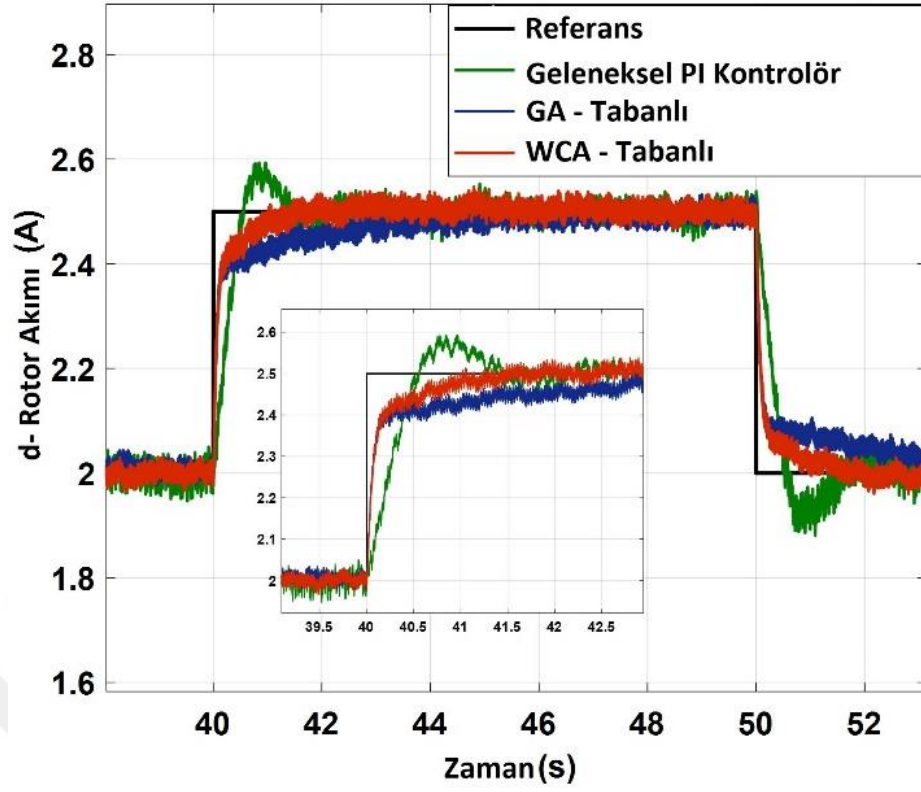
ÇBAG dinamiğinden, rotor akımlarının rotor hız değişimlerinden en çok etkilendiği açıkça görülmektedir. Şekil 4.26'da gösterilen sonuçlardan, konvansiyonel yöntem durumunda dc-link gerilim regülasyonunun hız değişimlerinden etkilendiği görülürken, WCA ve GAO Şekil 4.26 (a)'da gösterildiği gibi iyi performans sağlar. d - q eksenleri ile ilgili olarak, Şekil 4.26 (b) ve (c)'de gösterilen rotor akımı tepkileri ile ilgili olarak, WCA'nın optimize edilmiş kontrol cihazlarının, GAO ve geleneksel kontrol cihazlarına kıyasla aşma ve yerleşme süresi açısından, rotor hız değişikliklerine daha iyi tepki verdiği gözlenebilir.

Ayrıca, geçici rejimde kalma süresinin, üç kontrol değişkenli dc-link gerilimi, d -ekseni rotor akımı ve q -ekseni rotor akımı için, GAO ve geleneksel yöntemlere kıyasla WCA yönteminin daha iyi olduğu gözlenebilir (Şekil 4.27).

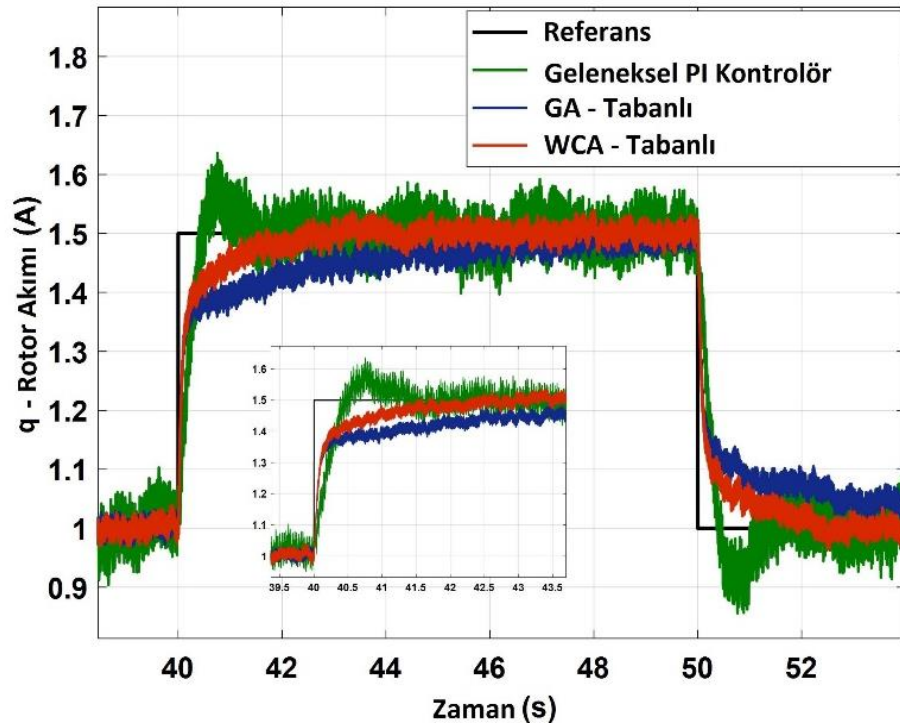
Son olarak, gerilimin geçici rejim tepkisi, WCA yöntemi kullanılarak IAE, ITAE, ISE ve ITSE performans kriterleri için karşılaştırılır. Şekil 4.28'de gösterilen sonuçlardan, ITSE performansının yerleşme süresi açısından daha iyi olduğu gözlemlenebilir.



(a)

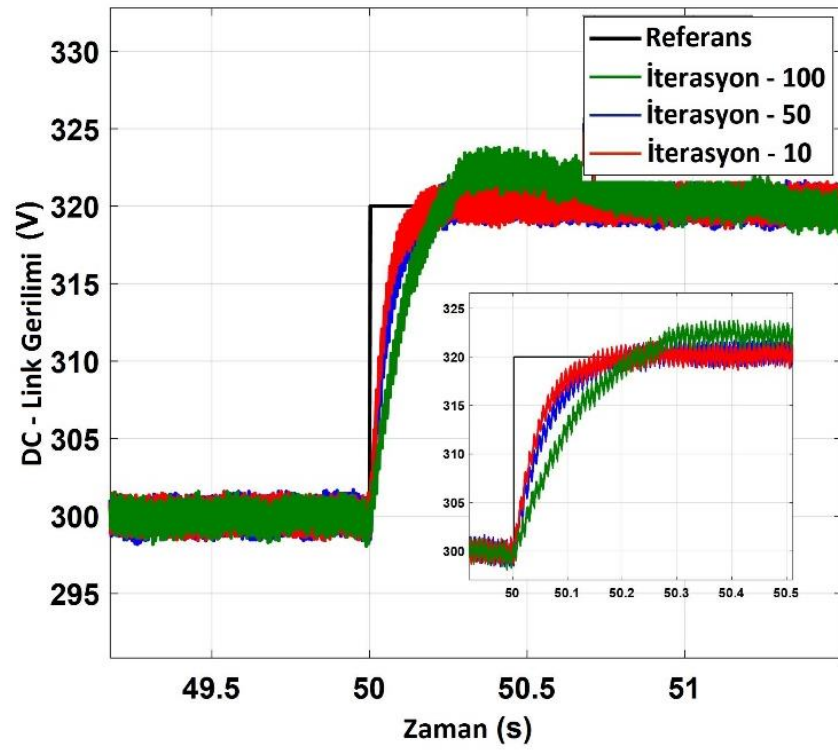


(b)

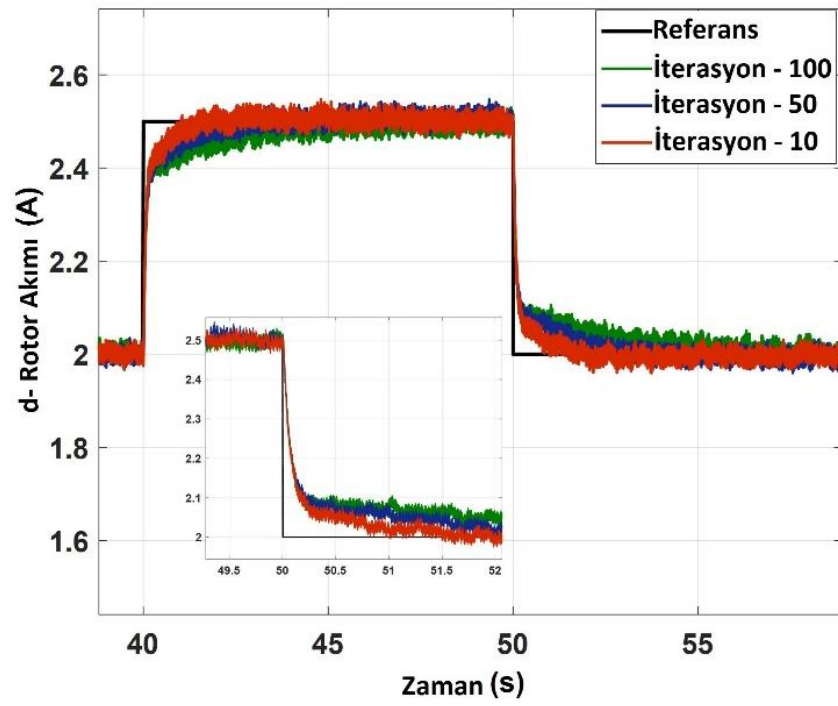


(c)

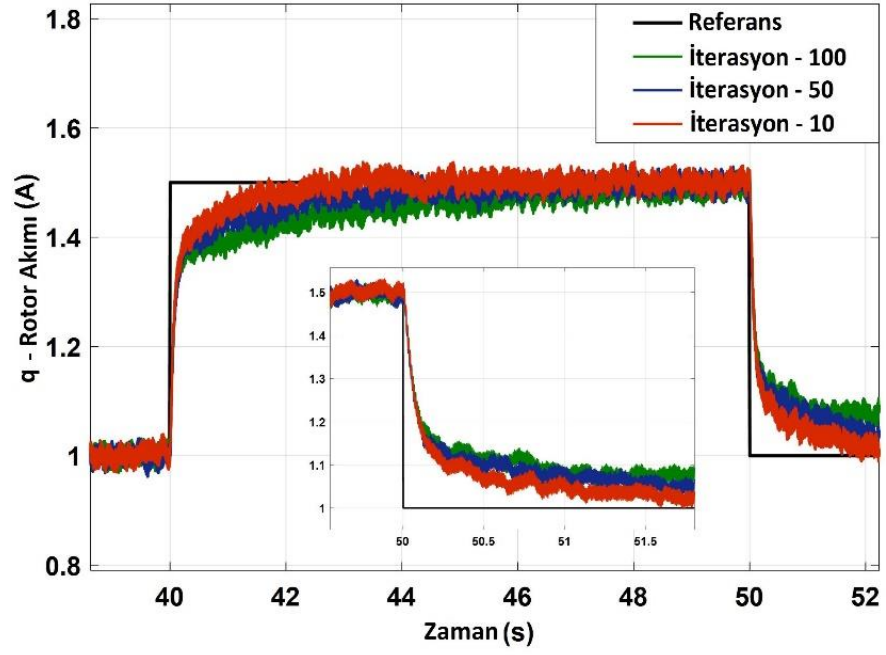
Şekil 4.24. Farklı optimizasyon yöntemleri ve sabit rotor hızı altındaki kontrol tepkisi. (a) dc-link gerilim tepkisi. (b) d-rotor akımı tepkisi. (c) q-rotor akımı tepkisi.



(a)

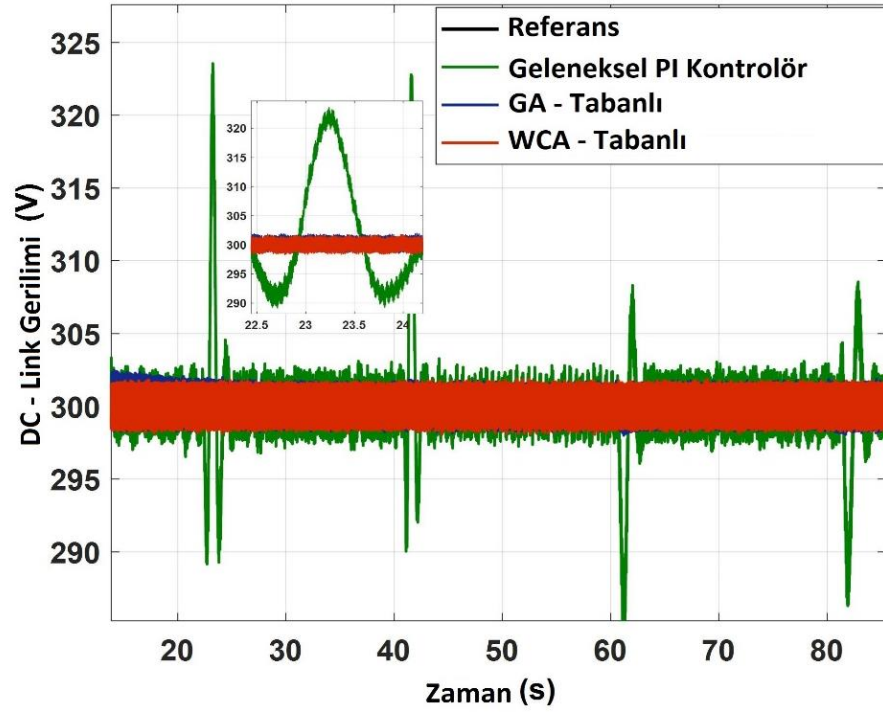


(b)

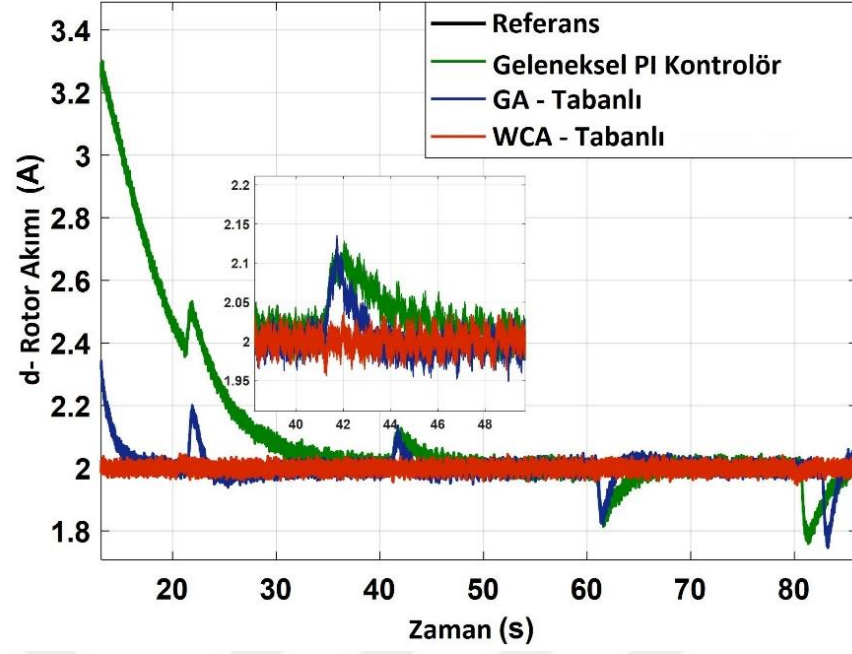


(c)

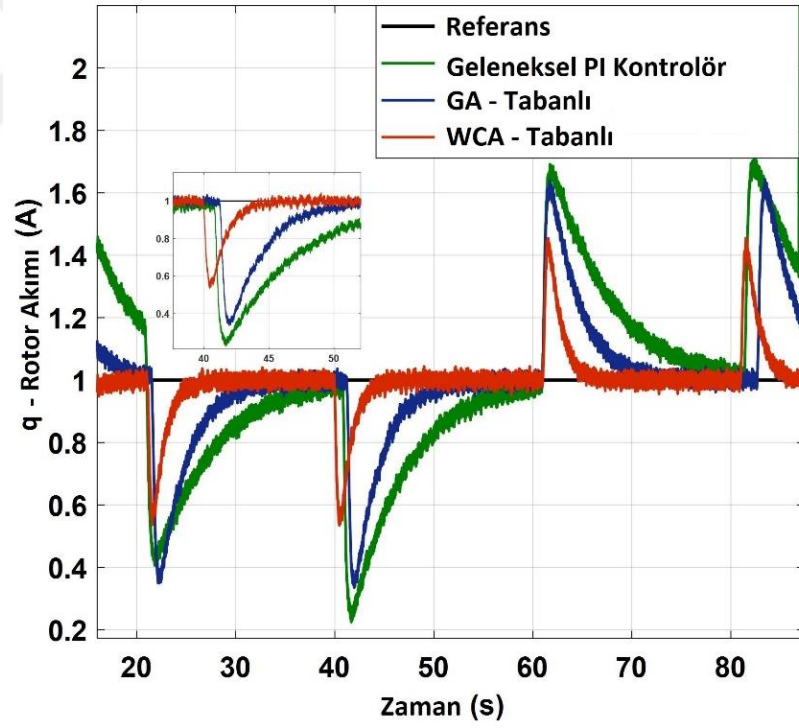
Şekil 4.25. Farklı iterasyonlarda WCA için kontrol tepkisi. (a) dc-link gerilim cevabı. (b) d-rotor akımı yanıtı. (c) q-rotor akımı tepkisi.



(a)

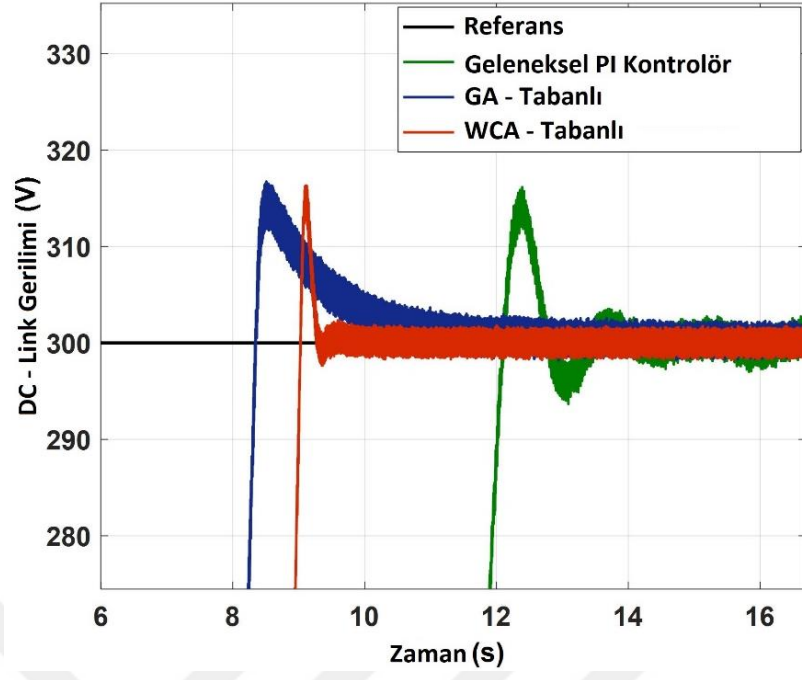


(b)

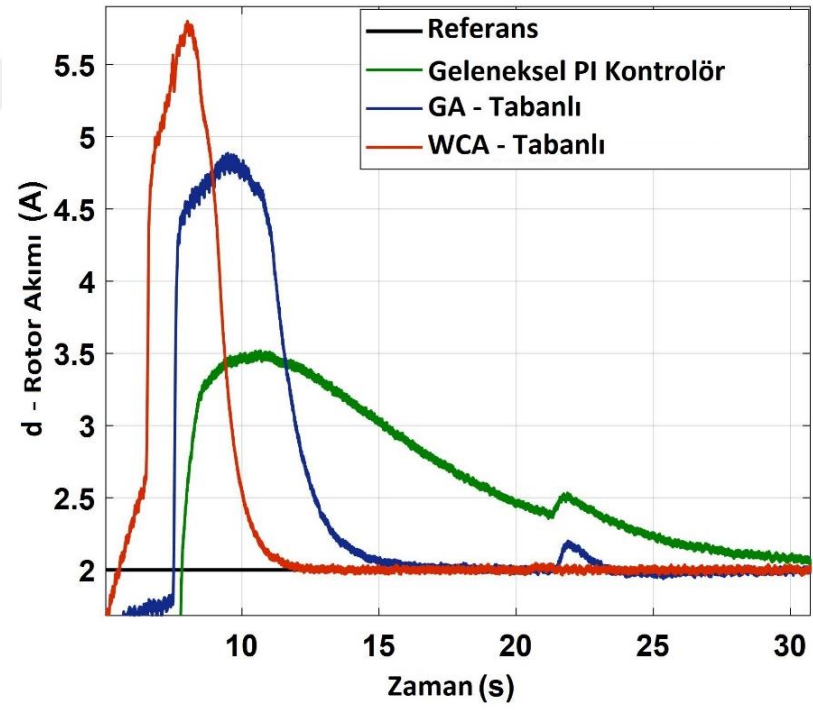


(c)

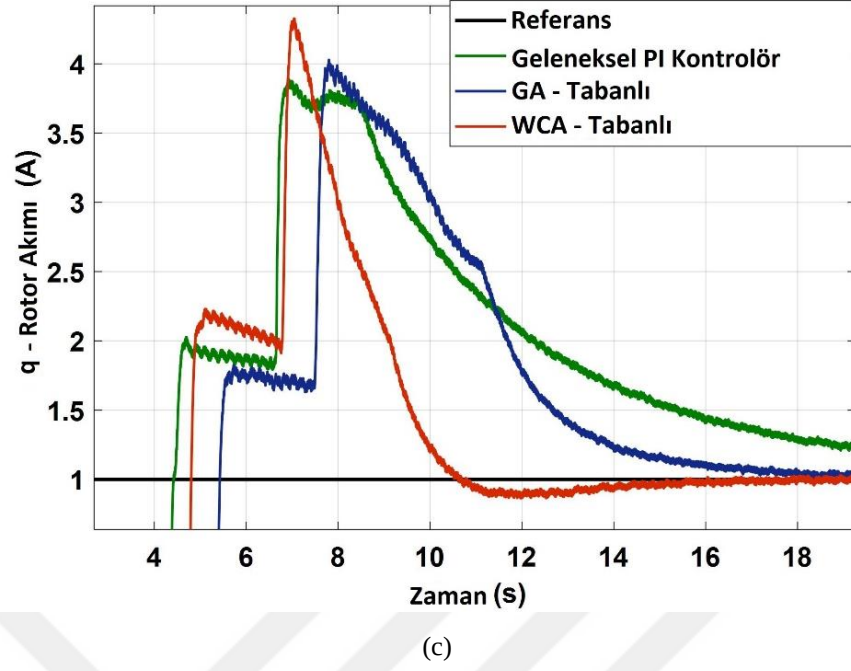
Şekil 4.26. Farklı optimizasyon yöntemleri ve değişken rotor hızı altındaki kontrol tepkisi. (a) dc-link gerilim cevabı. (b) d-rotor akım cevabı. (c) q-rotor akımı cevabı.



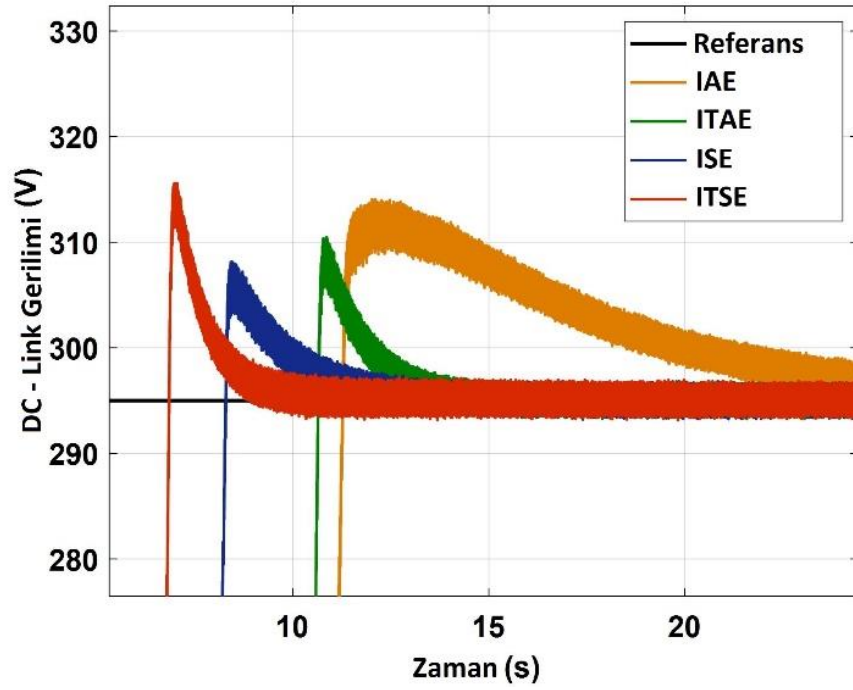
(a)



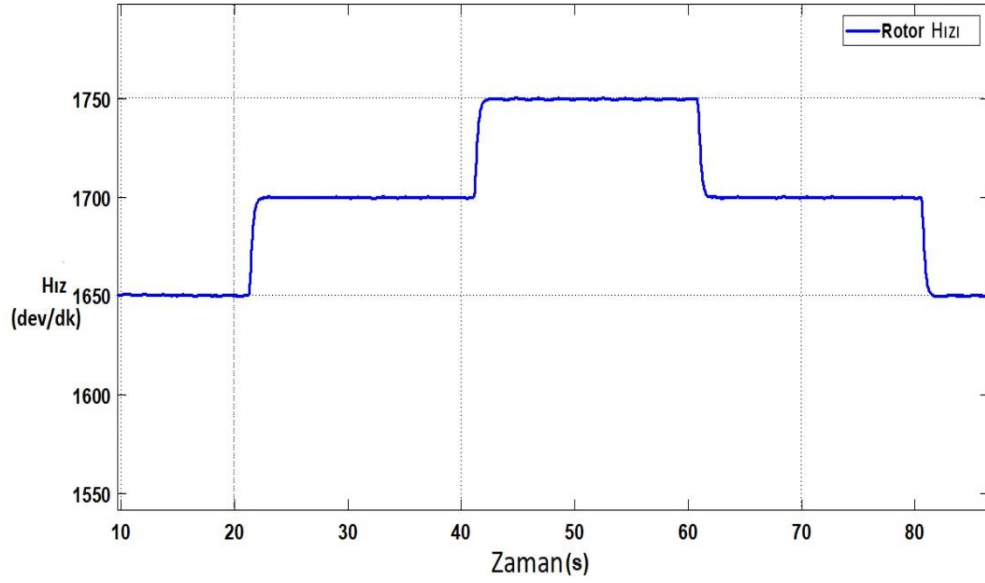
(b)



Şekil 4.27. Farklı optimizasyon yöntemleri ve değişken rotor hızı altında geçici tepki. (a) dc-link gerilim cevabı. (b) d-rotor akımı yanıtı. (c) q-rotor akımı



Şekil 4.28. WCA altında geçici cevap ve farklı performans kriterleri.



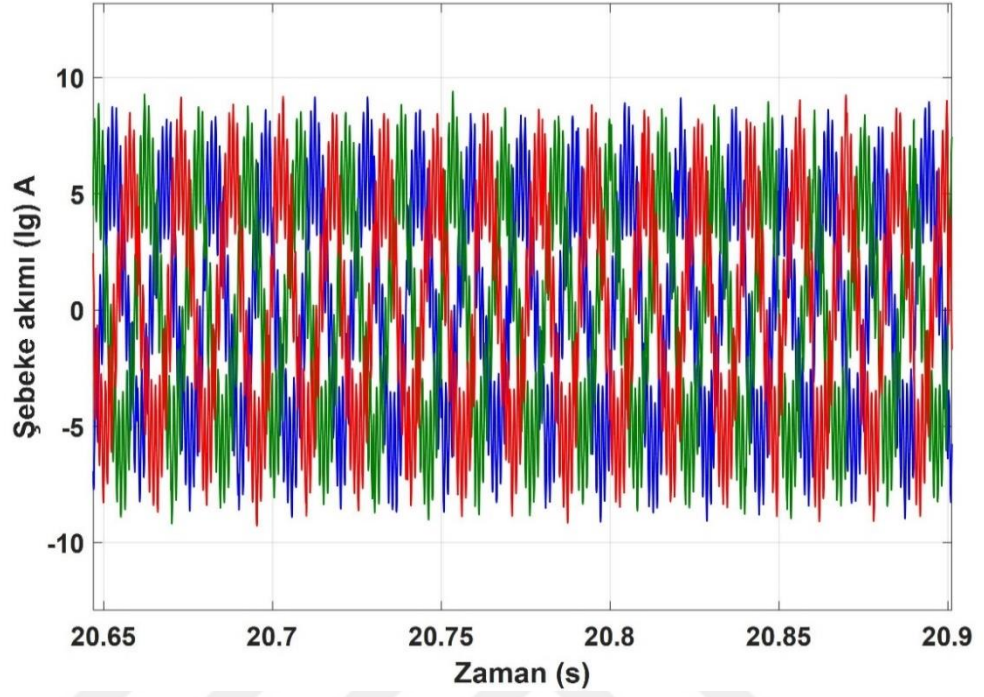
Şekil 4.29. Değişken rotor hızı

4.4. ÇBAG tabanlı rüzgar enerji sisteminin gerçek zamanlı akım, gerilim, güç simülasyon sonuçları

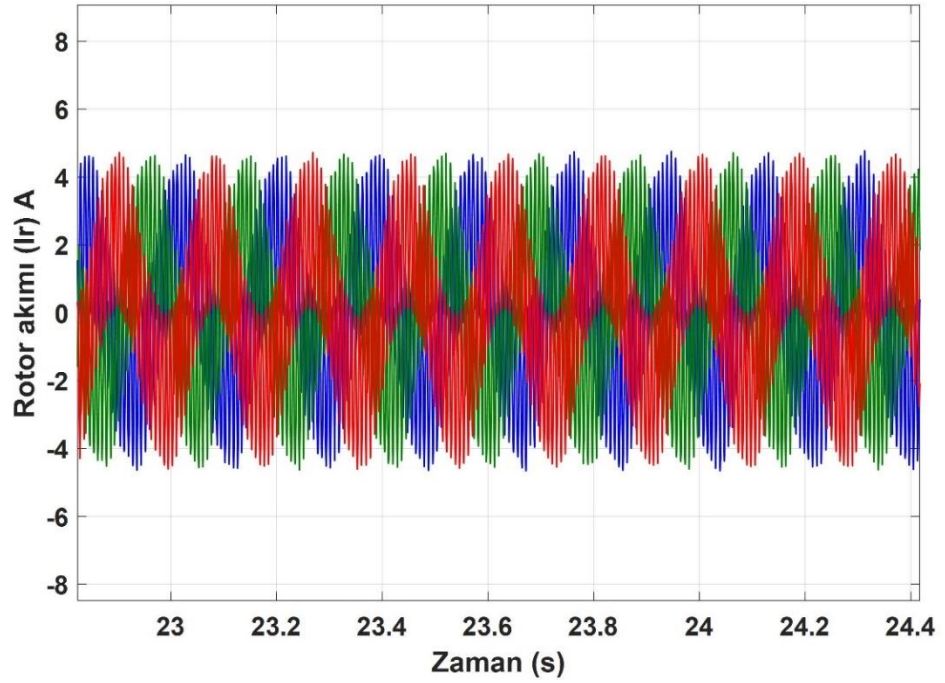
Bu test düzeneğinde, dinamometre (rüzgar türbini emülatörü), sabit hızda çalıştırılmıştır. Sistemden çalışırken yukarıdaki sonuçlardaki kontrol devresindeki gibi I_q akımına bir sinyal verilerek değiştirilmiştir. Bu aşamadaki sonuçlara bağlı olarak Şekil 4.30-4.32’de gerçek zamanlı sistemin şebeke akımının 8 A değeri arasında üç fazlı bir sinüs sinyali oluşturduğu görülmektedir, rotor akımı ise 4 A çekerek bir üç fazlı sinyal oluşturmıştır ve stator akımının da 12 A çektiği görülmektedir.

Şekil 4.33-4.35’de OPAL-RT teknolojisi sayesinde sisteme ait gerçek zamanlı sonuçlarda 30 V üç fazlı bir şebeke gerilimi verilmiştir, 150 V rotor ve 28 V stator gerilim sonuçları alınmıştır. Şekil 4.36-4.38’de aktif ve reaktif güç, rotor q akımını değiştirerek, kontrol edilmiştir ve stator, rotor ve şebeke için güç profilleri verilmiştir. Gösterilen güç tepkisinden Şekil 4.38’de aktif ve reaktif gücün rotoru değiştirerek kontrol edilebildiği görülebilir. Şekil 4.38’de mavi renkli aktif güç toplamı dengelemek için artarken yeşil renkli reaktif güç azalmaktadır. Aynı şekilde sistemde I_d akımı değiştirildiğinde mavi renkli aktif güç toplamı dengelemek için azalırken yeşil renkli reaktif güç artmaktadır. Aslında sistemlerde I_d ve I_q akımının değişimine bağlı olarak aktif reaktif güçlerde ve sistemde oluşan değişimler görülmektedir, buna bağlı olarak bu rüzgar sisteminde V_{dc}

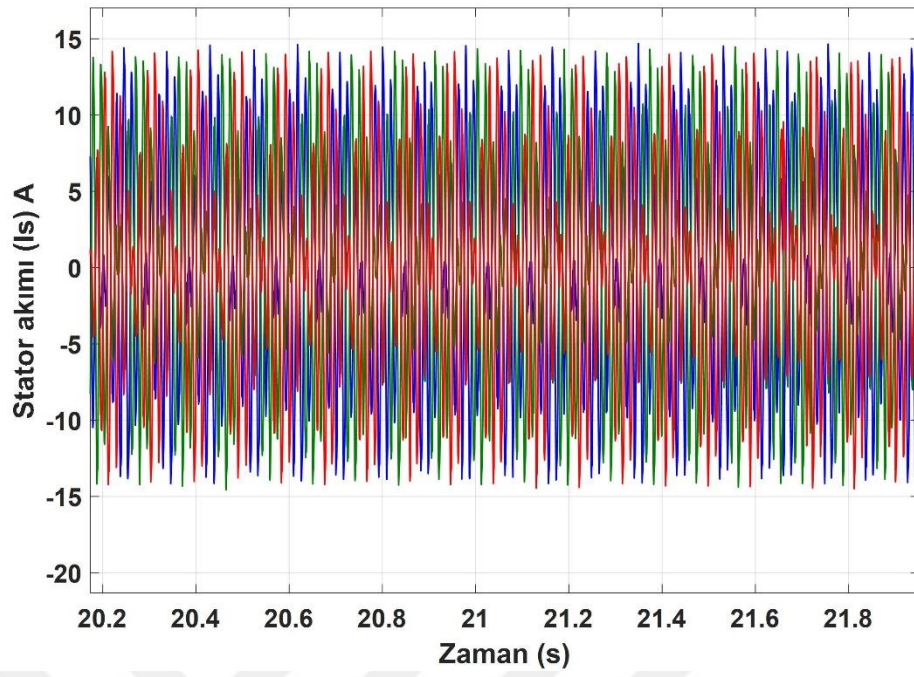
sabit, I_d ve I_q değişiminin sisteme etkisi ve güç profilindeki değişimleri görülmektedir. Ayrıca, dc-link gerilimi sürekli bir referansı takip etmek için başarıyla düzenlenmiştir.



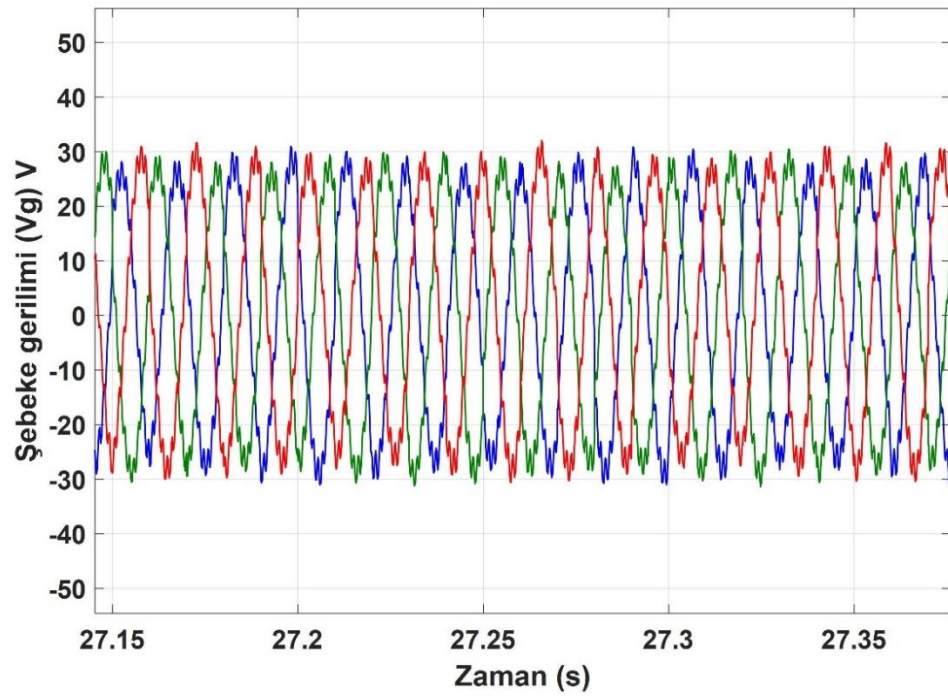
Şekil 4.30. Sistemin şebeke akımı



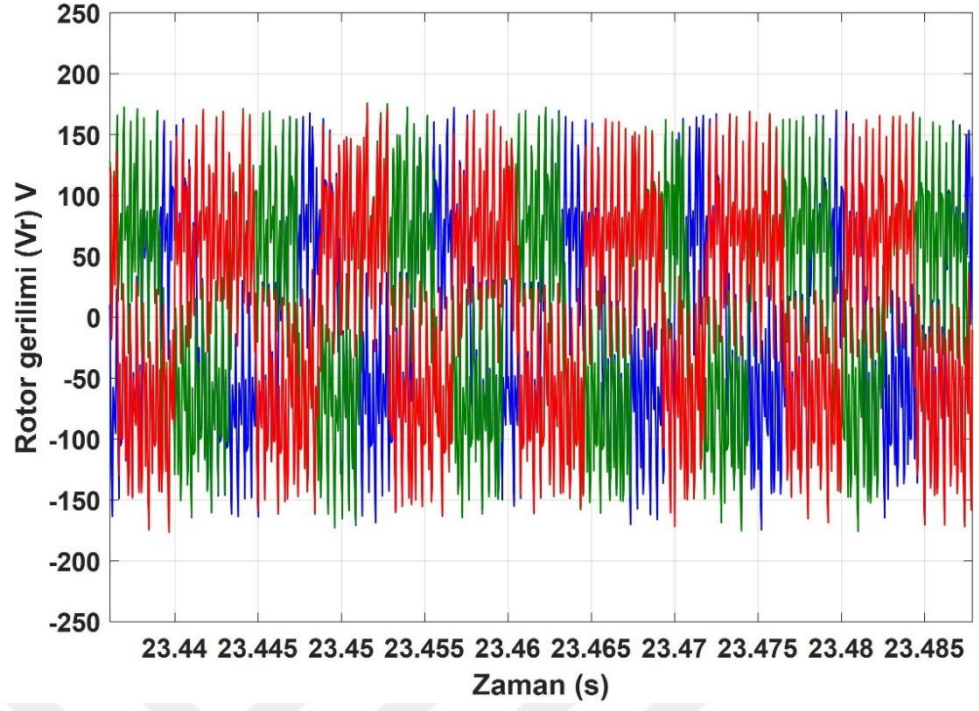
Şekil 4.31. Sistemin rotor akımı



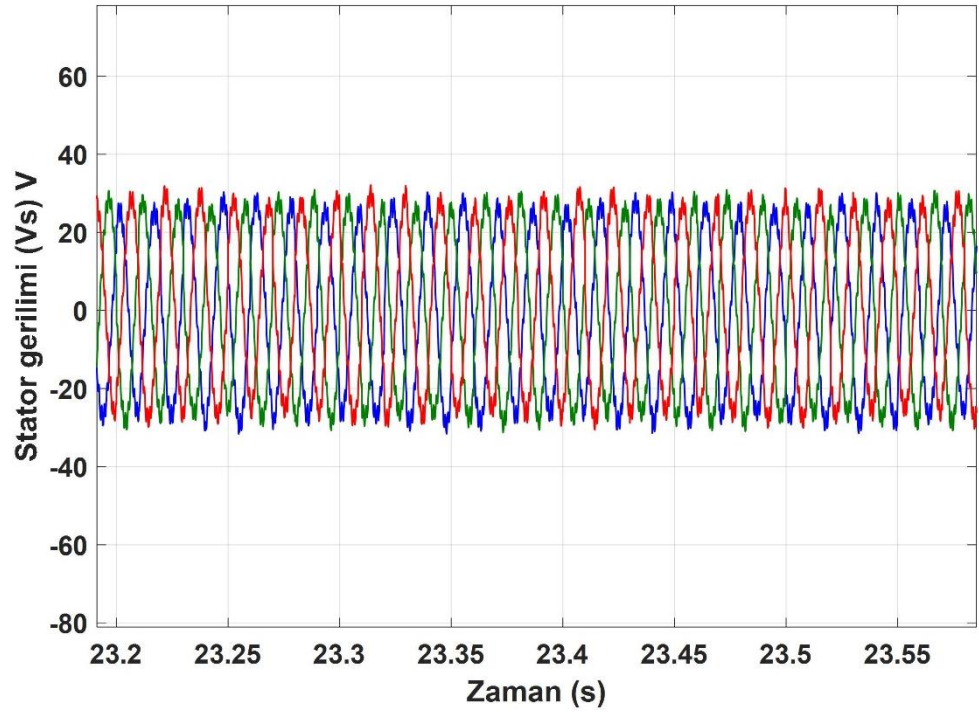
Şekil 4.32. Sistemin stator akımı



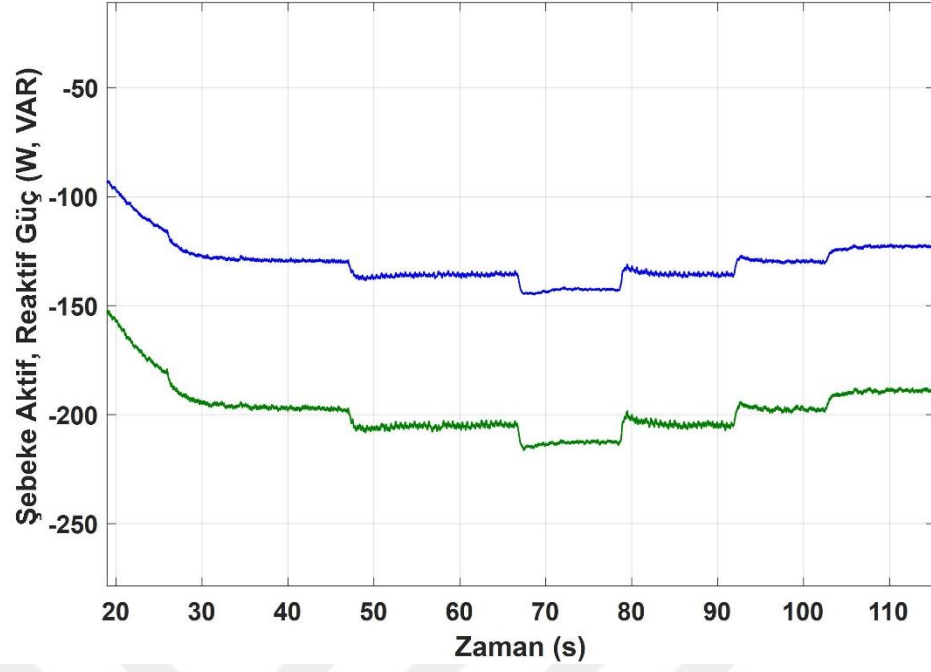
Şekil 4.33. Sistemin şebeke gerilimi



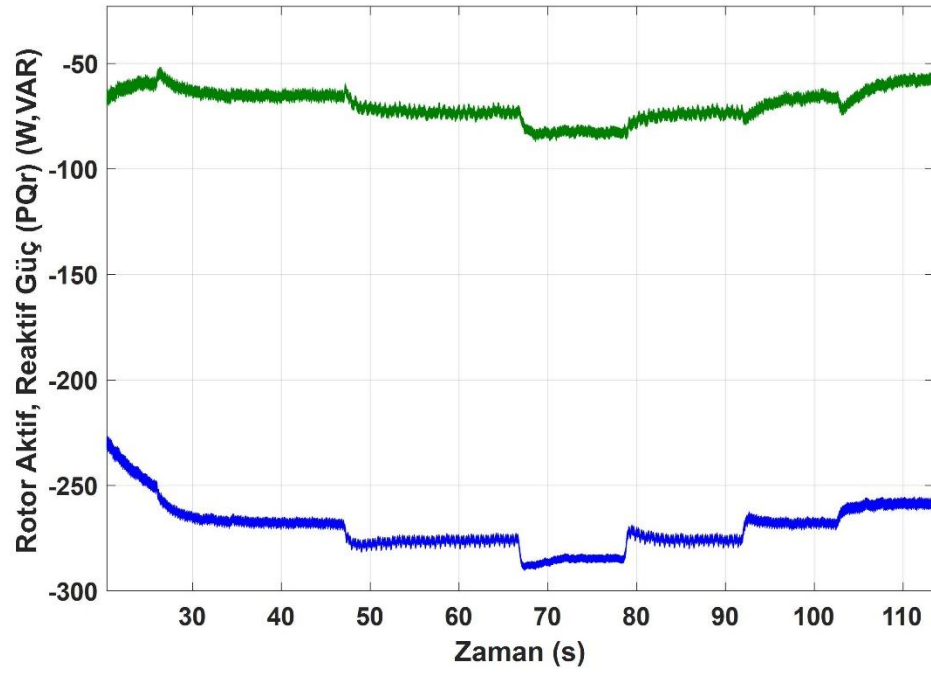
Şekil 4.34. Sistemin rotor gerilimi



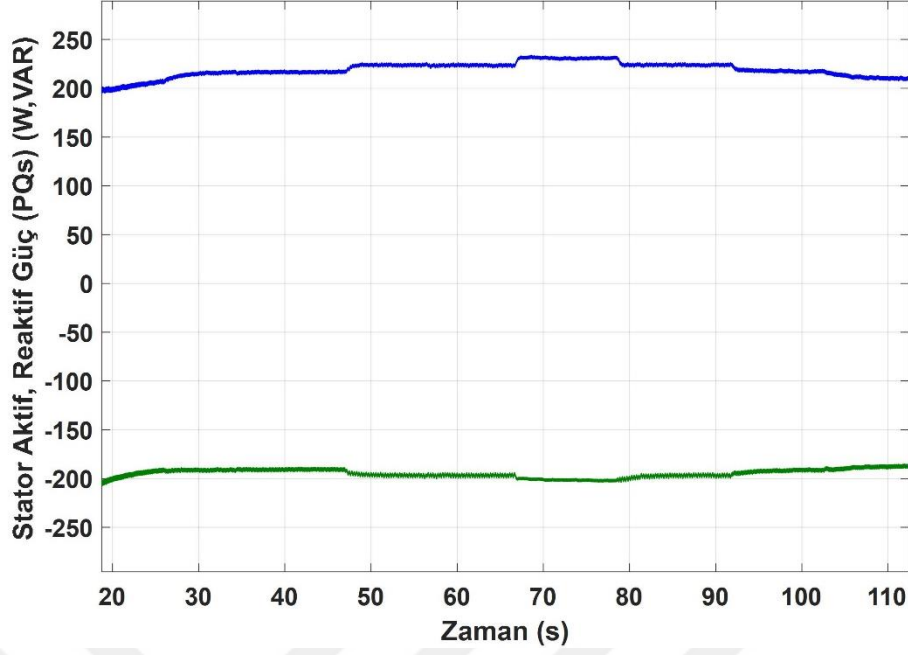
Şekil 4.35. Sistemin stator gerilimi



Şekil 4.36. Sistemin şebeke için aktif, reaktif gücü



Şekil 4.37. Sistemin rotor için aktif, reaktif gücü



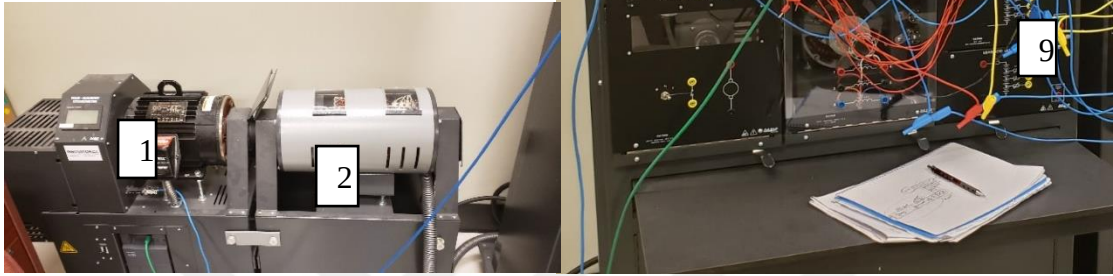
Şekil 4.38. Sistemin stator için aktif, reaktif gücü

4.5. Opal – RT teknolojisi kullanılarak ÇBAG tabanlı rüzgar sistemine STATCOM eklenmesi

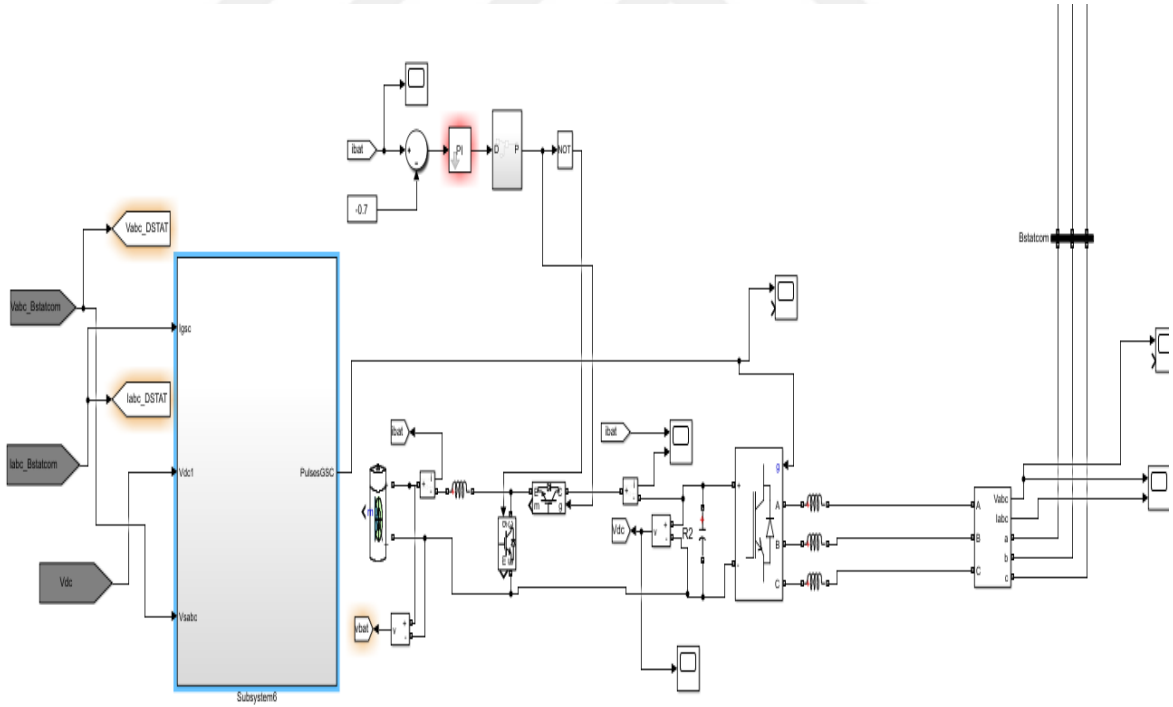
ÇBAG tabanlı rüzgar enerji sistemine (kısıtlı süre için bulunan Kanada'da çalışma yapılan laboratuvarı FV sistem başka bir doktora öğrencisi tarafından kullanıldığı için çalışmalar rüzgar sistemi üzerine yapılmıştır) STATCOM eklenmiş, RT-LAB'da çalıştırılmış ve donanımına geçildiğinde fiziksel olarak kurulan STATCOM tatmin edici sonuçlar vermemiştir. Laboratuvarındaki test düzeneğinde ara yüzde iki adet altı darbeli inverter girişi vardır, ek olarak bir STATCOM'un üç fazlı inverter için altı darbe daha gerekli olmuştur. Laboratuvarı arayüzde dijital girişler kullanılmış ve kullanılan dijital girişlerden gelen darbeler senkronizasyonu sağlayamadığı için set üzerinde yüksek akım ve gerilimler meydana gelmiştir.

Tüm sistem Şekil 4.39'da gösterilmiştir. Simulink'te modellenen STATCOM'da yüksek değerli kapasitör, süper kapasitör görevi gördüğü için iki yönlü reaktif güç kontrolü yapmaktadır. Fakat OPAL-RT deney düzeneğinde süper kapasitör olmadığı için onu karşılayacak buck-boost konvertör ve batarya bağlanmıştır. Şekil 4.40'da RT-LAB da modellenen STATCOM modeli verilmektedir.

- (1) Dinanometre(WT)
- (2) ÇBAG makine
- (3) ÇBAG arayüz
- (4) 3-ph AC gerilim kaynak
- (5) Veri toplama (OP8660)
- (6) RT kontrol edici (OP5660)
- (7) Back-to-back dönüştürücü
- (8) Hat indüktansı
- (9) Batarya
- (10) Gerilim kaynaklı inverter



Şekil 4.39. STATCOM eklenmiş şebeke bağlantılı ÇBAG tabanlı rüzgar enerji sistemi



Şekil 4.40. RT-LAB’da modellenen STATCOM modeli

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu çalışmada Simulink'te modellenen 2 MW güçte bir çift beslemeli asenkron generatör tabanlı bir rüzgar üretim sisteminin şebekeye etkisi incelenmiş ve daha sonrasında 0,4 MW'lık güneş enerjisi üretim sisteminin şebekeye etkisi incelenmiş, tüm sistem hibrit bir yapı haline getirilmiştir. Güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının gerilim profilinde dalgalanmalara sebep olduğu ve reaktif güç kompanzasyonunun STATCOM ile sağlanabileceği üzerine çalışılmıştır. Simulink'te modellenen ± 3 MVAR'lık STATCOM sisteme eklenmiştir. Hibrit yapıda bir Güneş-Rüzgar güç sistemi tasarlanarak çıkıştaki güç profilleri incelenmiş ve STATCOM ilave edilerek kapasitif ve reaktif çalışma durumlarına göre sistemdeki güç profilleri incelenmiştir. Bu çalışma ile büyük iletim sistemlerindeki güç kararsızlığını minimize edebilir ve yük artışı durumunda ya da yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme eklenmesi ile oluşan dalgalanmalar minimize edilebilir.

Bu çalışma da ilk çalışma olarak, 2 MW'lık endüksiyon generatörü tabanlı rüzgar enerjisi sisteminin ve 0,4 MW'lık solar FV enerji üretim sisteminin şebekeye etkilerini araştırmak ve hibrit sistemde, STATCOM kullanılarak reaktif gücün telafisi düşünülmüştür.

İlk olarak hibrit yapıya sahip bir güneş FV-rüzgar enerjisi sistemi performansı ve çıkışdaki gerilim profilleri incelenmiştir. STATCOM, sistemdeki gerilim profillerini kapasitif ve reaktif çalışma durumlarına göre incelemek için dahil edilmiştir ve optimizasyon sonuçları ilk olarak GA ve BFA tabanlı PI kontrolör kullanılarak karşılaştırılmış ve geleneksel PI ve GA tabanlı kontrolöre göre BFA tabanlı kontrolörden tatmin edici sonuçlar alınmıştır. Temelde, bu çalışma, büyük iletim sistemlerinde güç dengesizliğinin en aza indirilebileceğini ve yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme kabul edilmesinin neden olduğu dalgalanmaların azaltılabileceğini göstermiştir. Ayrıca bara sonunda enerjinin yüklere sorunsuz bir şekilde iletilebilmesi de sağlanmıştır.

Daha sonrasında, STATCOM'un GA, PSO ve BF-PSO tabanlı kontrolör ile ayarlandığı gösterilmiştir. Duyarlılık analizi, optimize edilmiş BF-PSO tabanlı PI kontrolörün oldukça sağlam olduğunu ve belirsizlik altında tatmin edici bir performans sağladığını göstermektedir. Dört performans kriterine göre, üç optimizasyon yönteminin tümü gerilim kararlılığına iyi cevap vermiştir, ancak ITAE kriterine göre en iyi

performans, BF-PSO tarafından çok çeşitli koşullarda elde edilir. Sonuç olarak, %112,5 aşma değeri %2,104'e düşürülmüş ve gerilim kararlılığı sağlanmıştır. PI kontrolör kazanımları için en iyi değerleri elde ederek, reaktif güçteki değişiklik nedeniyle oluşan gerilim dalgalanmaları aşılmış ve daha iyi bir dinamik cevaba ulaşılmıştır.

Simulink'te modellenen ÇBAG tabanlı rüzgar enerji sistemi ve STATCOM modeli Matlab 2011b versiyonuna göre modellenmiştir ve Simulinkteki model RT-LAB'da oluşturulmuştur. STATCOM ve rüzgar sistemi fiziksel bir şekilde kurularak OPAL-RT teknolojisi ile deneysel kontrol sistemleri gerçekleştirilmiştir. Öncelikle yalnız rüzgar enerji sisteminin kontrolörlerin parametrelerini seçmek için optimizasyon yöntemi kullanılmıştır.

Deneysel bir ÇBAG rüzgar enerjisi dönüşüm sistemini çalıştırmak için PI kontrolörlerinin parametrelerini ayarlamak için bakteri yemek arama optimizasyon algoritması uygulanmıştır. Daha sonrasında, PI kontrolörlerinin parametrelerinin ayarlanması, ÇBAG enerji sistemindeki bir şebekede, doğal su döngüsüne dayanan bir doğadan esinlenen optimizasyon algoritması ve bakteri yemek arama optimizasyon algoritması kullanılarak incelenmiştir. Kontrol amaçları, dc-link gerilimini ve rotor akımlarını düzenlemektir. Optimizasyon, çevrimdışı olarak farklı performans endeksleri altında altı parametre için gerçekleştirilmiştir. İyileştirme yöntemini izleyen genetik algoritmalar ve konvansiyonel ayarlama yöntemleri ile karşılaştırılarak sıfır kararlı durum hatalarının iyi bir performansla sağlanmasının avantajını göstermiştir.

Yiyecek arama bakterileri, optimum kontrol uygulamalarında parametreleri veya maliyet fonksiyonlarını ayarlamak için değişken ve sabit rüzgar hızı altında deneysel sonuçlar irdelendiğinde kullanılabilecek güçlü bir optimizasyon aracı olduğunu hem deneysel hem de simülasyon sonuçları ile göstermiştir.

Su döngüsü optimizasyon yöntemi, izleme hatalarını temel alan bir maliyet fonksiyonunu optimize etmek için uygulanmıştır. Optimizasyon işlemi sırasında, maliyet fonksiyonu benzetilmiş bir ÇBAG enerji sisteminden gerçekleştirilmiştir. IAE, ITAE, ISE ve ITSE gibi farklı fonksiyonlar karşılaştırma amacıyla incelenmiştir. Deneme, sabit ve değişken rotor hızında, geleneksel, genetik algoritmalar ve su döngüsü yöntemleri ile optimize edilmiş kontrol parametreleri kullanılarak 2 kW ÇBAG enerji sisteminde gerçekleştirilmiştir.

Su döngüsü optimizasyonunun aşmalar ve tepki süresi açısından daha iyi performans sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca, WCA için ITSE bazlı maliyet fonksiyonunun daha iyi takip tepkisi sağladığı bulunmuştur. Her ne kadar su döngüsü

optimizasyonu daha fazla yürütme süresi gerektirse de, bu dezavantajı yenmek için optimizasyon kalitesini değiştirmeden iterasyon sayısı azaltılabilir.

Su döngüsü optimizasyonu, diğer kontrol sistemlerinin parametrelerini ayarlamak için ve gelecek çalışmalarda hata, maliyet minimizasyonunda kullanılabilecek iyi bir optimizasyon aracı olduğunu deneysel sonuçlarla kanıtlamıştır.

5.2 Öneriler

Yapılan ilk çalışmada hedef olarak güneş-rüzgar hibrit mikroşebekelerde gerilim dalgalanmasını azaltmak, gerilim kararlılığı sağlamak için Statik senkron kompanzatör kullanılarak reaktif güç kompanzasyonu yapılmıştır. Bilindiği üzere STATCOM esnek iletim sistemleri olarak adlandırılan FACTS cihazlarından biridir. Yani diğer herhangi bir FACTS cihazı kullanılarak gelecekte STATCOM ile karşılaştırılması yapılarak, gerilim kararlılığı üzerindeki etkisi ve performansı üzerine çalışmalar yapılabilir.

İkinci çalışma olan OPAL-RT teknolojisi ile ÇBAG tabanlı rüzgar enerji sistemlerinde kontrol yöntemi ve optimizasyon üzerine araştırma yapılmıştır. Gelecekte bazı faz-nötr arıza sistemleri altında performans analizi yapılabilir ya da bu sistemlere değişken yük eklenerek OPAL-RT teknolojisi kullanılarak enerji yönetimi üzerine çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Abad, G., López, J., Rodríguez, M., A., Marroyo, L., Iwanski, G., (2011). *Dynamic Modeling of the Doubly Fed Induction Machine*: John Wiley & Sons, Inc.
- Alhato, M. M., & Bouallègue, S. (2019). Direct Power Control Optimization for Doubly Fed Induction Generator Based Wind Turbine Systems. *Math. Comput. Appl.*, 24(77). doi:10.3390/mca24030077.
- Ambia, M. N., Hasanien, H. M., Al-Durra, A., & Mueeen, S. M. (2015). Harmony Search Algorithm-Based Controller Parameters Optimization for a Distributed-Generation System. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(1), 246-255. doi:10.1109/TPWRD.2014.2358940.
- Amin, M. M., & Mohammed, O. A. (2011). Development of High-Performance Grid-Connected Wind Energy Conversion System for Optimum Utilization of Variable Speed Wind Turbines. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2(3), 235-245. doi:10.1109/TSTE.2011.2150251.
- Arulampalam, A., Barnes, M., Jenkins, N., & Ekanayake, J. B. (2006). Power quality and stability improvement of a wind farm using STATCOM supported with hybrid battery energy storage. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 153(6), 701-710. doi:10.1049/ip-gtd:20045269
- Bakir H., K. A. A. (2019). Modelling and voltage control of the solar-wind hybrid micro-grid with optimized STATCOM using GA and BFA. *Engineering Science and Technology, an International Journal*.
- Banerjee, A., Mukherjee, V., & Ghoshal, S. P. (2013). Modeling and seeker optimization based simulation for intelligent reactive power control of an isolated hybrid power system. *Swarm and Evolutionary Computation*, 13, 85-100. doi:10.1016/j.swevo.2013.05.003.
- Banerjee, S., Kumar, T. K. S., Pal, J., & Prasad, D. (2008). Controller Design for Large-Gap Control of Electromagnetically Levitated System by Using an Optimization Technique. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 16(3), 408-415. doi:10.1109/TCST.2007.906272.
- Bansal, R. C., Bhatti, T. S., & Kumar, V. (2007). Reactive power control of autonomous wind-diesel hybrid power systems using ANN. *2007 Conference Proceedings Ipec, Vols 1-3*, 982-+.
- Bevrani, H., Habibi, F., Babahajyani, P., Watanabe, M., & Mitani, Y. (2012). Intelligent Frequency Control in an AC Microgrid: Online PSO-Based Fuzzy Tuning Approach. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4), 1935-1944. doi:10.1109/TSG.2012.2196806.

- Bharti, O. P., Saket, R. K., & Nagar, S. K. (2017). Controller Design of DFIG Based Wind Turbine by Using Evolutionary Soft Computational Techniques. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 7(3), 1732-1736.
- Birinç, S., B.,. (2008). *Değişken hızlı rüzgar santrallerinin dinamik modellenmesi ve karşılaştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Boakye-Boateng, N. A., & Ofoli, A. R. (2013, 6-11 Oct. 2013). *Real-time simulation of a Doubly-Fed Induction Generator based wind power system on eMEGASim® Digital Simulator*. Paper presented at the 2013 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting.
- Brekken, T. K. A., & Mohan, N. (2007). Control of a Doubly Fed Induction Wind Generator Under Unbalanced Grid Voltage Conditions. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(1), 129-135. doi:10.1109/TEC.2006.889550
- Chen, A., Xie, D., Zhang, D., Gu, C., & Wang, K. (2019). PI Parameter Tuning of Converters for Sub-Synchronous Interactions Existing in Grid-Connected DFIG Wind Turbines. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(7), 6345-6355. doi:10.1109/TPEL.2018.2875350
- Chen, Y., Liu, Y., Hung, S., & Cheng, C. (2007). Multi-Input Inverter for Grid-Connected Hybrid PV/Wind Power System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22(3), 1070-1077. doi:10.1109/TPEL.2007.897117
- Chouhan, S. S., Kaul, A., Singh, U. P., & Jain, S. (2018). Bacterial Foraging Optimization Based Radial Basis Function Neural Network (BRBFNN) for Identification and Classification of Plant Leaf Diseases: An Automatic Approach Towards Plant Pathology. *IEEE Access*, 6, 8852-8863. doi:10.1109/ACCESS.2018.2800685
- Chu, G., Wen, H., Yang, Y., & Wang, Y. (2020). Elimination of Photovoltaic Mismatching With Improved Submodule Differential Power Processing. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(4), 2822-2833. doi:10.1109/TIE.2019.2908612
- Çetinkaya, N., & Umer, F. (2017). Effect of Neutral Grounding Protection Methods for Compensated Wind/PV Grid-Connected Hybrid Power Systems. *International Journal of Photoenergy*, 2017, 4860432. doi:10.1155/2017/4860432
- Diab, A. A. Z., Sultan, H. M., Mohamed, I. S., Kuznetsov, O. N., & Do, T. D. (2019). Application of Different Optimization Algorithms for Optimal Sizing of PV/Wind/Diesel/Battery Storage Stand-Alone Hybrid Microgrid. *IEEE Access*, 7, 119223-119245. doi:10.1109/ACCESS.2019.2936656
- Du, S., Liu, J., Lin, J., & He, Y. (2013). A Novel DC Voltage Control Method for STATCOM Based on Hybrid Multilevel H-Bridge Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(1), 101-111. doi:10.1109/TPEL.2012.2195508

- Duman, S., Yörükeren, N., Altaş, İ., H., (2014). FOTOVOLTAİK ENERJİ SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ, BENZETİMİ ve UYGULAMASI. *Journal of Advanced Technology Sciences*, 3(1), 9-23.
- El-Hameed, M. A., & El-Fergany, A. A. (2016). Water cycle algorithm-based load frequency controller for interconnected power systems comprising non-linearity. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10(15), 3950-3961. doi:10.1049/iet-gtd.2016.0699
- Ertay, M. M., & Aydoğmuş, Z. (2012). GÜÇ SİSTEMLERİNDE FACTS UYGULAMALARI. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 4(2), 40-58.
- Eskandar, H., Sadollah, A., Bahreininejad, A., & Hamdi, M. (2012). Water cycle algorithm – A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems. *Computers & Structures*, 110-111, 151-166. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2012.07.010>
- Gupta, A., Saini, R. P., & Sharma, M. P. (2007, 11-12 April 2007). *Design of an Optimal Hybrid Energy System Model for Remote Rural Area Power Generation*. Paper presented at the 2007 International Conference on Electrical Engineering.
- Gupta, A. R., & Kumar, A. (2016). Energy saving using D-STATCOM placement in radial distribution system under reconfigured network. *5th International Conference on Advances in Energy Research (Icaer) 2015*, 90, 124-136. doi:10.1016/j.egypro.2016.11.177
- Hajisalem, A. H. (2013). *Optimization of PID Control Parameters for Wind /PV Solar Energy Systems with GA and PSO*. (Master Thesis), Karadeniz Technical University, Turkey.
- Hamane, B., Doumbia, M. L., Bouhamida, A. M., & Benghanem, M. (2014, 29 Oct.-1 Nov. 2014). *Direct active and reactive power control of DFIG based REDS using PI and sliding mode controllers*. Paper presented at the IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.
- Hasanien, H. M., & Matar, M. (2018). Water cycle algorithm-based optimal control strategy for efficient operation of an autonomous microgrid. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 12(21), 5739-5746. doi:10.1049/iet-gtd.2018.5715
- Hasanien, H. M., & Muyeen, S. M. (2012). Design Optimization of Controller Parameters Used in Variable Speed Wind Energy Conversion System by Genetic Algorithms. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 3(2), 200-208. doi:10.1109/TSTE.2012.2182784
- Hassan, L. H., Moghavvemi, M., Almurib, H. A. F., Muttaqi, K. M., & Ganapathy, V. G. (2014). Optimization of power system stabilizers using participation factor and genetic algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 55, 668-679. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.10.026>

- Hingorani, N. G., & Gyugyi, L. (1999). *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible ac transmission systems*. In.
- Hsieh, C., & Chou, J. (2007). Design of Optimal PID Controllers for PWM Feedback Systems With Bilinear Plants. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 15(6), 1075-1079. doi:10.1109/TCST.2007.908084
- Kamel, O. M., Diab, A. A. Z., Do, T. D., & Mossa, M. A. (2020). A Novel Hybrid Ant Colony-Particle Swarm Optimization Techniques Based Tuning STATCOM for Grid Code Compliance. *IEEE Access*, 8, 41566-41587. doi:10.1109/ACCESS.2020.2976828
- Karaca, H., & Akkaya, R. (2014, 30 June-4 July 2014). *Dynamic simulation of SVM based direct AC/AC converter*. Paper presented at the 2014 International Conference on Computer Technologies in Physical and Engineering Applications (ICCTPEA).
- Karaipoom, T., & Ngamroo, I. (2015). Optimal Superconducting Coil Integrated Into DFIG Wind Turbine for Fault Ride Through Capability Enhancement and Output Power Fluctuation Suppression. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 6(1), 28-42. doi:10.1109/TSTE.2014.2355423
- Karataş, M. (2011). *Control of Static Synchronous Compensator with PID Controller*. (Master thesis), Inonu University, Malatya.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. 1995 *Ieee International Conference on Neural Networks Proceedings*, Vols 1-6, 1942-1948. doi:10.1109/Icnn.1995.488968
- Keshta, H., Ali, A., Saied, E., & Bendary, F. (2017). Comparative performance of wind energy conversion system (REDS) with PI controller using heuristic optimisation algorithms. *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, 2017(1), 549-553. doi:10.1049/oap-cired.2017.0097
- Kumarasamy, K., & Raghavan, R. (2012). Particle Swarm Optimization Algorithm for Voltage Stability Improvement using Multiple STATCOM. 2012 *International Conference on Emerging Trends in Electrical Engineering and Energy Management (Iceteem - 2012)*.
- Li, M., Zhou, P., Zhao, Z., & Zhang, J. (2016). Two-degree-of-freedom fractional order-PID controllers design for fractional order processes with dead-time. *ISA Trans*, 61, 147-154. doi:10.1016/j.isatra.2015.12.007
- Luo, Y. X., Chen, Z. G., & Che, X. Y. (2010). Optimization for PID Control Parameters on Hydraulic Servo Control System Based on The Novel Compound Artificial Fish-swarm Evolutionary Algorithm. 2010 *International Conference on the Development of Educational Science and Computer Technology*, 81-84.
- Luo, Y. X., & Li, J. Y. (2009). The Controlling Parameters Tuning and its Application of Fractional Order PID Bacterial Foraging-based Oriented by Particle Swarm Optimization. 2009 *Ieee International Conference on Intelligent Computing and*

Intelligent Systems, Proceedings, Vol 1, 4-7. doi:Doi 10.1109/Icicisys.2009.5357944

- Mendis, N., Muttaqi, K. M., Sayeef, S., & Perera, S. (2010, 7-10 Nov. 2010). *A control approach for voltage and frequency regulation of a Wind-Diesel-battery based hybrid remote area power supply system*. Paper presented at the IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society.
- Merabet, A., Ahmed, K. T., Ibrahim, H., & Beguenane, R. (2016). Implementation of Sliding Mode Control System for Generator and Grid Sides Control of Wind Energy Conversion System. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 7(3), 1327-1335. doi:10.1109/TSTE.2016.2537646
- Merabet, A., Eshaft, H., & Tanvir, A. A. (2018). Power-current controller based sliding mode control for DFIG-wind energy conversion system. *IET Renewable Power Generation*, 12(10), 1155-1163. doi:10.1049/iet-rpg.2017.0313
- Miao, Z., Fan, L., Osborn, D., & Yuvarajan, S. (2009). Control of DFIG-Based Wind Generation to Improve Interarea Oscillation Damping. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24(2), 415-422. doi:10.1109/TEC.2009.2015980
- Mishra, Y., Mishra, S., Tripathy, M., Senroy, N., & Dong, Z. Y. (2009). Improving Stability of a DFIG-Based Wind Power System With Tuned Damping Controller. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24(3), 650-660. doi:10.1109/TEC.2009.2016034
- Mithulananthan, N., -Yome, A. S., & Acharya, N. (2005). *Application of FACTS Controllers in Thailand Power Systems*. Retrieved from Thailand:
- Mohanty, A., Mohanty, S. R., Kishor, N., & Ray, P. K. (2013). Self Tuned Fuzzy-PI based Reactive Power Compensation in Wind-Diesel Hybrid System. *Proceedings of 2013 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (Iccpct 2013)*, 362-367.
- Mosaad, M. I., El-Raouf, M.O.A., Al-Ahmar, M.A., Bendary, F.M. (2019). Optimal PI controller of DVR to enhance the performance of hybrid power system feeding a remote area in Egypt. *Sustainable Cities and Society*, 47. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101469>
- Ofoli, A. R., & Altimania, M. R. (2017, 1-5 Oct. 2017). *Real-time digital simulator testbed using eMEGASim® for wind power plants*. Paper presented at the 2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting.
- Ozcelik, M. A., Yilmaz, A. S., Kucuk, S., & Bayrak, M. (2015). Efficiency in Centralized DC Systems Compared with Distributed DC Systems in Photovoltaic Energy Conversion. *Elektronika Ir Elektrotechnika*, 21(6), 51-56. doi:10.5755/j01.eee.21.6.13761
- Paliwal, N. K., Mohanani, R., Singh, N. K., & Singh, A. K. (2016). Demand Side Energy Management in Hybrid Microgrid System Using Heuristic Techniques.

Proceedings 2016 Ieee International Conference on Industrial Technology (Icit), 1910-1915.

- Panda, A., & Tripathy, M. (2014). Optimal power flow solution of wind integrated power system using modified bacteria foraging algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 54, 306-314. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.07.018>
- Panda, A., & Tripathy, M. (2015). Security constrained optimal power flow solution of wind-thermal generation system using modified bacteria foraging algorithm. *Energy*, 93, 816-827. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.083>
- Passino, K. M. (2002). Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control. *IEEE Control Systems Magazine*, 22(3), 52-67. doi:10.1109/MCS.2002.1004010
- Prasad, R. M., & Mulla, M. A. (2020). Mathematical Modeling and Position-Sensorless Algorithm for Stator-Side Field-Oriented Control of Rotor-Tied DFIG in Rotor Flux Reference Frame. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 35(2), 631-639. doi:10.1109/TEC.2019.2956255
- Rezkallah, M., Sharma, S. K., Chandra, A., Singh, B., & Rouse, D. R. (2017). Lyapunov Function and Sliding Mode Control Approach for the Solar-PV Grid Interface System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(1), 785-795. doi:10.1109/TIE.2016.2607162
- Sadollah, A., Eskandar, H., Lee, H. M., Yoo, D. G., & Kim, J. H. (2016). Water cycle algorithm: A detailed standard code. *SoftwareX*, 5, 37-43. doi:<https://doi.org/10.1016/j.softx.2016.03.001>
- Sakarya, H. (2009). *Sürekli Miknatıslı Senkron Motorlar için alan Yönlendirmeli Sürücü Düzenegi Tasarımı ve uygulaması*. (Yüksek lisans tezi), Selçuk Üniversitesi Fen bilimleri enstitüsü, Konya.
- Sanjari, M. J., Gooi, H. B., & Nair, N. C. (2020). Power Generation Forecast of Hybrid PV–Wind System. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 11(2), 703-712. doi:10.1109/TSTE.2019.2903900
- Saxena, N. K., & Kumar, A. (2016). Reactive power control in decentralized hybrid power system with STATCOM using GA, ANN and ANFIS methods. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 83, 175-187. doi:10.1016/j.ijepes.2016.04.009
- Sevilmiş, F., & Karaca, H. (2017). *Performance Analysis of SRF-PLL and DDSRF-PLL Methods for Grid Interactive Inverters* Paper presented at the International Advanced Researches & Engineering Congress, Osmaniye/TURKEY.
- Shahnia, F., Rajakaruna, S., & Ghosh, A. (2015). *Static Compensators (STATCOMs) in Power System*. In F. Shahnia, Rajakaruna, Sumedha, Ghosh, Arindam (Eds.) (Ed.).

- Sharma, P., Bhatti T.S, & Ramakrishna, K.S.S. . (2010). *International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems* India.
- Software, t. (2019). Powering Real-Time Simulation.
- Soued, S., Chabani, M. S., Becherif, M., Benchouia, M. T., Ramadan, H. S., Betka, A., . . . Zouzou, S. E. (2019). Experimental behaviour analysis for optimally controlled standalone DFIG system. *IET Electric Power Applications*, 13(10), 1462-1473. doi:10.1049/iet-epa.2018.5648
- Tang, Y., Ju, P., He, H., Qin, C., & Wu, F. (2013). Optimized Control of DFIG-Based Wind Generation Using Sensitivity Analysis and Particle Swarm Optimization. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(1), 509-520. doi:10.1109/TSG.2013.2237795
- Tanvir, A., Merabet, A., & Beguenane, R. (2015). Real-Time Control of Active and Reactive Power for Doubly Fed Induction Generator (DFIG)-Based Wind Energy Conversion System. *Energies*, 8, 10389-10408. doi:10.3390/en80910389
- Teodorescu, R., Liserre, M., & Rodriguez, P. (2011). *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*. In. doi:10.1002/9780470667057
- Tripathy, M., & Mishra, S. (2007). Bacteria Foraging-Based Solution to Optimize Both Real Power Loss and Voltage Stability Limit. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(1), 240-248. doi:10.1109/TPWRS.2006.887968
- Tsai, S. C., Chang, D. F., Hong, C. M., Xia, P., Senadheera, D., Trump, L., . . . Lutzko, C. (2014). Induced overexpression of OCT4A in human embryonic stem cells increases cloning efficiency. *Am J Physiol Cell Physiol*, 306(12), C1108-1118. doi:10.1152/ajpcell.00205.2013
- Vachirasricirikul, S., Ngamroo, I., & Kaitwanidvilai, S. (2010). Coordinated SVC and AVR for robust voltage control in a hybrid wind-diesel system. *Energy Conversion and Management*, 51(12), 2383-2393. doi:10.1016/j.enconman.2010.05.001
- Wandhare, R. G., & Agarwal, V. (2015). Novel Integration of a PV-Wind Energy System With Enhanced Efficiency. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(7), 3638-3649. doi:10.1109/TPEL.2014.2345766
- Wei, X., Cheng, M., Wang, W., Han, P., & Luo, R. (2016). Direct Voltage Control of Dual-Stator Brushless Doubly Fed Induction Generator for Stand-Alone Wind Energy Conversion Systems. *IEEE Transactions on Magnetics*, 52(7), 1-4. doi:10.1109/TMAG.2016.2526049
- Xu, L. (2009). *Control of Power Converter for grid Integration of Renewable Energy Conversion and Statcom Systems*; (Master Thesis), Graduate School of The University of Alabama, Alabama.

- Yang, X., Long, J., Liu, P., Zhang, X., & Liu, X. (2018). Optimal scheduling of microgrid with distributed power based on water cycle algorithm. *Energies*, 11, 2381. doi:10.3390/en11092381
- Ye, Z., Wen, H., Chu, G., & Li, X. (2017, 5-8 Nov. 2017). *Minimum-power-tracking for PV-PV differential power processing systems*. Paper presented at the 2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA).
- Zhou, D., & Blaabjerg, F. (2017). Bandwidth oriented proportional-integral controller design for back-to-back power converters in DFIG wind turbine system. *IET Renewable Power Generation*, 11(7), 941-951. doi:10.1049/iet-rpg.2016.0760

