



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ENERJİ YÖNETİMİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ÇİFT BESLEMELİ İNDÜKSİYON JENERATÖRLÜ RÜZGAR
TÜRBİNLERİ İÇİN HOA TABANLI PID DENETLEYİCİ
TASARIMI VE PERFORMANS ANALİZİ**

Fatma ARTUN

**Mayıs-2025
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ENERJİ YÖNETİMİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ÇİFT BESLEMELİ İNDÜKSİYON JENERATÖRLÜ RÜZGAR
TÜRBİNLERİ İÇİN HOA TABANLI PID DENETLEYİCİ
TASARIMI VE PERFORMANS ANALİZİ**

Fatma ARTUN

**Danışman
Doç. Dr. Davut İZCİ**

Diğer Jüri Yeleri

Doç. Dr. Serdar Ekinci

Dr. Öğr. Üyesi Erdal Eker

**Mayıs-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Fatma ARTUN tarafından hazırlanan “Çift Beslemeli İndüksiyon Jeneratörlü Rüzgar Türbinleri İçin HOA Tabanlı PID Denetleyici Tasarımı Ve Performans Analizi” adlı tez çalışması 20/05/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Enerji Yönetimi Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Serdar Ekinci

.....

Danışman

Doç. Dr. Davut İZCİ

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Erdal Eker

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat Öter
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

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 beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Fatma ARTUN
Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇİFT BESLEMELİ İNDÜKSİYON JENERATÖRLÜ RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN HOA TABANLI PID DENETLEYİCİ TASARIMI VE PERFORMANS ANALİZİ

Fatma ARTUN

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Enerji Yönetimi Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Davut İZCİ

2025, 42 Sayfa

Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarına enerji piyasasında talep artmıştır. Bu kaynaklar arasında rüzgâr enerjisi önemli bir paya sahiptir. Üstün özelliklerinden dolayı rüzgâr türbini endüstrisinde yaygın olarak Çift Beslemeli İndüksiyon Jeneratörleri (DFIG) kullanılmaktadır. Bu çalışma, DFIG sistemlerinde, oransal-integral-türev (PID) kontrolör parametrelerinin optimizasyonuna odaklanmaktadır. DFIG sistemlerinde kararlılığı, verimliliği ve dinamik uyarlanabilirliği korumanın kritik öneme sahip olduğu göz önüne alındığında, PID kontrol parametrelerinin uygun şekilde ayarlanması büyük bir önem teşkil etmektedir. Bu bağlamda, Tobler'in yürüme fonksiyonundan esinlenerek geliştirilen yürüyüş optimizasyon algoritması (HOA) tabanlı yeni bir optimizasyon yöntemi önerilmektedir. Bu yöntemle, PID kontrol parametrelerinin optimizasyonunu gerçekleştirmek için HOA'nın güçlü yönlerinden yararlanılmış ve sistem performansını artıracak bir yaklaşım geliştirilmiştir. Önerilen yöntem, temel kontrol zorluklarını ele almak amacıyla, sınırlama terimlerini içeren değiştirilmiş bir Zve-Lee Gaing (ZLG) hedef fonksiyonunu entegre ederek tasarlanmıştır. Aşırı çekim, yerleşme süresi, kontrol çabası ve ani kontrol sinyali değişimleri gibi kritik kontrol problemleri göz önünde bulundurularak sistemin daha dengeli, verimli ve kararlı çalışmasını sağlamak hedeflenmiştir. Önerilen metodoloji, sistemin geçici durum ve kalıcı rejim performansı arasında sağlam bir denge kurmasını sağlayarak, dinamik çalışma koşulları altında daha güvenilir bir kontrol mekanizması sunmaktadır. HOA ile optimize edilen PID kontrolörü, denizyıldızı optimizasyon algoritması, gri kurt optimizasyonu, yusufoçuk algoritması, akış yönü algoritması ve sinüs-kosinüs algoritması gibi beş farklı modern optimizasyon yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, önerilen yöntemin etkinliğini doğrulamak için istatistiksel performans analizi, yakınsama eğrileri, zaman tepkisi ölçümleri ve frekans tepkisi değerlendirmeleri gerçekleştirilmiştir. Denetleyicinin giriş sinyallerini takip etme yeteneği ve harici bozucu etkilere karşı direnç gösterebilme kapasitesi, dinamik çalışma koşulları altında detaylı şekilde incelenmiştir. Mevcut literatürle yapılan kapsamlı karşılaştırmalı analizler, HOA'nın etkinliğini vurgulamakta ve onu DFIG sistemleri ile diğer karmaşık endüstriyel uygulamalarda gelişmiş PID kontrolü için umut vadeden bir optimizasyon aracı haline getirmektedir. Özellikle sıfır aşma, hızlı yerleşme süresi, düşük hata oranı, gelişmiş kararlılık ve sağlamlık gibi kritik parametrelerde sağladığı üstünlükler, algoritmanın geniş bir mühendislik ve endüstriyel uygulama alanında güvenilir ve verimli bir çözüm sunduğunu kanıtlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Çift Beslemeli Endüksiyon Üretim Sistemi, PID Denetleyici, Rüzgâr Enerjisi Dönüşümü, Yürüyüş Optimizasyon Algoritması

ABSTRACT

MASTER THESIS

HOA-BASED PID CONTROLLER DESIGN AND PERFORMANCE ANALYSIS FOR DOUBLY-FED INDUCTION GENERATOR WIND TURBINES

Fatma ARTUN

Batman University Graduate Education Institute

Energy Management Department of Science

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Davut İZCİ

2025, 42 Pages

In recent years, the demand for renewable energy sources in the energy market has increased. Among these sources, wind energy has a significant share. Due to its superior features, Doubly Fed Induction Generators (DFIG) are widely used in the wind turbine industry. This study focuses on the optimization of proportional-integral-derivative (PID) controller parameters in DFIG systems. Considering that maintaining stability, efficiency, and dynamic adaptability are critical in DFIG systems, appropriate tuning of PID control parameters is of great importance. In this context, a new optimization method based on the walking optimization algorithm (HOA) inspired by Tobler's walking function is proposed. With this method, the strengths of HOA are utilized to perform the optimization of PID control parameters and an approach that will increase system performance is developed. The proposed method is designed by integrating a modified Zwe-Lee Gaing (ZLG) objective function including penalty terms in order to address the basic control challenges. It is aimed to provide more balanced, efficient and stable operation of the system by considering critical control problems such as overshoot, settling time, control effort and sudden control signal changes. The proposed methodology provides a more reliable control mechanism under dynamic operating conditions by providing a solid balance between the transient and steady-state performance of the system. The PID controller optimized with HOA is compared with five different modern optimization methods such as starfish optimization algorithm, gray wolf optimization, dragonfly algorithm, flow direction algorithm and sine-cosine algorithm. In addition, statistical performance analysis, convergence curves, time response measurements and frequency response evaluations are performed to verify the effectiveness of the proposed method. The ability of the controller to follow the input signals and its resistance to external disturbances are investigated in detail under dynamic operating conditions. Extensive comparative analyses with existing literature highlight the effectiveness of HOA and make it a promising optimization tool for advanced PID control in DFIG systems and other complex industrial applications. The advantages it provides in critical parameters such as zero overshoot, fast settling time, low error rate, improved stability and robustness prove that the algorithm offers a reliable and efficient solution in a wide range of engineering and industrial applications.

Keywords: Doubly Fed Induction Generation System, PID Controller, Wind Energy Conversion, Hiking optimization algorithm

ÖN SÖZ

Tez çalışmam boyunca bana yol gösteren, değerli katkılarıyla destek veren, bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren ve her aşamada rehberlik eden saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Davut İZCİ 'ye, bana her türlü desteğini esirgemeyen eşim Selman ARTUN'a ve aileme sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Fatma ARTUN
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖN SÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ÇİZELGELER LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON JENERATÖRLER	6
3.1. Rüzgar Türbinlerinde Enerji Dönüşümü.....	7
3.2. Türbin Dinamiği	7
4. PID KONTROL YÖNTEMİ	10
5. ÖNERİLEN KONTROL YÖNTEMİ	13
5.1. Yürüyüş Optimizasyon Algoritması (HOA).....	13
5.2. HOA Tabanlı PID Kontrol Yöntemi.....	15
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	19
6.1. Karşılaştırılan Algoritmalar	19
6.2. İstatistiksel Bulgular	20
6.3. Standart PID Denetleyicisinin Yakınsama Eğrileri ve Elde Edilen Kontrol Parametreleri.....	21
6.4. Zaman Yanıtı Analizi.....	23
6.5. Frekans Yanıtı Analizi	26
6.6. Mevcut Literatürle Karşılaştırma	28
6.7. Referans Sinyal İzleme Performansı.....	31
6.8. Bozucu Sinyalleri Bastırma Yeteneği.....	33
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	35
7.1 Sonuçlar	35
7.2 Öneriler	36
KAYNAKLAR	38
EKLER	42

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 4.1. PID parametrelerinin sistem üzerindeki etkileri [30].....	12
Çizelge 6.1. Karşılaştırılan algoritmalarından elde edilen istatistiksel veriler.....	20
Çizelge 6.2. HOA, DA, FDA, GWO, SCA ve SFOA algoritmalarıyla elde edilen PID denetleyicisi parametre değerleri.....	22
Çizelge 6.3. HOA, FDA, SCA, DA, GWO ve SFOA için elde edilen zaman tepkisi metriklerinin sayısal değerleri.....	25
Çizelge 6.4. RSA, BFO, GSA, PSO, h-ASO, ASO, Imp-HGS ve HGS algoritmaları ile optimize edilen standart PID kontrol cihazının parametreleri.....	26
Çizelge 6.5. HOA, RSA, BFO, GSA, PSO, h-ASO, ASO, Imp-HGS ve HGS algoritmaları ile elde edilen zaman tepkisi metriklerinin sayısal değerleri.....	28

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. DFIG ve şebeke bağlantısı.....	6
Şekil 4.1. PID kullanılan sistemin blok şeması.....	10
Şekil 4.2. PID kontrolörün blok şeması.....	11
Şekil 5.1. Önerilen HOA tabanlı PID kontrollü DFIG sistemi.....	18
Şekil 6.1. Yineleme sayılarına göre karşılaştırmalı yakınsama eğrileri.....	21
Şekil 6.2. HOA, FDA, SCA, DA, GWO ve SFOA kullanılarak elde edilen karşılaştırmalı adım yanıtları.....	23
Şekil 6.3. HOA, FDA, SCA, DA, GWO ve SFOA algoritmaları ile elde edilen karşılaştırmalı sabit durum hata değerleri.....	24
Şekil 6.4. HOA, FDA, SCA, DA, GWO ve SFOA algoritmaları ile elde edilen karşılaştırmalı Bode grafikleri.....	25
Şekil 6.5. HOA, RSA, BFO, GSA, PSO, h-ASO, ASO, Imp-HGS ve HGS algoritmaları ile elde edilen karşılaştırmalı adım tepkileri.....	27
Şekil 6.6. HOA, RSA, BFO, GSA, PSO, h-ASO, ASO, Imp-HGS ve HGS uygulamalarından elde edilen karşılaştırmalı sabit durum hata değerleri.....	28
Şekil 6.7. Değişken giriş koşulları için HOA tabanlı yaklaşımın performans değerlendirmesi.....	29
Şekil 6.8. Harici rahatsızlık reddetme yeteneği için HOA tabanlı yaklaşımın performansı.....	31

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

C_p	: Güç Katsayısı
d	: d Ekseni
dB	: Desibel
e	: Hata
I	: Akım
K	: Kazanç
L_{Is}	: Stator Kaçak Endüktansı
L_{Ir}	: Rotor Kaçak Endüktansı
L_m	: Karşılıklı Endüktanslar
P	: Aktif Güç
P_w	: Rüzgar Türbinlerinden Elde Edilen Mekanik Çıkış Gücü
R_s	: Stator Sargı Direnci
R_r	: Rotor Sargı Direnci
s	: Kayma Oranı
t	: Zaman
Q	: Reaktif Güç
q	: q Ekseni
V	: Hız
V	: Gerilim
ω	: Dönme Açısal Hızı
α	: Alfa
β	: Beta
λ	: Dalga Boyu (Kanat Uç Hız Oranı)
γ	: Gama
ρ	: Rüzgar Yoğunluğu
φ	: Akı

Kısaltmalar

ASO	: Atom Search Optimization
BFO	: Bacterial Foraging Optimization
CE	: Control Effort
CRP	: Control Rate Penalty
DA	: Dragonfly Algorithm
DC	: Direct Current
DFIG	: Doubly Fed Induction Generator
F	: Fonksiyon
FDA	: Flow Direction Algorithm
GSA	: Gravitational Search Algorithm
GSC	: Grid Side Converter
GWO	: Grey Wolf Optimizer
h-ASPSO	: Hybrid Atom Search Particle Swarm Optimization
HGS	: Hunger Games Search
HOA	: Hiking Optimization Algorithm

Imp-HGS: Improved Hunger Games Search
OS: Overshoot
PI: Proportional-Integral
PID: Proportional-Integral-Derivative
PSO: Particle Swarm Optimization
RSA: Reptile Search Algorithm
SCA: Sine-Cosine Algorithm
SF: Süpürme Faktörü
SFOA: Starfish Optimization Algorithm
THF: Tobler's Hiking Function
TSR: Tip Speed Ratio
ZLG: Zwe-Lee Gaing

1. GİRİŞ

Dünyanın birincil enerji kaynakları hızla tükenmektedir ve var olan fosil yakıtların elde edilme maliyetleri de her geçen gün artmaktadır (Alagöz, 2021). Kaynakların tükenmeye yüz tutması ve yüksek maliyet; yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi kaçınılmaz kılmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında son yıllarda büyük bir talep ile rüzgar santralleri önemli bir yer edinmiştir. Danimarka, ABD, Hindistan, Almanya ve İspanya gibi birçok ülke, rüzgâr enerjisi ile ülkede üretilen elektrik enerjilerinin önemli bir payını üretmeye başlamışlardır (Özsoy, 2014).

Son yıllarda, sürdürülebilir ve çevre dostu enerji çözümlerine olan küresel ilgi (Ekinci et al., 2024), yenilenebilir enerji kaynaklarının modern güç sistemlerine entegrasyonunu önemli ölçüde hızlandırmıştır. Çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda, yenilenebilir enerji kaynaklarının mevcut enerji altyapılarına dahil edilmesi giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Günümüzde, temiz enerjiye yönelik artan küresel talep, yenilenebilir kaynakların güç sistemlerine entegrasyon sürecini teşvik etmektedir (Jabari et al., 2024).

Yüksek verimliliği, değişken hızda çalışma yeteneği ve maliyet açısından sunduğu avantajlar nedeniyle, çift beslemeli endüksiyon jeneratörü (DFIG), rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir teknoloji haline gelmiştir. Bu jeneratör türü, rüzgar enerjisinin etkin bir şekilde elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlayarak sistemlerin performansını artırmaktadır (Kumar et al., 2022).

Rüzgar enerjisi rüzgar hızının dengesiz olmasından dolayı genellikle dengesiz güç iletim şebekeleri olarak anılırlar. Şebekeye bağlı rüzgâr türbinleri çevresel faktörlerin, özellikle rüzgârın etkisiyle farklı zorlanmalarla karşı karşıya kalmaktadır (Doğan vd., 2015). Şebekeye bağlanan rüzgar santrali sayısındaki artış özellikle şebeke entegrasyonu konusunda yapılan çalışmaların artmasını zorunlu hale getirmiştir (Çalışır vd., 2018). Etkin bir kontrol sağlanamaması durumunda, sistemdeki düzensiz voltaj ve frekans dalgalanmaları, enerji kayıplarına, hatta sistem arızalarına yol açabilir. Bu durum, enerji kesintilerine ve üretimde azalmaya neden olabilir.

Bununla birlikte, DFIG sistemlerinin yapısal karmaşıklığı, şebeke kesintilerine karşı duyarlılığı ve kararlılık sorunları, kullanımında çeşitli teknik engeller oluşturur. Ayrıca, istenilen performans seviyesinin sürdürülebilmesi için de hassas kontrol mekanizmalarına ihtiyaç duyulmaktadır (Anju et al., 2024).

Bu çalışmada, DFIG kullanan rüzgar santrallerinde PID kontrolör parametre değerlerinin önerilen yeni bir meta-sezgisel yaklaşımla, çeşitli ileri seviyedeki optimizasyon yöntemlerle karşılaştırılması ve kapsamlı analizlerle değerlendirilmesi sonucu önerilen yeni yöntemin kararlılığı değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen yeni yöntemin sıfır aşım, kısa yerleşme süresi, minimum hata ve yüksek kararlılık sağlayarak sistemin performansını artırdığını göstermektedir. Literatürde yapılan karşılaştırmalar, bu yöntemin DFIG sistemleri ve endüstriyel uygulamalarda güçlü ve etkili bir yöntem olduğunu kanıtlamaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

DFIG tabanlı rüzgar enerjisi sistemlerinde kontrol stratejileri, dinamik performans, kararlılık ve operasyonel verimlilik gibi temel zorlukların üstesinden gelmek için sürekli gelişmektedir. Son yıllarda, bu sistemlerin optimizasyon teknikleriyle iyileştirilmesi giderek daha fazla önem kazanmış ve etkin çözümler sunulmasına olanak sağlamıştır.

Bu bölümde DFIG tabanlı rüzgar enerjisi sistemlerinde kontrol stratejileri ile ilgili yapılan çalışmalara odaklanılacaktır. Araştırmacıların optimizasyon teknikleri ele alınacak ve bu sayede hangi hedeflerin güdüldüğü ile ilgili bilgiler sunulacaktır. Ayrıca araştırmacıların belirledikleri içeriklere ne ölçüde ulaşıldıkları da ele alınacaktır.

Parçacık sürüsü optimizasyonu, model öngörülü kontrol çerçevelerinde uygulanarak anahtarlama kayıplarını azaltmada ve voltaj kaynağı dönüştürücülerinin harmonik performansını iyileştirmede etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Ali et al., 2024). Aynı şekilde, termal değişim optimizatörü gibi yenilikçi metasezgisel yöntemler, rotor ve şebeke tarafı dönüştürücülerdeki sınırlamaları gidermeye yönelik çözümler sunmaktadır. Bu yaklaşımlar, orantılı-integral (PI) denetleyicisinin ayarlarını optimize etmek için kullanılmış ve hem kararlılık hem de yakınsama açısından üstün performans sağlanmıştır (Milles et al., 2024).

Civelek (2017), rüzgar türbinlerinin bireysel hatve açısını kontrol etmek için PID, bulanık PID ve genetik bulanık denetleyiciler kullanarak bir araştırma gerçekleştirmiştir. Çalışma, türbin üzerindeki moment yüklerini azaltmayı ve elektriksel güç çıkışını artırmayı hedeflemiştir. Bu çalışmada, farklı denetleyici türlerinin performansı karşılaştırılmış ve türbin dinamiklerini iyileştirme potansiyelleri incelenmiştir. Denetleyici tasarımı ve simülasyon çalışmaları, Matlab/Simulink ortamında yürütülmüştür.

Karınca aslanı optimizatörü gibi ileri seviye teknikler, şebekeye bağlı DFIG sistemlerinde kesirli mertebeden PI regülatörlerine entegre edilmiştir. Bu yöntemler, geleneksel denetleyicilere kıyasla çok amaçlı problemlere daha iyi uyum sağlarken, zaman ve frekans tepkisi açısından daha güçlü ve istikrarlı bir performans sunmuştur (Veerendra & Vasavi, 2023).

Parametrik tahmine dayalı uyarlanabilir geri adımlama kontrolü içeren doğrusal olmayan ileri güç denetleyicisi gibi yöntemler, DFIG tabanlı sistemlerde arıza durumlarında yüksek arıza geçiş kapasitesi ve etkin reaktif güç stabilizasyonu sağlamıştır. Bu doğrusal olmayan stratejiler, zorlu çalışma koşullarında sistemin güvenilirliğini ve dayanıklılığını artırmada önemli bir rol oynamaktadır (Loulijat et al., 2024).

DFIG sistemlerinin kontrolünde uyarlanabilir nöro-bulanık çıkarım sistemi önemli bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu yaklaşıma dayalı doğrudan tork ve akı kontrol şemaları, geçici tepe değerlerini sınırlayarak ve tork ile stator akımı dalgalanmalarını azaltarak üstün dinamik performans sunmaktadır. Yapılan deneyler, uyarlanabilir nöro-bulanık çıkarım sisteminin, yerleşme süresi, aşım miktarının azaltılması ve değişken rüzgar koşullarında geçici performans açısından geleneksel PI ve bulanık mantık denetleyicilerine kıyasla daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır (Arifin et al., 2023).

DFIG kontrolü için, genetik algoritma tabanlı Karınca Kolonisi Optimizasyonu ile iyileştirilmiş tekrarlayan bulanık sinir ağlarını birleştiren hibrit bir yöntem geliştirilmiştir. Bu entegrasyon, sistemin doğrusal olmayan dinamiklerini daha etkili bir şekilde yönetirken, parametre optimizasyonunda yüksek yakınsama doğruluğu sağlamaktadır. Sonuç olarak, gelgit akışı türbin sistemlerinde daha verimli dinamik tepki ve güç üretimi elde edilmiştir (Kumar & Choudhary, 2024).

DFIG rüzgar türbini kontrol parametrelerini optimize etmek, sistem hatalarını en aza indirmek ve salınım sönümlemesini iyileştirmek amacıyla diferansiyel evrim algoritması kullanılmıştır. Dinamik şebeke rahatsızlıkları sırasında aşırı akımın azaltılması ve daha iyi yerleşme süreleri sağlanması açısından, zaman ağırlıklı mutlak hata hedef fonksiyonunun integrali önemli bir rol oynamaktadır. Bu yaklaşım, sistem performansını iyileştirmede etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Yahya et al., 2021).

DFIG sistemlerindeki dengeli voltaj düşüşlerini azaltmak amacıyla geliştirilmiş yeni bir koruma şeması sunulmuştur (Sabo et al., 2024). Bu yaklaşım, klasik levye devresine empedans odaklı bir paralel devre ekleyerek çalışır. Böylece, rotor akımının kontrolü ve DC bağlantı voltajının stabil tutulması sağlanırken, herhangi bir DC kesici kullanımına ihtiyaç duyulmaz. Geliştirilen koruma şeması, arıza anında bağlantının sürekliliğini sağlayarak sistemin verimliliğini artırır. Bu sayede rotor aşırı akımları azaltılır, reaktif güç ihtiyacı minimum seviyeye indirilir ve geleneksel levye korumasına kıyasla aktif ve reaktif güç dinamikleri daha iyi yönetilir.

Son dönemde, DFIG tabanlı rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinde güç kalitesini artırmak amacıyla kademeli yapay sinir ağı tabanlı bir kontrol yöntemi geliştirilmiştir (Loulijat et al., 2023). Bu sistem, harmonik bozulmaları azaltmak ve voltaj dengesini sağlamak için kademeli yapay sinir ağını kullanırken, verimli enerji transferi için darbe genişlik modülasyonlu doğrultucular ve çift yönlü DC-DC dönüştürücülerle entegre edilmiştir. MATLAB simülasyon sonuçları, kademeli yapay sinir ağı tabanlı kontrolörün toplam harmonik bozulmayı %1,76 oranında azalttığını, PI ve bağımsız yapay sinir ağı tabanlı denetleyicilere kıyasla daha üstün performans sergilediğini ve daha kısa yerleşme süresi sağladığını ortaya koymaktadır.

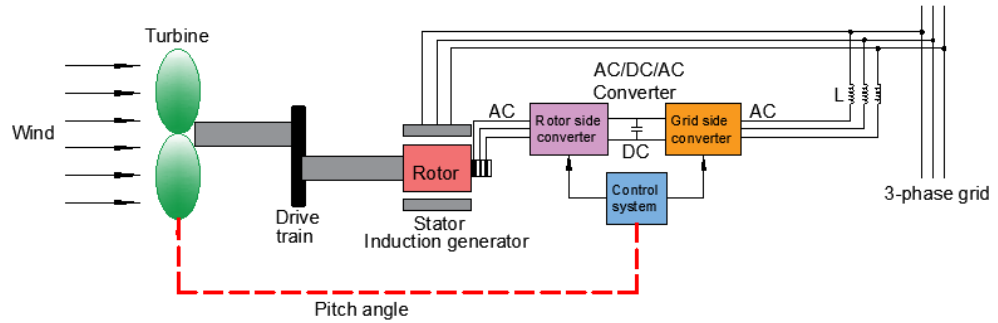
Son olarak, yapay ekosistem optimizatörü, DFIG tabanlı rüzgar enerjisi dönüşüm sistemine entegre edilen çok makineli güç sistemlerinde, güç sistemi dengeleyici parametrelerinin en iyi şekilde ayarlanması için kullanılmıştır (Prakash & Radheswari, 2023). Bu optimizasyon yöntemi, elektromekanik salınımları etkin bir şekilde bastırarak, değişken şebeke koşulları altında rotor açısının kararlılığını ve küçük sinyal stabilitesini iyileştirmektedir.

3. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON JENERATÖRLER

Çift Beslemeli Asenkron Jeneratörlerde (DFIG) stator sargısı doğrudan elektrik şebekesine bağlıdır. Rotor sargısı ise, şebekeye bağlanmak üzere dört bölgeye sahip bir güç konvertörü kullanılarak iki adet karşılıklı gerilim kaynağı içeren bir inverterden oluşmaktadır. Genellikle, elektromanyetik torku düzenleyip makinenin manyetizasyonunu sürdürebilmesi için reaktif güç sağlamak rotor tarafındaki konverter kontrol sisteminin görevidir. Doğru akım bağlantısını düzenleme görevi ise, şebeke tarafındaki konverter kontrol sistemine aittir (Apaydın vd., 2009).

Bu bölümde, DFIG sistemlerinin nasıl çalıştığına dair ayrıntılı bir inceleme sunulmuş olup rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinde sağladığı faydalar ile karşılaşılan zorluklara dikkat çekilmiştir.

Çift beslemeli asenkron jeneratör kullanan bir rüzgar enerjisi sistemi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. DFIG ve şebeke bağlantısı

DFIG'ler, bazı üstün özellikleri nedeniyle rüzgar uygulamalarında sıklıkla kullanılırlar. DFIG, statorun şebekeye doğrudan bağlanması ve rotor devresindeki güç elektroniği devresinin nominal stator gücünün yaklaşık %25'i oranında seçilebilmesi nedeniyle değişken hızlı rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinde kullanılan diğer jeneratör topolojilerine kıyasla yüksek verimliliğe ve düşük kurulum maliyetine sahiptir (Demirbaş & Bayhan, 2010).

Nominal gücün ötesinde enerji üretme kapasitesine sahip olduğundan, özellikle yüksek güç gereksinimi olan uygulamalar için idealdir. Nominal hızdan kesme hızına

kadar geniş bir hız aralığında belirtilen güç seviyelerinde üretim yapabilir. DFIG, sistem genelinde verimliliği artırmada kritik bir rol oynar (Aydın vd., 2016).

3.1. Rüzgar Türbinlerinde Enerji Dönüşümü

Rüzgar türbinleri, kinetik rüzgar enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılan cihazlardır.

Sougueh ve Görel (2022)'in de belirttiği gibi; rüzgar türbinlerinin güç katsayısı (C_p), kanat hatve açısı (β) ve kanat uç hız oranı (λ) gibi faktörlere bağlıdır. Bu katsayı, rüzgar türbininin kinetik enerjisini ne kadar verimli bir şekilde elektrik enerjisine dönüştürdüğünü gösterir. Betz sınırına göre, bu güç üretimi 0.59'u geçemez, yani rüzgar türbinleri rüzgarın sahip olduğu enerjinin en fazla %59'unu mekanik enerjiye dönüştürebilir.

Rüzgar türbinlerinden elde edilen mekanik çıkış gücü (P_w) denklem (3.1)'de verilmiştir.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p(\beta, \lambda) \quad (3.1)$$

Bu mekanik güç, rüzgar hızının küpüyle orantılıdır ve bu durum, rüzgarın yoğunluğuna (ρ) ve rüzgar hızına (V) bağlıdır. $C_p(\beta, \lambda)$ fonksiyonu ise, türbin kanatlarının hatve açısı ve kanat uç hız oranı (TSR) gibi gözlemlenerek, türbinin özellikleri belirlenir. Bu denkleme göre türbinin üretim kapasitesi rüzgarın hızına ve kanatların aerodinamik özelliklerine bağlı olarak değişir. Bu açıklama, türbinin üretim özelliklerinin optimize edilmesi ve önemli özelliklerin anlaşılmasına yardımcı olur.

3.2. Türbin Dinamiği

Rüzgar türbinlerinin verimli ve güvenilir çalışabilmesi için, türbinin dinamik özelliklerinin iyi anlaşılması ve modellenmesi gerekir.

Aşağıdaki denklemler; d-q referans çerçevesinde DFIG'in stator ve rotor gerilimleri ile akılarının dinamik özelliklerinin modellenmiş hali olarak kullanılabilir. Bu denklemler, sistemin elektromekanik davranışının anlaşılması ve analiz edilmesi için

önemli bir temel oluşturur (Bekakra & Attous, 2014; Kaloi et al., 2016; Mazouz et al., 2017; Nasef et al., 2022; Taveiros et al., 2015).

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} + \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = R_r \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} + s\omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$s(\text{slip ratio}) = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (3.6)$$

$$L_r = L_{lr} + L_m \quad (3.7)$$

Bu denklemlerde R_s ve R_r stator ve rotor sargılarının dirençlerini temsil ederken; kaçak endüktanslar L_{ls} ve L_{lr} ile, karşılıklı endüktanslar ise L_m olarak ifade edilmiştir. d - q koordinatlarındaki V , I ve φ ise sırasıyla gerilim, akım ve akıyı temsil eder. Stator ve rotor akımlarıyla oluşan hızlar ω_s ve ω_r ile ifade edilirken; makinenin kayma oranı ise s ile ifade edilir (Nasef et al., 2022).

Şebekeye bağlı DFIG sisteminin kontrolünün iyileştirilmesi için, stator akısının sabit olduğu ve stator direnci R_s nin ihmal edilebileceği bir durum ele alınır. Bu durumda $\varphi_{ds} = \varphi_s$ ve $\varphi_{qs} = 0$ olarak kabul edilir. Bu şekilde, stator blokları ve akı ile ilgili denklemler aşağıdaki gibi daha basit bir forma dönüştürülebilir. Stator direncinin ihmal edilmesi hem genişletilmiş modelin çözümünü hem de sistem kontrollerini daha basit hale getirir (Kaloi et al., 2016; Mazouz et al., 2017; Nasef et al., 2022; Taveiros et al., 2015).

$$V_{ds} = \frac{d\varphi_{ds}}{dt} = 0 \quad (3.8)$$

$$V_{qs} = V_s = \omega_s \varphi_{ds} \quad (3.9)$$

Statorun aktif ve reaktif gücü, aşağıdaki denklemlerle gösterilebilir (Kaloi et al., 2016; Mazouz et al., 2017; Nasef et al., 2022; Taveiros et al., 2015):

$$P_s = -\frac{L_m}{L_s} V_s I_{qr} \quad (3.10)$$

$$Q_s = \frac{V^2}{\omega_s L_s} V_s I_{qr} - \frac{L_m}{L_s} V_s I_{dr} \quad (3.11)$$

DC voltajını şebeke bağlantılarından bağımsız şekilde sabit tutmak amacıyla, GSC (şebeke tarafı dönüştürücü), sırt sırta bağlı dönüştürücülerin DC terminal voltajını düzenlemek için kullanılır. Ayrıca şebeke ile GSC arasındaki aktif ve reaktif güç büyüklüklerini kontrol etmek için ileri beslemeli bir kontrol stratejisi uygulanır (Nasef et al., 2022). Bu yaklaşım, DC bağlantı ayarlarının sabit bir şekilde korunmasını sağlarken, şebekeyle uyumlu güç yönetimi için etkili bir çözüm sunar.

Kontrol sistemi, şebeke düzenine göre hizalanmış bir senkron referans çerçeveleri (d eksen) sistemli olarak tasarlanmıştır. Bu referans çerçeve, şebeke düzeninin q-ekseni bileşeni (V_q) Sıfır olarak kabul edilir. Sistemin iki temel hedefi vardır. İlk olarak I_d akım kontrolü sağlanan DC bağlantı parametreleri önceden belirlenmiş sabit bir değerde tutulur. İkinci olarak I_q dögüsel olarak reaktif güç ölçümü kontrol edilir (Nasef et al., 2022). Bu strateji hem aktif güç hem de reaktif güç kontrolünü bağımsız olacak şekilde gerçekleştirmeyi mümkün kılar ve sistem şebekesiyle uyumlu çalışmayı sağlar.

Rüzgar türbini dinamiğinin doğru bir şekilde modellenmesi, değişken enerji üretiminin sürdürülebilirliğinin artırılması için temel bir adımdır. Bu dinamiklerin etkin bir şekilde optimize edilmesi, enerji üretimini daha verimli hale getirmek ve artan enerji tüketimini karşılamak için önemli bir strateji oluşturacaktır.

4. PID KONTROL YÖNTEMİ

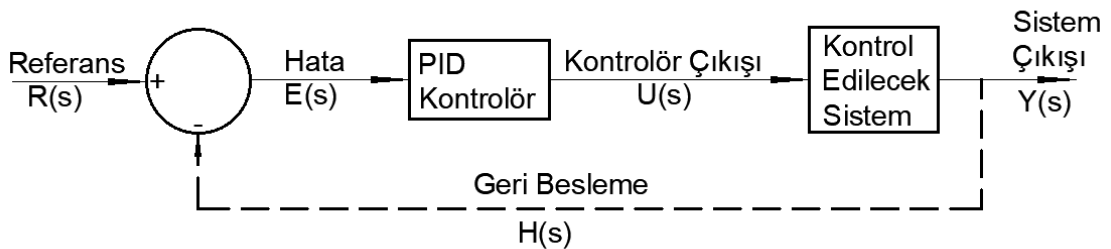
DFIG sistemlerinde kontrol optimizasyonu büyük bir zorluk teşkil etmektedir, çünkü kontrol parametrelerinin yanlış ayarlanması, sistemin verimliliğini düşürebilir, enerji kayıplarını artırabilir ve kararsızlığa yol açabilir. DFIG sistemlerinin giderek daha fazla kullanılması, değişken çalışma koşullarına ve dış etkenlere karşı dayanıklı ve uyarlanabilir kontrol stratejilerine olan gereksinimi artırmıştır.

PID kontrolörleri, endüstride en sık tercih edilen kontrol yöntemlerinden biridir. Bunun temel sebepleri, kolay uygulanabilir olmaları, geniş bir kullanım alanına sahip olmaları ve yüksek performans göstermeleridir. Ayrıca, basit yapısına rağmen karmaşık sistemleri etkin bir şekilde dengeleme yeteneği, PID kontrolörlerini birçok otomasyon sürecinde vazgeçilmez kılmaktadır (Eker et al., 2023).

PID kontrolörü, sistemin gerçek çıkış değeri ile hedeflenen değer arasındaki farkı sürekli izleyerek kontrol sinyalini dinamik olarak ayarlar. Bu geri besleme mekanizması, üretim, enerji ve kimyasal işleme gibi birçok endüstride sistemin kararlılığını korumak, performansını artırmak ve işlem verimliliğini maksimize etmek için önemli bir rol oynar.

PID kontrolör, oransal (P=Proportional), integral (I =Integral) ve türevsel (D=Derivative) olmak üzere üç temel bileşenden oluşmaktadır (Avan, 2022). P bileşeni, mevcut hata ile orantılı bir kontrol sinyali üreterek sisteme doğrudan tepki verir. Bu, sistemin daha hızlı yanıt vermesini sağlar ancak kalıcı hatalara neden olabilir. I bileşeni, geçmiş hataları zaman içinde toplayarak sistemin sabit durum hatalarını gidermesine yardımcı olur. D bileşeni ise hatanın değişim hızını değerlendirerek gelecekte oluşabilecek hataları tahmin eder ve aşırı tepkileri azaltarak sistemin daha dengeli çalışmasını sağlar.

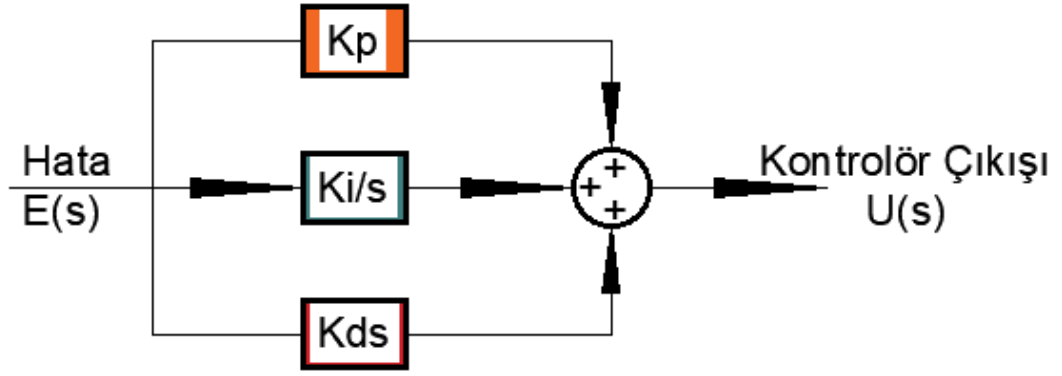
PID kontrolörün uygulandığı örnek bir sistemin blok şeması Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. PID kullanılan sistemin blok şeması

Şekil 4.1'de gösterildiği gibi, sistemin çıkış değeri referans değeri ile karşılaştırılarak hata hesaplanır ve bu hata PID kontrolöre giriş olarak verilir. PID kontrolör, hatayı analiz ederek sistem girişine düzeltici bir etki uygular. İstenen çıkış ile gerçek çıkış arasındaki fark, kontrolör tarafından işlenerek uygun bir giriş sinyali üretilir (Avan, 2022).

PID kontrolörün blok şeması Şekil 4.2'de gösterilmektedir.



Şekil 4.2. PID kontrolörün blok şeması

Standart PID kontrolör denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.1)$$

Burada $u(t)$ kontrol sinyalini, $e(t)$ hata değerini (hedef değeri ile gerçek değeri arasındaki fark) temsil eder. K_p , K_i ve K_d ise sırasıyla oransal, integral ve türev kazançlarıdır. Bu denklem, oransal, integral ve türev bileşenlerinin birlikte çalışmasını ifade ederek, çeşitli sistemler için etkili ve kararlı bir kontrol mekanizması sağlar.

PID kontrolörün frekans bölgesindeki matematiksel modeli ise denklem (4.2)'de ifade edilmiştir.

$$U(S) = K_p * E(s) + \frac{K_i}{s} * E(s) + K_d * s * E(s) \quad (4.2)$$

PID parametrelerinin sisteme etkileri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. PID parametrelerinin sistem üzerindeki etkileri (Avan, 2022)

Parametre	Yükselme Zamanı	(%) Aşım	Yerleşme Zamanı	Kararlı Hal Hatası
K_p	Azalı	Artar	Az Artar	Azalı
K_i	Az Azalı	Artar	Artar	Çok Azalı
K_d	Az Azalı	Azalı	Azalı	Çok Az Değişir

Parametre değerleri her sistem için farklıdır. Sisteme uygun parametre değerlerini ayarlamak amacıyla farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada PID denetleyici parametrelerini optimize etmek amacıyla optimizasyon algoritması kullanılmıştır.

Günümüzde yapılmış araştırmalar, geleneksel PI denetleyicilerinden ileri düzey sezgisel optimizasyon yöntemlerine kadar çeşitli yaklaşımlar sunarak, DFIG sistemleri için güvenilir kontrol stratejilerinin önemini ön plana çıkarmaktadır.

Bu araştırma, sistemin kararlılığını, uyarlanabilirliğini ve hesaplama verimliliğini etkileyen kısıtlamaları gidermeye odaklanarak mevcut temelleri geliştirmeyi amaçlamaktadır. Meta-sezgisel optimizasyondaki yeni ilerlemeler, bu kısıtlamaların aşılmasında etkili olabileceğini kanıtlamış ve daha gelişmiş ayarlama yöntemlerinin tasarlanmasına ilham vermiştir.

5. ÖNERİLEN KONTROL YÖNTEMİ

Meta-sezgisel optimizasyonda elde edilen yeni buluşlar, sistemin dengesi, adaptasyon kabiliyeti ve hesaplama verimliliği ile ilgili kısıtlamaları ortadan kaldırmaya yönelerek, daha ileri düzey ayarlama tekniklerinin önünü açmıştır. Bu bölümde, ilk olarak önerilen HOA ayrıntılı olarak açıklanmakta ve temel prensipleri kapsamlı bir şekilde incelenmektedir. Ardından değiştirilmiş hedef fonksiyon ile yapılandırılmış HOA'nın PID kontrollü bir DFIG sistemine uygulanışı açıklanmakta ve hedef fonksiyonun entegrasyonu ile kontrol çerçevesindeki önemli uygulama unsurlarına odaklanmaktadır.

5.1. Yürüyüş Optimizasyon Algoritması (HOA)

Meta-sezgisel algoritmalar, optimizasyon problemlerine yönelik genel yaklaşımlar geliştirmek için doğal sistemlerin işleyişinden esinlenir. HOA (The Hiking Optimization Algorithm), bu tür algoritmalara yeni bir bakış açısı sunar ve insanların günlük yaşamda sergilediği yürüyüş davranışlarından ilham alır. HOA'nın temel amacı, küresel optimuma hızlı ve etkili bir şekilde ulaşmaktır.

HOA, Oladejo ve diğerlerinin (2024) de belirttiği gibi; Amerikalı-İsviçreli coğrafyacı ve kartograf Waldo Tobler tarafından formülize edilen Tobler'in Yürüyüş Fonksiyonu köklü temeline dayanır. Bu fonksiyon, bir yürüyüşçünün izlediği arazinin eğimine bağlı olarak, üstel bir model sunar. Tobler'in Yürüyüş Fonksiyonu, arazi özelliklerini katarak, yürüyüşçülerin farklı eğimlerde nasıl bir hızla ilerleyeceğini tahmin eder. Bu model, özellikle arazide yürüyüş yapmak için kullanılan üstel bir fonksiyon olarak bilinir ve patika eğiminin hızının üzerindeki mesafe hassas bir şekilde yansıtılır.

$$W_{i,t} = 6e^{-3.5|S_{i,t}+0.05|} \quad (5.1)$$

Burada $W_{i,t}$ yürüyüşçünün t zamandaki hızını, $S_{i,t}$ ise arazinin eğimini belirtir. Ek olarak arazi eğimi $S_{i,t}$, aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$S_{i,t} = dh/dx = \tan\theta_{i,t} \quad (5.2)$$

Burada dh , iki nokta arasındaki dikey yükseklik değişimini gösterirken, dx , yatay düzlemde alınan mesafeyi tanımlar. Bununla birlikte, $\theta_{i,t}$; arazinin eğim açısı olarak kabul edilir ve bu değer 0 ile 50° arasında değişir. HOA, yürüyüşçülerin hem bir grup olarak sosyal dinamiklerinden hem de bireysel yürüyüşçülerin bilişsel becerilerinden yararlanır. Bir yürüyüşçünün güncel hızı, Tobler'in Yürüyüş Fonksiyonu (THF) tarafından belirlenen başlangıç hızına ek olarak, lider yürüyüşçünün konumu, kendi mevcut konumu ve süpürme faktörü gibi unsurlara bağlı olarak hesaplanır.

$$W_{i,t} = W_{i,t-1} + \gamma_{i,t} (\beta_{best} - \alpha_{i,t} \beta_{i,t}) \quad (5.3)$$

Burada $\gamma_{i,t}$ [0,1] aralığında rastgele ve düzgün dağılıma sahip bir sayı olarak tanımlanır. $W_{i,t}$, yürüyüşçü i 'nin mevcut hızını, $W_{i,t-1}$ ise başlangıç hızını ifade eder. β_{best} , lider yürüyüşçünün konumunu temsil ederken, $\alpha_{i,t}$ [1,3] aralığında tanımlanan süpürme faktörüdür (SF). Süpürme faktörü, yürüyüşçünün liderden çok uzaklaşmasını önlemek için bir kontrol mekanizması işlevi görür. Bu, yürüyüşçünün liderin yönünü gözlemleyebilmesini ve liderin verdiği sinyalleri algılayabilmesini sağlar.

Yürüyüşçünün yeni konumu, mevcut hızın zaman içindeki etkisini yansıtır ve pozisyonun nasıl değiştiğini ifade eder. Bu, yürüyüşçünün o anki konumuna, belirlenen hız değerine ve zaman adımına bağlı olarak belirlenir. Başka bir deyişle, $\beta_{i,t+1}$, yürüyüşçünün önceki pozisyonunun üzerine, (5.1) denklemindeki hız değerinin eklenmesiyle elde edilir. Bu formül, yürüyüşçünün ilerleyen adımlardaki yer değişimini modellemek için kullanılır.

$$\beta_{i,t+1} = \beta_{i,t} + W_{i,t} \quad (5.4)$$

HOA'nın keşif ve sömürü davranışları, süpürme faktörü (SF) adı verilen bir parametre tarafından yönlendirilir. SF, Denklem (5.3)'te gösterildiği gibi, patika lideri ile diğer yürüyüşçüler arasındaki mesafeyi doğrudan etkiler. Aynı zamanda, Denklem (5.1) ve (5.2)'de tanımlanan yürüyüşçü hızını belirleyen patika eğimi de HOA'nın keşif ve sömürü eğilimlerini şekillendiren kritik bir unsurdur. SF parametresinin aralığı genişlediğinde, HOA daha çok sömürü aşamasına odaklanır. Diğer yandan, SF aralığının daralması, sistemin daha fazla keşif davranışı sergilemesine yol açar. Benzer şekilde,

parkurun eğim açısının aralığının daraltılması, HOA'nın daha çok sömürü davranışı göstermesine neden olur. Bu parametreler birlikte, HOA'nın optimizasyon süreçlerindeki davranışını ve performansını belirler. SF ve eğim açısı gibi faktörlerin değişimi, sistemin keşif ve sömürü arasındaki dengeyi nasıl kuracağını etkiler ve böylece çözüm üretme stratejilerini şekillendirir. Algoritma 1, HOA'nın işleyişini adım adım açıklamaktadır.

Algoritma 1: HOA'nın sözde kodu

<p>Input: UB, LB, T, I, d</p> <p>1: $F \leftarrow$ Prepare by predetermining the fitness vector $R^{I \times 1}$</p> <p>2: $F_{best} \leftarrow$ Predetermine the best fitness vector $R^{(I+1) \times 1}$</p> <p>3: $\beta \leftarrow$ Initialize by randomly determining the positions of the hiker's $R^{I \times d}$</p> <p>4: for $i \leftarrow 1$ to I do</p> <p>5: $F_i \leftarrow$ Measure the competence of the hiker's</p> <p>6: end for</p> <p>7: $F_{best, 1} \leftarrow$ The best value of the walkers at the initial level</p> <p>8: for $t \leftarrow 1$ to T do</p> <p>9: $F_{best, t} \leftarrow$ Determine hiker with highest fitness</p> <p>10: $\beta_{best, t} \leftarrow$ Express the position of the best condition as $F_{best, t}$</p> <p>11: for $i \leftarrow 1$ to I do</p> <p>12: $\beta_{i,t} \leftarrow$ Determine the initial position of hiker i</p> <p>13: $\theta_{i,t} \leftarrow$ Calculate the slope angle on the hiker's track</p> <p>14: $S_{i,t} \leftarrow$ Calculate the slope by (5.2)</p> <p>15: $W_{i,t-1} \leftarrow$ Calculate the initial hiking speed with (5.1)</p> <p>16: $W_{i,t} \leftarrow$ Determine the actual speed of hiker i using (5.3)</p> <p>17: $\beta_{i,t+1} \leftarrow$ Update the position of hiker i using (5.4)</p> <p>18: $\beta_{i,t} \leftarrow$ Determine the boundary $\beta_{i,t+1}$ within LB and UB</p> <p>19: if $F_n \leq F(n)$ then</p> <p>20: $\gamma(n, :) \leftarrow \vec{H}$</p> <p>21: $F(n) \leftarrow F_n$</p> <p>22: end if</p> <p>23: end for</p> <p>24: $F_{sol}(i+1) \leftarrow \min(F)$</p> <p>25: end for</p> <p>26: $F_{sol}^* \leftarrow \operatorname{argmin}(F_{sol})$</p> <p>27: return</p>
--

5.2. HOA Tabanlı PID Kontrol Yöntemi

Gelişmiş kontrol sistemlerinde, özellikle DFIG gibi dinamik yapıya sahip sistemlerde, standart PID denetleyicisinin en iyi performansı sergileyebilmesi için hassas

şekilde ayarlanması gerekebilir. Bu tür sistemlerde, PID kontrolörünün etkili çalışabilmesi için parametrelerinin dikkatlice optimize edilmesi önemlidir.

PID kontrol parametrelerinin (K_p , K_i , K_d) doğru şekilde ayarlanması, sistemde aşımı azaltmak, hızlı yerleşme süresi sağlamak ve enerji verimliliğini artırmak gibi hedefler arasında denge kurmada hayati bir rol oynar. Bu parametrelerin optimize edilmesi, sistemin hem kararlı hem de verimli çalışması için gereklidir.

Bu çalışma, DFIG sistemi için standart PID denetleyicisinin parametre ayarlarını optimize etmek amacıyla Zve-Lee Gaing (ZLG) (Can et al., 2023) maliyet fonksiyonunun geliştirilmiş bir versiyonunu kullanmaktadır. Çalışmada, ZLG maliyet fonksiyonunun iyileştirilmiş hali ile PID kontrol parametrelerinin en uygun şekilde belirlenmesi hedeflenmiştir.

İlk olarak kontrol sistemi optimizasyonu amacıyla geliştirilen ZLG fonksiyonu, geçici durum ve kararlı durum performans kriterleri arasında başarılı bir denge sağlar (Ekinci et al., 2023). Bu işlev, sistemin hem dinamik tepkisini iyileştirmeye hem de kararlı durum hatalarını minimize etmeye yönelik olarak tasarlanmıştır.

Bu çalışmada yapılan değişiklikler, ZLG yöntemini genişleterek aşım, yerleşme süresi, kontrol çabası ve kontrol sinyallerinin değişim oranı gibi temel kontrol zorluklarını ele almak için ek sınırlandırma terimlerini içermektedir. Önerilen yaklaşım, bu faktörleri dikkate alarak ZLG fonksiyonunun kapsamını genişletip kontrol performansını iyileştirmeyi amaçlamaktadır. ZLG'nin orijinal hedef fonksiyonu aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

$$ZLG = (1 - e^{-\beta}) \cdot \left(E_{ss} + \frac{OS}{100} \right) + e^{-\beta} \cdot (T_s - T_r) \quad (5.5)$$

Burada E_{ss} , kararlı durum hatasını ifade eder ve bu hata, yerleşme bölgesinin minimum ve maksimum değerleri arasındaki mutlak fark olarak yaklaşık olarak belirlenir. OS , sistemin ayar noktasından maksimum sapmasını gösteren ve ayar noktası değeriyle normalize edilen yüzde aşımıdır. T_s , sistem yanıtının ayar noktasının %2'si içinde kalmasını sağlamak için geçen süredir ve yerleşme süresi olarak adlandırılır. T_r , sistemin ayar noktasının %90'ına ulaşması için gereken süre olup yükselme süresi olarak tanımlanır. Son olarak β , kararlı durum ve geçici durum performansı arasındaki göreceli önemi belirleyen bir dengeleme katsayısıdır. β 'nın büyük olması, geçici yanıtın iyileştirilmesine odaklanırken, küçük olması ise kararlı durum hatasının minimize

edilmesini sağlar. ZLG fonksiyonunun orijinal şekli, geçici ve sabit durum performansına öncelik tanımak, hızlı yanıtların dengelenmesini sağlamak ve aşım ile sabit durum hatalarını en aza indirmek üzere tasarlanmıştır.

Bu çalışma, ZLG fonksiyonunun DFIG sistemlerinin sağlamlık ve uyarlanabilirliğinin artırılması amacıyla, aşırı aşım, uzun süreli yerleşme süreleri, yüksek kontrol çabası ve ani kontrol değişimleri gibi istenmeyen kontrol işlemlerini sınırlandıran ek sınırlandırma terimlerini önerir. Bu işlem, sistemin daha kararlı ve verimli çalışmasını sağlamak için tasarlanmıştır. Aşağıda önerilen hedef fonksiyonların formülizasyonu yer almaktadır.

$$F = \frac{1}{2} \cdot \left((1 - e^{-\beta}) \cdot \left(E_{ss} + \frac{OS}{100} \right) + e^{-\beta} \cdot (T_s - T_r) \right) + \frac{1}{2} \cdot (OS_{penalty} + T_s^{penalty} + CRP + CE) \quad (5.6)$$

Burada β dengeleme faktörü olarak belirtilmiş olup, değeri 0,3 olarak alınmıştır. $OS_{penalty}$ ise aşım sınırlandırmasını ifade eder ve bu sınırlandırma, $OS_{penalty} = OS^2$ olarak tanımlanmıştır. Bu terim, sistem istikrarsızlığı yaşanmasını engellemek amacıyla büyük aşım değerlerine sınırlandırıcı bir etki uygular. Böylece aşırı sapmaların önüne geçilerek sistemin daha dengeli bir şekilde çalışmasını sağlar. $T_s^{penalty}$, uzun yerleşme sürelerini engelleyerek daha hızlı bir yanıt elde etmeyi sağlayan sınırlandırmayı ifade eder. Bu sınırlandırma, sistemin daha hızlı dengeye ulaşmasını sağlamaya yöneliktir. Ve $T_s^{penalty} = T_s^2$ olarak tanımlanmıştır. CRP, kontrol oranı sınırlandırmasını ifade eder. Başka bir deyişle, CRP, kontrol sinyalinin değişim hızına dayalı bir sınırlandırma terimidir ve formülizasyonu aşağıda belirtildiği gibidir.

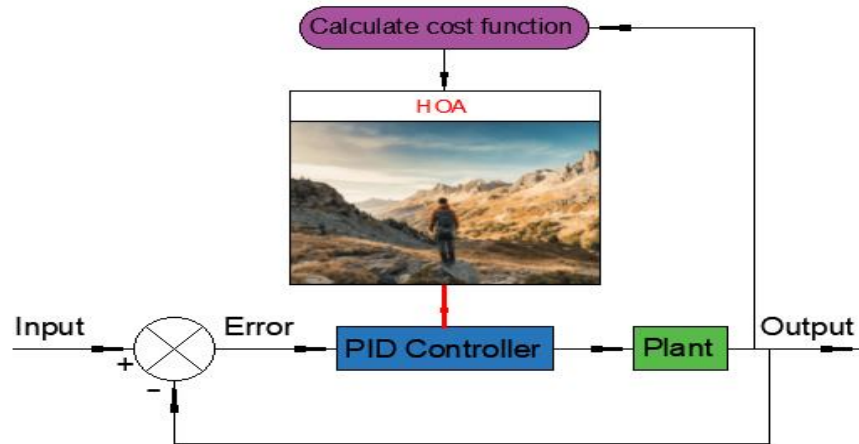
$$CRP = \int_0^T \left(\frac{du(t)}{d(t)} \right)^2 dt \quad (5.7)$$

Bu terim, kontrol sinyalindeki ani bozulmayı engellemeyi, daha düzgün tepkiler sağlamayı ve salınımları azaltmayı hedefler. Son olarak CE, aşırı kontrol eylemlerini azaltarak sistemin daha verimli bir şekilde çalışmasını sağlayan kontrol çabasını ifade eder. Bu terim, gereksiz kontrol müdahalelerinin önüne geçerek enerji tüketimini optimize eder ve aşağıdaki şekilde formülize edilmiştir.

$$CE = \int_0^T \left(\frac{1}{1+t} \right) \cdot u(t)^2 dt \quad (5.8)$$

Kontrol sistemlerinde aşım, yerleşme süresi, kontrol çabası ve değişim oranı gibi parametrelere yönelik sınırlandırma terimlerinin eklenmesi, orijinal ZLG işlevinin daha uygulanabilir hale gelmesini sağlar. β 'nin kullanımı, sistemin kararlı ve geçici davranışlarını dengeleyerek, daha etkili bir optimizasyon yöntemi oluşturur. Önerilen yaklaşım, istenmeyen dinamikleri sınırlayarak, DFIG sistemlerinin değişen koşullara karşı daha istikrarlı ve düzgün tepkiler vermesini sağlar.

Geliştirilmiş ZLG fonksiyonu, DFIG sistemlerinde kararlılık, verimlilik ve dinamik uyarlanabilirliğin kritik olduğu durumlar için daha uygun bir çözüm sunar. Bu fonksiyon, özellikle bu tür sistemlerde yapılması gereken performans uygulamalarını sağlamada daha etkili bir araçtır. HOA, önerilen F hedef fonksiyonları üzerinden ideal PID parametrelerini optimize etmek için kullanılır. Şekil 5.1, önerilen yöntemin adımlarını ve sürecini görsel olarak sunmaktadır.



Şekil 5.1. Önerilen HOA tabanlı PID kontrollü DFIG sistemi

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, istatistiksel ölçütler, yakınsama davranışı, zaman ve frekans tepkisi değerlendirmeleri ile literatürdeki çalışmalara dayalı performans doğrulamasını kapsayan karşılaştırmalı analiz sonuçları ele alınmaktadır.

6.1. Karşılaştırılan Algoritmalar

Bu çalışma, HOA'nın performansını değerlendirmek amacıyla, denizyıldızı optimizasyon algoritması (SFOA) (Zhong et al., 2025), gri kurt optimizasyon algoritması (GWO) (Mirjalili et al., 2014), yusuçuk algoritması (DA) (Mirjalili, 2016), akış yönü algoritması (FDA) (Yildiz et al., 2023) ve sinüs-kosinüs algoritması (SCA) (Abualigah & Diabat, 2021) gibi beş farklı meta-sezgisel yöntemle karşılaştırmaktadır.

Bu algoritmaların seçimi hem literatürdeki güncelliklerini hem de optimizasyon problemlerini çözümedeki etkinliklerini göz önünde bulundurularak yapılmış olup, değerlendirme sürecine en yeni yöntemlerin dahil edilmesini sağlamaktadır. Örneğin, SFOA, denizyıldızlarının kendine özgü hareket kabiliyetlerini ve rejeneratif özelliklerini modelleyen biyolojik temelli bir algoritmadır ve bu sayede karmaşık ve dinamik optimizasyon ortamlarına uyum sağlama konusunda oldukça başarılıdır. GWO ise, gri kurtların sosyal yapılarını ve avlanma stratejilerini temel alan, keşif ve sömürü süreçleri arasında denge kurmayı amaçlayan doğadan esinlenmiş bir optimizasyon algoritmasıdır. Benzer şekilde DA, yusuçukların grup halinde hareket etme prensiplerinden esinlenerek, çözümlerin keşif sürecinde çekim ve dikkat dağıtma kuvvetlerinden faydalanır. FDA, akışkanların hareket dinamiklerini taklit eden bir yaklaşım benimseyerek, çözümlerin akış yönünü optimize etmek için akışkanlar mekaniği ilkelerini uygular. Diğer algoritmaların aksine, SCA, küresel ve yerel optimizasyon süreçlerinde dinamik arama yörüngelerini belirlemek için sinüs ve kosinüs fonksiyonlarını kullanan matematiksel tabanlı bir algoritmadır.

Algoritmaların önyargısız bir şekilde değerlendirilmesi için, her birine orijinal yayınlarında belirtilen varsayılan parametre değerleri atanmış, böylece performans ölçümünün yalnızca algoritmaların kendi iç dinamiklerini yansıtması sağlanmıştır. Bu

çalışmada, HOA ve diğer algoritmalar aynı test koşullarında ele alınarak, DFIG sistemlerinde PID kontrol ayarlarının optimizasyonunda farklı stratejilerin etkinliğini karşılaştırmak için güvenilir bir değerlendirme çerçevesi sunulmuştur.

6.2. İstatistiksel Bulgular

Bu çalışmada karşılaştırılan algoritmaların istatistiksel performans metrikleri, PID kontrolörlerini ayarlama HOA'nın etkinliğini ve güvenilirliğini değerlendirmek için nicel bir temel sağlar. Analiz edilen metrikler, her algoritma tarafından 30 çalışmada elde edilen hedef fonksiyon değerlerinin en iyi, en kötü, ortalama, medyan ve standart sapmasını içerir. Çizelge 6.1 elde edilen karşılaştırmalı sonuçların özetini sunmaktadır.

Çizelge 6.1. Karşılaştırılan algoritmalarından elde edilen istatistiksel veriler

Algoritma	En İyi	En Kötü	Ortalama	Medyan	Standart Sapma
HOA	0.1952	0.2002	0.1965	0.196	0.0013
DA	0.21	441.8382	17.9704	0.2963	88.3058
FDA	0.2252	2.2742	0.3788	0.2898	0.4014
GWO	0.2016	0.623	0.3212	0.2897	0.1085
SCA	0.2212	0.6846	0.3649	0.2882	0.1505
SFOA	0.1959	0.211	0.1973	0.2098	0.0036

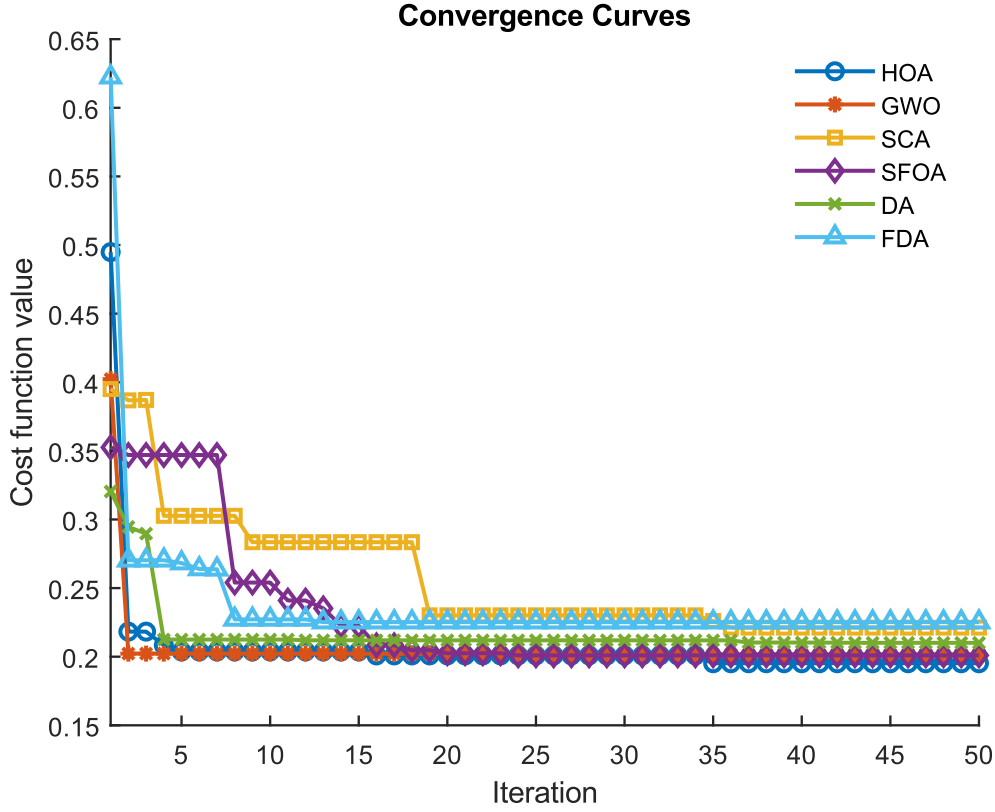
Görüldüğü üzere, HOA, en düşük standart sapma değeri (0,0013) ile en tutarlı performansı sergileyerek, optimizasyon sürecindeki kararlılığını kanıtlamıştır. Ortalama (0,1965) ve medyan (0,196) değerlerinin birbirine yakın olması, sonuçların sıkı bir şekilde kümelenmiş olduğunu ve değişkenliğin minimum seviyede olduğunu göstermektedir. Bu durum, HOA'nın yüksek güvenilirlik ve istikrar sunduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Öte yandan DA yüksek bir değişkenlik sergileyerek önemli dalgalanmalar göstermiştir. Standart sapmanın 88,3058 gibi büyük bir değere sahip olması ve en iyi (0,21) ile en kötü (441,8382) sonuçlar arasındaki geniş fark, algoritmanın çözümler arasında büyük tutarsızlıklar yaşadığını ortaya koymaktadır. Bu durum, DA'nın optimum çözümlere istikrarlı bir şekilde yakınsamakta zorlandığını göstermektedir. FDA, DA'ya kıyasla daha iyi bir tutarlılık sergilemiş olsa da belirli bir seviyede değişkenlik göstermeye devam etmiştir. En iyi değeri (0,2252) ile en kötü değeri (2,2742) arasındaki fark, performansında bazı dalgalanmalar olduğunu ortaya koymaktadır. Öte yandan, GWO, 0,1085'lik düşük standart sapmasıyla oldukça istikrarlı sonuçlar üretmiştir. Ancak, ulaştığı en iyi değer (0,2016), HOA ile kıyaslandığında biraz daha düşük rekabetçiliğe

sahip olmuştur. SCA, 0,1505'lik standart sapma değeriyle daha fazla değişkenlik göstererek, HOA ve GWO'ya kıyasla daha az istikrarlı bir yakınsama sergilemiştir. Bu durum, algoritmanın farklı çalışmalarda daha tutarsız sonuçlar ürettiğini ve optimizasyon sürecinde belirli dalgalanmalar yaşadığını ortaya koymaktadır. Son olarak, SFOA, performans açısından HOA'ya oldukça yakın sonuçlar elde etmiştir. 0,0036'lık düşük bir standart sapma göstererek istikrarlı bir optimizasyon süreci sergilemiştir. En iyi elde ettiği değer ise 0,1959 olup, bu değer HOA'nın ulaştığı en iyi değere (0,1952) oldukça yakındır. Ancak, SFOA, hassasiyet açısından HOA'ya kıyasla biraz daha düşük bir doğruluk sergilemiştir.

Elde edilen sonuçlar, HOA'nın PID denetleyici ayarlarında üstün bir tutarlılık ve hassasiyet sağladığını ortaya koymaktadır. Bu özellikler, sistemin kararlılığını ve güvenilirliğini artırarak, diğer algoritmalara kıyasla daha başarılı bir performans sergilediğini göstermektedir. HOA'nın düşük değişkenlik ve sıkı kümelenmiş değerler ile en iyi sonuçları sunması, onu sağlam bir optimizasyon yöntemi haline getirmektedir. HOA'nın düşük standart sapma değeri, optimum çözümlere güvenilir bir şekilde ulaşabildiğini gösterirken, en iyi ve en kötü değerler arasındaki dar fark, algoritmanın istikrarlı performans sunduğunu kanıtlamaktadır. Bu durum, farklı koşullar altında bile tutarlı sonuçlar elde edebilme kapasitesini vurgular. Elde edilen istatistiksel bulgular, HOA'nın dinamik çalışma ortamlarında DFIG sistemleri için PID denetleyici parametrelerini optimize etme konusunda üstün bir yetenek sergilediğini desteklemektedir.

6.3. Standart PID Denetleyicisinin Yakınsama Eğrileri ve Elde Edilen Kontrol Parametreleri

Bu bölümde, HOA ile birlikte beş farklı optimizasyon algoritmasının (DA, FDA, GWO, SCA ve SFOA) yakınsama özellikleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında, her algoritmanın DFIG sisteminde PID denetleyici parametrelerini (K_p , K_i , K_d) en iyi şekilde ayarlama kapasitesi değerlendirilmiştir. Şekil 6.1, tüm algoritmaların yakınsama eğrilerini sunarak, yineleme sayısına bağlı olarak hedef fonksiyon değerlerindeki değişimi göstermektedir. Bu analiz, farklı yöntemlerin optimizasyon sürecindeki etkinliklerini ve performanslarını karşılaştırmaya olanak tanımaktadır.



Şekil 6.1. Yineleme sayılarına göre karşılaştırmalı yakınsama eğrileri

Eğrilerden görülebileceği gibi, HOA, minimum yineleme sayısı ile kararlılığa ulaşarak optimum çözüme doğru hızlı bir yakınsama sergiler. Bu, optimizasyon sürecinde keşif ve sömürü aşamalarını etkili bir şekilde dengeleme yeteneğini ortaya koymaktadır. Bu hızlı yakınsama, HOA'nın parametre ayarlama konusunda verimli ve etkin bir algoritma olduğunu gösterir. GWO ve SFOA, güçlü bir yakınsama davranışı sergileyerek optimum çözümlere hızla yaklaşır, ancak kararlılığa ulaşmak için HOA'ya kıyasla daha fazla yineleme süresine ihtiyaç duyarlar. Bu durum, bu algoritmaların hızlı bir başlangıç yapmasına rağmen, kararlılığı sağlama konusunda daha fazla zaman harcadığını gösterir. DA, FDA ve SCA, arama alanında verimli bir şekilde gezinme ve parametreleri ince ayarlama konusundaki zorluklarını yansıtarak daha yavaş bir yakınsama oranı sergilerler. Bu durum, bu algoritmaların optimum çözümü bulma sürecinde daha fazla zaman ve yineleme gerektirdiğini, dolayısıyla daha düşük hızda yakınsamalar sağladığını gösterir.

Çizelge 6.2, her bir algoritma tarafından elde edilen optimize edilmiş PID parametrelerini (K_p , K_i , K_d) sunmaktadır. Bu parametreler, her algoritmanın DFIG sistemi için PID denetleyici optimizasyonundaki performansını ve sağladığı sonuçların karşılaştırılmasını kolaylaştırır.

Çizelge 6.2. HOA, DA, FDA, GWO, SCA ve SFOA algoritmalarıyla elde edilen PID denetleyicisi parametre değerleri

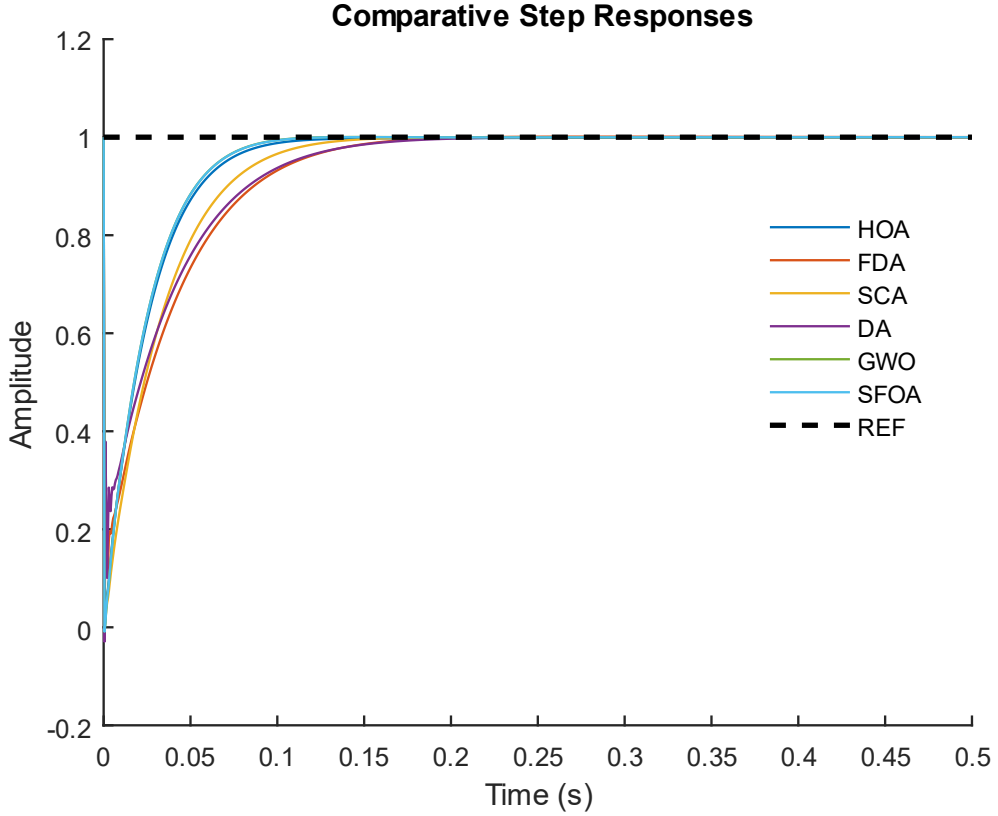
Algoritma	K_p	K_i	K_d
HOA	19.5881	176.288	0.0064
DA	15.1118	133.4676	0.1093
FDA	13.4197	123.8447	0.0651
GWO	20	186.2713	0.0012
SCA	14.8677	138.9476	0.0042
SFOA	20	185.7454	0.001

HOA, hedef fonksiyonunu minimize etme ve performans kriterlerini karşılama konusunda mükemmel bir yetenek sergileyerek optimize edilmiş parametrelere ulaşmıştır. HOA, sistem kararlılığını korurken aşımı, yerleşme süresini ve kontrol çabasını en aza indirme amacına yönelik uyumlu parametre değerleri elde etmiştir. Bu, birbirini tamamlayan ve rekabet eden hedefler arasında hassas bir denge kurma yeteneğinin açık bir göstergesidir. GWO ve SFOA, HOA ile karşılaştırıldığında biraz daha az optimum sonuçlar elde etmesine rağmen, yine de rekabetçi parametre değerleri sunarak benzer performans sergilemiştir. DA, FDA ve SCA, daha yüksek orantılı ve integral kazanımların neden olduğu daha az kararlı kontrol davranışları sergileyerek, optimum olmayan parametre ayarlarıyla sonuçlanmıştır.

Yakınsama eğrilerinden ve elde edilen parametrelerden elde edilen sonuçlar, HOA'nın değişken çalışma koşulları altında DFIG gibi karmaşık sistemler için PID denetleyicilerini optimize etmedeki etkinliğini ve güvenilirliğini kanıtlamaktadır. Bu, HOA'nın endüstriyel kontrol uygulamalarında sağlam bir araç olarak büyük potansiyel taşıdığını göstermektedir.

6.4. Zaman Yanıtı Analizi

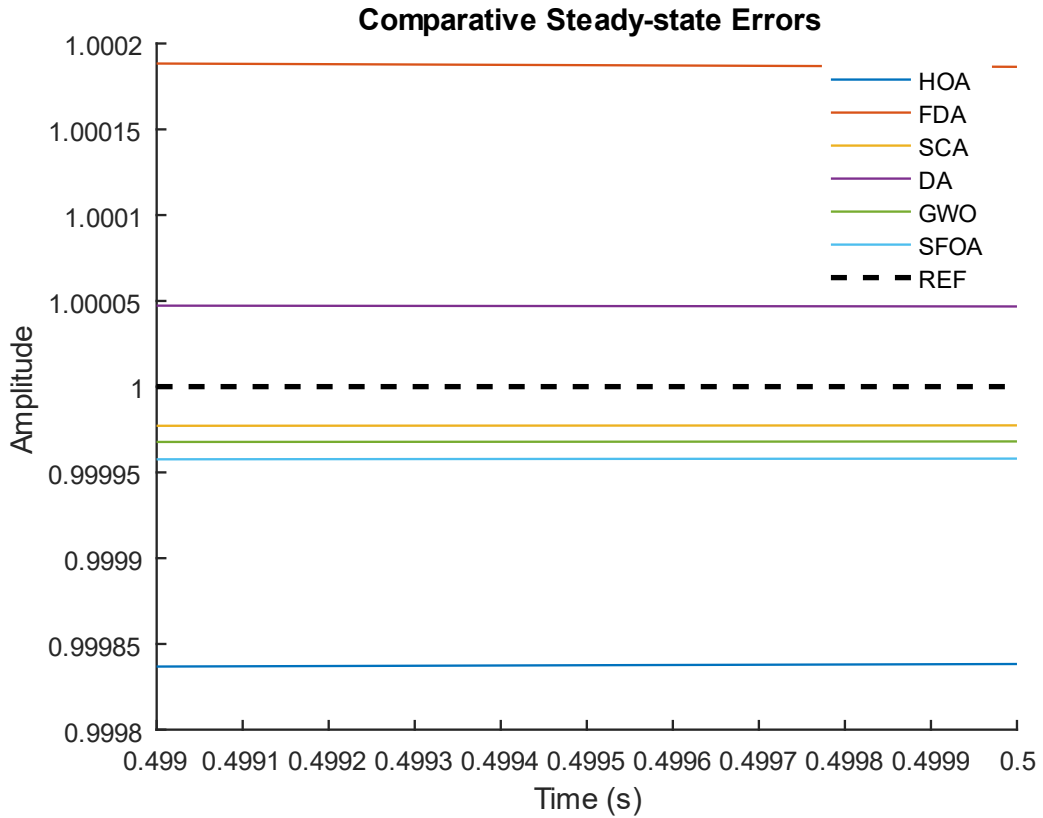
Bu bölümde, HOA ve beş karşılaştırmalı algoritma (DA, FDA, GWO, SCA ve SFOA) tarafından optimize edilen PID kontrolörlerinin zaman alanı tepkisi analiz edilmiştir. Analiz, aşma, yükselme süresi, yerleşme süresi ve tepe süresi gibi temel performans ölçütlerini içermektedir. Şekil 6.2 ve 6.3, sırasıyla karşılaştırmalı adım tepki profillerinin ve sabit durum hata değerlerinin görsel temsillerini sunmaktadır. Sayısal sonuçlar ise Çizelge 6.3'te özetlenmiştir. Bu analiz, her bir algoritmanın performansını değerlendirirken, özellikle HOA'nın üstün zaman tepkisi performansını vurgulamaktadır.



Şekil 6.2. HOA, FDA, SCA, DA, GWO ve SFOA kullanılarak elde edilen karşılaştırmalı adım yanıtları

Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlara göre, HOA sıfır aşma göstermiştir. Bu da mükemmel kararlılık ve hassas kontrol sağladığını göstermektedir. Bu özellik, HOA'yı yüksek performans gereksinimleri olan DFIG sistemleri için en güvenilir algoritma haline getirmektedir. FDA ve SFOA, sırasıyla %0,96425 ve %0,0056227 gibi küçük aşmalar gösterirken, GWO biraz daha yüksek bir aşma değeri (%0,039555) sergilemiştir. Yükselme süresi açısından, tüm algoritmalar sıfır yükselme süresine ulaşarak, adım değişikliklerine hızlı ve etkili bir şekilde yanıt vermiştir. Çökme süresi açısından, HOA 0,08922 saniyelik en kısa çökme süresine ulaşarak, sistemi hızlı bir şekilde stabilize etme yeteneğini vurgulamaktadır. Diğer algoritmalar arasında, FDA ve DA sırasıyla 0,1397 ve 0,13994 saniyelik daha uzun çökme sürelerine sahipken, GWO ise 0,082414 saniyelik çökme süresi ile biraz daha iyi bir performans sergilemiştir. Tepe zamanı açısından, HOA sıfır tepe zamanı elde ederek üstün sönümlenme ve kararlılık performansını daha da güçlendirmiştir. Diğer algoritmalar arasında, FDA ve SFOA sırasıyla 0,24728 saniye ve 0,13749 saniyelik küçük tepe zamanları göstermiştir. Bu sonuçlar, HOA'nın daha hızlı ve daha stabil bir tepki verdiğini ortaya koymaktadır.

Şekil 6.3, karşılaştırılan tüm algoritmalar için sabit durum hata değerlerini göstermektedir. Tüm yöntemler, referans çizgisine oldukça yakın sabit durum hataları sergileyerek, genel olarak benzer seviyelerde doğruluk sağladı. HOA, FDA, SCA, DA, GWO ve SFOA, referans çizgisine yakın sonuçlar göstererek küçük hatalarla performans sergiledi. Ancak, HOA, diğer yaklaşımlar arasında en düşük hatayı elde ederek, sifıra yakın değerler ulaştı ve ihmal edilebilir sabit durum hatası gösterdi. Bu durum, HOA'nın endüstriyel uygulamalarda güvenilirliği ve hassasiyetini sağlamak için kritik olan sabit durum koşullarında en etkili ve doğru kontrolü sunduğunu vurgulamaktadır. HOA, kontrol hassasiyetini yüksek tutarak, endüstriyel sistemlerde güvenli ve kararlı bir performans sergileyebileceğini kanıtlamaktadır.



Şekil 6.3. HOA, FDA, SCA, DA, GWO ve SFOA algoritmaları ile elde edilen karşılaştırmalı sabit durum hata değerleri

Çizelge 6.3, tüm algoritmalar için zaman tepkisi metriklerini sunmaktadır. Sonuçlar, HOA'nın aşım ve yerleşme süresi gibi önemli zaman-tepki metriklerinde diğer algoritmalara göre belirgin bir üstünlük gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu performans, HOA'nın DFİG sistemlerinin dinamik ve hassas doğası için gerekli olan hızlı ve istikrarlı tepkileri sağlama konusunda üstün bir yeteneğe sahip olduğunu vurgulamaktadır.

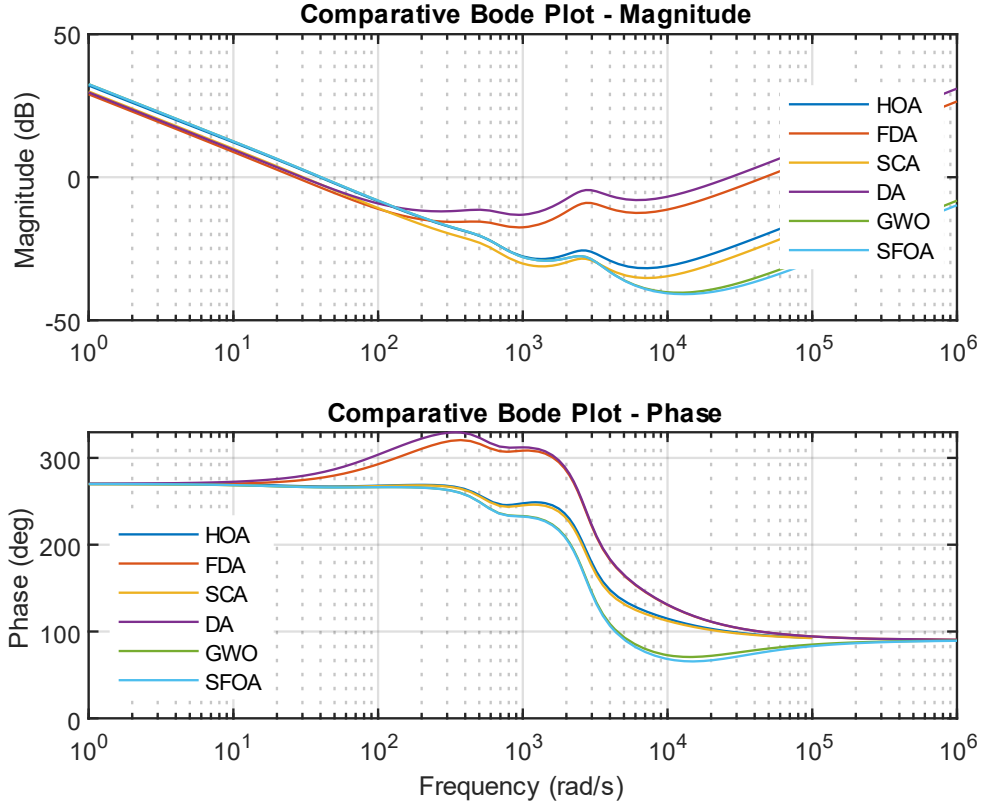
HOA'nın bu üstün tepkisi, endüstriyel uygulamalarda, özellikle zorlu ve değişken koşullarda yüksek performans gereksinimlerini karşılamak için uygunluğunu desteklemektedir.

Çizelge 6.3. HOA, FDA, SCA, DA, GWO ve SFOA için elde edilen zaman tepkisi metriklerinin sayısal değerleri

Algoritma	Aşım	Yükselme Zamanı	Yerleşme Zamanı	Tepe Zamanı
HOA	0	0	0.08922	0
FDA	0.96425	0	0.1397	0.24728
SCA	0	0	0.11321	0
DA	0	0	0.13994	0
GWO	0.039555	0	0.082414	0.14557
SFOA	0.0056227	0	0.8269	0.13749

6.5. Frekans Yanıtı Analizi

Bu bölümde, HOA ve karşılaştırmalı algoritmalar (DA, FDA, GWO, SCA ve SFOA) kullanılarak optimize edilen PID denetleyicilerinin frekans tepkisi analiz edilmiştir. Frekans tepkisi analizi, kontrol sistemlerinin değişen koşullar altında kararlılığını, sağlamlılığını ve dinamik performansını değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. Şekil 6.4, karşılaştırılan tüm algoritmalar için Bode grafiklerini sunarak, her bir denetleyicinin faz ve kazanç yanıtlarını görsel olarak göstermektedir. Bu grafikler, her algoritmanın yüksek frekanslardaki kararlılığını, düşük frekanslardaki hassasiyetini ve genel performansını değerlendirmek için kullanılmıştır.



Şekil 6.4. HOA, FDA, SCA, DA, GWO ve SFOA algoritmaları ile elde edilen karşılaştırmalı Bode grafikleri

Şekilden de görülebileceği gibi, HOA, faz bozulmalarına karşı üstün kararlılık ve sağlamlığı gösteren 87.163 derecelik en yüksek faz marjına ulaşmıştır. Bu, HOA'nın yüksek frekanslarda bile stabil bir kontrol sağlama yeteneğini vurgular ve PID denetleyicisinin dinamik koşullar altında güvenilir performans gösterdiğini ortaya koyar. Diğer algoritmalar, HOA'nın bu mükemmel faz marjına ulaşamamakla birlikte, yine de belirli düzeyde kararlılık sağlamakta, ancak HOA'nın sağladığı kadar sağlam bir performans gösterememektedirler. HOA'nın yüksek faz marjı, bu algoritmalarla karşılaştırıldığında daha güçlü bir kararlılık ve sağlamlık sunarak, değişen koşullarda dahi kontrol sisteminin güvenilirliğini artırır.

HOA ayrıca, değişen kazanç koşulları altında kararlılığını koruyabilme yeteneğini vurgulayan 26.11 dB'lik bir kazanç marjı da göstermiştir. SFOA ve GWO da rekabetçi kazanç marjları sergilemiştir, ancak HOA'dan biraz daha düşüktür. Bu, HOA'nın kazanç değişimlerine karşı daha sağlam bir tepki verdiğini ve sistemin performansını daha geniş bir koşul yelpazesinde sürdürebildiğini gösterir. Frekans tepkisi analizi, HOA'nın faz ve kazanç marjları açısından diğer algoritmalarından daha iyi performans gösterdiğini açıkça göstermektedir. HOA, en yüksek faz ve kazanç marjı değerleriyle, sistemin kararlılığını

ve sağlamlığını daha geniş bir koşul aralığında koruma yeteneğini sergilemiştir. Diğer algoritmalar, HOA'nın gerisinde kalarak daha düşük faz ve kazanç marjlarıyla sınırlı performans sergilemiştir. Bu, HOA'nın değişken koşullar altında daha üstün ve güvenilir bir performans sunduğunu kanıtlar niteliktedir.

Bu sonuçlar, DFIG sistemlerindeki dinamik ve belirsiz koşulları idare edebilen sağlam bir PID kontrolör tasarımının göstergesidir. Frekans tepkisi analizi, özellikle kararlılık ve sağlamlık açısından PID kontrolörlerini optimize etmede HOA'nın üstünlüğünü pekiştirmektedir. HOA'nın faz ve kazanç marjlarındaki yüksek değerler, değişken çalışma koşullarında bile yüksek performans ve güvenilirlik sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu performans, HOA'yı endüstriyel uygulamalarda DFIG sistemlerinin zorlu dinamiklerini yönetmek için en güvenilir seçim haline getirir.

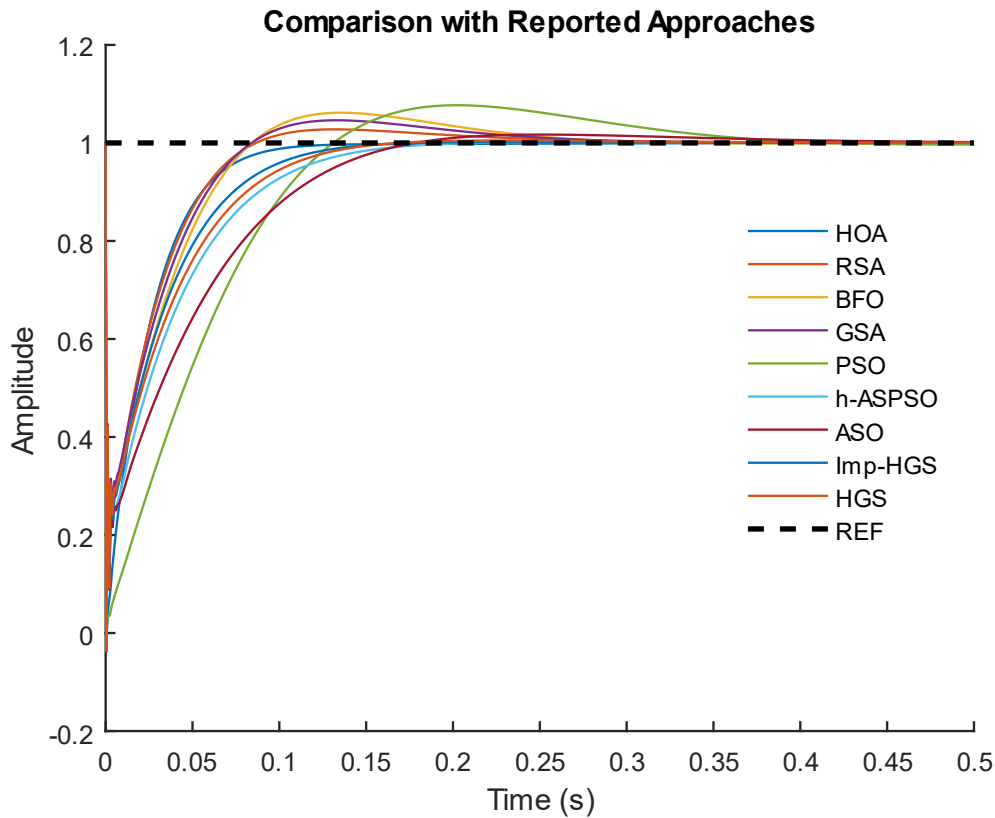
6.6. Mevcut Literatürle Karşılaştırma

HOA'nın performansını daha ileri düzeyde değerlendirmek için mevcut literatürden bildirilen optimizasyon yöntemleriyle kapsamlı bir karşılaştırma yapıldı. Bu yöntemler arasında sürüngen arama algoritması (RSA) (İzci et al., 2022), bakteriyel yiyecek arama optimizasyonu (BFO) (Bharti et al., 2021), yerçekimsel arama algoritması (GSA) (Bharti et al., 2021), parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) (Bharti et al., 2021), atom arama optimizasyonu (ASO) ve hibrit atom arama parçacık sürüsü optimizasyonu (h-ASPSO) (İzci et al., 2023), açlık oyunları arama (HGS) algoritması ve geliştirilmiş versiyonu (Imp-HGS) (Ekinci et al., 2024) yer almaktadır. Çizelge 6.4, bildirilen yaklaşımlarla elde edilen optimize edilmiş PID parametrelerini (K_p , K_i , K_d) vurgulamaktadır.

Çizelge 6.4. RSA, BFO, GSA, PSO, h-ASO, ASO, Imp-HGS ve HGS algoritmaları ile optimize edilen standart PID kontrol cihazının parametreleri

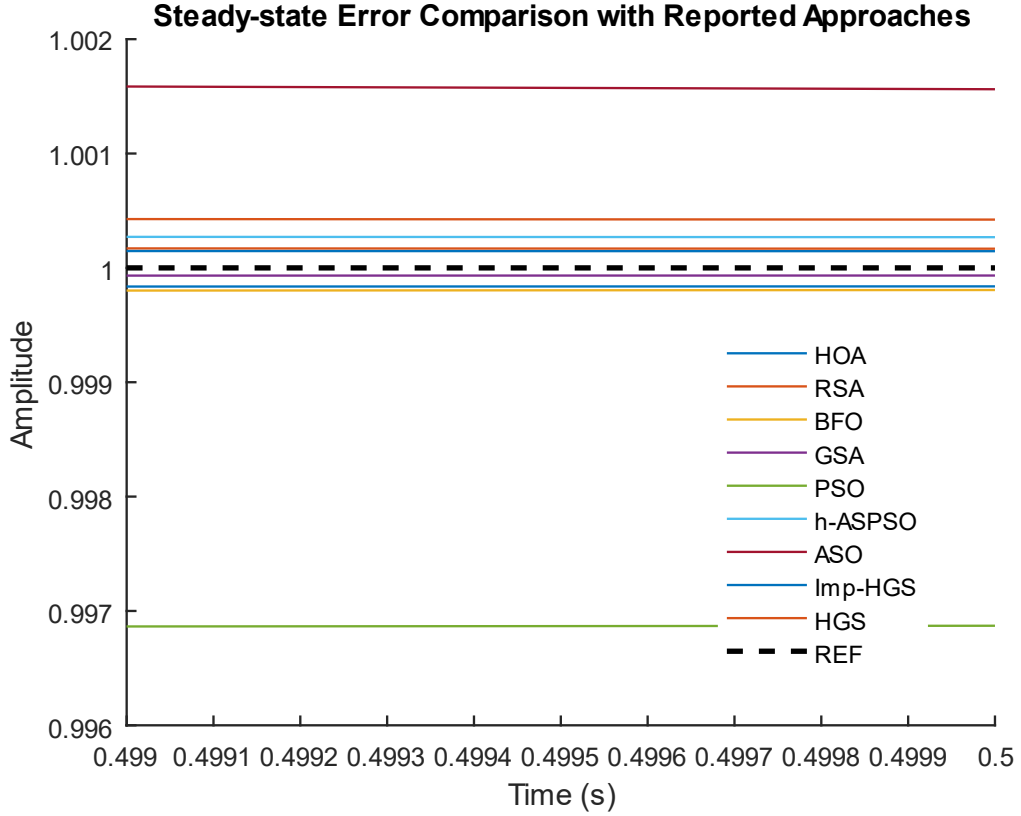
Algoritma (%)	K_p	K_i	K_d
RSA	18.7151	227.6068	0.08735
BFO	14.9400	240.4000	0.1189
GSA	16.9400	242.4000	0.1191
PSO	6.2392	111.4924	0.0099
h-ASPSO	13.6145	124.9119	0.08982
ASO	10.0207	109.2884	0.1122
Imp-HGS	16.4211	150.5726	0.09552
HGS	14.9782	142.4485	0.1183

Şekil 6.5, HOA'nın adım tepkilerini diğer algoritmalarla görsel olarak karşılaştırır. HOA'nın tepkisi, tüm rakiplerini geride bırakarak minimum aşma, hızlı stabilizasyon ve düzgün dinamiklerle öne çıkar. Diğer yandan, RSA, BFO ve PSO gibi yöntemlerin adım tepkileri, belirgin aşmalar ve daha uzun stabilizasyon süreleri sergileyerek HOA'nın üstün performansını daha da vurgular. Bu sonuçlar, HOA'nın dinamik yanıtlarındaki istikrarını ve hızını göstererek, endüstriyel uygulamalarda daha güvenilir ve etkin bir çözüm sunduğunu kanıtlar.



Şekil 6.5. HOA, RSA, BFO, GSA, PSO, h-ASPSO, ASO, Imp-HGS ve HGS algoritmaları ile elde edilen karşılaştırmalı adım tepkileri

Şekil 6.6, algoritmalar genelindeki sabit durum hatalarını vurgular. HOA, diğer algoritmalara kıyasla üstün kontrol hassasiyetini koruyarak ihmal edilebilir bir sabit durum hatası elde eder. Buna karşılık, BFO, GSA ve PSO gibi algoritmalar, daha az hassas kontrol sağladığını gösteren önemli ölçüde daha yüksek sabit durum hataları sergiler. Bu sonuçlar, HOA'nın hem parametre optimizasyonu hem de zaman tepkisi performansında diğer bildirilen optimizasyon yöntemlerini geride bırakarak daha güvenilir ve hassas bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 6.6. HOA, RSA, BFO, GSA, PSO, h-ASO, ASO, Imp-HGS ve HGS uygulamalarından elde edilen karşılaştırmalı sabit durum hata değerleri

Şekil 6.5 ve 6.6, HOA'nın üstünlüğünü kanıtlayarak sağlam tasarımını, üstün dinamik performansını ve sabit durum kontrolündeki hassasiyetini sergiler. HOA, minimum aşma, hızlı stabilizasyon ve düzgün dinamik yanıtlar ile diğer algoritmaları geride bırakırken, sabit durum hatalarını da en aza indirmeyi başarmaktadır. Bu sonuçlar, HOA'nın yüksek performanslı uygulamalarda PID kontrolör tasarımı için gelişmiş bir optimizasyon tekniği olarak uygunluğunu teyit etmektedir.

Çizelge 6.5, her algoritmanın zaman tepkisi özelliklerini, aşma, yükselme süresi, yerleşme süresi ve tepe süresi dahil olmak üzere sunmaktadır. Bu karşılaştırmalı veri, her bir algoritmanın dinamik performansını ve kontrol sisteminin zamanla nasıl tepki verdiğini değerlendirmek için kullanılmıştır. HOA, bu metriklerde genellikle en iyi performansı sergilemiş olup, sistemin daha hızlı stabilizasyon, düşük aşma ve daha kısa yerleşme süresi sağladığını göstermektedir. Diğer algoritmalar ise, bu ölçütlerde biraz daha düşük performans sergileyerek HOA'nın üstünlüğünü pekiştirmektedir.

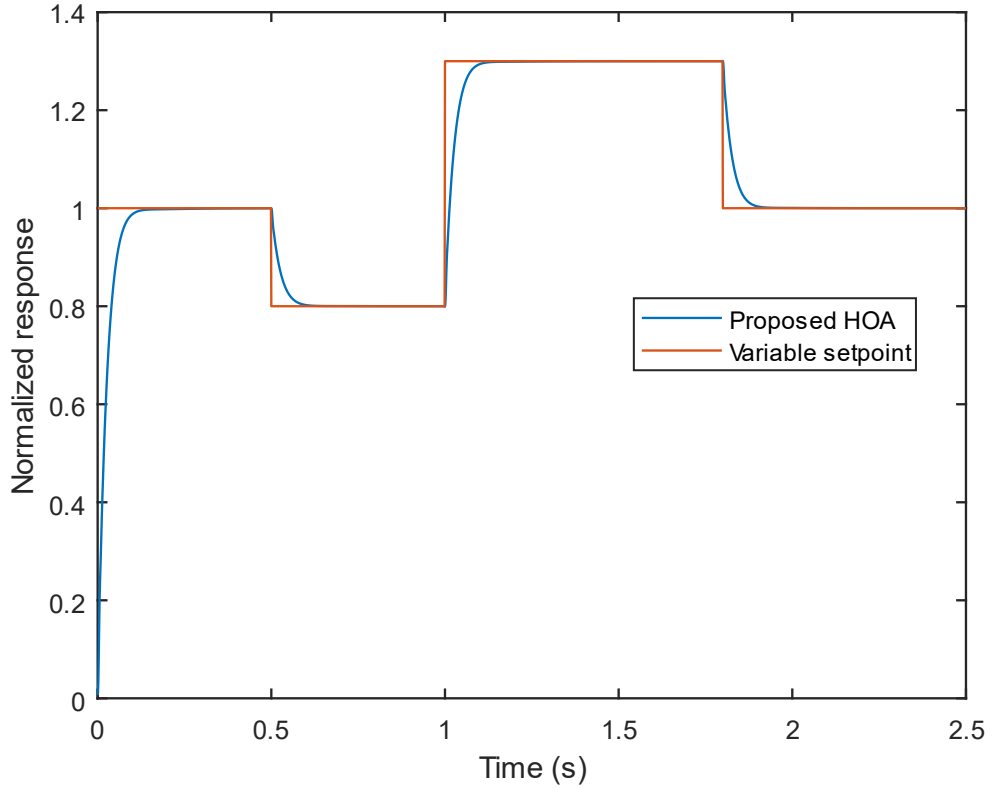
Çizelge 6.5. HOA, RSA, BFO, GSA, PSO, h-ASO, ASO, Imp-HGS ve HGS algoritmaları ile elde edilen zaman tepkisi metriklerinin sayısal değerleri

Algoritma	Aşım	Yükselme Zamanı	Yerleşme Zamanı	Tepe Zamanı
HOA	0	0	0.08922	0
RSA	2.7713	0	0.17919	0.13171
BFO	6.1632	0	0.2309	0.13554
GSA	4.6206	0	0.216	0.13296
PSO	7.6927	0	0.33503	0.20242
h-ASPO	0.028525	0	0.1429	0.21839
ASO	1.7031	0	0.15389	0.25134
Imp-HGS	0.14572	0	0.11912	0.21656
HGS	0.37179	0	0.12725	0.19273

HOA, sıfır aşım, en hızlı yerleşme süresi ve tepe süresi olmamasıyla diğer algoritmalarından belirgin şekilde üstün performans sergiledi. HOA, sistemin kararlılığını garanti ederken herhangi bir aşırı çıkış olmadan sıfır aşım elde etti. Ayrıca, 0,08922 saniyelik en kısa yerleşme süresiyle sistemi en hızlı şekilde dengeye getirdi. HOA, sabit durum hatasını da en aza indirerek, zaman içinde hassas kontrol sağlama konusunda etkinliğini kanıtladı.

6.7. Referans Sinyal İzleme Performansı

HOA tarafından optimize edilen PID kontrol cihazının giriş sinyali izleme performansı, değişen referans sinyallerini doğru bir şekilde takip etme kabiliyetini belirlemek amacıyla değerlendirildi. Şekil 6.7, dinamik tepkiyi test etmek için kullanılan değişken bir giriş sinyali altında HOA'nın izleme performansını göstermektedir. Bu görsel, HOA'nın değişen koşullara ve referans sinyallerine karşı ne kadar hassas ve hızlı tepki verdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 6.7. Değişken giriş koşulları için HOA tabanlı yaklaşımın performans değerlendirilmesi

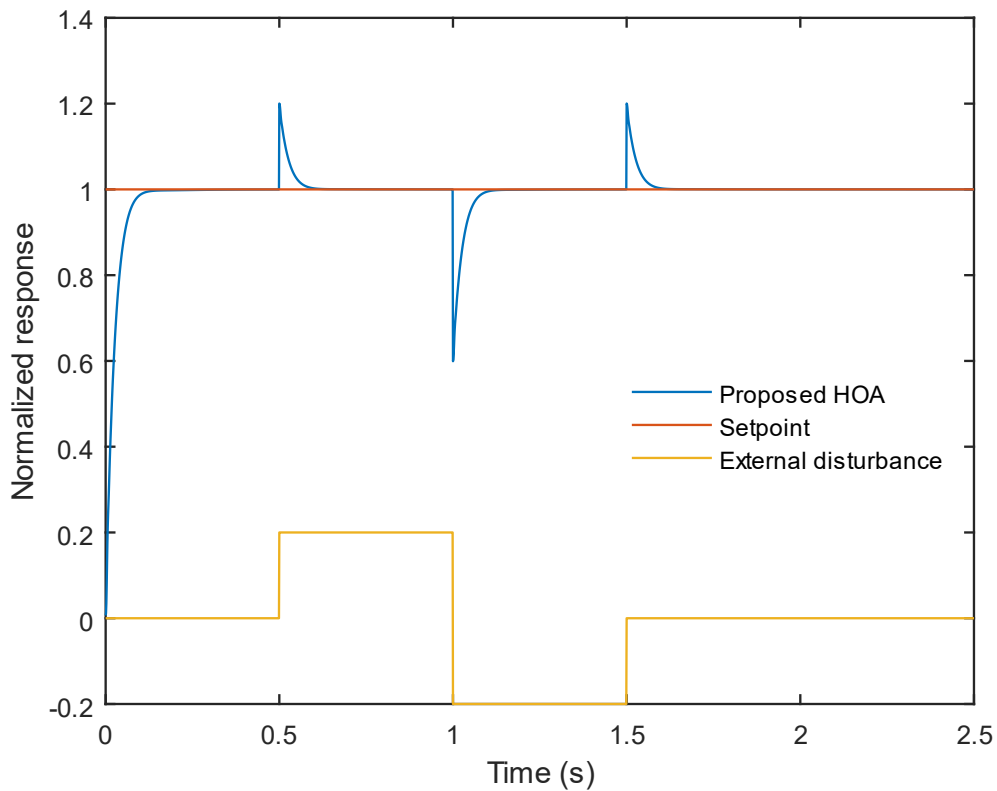
HOA, çıkışın hem sabit durum hem de dinamik koşullar altında giriş sinyallerini oldukça yakın bir şekilde takip etmesiyle olağanüstü izleme doğruluğu sergilemiştir. Bu, HOA tarafından optimize edilen PID parametreleri sayesinde elde edilen hassas kontrolü vurgulamaktadır. HOA'nın, değişken giriş sinyallerine karşı gösterdiği yüksek doğruluk, kontrol sisteminin kararlılığını ve güvenilirliğini artırmaktadır. Girişteki ani değişiklikler sırasında (adım tepkisi), HOA tarafından optimize edilen PID kontrolörünün sistemin minimum aşma ve hızlı bir stabilizasyon süresi gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu özellikler, özellikle rüzgar enerjisi sistemleri gibi dinamik ve değişken çevresel koşullara sahip uygulamalarda, ani giriş değişikliklerine karşı sistemin güvenilirliğini ve stabilitesini garanti eder. HOA'nın bu yüksek performansı, hızlı ve etkili yanıt verebilme yeteneğiyle birlikte, dinamik ortamlarda güvenilir kontrol sağlayan bir çözüm olarak öne çıkar. HOA, zorlu dinamik senaryolarda bile kararlılığını ve doğruluğunu koruyarak tutarlı bir performans sergilemiştir. Bu sağlamlık, HOA tarafından optimize edilen kontrol cihazlarının karmaşık endüstriyel sistemler için yüksek uyarlanabilirliğini ve güvenilirliğini vurgular. HOA'nın bu güçlü performansı, değişken koşullarda bile

sistemin doğru ve istikrarlı bir şekilde çalışmasını sağlayarak, endüstriyel uygulamalarda kesintisiz ve verimli bir operasyon garantisi sunar.

HOA'nın gösterdiği üstün izleme performansı, özellikle dalgalanan girdiler üzerinde hassas kontrolün kritik olduğu DFIG gibi sistemler için endüstriyel uygulamalardaki potansiyelini yansıtır. Bu performans, HOA'nın PID kontrolör tasarımı için sağlam bir optimizasyon yaklaşımı olarak uygunluğunu daha da doğrular. HOA, sistemin dinamik yanıtını iyileştirerek, endüstriyel sistemlerde yüksek doğruluk ve güvenilirlik sağlayan optimize edilmiş PID kontrolörler için güçlü bir çözüm sunar.

6.8. Bozucu Sinyalleri Bastırma Yeteneği

HOA ile optimize edilen PID kontrolörünün harici bozulmalara karşı dayanıklılığı, dinamik çalışma koşulları altında test edilmiştir. Bu test, DFIG sistemleri gibi gerçek dünya endüstriyel uygulamalarda, harici bozulmaların kaçınılmaz olduğu senaryolarda kontrolörün sağlamlık ve güvenilirliğini değerlendirmek için kritik bir öneme sahiptir. Şekil 6.8, HOA tabanlı kontrolörün, sisteme uygulanan bozulmaları bastırma performansını açıkça göstermektedir.



Şekil 6.8. Harici rahatsızlık reddetme yeteneği için HOA tabanlı yaklaşımın performansı

HOA ile optimize edilen PID kontrolörleri, harici bozulmalara karşı mükemmel bir dayanıklılık sergilemiştir. Bozulmalar uygulandığında, sistem bu bozulmaların etkisini hızla hafifleterek çıktıyı minimum sapma ile istenen ayar noktasına geri döndürmeyi başarmıştır. Bu, kontrolörün dış etkenlere karşı ne kadar etkili ve sağlam olduğunu göstermektedir. Sistem, bozulma reddi sırasında ihmal edilebilir bir aşırı atış göstererek, istikrarsızlık olmadan kararlı bir çalışma sağlamıştır. Ayrıca, çökme süresi oldukça kısa olmuş ve bu, kontrolörün harici bozulmalara karşı etkili bir şekilde çalıştığını ve bu tür bozulmaları hızlı bir şekilde telafi edebildiğini yansıtmaktadır. Bu performans, HOA tabanlı PID kontrolörünün güvenilirliğini ve sağlamlığını bir kez daha ortaya koymaktadır. HOA, dinamik değişimlere mükemmel uyum sağlayarak, farklı bozulma büyüklükleri ve süreleri boyunca istikrarlı bir performans sergilemiştir. Bu, kontrol sisteminin dışsal etkilere karşı dayanıklılığını ve adaptasyon yeteneğini vurgulayan önemli bir özelliktir. Bu özellik, endüstriyel uygulamalarda kesintisiz ve güvenilir çalışmayı sürdürmek için büyük önem taşır. Harici bozulma reddi analizi, HOA tarafından optimize edilen PID kontrolörünün, zorlu ve değişken koşullarda bile istikrarlı performans sergileyerek, sistemin güvenilirliğini ve sağlamlığını pekiştirdiğini ortaya koymaktadır. Değişen bozulma koşulları altındaki üstün performansı, harici bozulmaların sürekli bir zorluk oluşturduğu zorlu endüstriyel ortamlar için HOA'nın ideal bir çözüm sunduğunu gösterir. Bu bulgular, HOA'nın PID kontrol tasarımı için güçlü bir optimizasyon tekniği olarak etkinliğini ve güvenilirliğini pekiştirir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölümde, önerilen metodolojinin ana bulguları özetlenmiş, elde edilen sonuçlar tartışılmış ve gelecekteki araştırmalar için potansiyel yollar önerilmiştir.

7.1 Sonuçlar

Bu çalışma, HOA algoritmasını geliştirilmiş bir ZLG hedef fonksiyonuyla birleştirilerek, DFIG sistemleri için PID denetleyici parametrelerinin optimize edilmesine yönelik yenilikçi bir yaklaşım sunmuştur. HOA, ZLG hedef fonksiyonuyla desteklendiğinde, daha hızlı ve doğru yakınsama, düşük aşma, hızlı yerleşme süresi ve hassas kontrol gibi önemli performans iyileştirmeleri sağlamaktadır. Bu kombinasyon, PID denetleyicilerinin kararlılık, sağlamlık ve verimlilik açısından gelişmiş bir optimize edilme sürecini sunarak, endüstriyel uygulamalarda DFIG sistemlerinin dinamik ve değişken koşulları altında güvenilir kontrol sağlayabilmektedir.

Önerilen yöntem, kontrol sistemlerindeki kritik zorlukları etkili bir şekilde ele alarak, aşımaları en aza indirme, yerleşme süresini azaltma, sabit durum hassasiyetini koruma ve dış bozulmalara karşı sağlamlığı artırma konularında önemli iyileştirmeler sunmaktadır. HOA'nın kullanımı, PID denetleyicilerinin dinamik ve belirsiz koşullar altında yüksek performansla çalışmasını sağlar. Bu, özellikle rüzgar enerjisi gibi uygulamalarda kritik olan güvenilirliği ve kararlılığı sağlamada önemli bir katkı sunmaktadır. Bu yöntem, endüstriyel sistemlerdeki zorluklara karşı güçlü bir çözüm sunarak PID kontrolünün optimize edilmesinde önemli bir adım teşkil etmektedir. Mevcut literatürden beş son teknoloji algoritma ve kıyaslama ölçütlerine karşı yapılan karşılaştırmalı değerlendirmeler, HOA'nın optimum geçici ve sabit durum performans ölçütlerine ulaşmada üstünlüğünü açıkça ortaya koymuştur. HOA, diğer algoritmalarla kıyaslandığında daha düşük aşım, hızlı yerleşme süresi, sıfır tepe zamanı ve sabit durum hatalarını minimize etme gibi önemli performans kriterlerinde daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Bu üstün performans, HOA'nın PID kontrolörlerinin dinamik ve belirsiz çalışma koşulları altında güvenilir ve hassas sonuçlar sağlama yeteneğini vurgulamaktadır. HOA tabanlı PID denetleyicisi, sıfır aşım, hızlı stabilizasyon ve mükemmel bozulma reddi gibi

dikkate değer yetenekler sergileyerek sistem performansını önemli ölçüde iyileştirmiştir. Bu yöntem, değişen çalışma koşullarına ve farklı giriş profillerine yüksek uyum sağlayarak, dinamik endüstriyel ortamlarda etkili bir şekilde uygulanabilir. Bu özellikler, HOA'nın endüstriyel uygulamalarda güvenilir ve esnek bir kontrol çözümü olarak potansiyelini güçlü bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu çalışma, PID denetleyici optimizasyonunda son teknolojiyi ilerleterek yenilenebilir enerji sistemleri ve diğer endüstrilerdeki sağlam kontrol stratejilerine önemli katkılarda bulunmaktadır. Önerilen HOA tabanlı yöntem, endüstriyel uygulamalarda güvenilirliği artırırken, PID kontrolörlerinin performansını iyileştirerek sistem verimliliğini ve dayanıklılığını önemli ölçüde yükseltmektedir. Bu, gelecekteki araştırmalar için sağlam bir temel oluşturmakta ve yenilikçi optimizasyon tekniklerinin uygulanabilirliğini vurgulamaktadır.

7.2 Öneriler

Bu çalışmanın umut vadeden sonuçları doğrultusunda, gelecekteki araştırmalar için bir dizi potansiyel yön belirlenmiştir.

İlk olarak, HOA'nın yenilenebilir enerji alanındaki uygulamaları, maliyet etkinliği, çevresel etkilerin azaltılması ve hassas kontrol gereksinimlerinin dengelenmesi açısından kapsamlı bir şekilde değerlendirilebilir. İkinci araştırma yönü, doğrusal olmayan ve zamanla değişen sistemlerde HOA'nın performansını incelemeye odaklanmaktadır. Bu doğrultuda, HOA'nın kontrolör optimizasyonundaki etkinliği, dinamik yapıya sahip ve belirsizlik içeren sistemlerde test edilebilir. Böylece, değişken çalışma koşulları altında sistem kararlılığını ve kontrol doğruluğunu artırma potansiyeli ortaya konulabilir. Üçüncü araştırma alanı, HOA'nın gerçek zamanlı performansını ve uyarlanabilirliğini artırmak için gelişmiş kontrol stratejileriyle entegrasyonunu ele almaktadır. Özellikle, uyarlanabilir kontrol veya model tahminli kontrol yaklaşımlarıyla birleştirilerek, değişken ve belirsiz çalışma koşullarına daha hızlı ve hassas tepkiler verebilecek bir sistem tasarlanabilir. Bu tür bir entegrasyon, dinamik olarak değişen endüstriyel ortamlar ve yenilenebilir enerji sistemleri gibi karmaşık uygulamalarda, sistemin sürekli olarak kendini optimize etmesini ve yüksek performansını korumasını sağlayabilir. HOA'nın büyük ölçekli sistemler için ölçeklenebilirliğini ve hesaplama verimliliğini inceleyerek, çok alanlı güç şebekeleri veya hibrit yenilenebilir enerji sistemleri gibi karmaşık yapılar üzerindeki etkinliğini değerlendirebilir. Buna ek olarak, gürültülü ölçüm koşulları ve model belirsizlikleri altında HOA ile optimize edilen

kontrolörlerin dayanıklılığı test edilerek, pratik uygulamalarda sağlıkları doğrulanabilir. Son olarak, HOA'nın robotik, proses kontrolü ve otonom sistemler gibi farklı alanlardaki optimizasyon problemlerine uygulanabilirliği araştırılarak, bu yöntemin çok yönlülüğü ve geniş kullanım potansiyeli ortaya konulabilir.

KAYNAKLAR

- Abualigah, L., & Diabat, A. (2021). Advances in sine cosine algorithm: a comprehensive survey. *Artificial Intelligence Review*, 54(4), 2567-2608. <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09909-3>
- Alagöz, İ. (2021). Rüzgâr elektrik santrallerinin kontrolü için kullanılabilir olacak doğrulamalı kod kütüphanesi geliştirilmesi. *El-Cezeri*, 8(2), 841-858.
- Ali, Y. A., & Ouassaid, M. (2024, June). Towards alleviating operating conditions of MPC controlled VSC for DFIG-Based Wind Turbines using PSO Algorithm. In *2024 6th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)* (pp. 487-493). IEEE.
- Anju, M., Shihabudheen, K. V., & Mija, S. J. (2024). Enhancing grid stability: a hybrid control strategy for DFIG-based wind turbines to mitigate sub-synchronous oscillations. *Electrical Engineering*, 1-32. <https://doi.org/10.1007/s00202-024-02387-8>
- Apaydın, M., Üstin, A. K., Kurban, M., & Başaran Filik, Ü. (2009). Rüzgar Enerjinde Kullanılan Jenaratörlerin Karşılaştırmalı Analizi. *YEKSEM 2009 5. Yenilebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 103-107.
- Arifin, M. S., Uddin, M. N., & Wang, W. (2023). Neuro-fuzzy adaptive direct torque and flux control of a grid-connected DFIG-WECS with improved dynamic performance. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 59(6), 7692-7700. <https://doi.org/10.1109/TIA.2023.3302844>
- Avan, A. B. (2022). Esnek hesaplama tabanlı da motorun hız kontrolü.
- Aydın, E., Polat, A., & Ergene, L. T. (2016). Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan ÇBAG Vektör Kontrolü ve Gerilim Düşümü Durumunun İncelenmesi Vector Control of DFIG in Wind Power Applications and Analysis for Voltage Drop Condition.
- Bekakra, Y., & Attous, D. B. (2014). Optimal tuning of PI controller using PSO optimization for indirect power control for DFIG based wind turbine with MPPT. *International journal of system assurance engineering and management*, 5, 219-229. <https://doi.org/10.1007/s13198-013-0150-0>
- Bharti, O. P., Sarita, K., Vardhan, A. S. S., Vardhan, A. S. S., & Saket, R. K. (2021). Controller design for DFIG-based WT using gravitational search algorithm for wind power generation. *IET Renewable Power Generation*, 15(9), 1956-1967. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12118>
- Can, Ö., Andiç, C., Ekinci, S., & Izci, D. (2023). Enhancing transient response performance of automatic voltage regulator system by using a novel control design

strategy. *Electrical engineering*, 105(4), 1993-2005.
<https://doi.org/10.1007/s00202-023-01777-8>

- Civelek, Z. (2017). Rüzgâr türbinlerinde bireysel hatve açısının PID, bulanık PID ve genetik bulanık denetleyiciler ile kontrol edilerek elektriksel güç çıkışı ve momentin iyileştirilmesi.
- Çalışır, A., Yılmaz, A., & Bayrak, G. (2018). DFIG Tipli Rüzgâr Türbini Bağlı Mikroşebekelerde Güç Akışı ve Kısa Devre Arıza Analizinin DİgSILENT PowerFactory Programı ile Gerçekleştirilmesi Power Flow and Short Circuit Fault Analysis of DFIG-Typed Wind Turbines Connected Microgrid with DİgSILENT PowerFactory Program.
- Demirbaş, Ş., & Bayhan, S. (2010). Şebeke Bağlantısız Çift Beslemeli Asenkron Generatörün Doğrudan Gerilim Denetimi.
- Doğan, Z., Kurt, M. Ş., & Emeksiz, C. (2015). Çift Beslemeli Asenkron Generatörlü Rüzgar Türbinlerinde Arıza Teşhisi.
- Eker, E., Ekinci, S., & İzci, D. (2023). Optimal PID controller design for liquid level tank via modified artificial hummingbird algorithm. *Computer Science*, (IDAP-2023), 37-43. <https://doi.org/10.53070/bbd.1346269>
- Ekinci, S., İzci, D., & Yılmaz, M. (2023). Efficient speed control for DC motors using novel gazelle simplex optimizer. *Ieee Access*, 11, 105830-105842. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3319596>
- Ekinci, S., İzci, D., Eker, E., Abualigah, L., Thanh, C. L., & Khatir, S. (2024). Hunger games pattern search with elite opposite-based solution for solving complex engineering design problems. *Evolving Systems*, 15(3), 939-964. <https://doi.org/10.1007/s12530-023-09526-9>
- Ekinci, S., Rizk-Allah, R. M., İzci, D., & Çelik, E. (2024). Multi-strategy improved runge kutta optimizer and its promise to estimate the model parameters of solar photovoltaic modules. *Heliyon*, 10(20). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39301>
- Izci, D., Ekinci, S., & Hussien, A. G. (2023). Effective PID controller design using a novel hybrid algorithm for high order systems. *PLoS One*, 18(5), e0286060. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286060>
- Izci, D., Ekinci, S., Budak, C., & Gider, V. (2022, October). PID controller design for DFIG-based wind turbine via reptile search algorithm. In *2022 Global Energy Conference (GEC)* (pp. 154-158). IEEE.
- Jabari, M., İzci, D., Ekinci, S., Bajaj, M., Blazek, V., & Prokop, L. (2024). A novel artificial intelligence based multistage controller for load frequency control in power systems. *Scientific Reports*, 14(1), 29571. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81382-2>

- Kaloi, G. S., Wang, J., & Baloch, M. H. (2016). Active and reactive power control of the doubly fed induction generator based on wind energy conversion system. *Energy Reports*, 2, 194-200. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2016.08.001>
- Kumar, B., Sandhu, K. S., & Sharma, R. (2022). Comparative Analysis of Control Schemes for DFIG-Based Wind Energy System. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, 103(2), 649-668. <https://doi.org/10.1007/s40031-021-00660-z>
- Kumarb, R. K., & Choudhary, J. (2024). Design of a novel control scheme for the operation of the doubly fed induction generator. *Archives of Electrical Engineering*, 373-392. <https://doi.org/10.24425/aee.2024.149922>
- Loulijat, A., Chojaa, H., El Marghichi, M., Ettalabi, N., Hilali, A., Barnawi, A. B., ... & Mossa, M. A. (2023). Application and comparison of a modified protection scheme utilizing a proportional–integral controller with a conventional design to enhance doubly fed induction generator wind farm operations during a balanced voltage dip. *Processes*, 11(10), 2834. <https://doi.org/10.3390/pr11102834>
- Loulijat, A., Makhad, M., Hilali, A., Chojaa, H., El Marghichi, M., Hatatah, M., & Alghamdi, T. A. (2024). Enhancing fault ride-through capacity of DFIG-Based WPs by adaptive backstepping command using parametric estimation in non-linear forward power controller design. *IEEE Access*, 12, 58675-58689. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3381613>
- Mazouz, F., Belkacem, S., Harbouche, Y., Abdessamed, R., & Ouchen, S. (2017, May). Active and reactive power control of a DFIG for variable speed wind energy conversion. In *2017 6th International Conference on Systems and Control (ICSC)* (pp. 27-32). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICoSC.2017.7958642>
- Milles, A., Belhait, A., Ghoudelbourk, S., Aggoune, M. S., Boukhalfa, G., Bensedira, N., & Salem, H. (2024, May). Optimizing PI Regulators for DFIGs in Wind Energy Using Artificial Intelligence. In *2024 2nd International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control (ICEEAC)* (pp. 1-6). IEEE.
- Mirjalili, S. (2016). Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems. *Neural computing and applications*, 27, 1053-1073. <https://doi.org/10.1007/s00521-015-1920-1>
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, 69, 46-61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>
- Nasef, S. A., Hassan, A. A., Elsayed, H. T., Zahran, M. B., El-Shaer, M. K., & Abdelaziz, A. Y. (2022). Optimal tuning of a new multi-input multi-output fuzzy controller for doubly fed induction generator-based wind energy conversion system. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(3), 3001-3021.

- Oladejo, S. O., Ekwe, S. O., & Mirjalili, S. (2024). The Hiking Optimization Algorithm: A novel human-based metaheuristic approach. *Knowledge-Based Systems*, 296, 111880. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2024.111880>
- Özsoy, E. E. (2014). Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinde Kullanıma Yönelik Dayanıklı Çift Beslemeli Asenkron Generatör Kontrol Yöntemi Tasarımı Ve Uygulaması.
- Prakash, S., & Radheswari, S. (2023, December). Improved DFIG-Based Power Quality Controller Based on Machine Learning Cascaded Neural Networks. In *2023 International Conference on Energy, Materials and Communication Engineering (ICEMCE)* (pp. 1-6). IEEE.
- Sabo, A., Ebuka Odoh, T., Veerasamy, V., & Abdul Wahab, N. I. (2024). Modified multimachine power system design with DFIG-WECS and damping controller. *Energies*, 17(8), 1841. <https://doi.org/10.3390/en17081841>
- Sahri, Y., Tamalouzt, S., Lalouni Belaid, S., Bacha, S., Ullah, N., Ahamdi, A. A. A., & Alzaed, A. N. (2021). Advanced fuzzy 12 DTC control of doubly fed induction generator for optimal power extraction in wind turbine system under random wind conditions. *Sustainability*, 13(21), 11593. <https://doi.org/10.3390/su132111593>
- Sougueh, I. M., & Görel, G. (2022). PI, PID ve GA-PID Kontrolör ile Rüzgâr Türbinin Kanat Hatve Açısı Kontrolü. *International Journal of Engineering Research and Development*, 14(2), 502-513.
- Taveiros, F. E. V., Barros, L. S., & Costa, F. B. (2015). Back-to-back converter state-feedback control of DFIG (doubly-fed induction generator)-based wind turbines. *Energy*, 89, 896-906. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.027>
- Veerendra, A. S., & Peddakapu, K. (2023). Enhancement of a grid-connected DFIG wind turbine system using fractional order PI controllers. *Renewable Energy Focus*, 47, 100506. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2023.100506>
- Yildiz, B. S., Pholdee, N., Mehta, P., Sait, S. M., Kumar, S., Bureerat, S., & Yildiz, A. R. (2023). A novel hybrid flow direction optimizer-dynamic oppositional based learning algorithm for solving complex constrained mechanical design problems. *Materials Testing*, 65(1), 134-143. <https://doi.org/10.1515/mt-2022-0183>
- Zhong, C., Li, G., Meng, Z., Li, H., Yildiz, A. R., & Mirjalili, S. (2025). Starfish optimization algorithm (SFOA): a bio-inspired metaheuristic algorithm for global optimization compared with 100 optimizers. *Neural Computing and Applications*, 37(5), 3641-3683.

EKLER

EK-1 BİLDİRİ: International Symposium on Innovative Approaches in Smart Technologies (ISAS 2025) Design of PI-PDN Controlled DFIG System via a New Objective Function and Starfish Optimizer