



Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını İçeren Çok Kaynaklı Tek Alanlı Modern Güç Sistemi için Yük Frekansı Kontrolünün İyileştirilmesi

Improving Load Frequency Control for Multi-Source Single Area Modern Power System Including Renewable Energy Sources

¹Yunus BALCI , ²Serhat DUMAN 

^{1,2}Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bandırma/Balıkesir, Türkiye

¹ybalci@bandirma.edu.tr, ²sduman@bandirma.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

ARTICLE INFO

Article history

Received : 9 March 2023
Accepted : 28 March 2023

Keywords:

Load Frequency Control,
Chameleon Swarm
Algorithm, Optimization

ABSTRACT

Recently, with the increasing energy demand and the inclusion of renewable energy sources (RES) in electrical power systems, the importance of frequency and voltage stability in interconnected power systems is increasing. In modern power systems, high quality, continuous and stable electrical energy transmission should be provided to the consumer. During sudden load changes in power systems, the mismatch between power generation and load demand causes undesirable oscillations in the frequency between generation zones. Load frequency control (LFC) is applied to minimize frequency oscillations in the system. Controllers used to suppress oscillations in the system must operate satisfactorily in line with the desired system criteria. In this context, PID and PID+DD controller structures were used. SMA, GTO and CSA algorithms presented in the literature were used in the optimization of the controller parameters. The LFC problem was investigated in a multi-source single-site test system including thermal, hydroelectric, gas, wind and diesel energy systems. Boiler dynamics structure is used to increase the nonlinearity of the test system. As a result of the optimization process, the success of the algorithms in optimizing the controller parameters was evaluated in itself and it was seen that the CSA algorithm was more successful than the other algorithms.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri

Gönderim : 9 Mart 2023
Kabul : 28 Mart 2023

Anahtar Kelimeler:

Yük Frekans Kontrolü,
Bukalemun, Sürü
Algoritması, Optimizasyon

ÖZET

Son zamanlarda, artan enerji talebi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) elektrik güç sistemlerinde yer almasıyla, enterkonnekte güç sistemlerinde frekans ve gerilim kararlılığının önemi artmaktadır. Modern güç sistemlerinde tüketiciye kaliteli, sürekli ve kararlı elektrik enerjisi iletimi sağlanmalıdır. Güç sistemlerindeki ani yük değişimlerinde güç üretimi ile yük talebi arasındaki uyumsuzluk, üretim bölgeleri arasındaki frekansta istenmeyen salınımlara neden olur. Sistemdeki frekans salınımlarını minimize etmek için yük frekans kontrolü (YFK) uygulanır. Sistemdeki salınımları bastırmak için kullanılan denetleyiciler, istenen sistem kriterleri doğrultusunda tatmin edici bir şekilde çalışmalıdır. Bu bağlamda PID ve PID+DD denetleyici yapılarından yararlanılmıştır. Denetleyici parametrelerinin optimizasyonunda literatürde sunulan GBO, BSA ve BKA algoritmaları kullanılmıştır. YFK problemi, termal, hidroelektrik, gaz, rüzgar ve dizel enerji sistemlerini içeren çok kaynaklı tek alanlı test sisteminde incelenmiştir. Test sisteminin doğrusalsızlığını artırmak için kazan dinamiği yapısı kullanılmıştır. Optimizasyon işlemi sonucunda algoritmaların denetleyici parametrelerini optimize etme başarısı kendi içinde değerlendirilmiş ve BSA algoritmasının diğer algoritmalara göre daha başarılı olduğu görülmüştür.

© 2023 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayımlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

1. GİRİŞ

Günümüzde enerji talepleri ve teknolojiadaki hızlı gelişmeler ile yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) kullanımı, gaz ve termal santraller gibi geleneksel elektrik üretim sistemlerine ek olarak giderek artmıştır. Modern elektrik güç sistemleri, geleneksel enerji üretim birimleriyle birlikte rüzgar, güneş, hidro, biyokütle, jeotermal, dalga ve gelgit enerjisi gibi YEK'lerin kullanılmasıyla daha karmaşık hale geldi. Ancak artan enerji taleplerinin karşılanmasında, farklı elektrik üretim birimlerinin bir arada kullanılması ve bunun sonucunda ortaya çıkan enerji üretimi ve tüketimi arasındaki dengesizlikler, enterkonnekte güç sisteminde frekans ve gerilim bozulmalarına neden olmaktadır.

Güç sistemlerindeki kararlılık problemleri olarak tanımlanan bu bozulmalar, son zamanlarda güç sistemleri araştırma grupları tarafından ele alınan ve çözülmesi gereken güncel araştırma konularından biri haline gelmiştir. Yük frekans kontrolü (YFK) veya otomatik üretim kontrolü (OÜK), farklı yapıya sahip elektrik üretim ünitelerinden oluşan modern elektrik güç sistemlerinin enterkonnekte sistemde birbirleriyle senkron olarak çalışmasını ve tüketicilere kaliteli bir enerji ulaşmasını sağlamayı amaçlar. Diğer bir ifadeyle YFK, güç sistemindeki sürekli dalgalanmaya rağmen üretim ve tüketici tarafındaki yük talebi arasındaki dengeyi sağlayarak, frekans ve bağlı güç akışlarındaki değişimleri belirlenen sınır değerler içinde tutmak olarak tanımlanabilir. Ayrıca YFK, modern elektrik güç sistemlerinin etkin kontrolünde veya işletilmesinde değişimlerin izlenmesi ve alan kontrol hatasının (AKH) en aza indirilmesi için en uygun denetleyici yapısının tasarlanmasını ve kullanılmasını zorunlu kılmaktadır [1-7].

Son zamanlarda, modern güç sistemlerinin en önemli kararlılık problemlerinden biri olan YFK problemi üzerinde çalışan güç sistemi araştırmacıları, kararlılık problemlerinin üstesinden gelebilmek için çeşitli denetleyici yapıları ve optimizasyon algoritmaları kullanarak sistem performansını artırmaya çalışmışlardır. Literatürdeki tüm çalışmalar, güç sistemlerinde çalışma koşulları değiştiğinde oluşan frekans ve bağlantı hattı gücündeki değişimleri veya salınımları sönmölemek için yapılmıştır. Bu bağlamda yapılan çalışmalarda iki ana kriter ortaya çıkmaktadır. Bunlar, denetleyici tasarımı ve denetleyici parametrelerini optimize etmek için kullanılan optimizasyon algoritmalarıdır. Optimizasyon algoritmaları, YFK problemi için performansı artırmada kullanılan en etkili sistem parametrelerinden biridir. Ayrıca problem için tasarlanan denetleyici yapılarının birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

Literatürün kapsamlı incelemesine göre, esneklikleri nedeniyle, YFK tasarımında sıklıkla geleneksel oransal-integral-türev (PID) ve oransal integral (PI) denetleyiciler kullanılmıştır [8]. PID denetleyicisinin parametrelerinin optimizasyonunda yerçekimsel arama algoritması (YAA) [9], geliştirilmiş stokastik fraktal arama (GSFA) [10], öğretim tabanlı öğrenme tabanlı optimizasyon (ÖTÖA) [11], emperyalist rekabetçi algoritma (ERA) [12], bakteriyel yiyecek arama algoritması (BYAA) [13], karınca kolonisi optimizasyonu (KKO) [14], genetik algoritma (GA) [15], çiçek tozlaşma algoritması (ÇTA) [16], bakteri yiyecek arama optimizasyonu (BYAO) [17], balina optimizasyon algoritması (BOA) [18] gibi çeşitli optimizasyon algoritmaları kullanıldı. Parametreleri optimize edilen PID denetleyicinin çeşitli güç sistemlerinde belirli çalışma koşullarında sistem performansını iyileştirmede birçok denetleyici yapısına göre daha başarılı olduğu literatürde belirtilmektedir. Ayrıca bir çalışmada I, PI, PID ve oransal-integral-türev-artı-ikinci-dereceden-türev (PID+DD) denetleyicileri ayrı ayrı ikincil denetleyiciler olarak ele alınır. Denetleyici parametreleri karınca aslan optimizasyonu (KAO) ile tasarlanmış ve PID + DD denetleyicinin daha kısa yerleşme süresi, aşma miktarları ve azaltılmış salınımlar açısından daha iyi performansını ortaya koymaktadır [19].

Bu çalışmada, klasik PID ve PID+DD denetleyici yapıları frekans ve şebeke güç değişimlerinde salınımları sönmölemek için tasarlanmıştır. Denetleyici yapıları, yenilenebilir enerji kaynakları içeren çok kaynaklı tek alanlı modern elektrik güç sisteminde test edilmiştir. Denetleyiciler, sistem çalışma koşulları değiştiğinde sistem performansını iyileştirmeyi başardı. Ancak kullanıcı deneyimine veya matematiksel yaklaşımlara dayalı olarak belirlenen denetleyici parametreleri, bazen denetleyicinin sistem performansını iyileştirmede yetersiz kalmasına neden olmuştur. Çalışmanın kalitesini ve denetleyicilerin performansını artırmak için literature güncel olarak sunulan balçık küf algoritması (BKA) [20], goril birlikleri optimizasyonu (GBO) [21] ve bukalemun sürü algoritması (BSA) [22] kullanılarak denetleyicilerin parametreleri ayarlanmıştır.

Çalışmanın başlıca katkıları şu şekilde sıralanabilir:

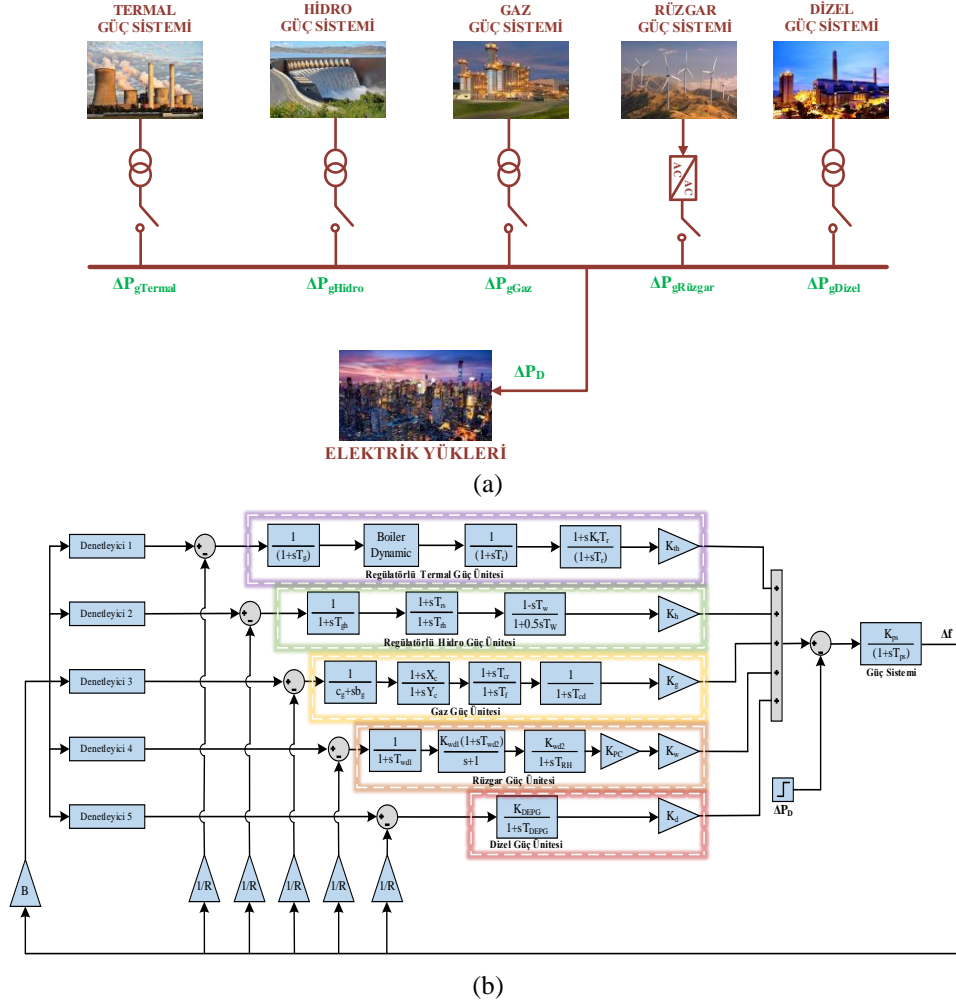
- Test sistemlerindeki YFK problemini çözmek için PID ve PID+DD denetleyici parametreleri optimize edilmiştir.
- YEK'lerin de dahil olduğu tek alanlı beş ayrı ünite oluşan farklı bir test sistemi sunulmuştur.
- Denetleyici parametrelerinin optimizasyonunda üç farklı güncel algoritma kullanılmıştır.
- BSA algoritmasının GBO ve BKA algoritmalarına göre üstünlüğü göstermek.

Giriş bölümünden sonra makalenin düzeni şu şekildedir:

- İkinci bölümde, yenilenebilir enerji kaynaklarını içeren modern elektrik güç sistemi modeli tanıtılır.
- Üçüncü bölümde, test sisteminde kullanılan denetleyici yapıları açıklanır.
- Dördüncü bölümde, denetleyici parametrelerinin optimizasyonunda en iyi algoritma BSA sunulmuştur.
- Beşinci bölümde, test sisteminden elde edilen simülasyon sonuçları verilmiş ve algoritmalar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.
- Altıncı bölümde, çalışmanın sonuçları yorumlanmıştır.

2. YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ İÇEREN ÇOK KAYNAKLI TEK BÖLGELİ GÜÇ SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

Bu bölümde, modern güç sistemlerindeki en önemli kararlılık problemlerinden biri olan YFK problemini incelemek için yenilenebilir enerji kaynaklarını içeren çok kaynaklı tek bölgeyi dinamik bir test sistemi tanımlanmıştır. YFK'ye uygun şekilde güç sisteminin transfer fonksiyonu modeli MATLAB/Simulink ortamında tasarlanmıştır. Şekil 1(a)'da test sisteminin genel şematik diyagramı ve Şekil 1(b)'de YFK tasarımı ve analizi için yaygın olarak kullanılan transfer fonksiyonu modeli verilmiştir. Sistem termal, hidroelektrik, gaz, rüzgar ve dizel olmak üzere 5 farklı üniteden oluşur.



Şekil 1. (a) Genel şematik diyagram ve (b) Test sisteminin transfer fonksiyonu modeli.

Güç sisteminde, denetleyici çıkışı ΔP_{ref} , yük bozulması ΔP_D kontrol alanının girişlerini, generatör frekans hatası Δf ve alan kontrol hatası (AKH) kontrol alanı çıkışlarını temsil eder. AKH'nın matematiksel ifadesi Denklem (1)'de gösterilmiştir.

$$AKH = -\Delta f \quad (1)$$

B burada frekans yanlılığı parametresini tanımlar. Yeniden ısıtma türbinli termal sistemde, hız regülatörünün matematiksel ifadesi Denklem (2)'de gösterilmektedir.

$$G_g(s) = \frac{\Delta P_g}{\Delta P_v} = \frac{1}{sT_g + 1} \quad (2)$$

Burada ΔP_v hız regülatörünün girişidir ve bu değer Denklem (3)'teki gibi hesaplanır. R, hız regülatöründe hız regülasyonu için kullanılan parametreyi tanımlar ve ΔP_{ref} üretilecek referans güç değeri için sisteme gönderilen komutu gösterir.

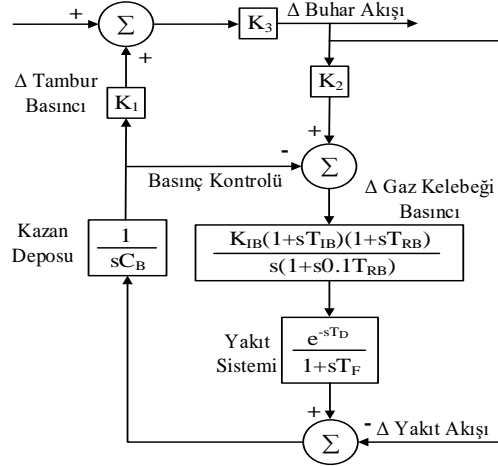
$$\Delta P_v = \Delta P_{ref} - \frac{1}{R} \Delta f \quad (3)$$

Generatör çifti ve sistemdeki yük K_{ps} kazanç ve T_{ps} zaman sabiti üzerinden modellenmiş ve her saha çıkışındaki frekans hatası matematiksel olarak Denklem (5)'teki gibi ifade edilmiştir.

$$G_p(s) = \frac{K_{ps}}{sT_{ps} + 1} \quad (4)$$

$$\Delta f(s) = G_p(s)[\Delta P_t(s) - \Delta P_D(s)] \quad (5)$$

Termal tesislerde, kazan buhar akışı, yakıt sistemini kontrol ederek tambur basıncı ayarlanarak ayarlanır. Buhar basıncındaki ve buhar akışının hızındaki değişiklik, türbin kontrol vanaları ve kazan kontrolü tarafından algılanır. Elde edilen veriler ışığında gerekli eylemler gerçekleştirilir. Kazan dinamiği yapısının blok diyagramı Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Kazan dinamiği genel yapısı.

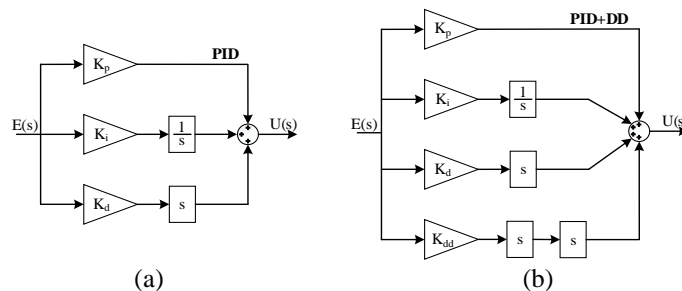
Ünitelerin katılım faktörü olarak adlandırılan güç üretimindeki katkı miktarları sırasıyla K_{th} , K_h , K_g , K_w ve K_d sabitleriyle belirlenir. Çalışmada kullanılan test sistemi parametreleri Tablo 1'de verilmiştir [7-23-24-25].

Tablo 1. Test sistemine ait sistem parametreleri.

Parametre	Değer	Parametre	Değer	Parametre	Değer	Parametre	Değer
T_g	0.2	c_g	1.0	T_{wd2}	0.6	R	2.4
T_t	0.5	b_g	0.05	K_{wd2}	1.3	K_1	0.85
K_r	0.3	X_c	0.6	K_{PC}	0.8	K_2	0.095
T_r	10.0	Y_c	1.0	K_w	0.125	K_3	0.92
K_{th}	0.4	T_{cr}	0.01	K_{DEPG}	0.03	C_B	200.0
T_{gh}	0.2	T_f	0.23	T_{DEPG}	2.3	K_{IB}	0.03
T_{rs}	10.0	T_{cd}	0.2	K_d	0.125	T_{IB}	26.0
T_{rh}	28.7	K_g	0.125	K_{ps}	120.0	T_{RB}	6.9
T_w	1.0	T_{wd1}	0.041	T_{ps}	20	T_D	0.0
K_h	0.225	K_{wd1}	1.25	B	0.425	T_F	10.0

3. DENETLEYİCİ YAPILARI VE PARAMETRE SEÇİMİ

Bu çalışmada, YEK'leri içeren çok kaynaklı tek bölgeyi güç sistemi için yük frekans kontrolünde PID ve PID+DD denetleyici yapıları kullanılmıştır. Oransal-integral-türev (PID) denetleyici, basit tasarımı ve çok çeşitli çalışma koşullarına karşı sağlam performansı nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. PID benzeri yapılandırılmış, oransal-integral-türev-artı-ikinci-dereceden-türev (PID + DD) denetleyicisi, otomatik gerilim regülatörü (OGR) sistemini incelemek için araştırmacıların dikkatini çekti [19]. Kullanılan denetleyici yapılarının aynı bozunum ve optimizasyon algoritmasında gösterdikleri performans birbirleriyle kıyaslanmıştır. Bu denetleyicilerin blok şemaları Şekil 3'de gösterildiği gibidir.



Şekil 3. Denetleyici yapılarının blok diyagramları.

- PID denetleyici (Şekil 3(a)) endüstride ve birçok mühendislik alanında kullanılmaktadır. Bu denetleyici yapısı K_p , K_i ve K_d olarak tanımlanan optimize edilecek üç parametre içerir. Bu denetleyicinin transfer fonksiyonu Denklem (6)'da gösterilmiştir.

$$G_{\text{denetPID}}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (6)$$

- PID + DD denetleyici, (Şekil 3(b)) PID denetleyiciye ilave olarak optimize edilecek dördüncü bir parametre içerir. Bu ilave parametre ikinci-dereceden-türevdir (K_{dd}). Bu denetleyicinin transfer fonksiyonu Denklem (7)'de gösterilmiştir.

$$G_{\text{denetPID+DD}}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s + K_{dd} s^2 \quad (7)$$

YFK probleminde denetleyici tasarımı ve denetleyici parametrelerinin optimizasyonu, güç sistemi araştırma grupları tarafından ele alınması ve araştırılması gereken çok sıcak bir konu olarak öne çıkmaktadır. Modern elektrik güç sistemlerinde YFK performansını etkileyen ikincil denetleyicinin yapısı, denetleyici parametrelerinin optimal değerlerini bulmak için kullanılan optimizasyon algoritmaları ve çözümlerin optimizasyon algoritmalarına uygunluğunu değerlendirmek için kullanılan performans indeksleri olmak üzere üç temel unsur vardır [6].

YFK performansı literatürdeki güncel farklı algoritmalar kullanılarak iyileştirilmeye çalışılmıştır. Kullanılan denetleyici yapılarında AKH, giriş sinyali olarak alınır ve denetleyicinin çıkışı referans güç ayarı veya sistem kontrol girişi olarak ifade edilmiştir. ΔP_{ref} , denetleyici yapılarında Denklem (8)'de verildiği gibi matematiksel olarak modellenmiştir.

$$\Delta P_{\text{ref}} = \text{AKH} \left(\overbrace{K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s}^{\text{PID}} \right) \quad (8.a)$$

$$\Delta P_{\text{ref}} = \text{AKH} \left(\overbrace{K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s + K_{dd} s^2}^{\text{PID+DD}} \right) \quad (8.b)$$

Üretim-yük dengesi, modern elektrik güç sistemlerinde YFK sorunu için en uygun şekilde ayarlanmalıdır. Bu nedenle, ikincil denetleyicide bu dengeyi sağlamak için tasarlanan denetleyicilerin tasarım parametreleri eş zamanlı olarak optimize edilmelidir.

Bu parametreler kullanıcı deneyimine göre tasarlandığında, kontrol performansı optimize edilmiş sistem performansından daha zayıf bir etkiye sahip olacaktır. Bu nedenle kullanıcı deneyiminin etkisini ortadan kaldırmak için optimizasyon algoritmaları kullanılarak tasarlanan denetleyici yapılarında amaç fonksiyonunun kullanılması oldukça önemlidir. Bu çalışmada YFK problemlerinde en çok tercih edilen zaman ağırlıklı mutlak hatanın integrali (ITAE) kriteri, optimizasyon algoritması için maliyet fonksiyonu olarak belirlenmiş ve Denklem (9)'da gösterilmiştir.

$$J = \text{ITAE} = \int_0^{T_{\text{sim}}} t(|\Delta f|) dt \quad (9)$$

Burada T_{sim} , test sistemlerinde yanıtlar elde etmek için ayarlanmış simülasyon süresidir. Δf kontrol alanı frekansının sapsmasını temsil eder. J uygunluk fonksiyonu minimum değere indirildiğinde, belirlenen basamak yük bozunumu (SLP) değişimine bağlı olarak Δf salınımlarında daha fazla sönüm görülebilmektedir. İstenen bir sonuç olarak, denetleyicilerin parametreleri aşağıda formüle edildiği gibi belirtilen sınır değerler içinde kalmıştır.

$$\begin{aligned} K_p^{\min} &\leq K_p \leq K_p^{\max} \\ K_i^{\min} &\leq K_i \leq K_i^{\max} \\ K_d^{\min} &\leq K_d \leq K_d^{\max} \\ K_{dd}^{\min} &\leq K_{dd} \leq K_{dd}^{\max} \end{aligned} \quad (10)$$

Şekil 3'deki PID ve PID+DD denetleyici yapıları K_p , K_i , K_d ve K_{dd} olarak ifade edilen 4 parametrenin optimizasyon algoritmaları ile en iyi değerleri bulunarak tasarlanmıştır.

4. BUKALEMUN SÜRÜ ALGORİTMASI

Algoritma 2021 yılında Braik tarafından önerilmiş en yeni optimizasyon tekniklerinden birisidir [22]. BSA, bukalemunların gerçek hayattaki avlanma ve yiyecek arama şeklini taklit eden metasezgisel bir optimizasyon tekniğidir. Genel olarak, bukalemunlar bulunduğu ortama göre renk değiştirebildiklerinden dağlarda, ovalarda ve çöllerde böcekleri avlanma yeteneğine sahip olan nadir canlılardır. Bukalemunların avlanması, avın takip edilmesi,

avı kovalamak için gözlerin kullanılması ve ava saldırma gibi farklı adımları içerir. Algoritmanın matematiksel modellenmesi ve işleyişi alt bölümlerde açıklanmıştır.

4.1. Başlatma ve Fonksiyon Değerlendirilmesi

BSA, optimizasyon işlemi rastgele oluşturulmuş bir başlangıç popülasyonu ile başlatan popülasyon temelli metasezgisel bir algoritmadır. Bukalemun popülasyonu büyüklüğü n , d boyutlu bir arama uzayında başlatılır ve tüm bireyler, optimizasyon probleminin muhtemel çözümü olarak kabul edilir. Arama uzayındaki herhangi bir yinelemede bukalemun konumu, Denklem (11) ile ifade edilir. Yineleme sayısı $i = 1, 2, \dots, t$ ile, bukalemunun konumu ise $y_{t,d}^i$ ile ifade edilir.

$$y_t^i = [y_{t,1}^i, y_{t,2}^i, \dots, y_{t,d}^i] \quad (11)$$

Başlangıç popülasyonu, problem boyutuna ve arama uzayındaki bukalemun sayısına göre Denklem (12) ile ifade edilir.

$$y^i = l_j + r(u_j - l_j) \quad (12)$$

i . bukalemunun başlangıç vektörü y^i , arama uzayının üst sınırı u_j , arama uzayının alt sınırı l_j ile ifade edilir. r , [0-1] arasında değişen rastgele bir düzgün sayıdır. Her bir adımdaki çözümün kalitesi, amaç fonksiyonuna dayalı olarak her adımda değerlendirilir.

4.2. Avın Aranması

Bukalemunların avın aranması esnasındaki davranışı, Denklem (13)'de önerildiği gibi konum güncelleme stratejisine dayalı olarak matematiksel olarak modellenir.

$$y_{t+1}^{i,j} = \begin{cases} y_t^{i,j} + p_1(P_t^{i,j} - G_t^j)r_2 + p_2(G_t^j - y_t^{i,j})r_1 & r_i \geq P_p \\ y_t^{i,j} + \mu((u^j - l^j)r_3 + l_b^j) \operatorname{sgn}(\operatorname{rand} - 0.5) & r_i < P_p \end{cases} \quad (13)$$

burada t ve $(t + 1)$ ilgili yineleme adımını gösterir. i ve j , j . boyuttaki i . bukalemunu temsil eder. Bukalemunun mevcut ve yeni konumu sırasıyla $y_t^{i,j}$ ve $y_{t+1}^{i,j}$ ile temsil edilir. $P_t^{i,j}$ bukalemunun en iyi ve G_t^j ise yerel en iyi konumunu ifade eder.

p_1 ve p_2 , keşif yeteneğini kontrol eden iki pozitif sayıdır. r_1 , r_2 ve r_3 , 0 ile 1 arasında oluşturulan ve rasgele uniform sayılardır. r_i , 0 ile 1 arasında değişen i indeksinde oluşturulan rastgele uniform bir sayıdır. P_p , bukalemunun avı algılama olasılığını gösterir. $\operatorname{sgn}(\operatorname{rand} - 0.5)$ kullanma ve keşfin yönü üzerinde bir etkiye sahiptir ve -1 veya 1 olabilir. μ , yineleme sayısı azalan yineleme parametresinin bir fonksiyonudur.

4.3. Bukalemun Gözlerinin Dönüşü

Bukalemunlar, avlarının seçmek ve yerini tam tespit için gözlerinin 360 derece dönen üstün yönünü kullanır. Bu dönüş, bukalemunların avlanma mekanizmasını açıklamak için matematiksel olarak formüle edilmiştir. Bu durumda bukalemunlar avlandıkları yere göre yer değiştirirler. Bu bağlamda aşağıdaki adımlar önerilmiştir.

- Bukalemunun ilk konumu yerçekiminin odak noktasıdır (başlangıç).
- Avın konumunu tanıyan dönüş matrisi keşfedilir.
- Bukalemunun durumu, yerçekiminin odak noktasındaki dönme matrisi kullanılarak yenilenir.
- Son olarak, bukalemunlar ilk pozisyona geri döndürülür.

Bir bukalemunun yeni konumu, Denklem (14)'deki gibi matematiksel olarak ifade edilir.

$$y_{t+1}^i = y_t^i + y_t^i \quad (14)$$

burada y_{t+1}^i dönüşten sonraki konumdur, y_t^i dönüşten önceki mevcut konumu ve y_t^i bukalemunun arama uzayındaki dönüş koordinatlarını gösterir.

4.4. Avın Avlanması

Bukalemunlar, avlarına önce aşırı derecede yaklaşır ve daha sonra ani olarak saldırırlar. Avına yaklaşan bukalemunun en iyi bukalemun olduğu varsayılır ve en uygundur. En iyi bukalemun dilini kullanarak avına saldırır. Dilini uzunluğunun iki katı kadar uzatabilmesi bir avantaj sağlar. Bu mekanizma, bukalemunların avlarını etkili bir şekilde yakalayarak arama alanından yararlanmalarına yardımcı olur. Bir bukalemunun dilinin ava doğru hareketi anındaki hızı Denklem (15)'e göre matematiksel olarak modellenebilir.

$$v_{t+1}^{i,j} = \omega v_t^{i,j} + c_1(G_t^j - y_t^{i,j})r_1 + c_2(P_t^{i,j} - y_t^{i,j})r_2 \quad (15)$$

burada v_{t+1}^{ij} , $t + 1$ yinelemesinde i . bukalemun j . boyuttaki yeni hızını temsil eder, v_t^{ij} , i . bukalemunun j . boyuttaki mevcut hızını temsil eder, y_t^{ij} , i . bukalemunun mevcut konumunu temsil eder, P_t^{ij} , i . bukalemunun en iyi bilinen konumudur ve G_t^j bukalemunlar tarafından şimdiye kadar bilinen yerel en iyi konumdur. c_1 ve c_2 bukalemun dilini düşürmede P_t^{ij} ve G_t^j 'nin etkisini kontrol eden iki pozitif sabittir, r_1 ve r_2 , 0 ile 1 aralığında dağıtılan iki rastgele sayıdır ve ω , yinelemeli üretimlerle doğrusal olarak azalan eylemsizlik ağırlığıdır.

5. TEST SİSTEMİNE AİT SİMÜLASYON SONUÇLARI

Bu çalışmada modern güç sistemlerindeki en önemli kararlılık problemlerinden biri olan YFK problemi modern bir test sisteminde detaylı olarak incelenmiştir. Çalışmada PID ve PID+DD denetleyicilerinin sistem performansı, dayanıklılığı ve verimliliği, çeşitli çalışma senaryoları altında güç sistemi modelinin dinamik tepkilerini elde etmek için kullanılmıştır. Literatür taramasına göre, denetleyici yapılarının performansları, ITAE performans indeksi kullanılarak test sisteminin frekans sapmaları, oturma süresi, altında kalma ve aşma miktarları açısından değerlendirilmiştir. Sistem $t=0$ 'da sırasıyla %1, %5 ve %10 bozunum değerlerinde ve iki farklı denetleyici yapısında ayrı ayrı simüle edilmiştir. Ayrıca optimizasyon algoritmaları arasında adil bir değerlendirme ortamı sağlamak amacıyla optimizasyon sırasında kullanılan ayar parametreleri literatüre ilk sunuldukları değerlerde kabul edilmiştir. Ayrıca, popülasyon sayısı ve maksimum yineleme sayısı sırasıyla 30 ve 100 olarak ayarlanmıştır. Optimizasyon probleminde kısıtlar denetleyici parametrelerinin sınırları olup, bu sınırlar Tablo 2'de verilmiştir. Simülasyon sonuçlarını elde etmek için Intel(R), core(TM) i7-8750H 2.2 GHz CPU ve 8 GB RAM'e sahip bir bilgisayar kullanılmıştır.

Tablo 2. Denetleyici parametrelerinin sınırları.

Sınırlar	Parametreler			
	K_p	K_i	K_d	K_{dd}
Minimum	-7	-7	-7	-0.1
Maksimum	7	7	7	0.1

Test sistemindeki simülasyon çalışmaları YEK'leri içeren çok kaynaklı elektrik güç sistemi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kullanılan denetleyici yapılarının en uygun parametreleri farklı bozunum değerlerinde GBO, BKA ve BSA algoritmaları ile belirlenmiştir ve değerler EK1, EK2 ve EK3'de verilmiştir.

Simülasyon çalışmasından elde edilen dinamik sistem tepkisi Δf 'yi içeren grafikler Şekil 4'de detaylı olarak verilmiştir. Test sistemine ait Δf 'nin minimum ve maksimum aşım değerleri, oturma süresi değerleri ve sistem yanıtına göre performans sıralaması Tablo 3'de detaylı olarak verilmiştir. Yerleşme zamanını ölçmek için ± 0.0001 gibi çok dar bir tolerans bandı kabul edilmiştir.

PID denetleyicisi oturma süresi açısından bozunumun %1 olduğu durumda BKA algoritması için 2.5187, GBO algoritması için 1.5025 ve BSA algoritması için 2.4044 olarak tespit edilmiştir. PID denetleyicisi için diğer bozunum değerleride dikkate alındığında GBO algoritması oturma süresi bakımından daha başarılıdır. PID+DD denetleyicisi için farklı bozunum değerlerinde oturma süresi bakımından algoritmaların başarıları değişkenlik göstermiştir. Bozunumun %1, %5 ve %10 olduğu durumlarda sırasıyla 1.2610 değeriyle BKA, 4.4981 değeriyle GBO ve 3.4135 değeriyle BSA daha başarılı olmuştur. Fakat tüm değerler ortak olarak değerlendirildiğinde BKA daha başarılı olarak nitelendirilebilir.

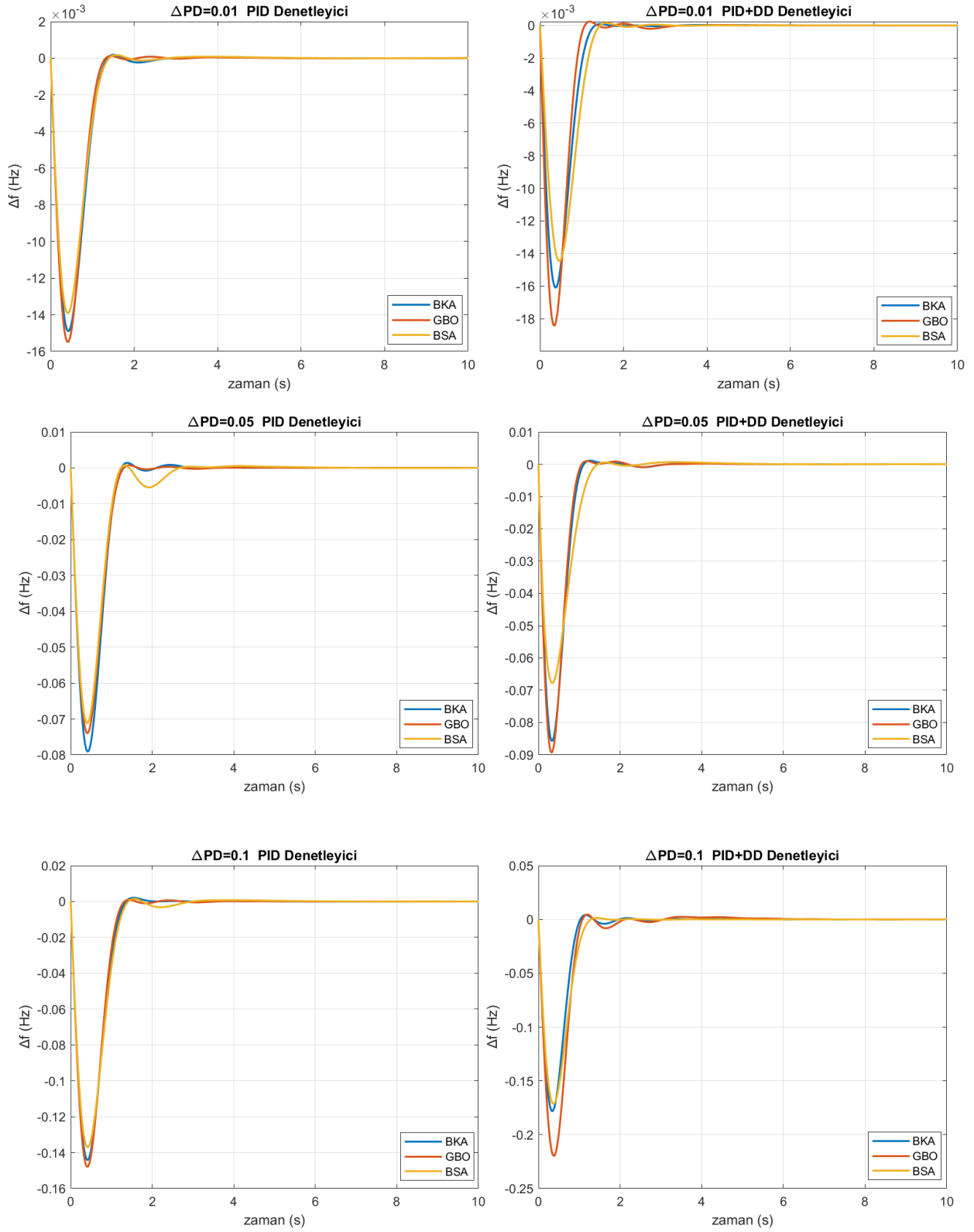
Minimum aşma değeri sırasıyla BKA, GBO ve BSA algoritmaları için %1'lik bozunum değerinde PID denetleyicisi için -0.014906, -0.015484 ve -0.013924, PID+DD denetleyicisi için -0.016095, -0.018416 ve -0.014459 olmuştur. BSA algoritması minimum aşma değeri açısından diğerlerinden daha üstündür. Ek olarak %5 ve %10'bozunum değerleri içinde sıralama değişmemiştir.

Maksimum aşma değeri bakımından hem PID hem de PID+DD denetleyicisi için farklı bozunum değerlerinde algoritmaların başarı sıraları değişkenlik göstermiştir. PID denetleyicisi için bozunumun sırasıyla %1, %5 ve %10 olduğu durumlarda 0.00012952 değeriyle GBO, 0.00069138 değeriyle BSA ve 0.00101250 değeriyle GBO daha başarılı olmuştur. PID+DD denetleyicisinde ise bozunumun sırasıyla %1, %5 ve %10 olduğu durumlarda 8.4012×10^{-5} değeriyle BKA, 0.00067620 değeriyle BSA ve 0.00137830 değeriyle BSA daha başarılı olmuştur. PID denetleyicisi için maksimum aşma değerinde en iyi GBO, PID+DD denetleyicisi için ise BSA algoritması daha başarılıdır. Ayrıca sistemdeki bozunumun arması genel olarak oturma süresi, minimum aşma ve maksimum aşma değerlerini artırmıştır.

Kullanılan her iki denetleyici yapısından elde edilen sistem yanıtları yerleşme süresi, minimum aşma değeri ve maksimum aşma değeri açısından ayrı ayrı incelendiğinde;

- Yerleşme süresi açısından GBO,
- Minimum ve maksimum sapma değeri açısından BSA,

algoritmasının daha iyi olduğu görülür. Tüm kriterlerin ortak değerlendirilmesi sonucunda algoritmalar arasında en iyi sıralama sırasıyla BSA, GBO ve BKA şeklindedir.



Şekil 4. Test sisteminde kullanılan denetleyicilerin Δf sistem yanıtı.

Tablo 3. Denetleyicilerin sistem yanıtlarına göre optimizasyon algoritmalarının performans sıralaması.

Denetleyiciler			Algoritmalar		
			BKA	GBO	BSA
PID	Ts (s)	$\Delta f_{0.01}$	2.5187	1.5025	2.4044
		$\Delta f_{0.05}$	3.4515	3.4116	6.1292
		$\Delta f_{0.10}$	4.6642	3.5642	6.2804
	Min. (US)	$\Delta f_{0.01}$	-0.01490600	-0.01548400	-0.01392400
		$\Delta f_{0.05}$	-0.07915800	-0.07392900	-0.07115700
		$\Delta f_{0.10}$	-0.14422000	-0.14785000	-0.13711000
	Mak. (OS)	$\Delta f_{0.01}$	0.00019359	0.00012952	0.00017760
		$\Delta f_{0.05}$	0.00140780	0.00071964	0.00069138
		$\Delta f_{0.10}$	0.00205650	0.00101250	0.00149450
PID+DD	Ts (s)	$\Delta f_{0.01}$	1.2610	3.0267	1.6967
		$\Delta f_{0.05}$	4.9636	4.4981	5.4152
		$\Delta f_{0.10}$	4.8071	7.1197	3.4135
	Min. (US)	$\Delta f_{0.01}$	-0.01609500	-0.01841600	-0.01445900
		$\Delta f_{0.05}$	-0.08575600	-0.08925900	-0.06777200
		$\Delta f_{0.10}$	-0.17818000	-0.21975000	-0.17149000
	Mak. (OS)	$\Delta f_{0.01}$	8.4012x10 ⁻⁵	0.00023562	0.00015898
		$\Delta f_{0.05}$	0.00112290	0.00098289	0.00067620
		$\Delta f_{0.10}$	0.00415930	0.00451810	0.00137830
En iyi denetleyici sonuçlarına göre optimizasyon algoritmalarının sıralaması					
Denetleyiciler			Algoritmalar		
			BKA	GBO	BSA
PID	Ts (s)	$\Delta f_{0.01}$	3	1	2
		$\Delta f_{0.05}$	2	1	3
		$\Delta f_{0.10}$	2	1	3
	Min. (US)	$\Delta f_{0.01}$	2	3	1
		$\Delta f_{0.05}$	3	2	1
		$\Delta f_{0.10}$	2	3	1
	Mak. (OS)	$\Delta f_{0.01}$	3	1	2
		$\Delta f_{0.05}$	3	2	1
		$\Delta f_{0.10}$	3	1	2
PID+DD	Ts (s)	$\Delta f_{0.01}$	1	3	2
		$\Delta f_{0.05}$	2	1	3
		$\Delta f_{0.10}$	2	3	1
	Min. (US)	$\Delta f_{0.01}$	2	3	1
		$\Delta f_{0.05}$	2	3	1
		$\Delta f_{0.10}$	2	3	1
	Mak. (OS)	$\Delta f_{0.01}$	1	3	2
		$\Delta f_{0.05}$	3	2	1
		$\Delta f_{0.10}$	2	3	1
Ortalama Değerler			2.22	2.16	1.61
Ortalama Değerlerin Sıralaması			3	2	1

6. SONUÇ

Artan enerji talebini karşılamak için, son zamanlarda fosil yakıt üretim birimlerini içeren güç sistemlerine YEK'lerin entegrasyonu artmıştır. Bu bağlamda çalışmada, modern elektrik güç sistemlerinin tüketici tarafında değişen yük koşullarında meydana gelen YFK problemini çözmek için PID ve PID+DD denetleyici yapısı parametreleri üç farklı optimizasyon algoritması ile optimize edilmiştir. Optimize edilen denetleyiciler sistem doğrusalsızlığını artıran kazan dinamiği yapısı ve YEK'leri de içeren tek alanlı çok kaynaklı güç test sisteminde incelenmiştir.

Simülasyonlarda %1, %5 ve %10'luk yük bozunum değerleri ayrı ayrı uygulanmış ve farklı algoritmalarla optimize edilen denetleyici yapılarının verdiği sonuçlar incelenmiştir. Denetleyici parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan optimizasyon algoritmaları kendi içlerinde karşılaştırılmıştır. BSA algoritması ile parametreleri optimize edilen denetleyiciler sistemdeki salınımları sönmülemde daha başarılı olmuştur.

Yazar Katkıları

Yazarlar çalışmaya eşit oranlı katkı sunmuşlardır.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler

KAYNAKÇA

- [1] D. H. Tungadio and Y. Sun “Load frequency controllers considering renewable energy integration in power system”, *Energy Reports*, vol. 5, pp. 436-453, 2019.
- [2] K. Peddakapu et al. “A state-of-the-art review on modern and future developments of AGC/LFC of conventional and renewable energy-based power systems”, *Renewable Energy Focus*, vol. 43, pp. 146-171, 2022.
- [3] M. Ranjan and R. Shankar “A literature survey on load frequency control considering renewable energy integration in power system: Recent trends and future prospects”, *Journal of Energy Storage*, vol. 45, p.103717, 2022.
- [4] A. Pappachen and A.P. Fathima “Critical research areas on load frequency control issues in a deregulated power system: A state-of-the-art-of-review” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, pp. 163-177, 2017.
- [5] Y. Arya et al. “AGC performance amelioration in multi-area interconnected thermal and thermal-hydro-gas power systems using a novel controller”, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 24, pp. 384-396, 2021.
- [6] E. Celik et al. “(1+PD)-PID cascade controller design for performance betterment of load frequency control in diverse electric power systems”, *Neural Computing and Applications*, vol. 33, pp. 15433-15456, 2021.
- [7] A. Tabak and S. Duman “Levy flight and fitness distance balance-based coyote optimization algorithm for effective automatic generation control of PV-based multi-area power systems”, *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 47, pp. 14757-14788, 2022.
- [8] Y. V. Hote and S. Jain “PID controller design for load frequency control: Past, Present and future challenges”, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 4, pp. 604-609, 2018.
- [9] S. Duman and N. Yorukeren “Automatic generation control of the two area non-reheat thermal power system using gravitational search algorithm”, *Przegład Elektrotechniczny*, vol. 10a, pp. 254-259, 2012.
- [10] E. Celik “Improved stochastic fractal search algorithm and modified cost function for automatic generation control of interconnected electric power systems”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 88, 103407, 2020.
- [11] A.K. Barisal “Comparative performance analysis of teaching learning based optimization for automatic load frequency control of multi-source power systems”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 66, pp. 67-77, 2015.
- [12] H. Shabani, B. Vahidi, and M. Ebrahimpour “A robust PID controller based on imperialist competitive algorithm for load-frequency control of power systems”, *ISA Transactions*, vol. 52, pp. 88-95, 2013.
- [13] E.S. Ali and S.M. Abd-Elazim “BFOA based design of PID controller for two area load frequency control with nonlinearities”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 51, pp. 224-231, 2013.
- [14] J. Kaliannan, A. Baskaran, and N. Dey “Automatic Generation Control of Thermal-Thermal-Hydro Power Systems with PID Controller using Ant Colony Optimization”, *Int. J. Serv. Sci. Manag. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 2, pp. 18-34, 2015.
- [15] D.C. Das, A.K. Roy, and N. Sinha “GA based frequency controller for solar thermal-diesel-wind hybrid energy generation/energy storage system”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 43, no. 1, pp. 262-279, 2012.
- [16] K. Jagatheesan et al. “Application of flower pollination algorithm in load frequency control of multi-area interconnected power system with nonlinearity”, *Neural Comput. Appl.*, vol. 28, no. s1, pp. 475-488, 2017.
- [17] A. Panwar, G. Sharma, and R.C. Bansal “Optimal AGC Design for a Hybrid Power System Using Hybrid Bacteria Foraging Optimization Algorithm”, *Electr. Power Components Syst.*, vol. 47, no. 11-12, pp. 955-965, 2019.
- [18] K.S. Simhadri and B. Mohanty “Performance analysis of dual-mode PI controller using quasi-oppositional whale optimization algorithm for load frequency control”, *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 30, no. 1, pp. 1-23, 2020.
- [19] M. Raju, L.C. Saikia, and N. Sinha “Automatic generation control of a multi-area system using ant lion optimizer algorithm based PID plus second order derivative controller”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 80, pp. 52-63, 2016.
- [20] S. Li, H. Chen, M. Wang, A.A. Heidari, and S. Mirjalili “Slime mould algorithm: A new method for stochastic optimization”, *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 111, pp. 300-323, 2020.
- [21] B. Abdollahzadeh, F. Soleimanian Gharehchopogh, and S. Mirjalili “Artificial gorilla troops optimizer: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems”, *Int. J. Intell. Syst.*, vol. 36, no. 10, pp. 5887-5958, 2021.
- [22] M.S. Braik “Chameleon Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for solving engineering design problems”, *Expert Syst. Appl.*, vol. 174, no. April 2020, p. 114685, 2021.
- [23] B. Mohanty, S. Panda, and P.K. Hota “Differential evolution algorithm based automatic generation control for interconnected power systems with non-linearity”, *Alexandria Engineering Journal*, vol. 53, pp. 537-552, 2014.
- [24] S. Oladipo, Y. Sun, and Z. Wang “Application of a new fusion of flower pollinated with pathfinder algorithm for AGC of multi-source interconnected power system”, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 94149-94168, 2021.
- [25] P.C. Sahu, R.C. Prusty, and S. Panda “Approaching hybridized GWO-SCA based type-II fuzzy controller in AGC of diverse energy source multi area power system”, *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, vol. 32, pp. 186-197, 2020.

EKLER

EK1. Denetleyicileri yapılarının optimize edilmiş parametreleri ($\Delta P_p=0.01$).

Denetleyici	Parametreler		Algoritmalar		
			BKA	GBO	BSA
PID	Denet-1	K _p	-6.5029	-7.0000	-6.8514
		K _i	-0.7962	1.5168	0.5345
		K _d	-7.0000	-3.0957	-6.6434
	Denet-2	K _p	-6.3272	-7.0000	-6.9967
		K _i	-0.0146	-7.0000	-3.9598
		K _d	0.1634	-0.3912	0.2149
	Denet-3	K _p	-4.9536	-7.0000	-7.0000
		K _i	-7.0000	-7.0000	-6.9956
		K _d	-5.1820	-7.0000	-5.0803
	Denet-4	K _p	-6.9798	-6.9995	-6.9997
		K _i	-6.7340	-5.6283	-6.9713
		K _d	0.2437	-2.9731	-1.9372
	Denet-5	K _p	0.4802	-6.9998	-6.9981
		K _i	-0.3524	-5.9396	-6.8461
		K _d	4.9296	-6.9991	-6.9533
PID+DD	Denet-1	K _p	-5.8130	-7.0000	-5.9337
		K _i	-0.7635	-1.3804	-0.9443
		K _d	-6.9537	-6.9954	-6.8867
		K _{dd}	0.0582	0.1000	-0.0992
	Denet-2	K _p	-6.6012	-6.9938	-5.7611
		K _i	-0.0079	1.3082	0.2421
		K _d	0.0211	-0.0158	0.1040
		K _{dd}	-0.0569	-0.1000	0.0611
	Denet-3	K _p	-5.8950	-3.8819	-6.7839
		K _i	-6.9985	-6.9946	-6.6748
		K _d	-5.4851	-5.7380	-6.9458
		K _{dd}	0.0149	0.1000	-0.0950
	Denet-4	K _p	-7.0000	-7.0000	-6.9182
		K _i	-6.9999	-7.0000	-6.6487
		K _d	1.6317	3.1993	2.8248
K _{dd}		0.0341	0.0988	0.0651	
Denet-5	K _p	-0.0000	7.0000	-5.8898	
	K _i	0.1877	7.0000	-5.7207	
	K _d	1.3929	-6.9152	-6.4415	
	K _{dd}	-0.0024	-0.1000	-0.0981	

EK2. Denetleyicileri yapılarının optimize edilmiş parametreleri ($\Delta P_b=0.05$).

Denetleyici	Parametreler		Algoritmalar		
			BKA	GBO	BSA
PID	Denet-1	K_p	-6.9981	-7.0000	-7.0000
		K_i	-1.0652	-0.3844	0.7271
		K_d	-4.3017	-6.9999	-6.9782
	Denet-2	K_p	-3.8254	-6.9997	-6.9104
		K_i	0.2909	-1.5407	-4.1636
		K_d	-0.0299	0.2217	-0.1711
	Denet-3	K_p	-6.8191	-7.0000	-6.9886
		K_i	-6.9955	-7.0000	-6.9941
		K_d	-6.8549	-7.0000	-3.1007
	Denet-4	K_p	-7.0000	-6.9999	-6.9991
		K_i	-6.8329	-6.9999	-6.9992
		K_d	2.2371	2.2472	-4.2018
	Denet-5	K_p	1.1569	7.0000	-4.6827
		K_i	5.2019	-6.9999	1.6833
		K_d	-2.2608	-0.4908	-5.9448
PID+DD	Denet-1	K_p	-6.7508	-7.0000	-6.9747
		K_i	0.4043	0.6464	1.5080
		K_d	-2.6753	-2.5485	-6.9920
		K_{dd}	-0.0866	-0.0999	-0.0995
	Denet-2	K_p	-6.9981	-7.0000	-6.9999
		K_i	-3.9116	-4.7085	-6.9941
		K_d	-0.9791	-1.2169	-0.9189
		K_{dd}	-0.1000	-0.0999	-0.1000
	Denet-3	K_p	-6.8074	-7.0000	-6.9916
		K_i	-6.9573	-7.0000	-6.9547
		K_d	-6.7589	-7.0000	-1.7958
		K_{dd}	0.0190	-0.0622	-0.0971
	Denet-4	K_p	-7.0000	-6.9999	-6.9999
		K_i	-6.9993	-7.0000	-7.0000
		K_d	-0.6553	-0.0658	-4.0296
K_{dd}		-0.0052	0.0922	-0.0981	
Denet-5	K_p	2.6766	6.9644	-6.9995	
	K_i	-2.2610	7.0000	-6.9995	
	K_d	-6.4043	-7.0000	-7.0000	
	K_{dd}	-0.0561	0.1000	-0.0412	

EK3. Denetleyicileri yapılarının optimize edilmiş parametreleri ($\Delta P_b=0.1$).

Denetleyici	Parametreler		Algoritmalar		
			BKA	GBO	BSA
PID	Denet-1	K_p	-7.0000	-7.0000	-6.9827
		K_i	0.2816	-0.3791	0.5255
		K_d	-6.9497	-7.0000	-7.0000
	Denet-2	K_p	-6.9921	-7.0000	-6.6598
		K_i	-3.2496	-1.5549	-3.9477
		K_d	0.2304	0.2166	0.2680
	Denet-3	K_p	-6.9960	-7.0000	-6.9715
		K_i	-7.0000	-7.0000	-6.9834
		K_d	-6.0059	-7.0000	-4.0863
	Denet-4	K_p	-7.0000	-7.0000	-7.0000
		K_i	-6.9645	-7.0000	-6.7842
		K_d	0.2896	2.0904	-2.7448
	Denet-5	K_p	-5.1872	7.0000	-4.0239
		K_i	0.4992	-7.0000	0.5888
		K_d	-0.6457	7.0000	-6.8262
PID+DD	Denet-1	K_p	-6.9610	-7.0000	-6.9544
		K_i	-0.2774	0.2756	0.1069
		K_d	-2.6317	0.6511	-6.3342
		K_{dd}	-0.0507	-0.1000	-0.0728
	Denet-2	K_p	-4.3184	-7.0000	-6.5113
		K_i	-1.9837	-3.3987	-3.2597
		K_d	-1.1230	-1.9226	-0.7731
		K_{dd}	-0.0997	-0.1000	-0.0795
	Denet-3	K_p	-6.8668	-2.5332	-6.9996
		K_i	-6.9981	-6.8526	-5.2155
		K_d	-5.5480	-6.9998	-5.2706
		K_{dd}	-0.0270	0.0367	-0.0917
	Denet-4	K_p	-6.9983	-2.8823	-4.9921
		K_i	-7.0000	-3.3511	-6.5621
		K_d	0.5746	-2.4934	2.9372
K_{dd}		-0.0273	-0.1000	0.0247	
Denet-5	K_p	2.1392	-1.8415	3.3434	
	K_i	6.1841	-7.0000	-2.4560	
	K_d	-5.6160	-7.0000	2.0471	
	K_{dd}	0.0132	-0.0998	0.0117	