

Termik Güç Santrali ve Fotovoltaik Güneş Enerji Sisteminden Oluşan Güç Sisteminde Üstel PI Denetleyici ile Sekonder Frekans Regülasyonu

Secondary Frequency Regulation Using Exponential PI Controller for a Power System Comprising of Thermal Power Plant and PV Solar Energy System

¹Emre ÇELİK

¹Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Düzce, Türkiye

emrecelik@duzce.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

ARTICLE INFO

Article history

Received : 20 March 2024

Accepted : 15 April 2024

Keywords:

Secondary Frequency Regulation, Exponential PI Controller, Thermal Power Plant, PV Solar Energy System, Snake Optimizer,

ABSTRACT

Imbalance between power generation and load demand causes unwanted undulations in frequency and tie-line power responses. These undulations closely affect the reliability/security of the power system, quality of the energy generated and the end user. In accomplishing generation suitable for consumption, secondary frequency regulation (SFR) is an inevitable control technique. In this brief, an exponential PI (EXP-PI) controller is proposed to enhance the performance of SFR in an interconnected power system. Snake optimizer (SO), one of the computational intelligence techniques, is benefitted for adjusting the controller parameters optimally. This way, without the requirement of an expert knowledge, controller parameters are searched optimally by minimizing the value of integral of time-multiplied absolute error (ITAE). To confirm the contribution of SO tuned EXP-PI controller, comparisons with the works in literature are established. It is deduced from the obtained results that the system performance with our proposal has enhanced in terms of oscillation, settling time, maximum overshoot/undershoot and ITAE value of the frequency and tie-line power responses.

© 2024 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri

Gönderim : 20 Mart 2024

Kabul : 15 Nisan 2024

Anahtar Kelimeler:

Sekonder Frekans Regülasyonu (SFR), Üstel PI Denetleyici, Termik Güç Santrali, Fotovoltaik Güneş Enerji Sistemi, Yılan Arama Algoritması

ÖZET

Güç üretimi ve yük talebi arasında yaşanan bir uyumsuzluk frekans ve bağlantı hattı güç tepkilerinde arzu edilmeyen salınımlara neden olur. Bu salınımlar güç sisteminin güvenilirliğini/güvenliğini, üretilen enerjinin kalitesini ve son kullanıcıları yakından etkilemektedirler. Tüketime uygun üretimin gerçekleştirilmesinde sekonder frekans regülasyonu (SFR) kaçınılmaz bir kontrol tekniğidir. Bu çalışmada enterkonnekte bir güç sisteminde SFR performansının artırılması için üstel PI denetleyicisi önerilmiştir. Denetleyici parametrelerinin optimum ayarı için işlemsel zekâ tekniklerinden yılan arama algoritmasından (YAA) faydalanılmıştır. Böylece denetleyici parametreleri zaman ağırlıklı mutlak hatanın integral (ITAE) değeri en az yapılacak şekilde uzman bilgisine gerek duyulmadan optimum şekilde araştırılmıştır. YAA tabanlı üstel PI denetleyicinin alana katkısını doğrulamak amacıyla literatürdeki çalışmalarla karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir. Elden edilen sonuçlardan önerilen yöntem ile sistem performansının frekans ve bağlantı hattı güç tepkilerindeki osilasyon, oturma süresi, maksimum pozitif/negatif aşım ve ITAE değerleri bakımından iyileştiği anlaşılmıştır.

© 2024 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

1. GİRİŞ

Teknolojik ilerlemeler, endüstriyel alanlardaki geniş ölçekli büyümeler ile hızlı nüfus artışı elektrik enerjisine olan talebi oldukça artırmaktadır. Ayrıca enerji kaynaklarının sınırlı oluşu, toplumların çevre kirliliği konusunda daha fazla bilinçlenmeleri ve elektrik enerjisinin kayda değer oranlarda depolanamayışı elektrik enerjisinin anlık ihtiyaçlara cevap verecek büyüklüklerde verimli bir şekilde üretilerek tüketicilere daha az kayıplarla iletilmesi gibi temel mühendislik problemlerini oluşturmaktadırlar.

Frekans, güç sistemlerinin kararlılığını etkileyen en önemli parametrelerin başında gelir. Üretilen ve tüketilen güç dengesiyle sabit tutulan frekans değeri bazı Avrupa ve Amerika ülkelerinde 60 Hz iken ülkemizde 50 Hz değerindedir. 10/11/2004 tarihli ve 25639 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliğinde belirtildiği üzere sistemin nominal frekansı TEİAŞ tarafından 50 Hertz (Hz) etrafında 49.8-50.2 Hz aralığında, ± 200 mHz’lik frekans sapması ile hedeflenen işletme koşullarında kontrol edilir. Sapmanın belirlenen aralığın dışına çıkması sistem kararlılığı ve emniyeti açısından tehlike arz eder. En kötü senaryoda sistemde kesintiler/şebeke çökmesi yaşanır. Geçmişte bazı şebeke çökmeleri 1999 yılı Mart ayında Brezilya’da, 2001 ve 2002 yıllarının bahar dönemlerinde İran’da, 2003 yılı Ağustos ayında kuzey Amerika’da, 2014 yılı Kasım ayında Bangladeş’te, 2019 yılı Mart ayında Venezuela’da (dünyadaki en uzun kesinti) yaşanmıştır [1]. 31 Mart 2015 tarihinde Türkiye’de de 9 saatlik bir elektrik güç kesintisi yaşanmış ve ülkemiz bu durumdan etkilenmiştir.

Elektrik şebekelerinde frekansı etkileyen en önemli değişken aktif güçtür. Frekansın sabit kalabilmesi üretilen ve tüketilen güç dengesi ile mümkündür [2]. Öyle ki üretilen toplam aktif güç, iletim hattı kayıpları ile alıcı güçleri toplamına eşit olmalıdır. Üretilen enerji talep edilenden fazla olursa frekans artacak, talep edilen enerji üretilen enerjiden fazla olursa bu kez frekans düşecektir. Frekansın değişimi enterkonnekte güç sistemlerinde geçici bağlantı hatları arası güç alışverişine neden olacaktır. İşte elektrik şebekelerinde kararlılığın iyileştirilmesi, sistemin güvenli çalışabilmesi için enerji üretim tesislerinin aktif güç çıkışını talebe uygun şekilde artırarak veya azaltarak sistem frekansını mümkün olduğunca hızlı şekilde nominal değerine getirme işine sekonder frekans regülasyonu (SFR) denilmektedir. Bu sayede komşu elektrik şebekeleriyle olan toplam güç alışverişi programlanan değere getirilmiş olur [3, 4]. Tüketilen enerjinin bir hayli karmaşık ve sürekli değiştiği günümüz dünyasında üretilen ve talep edilen güç arasındaki uyumu sağlamak ve böylece frekans sapsmaları ile bölgeler arası salınımları sönmüleyebilmek için etkin ve hızlı cevap verebilecek bir denetim organına gereksinim vardır. İyi tasarlanmış bir denetleyicinin tesisi ile istemin güvenli, güvenilir ve kararlı işletimine katkı sağlanır, aynı zamanda uluslararası elektrik enerjisi ticaret hacmi artırılır.

Literatürde değişik güç sistemlerinde SFR ile ilgili çok çeşitli araştırma makaleleri bulunmaktadır. İki bölgeli bir güç sisteminde SFR için PI ve PID denetleyicileri önerilmiştir [1]. Denetleyici parametreleri klasik Ziegler-Nichols tabloları ile tespit edilip modele uygulanmıştır. Yük değişimi sonrası SFR sayesinde her iki denetleyicide kalıcı frekans hatası sıfır yapıp frekans anma değerinde tutulmuştur. PID denetleyicinin gerek oturma süresi gerekse osilasyon açısından PI denetleyiciye göre çok daha iyi sonuç verdiği anlaşılrsa da arzu edilen tepkileri elde etmede her iki denetleyici zayıf kalmıştır. Ayrıca Ziegler-Nichols yöntemi ile verilen kurallar optimum denetleyici parametrelerinin tespitinde başarısızdırlar. Bu kuralların yerini artık etkin biçimde meta-sezgisel algoritmalar almıştır. Meta-sezgisel algoritmalarla bilinmeyen denetleyici parametreleri etkili şekilde, makul bir sürede araştırılabilir.

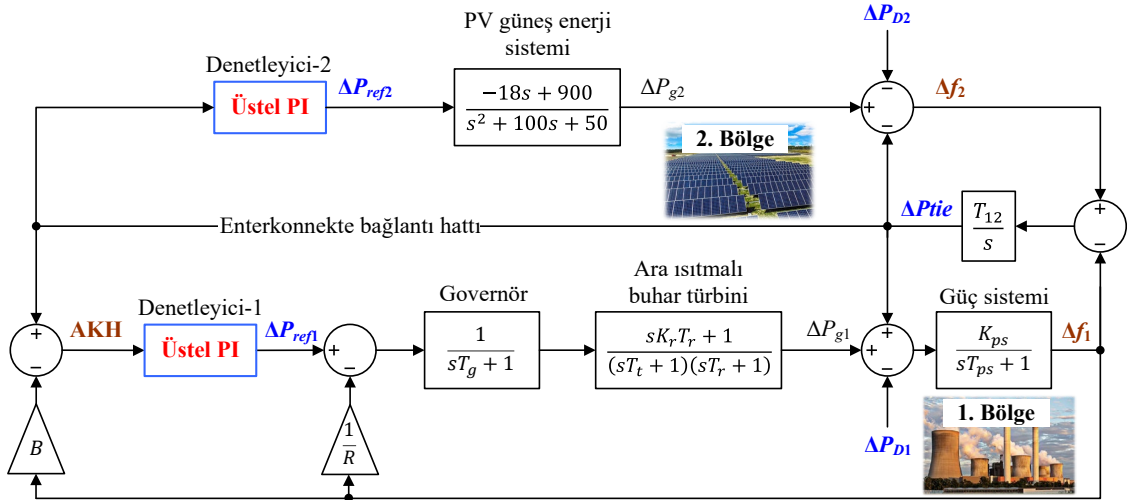
Hibrit bakteriyel besin arama algoritması-parçacık sürüsü optimizasyonu (hBBAA-PSO) [5], diferansiyel gelişim algoritması (DGA) [6], genetik algoritma (GA) [7] ve ateş böceği algoritması (ABA) [7] ile klasik PI denetleyici parametreleri elde edilmiştir. Hibrit stokastik fraktal arama algoritması-desen arama tekniği (hSFAA-DA) [8], simbiyotik organizmalar arama (SOA) algoritması [9] ve DGA [10] ile PID denetleyici parametreleri elde edilmiştir. [9] numaralı kaynakta SOA tekniği ile PID denetleyici parametrelerinin tespiti yeni bir amaç fonksiyonu ile gerçekleştirilmiş ve etkili sonuçlar elde edilmiştir. Bir başka başarılı çalışmada iyileştirilmiş stokastik fraktal arama algoritması PID denetleyici parametrelerinin en uygun değerlerinin bulunmasında kullanılmıştır [11]. İlgili çalışmada standart amaç fonksiyonlarından farklı olarak daha makul yeni bir amaç fonksiyonu önerilmiştir. [12] ve [13] numaralı çalışmalarda öğretim-öğrenmeye dayalı optimizasyon algoritması (ÖÖOA) ile PID ve iki serbestlik dereceli PID (2SD PID) denetleyici parametreleri elde edilmiştir. [14]’de hibrit parçacık sürü optimizasyonu-desen arama (hPSO-DA) tekniği ile bulanık PI denetleyici parametreleri elde edilmiştir. [15]’de ise iyileştirilmiş gri kurt optimizasyon (GGKO) algoritması kullanılarak PI, PID ve eklemeli PI-PD denetleyici parametrelerinin en uygun değerleri bulunmuştur. Daha yeni bir çalışmada son zamanda ortaya konulan aritmetik optimizasyon algoritması (AOA) iki bölgeli termik ve fotovoltaik güç sisteminde SFR performansının artırılması amacıyla PI denetleyici parametrelerinin elde edilmesinde kullanılmıştır [16]. Elde edilen sonuçlar [7]’de verilen sonuçlarla benzer şartlarda karşılaştırılmış ve AOA’nın GA ile ABA algoritmasından daha üstün cevap eğrileri sunduğu görülmüştür.

Mevcut denetim tekniklerine alternatif olarak üstel PI denetleyici ilk defa [17]’de önerilmiş ve sabit mıknatıslı DA servo motorun kapalı çevrim hız denetimine başarılı şekilde uygulanmıştır. Önerilen yöntemde kontrol hatası PI denetleyiciye uygulanmadan önce üstel bir fonksiyona verilmektedir. Üstel fonksiyon doğrusal olmadığından giriş sinyali doğrusal olmayan şekilde işlenmiş olmaktadır. Elde edilen bu sinyal daha sonra PI denetleyiciye giriş olarak verilmektedir. Bu arada üstel fonksiyon karakteristiği sabit olmayıp, iki skaler sabite ile değiştirilebilmektedir. Bu manada fonksiyonun eğimi/keskinliği ile maksimum/minimum değerleri kullanıcı tarafından ayarlanabilmektedir.

Bu çalışmada termik güç santrali ve fotovoltaik güneş enerji sisteminden oluşan iki bölgeli bir güç sisteminde SFR performansının artırılması için üstel PI denetleyicisi tasarlanmış ve önerilmiştir. Denetleyici parametrelerinin etkili biçimde elde edilmesinde yeni bir algoritma olan yılan arama algoritması (YAA) kullanılmıştır. Bu manada denetleyici tasarım aşamasında insan faktörü ortadan kalkmış, yanlış parametre ayarından dolayı istenmeyen performans ile karşı karşıya kalma riski de önlenmiştir. Benzetimi gerçekleştirilen güç sistemi MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş, optimizasyon algoritması ise MATLAB/M-file ortamında yazılmıştır. YAA’da bireylerin uygunluğunu değerlendirmek için Simulink modeli ile M-file birbirlerine bağlanmışlardır. YAA tabanlı üstel PI denetleyici performansının ispatı için literatürdeki [7] ve [16] numaralı kaynaklarla karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırmalarda frekans sapması ve bağlantı hattı güç dalgalanmalarına ait cevap eğrileri analiz edilmiştir.

2. GÜÇ SİSTEMİ TRANSFER FONKSİYONU MODELİ

Bu bölümde iki bölgeli termik santral ve PV güneş enerji sisteminden oluşan güç sisteminin benzetim çalışmalarında kullanılan dinamik modeli verilmiştir. Şekil 1’te bu modelin SFR tasarımı ve analizi için oluşturulan transfer fonksiyonu modeli görülmektedir. Bu sistem iki farklı santralin birbirlerine enterkonekte bağlantı hattı ile bağlanmasıyla oluşur. 1. bölgede ara ısıtmalı buhar türbinine sahip termik santral görev yaparken 2. bölgede PV güneş enerji sistemi bulunmaktadır. Şekil 1’de R generatörün güç-frekans karakteristik eğrisinden elde edilen governör regülasyon faktörü, B frekans biasıdır. Ayrıca ΔP_{D1} ve ΔP_{D2} yük değişimlerini, ΔP_{g1} ve ΔP_{g2} güç üretimindeki değişimleri, Δf_1 ve Δf_2 bölge frekans sapmalarını, ΔP_{tie} komşu bölgeler arasındaki bağlantı hattı güç dalgalanmalarını, ΔP_{ref1} ve ΔP_{ref2} denetleyici çıkış sinyallerindeki değişimi ve AKH alan kontrol hatasını göstermektedir.



Şekil 1. Çalışmadaki güç sistemi transfer fonksiyonu modeli.

Bu güç sisteminde AKH şu şekilde hesaplanır;

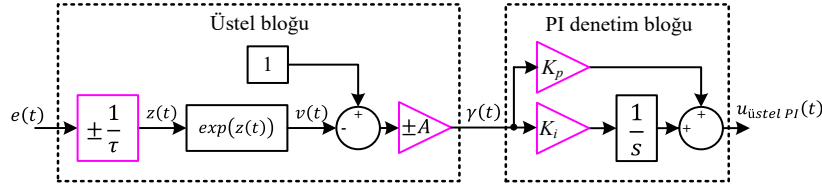
$$AKH = -B\Delta f_1 + \Delta P_{tie} \quad (1)$$

SFR ile bölgeler arasındaki güç akışını kontrol edilir ve sistemde var olan kalıcı frekans hatası giderilerek sistem frekansı belirlenen nominal değerine getirilir. Bağlantı hatlarındaki aktif güç akışı yük tevzi merkezlerinde bilgisayar destekli denetleyiciler vasıtasıyla kontrol edilir. Bu denetleyiciler bağlantı hattında var olan AKH değerini kontrol ederler.

Çalışmada kullanılan sistem parametreleri şu şekilde ayarlanmıştır [7]: $T_{ps} = 20$ s, $K_{ps} = 120$ Hz/puMW, $T_g = 0.08$ s, $T_t = 0.3$ s, $K_r = 0.33$, $T_r = 10$ s, $T_{12} = 0.545$ puMW/Hz, $B = 0.8$ puMW/Hz, $R = 0.4$ Hz/puMW, $F^0 = 60$ Hz

3. ÜSTEL PI DENETLEYİCİ YAPISI VE TASARIMI

Üstel PI denetim blok diyagramı Şekil 2’de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere üstel blok PI denetim bloğunun önüne konulmuş, birbirlerine eklemeli (kaskad bağlı) şekilde çalışmaktadırlar. Burada üstel blok değişken bir kazanç görevi görmektedir. Öyle ki bu kazanç, örn. k , hata sinyali $e(t)$ ’nin üstel fonksiyon ile tanımlı doğrusal olmayan bir fonksiyondur. Bu durumda $k = 1$ iken üstel PI denetleyici klasik bir PI denetleyiciye dönüşür. $k \neq 1$ olduğunda $e(t)$ sinyali üstel fonksiyon ile doğrusal olmayan şekilde işlenerek $\gamma(t)$ sinyali hesaplanır. $\gamma(t)$ daha sonra PI denetim bloğuna girerek nihai çıkış sinyali $u_{üstel PI}(t)$ elde edilir.

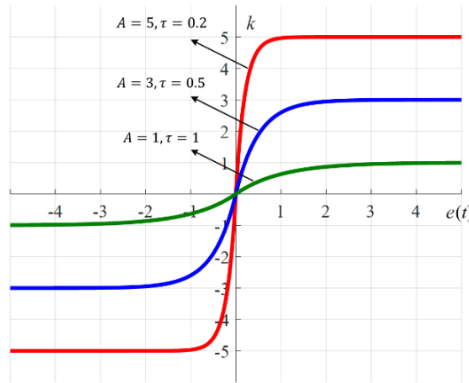


Şekil 2. Üstel PI denetim konsepti.

k kazancının matematiksel ifadesi Denklem 2’de verilmiştir.

$$k = \begin{cases} A(1 - \exp(-e(t)/\tau)) & e(t) > 0 \\ -A(1 - \exp(e(t)/\tau)) & e(t) \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Denklem 1’den anlaşılacağı üzere üstel blokta iki bilinmeyen vardır. Bunlar üstel fonksiyonu karakterize eden τ ve A parametreleridir. Fonksiyonunun eğimini τ parametresi ile ayarlanırken A ile fonksiyonun sınırları belirlenmektedir. Olayın daha iyi anlaşılabilmesi için k değeri $e(t)$ ’nin bir fonksiyonu olarak Şekil 3’te çizdirilmiştir. Görüldüğü gibi A bir çarpan görevi görür ve $e(t)$ giriş hata sinyalini büyütüp küçültür. τ ise fonksiyonun eğimini ayarlamaktan sorumludur. Değeri küçüldükçe eğim büyür.



Şekil 3. Farklı τ ve A parametre değerlerinde k kazancının $e(t)$ ’nin bir fonksiyonu olarak üstel şekilde değişimi.

Sonuç olarak üstel PI denetim kuralı Denklem 3’de gibi verilebilir.

$$u_{\text{üstel PI}}(t) = K_p \gamma(t) + K_i \int \gamma(t) dt \quad (3)$$

Denklem 3’te $\gamma(t) = k \cdot e(t)$ ’dir. Üstel PI denetleyicinin tasarımında K_p ve K_i parametrelerine ek olarak τ ile A parametrelerinin en uygun şekilde belirlenmesi gerekir. Aksi halde denetleyiciden beklenen performans elde edilemez. Bu iş için uygulanabilecek en etkili yöntem meta-sezgisel bir algoritma ile denetleyici parametrelerinin optimizasyonudur. Seçilen algoritma ile önceden tanımlı hata tabanlı amaç fonksiyonu değeri küçültülerek en iyi denetleyici parametreleri tespit edilir. Güçlü yapısı ve yeni bir yöntem olması hasebiyle bu çalışmada yılan arama algoritması (YAA) tercih edilmiştir.

4. YILAN ARAMA ALGORİTMASI

Yılan arama algoritması optimizasyon problemlerine çözüm üretmek için alternatif olarak geliştirilen bir algoritmadır [18]. Algoritma 2022 yılında ortaya konmuştur. İlham kaynağı yılanların yiyecek arama ve özel çiftleşme mekanizmalarından gelir. Yılanların çiftleşmesi belirli şartlar altında gerçekleşir. En doğru zaman sıcaklığın yeterince düşük olduğu baharın sonu ve yazın başlangıcıdır. Sıcaklıktan başka yiyeceğin varlığı da çiftleşmeyi etkilemektedir. Şartlar sağlandığında rakip erkekler güçlü olmak ve dişiyi etkilemek için karşı karşıya gelirler. Dişi çiftleşmeye karar verirse çiftleşme meydana gelir ve dişi yılan yumurtalarını bir yuvanın içine bırakır. Yumurta dışarı çıktığı vakit dişi yuvadan ayrılır. Yılanların karşı karşıya gelmesi, çiftleşmesi ve yumurta bırakması Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 1. Doğadaki yılanlar (a) kavgaları (b) çiftleşmeleri (c) yumurta bırakma.

Yılanların tespit edilen bu içgüdüleri matematiksel olarak aşağıda verilmiştir.

4.1. Popülasyonun Oluşturulması

YAA arama işlemine rastgele popülasyonla başlar. Popülasyon Denklem 4 ile rastgele üretilir.

$$S_i = S_{min} + rand \cdot (S_{max} - S_{min}) \quad (4)$$

Burada S_i i . yılanın pozisyonu, $rand$ 0-1 arasında rastgele sayı üretici, S_{min} ve S_{max} problemdeki karar değişkenlerinin alt ve üst sınırlarını gösterir.

4.2. Popülasyonun İki Eşit Gruba Ayrılması: Erkekler ve Dişiler

Algoritmada popülasyonun eşit olarak iki gruba ayrıldığı kabul edilir. Erkek yılanlarla dişi yılanlardan oluşan iki grup matematiksel olarak şu şekilde elde edilir.

$$N_m \approx N/2 \quad (5)$$

$$N_f = N - N_m \quad (6)$$

Burada N toplam yılanlardan oluşan çözüm sayısını, N_m ile N_f sırasıyla erkekler ve dişilerin sayısını vermektedir.

4.3. Grupların Değerlendirilmesi

Her gruptaki en iyi birey değerlendirilir ve uygunluk değerleri erkek birey için $f_{best,m}$, dişi birey için de $f_{best,f}$ değişkenlerinde saklanır. Yiyecek için f_{food} değişkeni kullanılacaktır.

Daha önce ifade edildiği gibi yılanların bir araya gelmesi ve çiftleşmesi için sıcaklık ve yiyecek miktarı gibi çiftleşmeyi etkileyen bazı faktörler bulunmaktadır. İterasyon sayısı t , maksimum iterasyon sayısı T olmak üzere algoritmada sıcaklık aşağıdaki formül kullanılarak üstel şekilde düşürülür.

$$Temp = exp\left(\frac{-t}{T}\right) \quad (7)$$

Yiyecek miktarı ise her iterasyonda Denklem 8 ile hesaplanır:

$$Q = c_1 \cdot exp\left(\frac{t-T}{T}\right) \quad (8)$$

Burada $c_1 = 0.5$ 'dir.

4.4. Keşif Fazı

Bu faz yiyeceğin olmadığı fazdır. Eğer Q belli bir eşik değerin (örneğin 0.25) altındaysa algoritma çözüm uzayını keşfeder. Bu süreçte yılanlar yiyeceğin kaynağını ararlar. Bunun için popülasyondan rastgele bireyler seçilir ve bu bireylere göre yeni pozisyonlar Denklem 9 kullanılarak hesaplanır.

$$S_{i,m}(t+1) = S_{rand,m}(t) \pm c_2 \cdot A_m \cdot (S_{min} + rand \cdot (S_{max} - S_{min})) \quad (9)$$

Burada $S_{i,m}$ i . erkek bireyin pozisyonu, $S_{rand,m}$ seçilen rastgele erkek bireyin pozisyonu, $c_2 = 0.05$ ve A_m erkek bireyin yiyecek bulma yeteneğidir. A_m 'nin hesaplanması için Denklem 10 önerilmiştir.

$$A_m = exp\left(\frac{-f_{rand,m}}{f_{i,m}}\right) \quad (10)$$

Denklem 10'da $f_{rand,m}$, $S_{rand,m}$ 'nin uygunluk değeri, $f_{i,m}$ ise $S_{i,m}$ 'nin uygunluk değeridir. Denklemler 9 ve 10 benzer şekilde dişi yılanların bulunduğu gruba da uygulanır.

4.5. Sömürü Fazı

Bu fazda yiyecek bulunur. Eğer Q belli bir eşik değeri aşırsa ve sıcaklığı gösteren $Temp$ değişkeni 0.6'yı aşırsa bu durumda yılanlar Denklem 11'deki gibi kendilerini yiyeceğe doğru hareket ettirirler.

$$S_{i,j}(t+1) = S_{food} \pm c_3 \cdot Temp \cdot rand \cdot (S_{food} - S_{i,j}(t)) \quad (11)$$

Denklem 11'de $S_{i,j}$ i . erkek ya da dişi yılanın j . boyuttaki konumu, S_{food} en iyi bireyin pozisyonu ve c_3 değeri 2 olarak ayarlanan bir sabittir.

Eğer $Temp$ değeri 0.6'nın altına düşerse bu durumda yılanlar ya karşı karşıya gelirler ya da çiftleşirler. Karşı karşıya geldikleri durumda Denklem 12 kullanılarak yılanlar pozisyon değiştirir.

$$S_{i,m}(t+1) = S_{i,m}(t) + c_3 \cdot FM \cdot rand \cdot (Q \cdot S_{best,f} - S_{i,m}(t)) \quad (12)$$

Denklem 12'de $S_{i,m}$ i. erkeğin pozisyonu, $S_{best,f}$ dişi gruptaki en iyi pozisyon ve FM erkek bireyin mücadele kabiliyetidir. Benzer bir karşı karşıya geliş aynı şekilde dişi yılanlar arasında da gerçekleştiği düşünülmüş ve algoritmada Denklem 13 ile verilmiştir.

$$S_{i,f}(t+1) = S_{i,f}(t) + c_3 \cdot FF \cdot rand \cdot (Q \cdot S_{best,m} - S_{i,f}(t)) \quad (13)$$

Burada $S_{i,f}$ i. dişinin pozisyonu, $S_{best,m}$ erkek gruptaki en iyi pozisyon ve FF dişi bireyin mücadele kabiliyetidir. FM ile FF Denklemler 14 ve 15 ile hesaplanır.

$$FM = \exp\left(\frac{-f_{best,f}}{f_i}\right) \quad (14)$$

$$FF = \exp\left(\frac{-f_{best,m}}{f_i}\right) \quad (15)$$

Burada $f_{best,f}$ ile $f_{best,m}$ sırasıyla $S_{best,f}$ ve $S_{best,m}$ bireylerinin uygunluk değerleridir. Yılanların çiftleştiği durumda ise aşağıdaki denklemler ile bireyler pozisyonlarını güncellerler.

$$S_{i,m}(t+1) = S_{i,m}(t) + c_3 \cdot M_m \cdot rand \cdot (Q \cdot S_{i,f}(t) - S_{i,m}(t)) \quad (16)$$

$$S_{i,f}(t+1) = S_{i,f}(t) + c_3 \cdot M_f \cdot rand \cdot (Q \cdot S_{i,m}(t) - S_{i,f}(t)) \quad (17)$$

Burada $S_{i,m}$ erkeğin pozisyonunu, $S_{i,f}$ dişinin pozisyonunu, M_m ve M_f ise erkek ve dişinin çiftleşme kabiliyetlerini göstermektedir. Bu parametreler şu şekilde hesaplanır:

$$M_m = \exp\left(\frac{-f_{i,f}}{f_{i,m}}\right) \quad (18)$$

$$M_f = \exp\left(\frac{-f_{i,m}}{f_{i,f}}\right) \quad (19)$$

Eğer yumurta çıkarsa, bu durumda en kötü erkek ile en kötü dişi bireyin pozisyonu Denklemler 20 ve 21 ile hesaplanır.

$$S_{worst,m} = S_{min} + rand \cdot (S_{max} - S_{min}) \quad (20)$$

$$S_{worst,f} = S_{min} + rand \cdot (S_{max} - S_{min}) \quad (21)$$

Burada $S_{worst,m}$ ve $S_{worst,f}$ erkek gruptaki ve dişi gruptaki en kötü bireylerdir. Algoritmanın sözde kod tasarımı Algoritma 1'de gösterilmiştir.

Algoritma 1. YAA sözde kodu

```

1  Yılanlardan meydana gelen popülasyonu kısıtlar dahilinde rastgele oluştur, S
2  Popülasyonu iki eşit parçaya böl
3  while t < T
4    Her bir grubun ( $N_m$  and  $N_f$ ) uygunluk değerlerini hesapla
5     $f_{best,m} \leftarrow$  en iyi erkek çözüm
6     $f_{best,f} \leftarrow$  en iyi dişi çözüm
7    Temp ve Q değişkenlerini Denklemler 7 ve 8 ile güncelle
8    if Q < 0.25  % keşif fazı
9      Denklem 9 ile keşif gerçekleştir
10   else  % sömürü fazı
11     if Temp > 0.6
12       Bireyleri Denklem 11'i kullanarak güncelle
13     else
14       if rand > 0.6
15         Yılanların karşı karşıya geldiği mod: Denklem 12 ve Denklem 13'ü kullan
16       else
17         Yılanların çiftleştiği mod: Denklem 16 ve Denklem 17'i kullan
18         En kötü erkek ve dişinin pozisyonlarını Denklemler 20 ve 21 ile değiştir
19       endif
20     endif
21   endif
22 endwhile
23 En iyi çözümü görüntüle

```

Şekil 2'de gösterilen önerilen denetleyici yapısında K_p , K_i , τ ve A olmak üzere toplamda dört parametre vardır. Denetleyiciden maksimum performans elde edebilmek için bu parametrelerin en iyi şekilde ayarlanması gerekir.

Bu çalışmada bu parametreler deneme ve yanılma yoluyla değil, YAA ile optimal şekilde ayarlanmaya çalışılmıştır.

Optimizasyon işlemlerinde probleme özgü çalışan tek kısım amaç fonksiyonudur ve bu fonksiyonun tanımı elde edilen sonuçların amaca uygunluğunu önemli derece etkiler. Kontrol sistemlerinde dört tür amaç fonksiyonu kullanılmaktadır. Bunlar IAE, ISE, ITSE ve ITAE performans kriterleridir. Bu fonksiyonlar matematiksel olarak Denklem 22, Denklem 23, Denklem 24 ve Denklem 25’de tanımlanmışlardır. Bu Denklemlerde; t zamanı, T benzetim süresini, Δf_1 ve Δf_2 frekans değişimlerini ve ΔP_{tie} iki bölgeyi birbirine bağlayan iletim hattındaki güç değişimini göstermektedir. SFR çalışmalarında ITAE’nin diğer integral tabanlı hata kriterlerine göre daha iyi sonuçlar ürettiği görülmüştür [19].

$$IAE = \int_0^T (|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + |\Delta P_{tie}|). dt \quad (22)$$

$$ISE = \int_0^T [(\Delta f_1)^2 + (\Delta f_2)^2 + (\Delta P_{tie})^2]. dt \quad (23)$$

$$ITSE = \int_0^T [(\Delta f_1)^2 + (\Delta f_2)^2 + (\Delta P_{tie})^2]. t. dt \quad (24)$$

$$ITAE = \int_0^T (|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + |\Delta P_{tie}|). t. dt \quad (25)$$

Yürütülen algoritmada ITAE değerinin minimizasyonu ile salınım/sapma miktarı küçük, 0 pu referans değere en az oturma zamanı ile çabucak yerleşen cevap eğrilerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Sonuç olarak üstel PI denetleyici tasarımı problemleri kısıtlı optimizasyon problemleri olarak modellenerek çözülmeye çalışılmıştır. Optimizasyon problemindeki kısıtlar denetleyici parametrelerinin minimum ve maksimum sınırlarıdır. Optimizasyon problemi basitçe Denklem 26’daki gibi tanımlanabilir.

Aşağıdaki eşitsizlik kısıtlarını dikkate alarak ITAE değerini minimum yap

Eşitsizlik kısıtları:

$$\left. \begin{array}{l} K_p^{min} \leq K_p^* \leq K_p^{max} \\ K_i^{min} \leq K_i^* \leq K_i^{max} \\ \tau^{min} \leq \tau^* \leq \tau^{max} \\ A^{min} \leq A^* \leq A^{max} \end{array} \right\} \quad (26)$$

Denklem 26’da *min* ve *max* üst indisleri denetleyici parametrelerinin sırasıyla minimum ve maksimum sınırlarını göstermektedirler. Bu çalışmada K_p ve K_i parametreleri literatür çalışmalarına uyumlu olarak -2 ve 2 aralığında aranmıştır. τ ve A parametrelerinin alt ve üst sınırları ise 0 ve 2 olarak belirlenmiştir. Optimizasyon sonrasında en küçük ITAE değerini veren K_p^* , K_i^* , τ^* ve A^* değerleri denetleyici parametrelerinin en uygun değerleri olarak düşünülmüş ve benzetim çalışmalarında kullanılmışlardır.

5. BENZETİM SONUÇLARI

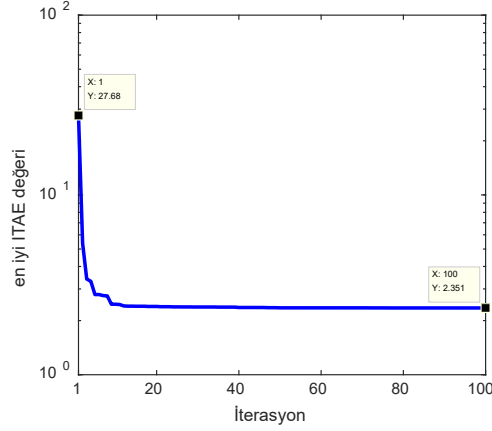
Transfer fonksiyonu Şekil 1’de gösterilen sistemde iki bölge farklı üretim tesislerine sahip olduğu için bu bölgelerde kullanılan denetleyicilerin de farklı parametrelere sahip olmaları gerekir. Bu manada toplam 8 parametrenin belli koşullar altında en iyi değerleri bulunacaktır. 1. bölgede basamak yük değişiminin %10 ($\Delta P_{D1}=0.1$ pu), diğer bölgede yük değişiminin sıfır olduğu ($\Delta P_{D2}=0$ pu) kabul edilerek YAA ile elde edilen üstel PI denetleyici parametreleri Tablo 1’de verilmiştir. Bu parametreler kullanılarak Δf_1 , Δf_2 ve ΔP_{tie} sinyallerine ait hesaplanan ITAE değeri de bu tablonun en alt satırında gösterilmiştir. Elde edilen sonuçların literatüre katkısını göstermek için daha önce yayımlanmış çalışmalardan elde edilen sonuçlar da Tablo 1’de görülmektedir.

Tablo 1. Denetleyici parametreleri ve ITAE değerleri

Denetleyici parametreleri	GA-PI [7]	ABA-PI [7]	AOA-PI [16]	YAA-üstel PI [önerilen]
K_{p1}	0.5663	0.8811	0.7395	0.2609
K_{i1}	0.4024	0.5765	0.4080	0.2333
K_{p2}	0.5127	0.7626	1.8960	1.9252
K_{i2}	0.7256	0.8307	0.9796	0.2404
τ_1	-	-	-	1.6027
A_1	-	-	-	1.7034
τ_2	-	-	-	1.2630
A_2	-	-	-	1.9780
ITAE	12.44	7.4259	3.9028	2.3511

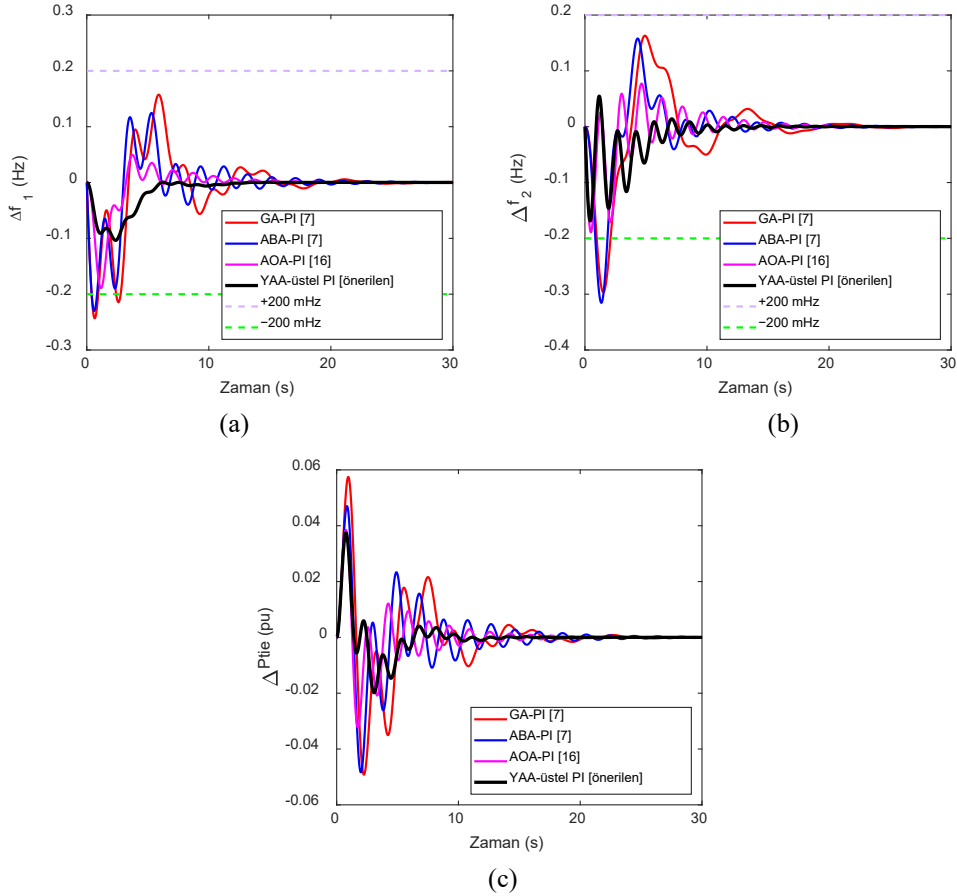
Tablo 1’de verilen ITAE değerleri incelendiğinde YAA-üstel PI denetleyicinin diğer yaklaşımlara göre daha düşük ITAE değeri sunduğu görülür ($ITAE = 2.3511$). Bu sonuç cevap eğrilerinin iyileştiği anlamına gelir. Önerilen yaklaşımdan sonra en iyi ikinci denetleyicinin AOA-PI denetleyicisi olduğu söylenebilir. ITAE kriteri bakımından en kötü sonuç GA-PI yönteminde hesaplanmıştır ($ITAE = 12.1224$).

Algoritmada popülasyon boyutu 30 ve maksimum iterasyon sayısı 100 olarak ayarlandığında elde edilen yakınsama grafiği Şekil 4’de verilmiştir. İlk iterasyon başlangıç popülasyonunu göstermektedir. Görüldüğü gibi en iyi ITAE değeri 27.68’den başlayarak 100 iterasyon sonunda 2.351 değerine kadar düşmüştür. ITAE değeri ne kadar düşerse Δf_1 , Δf_2 ve ΔP_{tie} tepkilerindeki salınım o derece azalmış olur. Buradan YAA’nın bu çalışmadaki probleme iyi bir yanıt ürettiği sonucu çıkarılabilir.



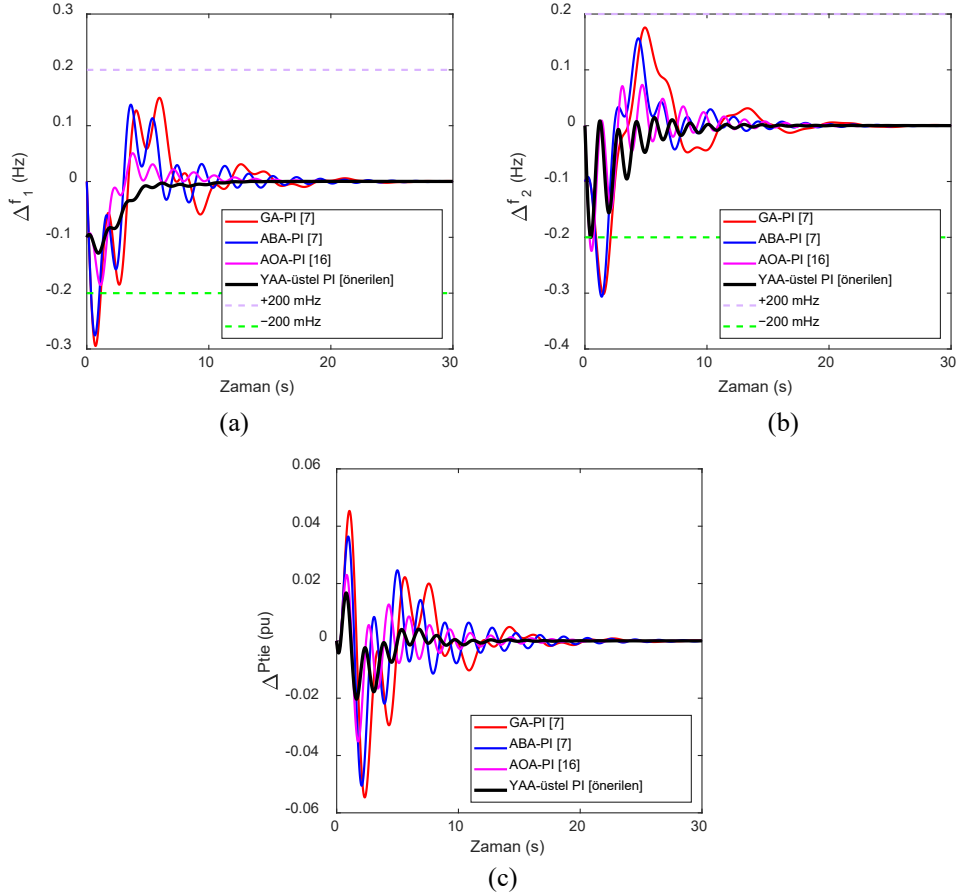
Şekil 4. Optimizasyon sürecinde YAA’nın yakınsama grafiği.

Tablo 1’de verilen denetleyici parametreleri kullanılarak benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiş ve elde edilen Δf_1 , Δf_2 ve ΔP_{tie} tepkileri [0, 30]s için Şekil 5’de verilmiştir. Şekilden açıkça anlaşılacağı üzere 1. bölgede 0.1 pu’lık yük değişimiyle önerilen yaklaşımda frekans eğrileri negatif yönde sapma göstermiş, akabinde hızlıca toparlanarak referans değere oturmuşlardır. Başka bir deyişle; artan yük miktarına karşı önce frekans düşmüş, sonrasında enerji üretim tesisleri çıkışlarındaki aktif gücü SFR ünitesinden gelen sinyallerle artırarak frekans değerini nominal değere geri getirmişlerdir. YAA-üstel PI denetleyici ile elde edilen tepkiler incelendiğinde diğerlerine göre daha hızlı toparlandıkları, daha az bir aşım ve osilasyon ile referans 0 pu değere çabucak yerleştikleri görülmüştür.



Şekil 5. 1. bölgede 0.1 pu’lık basamak yük değişimi sonrası elde edilen cevap eğrilerinin karşılaştırılması (a) Δf_1 (b) Δf_2 (c) ΔP_{tie} .

İkinci durumda iki bölgede %10'luk ($\Delta P_{D1}=\Delta P_{D2}=0.1$ pu) bir yük artışı sağlanmış ve elde edilen cevap eğrileri Şekil 6'da verilmiştir. İlk senaryodaki duruma benzer olarak YAA-üstel PI denetleyici daha iyi performans sergilemiş, bu manada Δf_1 , Δf_2 ve ΔP_{tie} sinyalleri daha az osilasyonla çabucak referans 0 pu değere oturmuşlardır.



Şekil 6. 1. bölgede ve 2. bölgede 0.1 pu'lık basamak yük değişimi sonrası elde edilen cevap eğrilerinin karşılaştırılması (a) Δf_1 (b) Δf_2 (c) ΔP_{tie} .

Şekiller 5 ve 6 dikkatli şekilde incelendiğinde literatür çalışmalarının Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliğinde belirtilen ± 200 mHz'lik toleransı ihlal ettikleri, önerilen YAA tabanlı üstel PI denetleyicisinde ise sapmaların ve değişimlerin istenen aralıkta tutulduğu görülmüştür.

6. SONUÇ

Güç sistemlerinde yükler sürekli devreye girip çıkarak frekansta ciddi değişimlere neden olur. Frekans regülasyon problemi olabildiğince hızlı çözülmelidir, aksi takdirde güç sisteminin güvenliği, güvenilirliği ve üretilen gücün kalitesi düşer. Bu ise SFR için tasarlanan denetleyiciye ve denetleyici parametrelerin en iyi şekilde belirlenmesiyle mümkündür. Parametre belirleme işlemi çalışmada optimizasyon problemi olarak düşünülmüş ve ITAE amaç fonksiyonu kullanılarak çözülmeye çalışılmıştır.

Çalışmada SFR tesisi için üstel PI denetleyicisi tasarlanmıştır. Denetleyici parametreleri deneme ve yanılma yöntemine başvurmadan YAA yaklaşımı ile elde edilmiştir. Ortaya konulan yöntemin performansı iki bölgeden meydana gelen termik ve fotovoltaik güç sistemi üzerinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürde yayımlananmış sonuçlarla aynı şartlarda karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına göre önerilen yaklaşımın diğer yöntemlere kıyasla sistem tepkilerinden hesaplanan oturma zamanı/maksimum pozitif/negatif aşım ve ITAE değerleri gibi zaman alanı performans kriterleri açısından daha iyi sonuçlar sunduğu görülmüştür. Önerilen yaklaşımla elde edilen eğriler ± 200 mHz'lik toleransı aşmadan hızlı toparlanarak arzu edilen kararlı durum değerine çabucak oturmuşlardır.

Yazar Katkıları

Bu eserin ortaya çıkmasındaki bütün işlemler yazar tarafından gerçekleştirilmiştir.

Çıkar Çatışması

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

KAYNAKÇA

- [1] P.P. Kumar, A. Kumar Yadav, A. Shastri, and P.A. Alvi, "BWOA assisted PIDF-(1+I) controller for intelligent load frequency management of standalone micro-grid", *ISA Transactions* vol. 132, pp. 387–401, 2023.
- [2] E. Yalçın, E. Çam, T. Vardar, and M. Lüy, "PID kontrolör ile iki bölgeli güç sistemlerinde yük frekans kontrolünün incelenmesi", *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, vol. 5, no. 2, pp. 7–11, 2013.
- [3] K.S.S. Ramakrishna, and T.S.Bhatti, "Sampled-data automatic load frequency control of a single area power system with multi-source power generation", *Electrical Power Components and Systems*, vol. 35 no. 8, pp. 955–980, 2007.
- [4] E. Çelik, "Performance analysis of SSA optimized fuzzy 1PD-PI controller on AGC of renewable energy assisted thermal and hydro-thermal power systems", vol. 13, pp. 4103–4122, 2022.
- [5] S. Panda, B. Mohanty, and P.K. Hota, "Hybrid BFOA-PSO algorithm for automatic generation control of linear and nonlinear interconnected power systems", *Applied Soft Computing*, vol. 13, no. 12, pp. 4718–4730, 2013.
- [6] U.K. Rout, R.K. Sahu, and S.Panda, "Design and analysis of differential evolution algorithm based automatic generation control for interconnected power system", *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 4, no. 3, pp. 409–421, 2013.
- [7] S.M. Abd-Elazim, and E.S. Ali, "Load frequency controller design of a two-area system composing of PV grid and thermal generator via firefly algorithm", *Neural Computing and Applications*, vol. 30, pp. 607–616, 2018.
- [8] S. Padhy, and S. Panda, "A hybrid stochastic fractal search and pattern search technique based cascade PI-PD controller for automatic generation control of multi-source power systems in presence of plug in electric vehicles", *CAAI Transactions on Intelligence Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 12–25, 2017.
- [9] Z.Y. Yenen, G. Bal, E. Çelik, N. Öztürk, U. Güvenç, and Y. Arya, "Yük frekans kontrolünde kullanılan ikincil denetleyicilerin optimizasyonuna yönelik yeni bir hedef fonksiyonu tasarımı", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 36, no.4, pp. 2053–2067, 2021.
- [10] B. Mohanty, S. Panda, and P.K. Hota, "Controller parameters tuning of differential evolution algorithm and its application to load frequency control of multi-source power system", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 54, no.1, pp. 77–85, 2014.
- [11] E. Çelik, "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, pp. 103407, 2020.
- [12] Sahu R.K., Panda S., Rout U.K., Sahoo D.K., Teaching learning based optimization algorithm for automatic generation control of power system using 2-DOF PID controller, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 77 (5), 287–301, 2016.
- [13] 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, no.3, pp. 67–77, 2015.
- [14] R.K Sahu, S. Panda, and G.T.C. Sekhar, "A novel hybrid PSO-PS optimized fuzzy PI controller for AGC in multi area interconnected power systems", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol.64, no.1, pp. 880–893, 2015.
- [15] S. Padhy, S. Panda, and S. Mahapatra, "A modified GWO technique based cascade PI-PD controller for AGC of power systems in presence of Plug in Electric Vehicles", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 20, no. 2, pp. 427–442, 2017.
- [16] E. Çelik, and A. Dalcalı, Performance betterment of load frequency regulation using snake search algorithm for an interconected power system incorporating thermal plant and pv power station, 5th International Antalya Scientific Research and Innovative Studies Congress, 26-28 July 2023, pp. 610–621, Antalya, Türkiye.
- [17] E. Çelik, G. Bal, N. Öztürk, E. Bekiroglu, E.H. Houssein, C. Ocak, and G. Sharma, "Improving speed control characteristics of PMDC motor drives using nonlinear PI control", *Neural Computing and Applications*, <https://doi.org/10.1007/s00521-024-09568-3>.
- [18] F.A. Hashim, and A.G. Hussien, "Snake Optimizer: A novel meta-heuristic optimization algorithm", *Knowledge-Based Systems* vol. 242, pp. 108320, 2022.
- [19] E. Çelik, N. Öztürk, Y. Arya, and C. Ocak, "(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.