

PAPER DETAILS

TITLE: İki Bölgele Termik Güç Sistemi ve Fotovoltaik Güç Sisteminin Yük-Frekans Denetimi İçin
1PDF-PI denetleyici ile Frekans Regölasyonu

AUTHORS: Mehmet Karayel,Emre Çelik

PAGES: 498-510

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/3948523>

İki Bölge Termik ve Fotovoltaik Güç Sisteminin Yük-Frekans Denetimi için 1PDF-PI Denetleyici Tasarımı

Mehmet KARAYEL^{1*}, Emre ÇELİK²

¹Çankırı Karatekin Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Çankırı, Türkiye

²Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Düzce, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22/05/2024
Düzeltilme: 31/05/2024
Kabul: 02/06/2024

Anahtar Kelimeler

Yük-Frekans Kontrolü
1PDF-PI Denetleyici
Ara Isıtımlı Termik Güç
Santrali
Fotovoltaik Güneş Enerji
Sistemi
Stokastik Fraktal Arama

Article Info

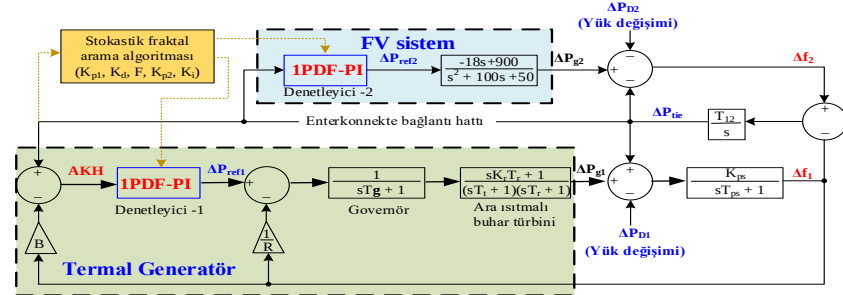
Research article
Received: 22/05/2024
Revision: 31/05/2024
Accepted: 02/06/2024

Keywords

Load-Frequency Control
1PDF-PI Controller
Reheat Thermal Power
Plant
Photovoltaic Solar Energy
System
Stochastic Fractal Search

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, güç sistemlerinde yük frekans kontrolü (YFK) için birbirine eklemeli (kaskat) bir filtreli oransal türev (1PDF)-oransal integral (PI) denetleyici tanıtılmaktadır. 1PDF-PI denetleyici parametrelerinin optimum değerlerinin bulunması için stokastik fraktal arama (SFA) algoritmasından faydalanılmıştır. / In this study, a cascaded filtered proportional-derivative (1PDF)-proportional-integral (PI) controller is introduced for load frequency control (LFC) in power systems. The stochastic fractal search (SFS) algorithm has been utilized to find the optimal values of the 1PDF-PI controller parameters.



Şekil A: İki bölge hibrit güç sistemi transfer fonksiyonu modeli / Figure A: Two-area hybrid power system transfer function model

Önemli noktalar (Highlights)

- YFK denetimi için yeni bir denetleyici tasarlanmıştır. / A new controller has been designed for Load Frequency Control.
- Önerilen denetleyici parametrelerinin en uygun değerlerinin stokastik fraktal arama algoritması ile bulunmuştur. / The optimal values of the proposed controller parameters were determined using the Stochastic Fractal Search (SFS) algorithm.
- Önerilen denetleyici performansı farklı yük değişimlerinde literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. / The performance of the proposed controller was compared with similar studies in the literature under various load changes.

Amaç (Aim): Farklı üretim ve tüketim tesislerinin bulunduğu enterkonnekte güç sistemlerinde anlık yük değişimine karşılık meydana gelen frekans ile bağlantı hattı güç sapmalarının hızlı ve düşük salınımlarla kontrol edilebilen bir denetleyici tasarımı amaçlanmıştır. / The aim of this study is to design a controller that can quickly and with low oscillations control the frequency and tie-line power deviations caused by instantaneous load changes in interconnected power systems with different generation and consumption facilities.

Özgünlük (Originality): Bu çalışmada, eklemeli(kaskat) ve filtreli yapısı ile yüksek çıkış tepkisine sahip, gürültüye karşı sağlam ve güvenilir bir denetleyici elde edilmiştir. / In this study, a controller with a cascaded and filtered structure has been developed, which exhibits high output response, robustness against noise, and reliability.

Bulgular (Results): Önerilen denetleyici performansı farklı yük değişimlerinde test edilmiş, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmış ve cevap eğrilerinde çok önemli iyileştirme sağladığı görülmüştür. / The performance of the proposed controller was tested under different load variations and compared with similar studies in the literature. It was observed that it provided significant improvements in the response curves.

Sonuç (Conclusion): Enterkonnekte güç sistemlerinde yük değişimlerinde etkili ve hızlı cevap tepkisine sahip bir denetleyici tasarlanmıştır. Aynı zamanda sistemde olası parametre değişimleri veya gürültü sinyallerine karşı denetleyicinin sağlam ve kararlı olduğu görülmektedir. / A controller with an effective and rapid response to load variations in interconnected power systems has been designed. Additionally, the controller was found to be robust and stable against possible parameter changes or noise signals in the system.



İki Bölge Termik ve Fotovoltaik Güç Sisteminin Yük-Frekans Denetimi için 1PDF-PI Denetleyici Tasarımı

Mehmet KARAYEL^{1*} , Emre ÇELİK²

¹Çankırı Karatekin University, Vocational School, Department of Electrical and Energy, Çankırı, Turkey

²Düzce University, Engineering Faculty, Department of Electrical and Electronics Engineering, Düzce, Turkey

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22/05/2024
Düzeltilme: 31/05/2024
Kabul: 02/06/2024

Anahtar Kelimeler

Yük-Frekans Kontrolü
1PDF-PI Denetleyici
Ara Isıtılmalı Termik Güç
Santrali
Fotovoltaik Güneş Enerji
Sistemi
Stokastik Fraktal Arama

Öz

Dünyada hızla artan nüfus ve sanayileşme nedeniyle enerji ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Artan enerji ihtiyacını karşılamak için farklı enerji üretim kaynaklarının enterkonnekte güç sistemlerine birlikte bağlanması zorunlu hale gelmektedir. Güç sistemlerinde üretilen enerjinin kalitesini ve güvenilirliğini belirleyen en önemli parametrelerden birisi frekanstır. Enterkonnekte sistemlerde herhangi bir alanda meydana gelen yük değişimi, sisteme bağlı olan diğer alanlarda da frekans ve güç değerlerinin değişmesine neden olmaktadır. Bu çalışmada, güç sistemlerinde yük frekans kontrolü (YFK) için birbirine eklemeli (kaskat) bir filtreli oransal türev (1PDF)-oransal integral (PI) denetleyici tanıtılmaktadır. 1PDF-PI denetleyici parametrelerinin (K_{p1} , K_d , F , K_{p2} , K_i) optimum değerlerinin bulunması için stokastik fraktal arama (SFA) algoritmasından faydalanılmıştır. Optimizasyon sırasında amaç fonksiyonu olarak alanların frekans ile bağlantı hattı güç sapmalarının mutlak değerlerinin zamanla çarpımının integrali kullanılmıştır. SFA tabanlı 1PDF-PI denetleyicinin literatüre katkısını doğrulamak için benzer çalışmalarla karşılaştırmalar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar önerilen yöntemin sistem performansı üzerinde istenmeyen salınımlar, oturma süresi ve ITAE değeri bakımından önemli derecede iyileşmeler sağladığını göstermiştir.

1PDF-PI Controller Design for Load Frequency Control of a Two-area Thermal and Photovoltaic Power System

Article Info

Research article
Received: 22/05/2024
Revision: 31/05/2024
Accepted: 02/06/2024

Keywords

Load-Frequency Control
1PDF-PI Controller
Reheat Thermal Power
Plant
Photovoltaic Solar Energy
System
Stochastic Fractal Search

Abstract

Energy consumption is increasing day by day due to the rapidly increasing population and industrialization in the world. In order to meet the increasing energy need, it becomes necessary to connect different energy production to interconnected power systems. One of the most important parameters determining the quality and reliability of energy generated in power systems is frequency. In interconnected systems, load change occurring in any area causes variation in frequency and power values in other areas connected to the system. In this paper, a cascade unity proportional derivative (1PDF) with filter-proportional integral (PI) controller is introduced for load frequency control (LFC) in power systems. Stochastic fractal search (SFA) algorithm is used to find the optimum values of the 1PDF-PI controller parameters, namely K_{p1} , K_d , F , K_{p2} and K_i . During optimization, integral of time multiplied absolute error (ITAE) of the frequency and tie-line power deviations is utilized as objective function. In order to affirm the contribution of SFS-based 1PDF-PI controller to relevant literature, comparisons are established against similar studies. The results achieved have shown that our proposal results in significant improvements on the system performance with regard to unwanted oscillations, settling time and ITAE value.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yük frekansı kontrolü (YFK), güç sistemlerindeki üretilen güç ile talep edilen güç arasındaki değişimlere bağlı bozulmalarda kararlı ve güvenilir bir çalışma sağlamak için frekans ve bağlantı hattı güç salınımlarını hızlı bir şekilde en aza indirmeyi amaçlamaktadır [1]. Güç sistemleri üzerindeki tüketilen taleplerine göre üretimin sürekli olarak ayarlanması, frekans ve güç dengesinin sağlanması gerekir. YFK genellikle generatörlerin hızını ve güç çıkışını düzenleyerek gerçekleştirilir. Talebin artması durumunda generatörlerin hızı artırılarak üretilen güç miktarı artırılır, talep azaldığında ise hız düşürülerek güç miktarı azaltılır. Bu şekilde frekans istikrarı sağlanır ve şebeke dengesi korunur [2]. Bazı Avrupa ve Amerika ülkelerinde, üretilen ve tüketilen güç dengesi için sabit tutulan frekans değeri 60 Hz, ülkemizde ise 50 Hz'dir. 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 [3]. Ani büyük tüketim artışı veya yüksek kapasiteli güç üretim tesisinin devre dışı kalması sonucunda frekans sapma aralığının dışına çıkması sistemde kesintiler/şebeke çökmesi meydana getirebilir.

Günümüzde artan güç talebi ve alternatif temiz enerji çalışmaları nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları kullanımının artmasıyla birlikte yük frekans kontrolü daha karmaşık hale gelmiştir. Rüzgar ve güneş gibi değişken kaynaklardan gelen enerji, sistemin frekansını etkileyebilir. Bu nedenle, yük frekans kontrolü sistemleri yenilenebilir enerji entegrasyonunu daha iyi yönetmek için sürekli olarak geliştirilmektedir. Bu bağlamda yenilenebilir üretim sistemlerinin YFK sorununa katkıda bulunacak şekilde değiştirilmesi gerekmektedir.

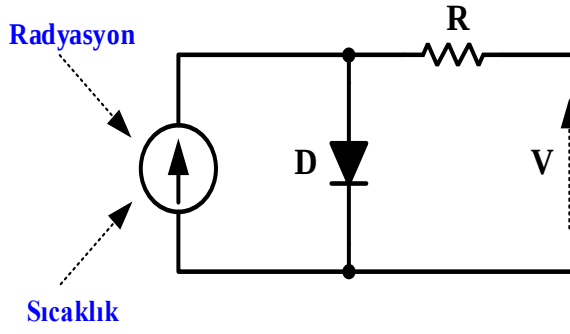
Genel olarak, geleneksel ve yenilenebilir güç üretim tesisleri de dahil bir enterkonnekte bağlantı hattına entegrasyonunda YFK için geleneksel PID denetleyici kullanır [4]. YFK problemini çözmek için PID denetleyici kazançlarının en uygun şekilde ayarlanması için sezgisel optimizasyon algoritmalarının uygulanması literatürde iyi bir şekilde ele alınmıştır. [5]'de alanlı güç sistemlerinde YFK'nın PID parametrelerini ayarlamak için doğadan ilham alınmış Genetik algoritma (GA), Parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO), Emperyalist rekabetçi algoritma (ERA), Ateşböceği algoritması (ABA), Desen arama

algoritması (DAA), Yarasa algoritması (YA), Guguk kuşu arama algoritması (GKAA), öğretme-öğrenmeye dayalı optimizasyon algoritması (ÖÖOA), Yapay arı kolonisi (YAK) ve Karınca aslanı optimize edici algoritma (KAOA) olmak üzere 10 farklı algoritma incelenmiş ve karşılaştırması yapılmıştır. [6]'da sinüs-kosinüs algoritması (SKA), [7]'de bakteriyel yiyecek arama algoritması (BYAA) ile kesirli dereceli PID parametreleri ayarlanmıştır. [8]'de aritmetik optimizasyon algoritması (AOA) ve [9]'da genetik algoritma (GA) ve atış böceği algoritması (ABA) iki bölgesel termik ve fotovoltaik (FV) güç sistemlerinin YFK için geleneksel PI denetleyici parametreleri optimize edilmiştir. [10]'de çoklu evren optimizasyonu (ÇEO), [11]'da simbiyotik organizmalar arama algoritması (SOAA) ve [12]'de stokastik fraktal arama algoritması PID denetleyici parametrelerinin optimum değerlerinin bulunması için kullanılmıştır.

Bu makale, YFK'ye verimli katkı sağlamak için geleneksel ve yenilenebilir üretim birimleri arasında koordineli bir denetim tasarım prosedürünü ele almaktadır. Bu bağlamda, çalışma, YFK'nin performansını geliştirmek için iki bölgesel bir güç sisteminde termik güç üretim tesisi ve FV güç üretim tesisi için 1PDF-PI denetleyici tasarlanmış ve önerilmiştir. Önerilen denetleyici parametreleri stokastik fraktal arama algoritması ile iyileştirilmesi yapılmıştır. Tasarlanan ve benzetimi gerçekleştirilen iki bölgesel YFK MATLAB/Simulink ortamında matematik modeli oluşturulmuştur. SFA algoritma kodları MATLAB/M file ortamında yazılmış ve oluşturulan model ile ilişkilendirilerek en uygun 1PDF-PI parametreleri belirlenmiştir. SFA tabanlı 1PDF-PI denetleyici performansını vurgulamak için literatürdeki [8] ve [9] numaralı kaynaklar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda önerilen denetleyicinin frekans sapması ve bağlantı hattı güç salınımları eğrileri analiz edilmiştir.

2. FOTOVOLTAİK (FV) SİSTEM MODELİ (PHOTOVOLTAİK SYSTEM MODEL)

FV hücre modeli, Şekil 1'de gösterildiği gibi bir diyot ve küçük seri temas direncine sahip güneş ışığı yoğunluğu (radyasyon ve sıcaklık) ile doğru orantılı fotovoltaik akım kaynağından oluşur.



Şekil 1. Fotovoltaik hücre eşdeğer devresi (Photovoltaic cell equivalent circuit)

FV panelinin radyasyon ve sıcaklık değişimlerine bağlı üretilen gücün transfer fonksiyonu aşağıdaki denklemle verilmektedir [13].

$$G_{pv} = \frac{-18s + 900}{s^2 + 100s + 50} \quad (1)$$

3. ARA-ISITMALI THERMAL GÜÇ SİSTEMİ MODELİ (REHEAT THERMAL POWER SYSTEM MODEL)

Bu çalışmada, iki bölgeli YFK modelinde bir ara-ısıtmalı termal güç sistemi modeli kullanılmıştır. Bu tip termal güç sistemleri genişleyen buharın iki türbin arasında ısıtılması ile yeniden enerjilendirildiği birden fazla türbinden oluşan verimi artırılmış sistemleridir. Termal güç sistem modeli dört bileşenden meydana gelir. Bu bileşenler generatör, buhar türbini, regülatör ve yeniden ısıtıcı transfer fonksiyonları sırasıyla aşağıda verilmektedir [14-15].

Termal güç sistemi governor transfer fonksiyonu;

$$\frac{K_g}{T_g s + 1} \quad (2)$$

Ara ısıtıcı transfer fonksiyonu;

$$\frac{K_t T_t s + 1}{T_t s + 1} \quad (3)$$

Buhar türbini transfer fonksiyonu;

$$\frac{K_t}{T_t s + 1} \quad (4)$$

Generatör transfer fonksiyonu;

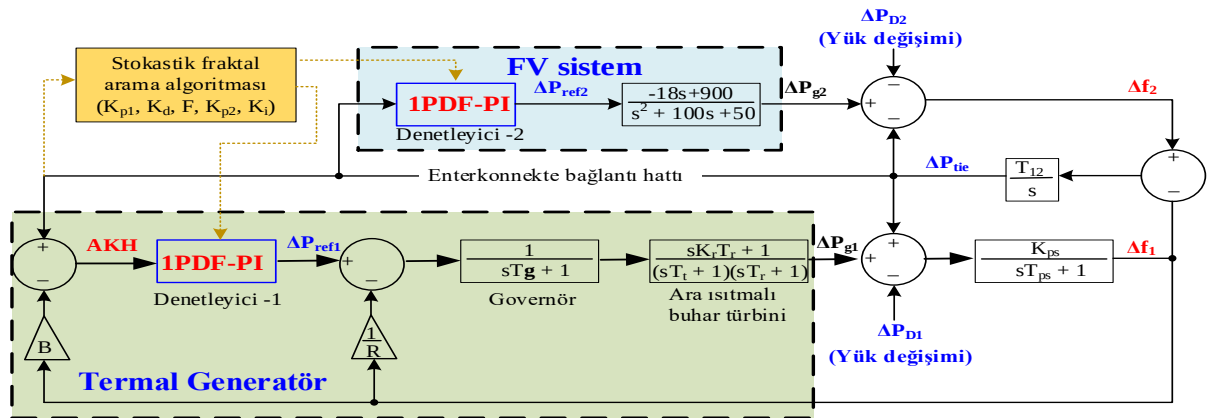
$$\frac{K_p}{T_p s + 1} \quad (5)$$

Termal güç sistemi frekans ve enterkonnekte bağlantı hattı yük değişimleri tarafından meydana gelen alan kontrol hatası (AKH) ise aşağıda belirtilen eşitlik ile ifade edilir;

$$AKH = \Delta P_{tie} - B \times \Delta f_1 \quad (6)$$

4. İKİ BÖLGELİ GÜÇ SİSTEMİ TRANSFER FONKSİYONU MODELİ (TWO-AREA HYBRID POWER SYSTEM TRANSFER FUNCTION MODEL)

Bu bölümde ara-ısıtmalı termal güç sistemi ve fotovoltaik güneş enerji sisteminden oluşan iki bölgeli enterkonnekte güç sisteminin dinamik modeli verilmektedir. Şekil 2’de bu modelin bölgeler arasında güç değişimlerine bağlı frekans hatalarının denetiminde sekonder frekans kontrolü için tasarımı ve transfer fonksiyonu modeli görülmektedir. Bu sistem enterkonnekte bağlantı hattı ile birbirine bağlanmış iki farklı enerji üretim sisteminden oluşur. 1. bölgede ara-ısıtmalı buhar türbinlerine sahip termal güç sistemi ile enerji üretilirken 2. bölgede FV güneş enerji sistemi bulunmaktadır [3].



Şekil 2. İki bölgeli hibrit güç sistemi transfer fonksiyonu modeli (Two-area hybrid power system transfer function model)

Şekil 2’de R governor regülasyon katsayısını, β frekans kutuplanma katsayısını, ΔP_{D1} ve ΔP_{D2} yük değişim oranlarını, ΔP_{g1} ve ΔP_{g2} üretilen güç değişimlerini, Δf_1 ve Δf_2 bölge değişim sapmalarını, ΔP_{ref1} ve ΔP_{ref2} denetleyici çıkış değişimlerini ve ΔP_{tie} bölgeler arasındaki bağlantı hattı güç dalgalanmasını ifade etmektedir [3].

Çalışmada kullanılan sistem parametreleri [3], [15]: $T_{12} = 0.545 \text{ puMW/Hz}$, $T_g = 0.08s$, $K_r = 0.33$, $T_r = 10s$, $T_t = 0.3s$, $K_{ps} = 120 \text{ Hz/puMW}$, $T_{ps} = 20s$, $R = 0.4 \text{ Hz/puMW}$, $B = 0.8 \text{ puMW/Hz}$.

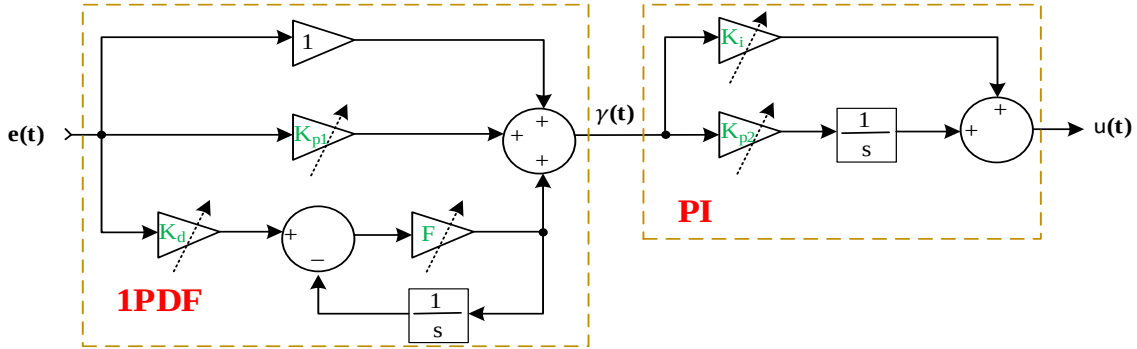
5. 1PDF-PI DENETLEYİCİ YAPISI VE TASARIMI (DESIGN AND STRUCTURE OF 1PDF-PI CONTROLLER)

PID denetleyiciler; kolay anlaşılır yapısı, basit tasarımı ve bazı yapısal değişiklikler ile geliştirildiğinde etkili bir kontrol sistemi olarak akademik ve endüstriyel uygulamalarda uzun yıllardır tercih edilmektedir. Bu bağlamda literatür araştırmalarında farklı sistemlerin zorlukların üstesinden gelmek için çok sayıda iyileştirilmiş PID denetleyici tasarımı görülmektedir. Bu çalışmamızda, literatür araştırmalarında daha önce YFK için uygulanmamış ancak [16]’da fırçasız doğru akım motor hız denetiminde oldukça iyi performans gösteren eklemeli 1PDF-PI denetleyici kullanılmaktadır.

Bu denetleyicinin konfigürasyonu Şekil 3’de gösterildiği gibi birbirine eklemeli 1PDF ve PI denetleyicilerden oluşmaktadır. Burada, 1PDF denetleyicide P oransal denetimi ifade etmekte ve hata değerinin sabit bir katsayı (K_{p1}) denetlenmesini, D hatanın türevine bağlı denetimi ifade etmekte ve hatanın değişim oranının sabit bir katsayı (K_d) denetlenmesini ve F ise türev ölçümü dalgalanmalarına bağlı ölçüm gürültüsü ve ayrık zaman türevi etkilerini filtrelemek için türev çıkışına yerleştirilen birinci dereceden alçak geçiren filtreyi ifade etmektedir. 1PDF denetleyicinin çıkışı $y(t)$, PI denetleyicin girişine uygulanır. AKH $e(t)$ ’ye etki ettikten sonra denetleyici, matematiksel olarak şu şekilde verilen kontrol girişi veya ΔP_{ref} değeri üretir:

$$u(t) = \left(\frac{y(t)}{e(t) + e(t)K_{p1} + \frac{e(t)K_d s F}{s + F}} \right) \times \left(K_{p2} + \frac{K_i}{s} \right) \quad (7)$$

Burada, F filtre katsayısı, K_{p1} ve K_{p2} oransal kazançlar, K_i integral kazancı ve K_d türev kazancıdır.



Şekil 3. 1PDF-PI denetleyici konfigürasyonu (1PDF-PI controller configuration)

6. STOKASTİK FRAKTAL ARAMA ALGORİTMASI (STOCHASTIC FRACTAL SEARCH ALGORITHM)

Stokastik fraktal arama algoritması, zor optimizasyon problemlerini hızlı yakınsama oranı ve yüksek doğrulukla çözebilen bir optimizasyon algoritması geliştirmek amacıyla 2015 yılında Salimi tarafından tanıtılmıştır [17]. Bunu yapmak için SFS, doğal büyüme olgusunu taklit eder ve iki önemli aşamayı kullanır: yayılma aşaması ve

güncelleme aşaması. Bu anlamda algoritmanın hem hızlı yakınsamayı hem de yüksek çözüm doğruluğunu sağlaması yalnızca birkaç nesil alır. Difüzyon sürecinde, her bir parçacığın, kullanım veya yoğunlaştırma özelliğini yerine getirmek için mevcut konumu etrafında yayıldığı temel fraktal arama taklit edilir. Bu süreç, yerel optimuma takılıp kalmayı önlemenin yanı sıra, küresel optimuma ulaşma şansını artırmada da önemlidir. Bir sonraki güncelleme işleminde, gruptaki diğer

noktaların konumuna bağlı olarak noktaların gruptaki konumları güncellenir. Bu süreç, SFS'nin keşif veya çeşitlendirme yeteneklerini arttırmak için değerlendirilmektedir. SFS algoritmasının çalışmasını özetlemek amacıyla okuyucuya kolaylık sağlamak amacıyla aşağıdaki adımlar verilmiştir[18-19].

İlk olarak, alt limit (AL) ve üst limit (UL) değerlerine bağlı olarak P parçacıklarının popülasyonu rastgele oluşturulur:

$$P = AL + \varepsilon \times (UL - AL) \quad (8)$$

Burada ε [0,1] aralığında rasgele bir sayıdır. Difüzyon sürecinde, Eş. 8 ve Eş. 9'da gösterildiği gibi belirli bir nokta etrafında yeni parçacıklar oluşturmak için iki Gauss yürüyüşü serisi benimsenir. Her parçacık için bu eşitlikler gerekli maksimum difüzyon numarası (MDN) için yürütülür. Daha sonra algoritma en iyi parçacıkla ilerlerken diğerleri göz ardı edilir.

$$GW_1 = Gauss(\mu_{BP}, \sigma) + (\varepsilon \times BP - \varepsilon' \times P_i) \quad (9)$$

$$GW_2 = Gauss(\mu_p, \sigma) \quad (10)$$

Burada, ε ve ε' [0,1] aralığında rasgele bir sayıdır. BP ve P_i sırasıyla gruptaki en iyi noktanın ve i 'inci noktanın konumu olarak ele alınır. Gauss, ortalama parametresi μ ve standart sapma parametresi σ ile normal dağılımdan rastgele sayı üreten bir fonksiyondur. Standart sapma denklemi Eş. 11'deki gibi hesaplanır.

$$\sigma = \frac{\log(g)}{g} \times |P_i - BP| \quad (11)$$

Burada, $\frac{\log(g)}{g}$ terimi nesil sayısı arttıkça sıfıra yaklaşır, böylece bir nokta etrafında daha derin bir arama sağlamak için Gauss sıçramalarının boyutu azalır. Daha sonra, keşif aşaması birbirini takip eden iki güncelleme işlemiyle başlar. Devam etmeden önce parçacıklar uygunluk değerlerine göre sıralanır ve daha sonra her bir i parçacığına Eş. (7)'deki gibi bir olasılık değeri verilir.

$$Pa_i = \frac{\text{rank}(P_i)}{N} \quad (12)$$

Eş. (12)'de N , gruptaki parçacıkların sayısıdır ve Pa_i , diğerleri arasındaki sırası, sıra fonksiyonu

tarafından verilen bir parçacık için hesaplanan olasılık değeridir. Bu denklem parçacıklara uygunluk değerleriyle orantılı bir olasılık değeri atamayı amaçlamaktadır. İlk güncelleme işleminde, eğer Pa_i bir rasgele sayıdan ε küçükse, P_i 'nin j 'inci bileşeninin güncellenmesi aşağıdaki denkleme tabidir; aksi halde herhangi bir değişiklik yapılmaz.

$$P_i'(j) = P_x(j) - \varepsilon \times (P_y(j) - P_i(j)) \quad (13)$$

Burada P_i' değiştirilmiş bileşen, P_x ve P_y gruptan rasgele seçilen farklı noktalardır. P_i' en iyi uygunluk değerine sahipse P_i' 'nin yerini alır. İlk güncelleme sürecinin sonunda, ortaya çıkan tüm noktaların bir kez daha Eş. (12) temel alınarak sıralanmasıyla ikinci güncelleme süreci başlar. Daha önce olduğu gibi Pa_i bir rasgele sayıdan ε küçükse, P_i noktasının farklı olması gereken x ve y endeksleri Eş. (14) kullanılarak değiştirilir. Yeni nokta P_i' P_i 'den daha iyiye P_i ile değiştirilir

$$P_i' = P_i - \varepsilon \times (P_x - BP) | \varepsilon' \leq 0.5 \\ P_i' = P_i - \varepsilon \times (P_x - P_y) | \text{diğer} \quad (14)$$

Bir YFK sisteminin güç değişimlerine bağlı frekans regülasyonuna daha iyi bir adım geçici tepkisi elde etmek için, SFA algoritması kullanımı 1PDF-PI denetleyicinin K_{p1} , K_d , F , K_{p2} ve K_i parametrelerini optimum değerini aramaya çalışılmış ve böylece ilgili sistemin denetim performansı etkili bir şekilde artırıldığı görülmüştür.

Kontrol tasarımında dikkate alınan dört tür performans kriteri vardır. Bunlar mutlak hatanın integrali (IAE), karesel hatanın integrali (ISE), zaman ağırlıklı karesel hatanın integrali (ITSE) ve zaman çarpımlı mutlak hatanın integrali (ITAE)'dir. Bu fonksiyonlara ait matematiksel ifadeler sırasıyla Eş. (15), Eş. (16), Eş. (17), Eş. (18)'de verilmektedir. Literatürde, YFK çalışmalarında IAE ve ITSE kriterlerine göre daha iyi performans göstermeleri nedeniyle çoğunlukla ISE ve ITAE kriterleri kullanılmaktadır. ITAE amaç fonksiyonuna sahip sistemler, ISE yöntemine göre daha hızlı yerleşir [20]. Bu kapsamda yapılan çalışmalar doğrultusunda ITAE'nin, integral tabanlı hata kriterlerine göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür [21].

$$IAE = \int_0^T (|\Delta F_1| + |\Delta F_2| + |\Delta P_{tie}|). dt \quad (15)$$

$$ISE = \int_0^T [(\Delta F_1)^2 + (\Delta F_2)^2 + (\Delta P_{tie})^2] . dt \quad (16)$$

$$ITSE = \int_0^T [(\Delta F_1)^2 + (\Delta F_2)^2 + (\Delta P_{tie})^2] . t . dt \quad (17)$$

$$ITAE = \int_0^T (|\Delta F_1| + |\Delta F_2| + |\Delta P_{tie}|) . t . dt \quad (18)$$

Burada t zamanı, T benzetim süresini, ΔF_1 ve ΔF_2 frekans değişimlerini, ΔP_{tie} bağlantı hattı güç değişimini ifade etmektedir. Bu çalışmada ITAE amaç fonksiyonu değerinin en küçük değeri ile frekans ve güç salınımlarının 0 pu değere en kısa sürede oturan denetim çıktıları elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle 1PDF-PI denetleyici tasarımı kısıtlı optimizasyon problemi olarak çözülmeye çalışılmıştır. Eş. 19'daki eşitsizliklere dikkate alınarak ITAE değeri minimize edilmektedir.

$$\begin{aligned} K_{p1}^{min} &\leq K_{p1}^* \leq K_{p1}^{max} \\ K_d^{min} &\leq K_d^* \leq K_d^{max} \\ F^{min} &\leq F^* \leq F^{max} \\ K_{p2}^{min} &\leq K_{p2}^* \leq K_{p2}^{max} \\ K_i^{min} &\leq K_i^* \leq K_i^{max} \end{aligned} \quad (19)$$

Eş. (19)'da min ve max üst indeksleri denetleyici parametrelerinin alt ve üst limitlerini ifade etmektedir. Bu çalışmada denetleyici parametreleri

alt ve üst limitleri -2 ve 2 olarak ayarlanmıştır. Optimizasyon işlemi sonrasında ITAE amaç fonksiyonunun en küçük değerini veren K_{p1}^* , K_d^* , F^* , K_{p2}^* ve K_i^* değerleri denetleyici parametrelerinin en uygun değerleri olarak alınmış ve benzetim çalışmalarında kullanılmıştır.

7. BENZETİM SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

Çalışmada Şekil 2'de transfer fonksiyonu verilen iki bölge hibrit güç sisteminde farklı yapıda üretim tesisi olması nedeniyle denetleyici parametreleri birbirinden bağımsız değerlendirilmesi gerekir. Bu sebeple önerilen 1PDF-PI denetleyicinin iki bölge için toplam 10 parametrenin aynı koşullar altında SFA algoritması ile en iyi değerleri bulunmaktadır. Literatürdeki katkısını göstermek amacıyla parametre belirlenirken benzer koşullara göre parametre belirleme ve sonuçları karşılaştırma işlemi yapılmıştır. 1PDF-PI denetleyicinin parametreleri belirlenirken 1. bölgedeki yük değişimi %10 ($\Delta P_{D1}=0.1$ pu), 2. bölgedeki yük değişimi %0 ($\Delta P_{D2}=0$ pu) kabul edilmiştir. Elde edilen en iyi sonuçlar literatürde daha önce yayınlanan çalışmaların sonuçları ile birlikte Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo1. Denetleyici Parametreleri ve ITAE değerleri (Controller Parameters and ITAE values)

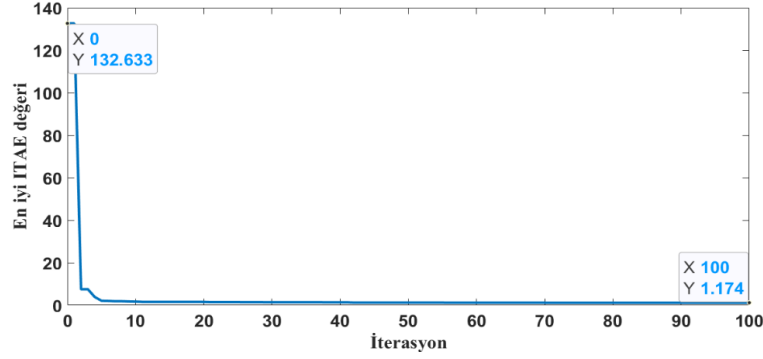
	Denetleyici parametreleri	GA-PI [9]	ABA-PI [9]	AOA-PI [8]	YAA-üstel PI [3]	SFA-1PDF-PI [önerilen]
1, Bölge	K_{p1}	0.5663	0.8811	0.7395	0.2609	-1.3135
	K_d	-	-	-	-	-0.5007
	K_{p2}	-	-	-	-	-0.9601
	K_i	0.4024	0.5765	0.4080	0.2333	-1.6856
	F	-	-	-	-	0.1873
2, Bölge	K_{p1}	0.5127	0.7626	1.8960	1.9252	0.3942
	K_d	-	-	-	-	0.6912
	K_{p2}	-	-	-	-	-0.1984
	K_i	0.7256	0.8307	0.9796	0.2404	-0.1392
	F	-	-	-	-	1.2672
	ITAE	12.44	7.4259	3.9028	2.3511	1.1741

Tablo 1'de gösterilen ITAE değerleri incelendiğinde 1PDF-PI denetleyicinin diğer denetleyici iyileştirme çalışmalarına göre daha küçük ITAE değerine sahip olduğu görülmektedir

(ITAE=1.1741). Bu sonuç denetleyicinin frekans ve güç salınımlarına karşı cevabının iyileştiği anlamına gelmektedir. Çalışmada diğer ITAE kriterleri bakımından en kötü sonuç ise GA-PI yaklaşımı ile elde edilmiştir (ITAE=12.1224).

SFA algoritması ile 1PDF-PI denetleyicinin en iyi parametre değerleri bulunması için parçacık popülasyon sayısı 30, iterasyon sayısı 100 olarak ayarlandığında elde edilen yakınsama Şekil 4’de verilmektedir. İlk iterasyon başlangıç popülasyonunun en iyi ITAE değeri 134,633 iken

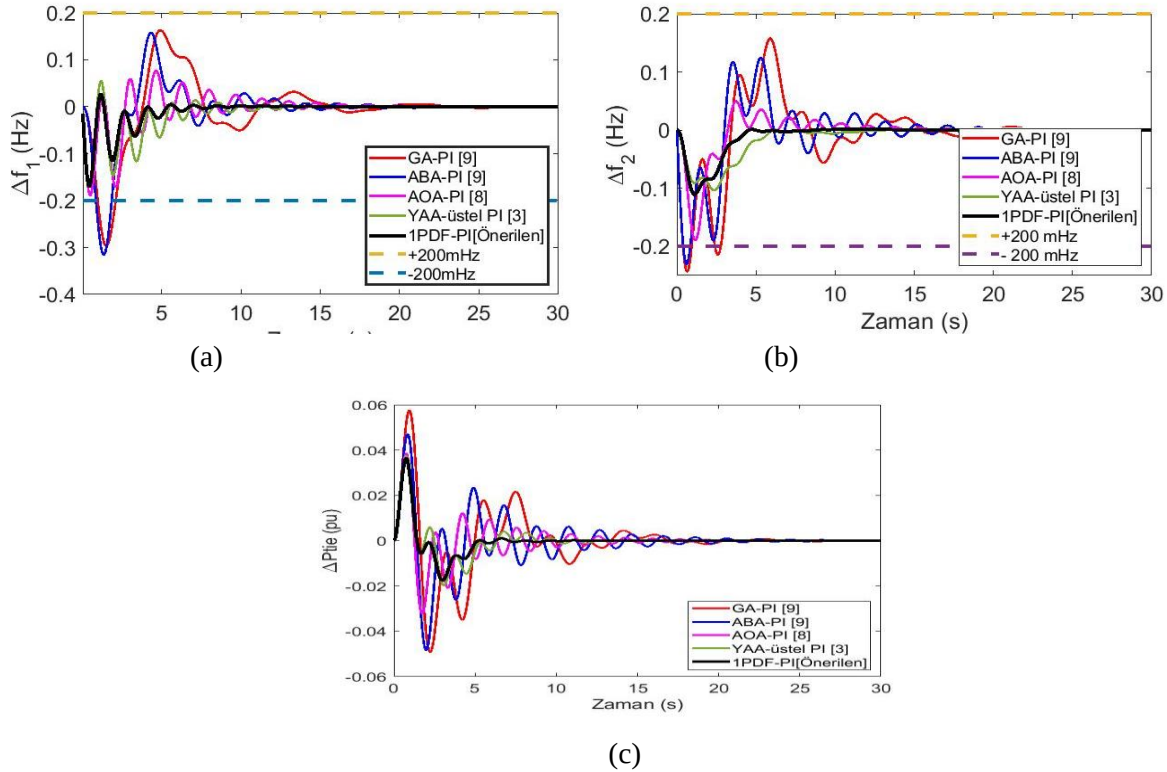
100. İterasyonun sonunda 1.174 değerine kadar düşmüştür. Eş. (18)’deki ifadeden de anlaşılacağı gibi ITAE kriteri sistemin frekans ve güç değişimlerine ($\Delta F_1, \Delta F_2$ ve ΔP_{tie}) bağlıdır. Bu nedenle ITAE değeri ne kadar düşük olursa $\Delta F_1, \Delta F_2$ ve ΔP_{tie} salınımları o kadar azalmış olur.



Şekil 4. İyileştirme sürecinde SFA algoritmasının yakınsama grafiği (Convergence graph of the SFA algorithm during the improvement process)

Tablo 1’de literatürde yapılan çalışmalar ve önerilen çalışmaya ait denetleyici parametreleri kullanılarak sistem performansları MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmaları her bir denetleyici için aynı koşullar altında [0, 30]s aralığında ve iki farklı çalışma durumuna tepkileri incelenmiştir. Birinci durumda 1. bölgede 0.1 pu’lık yük değişimine karşılık denetleyicilerin cevap tepkileri Şekil 5’de

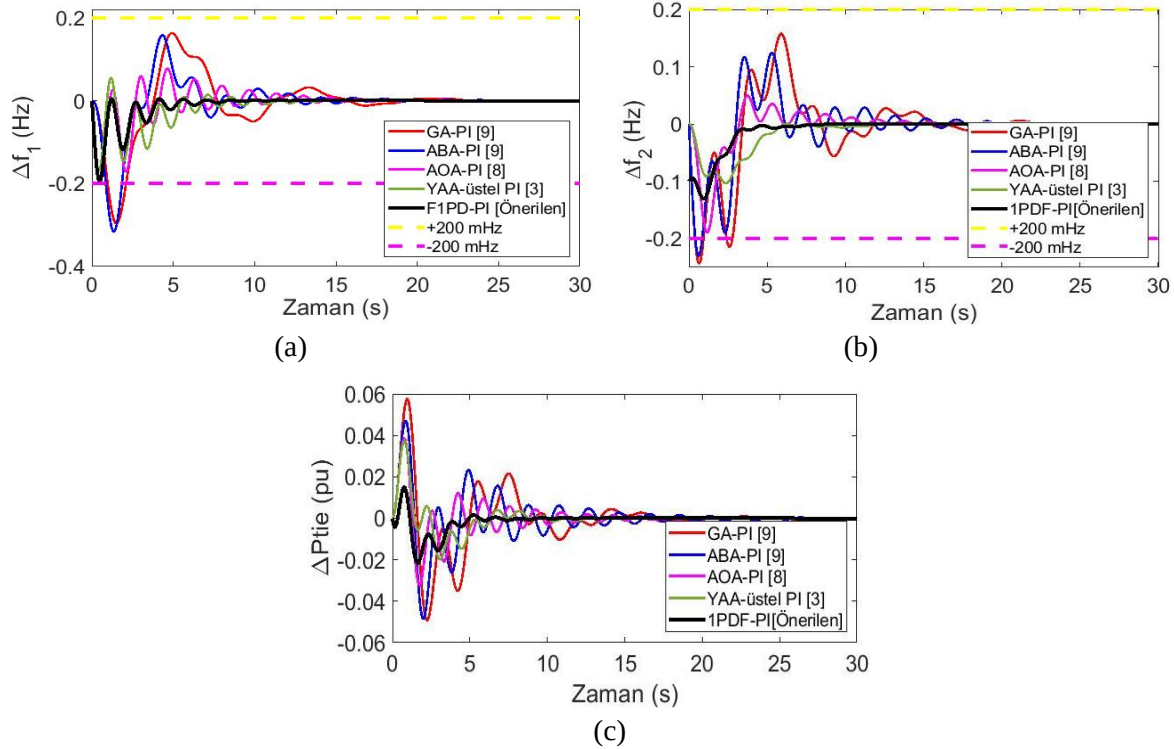
verilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde önerilen denetleyicin yük değişimine bağlı frekans eğrileri negatif yönde saptmasını hızlı bir şekilde referans değere ve düşük bir salınım yaparak oturmuştur. Bir başka ifade ile önerilen denetleyici diğer denetleyicilere göre artan yük değişimlerine karşın daha hızlı ve daha az salınım ile frekans değerini referans değere getirmiştir.



Şekil 5. 1. bölgede 0.1 pu’lık yük değişimi sonucu elde edilen cevap eğrileri karşılaştırılması (Comparison of response curves obtained as a result of a 0.1 pu load change in the 1st area) (a) ΔF_1 , (b) ΔF_2 , (c) ΔP_{tie}

İkinci durumda iki bölgede aynı anda meydana gelen 0.1 pu'lık yük artışı uygulanmıştır ($\Delta P_{D1}=0.1$ pu, $\Delta P_{D2}=0.1$ pu). Bu benzetimde elde edilen denetleyici cevap eğrileri Şekil 7'de verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde birinci durumda olduğu

gibi önerilen 1PDF-PI denetleyici diğerlerine göre daha iyi performans sergilemiş, frekans ve güç değişimlerini ($\Delta F_1, \Delta F_2$ ve ΔP_{tie}) hızlı ve düşük salınımla referans değerlerine getirmiştir.

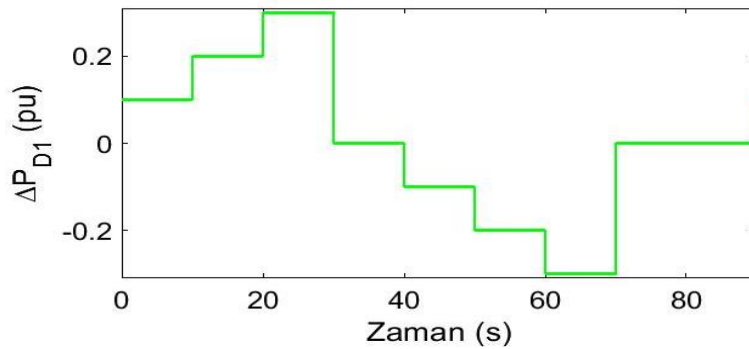


Şekil 6. 1. ve 2. bölgede 0.1 pu'lık yük değişimi sonucu elde edilen cevap eğrileri karşılaştırılması
(Comparison of response curves obtained as a result of a 0.1 pu load change in the 1st and 2nd areas) (a) ΔF_1 , (b) ΔF_2 , (c) ΔP_{tie}

Benzetim sonuçları incelendiğinde yukarıda belirtilen iki durumda literatür çalışmalarına kıyasla SFA tabanlı 1PDF-PI denetleyicinin YFK denetiminde hem yük değişimlerine karşı hızlı ve düşük salınımla referansa oturduğunu hem de sistemi Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği Kalite yönetmeliğinde belirtilen ± 200 mHz'lik tolerans içinde tuttuğu görülmüştür.

Enterkonnekte güç sistemleri farklı yük grupları ve üretim tesislerinin bir hatta bağlanması ile oluşan

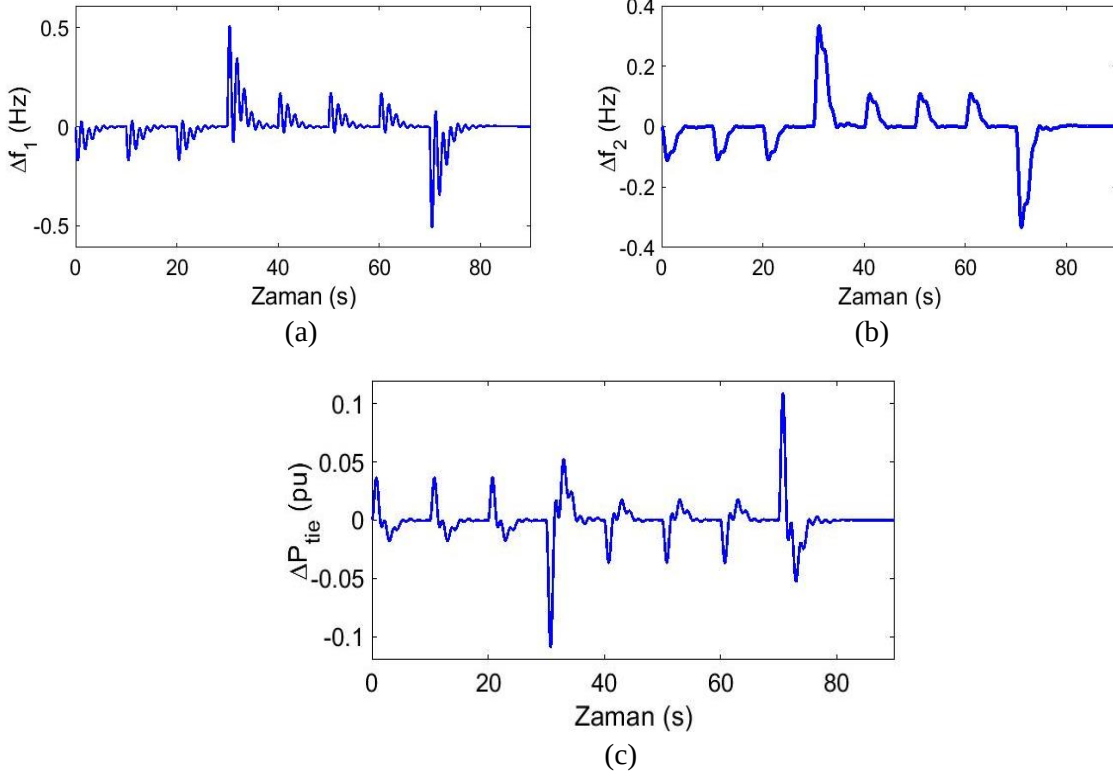
bir sistemdir. Bu nedenle sürekli olarak yük değişimleri meydana gelmektedir. Sistemin YFK denetiminde kullanılan denetleyicinin sistemin farklı seviyelerdeki yük değişimine aynı şekilde hızlı cevap vermesi ve sistemi referans güç ve frekans değerine hızlı getirmesi gerekmektedir. Bu bağlamda önerilen SFA tabanlı 1PDF-PI denetleyicinin farklı yük değişimlerine karşı tepkilerini göstermek amacıyla Şekil 7'deki gibi 1. bölgede farklı zaman ve oranda pu olarak yük değişimleri uygulanmıştır.



Şekil 7. 1. bölgeye uygulanan yük değişimleri (Load changes applied to 1st area)

Benzetim çalışmasında Şekil 7'deki gibi farklı zamanlarda pu olarak uygulanan yük değişimleri sonucu önerilen denetleyicinin cevap eğrileri Şekil 8'de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde denetleyicinin farklı oranlarda yükün devreye

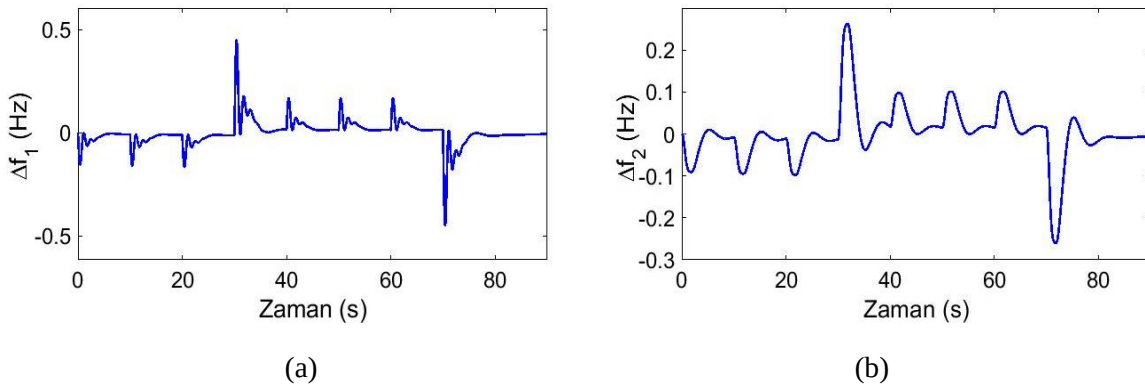
alınması veya devreden çıkarılması sonucu her iki bölgede meydana gelen frekans ve bağlantı hattı güç değerlerindeki bozulmaları hızlı ve düşük salınımlar ile referans değere getirdiği görülmektedir.

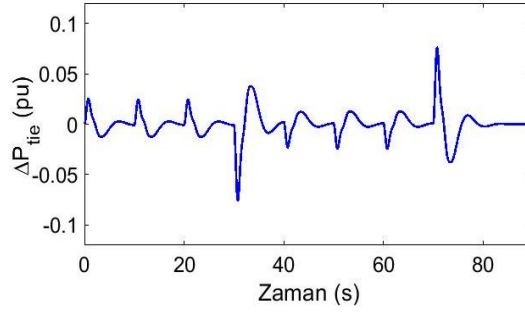


Şekil 8. 1. bölgede farklı yük değişimleri sonucu elde edilen cevap eğrileri (Response curves obtained as a result of different load changes in the 1st area) (a) ΔF_1 , (b) ΔF_2 , (c) ΔP_{tie}

Önerilen SFA tabanlı 1PDF-PI denetleyicinin sağlamlığını test etmek amacıyla herhangi bir nedenden dolayı sistemde meydana gelebilecek parametreler değiştiğinde denetleyicinin cevap çıktıları incelenmiştir. Bu nedenle 1. bölgede bulun ara-ısıtmalı buhar türbinli termal güç sistemi ait parametrelerin değerleri %30 oranında düşürülerek $T_{12} = 0.3815 \text{ puMW/Hz}$, $T_g = 0.056s$, $K_r =$

0.231 , $T_r = 7s$, $T_t = 0.21s$, $K_{ps} = 84\text{Hz/puMW}$, $T_{ps} = 14s$, $R = 0.28 \text{ Hz/puMW}$, $B = 0.56 \text{ puMW/Hz}$ olarak ayarlanmış ve Şekil 7'deki gibi 1. bölgede farklı zaman ve oranda pu olarak yük değişimleri uygulanmıştır. Elde edilen cevap çıktıları Şekil 9'da gösterilmektedir.





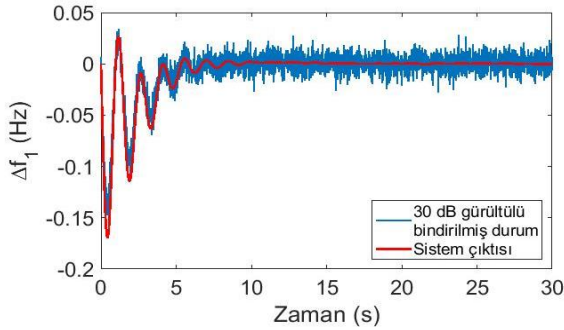
(c)

Şekil 9. 1. bölgede farklı yük değişimleri sonucu elde edilen cevap eğrileri (Response curves obtained as a result of different load changes in the 1st area) (a) ΔF_1 , (b) ΔF_2 , (c) ΔP_{tie}

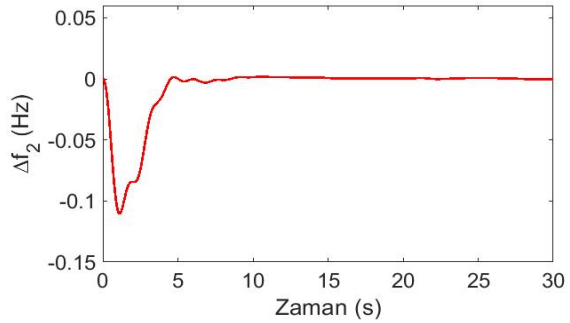
Şekil 9’da verilen cevap eğrileri incelendiğinde, önerilen denetleyicinin aynı parametre değerlerinde sistem parametrelerindeki değişimden fazla etkilenmediği, kararlı bir şekilde frekans ve güç değişimlerini hızlı bir şekilde referans 0 pu değerine getirdiği görülmektedir.

Son olarak, YFK güç sisteminin frekans geri besleme hattında ölçüm sensörlerinden kaynaklı bir gürültü meydana geldiğinde önerilen denetleyicinin cevap tepkisi performansı ve güvenilirliği test edilmiştir. Bu sebepten dolayı 1. Bölgedeki termal güç sistemine ait frekans geri besleme hattına 30 dB’lik sinyal-görüntü oranı

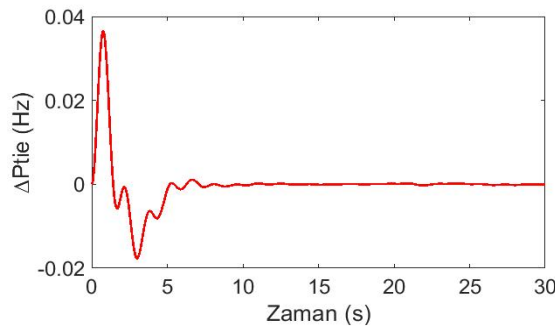
(SGO) ile beyaz gauss görüntüsü eklenmiştir. Bu benzetimde elde edilen denetleyici cevap eğrileri Şekil 10’da verilmektedir. Sonuçlar analiz edildiğinde 1. Bölgedeki termal güç sistemine ait frekans geribesleme hattına ölçüm sensörlerinden kaynaklanabilecek 30 dB’lik gürültü eklememize rağmen önerilen SFA tabanlı 1PDF-PI denetleyicinin yüksek frekanslı gürültüleri filtrelediği ve dinamik tepkiyi frekans ve güç değişimlerini ($\Delta F_1, \Delta F_2$ ve ΔP_{tie}) için en iyi şekilde verdiği gösterilmiştir. Sonuç olarak önerilen denetleyicinin gürültü gibi sistem güvenilirliği bozabilecek etkiler karşısında oldukça sağlam ve güvenilir olduğu ispat edilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 10. 1. bölgede frekans geribesleme hattına eklenen 30dB’lik gürültü sonucu elde edilen cevap eğrileri (Response curves obtained as a result of 30dB noise added to the frequency feedback line in the 1st area) (a) ΔF_1 , (b) ΔF_2 , (c) ΔP_{tie}

8. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada ara ısıtılmalı termal güç sistemi ve FV güç sisteminden oluşan iki bölgesi enterkonnekte şebekenin YFK için SFA tabanlı 1PDF-PI denetleyici tasarlanmıştır. Denetleyici parametreleri deneme yanılma yöntemiyle değil SFA yaklaşımı ile en iyi değerler elde edilmeye çalışılmıştır. Önerilen yöntemin performansını test etmek için iki bölgesi YFK'nin iki farklı durumdaki cevap tepkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile literatürde benzer yapıya sahip çalışmaların aynı koşullardaki sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına göre önerilen SFA tabanlı 1PDF-PI denetleyicinin diğer denetleyicilere göre sistemdeki yük değişimlerine tepkisinin otuma zamanı, $\pm$ maksimum aşım, salınım ve ITAE değerleri bakımında daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca, denetleyicinin sağlamlığı ve güvenilirliğini vurgulamak için denetleyici parametreleri değiştirilmeden güç sisteminin parametreleri değiştirilerek ve frekans geribesleme hattına 30 dB'lık gürültü eklenerek önerilen denetleyicinin çıkış performansı test edilmiştir. Elde edilen cevap eğrileri incelendiğinde denetleyicinin sağlamlık ve güvenilirliği sistem frekansları değiştiğinde ve ölçüm sensörlerinden kaynaklanabilecek gürültülü geribeslemelerde tatmin edici şekilde iyi sonuç vermiştir. Önerilen birbirine eklemeli 1PDF-PI denetleyici ilk olarak [16]'da fırçasız doğru akım motoru hız denetiminde kullanılmış ve başarılı bir kapılı çevrim hız denetimi elde edilmiştir. Bu manada önerilen SFA tabanlı 1PDF-PI denetleyici Alternatif akım veya doğru akım motorların pozisyon ve hız denetimi gibi doğrusal veya doğrusal olmayan kapalı çevrim geri beslemeli tüm sistemlerin denetiminde uzman kişiye ihtiyaç olmaksızın en uygun parametrelerin belirlenmesinde ve denetlenmesinde etkin sonuç verecektir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Mehmet KARAYEL: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Emre ÇELİK: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiş ve akademik danışmanlık yapmıştır.

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process and served as its academic advisor.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] S. Davtalab, B. Tousi, and D. Nazarpour, "Optimized Intelligent Coordinator for Load Frequency Control in a Two-Area System with PV Plant and Thermal Generator," *IETE J Res*, vol. 68, no. 5, pp. 3876–3886, Sep. 2022, doi: 10.1080/03772063.2020.1782777.
- [2] N. Hakimuddin, I. Nasiruddin, T. S. Bhatti, and Y. Arya, "Optimal Automatic Generation Control with Hydro, Thermal, Gas, and Wind Power Plants in 2-Area Interconnected Power System," *Electric Power Components and Systems*, vol. 48, no. 6–7, pp. 558–571, Aug. 2020, doi: 10.1080/15325008.2020.1793829.
- [3] E. Çelik, "Termik Güç Santrali ve Fotovoltaik Güneş Enerji Sisteminden Oluşan Güç Sisteminde Üstel PI Denetleyici ile Sekonder Frekans Regülasyonu," *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, vol. 6, no. 1, pp. 133–142, Apr. 2024, doi: 10.46387/BJESR.1456068.
- [4] S. Golshannavaz, R. Khezri, M. Esmaeeli, and P. Siano, "A two-stage robust-intelligent controller design for efficient LFC based on Kharitonov theorem and fuzzy logic," *J Ambient Intell Humaniz Comput*, vol. 9, no. 5, pp. 1445–1454, Oct.

- 2018, doi: 10.1007/S12652-017-0569-2/FIGURES/15.
- [5] F. Kalavani, M. Zamani-Gargari, B. Mohammadi-Ivatloo, and M. Rasouli, "A contemporary review of the applications of nature-inspired algorithms for optimal design of automatic generation control for multi-area power systems," *Artif Intell Rev*, vol. 51, no. 2, pp. 187–218, Feb. 2019, doi: 10.1007/S10462-017-9561-7/TABLES/6.
- [6] A. Oshnoei, R. Khezri, S. M. Muyeen, and F. Blaabjerg, "On the Contribution of Wind Farms in Automatic Generation Control: Review and New Control Approach," *Applied Sciences* 2018, Vol. 8, Page 1848, vol. 8, no. 10, p. 1848, Oct. 2018, doi: 10.3390/APP8101848.
- [7] R. Khezri, A. Oshnoei, M. T. Hagh, and S. M. Muyeen, "Coordination of Heat Pumps, Electric Vehicles and AGC for Efficient LFC in a Smart Hybrid Power System via SCA-Based Optimized FOPID Controllers," *Energies* 2018, Vol. 11, Page 420, vol. 11, no. 2, p. 420, Feb. 2018, doi: 10.3390/EN11020420.
- [8] E. Çelik and A. Dalcı, "Performance betterment of load frequency regulation using snake search algorithm for an interconnected power system incorporating thermal plant and pv power station," 5th International Antalya Scientific Research and Innovative Studies Congress, pp. 610–621, Jul. 2023.
- [9] 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 Comput Appl*, vol. 30, no. 2, pp. 607–616, Jul. 2018, doi: 10.1007/S00521-016-2668-Y/FIGURES/13.
- [10] M. Sharma, R. K. Bansal, S. Prakash, and S. Asefi, "MVO Algorithm Based LFC Design of a Six-Area Hybrid Diverse Power System Integrating IPFC and RFB," *IETE J Res*, vol. 67, no. 3, pp. 394–407, 2021, doi: 10.1080/03772063.2018.1548908.
- [11] Z. Y. Yilmaz, G. Bal, E. Çelik, N. Öztürk, U. Gövenç, 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. 2053–2068, Sep. 2021, doi: 10.17341/GAZIMMFD.841751.
- [12] E. Çelik, "Improved stochastic fractal search algorithm and modified cost function for automatic generation control of interconnected electric power systems," *Eng Appl Artif Intell*, vol. 88, p. 103407, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.ENGAPPAI.2019.103407.
- [13] S. A. Jeddi, S. Hamidreza Abbasi, and F. Shabaninia, "Load frequency control of two area interconnected power system (Diesel Generator and Solar PV) with PI and FGSPi controller," *AISP 2012 - 16th CSI International Symposium on Artificial Intelligence and Signal Processing*, pp. 526–531, 2012, doi: 10.1109/AISP.2012.6313803.
- [14] S. Davtalab, B. Tousi, and D. Nazarpour, "Optimized Intelligent Coordinator for Load Frequency Control in a Two-Area System with PV Plant and Thermal Generator," *IETE J Res*, vol. 68, no. 5, pp. 3876–3886, Sep. 2022, doi: 10.1080/03772063.2020.1782777.
- [15] 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 Comput Appl*, vol. 30, no. 2, pp. 607–616, Jul. 2018, doi: 10.1007/S00521-016-2668-Y/FIGURES/13.
- [16] E. Çelik and M. Karayel, "Effective speed control of brushless DC motor using cascade 1PDf-PI controller tuned by snake optimizer," *Neural Comput Appl*, vol. 36, no. 13, pp. 7439–7454, May 2024, doi: 10.1007/S00521-024-09470-Y/FIGURES/11.
- [17] H. Salimi, "Stochastic Fractal Search: A powerful metaheuristic algorithm," *Knowl Based Syst*, vol. 75, pp. 1–18, Feb. 2015, doi: 10.1016/J.KNOSYS.2014.07.025.
- [18] E. Çelik, "Incorporation of stochastic fractal search algorithm into efficient design of PID controller for an automatic voltage regulator system," *Neural Comput Appl*, vol. 30, no. 6, pp. 1991–2002, Sep. 2018, doi: 10.1007/S00521-017-3335-7/TABLES/5.
- [19] E. Çelik, "Improved stochastic fractal search algorithm and modified cost function for automatic generation control of interconnected electric power systems," *Eng Appl Artif Intell*, vol. 88, p. 103407, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.ENGAPPAI.2019.103407.

- [20] 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 & Energy Systems*, vol. 66, pp. 67–77, Mar. 2015, doi: 10.1016/J.IJEPES.2014.10.019.
- [21] 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