

İki Bölge İki Aşamalı Isıtılabilir Termal Güç Sisteminde Yük Frekans Kontrolü İçin Kesir Hesabına Dayalı Denetleyici Tasarımı

Alper Kemal GÜLİÇER^{1*}, Mustafa Şinasi AYAS²

Öz

Bu çalışmada iki bölge İki Aşamalı termal güç sisteminde yük frekans kontrolü için kesir hesabına dayalı farklı denetleyici tasarımları gerçekleştirilmiştir. İki bölge İki Aşamalı termal güç sistemi için doğrusal model oluşturulmuş, bu model için iki farklı yük değişimi göz önüne alınmış ve dört farklı denetleyicinin performansları gözlemlenmiştir. Çalışmada tasarımı yapılan ve incelenen denetleyiciler, oransal-integral-türev (PID), eğimli-integral-türev (TID), filtreli eğimli-integral-türev (TIDF) ve kesirli filtreli eğimli-integral-türev (TIDFF) denetleyicilerdir. Denge optimizasyon algoritması kullanılarak, hata tabanlı performans metriklerinden biri olan zaman ağırlıklı mutlak hatanın toplam değerini minimum seviyeye çeken denetleyicilerin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan denetleyicilerin kullanılmasıyla elde edilen bağlantı hattı gücü değişim grafikleri ve frekans değişimi grafikleri bulgularda verilmiş ve bu grafikler üstünden elde edilen oturma zamanı, alt aşma ve üst aşma değerleri tablolar ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Kesir hesabına dayalı denetleyicilerin (TID, TIDF ve TIDFF), geleneksel PID denetleyicilerden daha verimli olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yük frekans kontrolü, Kesir hesabına dayalı denetleyiciler, Eğimli-integral-türev denetleyici, Denge optimizasyon algoritması.

Fractional Calculus Based Controller Design for Load Frequency Control in Two-Area Reheat Thermal Power System

Abstract

In this study, different controller designs based on fractional calculus are realized for load frequency control in a two-area reheat thermal power system. A linear model for a two-area reheat thermal power system is established, two different load changes are considered for this model and performances of four different types of controllers are observed. The controllers designed and analyzed in this study are proportional-integral-derivative (PID), tilt-integral-derivative (TID), tilt-integral-derivative with filter (TIDF) and tilt-integral-derivative with fractional filter (TIDFF) controllers. By using the Equilibrium Optimization Algorithm, controllers are designed that minimize the total value of the time-weighted absolute error, which is one of the error-based performance metrics. The tie line power deviation figures and frequency change figures obtained by using the designed controllers are given in the findings, and the settling time, undershoot and overshoot values obtained from these figures are compared. The fractional calculus based controllers (TID, TIDF and TIDFF) are found to be more efficient than conventional PID controllers.

Keywords: Load frequency control, Fractional calculus-based controllers, Tilt-integral-derivative controller, Equilibrium optimization algorithm.

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Trabzon, Türkiye, alperkgulicer52@gmail.com

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Trabzon, Türkiye, msayas@ktu.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0001-9606-5973>

²<https://orcid.org/0000-0001-8113-4817>

1. Giriş

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte elektrik enerjisine olan ihtiyaç günden güne artış göstermektedir. Elektrik enerjisinin tamamına yakını, suyun hareketi sonucu ortaya çıkan kinetik enerjiden ve yakıtlardan elde edilen ısı enerjisinden üretilmektedir (Yılmaz, 2020). Üretilen elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtımı enterkonnekte şebeke ile sağlanmaktadır. Enterkonnekte şebekeler içerisinde enerji santralleri şebekede senkron bir şekilde birbirine bağlıdır ve bir senkron frekansa sahiptirler. Bu senkron frekans değeri, sistemin düzgün işleyebilmesi ve sistem kararlılığı açısından önem teşkil etmektedir (Özdemirci, 2002). Frekans değeri, üretilen ve tüketilen güç dengesine göre değişim göstermektedir. Sistemde tüketilen gücün üretilen güçten fazla olması halinde generatör yavaşlar ve sistem frekansında düşüş gözlemlenir. Tam tersi durum için yani üretilen gücün tüketilen güçten fazla olması halinde ise generatör hızlanır ve sistem frekansında artış gözlemlenir. Her iki durum da sistemin kararlılığı açısından istenmeyen durumlardır (Karyeyen, 2009). Aktif gücün değişiminin, frekans değerini arzulanan değerden uzaklaştırması, sistem kararlılığını sağlamak ve sisteme zarar verecek durumları engellemek adına bu değerlerin tekrar arzulanan değere getirilmesi ihtiyacını doğurmaktadır. Ayrıca enterkonnekte şebekeler birbirine bağlı enerji santrallerinden oluştuğundan aralarında bağlantı hatları da mevcuttur. Bu bağlantı hatları arasında da bir yük değeri bulunmaktadır. Dolayısıyla bu değerlerin de önceden belirlenmiş olan değerlere çekilmesi gerekmektedir (Yalçın ve ark., 2013). Hem frekans değerini arzulanan değer aralığında tutmak, hem de bağlantı hattındaki yük değerini önceden belirlenmiş değer aralığında tutmak için yük frekans kontrolü yapılmaktadır.

İlk modern yük frekans kontrolü 1970 yılında ara ısıtmasız termal bir güç sistemi için yapılmıştır (Elgerd ve Fosha, 1970). Sonraki yıllarda geçmişten günümüze kadar yük frekans kontrolü için güç sistemi modelleri oluşturulmuş, bu modeller için çeşitli optimizasyon yöntemleriyle optimize edilmiş birçok denetleyici tasarlanmıştır. Oluşturulan modellerin yük frekans kontrolü için; Bakteriyel Besin Algoritması Optimizasyonu ile optimize edilmiş PID denetleyici (Ali ve Abd-Elazim, 2013), Diferansiyel Evrim Algoritması ile optimize edilmiş 2 serbestlik dereceli PID denetleyici (Sahu ve ark., 2013), Kısıtlı Optimizasyon tekniği ile optimize edilmiş eğimli-integral-türev (TID) denetleyici (Topno ve Chanana, 2015), Ateşböceği Algoritması ile optimize edilmiş filtreli PID (PIDF) denetleyici (Sekhar ve ark., 2016), Diferansiyel Evrim Algoritması ile optimize edilmiş filtreli TID (TIDF) denetleyici (Sahu ve ark., 2016), Diferansiyel Evrim Algoritması ile optimize edilmiş integral-eğimli-türev (I-TD) denetleyici (Behera ve ark., 2018), Gugukkuşu Optimizasyon Algoritması ile optimize edilmiş filtreli kesir dereceli oransal-integral-türev (FOPIDF) denetleyici (Gheisarnejad ve Khooban, 2019), Harris Şahinleri Optimizasyon Algoritması ile optimize edilmiş oransal-integral + filtreli eğimli-integral-türev (PI-TIDF) denetleyici (Sahoo ve Panda, 2020),

Diferansiyel Evrim Algoritması ile optimize edilmiş kaskad yapıli eğimli-integral-eğimli-integral-türev (TI-TID) denetleyici (Mohanty ve Sahu, 2020), Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması ile optimize edilmiş yüksek kesir dereceli diferansiyel geri beslemeli (FHODF) denetleyici (Sahin, 2020), Yol Bulucu Algoritması ile optimize edilmiş kesir dereceli TID (FOTID) denetleyici (Priyadarshani ve ark., 2021), hibrit Uygunluk Bağimli-Sinüs Kosinüs Algoritması ile optimize edilmiş kesir dereceli integral-filtreli eğimli türev (FOI-TDF) denetleyici (Daraz ve ark., 2022), Balina Optimizasyon Algoritması ile optimize edilmiş 2 serbestlik dereceli TID denetleyici (Sahu ve ark., 2023), modifiye edilmiş Manta Vatozu Beslenme Algoritması ile optimize edilmiş 3 serbestlik kesir dereceli kaskad eğimli-oransal-integral-türev + filtreli TID (FOTPID-TIDF) denetleyici (Ahmed ve ark.,2023), Karadul Optimizasyon algoritması ile optimize edilmiş PID denetleyici (Wadhwa ve Gupta, 2023) gibi çeşitli denetleyici tasarımları yapılmıştır.

Bu çalışmada literatür çalışmalarının ışığında, iki bölgele ara ısıtmalı termal bir güç sisteminin çeşitli yük değişimi durumlarındaki yük frekans kontrolü için Denge Optimizasyon Algoritması (DOA) ile optimize edilmiş, PID, TID, TIDF ve kesirli filtreli TID (TIDFF) denetleyici tasarımları yapılmıştır. Denge Optimizasyon Algoritması, optimum çözümlere daha az zaman ve iterasyon sayısı ile ulaşabildiği için seçilmiş, kesir hesabına dayalı denetleyiciler ise klasik denetleyicilere göre daha iyi performans gösterdikleri için birbirleri arasında kıyaslanmıştır. Bu denetleyicilerin performansı, aynı güç sistemi modeli kullanılarak gerçekleştirilmiş olan literatürdeki Sharma ve arkadaşları tarafından 2021 yılında yapılan çalışma ile karşılaştırılmıştır. İlgili çalışmadaki (Sharma ve ark., 2021) Gri Kurt Optimizasyon Algoritması (GKOA) ve Salp Sürü Optimizasyon Algoritması (SSOA) ile optimize edilmiş TID denetleyici tasarımları ile bu çalışma kapsamında önerilen DOA ile optimize edilerek tasarlanan denetleyicilerin performans karşılaştırması yapılmıştır.

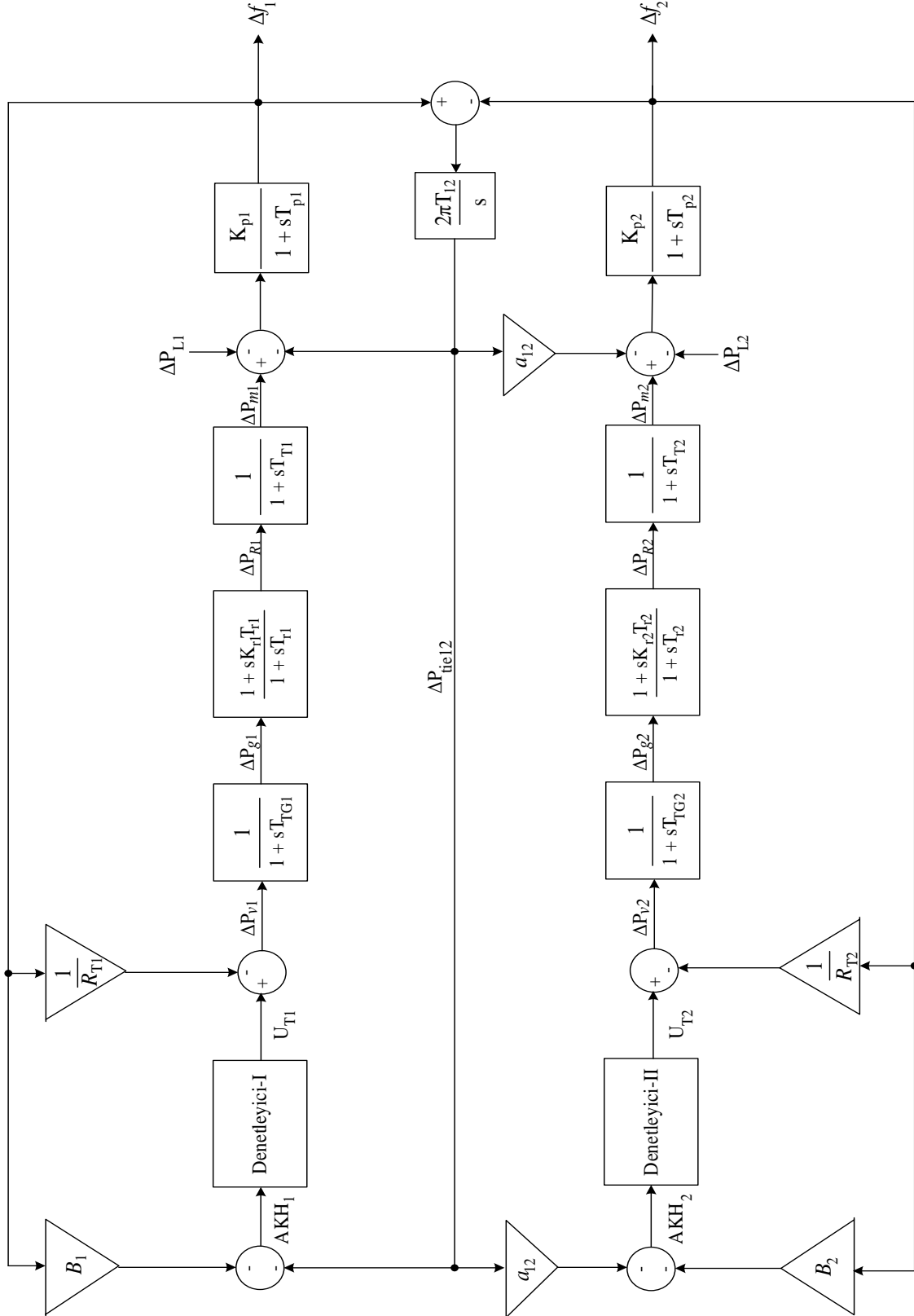
Çalışma sırasıyla, güç sistemi modeli, kullanılan optimizasyon yönteminin kısaca açıklamasını ve tasarım için seçilen denetleyicilere uygulanmasını, iki çeşit yük değişimi durumu için elde edilen optimum denetleyici parametrelerini ve bu parametreler sonucunda ortaya çıkan performans değerlerini ve değerlerin karşılaştırmasını içermektedir.

2. Materyal ve Metot

2.1. İki Bölgele Ara Isıtmalı Termal Güç Sistemi Modeli

Çalışmada birbiri ile simetrik olan iki bölge tercih edilmiştir. Her iki bölgede de üretim kaynağı olarak sadece ara ısıtmalı termal güç üniteleri mevcuttur. Güç sistemi modeli termal governor, yeniden ısıtma, buhar türbini ve kontrol bölgesi bloklarından oluşmaktadır. İki bölgedeki blok da birbiri ile simetriktir. Bu güç sistemi modelinin yük frekans kontrolü için yalnızca birinci bölgede

0.01 p.u. değerinde yük değişimi olması durumu ve birinci bölgede 0.01 p.u. ile ikinci bölgede -0.01 p.u. yük değişimi olması durumu göz önüne alınarak denetleyici tasarımı yapılmıştır. Şekil 1’de iki bölge ara ısıtmalı termal güç sistemi modeli verilmiştir.



Şekil 1. İki bölge ara ısıtmalı termal güç sistemi modeli

Güç sistemi modelindeki parametrelerin değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Birinci ve ikinci bölgedeki parametrelerin değerleri simetrik ve eşittir.

Tablo 1. Güç sistemi modelinin parametre değerleri ve anlamları.

Parametre	Parametrenin Değeri	Parametrenin Anlamı
B_1, B_2	0.425 p.u. MW/Hz	Frekans kutuplama sabiti
R_{T1}, R_{T2}	2.4 Hz/p.u. MW	Termal hız regülasyon sabiti
T_{TG1}, T_{TG2}	0.08 s	Termal governor zaman sabiti
K_{r1}, K_{r2}	0.5	Yeniden ısıtma kazancı
T_{r1}, T_{r2}	10 s	Yeniden ısıtma zaman sabiti
K_{P1}, K_{P2}	120 Hz/p.u. MW	Kontrol bölgesi kazancı
T_{P1}, T_{P2}	20 s	Kontrol bölgesi zaman sabiti
T_{T1}, T_{T2}	0.03 s	Buhar türbini zaman sabiti
$\Delta P_{L1}, \Delta P_{L2}$	p.u.	Bölgedeki yük değişimi
a_{12}	-1	Bölgeler arası güç oranı faktörü
T_{12}	0.0866 p.u. MW/rad	Bağlantı hattı senkronize edici momentum katsayısı

2.2. Denge Optimizasyon Algoritması

Denge Optimizasyon Algoritması (DOA), fizik kanunları temelli, dinamik kaynaklar ve yutak modelleri baz alınarak ortaya çıkarılmış bir optimizasyon algoritmasıdır. Algoritmanın temel prensibi kontrol hacmine giren ve çıkan kütle ile kontrol hacminde üretilen kütlelerin korunumuna dayanmaktadır (Faramarzi ve ark., 2020). Algoritma dört adımdan oluşmaktadır.

Birinci adım olan başlatma adımı ile başlangıç popülasyonu oluşturulur ve oluşturulan parçacıklar minimum ve maksimum değerler vasıtasıyla güncellenerek, amaç fonksiyonuna göre değerlendirilirler.

İkinci adımda denge havuzu oluşturulmasıdır. İlk adımda oluşturulan en iyi parçacıktan dört tanesi ve bu parçacıkların toplamının ortalama değeri alınarak beş parçacıklı bir denge havuzu oluşturulur. Her parçacık, rastgele bir aday seçerek kendini güncellemektedir.

Üçüncü adım ile üstel terim oluşturulur. Oluşturulan bu üstel terim optimizasyon algoritmasının temel denkleminde kullanılmaktadır.

Dördüncü adım üretim oranının uygulanmasıdır. Üretim oranı, iyi bir sonuca ulaşmaya yardımcı olmaktadır. Optimizasyon algoritması ile ilgili detaylı bilgiye (Faramarzi ve ark., 2020) kaynağından ulaşılabilir.

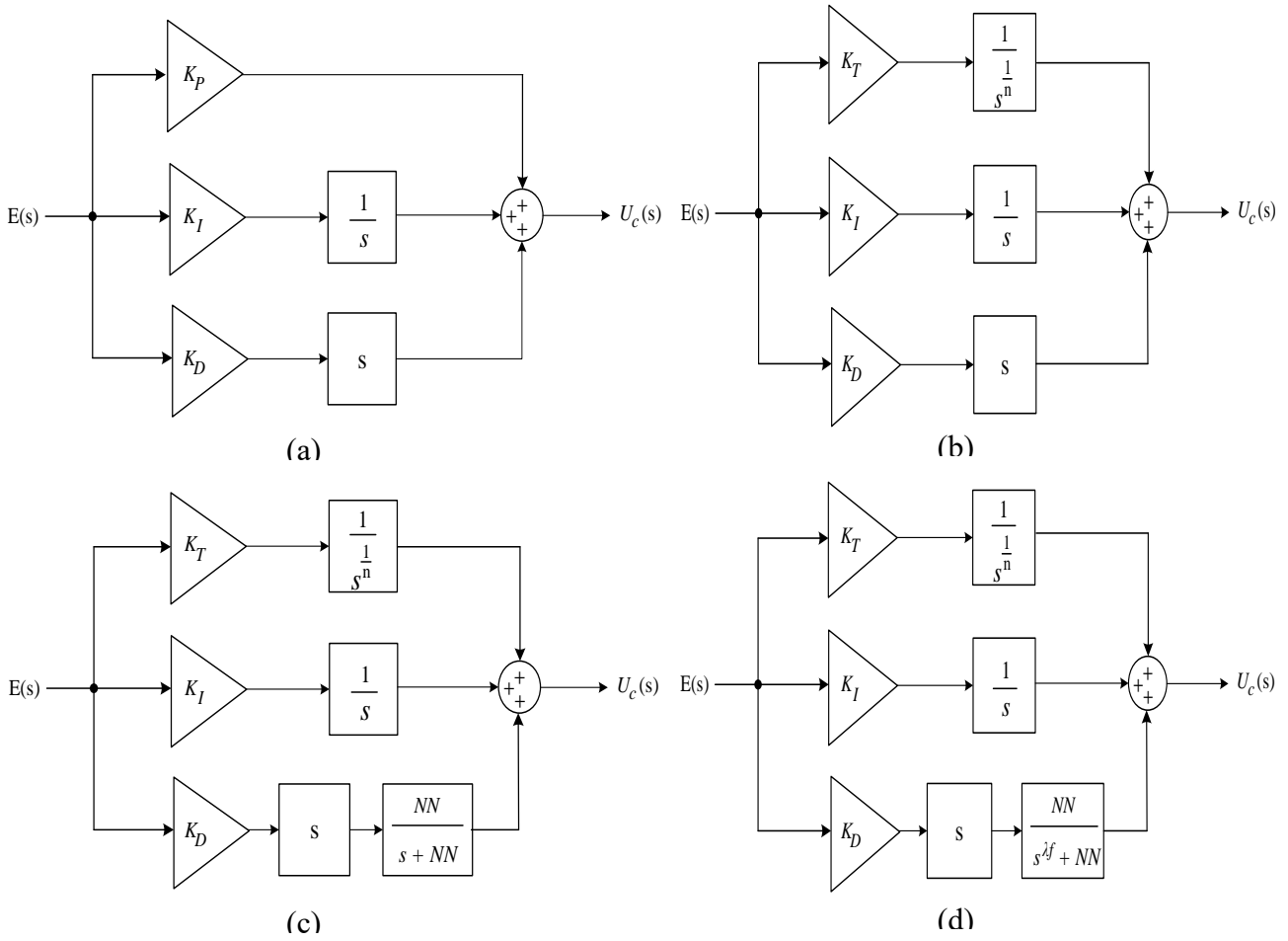
2.3. Denetleyicilerin Tasarımı

Bu çalışmada, iki bölgeli ara ısıtılmalı termal güç sistemi modelinin yük frekans kontrolü için, DOA kullanılarak, PID, TID, TIDF ve TIDFF denetleyici olmak üzere dört tip denetleyici tasarımı yapılmıştır. Şekil 1'den de anlaşılacağı üzere her bölge aynı tip olmak üzere bir denetleyici ile denetlenmektedir. Denetleyicilerin amacı, birinci bölgede oluşan frekans değişimi, ikinci bölgede oluşan frekans değişimi ve bağlantı hattındaki güç değişimi ile oluşan Alan Kontrol Hatası (AKH) sinyaline göre bu değişimlerin olabildiğince sıfıra indirilmesidir. Yalnızca bir bölgede %1'lik bir yük değişimi olması durumu ile her iki bölgede de aynı anda %1'lik bir yük değişimi olması durumu değerlendirildiğinden toplamda 8 adet denetleyici tasarımı yapılmıştır.

Çalışmada performans metriği olarak birinci bölgedeki frekans değişimi, ikinci bölgedeki frekans değişimi ve bağlantı hattındaki güç değişimi değerlerini göz önünde bulunduran, zaman ağırlıklı mutlak hatanın toplamı (ITAE) kullanılmıştır. Denklem (1)'de performans metriğinin denklemi verilmiştir.

$$ITAE = \int_{t=0}^{t_{sim}} t(|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + |\Delta P_{tie12}|) dt \quad (1)$$

Burada Δf_1 birinci bölgedeki frekans değişimini, Δf_2 ikinci bölgedeki frekans değişimini, ΔP_{tie12} bağlantı hattındaki güç değişimini, t_{sim} simülasyon süresini ifade etmektedir. Çalışmada kullanılan dört tip denetleyiciye ait blok diyagramları Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. (a) PID denetleyici blok diyagramı (b) TID denetleyici blok diyagramı
(c) TIDF denetleyici blok diyagramı (d) TIDFF denetleyici blok diyagramı.

PID denetleyici K_P , K_I ve K_D olmak üzere üç parametreye sahiptir ve transfer fonksiyonu Denklem (2)'de verilmiştir.

$$G_{PID}(s) = \frac{U_c(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} + sK_D \quad (2)$$

TID denetleyici K_T , K_I , K_D ve n olmak dört parametreye sahiptir ve transfer fonksiyonu Denklem (3)'te verilmiştir. Burada $\frac{1}{n}$ kesirli integratörün derecesidir.

$$G_{TID}(s) = \frac{U_c(s)}{E(s)} = K_T \frac{1}{s^n} + \frac{K_I}{s} + sK_D \quad (3)$$

TIDF denetleyici, TID denetleyici ek olarak türev kısmında bir filtre içermektedir. TID denetleyicinin tüm parametreleri ve filtreden gelen filtre kesme frekansı (NN) parametresi ile birlikte toplam beş parametreye sahiptir ve transfer fonksiyonu Denklem (4)'te verilmiştir.

$$G_{TIDF}(s) = \frac{U_C(s)}{E(s)} = K_T \frac{1}{s^n} + \frac{K_I}{s} + sK_D \frac{NN}{s+NN} \quad (4)$$

TIDFF denetleyici, TIDF denetleyiciden farklı olarak tam sayı dereceli bir filtre yerine kesir dereceli bir filtreye sahiptir. Kesirli türev derecesi (λf) ve TIDF denetleyicide bulunan tüm parametrelerle birlikte toplam altı parametreye sahiptir ve transfer fonksiyonu Denklem (5)'te verilmiştir.

$$G_{TIDFF}(s) = \frac{U_C(s)}{E(s)} = K_T \frac{1}{s^n} + \frac{K_I}{s} + sK_D \frac{NN}{s^{\lambda f} + NN} \quad (5)$$

Tablo 2'de bu denetleyicilere ait parametrelerin anlamları, optimizasyon için tercih edilen parametre aralıkları ve hangi denetleyicide hangi parametrelerin bulunduğu verilmiştir.

Tablo 2. Denetleyici parametrelerinin anlamları ve değer aralıkları.

Parametre	Parametrenin Değer Aralığı	Parametrenin Anlamı	Denetleyiciler
K_P	[0.01-6]	Oransal kazanç	PID
K_T	[0.01-6]	Eğimli kazanç	TID, TIDF, TIDFF
K_I	[0.01-6]	İntegral kazancı	PID, TID, TIDF, TIDFF
K_D	[0.01-6]	Türev kazancı	PID, TID, TIDF, TIDFF
n	[0.01-3]	1 / Kesirli integratör derecesi	TID, TIDF, TIDFF
NN	[0-300]	Filtre kesme frekansı	TIDF, TIDFF
λf	[0.01-3]	Kesirli türev derecesi	TIDFF

3. Bulgular ve Tartışma

Denetleyiciler, MATLAB/Simulink üzerinden benzetim çalışmaları yapılarak tasarlanmıştır. Simulink üzerinde Bölüm 2.1'de verilen iki bölgeli ara ısıtmalı termal güç sistemi modeli oluşturulmuş, DOA yardımıyla denetleyici optimizasyonları yapılmıştır. Denetleyicilerin optimizasyonu için kullanılan Denge Optimizasyon Algoritması'nın parçacık sayısı 30 olarak alınmıştır. İyi bir sonuç elde edebilmek adına iterasyon sayısı 100 olarak seçilmiştir. Simülasyon 15 saniye koşturulmuştur. İki çeşit yük değişimi durumu için birinci bölgedeki frekans değişimi, ikinci bölgedeki frekans değişimi ve bağlantı hattındaki güç değişimi grafikleri incelenmiş, bu grafiklerin alt ve üst aşma değerleri ile oturma zamanı değerleri tablolar halinde kaydedilmiştir. Yukarıdaki bölümde de belirtilen ve performans metriği olarak seçilen ITAE metriği bu değerler aracılığıyla

hesaplanmış ve denetleyiciler arasında karşılaştırma yapılmıştır. Oturma zamanı bandı ± 0.0005 olarak alınmıştır.

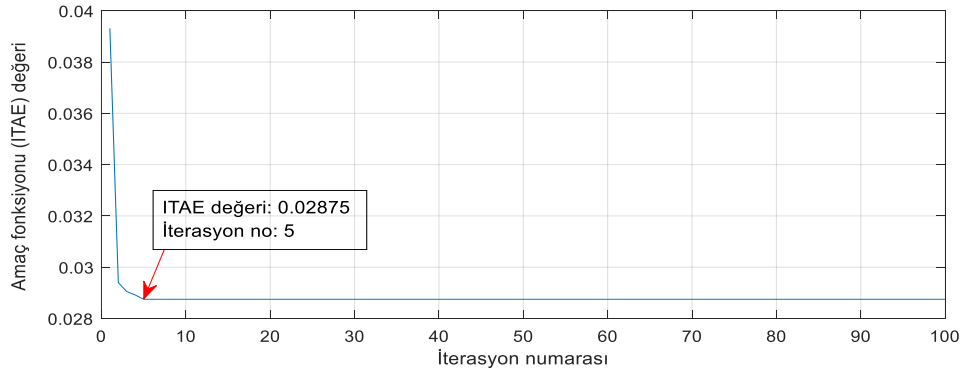
3.1. Yalnızca Birinci Bölgede Yük Değişimi Olması Durumu

Birinci bölgede 0.01 p.u. değerinde bir yük değişimi olması ve ikinci bölgede yük değişiminin olmaması durumunda, PID, TID, TIDF ve TIDFF denetleyici tasarımları yapılmıştır. Denetleyiciler, DOA ile optimize edilmiştir. Halihazırda literatürde bulunan GKOA ve SSOA ile optimize edilmiş TID denetleyici tasarımları (Sharma ve ark., 2021) ile DOA ile optimize edilerek tasarlanan denetleyicilerin performans karşılaştırması yapılmıştır. Tablo 3'te yalnızca birinci bölgede yük değişimi durumu için denetleyici parametreleri verilmiştir.

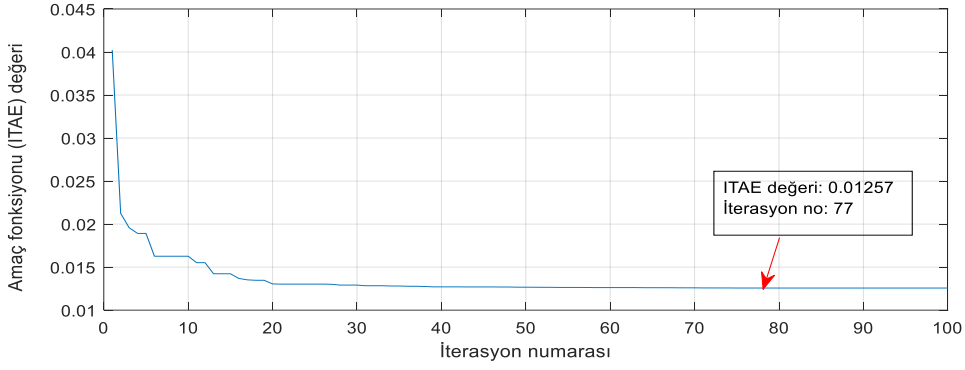
Tablo 3. Yalnızca birinci bölgede yük değişimi durumu için denetleyici parametreleri.

Parametre	DOA-PID	GKOA-TID (Sharma ve ark., 2021)	SSOA-TID (Sharma ve ark., 2021)	DOA-TID	DOA-TIDF	DOA-TIDFF
K_{P1}	6	-	-	-	-	-
K_{T1}	-	6	5.99929	5.9999	5.9998	6
K_{I1}	6	5.90565	2.03755	2.0125	1.9872	1.9243
K_{D1}	3.0523	1.80331	1.9398	1.9195	1.74	2.0190
n_1	-	1.90377	2.24377	2.2851	1.9584	1.9160
λf_1	-	-	-	-	-	0.7610
NN_1	-	-	-	-	10.9075	6.1489
K_{P2}	6	-	-	-	-	-
K_{T2}	-	5.59866	4.16632	3.0267	5.8884	5.5233
K_{I2}	6	5.90732	2.0156	1.4510	2.2148	0.0366
K_{D2}	3.0895	4.89975	4.35521	2.9462	5.0465	3.6493
n_2	-	1.79894	2.99896	2.9995	2.9999	2.1494
λf_2	-	-	-	-	-	0.2643
NN_2	-	-	-	-	266.4636	119.0419

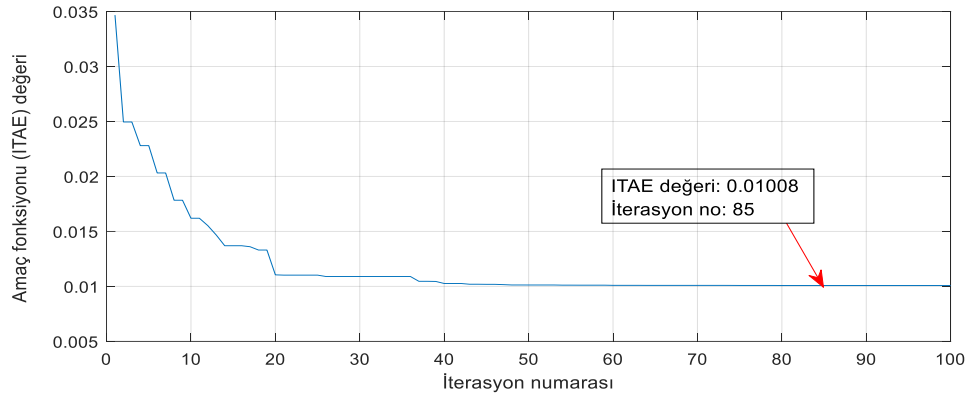
Tablo 3'te verilen optimize edilmiş parametreler ile elde edilen performans metriği ITAE değerine ait 100 iterasyon sonucunda oluşan yakınsama grafikleri Şekil 3'te verilmiştir. DOA-PID en iyi değeri 0.02875'e 5. iterasyonda, DOA-TID en iyi değeri 0.01257'ye 77. iterasyonda, DOA-TIDF en iyi değeri 0.01008'e 85. iterasyonda, DOA-TIDFF ise en iyi değeri 0.0097'ye 76. iterasyonda ulaşmıştır. Buradan da açıkça görüldüğü üzere en iyi ITAE değerine DOA-TIDFF denetleyici ulaşmıştır.



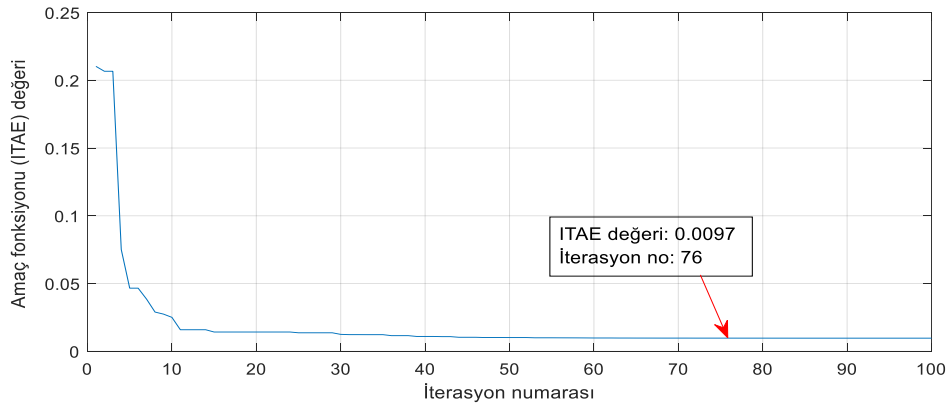
(a)



(b)



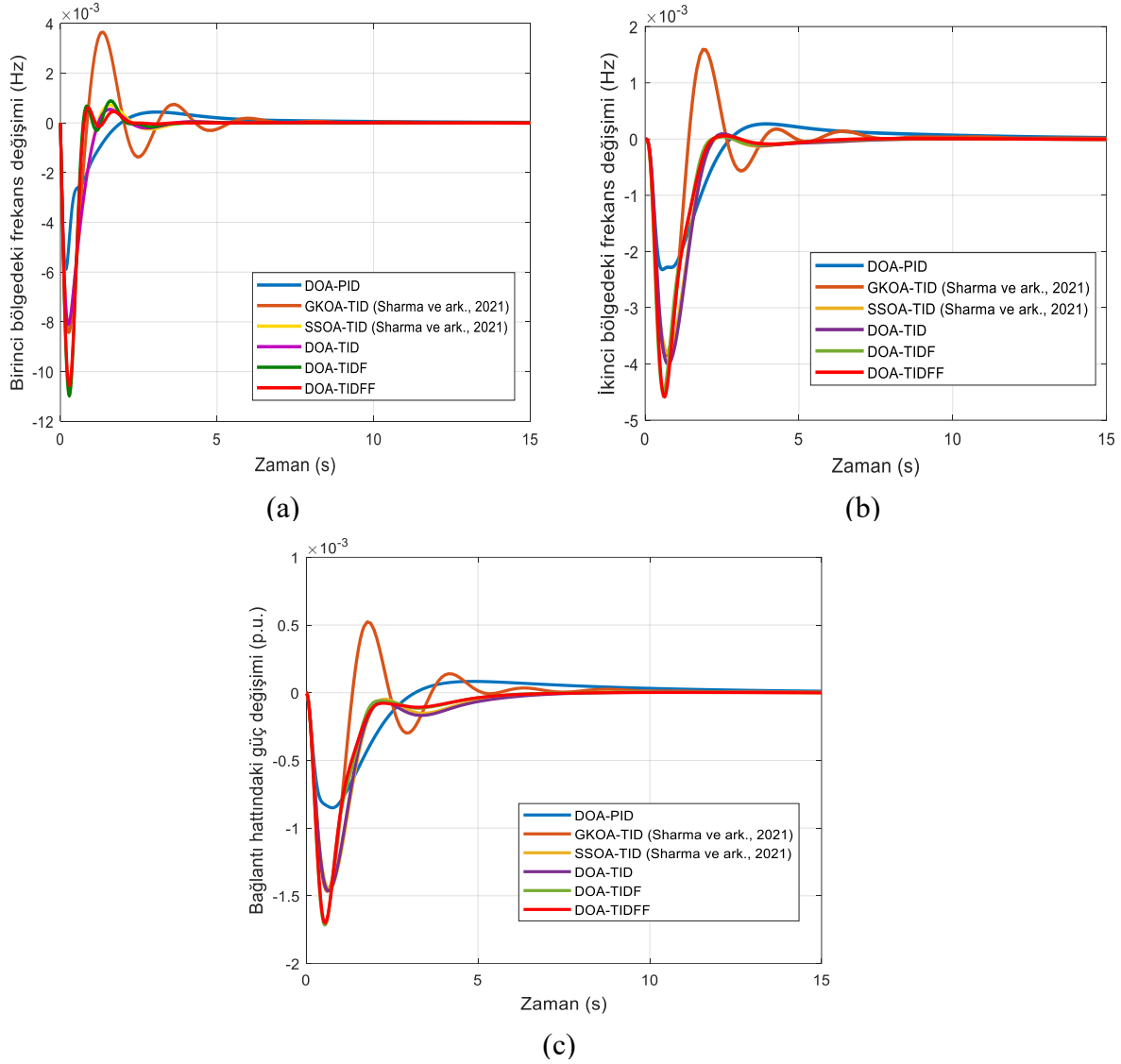
(c)



(d)

Şekil 3. Yalnızca birinci bölgede yük değişimi durumu için (a) DOA-PID denetleyici ITAE yakınsama grafiği (b) DOA-TID denetleyici ITAE yakınsama grafiği (c) DOA-TIDF denetleyici ITAE yakınsama grafiği (d) DOA-TIDFF denetleyici ITAE yakınsama grafiği

Simülasyon sonucunda elde edilen birinci bölgedeki frekans değişimi, ikinci bölgedeki frekans değişimi ve bağlantı hattındaki güç değişimi grafikleri Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Yalnızca bir bölgede yük değişimi durumu için (a) Birinci bölgedeki frekans değişimi grafiği (b) İkinci bölgedeki frekans değişimi grafiği (c) Bağlantı hattındaki güç değişimi grafiği

Yalnızca birinci bölgede yük değişimi olması durumu için tasarlanan denetleyicilerin yukarıda verilen birinci bölgedeki frekans değişimi, ikinci bölgedeki frekans değişimi ve bağlantı hattındaki güç değişimi grafiklerinin alt aşma ve üst aşma değerleri, oturma zamanları ile ITAE değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Yalnızca birinci bölgede yük değişimi durumu için tasarlanan denetleyicilerin performansları.

Ölçüt	Parametre İsmi	DOA-PID	GKOA-TID (Sharma ve ark., 2021)	SSOA-TID (Sharma ve ark., 2021)	DOA-TID	DOA-TIDF	DOA-TIDFF
Oturma Zamanı (s) ± 0.0005 bant	Δf_1	1.53	3.95	1.89	1.71	1.84	0.97
	Δf_2	2.19	3.31	1.86	1.88	1.74	1.79
	ΔP_{tie12}	1.63	1.91	1.48	1.46	1.39	1.33
Alt Aşma Değerleri	Δf_1	-0.0058	-0.0083	-0.008	-0.0081	-0.011	-0.01
	Δf_2	-0.0023	-0.0038	-0.0038	-0.004	-0.0045	-0.0046
	ΔP_{tie12}	-0.00085	-0.0014	-0.0014	-0.0014	-0.0017	-0.0017
Üst Aşma Değerleri	Δf_1	0.00043	0.0036	0.0007	0.00054	0.00089	0.0006
	Δf_2	0.00027	0.0016	0.00006	0.00009	0.00043	0.000058
	ΔP_{tie12}	0.000084	0.0005	0.000004	0.000005	0.0000036	0.000002
ITAE		0.02875	0.0269	0.01275	0.01257	0.01008	0.0097

Tablo 4'ten de görüldüğü üzere birinci bölgedeki frekans değişimi (Δf_1) için, DOA-TIDFF denetleyici alt aşma ve üst aşma değerleri bakımından en iyi performansı gösteremese de 0.97 saniye ile en iyi oturma zamanı değerine sahiptir. En iyi alt ve üst aşma değerleri DOA-PID denetleyiciye aittir.

İkinci bölgedeki frekans değişimi (Δf_2) için, alt aşma değeri için DOA-PID en iyi değeri verirken, 1.74 saniye oturma zamanı ve 0.000043 üst aşma değeri ile bu değerlerde DOA-TIDF en iyi performansı göstermektedir.

Bağlantı hattındaki güç değişimi (ΔP_{tie12}) için, DOA-TIDFF denetleyici 1.33 saniyelik oturma zamanı ile en iyi performansı göstermiştir. Alt aşma değeri en iyi olan denetleyici DOA-PID olurken, üst aşma değeri en iyi olan denetleyici DOA-TIDFF denetleyicidir.

Genel olarak yalnızca birinci bölgede yük değişimi olması durumunda, oturma süresi bakımından DOA-TIDFF, alt aşma değeri bakımından DOA-PID üstünlük sağlamıştır. Sırasıyla DOA-PID, DOA-TIDF ve DOA-TIDFF, yine sırasıyla birinci bölgedeki frekans değişimi, ikinci bölgedeki frekans değişimi ve bağlantı hattındaki güç değişiminin üst aşma değerlerinde üstünlük göstermişlerdir.

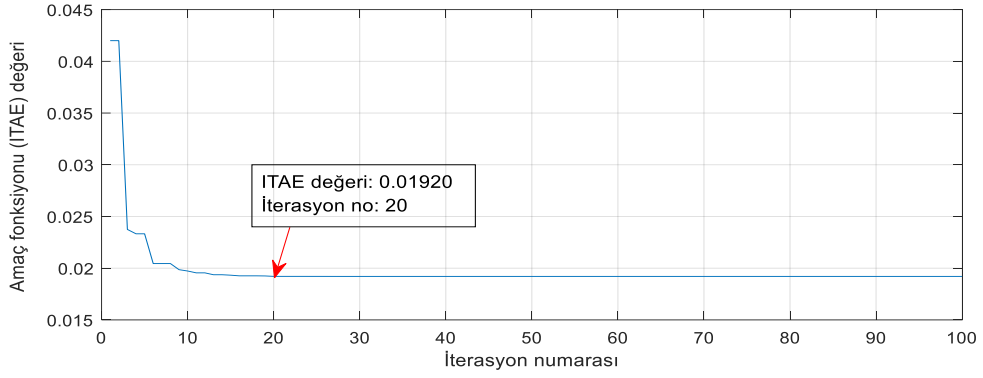
3.2. Her İki Bölgede Yük Değişimi Olması Durumu

Birinci bölgede 0.01 p.u. değerinde bir yük değişimi olması ve ikinci bölgede -0.01 p.u. değerinde bir yük değişimi olması durumunda, PID, TID, TIDF ve TIDFF denetleyici tasarımları yapılmıştır. Denetleyiciler, DOA ile optimize edilmiştir. Denetleyiciler oturma zamanı, alt aşma ve üst aşma değerleri ile performans metriği ITAE bakımından karşılaştırılmıştır. Tablo 5'te birinci ve ikinci bölgede yük değişimi olması durumu için bulunan denetleyici parametreleri verilmiştir.

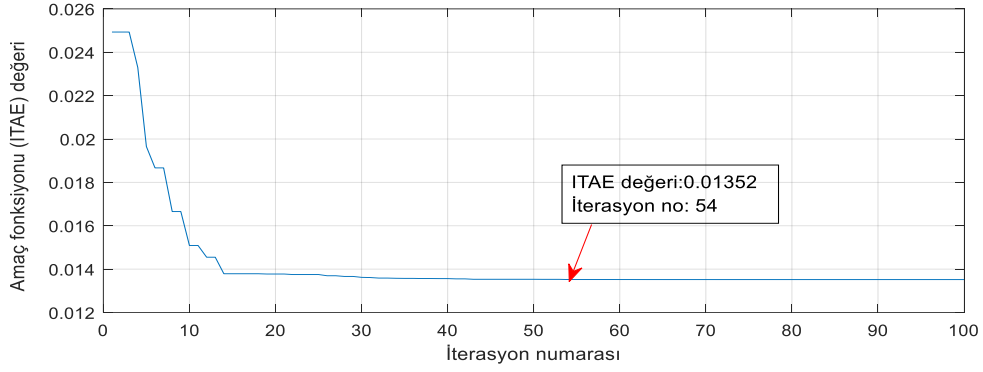
Tablo 5. Birinci ve ikinci bölgede yük değişimi durumu için bulunan denetleyici parametreleri.

Parametre	DOA-PID	DOA-TID	DOA-TIDF	DOA-TIDFF
K_{P1}	6	-	-	-
K_{T1}	-	6	5.9999	5.9997
K_{I1}	6	5.9997	5.9382	6
K_{D1}	1.5376	2.2437	2.1564	2.2869
n_1	-	3	3	2.7944
λ_{f_1}	-	-	-	0.9136
NN_1	-	-	270.2259	19.7883
K_{P2}	6	-	-	-
K_{T2}	-	6	5.9490	5.9999
K_{I2}	6	6	6	5.9964
K_{D2}	1.5396	2.2614	2.0615	2.2420
n_2	-	3	2.7434	2.7345
λ_{f_2}	-	-	-	0.8637
NN_2	-	-	16.9682	16.0938

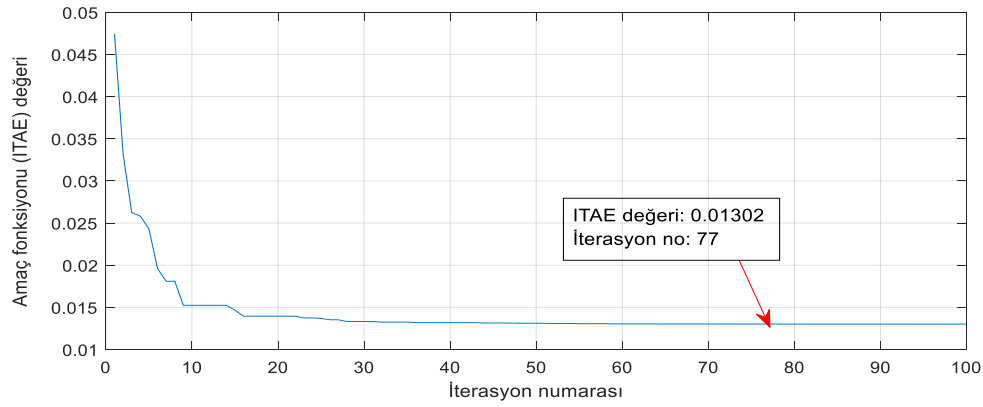
Tablo 5'te verilen optimize edilmiş parametreler ile elde edilen performans metriği ITAE değerine ait 100 iterasyon sonucunda oluşan yakınsama grafikleri Şekil 5'te verilmiştir. DOA-PID en iyi değeri 0.01920'ye 20. iterasyonda, DOA-TID en iyi değeri 0.01352'ye 54. iterasyonda, DOA-TIDF en iyi değeri 0.01302'ye 77. iterasyonda, DOA-TIDFF ise en iyi değeri 0.0126'ya 98. iterasyonda ulaşmıştır. Her iki bölgede de yük değişimi olması durumu için en iyi ITAE değerine yalnızca birinci bölgede yük değişimi durumunda olduğu gibi yine DOA-TIDFF denetleyici ulaşmıştır.



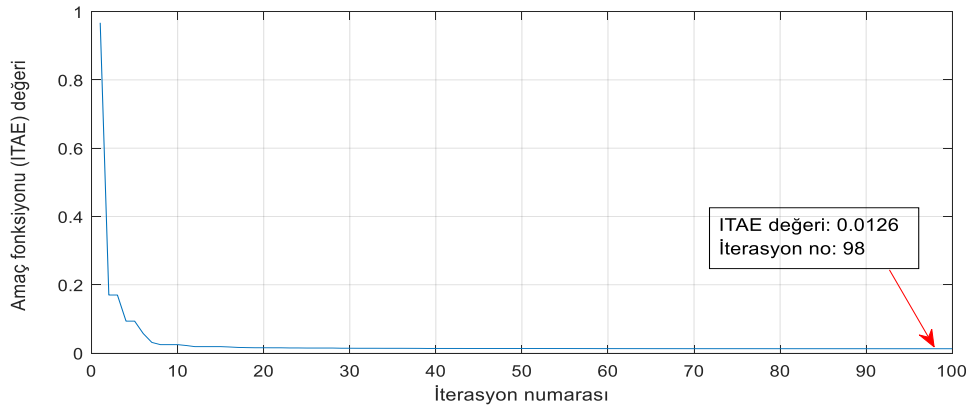
(a)



(b)



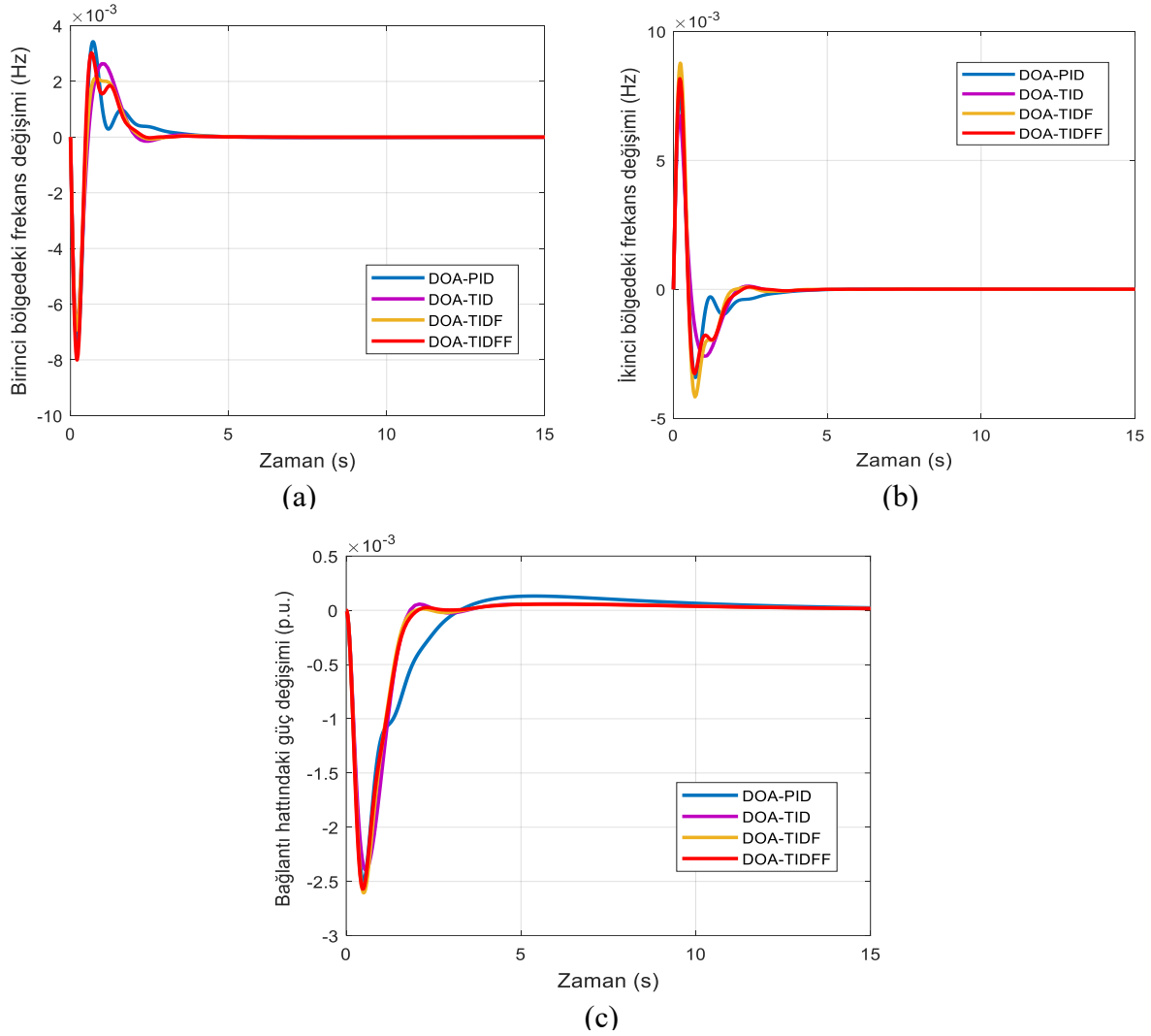
(c)



(d)

Şekil 5. İki bölgede de yük değişimi durumu için (a) DOA-PID denetleyici ITAE yakınsama grafiği (b) DOA-TID denetleyici ITAE yakınsama grafiği (c) DOA-TIDF denetleyici ITAE yakınsama grafiği (d) DOA-TIDFF denetleyici ITAE yakınsama grafiği

Simülasyon sonucunda elde edilen birinci bölgedeki frekans değişimi, ikinci bölgedeki frekans değişimi ve bağlantı hattındaki güç değişimi grafikleri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Her iki bölgede de yük değişimi durumu için (a) Birinci bölgedeki frekans değişimi grafiği (b) İkinci bölgedeki frekans değişimi grafiği (c) Bağlantı hattındaki güç değişimi grafiği

Her iki bölgede de yük değişimi olması durumu için tasarlanan denetleyicilerin yukarıda verilen birinci bölgedeki frekans değişimi, ikinci bölgedeki frekans değişimi ve bağlantı hattındaki güç değişimi grafiklerinin alt aşma ve üst aşma değerleri, oturma zamanları ile ITAE değerleri Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Her iki bölgede de yük değişimi durumu için tasarlanan denetleyicilerin performansları.

Ölçüt	Parametre İsmi	DOA-PID	DOA-TID	DOA-TIDF	DOA-TIDFF
Oturma Zamanı (s) ±0.0005 bant	Δf_1	2.03	1.82	1.81	1.77
	Δf_2	2.03	1.82	1.68	1.76
	ΔP_{tie12}	1.9	1.41	1.38	1.40
Alt Aşma Değerleri	Δf_1	-0.0075	-0.0067	-0.0069	-0.008
	Δf_2	-0.0034	-0.0026	-0.0041	-0.0032
	ΔP_{tie12}	-0.0025	-0.0024	-0.0026	-0.0025
Üst Aşma Değerleri	Δf_1	0.0034	0.0026	0.0021	0.03
	Δf_2	0.0075	0.0067	0.0087	0.0081
	ΔP_{tie12}	0.00013	0.000059	0.000057	0.000056
ITAE		0.0192	0.01352	0.01302	0.0126

Birinci bölgedeki frekans değişimi (Δf_1) için, DOA-TIDFF 1.77 saniye ile en iyi oturma zamanı değerine sahiptir. En iyi alt aşma değeri DOA-TID denetleyiciye aitken, en iyi üst aşma değeri DOA-TIDF denetleyiciye aittir.

İkinci bölgedeki frekans değişimi (Δf_2) için, en iyi oturma zamanına sahip denetleyici 1.68 saniye ile DOA-TIDF denetleyicidir. Yine ikinci bölgedeki frekans değişimi için en iyi alt ve üst aşma değerleri DOA-TID denetleyiciye aittir.

Bağlantı hattındaki güç değişimi (ΔP_{tie12}) için, DOA-TIDF denetleyici 1.38 saniyelik oturma zamanı ile en iyi performansı göstermiştir. Alt aşma değeri en iyi olan denetleyici DOA-TID olurken, üst aşma değeri en iyi olan denetleyici DOA-TIDFF denetleyicidir.

Genel olarak her iki bölgede de yük değişimi olması durumunda, oturma süresi bakımından DOA-TIDF denetleyici ve DOA-TIDFF denetleyici, alt aşma değeri bakımından DOA-TID üstünlük sağlamıştır. Yalnızca bir bölgede yük değişimi olması durumunda olduğu gibi üst aşma değerlerinde üstünlük farklılık göstermiştir. Sırasıyla DOA-TIDF, DOA-TID ve DOA-TIDFF, yine sırasıyla birinci bölgedeki frekans değişimi, ikinci bölgedeki frekans değişimi ve bağlantı hattındaki güç değişiminin üst aşma değerlerinde üstünlük göstermişlerdir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, iki bölgeli ara ısıtılmalı termal bir güç sistemi modellenerek, bu güç sistemi modelinin yük frekans kontrolünü yapmak için PID, TID, TIDF ve TIDFF denetleyici olmak üzere dört tip denetleyici tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan denetleyicilerin optimizasyonu DOA ile yapılmıştır. İki çeşit yük değişim durumu için dörder adet olmak üzere toplam 8 adet denetleyici tasarımı yapılmıştır. Performans metriği olarak seçilen ITAE değerinde literatürden alınan çalışmalar da dahil olmak üzere DOA-TIDFF denetleyicinin her iki yük durumunda da en iyi performansı gösterdiği görülmüştür. Alt aşma değerlerinde klasik DOA-PID denetleyici daha başarılıyken, üst aşma değerlerinde kesir hesabına dayalı denetleyiciler olan DOA-TID, DOA-TIDF ve DOA-TIDFF

denetleyicilerin başarılı olduğu görülmüştür. Ayrıca kesir hesabına dayalı bu denetleyicilerin oturma zamanında da üstün olduğu gösterilmiştir. Kesirli bir filtreye sahip olan ve çalışmanın baskın denetleyici tasarımı olan DOA-TIDFF denetleyicinin ise her iki yük değişimi durumunda da performans metriği ITAE değerinde üstün geldiği gözlemlenmiştir. Gelecekteki çalışmalar için mevcutta tasarlanan DOA-TIDFF denetleyici diğer optimizasyon algoritmaları ile optimize edilerek veya kaskad bir yapı içerisinde kullanılarak özellikle ITAE değeri gibi performans değerlerinde iyileşme sağlanabilir.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Bu çalışma Doç. Dr. Mustafa Şinasi AYAS danışmanlığında 31.03.2023 tarihinde tamamladığımız “İki Bölgeli Güç Sistemlerinde Yük Frekans Kontrolü İçin Kesir Hesabına Dayalı Denetleyici Tasarımı” başlıklı yüksek lisans tezi esas alınarak hazırlanmıştır (Yüksek Lisans, Karadeniz Teknik Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye).

Kaynaklar

- Ahmed, E., M., Mohamed, E., A., Selim, A., Aly, M., Alsadi, A., Alhosaini, W., Alnuman, H., Ramadan, H., A., (2023), Improving Load Frequency Control Performance in Interconnected Power Systems with a New Optimal High Degree of Freedom Cascaded FOTPID-TIDF Controller, *Ain Shams Engineering Journal*, 14(10), 102207.
- Ali, E., S. ve Abd-Elazim, S., M., (2013), BFOA Based Design of PID Controller for Two Area Load Frequency Control with Nonlinearities, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 51, 224-231.
- Behera, S., P., Biswal, A., Samantray, S., S. ve Swain, B., (2018, March), Modeling and Stability Analysis of I-TD controller for Load Frequency Control of Two-area Power System using Differential Evolution (DE) Algorithm, *IEEE International Conference on Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP-2018)*, (pp. 1-6), India.
- Daraz, A., Malik, S., A., Azar, A., T., Aslam, S., Alkhalifah, T., Alturise, F., (2022), Optimized Fractional Order Integral-Tilt Derivative Controller for Frequency Regulation of Interconnected Diverse Renewable Energy Resources, *IEEE Access*, 10, 43514-43527.

- Elgerd, O., I. ve Fosha, C., E., (1970), Optimum Megawatt-Frequency Control of Multiarea Electric Energy Systems, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 89(4), 556-563.
- Faramarzi, A., Heidarinejad, M., Stephens, B. ve Mirjalili, S., (2020), Equilibrium Optimizer: A Novel Optimization Algorithm, Knowledge-Based Systems, 191, 105190.
- Gheisarnejad, M. ve Khooban, M., H., (2019), 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, 41(9), 2563-2581.
- Karyeyen, A., (2009). Çok Bölgeli Elektrik Güç Sistemlerinde Optimum Yük Frekans Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Mohanty, P. ve Sahu, R., K., (2020, July) Analysis of Hybrid Tilt Integral Derivative Controller for Multi Area Power System with Real Time Simulation, 2020 International Conference on Computational Intelligence for Smart Power System and Sustainable Energy (CISPSSE), (pp. 1-4), India.
- Özdemirci, E., (2002). Bir Elektrik Güç Sisteminde Yük-Frekans Kontrolü İncelemesi ve Modellemesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Priyadarshani, S., Subashini, K., R. ve Satapathy, J., K., (2021), Pathfinder Algorithm Optimized Fractional Order Tilt-Integral-Derivative (FOTID) Controller for Automatic Generation Control of Multi-Source Power System, Microsystem Technologies, 27, 23-35.
- Sahin, E., (2020), 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, 8, 12327-12342.
- Sahoo, B., P. ve Panda, S., (2020, January), Load Frequency Control of Solar Photovoltaic/Wind/Biogas/Biodiesel Generator Based Isolated Microgrid Using Harris Hawks Optimization, 2020 First International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T), (pp. 188-193), India.
- Sahu, R., K., Panda, S., Biswal, A. ve Sekhar, G., T., C., (2016), Design and Analysis of Tilt Integral Derivative Controller with Filter for Load Frequency Control of Multi-Area Interconnected Power Systems, ISA Transactions, 61, 251-264.
- Sahu, R., K., Panda, S. ve Rout, U., K., (2013), DE Optimized Parallel 2-DOF PID Controller for Load Frequency Control of Power System with Governor Dead-Band Nonlinearity, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 49, 19-33.
- Sahu, P., R., Simhadri, K., Mohanty, B., Hota, P., K., Abdelaziz, A., Y., Albalawi, F., Ghoneim, S., S., M., Elsis, M., (2023), Effective Load Frequency Control of Power System with Two-Degree Freedom Tilt-Integral-Derivative Based on Whale Optimization Algorithm, Sustainability, 15(2), 1515.
- Sekhar, G., T., C., Sahu, R., K., Baliarsingh, A., K. ve Panda, S., (2016), Load Frequency Control of Power System Under Deregulated Environment Using Optimal Firefly Algorithm, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 74, 195-211.
- Sharma, M., Prakash, S. Saxena, S. ve Dhundhara, S., (2021), Optimal Fractional-Order Tilted-Integral-Derivative Controller for Frequency Stabilization in Hybrid Power System Using Salp Swarm Algorithm, Electric Power Components and Systems, 48(18) 1912-1931.
- Topno, P., N. ve Chanana, S., (2015, December), Tilt Integral Derivative Control for Two-Area Load Frequency Control Problem, 2015 2nd International Conference on Recent Advances in Engineering & Computational Sciences (RAECS) (pp. 1-6), India.
- Wadhwa, K., Gupta, S., K., (2023), A Novel Black Widow Optimized Controller Approach for Automatic Generation Control in Modern Hybrid Power Systems, International Journal of Electrical and Electronics Research, 11(3), 819-825.
- Yalçın E., Çam, E., Vardar, T., ve Lüy, M., (2013), PID Kontrolör ile İki Bölgeli Güç Sistemlerinde Yük Frekans Kontrolünün İncelenmesi, International Journal of Engineering Research and Development, 5(2), 7-11.
- Yılmaz, Z., Y., (2020). Güç Sistemlerinde Yük-Frekans Kontrolünde PID Denetleyici ve Parametrelerinin Simbiyotik Organizmalar Arama Algoritması ile Ayarı, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.