

İki Alanlı Termal Güç Sisteminde AHA Tabanlı PID, FOPID ve FOPI-FOPD Denetleyicilerin Siber Saldırı Analizi

Cyber Attack Analysis of AHA Based PID, FOPID and FOPI-FOPD Controllers in Two Area Thermal Power System

*Tural Aslanov, Bora Çavdar, Ömer Öztürk,
Şeymanur Başlık, Ömür Akyazı*

Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü
Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

412267@ogr.ktu.edu.tr, boracavdar@ktu.edu.tr, 412008@ogr.ktu.edu.tr,
412010@ogr.ktu.edu.tr, oakyazi@ktu.edu.tr

Özetçe

Güç sistemlerinde üretim ve tüketim arasındaki dengesizlik frekans salınımlarına sebebiyet verir. Frekans salınımlarının yüksek olması güç sistemi elemanlarına zarar verebilir hatta sistemin çökmesine sebep olabilir. Bu sebeple yük frekans kontrolü sistem güvenliği için oldukça önemlidir. Teknolojik gelişmeler akıllı güç sistemlerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Akıllı güç sistemleri siber saldırı tehdidiyle karşı karşıyadır. Bu çalışmada, iki alanlı termal güç sisteminde yük frekans kontrolü PID, FOPID, FOPI-FOPD denetleyicileri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu denetleyicilerin parametreleri yapay sinek kuşu algoritması (AHA) kullanılarak optimize edilmektedir. AHA tabanlı PID, FOPID ve FOPI-FOPD denetleyicileri literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılarak üstün performansları ispatlanmaktadır. Son olarak bu denetleyicilerin iki farklı siber saldırı yöntemi için performansları analiz edilmektedir.

Abstract

In power systems, the imbalance between generation and consumption causes frequency oscillations. High-frequency oscillations can damage power system components and even cause the system to blackout. For this reason, load frequency control is very important for system security. Technological advancements have resulted in smart power systems. Smart power systems face the threat of cyber attacks. In this study, load frequency control in a two-area thermal power system is performed with PID, FOPID, FOPI-FOPD controllers. The parameters of these controllers are optimized using the artificial hummingbird algorithm (AHA). AHA-based PID, FOPID and FOPI-FOPD controllers are compared with the studies in the literature to demonstrate their superior performance. Finally, the performance of these controllers is analyzed for two different cyber attack methods.

1. Giriş

Modern bir elektrik güç sistemi, güç üretim merkezleri ve aboneleri arasındaki elektrik enerjisi ticaretinin en verimli şekilde ve uygun maliyette sürdürülmesini hedefler [1]. Üretilen enerjinin kesintisiz ve kararlı bir şekilde kullanıcıya ulaştırılması için üretim santrallerinin senkronizasyonu gerçekleştirilmelidir. Senkronizasyonun sağlanması önceden

belirlenmiş aynı frekans ve gerilim aralığında güç üretimi ile mümkündür. Sistemdeki beklenmedik bozulmalar veya ani yük artışı/azalışı üretilen ve tüketilen gücün eşitsizliğine sebep olur. Bu dengesizlik sistem frekansında ve bağlantı hattı gücünde salınımlarına yol açar. Sonuç olarak sistem performansı düşer ve kısa sürede önlem alınmazsa güç sistemi çökebilir. Bu güvenlik tehdidini engellemek ve sistem kararlılığını sürdürmek için yük frekans kontrolü (YFK) gereklidir [2], [3]. YFK birincil kontrol işleminde sistem frekans salınımlarını sönmülese de kalıcı durum hatası ortaya çıkar. Bu yüzden sistem frekansını istenen değer aralığına oturtmak için YFK'ya denetleyici dahil edilmiş ve ikincil kontrol sağlanmıştır [3], [4].

Literatür taraması YFK tasarımında kullanılmış doğrusal ve doğrusal olmayan çeşitli denetleyici tiplerinin olduğunu göstermiştir. Bunlara klasik oransal-integral-türev (PID) denetleyici [3], [5]–[18], türev filtreli PID denetleyici (PIDF) [8], [15], kademeli PI-PD denetleyici [11], [12], 2 serbestlik dereceli PID (2-DOF PID) denetleyici [5], kesir dereceli PID (FOPID) denetleyici [1], [14], [19], kesir dereceli PI-kesir dereceli PD (FOPI-FOPD) denetleyici [1], [20], filtreli eğimli-integral-türev (TIDF) denetleyici [9], bulanık mantık temelli PID (FPID) denetleyici ve türev filtreli FOPID (FFOPIDF) denetleyici [2] örnektir.

Daha yüksek performans elde etmek için denetleyici kazanç parametreleri sisteme en uygun şekilde ayarlanmalıdır. Bu ayarlama işlemi sezgisel olarak çeşitli optimizasyon metodları ve yapay zekâ yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilir. Güç sistemleri için YFK tasarımında meta-sezgisel algoritmaların kullanımı son yıllarda yaygınlaşmıştır [21]. Öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon (TLBO) [5], kohort istihbarat optimizasyonu (CI) [14], yayılımcı rekabetçi optimizasyon (ICA) [20], parçacık sürü optimizasyonu (PSO) [9], diferansiyel evrim (DE) [7], [9], genetik algoritma (GA) [9], yusufluk arama algoritması (DSA) [1], hibrit armoni arama ve guguk kuşu arama algoritması (HSCOA) [4], kara dul optimizasyon algoritması (BWOA) [17], kurbağa sıçrama algoritması (SFLA) [16], guguk kuşu arama algoritması ile modifiye edilmiş gri kurt optimizasyonu (MGWO-CS) [18], ateş böceği algoritması (FA) [10] ve gaz brownian hareketi optimizasyonu (GBMO) [19] bu algoritmalarından bazılarıdır.

Hızlı teknoloji gelişimi ile geçmişten günümüze güç sistemleri daha karmaşık ve akıllı hale gelmiş bu sebeple sistem kararlılığının sağlanması güçleşmiştir. Bu teknolojik gelişmeler sistemleri siber saldırı tehdidinde açık hale getirmiştir. Siber saldırılar kontrol merkezleri ve ilişim kanallarına düzenlenebilir ve bu sayede talep edilen yük

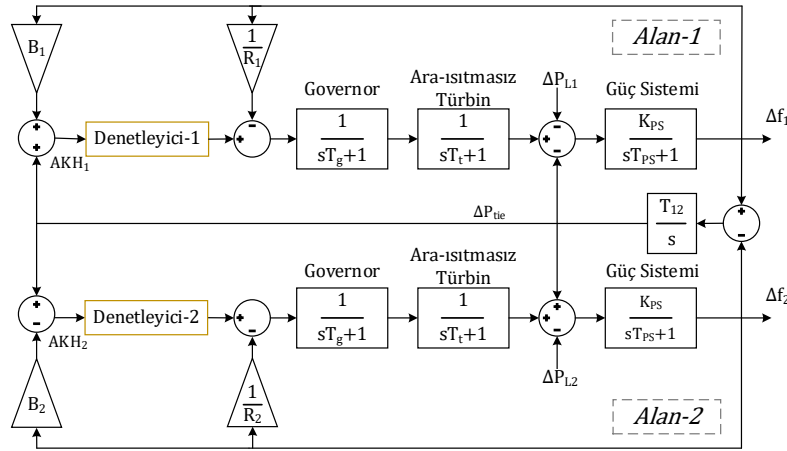
girişleri değiştirilebilir [22]. Bu durum üretim ve tüketim arasında dengesizlik oluşturarak güç sistemindeki elemanların zarar görmesine hatta sistemin çökmesine sebep olabilir.

Güç sistemlerinde YFK'nın kritik öneme sahip olması ve bu sistemlerin siber saldırılara açık hale gelmesi çalışmanın motivasyonunu oluşturur. Bu çalışmada iki alanlı termal güç sistemi için YFK tasarımında PID, FOPID ve FOPI-FOPD denetleyicileri kullanılmıştır. Bu denetleyiciler yeni bir biyo-ilhamlı algoritma olan yapay sinek kuşu algoritmasıyla (AHA) optimize edilmiştir. Optimizasyon sürecinin sonunda zaman bölgesi analiziyle elde edilen sistem geçici yanıtları literatürle karşılaştırılmıştır bu sayede denetleyicilerin ve algoritmanın başarısı ön plana çıkmıştır. AHA tabanlı denetleyicilere farklı siber saldırılar uygulanarak bu saldırılar karşısındaki performansları test edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

2. Sistem Tanıtımı (İki Alanlı Termal Güç Sistemi)

Dinamik bir sistemi incelemek ve analiz etmek için mevcut sistemin matematiksel olarak modellenmesi gerekmektedir. Her sistem bileşeni kendi özelliklerini tanımlayan uygun transfer fonksiyonu ile temsil edilir [2], [23]. Bu çalışmada incelenen sistem literatürde oldukça yaygın kullanılan iki alanlı termal güç sistemidir [1], [9], [21]. Elde edilen sonuçların literatürdeki benzer çalışmalarla adil olarak karşılaştırılması için aynı sistem parametreleri kullanılmıştır.

Şekil 1'de iki alanlı termal güç sistemi için YFK tasarımının doğrusal modeli gösterilmektedir. İki alanlı termal güç sistemi için kullanılan parametre değerleri Ek 1'de verilmiştir.



Şekil 1. İki alanlı termal güç sisteminin blok diyagramı [23]

3. Denetleyicilerin (PID, FOPID, FOPI-FOPD) Tanıtımı

Otomatik kontrol sistemleri, karmaşık ve dinamik sistemlerin verimli çalışması amacıyla referans değerlere göre sistemi denetler ve kontrol eder. Bu sistemlerde kullanılan denetleyiciler, hata değerine (gerçek değer ve referans değer arasındaki fark) göre sisteme müdahale ederek yeni giriş sinyalleri üretir. Bu süreç, hata değeri kabul edilebilir aralıktaki olana kadar devam eder [24].

Otomatik kontrol endüstrisinde basit ve kararlı yapısından dolayı PID denetleyicisi yaygın olarak kullanılan denetleyicilerden biridir [13], [16]. PID denetleyicisi oransal, integral ve türev olmak üzere üç kontrol eylemine sahiptir. PID denetleyicisinin transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir [3]:

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (1)$$

burada K_p oransal kazanç, K_I integral kazancı ve K_D türev kazancıdır [3], [13].

Podlubny tarafından önerilen FOPID denetleyicisi son yıllarda popülerliğini artırmıştır. Bu tür kesir dereceli denetleyicilerin tercih edilmesinin ana sebebi PID gibi geleneksel denetleyicilerden daha iyi performans göstermesidir [14], [19]. Ancak FOPID denetleyicisini tasarlamak PID kadar basit değildir. Çünkü bu denetleyici PID denetleyicisine ek olarak iki parametre daha içerir. FOPID denetleyicisinde K_p , K_I , K_D , λ ve μ olmak üzere beş parametre

bulunur. FOPID denetleyicisinin transfer fonksiyonu denklem 2'de gösterilmiştir.

$$G_{FOPID}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_I}{s^\lambda} + K_D s^\mu \quad (2)$$

burada λ ve μ tamsayı olmayan gerçek pozitif sayılardır.

FOPI ve FOPD denetleyicilerinin peş peşe eklenmesiyle FOPI-FOPD denetleyicisi oluşturulur ve bu denetleyicinin transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$G_{FOPI-FOPD}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = (K_p + \frac{K_I}{s^\lambda})(K_p + K_D s^\mu) \quad (3)$$

FOPID ve FOPI-FOPD denetleyicilerini tasarlamak için kesirli kalkülüs kullanılır. Denetleyici tasarımı için en sık kullanılan kesirli kalkülüs yöntemi Oustaloup yaklaşımıdır. Bant geçiren filtreye dayalı Oustaloup yaklaşım yönteminin matematiksel denklemini aşağıda verilmiştir [1], [25]:

$$s^\alpha \approx \omega_h^\alpha \prod_{k=-N}^N \frac{s + \omega_z}{s + \omega_p}, \quad \text{for } 0 < \alpha < 1 \quad (4)$$

burada N analog filtre derecesini $(2N + 1)$ belirlemek için kullanılır ve bu çalışmada 5 olarak ayarlanmıştır. ω_z sıfırları, ω_p ise kutupları temsil eder.

Bu çalışmada Oustaloup yakınsama yönteminin daha gelişmiş versiyonu olan Refined Oustaloup yakınsama yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin matematiksel denklemi aşağıda verilmiştir:

$$s^\alpha \approx \left(\frac{d}{b}\omega_h\right)^\alpha \frac{ds^2 + b\omega_h s}{d(1-\alpha)s^2 + b\omega_h s + d\alpha} \prod_{k=-N}^N \frac{s + \omega_z}{s + \omega_p} \quad (5)$$

for $0 < \alpha < 1$

burada d sabiti 9, b sabiti 10 değerine (genellikle) ayarlanır. Sıfırlar ve kutuplar aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$\omega_p = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b}\right)^{\frac{k+N+\frac{1}{2}(1+\alpha)}{2N+1}}, \omega_z = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b}\right)^{\frac{k+N+\frac{1}{2}(1-\alpha)}{2N+1}} \quad (6)$$

burada ω_h ve ω_b frekans bandı üst ve alt sınırlarıdır. Bu çalışmada frekans bandı alt sınırı 10^{-4} rad/s, üst sınırı 10^4 rad/s olarak tanımlanmıştır.

4. Yapay Sinek Kuşu Algoritması

Yapay sinek kuşu algoritması (Artificial hummingbird algorithm, AHA) sinek kuşlarının doğadaki yiyecek arama stratejilerinden ilham alan meta-sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Bir sinek kuşu eksel, diyagonal ve çok yönlü olmak üzere üç farklı uçuş becerisine sahiptir. Ayrıca, bu kuşların hedef besin kaynağını seçmeye yönelik hafıza yetenekleri, AHA algoritmasının en önemli bileşenidir. AHA optimizasyon sürecini yürütürken üç yiyecek arama davranışını taklit eder: rehberli yiyecek arama, bölgesel yiyecek arama ve göç ederek yiyecek arama [26]. Bu alt başlıkta AHA'nın temel bileşenleri ve matematiksel modeli kısaca açıklanmıştır.

Bir sinek kuşu hedef besin kaynağına üç farklı uçuş tekniği kullanarak gidebilir: eksel uçuş, diyagonal uçuş ve çok yönlü uçuş. Yiyecek ararken, beslenirken ve avcılardan kaçarken bu üç uçuş becerisi sinek kuşlarına kolaylık sağlar. Diğer kuşlardan farkı, bir sinek kuşunun eksel ve diyagonal uçuş tekniğinde usta olmasıdır. AHA algoritmasında bir yön değiştirme vektörü modellenir. Bu vektör bir sinek kuşunun d boyutlu bir arama uzayında hedef besin kaynağına hangi uçuş tekniği ile varacağına karar verir [26].

Eksel uçuşün matematiksel modeli aşağıdaki gibidir:

$$D^{(i)} = \begin{cases} 1 & \text{if } i = \text{randi}([1, d]) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, d \quad (7)$$

Diyagonal uçuşün matematiksel modeli aşağıdaki gibidir:

$$D^{(i)} = \begin{cases} 1 & \text{if } i = P(j), j \in [1, k], \\ P = \text{randperm}(k), i = 1, 2, \dots, d \\ k \in [2, \lceil r_1 \cdot (d - 2) \rceil + 1] \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

Çok yönlü uçuşün matematiksel modeli aşağıdaki gibidir:

$$D^{(i)} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, d \quad (9)$$

burada $\text{randi}([1, d])$ 1'den d 'ye kadar tam sayılardan oluşan bir vektördür, $\text{randperm}(k)$ 1'den k 'ya kadar rastgele tam sayı permütasyonu üretir ve r_1 0 ile 1 arasında rastgele bir sayıdır [26], [27].

Ziyaret tablosu: Ziyaret tablosu bir sinek kuşunun her besin kaynağını kaç yineleme boyunca ziyaret etmediğini takip eder. Tablodaki değeri en yüksek olan besin kaynağı, en uzun süre ziyaret edilmeyen besin kaynağıdır. Dolayısıyla, en çok nektar bu tablodaki en yüksek değere sahip besin kaynağında birikir. Bir sonraki yinelemede sinek kuşu bu tabloya göre en yüksek nektara sahip besin kaynağına yönelir. Her yineleme sonunda ziyaret tablosu güncellenir. Rehberli yiyecek arama aşamasında her bir sinek kuşu kendi hedef besin kaynağını bu tablodan seçebilir [26].

Rehberli yiyecek arama: AHA algoritmasında her sinek kuşu ziyaret tablosundan kendi hedef besin kaynağını belirler ve ona doğru ilerlemeyi planlar. Burada hedef besin kaynağı

nektar doldurma oranı en yüksek besin kaynağıdır. Rehberli yiyecek aramanın matematiksel modeli aşağıdaki gibidir [28]:

$$v_i(t+1) = x_{i,tar}(t) + a \cdot D \cdot (x_i(t) - x_{i,tar}(t)) \quad (10)$$

burada $x_i(t)$ i 'inci sinek kuşunun bulunduğu besin kaynağının t zamanındaki konumu, $x_{i,tar}(t)$ i 'inci sinek kuşunun ziyaret etmeyi planladığı hedef besin kaynağının konumu ve a normal dağılıma sahip rehber arama faktörüdür. i 'inci besin kaynağının konumu aşağıdaki denklem ile güncellenir [26]:

$$x_i(t+1) = \begin{cases} x_i(t) & f(x_i(t)) \leq f(v_i(t+1)) \\ v_i(t+1) & f(x_i(t)) > f(v_i(t+1)) \end{cases} \quad (11)$$

burada f uygunluk değerini temsil eder [26].

Bölgesel yiyecek arama: Bölgesel yiyecek arama aşaması her sinek kuşunun kendi komşu bölgesindeki besin kaynaklarını ziyaret ettiği aşamadır. Bu aşamada yerel bir arama yapılır ve mevcut besin kaynağından daha fazla nektar doldurma oranına sahip bir kaynak bulunursa besin kaynağının pozisyonu güncellenir. Bölgesel yiyecek aramanın matematiksel modeli aşağıdaki gibidir [26], [28]:

$$v_i(t+1) = x_i(t) + b \cdot D \cdot x_i(t) \quad (12)$$

burada b normal dağılıma sahip bölgesel arama faktörüdür [26].

Göç ederek yiyecek arama: AHA algoritmasında bir sinek kuşunun beslendiği kaynak yetersiz ise bu sinek kuşu göç ederek farklı bölgelerdeki kaynaklara yönelir. Bu aşamada bir göç katsayısı belirlenir. Yineleme sayısı, göç katsayısının önceden ayarlanmış değerini aşarsa, en az yiyeceğin bulunduğu besin kaynağındaki sinek kuşu farklı bir bölgeye göç eder. Göç ederek yiyecek aramanın matematiksel modeli aşağıdaki gibidir [26]:

$$x_{wor}(t+1) = Low + rand \cdot (Up - Low) \quad (13)$$

burada Low ve Up d boyutlu bir problem için alt ve üst sınırlar, x_{wor} en kötü nektar doldurma oranına sahip besin kaynağının konumu ve $rand$ 0 ile 1 arasında rastgele bir sayıdır [26].

5. Amaç Fonksiyonu (ITAE)

Optimizasyon problemi genellikle bir minimizasyon problemi olarak tasarlanır. Optimizasyon problemi için belirlenecek amaç fonksiyonu sistem performansını doğrudan etkileyeceği için dikkatli seçilmelidir. YFK tasarımlarında hata tabanlı ITAE, ITSE, ISE ve IAE amaç fonksiyonları kullanılsa da ITAE amaç fonksiyonu oturma süresini minimize etmedeki ve maksimum aşmayı azaltmadaki başarısından dolayı ön plana çıkmaktadır [1], [4]. Bu çalışmada da denetleyici parametrelerinin uygun şekilde tasarlanması için amaç fonksiyonu olarak ITAE tercih edilmiştir. YFK tasarımında kullanılan ITAE amaç fonksiyonunun matematiksel ifadesi aşağıda gösterildiği gibidir:

$$ITAE = \int_0^{t_{sim}} t \cdot (|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + |\Delta P_{tie}|) \cdot dt \quad (14)$$

6. Siber Saldırı

Bu bölümde sahte bir yük girişi sinyali oluşturmak için iki farklı siber saldırı yöntemi ele alınmaktadır. Bu yöntemler rezonans saldırı (RezS) ve rastgele saldırı (RasS) olarak adlandırılır. Bu yöntemlerden RezS sistem bilgisine ihtiyaç duyarken RasS herhangi bir bilgiye ihtiyaç duymaz. İki saldırı yönteminde de yük değişikliği kabul edilebilir sınırlar içinde olmalıdır aksi takdirde saldırı (sahte yük girişi) tespit edilebilir. Yük dinamik aralığı dikkate alınarak saldırının büyüklüğü 0.3 p.u. olarak belirlenmiştir [22]. Saldırıların amacı frekans

değişim oranında (RoCoF) büyük değişiklikler meydana getirerek RoCoF koruma rölelerinin açmasını sağlamaktır. Bu sayede güç sistemi elemanları sistemden ayrılır ve bu sayede büyük elektrik kesintilerine yol açılabilir. Güç sistemlerinde RoCoF koruma röleleri, sistemin ataletine bağlı olarak, genellikle 0.1-1.0 Hz/s aralığında devreye girecek şekilde ayarlanır [29].

RezS için bir rezonans kaynağı kullanılmalıdır. Bu çalışmada rezonans kaynağı olarak güç sistemindeki frekans çıktısı kullanılır. Aşağıda RezS için matematiksel model verilmiştir:

$$\Delta P_{L_1} = -0.3 \text{sign}(\Delta f'_1) \quad (15)$$

RasS için ise rastgele bir saldırı modeli oluşturulur. Saldırının frekansını saldırgan rastgele olarak belirleyebilir. Aşağıda RasS için matematiksel model verilmiştir:

$$\Delta P_{L_2} = -0.3 \text{sign}(\Delta(\omega t)), \quad \omega = 2\pi f, \quad f = 3 \quad (16)$$

İki saldırıda da Signum fonksiyonu kullanılarak saldırılar modellenir. Signum fonksiyonu bilindiği üzere -1, 0 ve +1 değerlerini alır. Bu sebeple saldırının genliğini ayarlamak için tespit edilemeyecek en büyük saldırı genliği (0.3 p.u.) seçilmelidir.

7. Simülasyon Sonuçları ve Tartışmalar

Bu bölümde önerilen AHA algoritması ile tasarlanmış denetleyicilerin (PID, FOPID ve FOPI-FOPD) performansını değerlendirmek için uygulanan analiz sonuçları gösterilmiş ve literatürde (aynı sistem parametrelerine sahip) çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

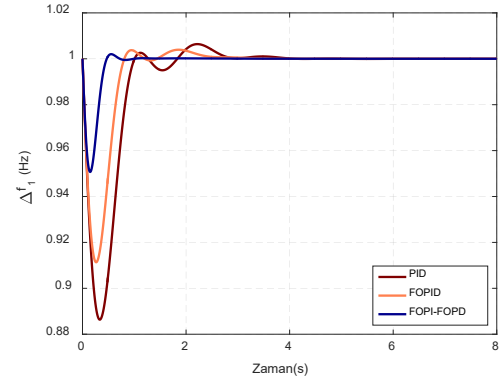
Tablo 1 alan-1 %10 bozucu yük (ΔP_{L_1}) altındayken AHA algoritmasıyla optimize edilmiş denetleyici parametrelerini verir. Optimizasyon sırasında denetleyicilerin kazanç değeri aralıkları PID için $0.001 < K_p < 2$, $0.001 < K_i < 2$, $0.001 < K_d < 2$, FOPID için $0.001 < K_p < 3$, $0.001 < K_i < 3$, $0.001 < K_d < 3$, $0.001 < \mu < 1.5$, $0.001 < \lambda < 1.5$, FOPI-FOPD için $0.001 < K_{p1} < 3$, $0.001 < K_{p2} < 3$, $0.001 < K_i < 3$, $0.001 < K_d < 3$, $0.001 < \mu < 1.5$, $0.001 < \lambda < 1.5$ olarak alınmıştır.

Tablo 1. Alan-1 %10 yük altındayken optimize edilmiş denetleyici parametreleri

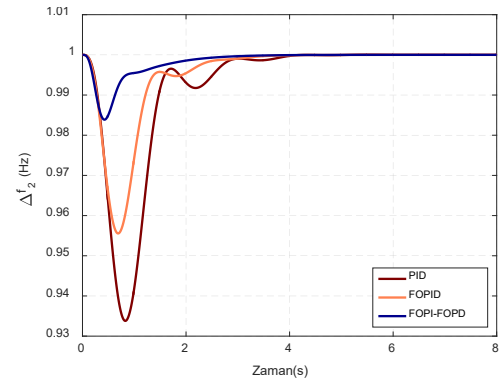
Denetleyici parametreleri	PID	FOPID	FOPI-FOPD
K_{p1}	1.0958	2.1195	2.1856
K_{p2}	-	-	2.9986
K_i	1.9999	2.9969	2.9982
K_d	0.4001	0.5911	0.4977
μ	-	0.9999	0.9988
λ	-	1.0434	1.1775

7.1. Zaman Bölgesi Analizi

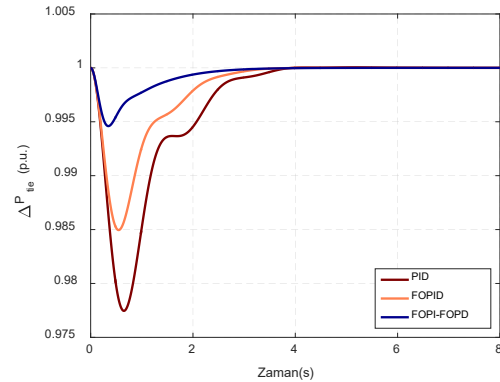
Tasarlanan üç farklı denetleyicinin alan-1 %10 bozucu yük altındayken alan-1'deki frekans değişimi (Δf_1), alan-2'deki frekans değişimi (Δf_2) ve bağlantı hattı güç değişimine (ΔP_{tie}) etkisi sırasıyla Şekil 2, 3 ve 4'te gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar FOPI-FOPD denetleyicisinin salınımları sönümlemede PID ve FOPID denetleyicilerinden daha başarılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. Alan-1 %10 yük altındayken alan-1'deki frekans değişiminin dinamik yanıtı



Şekil 3. Alan-1 %10 yük altındayken alan-2'deki frekans değişiminin dinamik yanıtı



Şekil 4. Alan-1 %10 yük altındayken bağlantı hattı güç değişiminin dinamik yanıtı

Simülasyon sonucunda elde edilen Δf_1 , Δf_2 ve ΔP_{tie} için yerleşme süreleri ve ITAE amaç fonksiyonu değeri literatürdeki aynı sistem için tasarlanan farklı denetleyicilerle karşılaştırılmıştır. Tablo 2'den anlaşılacağı gibi AHA algoritmasıyla tasarlanan FOPI-FOPD ve FOPID denetleyicisi son yıllarda yapılmış çalışmalardan daha iyi performans göstermiştir. Ayrıca AHA algoritmasıyla tasarlanan denetleyicisi karşılaştırılan çoğu çalışmadan daha başarılı sönümleme becerisine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 2. Test sonuçları ile literatürde yapılmış çalışmaların karşılaştırmalı analizi

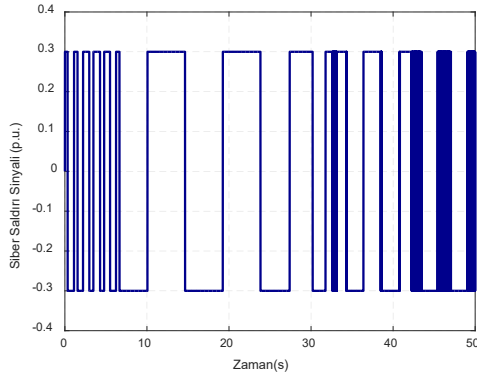
Denetleyici tipi	ITAE	Yerleşme zamanı (s) (± 0.002)		
		Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}
COA: PI ² DF [2]	0.0874	1.93	2.93	2.24
HSCOA: PID [4]	0.1247	2.36	2.75	2.42
TLBO: PID [5]	0.2452	4.84	5.13	3.03
DE: PID [9]	0.3391	3.58	4.85	4.20
FA: PID [10]	0.4714	4.25	5.49	4.78
PSO: PID [9]	0.4854	5.30	6.41	5.03
GA: PID [9]	0.4967	6.93	6.74	4.87
AHA: FOPI-FOPD	0,0191	0.55	1.75	1.10
AHA: FOPID	0.0686	2.21	2.36	2.02
AHA: PID	0.1305	2.65	2.75	2.48

7.2. Siber Saldırı Analizi

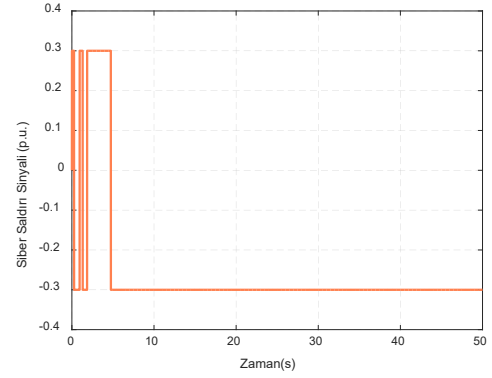
Bu bölümde tasarlanan denetleyici performansının siber saldırı altındaki performansı ölçülmüştür. RezS ve RasS olmak üzere iki farklı siber saldırı ele alınarak bu saldırıların ürettiği sahte yük girişleri iki alanlı termal güç sisteminde birinci alana uygulanmıştır.

7.2.1 Rezonans Saldırısı (RezS)

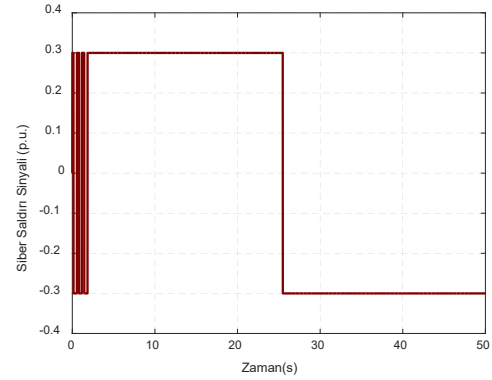
RezS yönteminde iki alanlı termal güç sisteminde üç farklı denetleyici kullanıldığı için her denetleyicinin doğasına özgü saldırı modeli oluşturulur. Bu modeller oluşturulurken rezonans kaynağı olarak birinci bölgenin frekansı kullanılır. PID, FOPID ve FOPI-FOPD için oluşturulan RezS modelleri sırasıyla Şekil 5, 6 ve 7'de verilmektedir.



Şekil 5. PID için RezS modeli



Şekil 6. FOPID için RezS modeli



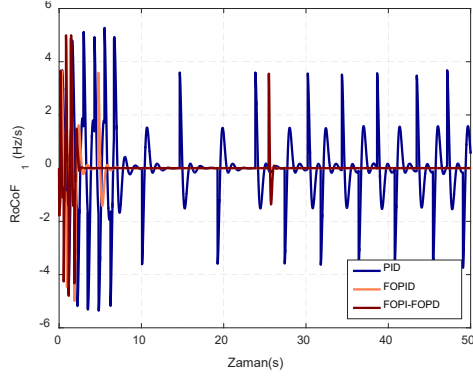
Şekil 7. FOPI-FOPD için RezS modeli

RezS saldırıları sonucu PID, FOPID ve FOPI-FOPD denetleyici kullanılan sistemlerin birinci ve ikinci alandaki RoCoF performansları sırasıyla Şekil 8 ve 9'da verilmektedir. Birinci alandaki (saldırının düzenlendiği alan) RoCoF maksimum değerlerinin ikinci alandakilere göre yaklaşık 3-4 kat büyük olduğu Şekil 8 ve 9'dan açıkça görülmektedir. RoCoF sınırı 1.0 Hz/s olarak seçilirse sadece ikinci bölgedeki RoCoF maksimum değerinin bu sınırı aşmadığı diğer durumlarda bu sınırın aşıldığı görülmektedir. Tablo 3 RezS 0.3 p.u. saldırı büyüklüğündeki RoCoF maksimum değerlerini vermektedir. Ayrıca Tablo 3 denetleyicilerin hangi saldırı büyüklüğüne kadar dayanabileceğini (RoCoF rölelerini devreye sokmayacağı) yani 1.0 Hz/s RoCoF sınırını aşmayan saldırı büyüklüğünü göstermektedir.

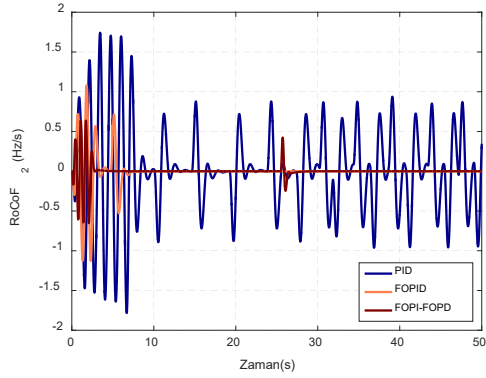
Tablo 3. RezS için RoCoF değerleri

Denetleyici	Alan	Maks. RoCoF değeri (Hz/s)	Maks. saldırı büyüklüğü
PID	Alan-1	5.2775	0.056
	Alan-2	1.7421	
FOPID	Alan-1	4.8646	0.061
	Alan-2	1.0793	
FOPI-FOPD	Alan-1	4.9931	0.060
	Alan-2	0.6376	

Tablo 3 incelendiğinde RezS karşısında PID denetleyicisinin FOPID ve FOPI-FOPD denetleyicisine göre performansının geri kaldığı sonucuna varılır.



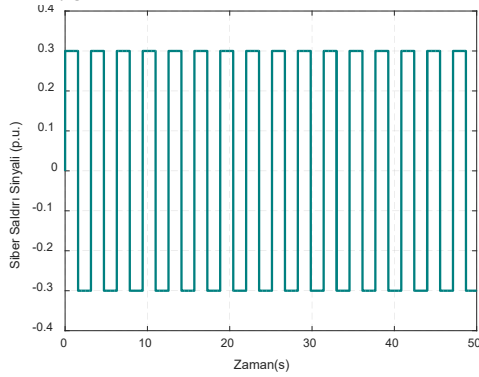
Şekil 8. RezS sonucunda birinci alan RoCoF'u



Şekil 9. RezS sonucunda ikinci alan RoCoF'u

7.2.2 Rastgele Saldırı (RasS)

RasS yöntemi ile sistem bilgisine ihtiyaç duymadan rastgele bir saldırı düzenlenir. Düzenlenen saldırı tüm sistemlere uygulanır. RasS modeli Şekil 10'da verilmiştir.



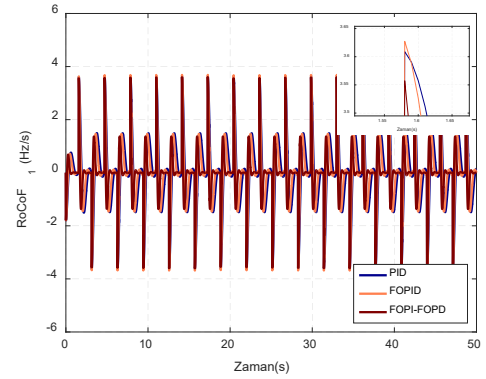
Şekil 10. PID, FOPID, FOPI-FOPD için RasS modeli

RasS saldırıları sonucu PID, FOPID ve FOPI-FOPD denetleyici kullanılan sistemlerin birinci ve ikinci alandaki RoCoF performansları sırasıyla Şekil 11 ve 12'de verilmektedir. Bu saldırı modelinde tüm sistemlerde birinci alanda RoCoF değerinin sınırı (1.0 Hz/s) aştığı ikinci alanda ise sınırın aşmadığı görülmektedir. Tablo 4 0.3 p.u. büyüklüğündeki saldırı için maksimum RoCoF değerlerini ve sınırların aşılmadığı en maksimum saldırı değerini vermektedir.

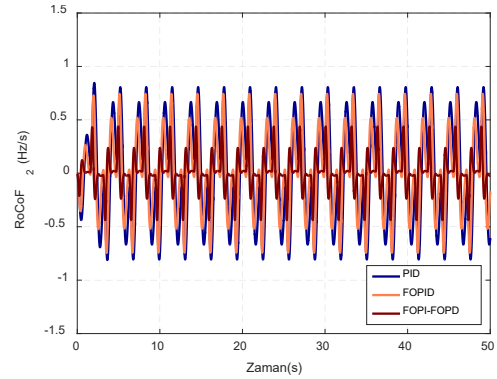
Tablo 4. RasS için RoCoF değerleri

Denetleyici	Alan	Maks. RoCoF değeri (Hz/s)	Maks. saldırı büyüklüğü
PID	Alan-1	3.6134	0.083
	Alan-2	0.8459	
FOPID	Alan-1	3.6867	0.081
	Alan-2	0.7439	
FOPI-FOPD	Alan-1	3.6011	0.083
	Alan-2	0.4376	

Tablo 4 incelendiğinde sonuçlar birbirine yakın olsa da rastgele saldırıdan en çok etkilenenin FOPID denetleyiciye sahip sistem olduğu görülmektedir.



Şekil 11. RasS sonucunda birinci alan RoCoF'u



Şekil 12. RasS sonucunda ikinci alan RoCoF'u

8. Sonuçlar

Bu çalışmada iki bölgeli termal güç sisteminde PID, FOPID ve FOPI-FOPD denetleyicileri kullanılarak YFK gerçekleştirilmiştir. Bu denetleyicilerin parametreleri ITAE amaç fonksiyonu kullanılarak AHA ile optimize edilmiştir. Elde edilen sistem geçici yanıtları literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılarak AHA tabanlı denetleyicilerin üstünlüğü ispatlanmıştır. Son olarak denetleyicilerin farklı türdeki siber saldırılar karşısındaki performansı analiz edilmiştir. Analiz sonucuna göre RezS yönteminin RoCoF üzerindeki etkisinin RasS yöntemine göre daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Maksimum saldırı büyüklükleri göz önüne alındığında RezS yönteminde en zayıf denetleyici PID (0.056) olurken RasS yönteminde denetleyici performansları birbirine yakındır.

Ek 1. İki alanlı termal güç sistemi parametre değerleri

$P_R=2000$ MW, $P_L=1000$ MW, $f=60$ Hz, $B_1=B_2=0.425$ p.u MW/Hz, $R_1=R_2=2.4$ Hz/pu, $T_g=0.08$ s, $T_i=0.3$ s, $K_{PS}=120$ Hz/pu, $T_{ps}=20$ s, $T_{12}=0.545$ p.u.

Kaynakça

- [1] E. Çelik, "Design of new fractional order PI-fractional order PD cascade controller through dragonfly search algorithm for advanced load frequency control of power systems," *Soft comput.*, vol. 25, no. 2, pp. 1193–1217, Jan. 2021, doi: 10.1007/s00500-020-05215-w.
- [2] M. Gheisarnejad and M. H. Khooban, "Design an optimal fuzzy fractional proportional integral derivative controller with derivative filter for load frequency control in power systems," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 41, no. 9, pp. 2563–2581, Jun. 2019, doi: 10.1177/0142331218804309.
- [3] J. M. Pearce *et al.*, "Load Frequency Control Assessment of a PSO-PID Controller for a Standalone Multi-Source Power System," 2023, doi: 10.3390/technologies.
- [4] M. Gheisarnejad, "An effective hybrid harmony search and cuckoo optimization algorithm based fuzzy PID controller for load frequency control," *Applied Soft Computing Journal*, vol. 65, pp. 121–138, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.asoc.2018.01.007.
- [5] R. K. Sahu, S. Panda, U. K. Rout, and D. K. Sahoo, "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*, vol. 77, pp. 287–301, May 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.11.082.
- [6] B. K. Sahu, T. K. Pati, J. R. Nayak, S. Panda, and S. K. Kar, "A novel hybrid LUS-TLBO optimized fuzzy-PID controller for load frequency control of multi-source power system," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 74, pp. 58–69, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.07.020.
- [7] 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, pp. 77–85, 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2013.06.029.
- [8] D. Guha, P. K. Roy, and S. Banerjee, "Study of differential search algorithm based automatic generation control of an interconnected thermal-thermal system with governor dead-band," *Applied Soft Computing Journal*, vol. 52, pp. 160–175, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.asoc.2016.12.012.
- [9] R. Kumar Sahu, S. Panda, A. Biswal, and G. T. Chandra Sekhar, "Design and analysis of tilt integral derivative controller with filter for load frequency control of multi-area interconnected power systems," *ISA Trans*, vol. 61, pp. 251–264, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.isatra.2015.12.001.
- [10] S. Padhan, R. K. Sahu, and S. Panda, "Application of firefly algorithm for load frequency control of multi-area interconnected power system," *Electric Power Components and Systems*, vol. 42, no. 13, pp. 1419–1430, Oct. 2014, doi: 10.1080/15325008.2014.933372.
- [11] 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, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.jestch.2017.03.004.
- [12] 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 Trans Intell Technol*, vol. 2, no. 1, pp. 12–25, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.trit.2017.01.002.
- [13] B. Dhanasekaran, S. Siddhan, and J. Kaliannan, "Ant colony optimization technique tuned controller for frequency regulation of single area nuclear power generating system," *Microprocess Microsyst*, vol. 73, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.micpro.2019.102953.
- [14] D. Murugesan, K. Jagatheesan, P. Shah, and R. Sekhar, "Fractional order PI λ D μ controller for microgrid power system using cohort intelligence optimization," *Results in Control and Optimization*, vol. 11, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.rico.2023.100218.
- [15] R. K. Khadanga, A. Kumar, and S. Panda, "A novel modified whale optimization algorithm for load frequency controller design of a two-area power system composing of PV grid and thermal generator," *Neural Comput Appl*, vol. 32, no. 12, pp. 8205–8216, Jun. 2020, doi: 10.1007/s00521-019-04321-7.
- [16] R. K. Khadanga, A. Kumar, and S. Panda, "A hybrid shuffled frog-leaping and pattern search algorithm for load frequency controller design of a two-area system composing of PV grid and thermal generator," *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, vol. 33, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.1002/jnm.2694.
- [17] P. Dahiya and A. K. Saha, "Frequency Regulation of Interconnected Power System Using Black Widow Optimization," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 25219–25236, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3155201.
- [18] R. K. Khadanga, A. Kumar, and S. Panda, "A modified Grey Wolf Optimization with Cuckoo Search Algorithm for load frequency controller design of hybrid power system," *Appl Soft Comput*, vol. 124, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.asoc.2022.109011.
- [19] A. Zamani, S. M. Barakati, and S. Yousofi-Darmian, "Design of a fractional order PID controller using GBMO algorithm for load-frequency control with governor saturation consideration," *ISA Trans*, vol. 64, pp. 56–66, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.isatra.2016.04.021.
- [20] M. Cui, Y. Zhao, P. Cao, Y. Tang, and Y. Lu, "Load frequency control of interconnected hydrothermal power system based on FOPI + FOPD controller," *Int J Dyn Control*, 2023, doi: 10.1007/s40435-023-01212-7.
- [21] E. Sahin, "Design of an Optimized Fractional High Order Differential Feedback Controller for Load Frequency Control of a Multi-Area Multi-Source Power System with Nonlinearity," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 12327–12342, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2966261.

- [22] Y. Wu, Z. Wei, J. Weng, X. Li, and R. H. Deng, "Resonance attacks on load frequency control of smart grids," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 9, no. 5, pp. 4490–4502, Sep. 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2661307.
- [23] E. Sahin, "Design of an Optimized Fractional High Order Differential Feedback Controller for Load Frequency Control of a Multi-Area Multi-Source Power System with Nonlinearity," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 12327–12342, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2966261.
- [24] Y. V. Hote and S. Jain, "PID controller design for load frequency control: Past, Present and future challenges," in *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier B.V., Jan. 2018, pp. 604–609. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.06.162.
- [25] A. Oustaloup, F. Levron, B. Mathieu, and F. M. Nanot, "Frequency-Band Complex Noninteger Differentiator: Characterization and Synthesis," 2000.
- [26] W. Zhao, L. Wang, and S. Mirjalili, "Artificial hummingbird algorithm: A new bio-inspired optimizer with its engineering applications," *Comput Methods Appl Mech Eng*, vol. 388, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.cma.2021.114194.
- [27] A. Fathy, "A novel artificial hummingbird algorithm for integrating renewable based biomass distributed generators in radial distribution systems," *Appl Energy*, vol. 323, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119605.
- [28] M. Shadman Abid, H. J. Apon, K. A. Morshed, and A. Ahmed, "Optimal Planning of Multiple Renewable Energy-Integrated Distribution System With Uncertainties Using Artificial Hummingbird Algorithm," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 40716–40730, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3167395.
- [29] H. K. Kargar and J. Mirzaei, "New Method for Islanding Detection of Wind Turbines."