

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**İKİ BÖLGELİ GÜÇ SİSTEMLERİNDE YÜK FREKANS KONTROLÜ İÇİN KESİR HESABINA
DAYALI DENETLEYİCİ TASARIMI**

Yüksek Lisans Tezi

Alper Kemal GÜLİÇER

**MART 2023
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**İKİ BÖLGELİ GÜÇ SİSTEMLERİNDE YÜK FREKANS KONTROLÜ İÇİN KESİR
HESABINA DAYALI DENETLEYİCİ TASARIMI**

Mühendis Alper Kemal GÜLİÇER

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"ELEKTRİK YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 21 / 02 / 2023

Tezin Savunma Tarihi : 31 / 03 / 2023

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mustafa Şinasi AYAS

ORCID : - - -

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı kapsamında yapılan bu tez çalışmasında denge optimizasyon algoritmasıyla optimize edilmiş kesir hesabına dayalı denetleyiciler ile çeşitli iki bölgeli güç sistemleri için yük frekans kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Yapılmış olan bu çalışmada, her zaman yanımda olan, tecrübelerini ve akademik bilgilerini benimle paylaşan ve beni bu çalışmamda yönlendiren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mustafa Şinasi AYAS'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tüm eğitim hayatım boyunca yanımda olan aileme sonsuz sevgi, saygı ve minnetlerimi sunarım.

Alper Kemal GÜLİÇER
Trabzon, 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “İki Bölge Güç Sistemlerinde Yük Frekans Kontrolü için Kesir Hesabına Dayalı Denetleyici Tasarımı” başlıklı bu çalışmayı baştan sona Doç. Dr. Mustafa Şinasi AYAS’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 31/03/2023

Alper Kemal GÜLİÇER

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER DİZİNİ	XVI
KISALTMALAR DİZİNİ	XIX
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Araştırması.....	2
1.3. Teorik Altyapı ve Modelleme.....	7
1.3.1. Yük Frekans Kontrolü	7
1.3.1.1. Birincil Kontrol Çevrimi	8
1.3.1.2. İkincil Kontrol Çevrimi	9
1.3.2. Güç Sistemi Modeli	10
1.3.2.1. Generatör Modeli.....	11
1.3.2.2. Yük Modeli.....	11
1.3.2.3. Governor Modeli	12
1.3.2.4. Ara Isıtmasız Termal Güç Ünitesi Modeli	13
1.3.2.5. Ara Isıtmalı Termal Güç Ünitesi Modeli.....	14
1.3.2.6. Hidro Güç Ünitesi Modeli	15
1.3.2.7. Gaz Güç Ünitesi Modeli.....	17
1.3.2.8. Governor Ölü Bantlı Termal Governor Modeli.....	19
1.3.2.9. Üretim Oranı Kısıtlaması Modeli	20

1.3.2.9.1.	Termal Güç Ünitesi Üretim Oranı Kısıtlaması Modeli	20
1.3.2.9.2.	Hidro Güç Ünitesi Üretim Oranı Kısıtlaması Modeli	21
1.3.2.10.	Kontrol Bölgesi Modeli	21
1.3.2.11.	Bağlantı Hattı Modeli	22
1.3.2.12.	İki Bölge Güç Sistemi Modeli.....	23
1.3.2.13.	Kesir Dereceli Hesaplama	25
1.3.3.	Denetleyici Yapıları.....	28
1.3.3.1.	PID Denetleyici	29
1.3.3.2.	TID Denetleyici	30
1.3.3.3.	TIDF Denetleyici.....	31
1.3.3.4.	TIDFF Denetleyici.....	33
1.3.4.	Denge Optimizasyon Algoritması	33
1.3.4.1.	Başlatma Adımı	34
1.3.4.2.	Denge Havuzu Oluşturma	34
1.3.4.3.	Üstel Terim Oluşturma	35
1.3.4.4.	Üretim Oranının Uygulanması	36
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	38
2.1.	Yük Frekans Kontrolü Yapılan Güç Sistemleri.....	38
2.1.1.	İki Bölge Ara Isıtmalı Termal Güç Sistemi	38
2.1.2.	İki Bölge Çok Kaynaklı Güç Sistemi	40
2.1.3.	Doğrusal Olmayan İki Bölge Çok Kaynaklı Güç Sistemi.....	42
2.2.	Denetleyici Parametrelerinin Optimizasyonu.....	45
2.2.1.	PID Denetleyici Optimizasyonu	45
2.2.1.1.	İki Bölge Ara Isıtmalı Termal Güç Sisteminde PID Denetleyici Optimizasyonu	46
2.2.1.2.	İki Bölge Çok Kaynaklı Güç Sisteminde PID Denetleyici Optimizasyonu ...	48
2.2.1.3.	Doğrusal Olmayan İki Bölge Çok Kaynaklı Güç Sisteminde PID Denetleyici Optimizasyonu	50
2.2.2.	TID Denetleyici Optimizasyonu.....	52
2.2.2.1.	İki Bölge Ara Isıtmalı Termal Güç Sisteminde TID Denetleyici Optimizasyonu	53

2.2.2.2.	İki Bölgele Çok Kaynaklı Güç Sisteminde TID Denetleyici Optimizasyonu...	55
2.2.2.3.	Doğrusal Olmayan İki Bölgele Çok Kaynaklı Güç Sisteminde TID Denetleyici Optimizasyonu	57
2.2.3.	TIDF Denetleyici Optimizasyonu	60
2.2.3.1.	İki Bölgele Ara Isıtmalı Termal Güç Sisteminde TIDF Denetleyici Optimizasyonu.....	60
2.2.3.2.	İki Bölgele Çok Kaynaklı Güç Sisteminde TIDF Denetleyici Optimizasyonu.....	63
2.2.3.3.	Doğrusal Olmayan İki Bölgele Çok Kaynaklı Güç Sisteminde TIDF Denetleyici Optimizasyonu	65
2.2.4.	TIDFF Denetleyici Optimizasyonu	68
2.2.4.1.	İki Bölgele Ara Isıtmalı Termal Güç Sisteminde TIDFF Denetleyici Optimizasyonu.....	68
2.2.4.2.	İki Bölgele Çok Kaynaklı Güç Sisteminde TIDFF Denetleyici Optimizasyonu.....	71
2.2.4.3.	Doğrusal Olmayan İki Bölgele Çok Kaynaklı Güç Sisteminde TIDFF Denetleyici Optimizasyonu	73
3.	BENZETİM ÇALIŞMALARI.....	76
3.1.	İki Bölgele Ara Isıtmalı Termal Güç Sistemi Benzetim Sonuçları.....	76
3.2.	İki Bölgele Çok Kaynaklı Güç Sistemi Benzetim Sonuçları	81
3.3.	Doğrusal Olmayan İki Bölgele Çok Kaynaklı Güç Sistemi Benzetim Sonuçları.....	87
4.	SONUÇLAR.....	94
5.	KAYNAKLAR.....	95
6.	EKLER	101
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

İKİ BÖLGELİ GÜÇ SİSTEMLERİNDE YÜK FREKANS KONTROLÜ İÇİN KESİR HESABINA DAYALI DENETLEYİCİ TASARIMI

Alper Kemal GÜLİÇER

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Mustafa Şinasi AYAS
2023, 103 Sayfa

Bu tez çalışmasında üç farklı iki bölgeli güç sisteminin yük frekans kontrolü gerçekleştirilmiştir. İki bölgeli ara ısıtılmalı termal güç sistemi, iki bölgeli çok kaynaklı güç sistemi ve doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sistemi modelleri oluşturulmuş, bu modeller için iki çeşit yük değişimi durumunda dört farklı denetleyicinin davranışı gözlemlenmiştir. Oransal-integral-türev (PID), eğimli-integral-türev (TID), filtreli eğimli-integral-türev (TIDF) ve kesirli filtreli eğimli-integral-türev (TIDFF), tez kapsamında tasarlanan ve kullanılan denetleyicilerdir. Hata tabanlı performans metriklerinden biri olan zaman ağırlık mutlak hatanın toplamı (ITAE) metriğini en aza düşürmeyi amaçlayan denetleyiciler Denge Optimizasyon Algoritması ile optimize edilerek tasarlanmıştır. Güç sistemi modellerinin denetleyici ile kontrolü sonrası elde edilen amaç fonksiyonu değeri, frekans değişimi eğrileri ve bağlantı hattındaki güç eğrileri incelenmiş, bu eğrilerin belirli koşullar altındaki oturma süresi, alt ve üst aşma değerleri ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalarla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Çoğu durum için kesir hesabına dayalı denetleyiciler olan TID, TIDF ve TIDFF denetleyicilerin, klasik PID denetleyicinin performansından daha üstün bir performans gösterdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yük frekans kontrolü, TID denetleyici, TIDF denetleyici, TIDFF denetleyici, denge optimizasyon algoritması.

Master Thesis

SUMMARY

FRACTIONAL CALCULUS BASED CONTROLLER DESIGN FOR LOAD FREQUENCY CONTROL IN TWO-AREA POWER SYSTEMS

Alper Kemal GÜLİÇER

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical-Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Mustafa Şinasi AYAS
2023, 103 Pages

In this thesis, load frequency control of three different two-area power systems is realized. Two-area reheat thermal power system, two-area multi-source power system and non-linear two-area multi-source power system models are established and the behavior of four different controllers is observed for these models under two types of load changes. Proportional-integral-derivative (PID), tilt-integral-derivative (TID), tilt-integral-derivative with derivative filter (TIDF) and tilt-integral-derivative with fractional derivative filter (TIDFF) are the controllers designed and used in the thesis. Aiming to minimize the time-weighted absolute error (ITAE) metric, which is one of the error-based performance metrics, the controllers are designed by optimizing with the Equilibrium Optimization Algorithm. The objective function value, frequency change curves and tie line power curves obtained after the control of the power system models with the controller are examined and the settling time, undershoot and overshoot values of these curves under certain conditions are presented. The results obtained are presented in comparison with the studies in the literature.

For most of the cases, the fractional calculus-based controllers, i.e. TID, TIDF and TIDFF, are found to outperform the performance of the classical PID controller.

Keywords: Load frequency control, TID controller, TIDF controller, TIDFF controller, equilibrium optimization algorithm.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. İki bölgeli bir güç sistemi için yük frekans kontrolü çevrimleri.....	8
Şekil 1.2. Birincil kontrol çevrimine ait karakteristik.....	9
Şekil 1.3. Birincil ve ikincil kontrol çevrimlerinin karakteristiği.....	10
Şekil 1.4. Generatör doğrusal modeli.....	11
Şekil 1.5. Generatör ve yük doğrusal modeli.....	12
Şekil 1.6. Governor doğrusal modeli.....	13
Şekil 1.7. Ara ısıtmasız termal güç ünitesi doğrusal modeli.....	14
Şekil 1.8. Ara ısıtmalı termal güç ünitesi doğrusal modeli.....	15
Şekil 1.9. Hidro güç ünitesi döngüsü.....	16
Şekil 1.10. Hidro güç ünitesi doğrusal modeli.....	17
Şekil 1.11. Gaz türbini döngüsü.....	17
Şekil 1.12. Gaz güç ünitesi doğrusal modeli.....	19
Şekil 1.13. Governor ölü bantlı termal governor doğrusal modeli.....	20
Şekil 1.14. Termal güç ünitesi üretim oranı kısıtlaması doğrusal modeli.....	21
Şekil 1.15. Hidro güç ünitesi üretim oranı kısıtlaması doğrusal modeli.....	21
Şekil 1.16. Kontrol bölgesi doğrusal modeli.....	22
Şekil 1.17. Bağlantı hattı doğrusal modeli.....	23
Şekil 1.18. İki bölgeli güç sistemi doğrusal modeli.....	23
Şekil 1.19. Denetleyicinin güç sistemi modeline uygulanması.....	29
Şekil 1.20. PID denetleyici blok diyagramı.....	30
Şekil 1.21. TID denetleyici blok diyagramı.....	31
Şekil 1.22. TIDF denetleyici blok diyagramı.....	32
Şekil 1.23. TIDF denetleyici geribeslemeli blok diyagramı.....	32
Şekil 1.24. TIDFF denetleyici blok diyagramı.....	33
Şekil 1.25. Denge optimizasyon algoritması akış şeması.....	37
Şekil 2.1. İki bölgeli ara ısıtmalı termal güç sistemi doğrusal modeli.....	39
Şekil 2.2. İki bölgeli çok kaynaklı güç sistemi doğrusal modeli.....	41
Şekil 2.3. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sistemi modeli.....	44
Şekil 2.4. PID denetleyici optimizasyonunun blok şeması.....	46

Şekil 2.5. İki bölgeli ara ısıtılmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA-PID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi.....	47
Şekil 2.6. İki bölgeli ara ısıtılmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için DOA-PID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi.....	48
Şekil 2.7. İki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA-PID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi.....	49
Şekil 2.8. İki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için DOA-PID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi.....	50
Şekil 2.9. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA-PID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi.....	51
Şekil 2.10. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için DOA-PID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi.....	52
Şekil 2.11. TID denetleyici optimizasyonunun blok şeması.....	53
Şekil 2.12. İki bölgeli ara ısıtılmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA-TID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi.....	54
Şekil 2.13. İki bölgeli ara ısıtılmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için DOA-TID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi..	55
Şekil 2.14. İki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA-TID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi.....	56
Şekil 2.15. İki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için DOA-TID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi.....	57
Şekil 2.16. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA-TID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi.....	58
Şekil 2.17. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için DOA-TID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi.....	59
Şekil 2.18. TIDF denetleyici optimizasyonunun blok şeması.....	60
Şekil 2.19. İki bölgeli ara ısıtılmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA-TIDF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi.....	61
Şekil 2.20. İki bölgeli ara ısıtılmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için DOA-TIDF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi.....	62
Şekil 2.21. İki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA-TIDF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi.....	64
Şekil 2.22. İki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için DOA-TIDF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi.....	65

Şekil 2.23. Doğrusal olmayan iki bölgeci çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA-TIDF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi.....	66
Şekil 2.24. Doğrusal olmayan iki bölgeci çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için DOA-TIDF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi.....	67
Şekil 2.25. TIDFF denetleyici optimizasyonunun blok şeması.....	68
Şekil 2.26. İki bölgeci ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA-TIDFF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi.....	69
Şekil 2.27. İki bölgeci ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için DOA-TIDFF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi.....	70
Şekil 2.28. İki bölgeci çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA-TIDFF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi.....	72
Şekil 2.29. İki bölgeci çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için DOA-TIDFF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi.....	73
Şekil 2.30. Doğrusal olmayan iki bölgeci çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA-TIDFF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi....	74
Şekil 2.31. Doğrusal olmayan iki bölgeci çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için DOA-TIDFF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi.....	75
Şekil 3.1. İki bölgeci ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için birinci bölge frekans değişimi eğrisi.....	76
Şekil 3.2. İki bölgeci ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ikinci bölge frekans değişimi eğrisi.....	77
Şekil 3.3. İki bölgeci ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için bağlantı hattı güç değişimi eğrisi.....	78
Şekil 3.4. İki bölgeci ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için birinci bölge frekans değişimi eğrisi.....	79
Şekil 3.5. İki bölgeci ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için ikinci bölge frekans değişimi eğrisi.....	80
Şekil 3.6. İki bölgeci ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için bağlantı hattı güç değişimi eğrisi.....	80
Şekil 3.7. İki bölgeci çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için birinci bölge frekans değişimi eğrisi.....	82
Şekil 3.8. İki bölgeci çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ikinci bölge frekans değişimi eğrisi.....	82
Şekil 3.9. İki bölgeci çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için bağlantı hattı güç değişimi eğrisi.....	83

Şekil 3.10. İki bölge çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için birinci bölge frekans değişimi eğrisi.....	85
Şekil 3.11. İki bölge çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için ikinci bölge frekans değişimi eğrisi.....	86
Şekil 3.12. İki bölge çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için bağlantı hattı güç değişimi eğrisi.....	86
Şekil 3.13. Doğrusal olmayan iki bölge çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için birinci bölge frekans değişimi eğrisi.....	88
Şekil 3.14. Doğrusal olmayan iki bölge çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ikinci bölge frekans değişimi eğrisi.....	89
Şekil 3.15. Doğrusal olmayan iki bölge çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için bağlantı hattı güç değişimi eğrisi.....	89
Şekil 3.16. Doğrusal olmayan iki bölge çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için birinci bölge frekans değişimi eğrisi.....	91
Şekil 3.17. Doğrusal olmayan iki bölge çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için ikinci bölge frekans değişimi eğrisi.....	91
Şekil 3.18. Doğrusal olmayan iki bölge çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için bağlantı hattı güç değişimi eğrisi.....	92

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 2.1. İki bölgele ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ideal PID denetleyici parametreleri.....	47
Tablo 2.2. İki bölgele ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için ideal PID denetleyici parametreleri.....	47
Tablo 2.3. İki bölgele çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ideal PID denetleyici parametreleri.....	48
Tablo 2.4. İki bölgele çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için ideal PID denetleyici parametreleri.....	49
Tablo 2.5. Doğrusal olmayan iki bölgele çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ideal PID denetleyici parametreleri.....	50
Tablo 2.6. Doğrusal olmayan iki bölgele çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için ideal PID denetleyici parametreleri.....	51
Tablo 2.7. İki bölgele ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ideal TID denetleyici parametreleri.....	53
Tablo 2.8. İki bölgele ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için ideal TID denetleyici parametreleri.....	54
Tablo 2.9. İki bölgele çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ideal TID denetleyici parametreleri.....	55
Tablo 2.10. İki bölgele çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için ideal TID denetleyici parametreleri.....	56
Tablo 2.11. Doğrusal olmayan iki bölgele çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ideal TID denetleyici parametreleri.....	58
Tablo 2.12. Doğrusal olmayan iki bölgele çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için ideal TID denetleyici parametreleri.....	59
Tablo 2.13. İki bölgele ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ideal TIDF denetleyici parametreleri.....	61
Tablo 2.14. İki bölgele ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için ideal TIDF denetleyici parametreleri.....	62
Tablo 2.15. İki bölgele çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ideal TIDF denetleyici parametreleri.....	63
Tablo 2.16. İki bölgele çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için ideal TIDF denetleyici parametreleri.....	64

Tablo 2.17. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ideal TIDF denetleyici parametreleri.....	66
Tablo 2.18. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için ideal TIDF denetleyici parametreleri.....	67
Tablo 2.19. İki bölgeli ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ideal TIDFF denetleyici parametreleri.....	69
Tablo 2.20. İki bölgeli ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için ideal TIDFF denetleyici parametreleri.....	70
Tablo 2.21. İki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ideal TIDFF denetleyici parametreleri.....	71
Tablo 2.22. İki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için ideal TIDFF denetleyici parametreleri.....	72
Tablo 2.23. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ideal TIDFF denetleyici parametreleri.....	74
Tablo 2.24. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için ideal TIDF denetleyici parametreleri.....	75
Tablo 3.1. İki bölgeli ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için tasarlanan denetleyicilerin performansları.....	78
Tablo 3.2. İki bölgeli ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için tasarlanan denetleyicilerin performansları.....	81
Tablo 3.3. İki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için tasarlanan denetleyicilerin performansları.....	84
Tablo 3.4. İki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için tasarlanan denetleyicilerin performansları.....	87
Tablo 3.5. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için tasarlanan denetleyicilerin performansları.....	90
Tablo 3.6. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için tasarlanan denetleyicilerin performansları.....	93
Tablo 6.1. İki bölgeli ara ısıtmalı termal güç sistemi parametreleri [49].....	101
Tablo 6.2. İki bölgeli çok kaynaklı güç sistemi parametreleri [49].....	102
Tablo 6.3. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sistemi parametreleri [42]...	103

SEMBOLLER DİZİNİ

a_G	Gaz ünite katılım faktörü
a_H	Hidro ünite katılım faktörü
a_T	Termal ünite katılım faktörü
a_1	Keşif aşamasında kullanılan sabit değer
a_2	Sömürü aşamasında kullanılan sabit değer
a_{12}	Birinci ve ikinci bölgenin güç oranından gelen katılım faktörü
B	Frekans kutuplama sabiti
b_G	Valf konumlandırıcı zaman sabiti
C	Konsantrasyon değeri
$C_{d,havuzu}$	Denge havuzu
C_{eq}	Denge durumunda üretim olmadığı andaki konsantrasyon değeri
$C_{eq,ort}$	En iyi dört adayın ortalama değeri
c_G	Valf konumlandırıcı sabiti
D	Yük sönümlleme sabiti
f_N	Frekansın nominal değeri
f_0	Frekansın arzulanan değeri
G	Kontrol hacmindeki kütlenin üretim oranı
G_0	Üretim oranı başlangıç değeri
H	Generatör eylemsizlik momenti
K_D	Türev kazancı
K_I	İntegral kazancı
K_P	Oransal kazanç
K_p	Kontrol bölgesi kazancı
K_r	Yeniden ısıtma kazanç sabiti
K_T	Eğim kazancı
M	Açısal momentum
n	Kesirli integratör derecesi
N	Yakınsama derecesi
NN	Filtre kesme frekansı

N_1, N_2	Governor ölü bandı Fourier katsayıları
P_e	Elektriksel güç
P_m	Mekanik güç
P_{PS}	Kontrol bölgesinin toplam gücü
R	Hız regülasyon sabiti
R_G	Gaz ünite hız regülasyon sabiti
R_H	Hidro ünite hız regülasyon sabiti
R_T	Termal ünite hız regülasyon sabiti
T_{CD}	Gaz türbini kompresör deşarj süresi
T_{CR}	Gaz türbini yanma tepkimesindeki gecikme süresi
T_D	Hidro governor geçici düşüş zaman sabiti
T_F	Gaz türbini yakıt zaman sabiti
T_H	Hidrolik yükselteç zaman sabiti
T_h	Hidro governor zaman sabiti
T_p	Kontrol bölgesi zaman sabiti
T_R	Hidro governor sıfırlama zamanı
T_r	Yeniden ısıtma zaman sabiti
$t_{simulation}$	Simülasyon süresi
T_T	Buhar türbini zaman sabiti
T_{TG}	Termal governor zaman sabiti
T_W	Cebri borudaki suyun nominal başlangıç zamanı
T_{12}	Bağlantı hattı senkronize edici momentum katsayısı
ÜKP	Üretim oranı kontrol parametresi
ÜO	Üretim olasılığı
V	Kontrol hacmi
W_{Kn}	Depolanan kinetik enerjinin nominal değeri
X_G	Gaz governor ilerleme süresi sabiti
Y_G	Gaz governor gecikme süresi sabiti
ω_k^k	k dizisinin kutupları
ω_k^s	k dizisinin sıfırları
ω_L	Bant geçiren filtrenin alt frekans değeri
ω_U	Bant geçiren filtrenin üst frekans değeri

ω_0	Açısal hız nominal değeri
λ	Kesir dereceli operatörün kesir derecesi
λf	Kesirli filtre türev derecesi
Δf	Frekans değişimi
ΔP_C	Tüketilen güç değişimi
ΔP_g	Türbine uygulanacak mekanik gücün değişimi
ΔP_h	Hidro governor çıkış gücü değişimi
ΔP_L	Yük değişimi
ΔP_{ref}	Referans güç değişimi
ΔP_{tie12}	Bağlantı hattındaki güç değişimi
ΔP_v	Hidrolik yükseltecin girişinde oluşan güç değişimi
ΔP_U	Üretilen güç değişimi

KISALTMALAR DİZİNİ

AA	Ateşböceği Algoritması
AKH	Alan Kontrolü Hatası
BESS	Battery Energy Storage System
DEA	Diferansiyel Evrim Algoritması
DOA	Denge Optimizasyon Algoritması
FHODF	Yüksek Kesir Dereceli Diferansiyel Geri Beslemeli
FOI-TDN	Kesir Dereceli İntegral Filtreli Eğimli-Türev
FOPIDF	Filtreli Kesir Dereceli PID
FOTID	Kesir Dereceli Eğimli-Türev-İntegral
GA	Genetik Algoritma
GKOA	Gri Kurt Optimizasyon Algoritması
GÖB	Governor Ölü Bandı
I	İntegral
IDDF	Filtreli İntegral-Çift Türev
ITAE	Integral Time Absolute Error
I-TD	İntegral-Eğimli-Türev
I-TDF	İntegral Filtreli Eğimli-Türev
PI	Oransal-İntegral
PID	Oransal-İntegral-Türev
PIDD2-PD	Kaskad Oransal-İntegral-Çift Türev-Oransal-Türev
PIDF	Filtreli Oransal-İntegral-Türev
PI-TIDF	Oransal-İntegral + Filtreli Eğimli-İntegral-Türev
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu
SMED	Süperiletken Manyetik Enerji Depolama
SSOA	Salp Sürü Optimizasyon Algoritması
TID	Eğimli-İntegral-Türev
TIDF	Filtreli Eğimli-İntegral-Türev
TI-TID	Kaskad Eğimli-İntegral-Eğimli-İntegral-Türev
ÜOK	Üretim Oranı Kısıtlaması
YBA	Yol Bulucu Algoritması

2-DOF PID	2 Serbestlik Dereceli Oransal-İntegral-Türev
2-DOF FOPID	2 Serbestlik Dereceli Kesir Dereceli Oransal-İntegral-Türev



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Gelişen teknoloji ve sanayileşmeyle birlikte enerjiye olan gereksinim gitgide artmaktadır. Elektrik enerjisinin büyük bir kısmı, suyun hareketi ile oluşan kinetik enerjiden ve fosil, nükleer gibi yakıtların ısı enerjisiyle dönüşümünden elde edilmektedir [1]. Elde edilen bu elektrik enerjisinin akışı çoğunlukla enterkonnekte şebekeler ile sağlanmaktadır.

Enterkonnekte şebeke, enerji santrallerinin birbiri ile bağlantılı olduğu şebekedir. Enterkonnekte şebekeler, yaşanan gelişmelerle birlikte her geçen gün büyümekte ve genişlemektedir. Günümüzde güneş, rüzgâr gibi çeşitli yenilenebilir enerji kaynakları ile küçük güçlü santraller de enterkonnekte şebekelere bağlanmaktadır [2].

Enterkonnekte şebekelerde enerji santralleri sisteme senkron bir şekilde bağlıdır. Senkron bağlı bu santraller, senkron bir frekansa sahip olmak durumundadır ve sistem kararlılığı açısından bu senkronizasyon önemlidir [3].

Avrupa’da kurulan Elektrik İletimi Koordinasyon Birliği, (Union for the Coordination of Transmission of Electricity) şebekeye bağlanacak ülkeler için frekans kontrol kalitesinin en önemli parametre olduğunu söylemektedir [4]. Ülkemizin de bu ağı katılmak için çalışmaları olduğu göz önüne alındığında, frekans kontrolünün verimi önemli hale gelmektedir.

Tüketici tarafından talep edilen gücün ve santraller tarafından üretilen gücün değişim halinde olmasından ötürü, sistem frekansında azalma ya da artma söz konusu olabilir. Üretimin, talepten fazla olması durumunda generatör hızı artacağından, frekans değeri de artış gösterecektir. Talebin üretimden fazla olması durumunda ise generatör hızı azalacağından, frekans değeri de azalmaktadır. Dolayısıyla sistemdeki herhangi bir üretim-tüketim dengesizliği, sabit tutulması arzulanan frekans değerinde oynamalara sebep olur. Frekans değişiminin boyutu, değişimin sisteme olan etkisini belirlemektedir. Küçük çaplı değişimler, sistemin işleyişini bozmasa da büyük ve ani değişimler sistem kararlılığını bozacağından zarara yol açmaktadır [5].

Güç sistemlerinde aktif güç, frekans üstünde önemli bir rol oynar. Enterkonnekte güç sistemlerinde bölgeler arası bağlantı hatlarındaki güç değişimleri de frekans değerinde değişimlere sebep olmaktadır. Dolayısıyla aktif gücün üretimi ve tüketiminde oluşacak

herhangi bir değişiklik, frekans değerinde değişimlere neden olmaktadır. Yük frekans kontrolü diğer bir adıyla otomatik üretim kontrolü, bölgelerdeki frekans değişimlerini denetleyerek, sistemin frekansını daha önceden belirlenmiş olan aralığa çekmektedir. Aynı zamanda bağlantı hatları arasındaki yükün değerini de bağlantılı olduğu şebekelerde önceden belirlenmiş değere çekmektedir [6].

Frekansın aşırı düşüşü veya yükseliş, yüksek miktardaki değişim oranının sisteme vereceği zararlardan ötürü istenmeyen bir durumdur. Bu değişim oranının önceden belirlenen değerler arasında tutulması işlemi, iki otomatik kontrol çevrimi içeren yük frekans kontrolü tarafından yapılmaktadır. Birincil kontrol çevrimi, hız regülatörlerinin (governor) yaptığı türbin kontrol işlemidir. İkincil kontrol çevrimi ise birincil kontrol çevriminden yani hız regülatörleri ile yapılan türbin kontrol işleminden sonra oluşan frekans değerinin, önceden belirlenmiş değerler aralığına getirilememesi durumunda, frekans değerini bir denetleyici aracılığıyla belirlenmiş aralığın içinde tutan çevrimdir [7].

Bu tez çalışmasında da farklı iki bölgeli güç sistemleri için yük frekans kontrolünün ikincil kontrol çevriminde kullanılan klasik denetleyicilerin tasarımı üzerinde çalışılmıştır.

1.2. Literatür Araştırması

1970 yılında integral kazançlı denetleyici kullanılarak iki bölgeli ara ısıtmasız termal bir güç sistemi için yük frekans kontrolü yapılmasıyla birlikte modern bir kontrol sisteminin temeli atılmıştır [8].

1991 yılında yine bir integral kazançlı denetleyici kullanılarak iki bölgeli ara ısıtmasız termal bir güç sistemi için yapılan yük frekans kontrolünde, sistemin frekans tepkisi ve türbin gücü grafiklerle gösterilmiştir [9].

1992 yılında bir bölgeli ara ısıtmasız termal bir güç sistemi için integral kazançlı denetleyici kullanılarak yük frekans kontrolü yapılmıştır ve güç sisteminin modeline üretim oranı kısıtlaması da eklenerek etkisi gözlemlenmiştir [10].

1997 yılında dört bölgeli ara ısıtmalı termal ve hidro kaynaklı bir güç sistemi için bulanık kazanç ayarlamalı oransal-integral (PI) denetleyici tasarlanmıştır. Ara ısıtmalı termal bölgelerde governor ölü bandı (GÖB) ve üretim oranı kısıtlaması (ÜOK) göz önüne alınmıştır [11].

Aynı yıl, iki bölgeli ara ısıtmasız termal bir güç sistemi için oransal-integral-türev (PID) denetleyici önerilmiş ve integral kazançlı denetleyici ile karşılaştırılmıştır [12].

1999 yılında üç bölgeli ara ısıtmasız termal bir güç sistemi için kayan kipli denetleyici önerilmiştir ve çalışmada kullanılan güç sisteminin modeline üretim oranı kısıtlaması da dahil edilmiştir [13].

2001 yılında üç bölgeli bir güç sisteminin yük frekans kontrolü için yapay sinir ağı destekli bir denetleyici önerilmiştir [14].

2002 yılında iki bölgeli ara ısıtmalı termal bir güç sistemi için bulanık kazanç ayarlamalı integral denetleyici tasarlanmış, bulanık kuralların tasarımında Genetik Algoritma (GA) kullanılmıştır. ÜOK ve GÖB, güç sisteminin modeline dahil edilmiştir [15].

2003 yılında bulanık kayan kipli bir PI denetleyici kullanılarak, dört bölgeli ara ısıtmalı termal bir güç sistemi için yük frekans kontrolü yapılmıştır [16].

2004 yılında iki bölgeli ara ısıtmalı termal bir güç sisteminin yük frekans kontrolü için bulanık PI denetleyici tasarlanmıştır. Denetleyicinin bulanık kazanç ayarlamasında hibrit Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve GA kullanılmıştır [17].

Nicel geri besleme teorisi yardımıyla 2006 yılında bir bölgeli hidro güç sisteminin yük frekans kontrolü için PID denetleyici tasarlanmıştır. Tasarlanan PID denetleyici, geleneksel PI denetleyici ile karşılaştırılarak performans analizi yapılmıştır [18].

2007 yılında iki bölgeli ara ısıtmasız termal bir güç sistemi için değiştirilmiş dinamik sinir ağı kullanılan bir denetleyici tasarlanmıştır [19].

2008 yılında Süperiletken Manyetik Enerji Depolama Üniteleri (SMED) de güç sistemi modeline dahil edilerek, iki bölgeli ara ısıtmasız termal bir güç sistemi modelinin yük frekans kontrolü için bulanık kazanç güncellemeli PI denetleyici tasarımı yapılmıştır [20].

2009 yılında Bozucu Etki Gözlemcisi ile PID denetleyici birleştirilerek, iki bölgeli ara ısıtmasız termal bir güç sistemi için yük frekans kontrolü sağlanmıştır. Performans metriği olarak frekans değişiminin maksimum değeri alınmıştır [21].

2010 yılında dört bölgeli ara ısıtmasız termal bir güç sisteminin yük frekans kontrolü PID denetleyiciler ile sağlanmıştır. PID denetleyici, PI denetleyici ile karşılaştırılmıştır. PI ve PID denetleyicinin parametreleri Ziegler-Nichols metodu ile bulunmuştur [22].

Yapay Arı Kolonisi Optimizasyonu kullanılarak, 2011 yılında iki bölgeli ara ısıtmasız termal bir güç sistemi için PI denetleyici önerilmiştir [23].

Fotovoltaik ve ara ısıtmalı termal ünite içeren bir bölgeli bir güç sisteminin yük frekans kontrolü için 2012 yılında bulanık kazanç ayarlamalı bir PI denetleyici tasarlanmıştır. Sonuç, klasik PI denetleyici sonucuyla karşılaştırılmıştır [24].

2013 yılında iki bölgeli ara ısıtmasız termal bir güç sisteminin yük frekans kontrolü için güç sisteminin modeline ÜOK eklenerek, Bakteriyel Besin Arama Optimizasyonu ile optimize edilmiş bir PID denetleyici önerilmiştir. Bu denetleyici GA ile optimize edilmiş bir PID denetleyici ile karşılaştırılmıştır [25].

İki bölgeli termal bir güç sisteminin modeline 2013 yılında GÖB, zaman gecikmesi ve ÜOK gibi doğrusallığı bozucu parametreler eklenmiş, bu sistemin yük frekans kontrolü için, Diferansiyel Evrim Algoritması (DEA) ile optimize edilmiş 2 serbestlik dereceli bir oransal-integral-türev (2-DOF PID) denetleyici tasarımı yapılmıştır. Denetleyici performansı Çılgın Parçacık Sürü Optimizasyonu ile optimize edilmiş aynı türdeki denetleyicinin performansı ile kıyaslanmıştır [26].

2014 yılında ara ısıtmasız termal, hidro ve gaz üniteleri içeren bir bölgeli güç sisteminin modeline Redoks Akışkan Piller de dahil edilmiş, sistem için PSO ile optimize edilmiş bir PI denetleyici tasarlanmıştır [27].

Aynı yılda üç bölgeli ara ısıtmalı termal bir güç sistemi için ÜOK da dahil edilerek, Ateşböceği Algoritması (AA) ile optimize edilmiş, 2 serbestlik dereceli bir kesir dereceli oransal-integral-türev (2-DOF FOPID) denetleyici önerilmiştir. Elde edilen veriler, klasik I, PI ve PID denetleyicilerden elde edilen verilerle kıyaslanmıştır [28].

2015 yılında bir bölgeli ara ısıtmasız termal bir güç sisteminin yük frekans kontrolünü gerçekleştirmek için PI denetleyici tasarlanmıştır. Sistem modelinde zaman gecikmesi de göz önünde bulundurulmuştur [29].

Kısıtlı Optimizasyon tekniği kullanılarak optimize edilmiş bir eğimli-integral-türev (TID) denetleyici, 2015 yılında iki bölgeli ara ısıtmasız termal bir güç sisteminin yük frekans kontrolü için önerilmiş, klasik PID denetleyici ile kıyaslama yapılmıştır [30].

2016 yılında bulanık kazanç ayarlamalı ve filtreli oransal-integral-türev (PIDF) denetleyici, AA ile optimize edilmiş ve dört bölgeli ara ısıtmalı termal bir güç sistemi için kullanılmıştır. İntegral (I), PI ve PIDF denetleyici için de sonuçlar elde edilmiş ve bulanık kazanç ayarlamalı PIDF denetleyiciden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Dört bölge için de ÜOK ve GÖB güç sisteminin modeline dahil edilmiştir. [31].

Aynı yılda, filtreli eğimli-integral-türev (TIDF) denetleyici DEA ile optimize edilmiş, iki bölgeli ara ısıtmasız termal ve üç bölgeli ara ısıtmalı termal güç sistemleri için önerilmiştir. Üç bölgeli olan güç sistemi için modellemeye Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (Thyristor Controlled Series Compensator) ve SMED de dahil edilmiş ve sonuçlar gözlemlenmiştir. DEA ile optimize edilmiş TIDF denetleyicinin performansı ile, GA ile

optimize edilmiş PID denetleyici, PSO ile optimize edilmiş PID denetleyici ve DEA ile optimize edilmiş PID denetleyici performansları karşılaştırılmıştır [32].

2017 yılında iki bölgeli ara ısıtmalı ve hidro üretim kaynakları içeren bir güç sistemi için bulanık kazanç ayarlamalı PIDF denetleyici önerilmiştir. Çalışmada ana optimizasyon yöntemi olarak Çoklu Evren Optimizasyon Algoritması kullanılmış, PSO, DEA gibi optimizasyon yöntemleri karşısındaki performansı sunulmuştur. Aynı çalışma içerisinde bulanık kazanç ayarlamalı PIDF denetleyici I, PI ve PIDF denetleyiciler ile de karşılaştırılmıştır [33].

Üç bölgeli ara ısıtmalı termal bir güç sistemi için 2017 yılında filtreli integral-çift türev (IDDF) denetleyici tasarlanmıştır. Bu denetleyici klasik PI ve PID denetleyici ile kıyaslanmıştır [34].

2018 yılında üç bölgeli ara ısıtmalı termal bir güç sistemi modeline elektrikli araç modeli de eklenerek, filtreli kesir dereceli PID (FOPIDF) denetleyici ile yük frekans kontrolü gerçekleştirilmiştir. Denetleyici, Değiştirilmiş Gri Kurt Optimizasyonu ile optimize edilmiştir. Klasik PID denetleyici ile kıyaslama yapılmıştır [35].

İki bölgeli ara ısıtmasız termal bir güç sistemi için 2018 yılında, DEA ile optimize edilmiş integral-eğimli-türev (I-TD) denetleyici tasarlanmıştır. Tasarlanan denetleyicinin klasik TID denetleyiciden daha üstün bir performans gösterdiği ortaya konmuştur [36].

2019 yılında iki ve üç bölgeli güç sistemleri için FOPIDF ve bulanık kazanç ayarlamalı FOPIDF denetleyiciler ile yük frekans kontrolü gerçekleştirilmiştir. Denetleyiciler Gugukkuşu Optimizasyon Algoritması ile optimize edilmiştir [37].

2020 yılında bir bölgeli bir güç sistemi modeline, fotovoltaik ünite (PV), rüzgâr, biyogaz, biyodizel gibi üretim kaynakları, volan enerji depolama sistemi (Flywheel Energy Storage System) ile batarya enerji depolama sistemi (Battery Energy Storage System-BESS) dahil edilmiştir. Bu güç sistemi için PIDF denetleyici ve oransal-integral + filtreli eğimli-integral-türev (PI-TIDF) denetleyici tasarlanmıştır. Ana optimizasyon algoritması olarak Harris Şahinleri Optimizasyon Algoritması kullanılmıştır. PIDF denetleyici için çeşitli optimizasyon algoritmalarının performansı karşılaştırılmıştır. Performans metriği açısından PI-TIDF denetleyicinin, PIDF ve TIDF denetleyiciden daha üstün olduğu gösterilmiştir [38].

İki bölgeli ara ısıtmalı termal bir güç sistemi için 2020 yılında, DEA ile optimize edilmiş kaskad eğimli-integral-eğimli-integral-türev (TI-TID) denetleyici tasarlanmıştır. Çalışma için gerçek zamanlı simülasyon da gerçekleştirilmiştir [39].

Aynı yıl iki farklı iki bölgeli güç sistemi için yapılan yük frekans kontrolünde yüksek kesir dereceli diferansiyel geribeslemeli (FHODF) denetleyici tasarımı önerilmiştir. Bu denetleyici PSO ile optimize edilmiş ve bulanık kazanç ayarlamalı FOPIDF ile performans metriği ve oturma süresi karşılaştırması yapılmıştır [40].

2021 yılında iki bölgeli bir güç sistemi, dizel, rüzgâr, PV ve BESS ile modellenmiş, yük frekans kontrolü için integral-filtreli eğimli-türev (I-TDF) denetleyici önerilmiştir. Denetleyici, Emperyalist Rekabetçi Algoritması ile optimize edilmiş ve PIDF, TIDF gibi denetleyiciler ile karşılaştırılmıştır [41].

İki bölgeli ara ısıtılmalı termal, hidro ve gaz üniteleri içeren bir güç sisteminin yük frekans kontrolü için 2021 yılında kesir dereceli TID (FOTID) denetleyici tasarlanmıştır. Yol Bulucu Algoritması (YBA) optimizasyon algoritması olarak kullanılmıştır. Klasik PID ve TID denetleyici ile tasarlanan denetleyici performansı kıyaslanmıştır. Önerilen denetleyici ile performans metriği, oturma süresi ve aşma değerlerinin, diğer denetleyicilerin değerlerinden daha üstün olduğu ortaya konmuştur [42].

2022 yılında iki bölgeli ara ısıtılmalı termal, hidro ve gaz üniteleri içeren bir güç sistemi için hibrit Uygunluk Bağımlı-Sinüs Kosinüs Algoritması ile optimize edilmiş kesir dereceli integral-filtreli eğimli-türev (FOI-TDN) denetleyici tasarlanmıştır. Güç sisteminin modeline ÜOK, GÖB, zaman gecikmesi ve kaynatıcı dinamiği gibi doğrusallığı bozan durumlar da eklenmiştir. Denetleyici performansı, klasik PID, klasik FOPID ve filtreli FOTID denetleyici gibi denetleyiciler ile kıyaslanmıştır [43].

Aynı yıl iki bölgeli ara ısıtılmalı termal, hidro, gaz, rüzgâr ve fotovoltaik üniteler içeren bir güç sistemi için kaskad oransal-integral-çift türev-oransal-türev (PIDD2-PD) denetleyici tasarlanmıştır [44].

Bu tez çalışmasında, iki bölgeli güç sistemi modeli için TID denetleyici ve kesirli filtreli TID denetleyici tasarımı yapılmıştır. Üç farklı güç sistemi modeli kullanılarak, sistemde olası üretim kaynağı artışı, üretim kaynaklarının çeşitliliği, GÖB ve ÜOK gibi bazı doğrusallığı bozan durumlar ve yük değişimleri de göz önüne alınarak denetleyicilerin sisteme olan etkisi gözlemlenmiştir. Denetleyicilerin optimizasyonu için Denge Optimizasyon Algoritması (DOA) kullanılmıştır. Bu denetleyiciler literatürde bulunan diğer çalışmalarla da karşılaştırılmıştır. Literatürde bulunan Gri Kurt Optimizasyon Algoritması (GKOA), Salp Sürü Optimizasyon Algoritması (SSOA) ve YBA gibi çeşitli optimizasyon algoritmalarıyla optimize edilmiş denetleyiciler karşısında, DOA ile optimize edilmiş TID ve kesirli filtreli TID denetleyicilerin performansı ortaya konmuştur.

1.3. Teorik Altyapı ve Modelleme

1.3.1. Yük Frekans Kontrolü

Güç sistemleri karmaşık bir yapıya sahiptir. Günümüz güç sistemlerinde birçok bölge bulunabilmekte ve bu bölgeler birden çok üretim kaynağından oluşabilmektedir. Bu da çeşitliliği ve sistemin karmaşıklığını artırmaktadır. Bir güç sisteminin iyi tasarlandığını söyleyebilmek için, güç sisteminin, üretim-tüketim dengesini sağlaması, güç kalitesinin yüksek olması gerekmektedir. Güç kalitesinin yüksek olması, gerilim ve frekans değerlerinin önceden belirlenmiş değerler arasında tutulmasıyla doğrudan ilişkilidir. Ayrıca iyi tasarlanmış bir güç sisteminde, bağlantı hattındaki güç değişiminin de sınırlar içerisinde tutulması gerekmektedir [45].

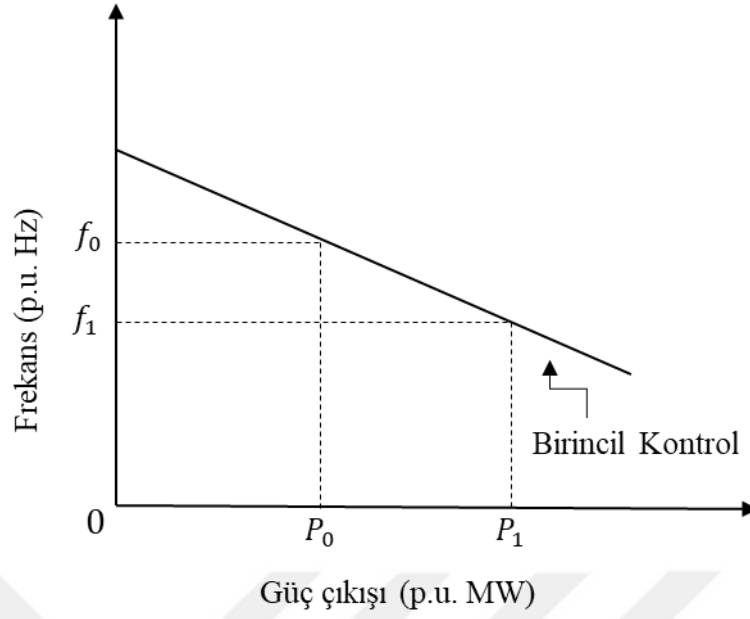
Üretilen gücün, tüketilen güçten düşük olması frekans değerinde düşüşe, üretilen gücün tüketilen güçten yüksek olması da frekans değerinde yükselmeye sebep olmaktadır [46]. Yani aktif güç dengesinin bozulması, frekans değerinde değişim meydana getirir. Frekanstaki değişimler, güç sistemindeki kaynağın kontrol edilmesiyle istenen değer aralığında tutulabilir. Frekans değeri ve aktif gücün kontrolü ile yapılan bu kontrol işlemine yük frekans kontrolü denir [47].

Yük frekans kontrolü, birincil ve ikincil kontrol çevrimi olmak üzere iki kontrol çevrimi içermektedir [7].

Şekil 1.1’de iki bölgeyi bir güç sistemi için yük frekans kontrolü çevrimleri gösterilmiştir. Şekilde B , frekans kutuplama sabitini, R , hız regülasyon sabitini, T_{12} , bağlantı hattındaki senkronize edici moment katsayısını, ΔP_{L1} ve ΔP_{L2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgedeki yük değişimini göstermektedir.

1.3.1.1. Birincil Kontrol Çevrimi

Birincil kontrol çevrimine ait karakteristik şekil 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2. Birincil kontrol çevrimine ait karakteristik

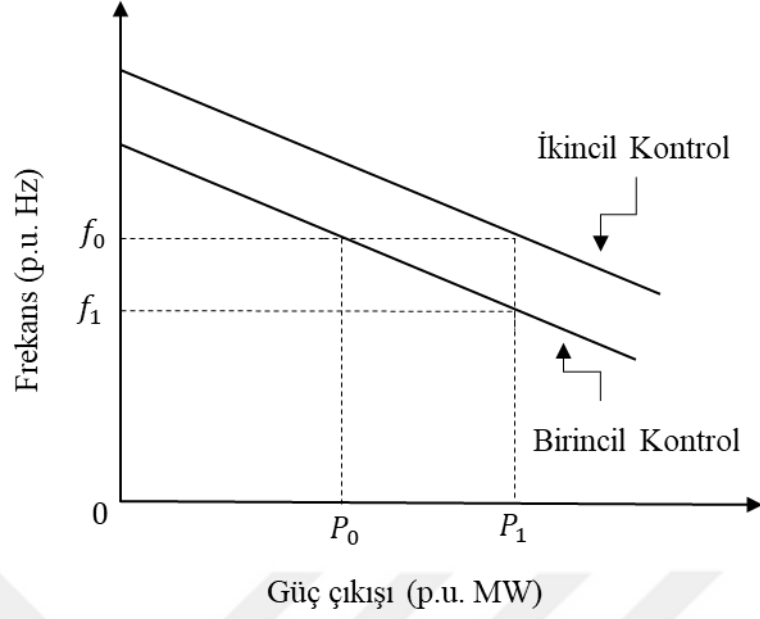
Şekil 1.2’de görüldüğü gibi güç çıkışı P_0 değerindeyken frekans değeri de ona karşılık gelen f_0 değeridir. Tüketimde oluşan artış nedeniyle hız regülatörü üretimi P_1 güç değerine çıkarır ve tüketim miktarını karşılamış olur. Fakat bunun sonucunda frekans değeri de yeni bir değer olan f_1 değeri olmaktadır. Yani frekans değeri, sürekli durum hatası içerir ve tam anlamıyla istenen değere çekilemez.

1.3.1.2. İkincil Kontrol Çevrimi

Birincil kontrol çevriminde oluşan sürekli durum hatasını düzeltmek, frekans değerini bir denetleyici ile istenen değere yeniden ulaştırmak, ikincil kontrol çevriminin görevidir [7].

İkincil kontrol çevriminin değişime etki süresi, birincil kontrol çevrimine göre daha yavaştır. Fakat sürekli durum hatasını kaldıran ya da minimuma indiren ve bağlantı hattındaki güç akışı değerini önceden belirlenen değerlerde tutan çevrimdir. Yük frekans kontrolü çevrimi de denilebilir.

Sistem çıkışındaki değişimin oluşması gereken süre 30 saniye olmakla birlikte, 15 dakika içerisinde frekans dengesi sağlanmış olmalıdır [1]. Şekil 1.3’te ikincil kontrol çevriminin, birincil kontrol çevrimi ile karşılaştırıldığı karakteristik verilmiştir.



Şekil 1.3. Birincil ve ikincil kontrol çevrimlerinin karakteristiği

Şekil 1.3'ten de anlaşılacağı üzere birincil kontrol çevriminde güç çıkışı değerlerinin değişmesi ile değişen frekans değeri, ikincil kontrol çevrimi ile istenen değere çekilmektedir. İkincil kontrol çevrimi ile güç çıkışı yani üretim değeri, P_1 değerine çıkartılmış olsa da frekans değeri birincil kontrol çevrimindeki P_0 değerine ait frekans değeri olan f_0 değerine getirilmektedir.

1.3.2. Güç Sistemi Modeli

Herhangi bir güç sisteminin analiz edilebilmesi için o güç sistemine ait matematiksel bir modelin oluşturulması gerekmektedir. Bu matematiksel model, denklemler ve dönüşümler yoluyla oluşturulabilmektedir.

Güç sistemleri türbin, governor gibi bileşenlerin yanında üretim ünitelerini de içerdiğinden bu bileşenlerin de matematiksel modellenmesinin yapılması gerekmektedir. Ara ısıtmalı ve ara ısıtmasız termal, hidro ve gaz gibi üretim ünitelerinin matematiksel modelleri, bu ünitelerin bulunduğu güç sistemlerinin analizi için oluşturulmuş ve analizler yapılmıştır. Ayrıca ÜOK ve GÖB gibi doğrusallığı bozan bileşenlerin de sisteme olan etkilerinin analiz edilebilmesi için matematiksel modelleri oluşturulmuştur. [42, 49] Bu tez çalışmasında da bu üretim ünitelerini içeren güç sistemi modelleri kullanılmaktadır.

1.3.2.1. Generatör Modeli

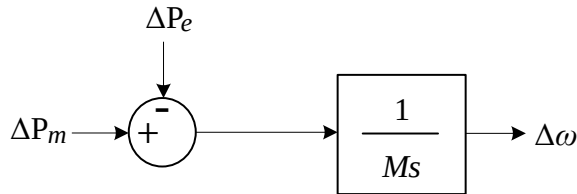
Güç sistemlerinde bir generatör, türbinin ürettiği mekanik güce (P_m) eşdeğer bir elektriksel güç (P_e) üretirse aktif güç dengesi sağlanmış olur. Aktif güç dengesi sağlandığı durumda frekans anma değerinde kalır. Aktif güç ve frekans birbiri ile ilişkili olduğundan generatörün matematiksel modeli oluşturulurken aktif güç ile açısal hız denkleminden yararlanılmaktadır. Denklem (1.1)'de aktif güç ile açısal hız değişimi arasındaki denklem verilmiştir. M , açısal momentumdur. $\Delta\omega$, açısal hız değişimini temsil etmektedir.

$$\Delta P_m - \Delta P_e = M \frac{d\Delta\omega}{dt} \quad (1.1)$$

Denklem (1.1)'in sıfır başlangıç koşulu altında Laplace dönüşümü alınırsa denklem (1.2) elde edilir. Elde edilen bu denklem generatörün doğrusal model denklemdir.

$$\Delta P_m(s) - \Delta P_e(s) = Ms\Delta\omega(s) \quad (1.2)$$

Şekil 1.4'te generatöre ait doğrusal model verilmiştir.



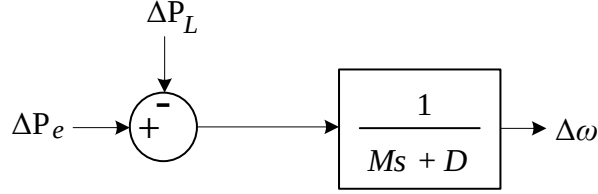
Şekil 1.4. Generatör doğrusal modeli

1.3.2.2. Yük Modeli

Bir güç sistemindeki omik yükler frekansa bağımlı değilken, motor gibi yükler frekanstan etkilenirler. Dolayısıyla frekanstaki değişim, frekanstan etkilenen yükleri etkiler. Açısal hız ile yük karakteristiği denklem (1.3)'te verilmiştir.

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D\Delta\omega \quad (1.3)$$

ΔP_L frekanstan etkilenmeyen yüklerden gelen bileşen iken, $D\Delta\omega$ frekanstan etkilenen yüklerden gelen bileşendir. Yük sönümlleme sabiti olarak isimlendirilen D , yükteki yüzdesel değişimin frekanstaki yüzdesel değişime oranıdır [50]. Şekil 1.5'te generatör ve yük modeli verilmiştir.



Şekil 1.5. Generatör ve yük doğrusal modeli

1.3.2.3. Governor Modeli

Governor, birincil kontrol çevriminin ana elemanıdır. Aktif güç dengesizliğinden meydana gelen frekans değişimlerini saptayarak, türbin mekanik gücünü düzenlemektedir. Doğrusal model çıkarımında, hidrolik yükselteç ve hız regülatöründen oluşmaktadır. Governor, hidrolik yükseltecin girişinde oluşan güç değerinin değişimini (ΔP_v) belirlemek için, referans güç değerinin değişimi (ΔP_{ref}) ile hız değişiminin farkını almaktadır. Denklem (1.4), hidrolik yükseltecin girişinde oluşan güç değişimini vermektedir.

$$\Delta P_v = \Delta P_{ref} - \frac{1}{R} \Delta\omega \quad (1.4)$$

R , önceki bölümlerde belirtildiği gibi hız regülasyon sabitidir. Denklem (1.4)'ün sıfır başlangıç koşulu altında Laplace dönüşümü alındığında denklem (1.5) elde edilir.

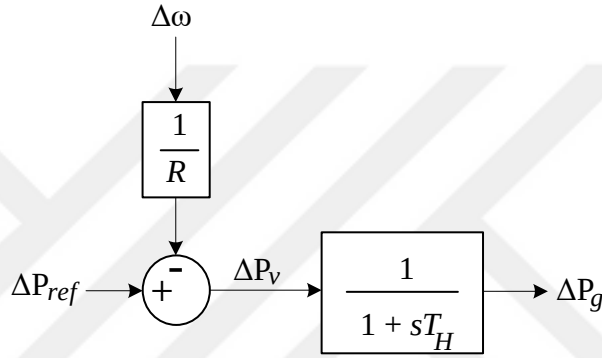
$$\Delta P_v(s) = \Delta P_{ref}(s) - \frac{1}{R} \Delta\omega(s) \quad (1.5)$$

Türbini düzenleyen güç değişiminin bulunması için denklem (1.6) ve (1.7) kullanılmaktadır. Denklem (1.6), hidrolik yükseltecin transfer fonksiyonudur.

$$G_H(s) = \frac{1}{1+sT_H} \quad (1.6)$$

$$\Delta P_g(s) = G_H(s)\Delta P_v(s) \quad (1.7)$$

T_H , hidrolik yükseltecin zaman sabitidir. Denklem (1.7) ise türbine uygulanacak mekanik güç değişimini belirtmektedir. Denklem (1.5), (1.6) ve (1.7) ışığında governor doğrusal modeli Şekil 1.6'daki gibi elde edilmektedir.



Şekil 1.6. Governor doğrusal modeli

1.3.2.4. Ara Isıtmasız Termal Güç Ünitesi Modeli

Ara ısıtmasız termal güç ünitesinin doğrusal modeli termal governor ve buhar türbininden oluşmaktadır. Denklem (1.8) termal governor transfer fonksiyonunu vermektedir. Burada T_{TG} termal governorun zaman sabitidir.

$$G_{TG}(s) = \frac{1}{1+sT_{TG}} \quad (1.8)$$

Buhar türbinine ait doğrusal modeli oluşturmak için denklem (1.9)'dan yararlanılmaktadır. T_T buhar türbininin zaman sabitidir.

$$T_T \frac{d\Delta P_m}{dt} = -\Delta P_m + \Delta P_g \quad (1.9)$$

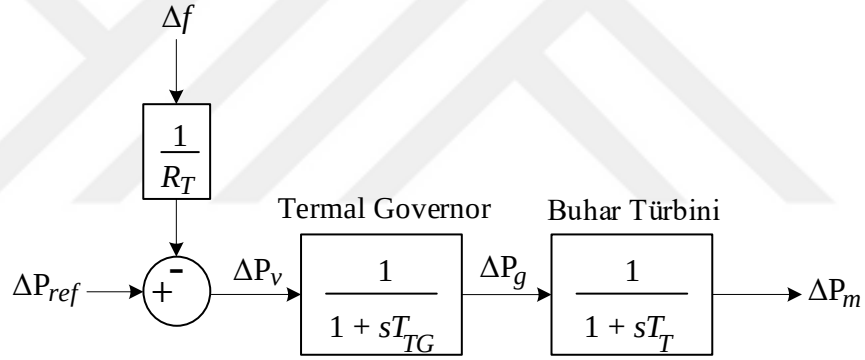
Denklem (1.9)'un sıfır başlangıç koşulu altında Laplace dönüşümü alınırsa,

$$sT_T \Delta P_m(s) = -\Delta P_m(s) + \Delta P_g(s) \quad (1.10)$$

Denklem (1.10) elde edilir. Denklem (1.10) düzenlendiğinde buhar türbinine ait transfer fonksiyonu elde edilir.

$$G_T(s) = \frac{\Delta P_m(s)}{\Delta P_g(s)} = \frac{1}{1+sT_T} \quad (1.11)$$

Şekil 1.7'de ara ısıtmasız termal güç ünitesine ait doğrusal model verilmiştir. R_T , termal ünite hız regülasyon sabitidir.



Şekil 1.7. Ara ısıtmasız termal güç ünitesi doğrusal modeli

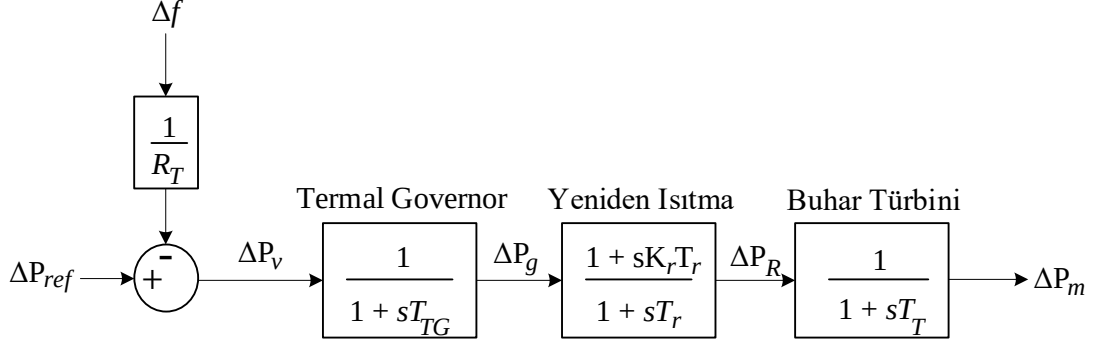
1.3.2.5. Ara Isıtmalı Termal Güç Ünitesi Modeli

Ara ısıtmalı termal güç ünitesi doğrusal modeli, ara ısıtmasız termal doğrusal modelinden farklı olarak içerisinde yeniden ısıtma ünitesi de bulundurmaktadır. Yeniden ısıtma işlemi, termal döngünün zirvesine yakın bir sıcaklıkta daha fazla ısı verilmesini sağlar ve termal verimliliği artırır.

Yeniden ısıtma işlemi yapan ısıtıcının transfer fonksiyonu denklem (1.12)'deki gibidir.

$$G_R(s) = \frac{1+sK_rT_r}{1+sT_r} \quad (1.12)$$

Burada K_r yeniden ısıtma işlemini yapan ısıtıcının kazanç sabiti, T_r ise aynı ısıtıcının zaman sabitidir. Şekil 1.8’de ara ısıtmalı termal güç ünitesinin doğrusal modeli verilmiştir.

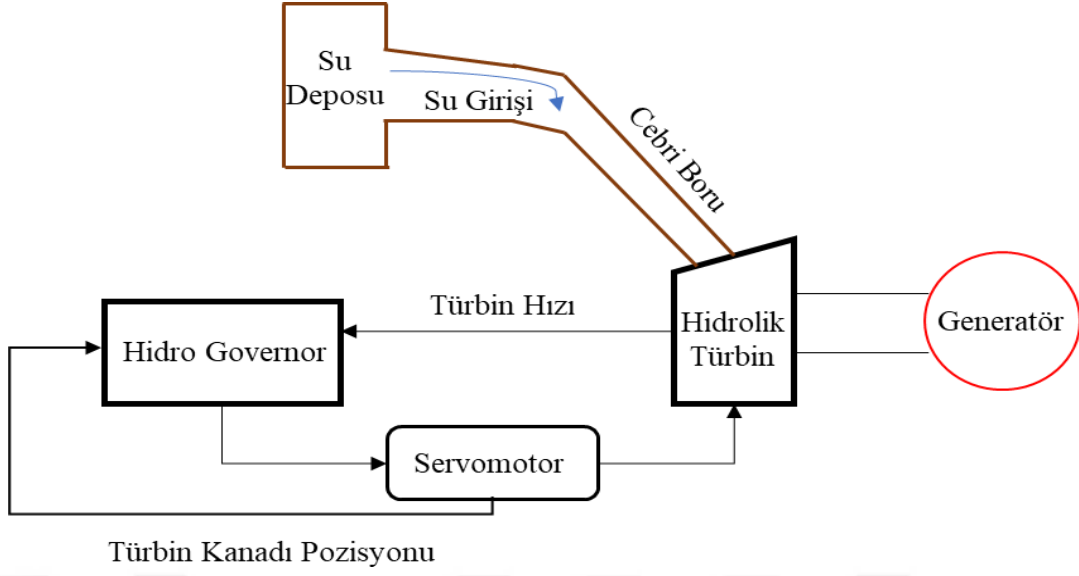


Şekil 1.8. Ara ısıtmalı termal güç ünitesi doğrusal modeli

1.3.2.6. Hidro Güç Ünitesi Modeli

Hidro güç ünitesi, suyun bir boru ya da cebri boru vasıtasıyla hidrolik türbine aktarılmasını ve türbinin dönüşünü sağlamaktadır. Bu sayede generatör elektrik üretmektedir. Hidro güç ünitesinde suyun kaynağı olan bir su deposu, boru ya da cebri boru, hidro governor, türbin kanadı ayarı için kullanılan bir servomotor ve hidrolik türbin bulunmaktadır. Hidro governor, hız regülasyonunu sağlamak için aktif güç bilgisini elektrik ağından, türbin hızı bilgisini türbin çıkışından, türbin kanadı pozisyonunun bilgisini de servomotordan almaktadır.

Şekil 1.9’da hidro güç ünitesine ait döngü diyagramı verilmiştir.



Şekil 1.9. Hidro güç ünitesi döngüsü

Hidro güç ünitesi doğrusal modeli, mekanik hidro governor ve cebri borulu hidro türbin bileşenlerinden oluşmaktadır. Mekanik hidro governor transfer fonksiyonu denklem (1.13)'te verilmiştir.

$$G_{HG}(s) = \frac{\Delta P_h(s)}{\Delta P_v(s)} = \left(\frac{1}{1+sT_h} \right) \left(\frac{1+sT_R}{1+sT_D} \right) \quad (1.13)$$

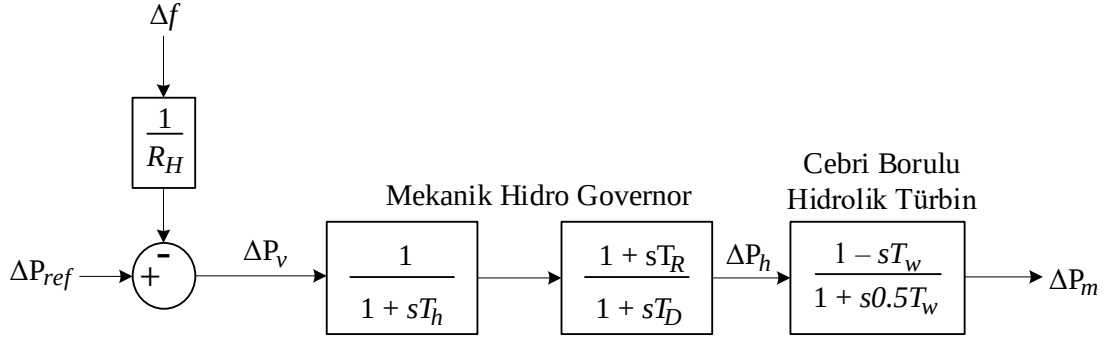
Burada ΔP_h hidro governor çıkış gücünün değişimini, T_h hidro governor zaman sabitini, T_R hidro governor sıfırlama zamanını, T_D ise hidro governor geçici düşüş zaman sabitini belirtmektedir.

Cebri borulu hidro türbin ünitesi için transfer fonksiyonu denklem (1.14)'teki gibidir.

$$G_w(s) = \frac{1-sT_w}{1+s0.5T_w} \quad (1.14)$$

Denklem (1.14)'te T_w , cebri borudaki suyun nominal başlangıç zamanını belirtmektedir.

Şekil 1.10'da hidro güç ünitesine ait doğrusal model verilmiştir. R_H , hidro ünitenin hız regülasyon sabitidir.

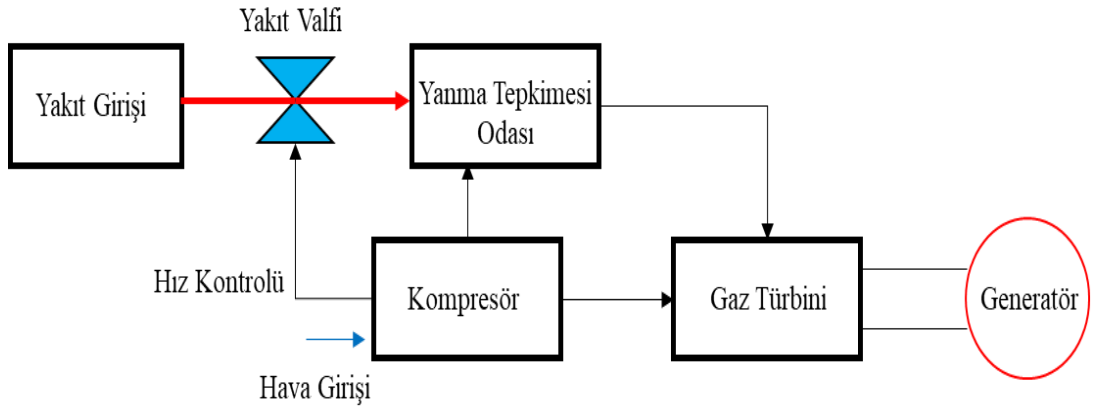


Şekil 1.10. Hidro güç ünitesi doğrusal modeli

1.3.2.7. Gaz Güç Ünitesi Modeli

Gaz güç ünitesi içerisinde yanma tepkimesi odası, kompresör, gaz türbini ve yakıt girişinin ayarlandığı yakıt valfinden oluşmaktadır. Kompresör, gaz türbini ile aynı şaft üzerine monte edilmekte ve ikinci bir türbin görevi görmektedir. Kompresör, havayı çekip sıkıştırarak yanan alevin yoğunluğunu artırır ve yanma odasını yüksek basınçla beslemektedir. Gaz türbini hızlandıkça yanma odası daha fazla havayla dolmaktadır. Bunun sonucunda kompresör daha fazla hızlanır ve gaz türbine daha yüksek basınçlı sıcak gaz göndererek yakıt yanma oranını artırır.

Şekil 1.11’de gaz türbini döngüsü verilmiştir.



Şekil 1.11. Gaz türbini döngüsü

Gaz güç ünitesinin doğrusal modeli valf konumlandırıcı, gaz governor, yakıt ve yanma tepkimesi ve kompresör deşarj bileşenlerinden oluşmaktadır.

Valf konumlandırıcının transfer fonksiyonu denklem (1.15)’te verilmiştir.

$$G_V(s) = \frac{1}{c_G + sb_G} \quad (1.15)$$

c_G , valf konumlandırıcı sabiti ve b_G valf konumlandırıcı zaman sabitidir.

Gaz governor transfer fonksiyonu denklem (1.16)'da verilmiştir.

$$G_G(s) = \frac{1+sX_G}{1+sY_G} \quad (1.16)$$

X_G , gaz governorın ilerleme süresi sabiti, Y_G , gaz governorın gecikme süresi sabitidir.

Kullanılan yakıt ve onun yanma süresi de doğrusal model şeklinde yazıldığında, transfer fonksiyonu denklem (1.17) şeklinde elde edilmektedir.

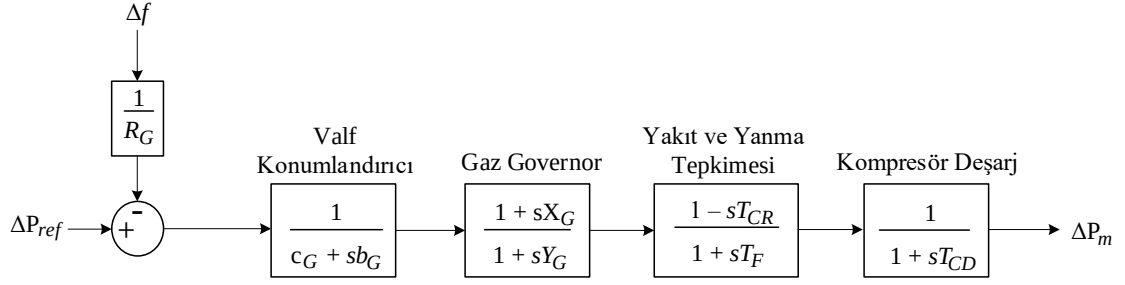
$$G_F(s) = \frac{1-sT_{CR}}{1+sT_F} \quad (1.17)$$

T_{CR} , gaz türbini yanma tepkimesindeki gecikme süresi ve T_F , gaz türbininin yakıt zaman sabitidir.

Son olarak kompresör deşarj işlemi için kullanılan doğrusal modelin transfer fonksiyonu denklem (1.18)'deki gibidir.

$$G_{CD}(s) = \frac{1}{1+sT_{CD}} \quad (1.18)$$

T_{CD} , gaz türbininin kompresör deşarj süresidir. Yukarıda verilen dört transfer fonksiyonu kullanılarak gaz güç ünitesine ait doğrusal model elde edilmektedir. Bu model şekil 1.12'de verilmiştir. Burada R_G , gaz ünitenin hız regülasyon sabitidir.



Şekil 1.12. Gaz güç ünitesi doğrusal modeli

1.3.2.8. Governor Ölü Banlı Termal Governor Modeli

Governor ölü bandı, governorın çalışması için gerekli hız değişiminin aralığıdır. Governor ölü bandı sinüsoidal dalgalar ürettiğinden ötürü doğrusal değildir. Doğrusal olmama durumunu aşmak için governor ölü bandı, Fourier serisi ile düzenlenip doğrusal bir model oluşturulabilmektedir [51].

Histerezis denklemler, denklem (1.19)'daki gibi gösterilebilir.

$$y = F(x, \dot{x}) \quad (1.19)$$

Burada x , sinüsoidal osilasyondur ve denklem (1.20)'deki gibidir.

$$x = A \sin \omega_0 t \quad (1.20)$$

Denklem (1.20), Fourier serisine açılırsa denklem (1.21) elde edilmektedir.

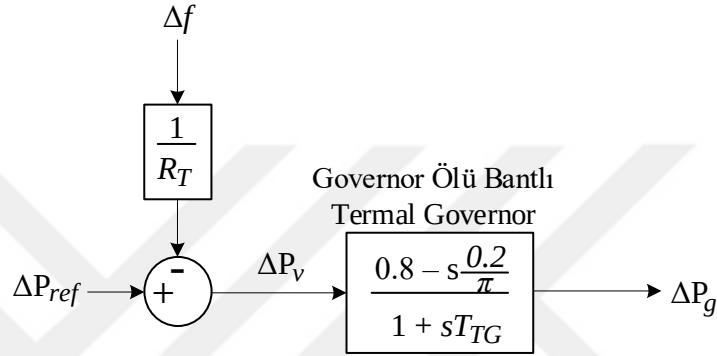
$$F(x, \dot{x}) = F_0 + N_1 x + \frac{N_2}{\omega_0} \frac{dx}{dt} + \dots \quad (1.21)$$

Yaklaşım yapıldığından ötürü ilk üç terim denklem için yeterlidir. F_0 , governor ölü bandı orjine simetrik olduğundan dolayı 0 olarak alınabilir. F_0 , 0 alınıp denklem (1.21)'in sıfır başlangıç koşulu altında Laplace dönüşümü alındığında governor ölü bandının doğrusal denklemi elde edilmektedir.

Bu denklemler ışığında governor ölü bandı içeren bir governorın transfer fonksiyonu denklem (1.22)'de verilmiştir.

$$G_{GDB}(s) = \frac{N_1 + s \frac{N_2}{\omega_0}}{1 + sT_{TG}} \quad (1.22)$$

$f_0 = 0.5$ Hz ve governor ölü bandı değeri $\pm\%0.05$ için $N_1 = 0.8$ ve $N_2 = -0.2$ bulunmaktadır [42]. Bu tez çalışmasında da bu değerler kullanılmıştır. Şekil 1.13'te governor ölü bantlı termal governor doğrusal modeli verilmiştir.



Şekil 1.13. Governor ölü bantlı termal governor doğrusal modeli

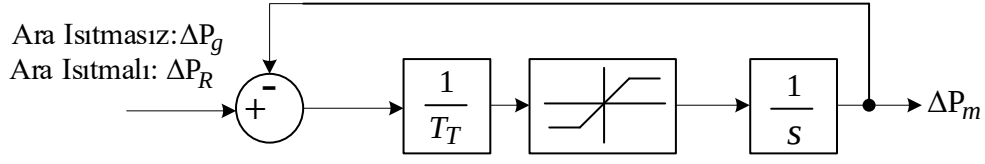
1.3.2.9. Üretim Oranı Kısıtlaması Modeli

Üretim oranı kısıtlaması, türbinin fiziksel sınırlarından ötürü, generatör tarafından üretilen enerjinin limitidir [52]. Literatürde termal ve hidro güç üniteleri için oluşturulmuş ÜOK doğrusal modelleri bulunmaktadır [42].

1.3.2.9.1. Termal Güç Ünitesi Üretim Oranı Kısıtlaması Modeli

Termal güç ünitesi için oluşturulmuş doğrusal model geribesleme içermektedir. Buhar türbininin transfer fonksiyonu bu model ile birleştirilmiştir. Termal güç ünitesi için oluşturulmuş ÜOK modeli, ara ısıtmalı termal güç ünitesi için yeniden ısıtma bloğunun çıkışında, ara ısıtmasız termal güç ünitesi için ise termal governorın çıkışındadır. Termal güç üniteleri için üretim oranı kısıtlaması, $\%3/\text{dk}$ veya $\%10/\text{dk}$ olarak alınmaktadır [42, 53].

Şekil 1.14'te termal güç ünitesi için oluşturulmuş üretim oranı kısıtlamasının doğrusal modeli verilmiştir.

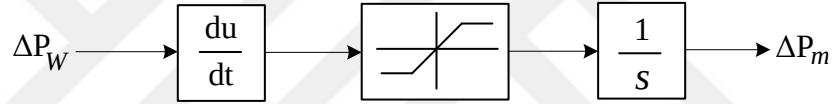


Şekil 1.14. Termal güç ünitesi üretim oranı kısıtlaması doğrusal modeli

1.3.2.9.2. Hidro Güç Ünitesi Üretim Oranı Kısıtlaması Modeli

Hidro güç ünitesi için oluşturulmuş üretim oranı kısıtlaması modeli, cebri borulu hidrolik türbin çıkışıdır. Hidro güç ünitesinde üretim oranı kısıtlaması, yükselme durumu için %270/dk, düşüş durumu için ise %360/dk olarak kabul edilmektedir [42]. Bu tez çalışmasında yükselme durumu göz önünde bulundurulmuştur.

Şekil 1.15'te hidro güç ünitesine ait üretim oranı kısıtlaması modeli verilmiştir.



Şekil 1.15. Hidro güç ünitesi üretim oranı kısıtlaması doğrusal modeli

1.3.2.10. Kontrol Bölgesi Modeli

Kontrol bölgesi, güç sisteminin frekans ve gerilim değerlerinin izlenip kontrol altına alınacağı bölgedir. Kontrol bölgesinin modelini oluştururken generatör eylemsizlik sabiti ve önceki bölümlerde bahsedilen yük sönümleme sabiti kullanılmaktadır. Denklem (1.23)'te generatör eylemsizlik sabiti H , verilmiştir. Burada W_{Kn} depolanan kinetik enerjinin nominal değeri, P_{PS} ise kontrol bölgesinin toplam gücüdür.

$$H = \frac{W_{Kn}}{P_{PS}} \quad (1.23)$$

Kontrol bölgesi doğrusal denkleminde ulaşmak için denklem (1.24) kullanılır.

$$[\Delta P_U(s) - \Delta P_C(s) - \Delta P_{tie12}(s)] \frac{f_N}{2HS + f_N D} = \Delta f(s) \quad (1.24)$$

ΔP_U , üretim gücünü, ΔP_C , tüketim gücünü, ΔP_{tie12} ise bağlantı hattındaki gücü göstermektedir. f_N , frekansın nominal değeridir. Denklem (1.24)'ten kontrol bölgesinin doğrusal denklemi (1.25)'teki gibi düzenlenebilir.

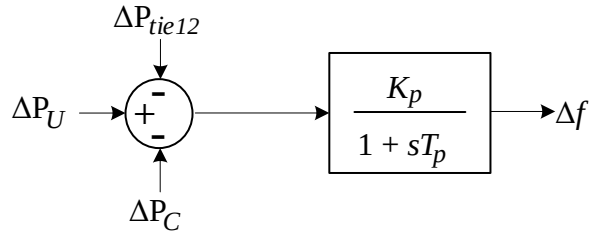
$$\frac{f_N}{2Hs + f_N D} = \frac{K_p}{1 + sT_p} \quad (1.25)$$

Burada K_p , kontrol bölgesinin kazancı, T_p ise kontrol bölgesinin zaman sabitidir ve denklem (1.26) ile (1.27) ile ifade edilirler.

$$K_p = \frac{1}{D} \quad (1.26)$$

$$T_p = \frac{2H}{f_N D} \quad (1.27)$$

Kontrol bölgesi kazancının birimi Hz/p.u. MW, kontrol bölgesi zaman sabitinin birimi ise saniyedir. Şekil 1.16' da kontrol bölgesinin doğrusal modeli verilmiştir.



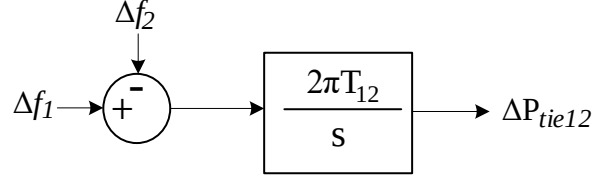
Şekil 1.16. Kontrol bölgesi doğrusal modeli

1.3.2.11. Bağlantı Hattı Modeli

Güç sistemlerinde bölgeler, bağlantı hattı ile birbirine bağlanmaktadır. Bağlantı hattının doğrusal denklemi denklem (1.28)'de verilmiştir. T_{12} , bağlantı hattı senkronize edici moment katsayısı ve ΔP_{tie12} bağlantı hattının güç değişimidir. Δf_1 , Δf_2 sırasıyla birinci ve ikinci bölgedeki frekans değişimini belirtmektedir.

$$\Delta P_{tie12}(s) = \frac{2\pi T_{12}}{s} [\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)] \quad (1.28)$$

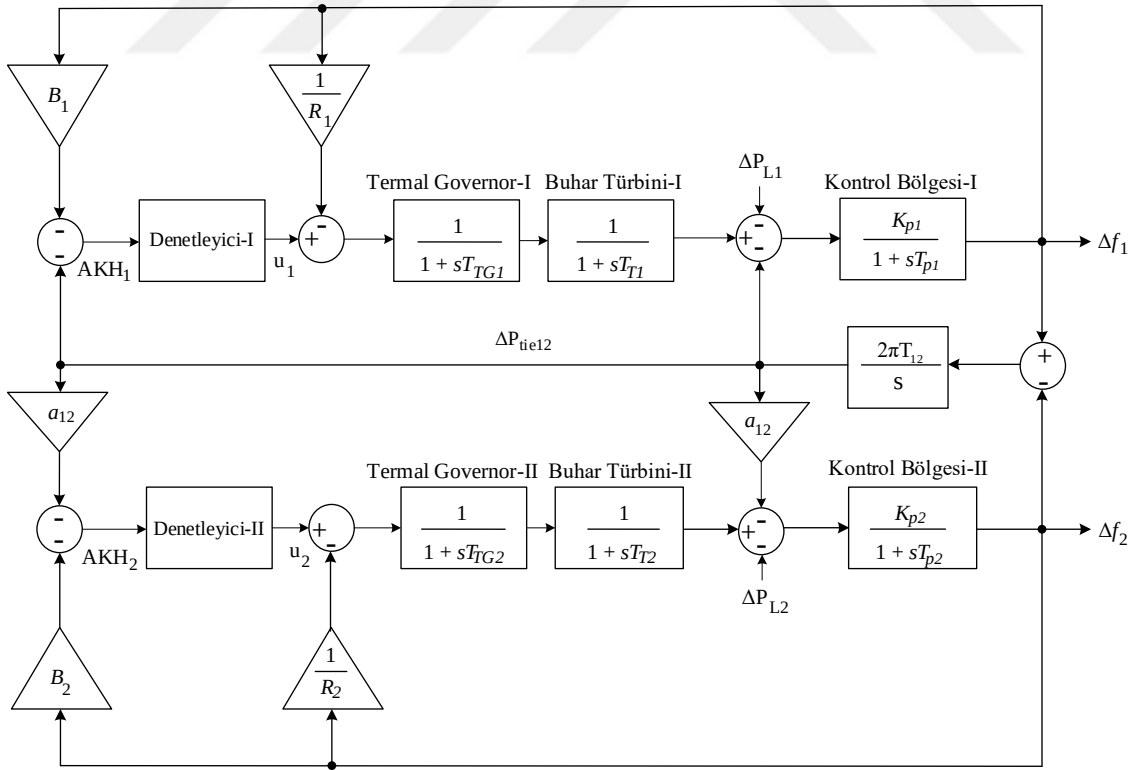
Şekil 1.17 bağlantı hattının doğrusal modelini göstermektedir.



Şekil 1.17. Bağlantı hattı doğrusal modeli

1.3.2.12. İki Bölge Güç Sistemi Modeli

İki bölge ara ısıtmasız termal bir güç sisteminin doğrusal modeli şekil 1.18’de verilmiştir. Çalışmada kullanılan diğer güç sistemleri ilerleyen bölümlerde ele alınacaktır.



Şekil 1.18. İki bölge güç sistemi doğrusal modeli

ΔP_{L1} 'lik bir yük değişimi için frekans değişimi Δf ve bağlantı hattındaki gücün değişimi ΔP_{tie12} sırasıyla denklem (1.29) ve (1.30) yardımıyla bulunur.

$$\Delta f = - \frac{\Delta P_{L1}}{D_1 + \frac{1}{R_1} + D_2 + \frac{1}{R_2}} \quad (1.29)$$

$$\Delta P_{tie12} = - \frac{\Delta P_{L1} \left(D_2 + \frac{1}{R_2} \right)}{D_1 + \frac{1}{R_1} + D_2 + \frac{1}{R_2}} \quad (1.30)$$

Frekans değişimi ve bağlantı hattındaki gücün değişimi denklemlerinin paydaları frekans kutuplama sabitleri olarak ifade edilmektedir. Şekil 1.18'deki B_1 ve B_2 , sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin frekans kutuplama sabitleridir. Frekans kutuplama sabitinin birimi p.u. MW/Hz'tir. Denklem (1.31) ve (1.32) frekans kutuplama sabiti denklemleridir.

$$B_1 = D_1 + \frac{1}{R_1} \quad (1.31)$$

$$B_2 = D_2 + \frac{1}{R_2} \quad (1.32)$$

Denklem (1.31) ve (1.32), denklem (1.29) ve (1.30)'da yerine koyulduğunda denklem (1.33) ve (1.34) elde edilmektedir.

$$\Delta f = - \frac{\Delta P_{L1}}{B_1 + B_2} \quad (1.33)$$

$$\Delta P_{tie12} = - \frac{\Delta P_{L1} B_2}{B_1 + B_2} \quad (1.34)$$

Denetleyicilerin frekans değerinde düzenleme yapabilmek için kullandığı hata sinyali, alan kontrol hatası (AKH) olarak adlandırılır. Sırasıyla denklem (1.35) ve (1.36), iki bölge gücü sistemi modeli için AKH denklemleridir.

$$AKH_1 = -\Delta P_{tie12} - B_1 \Delta f \quad (1.35)$$

$$AKH_2 = \Delta P_{tie12} - B_2 \Delta f \quad (1.36)$$

Denklem (1.29) ve (1.30), denklem (1.35) ve (1.36)'da yerine yazılırsa,

$$AKH_1 = \left(\frac{\Delta P_{L1} B_2}{B_1 + B_2} \right) - (B_1) \left(-\frac{\Delta P_{L1}}{B_1 + B_2} \right) = \Delta P_{L1} \quad (1.37)$$

$$AKH_2 = \left(-\frac{\Delta P_{L1} B_2}{B_1 + B_2} \right) - (B_2) \left(-\frac{\Delta P_{L1}}{B_1 + B_2} \right) = 0 \quad (1.38)$$

Denklem (1.37) ve (1.38) sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin AKH denklemleridir. Birinci ve ikinci bölgedeki denetleyiciler kendi bölgelerindeki alan kontrolü hatasını algılayarak hata değerini sıfıra indirmekle yükümlüdürler. a_{12} , birinci ve ikinci bölgenin güç değerlerinin oranından gelen katılım faktörüdür. Çalışmalarda genellikle iki bölgenin gücü eşit kabul edilip değeri -1 olarak alınmaktadır [42, 49].

1.3.2.13. Kesir Dereceli Hesaplama

Kesir dereceli hesaplama, tamsayı dereceli hesaplamaya göre daha gürbüz ve esnek bir performans gösterebildiği için mühendislik alanındaki çalışmalarda önem kazanmıştır. Bundan dolayı kesir dereceli operatörler mühendislik alanındaki çalışmalarda sıkça kullanılmaktadır. Kesir dereceli operatörü ifade etmek için ${}_a D_t^\lambda$ ifadesi kullanılır. Burada a minimum zaman değerini, t maksimum zaman değerini belirtirken, λ kesir dereceli operatörün kesir derecesini göstermektedir ve reel bir sayıdır [54]. Denklem (1.39)'da kesir dereceli operatöre ait denklem verilmiştir.

$${}_a D_t^\lambda = \begin{cases} \frac{d^\lambda}{dt^\lambda} & \lambda > 0 \\ 1 & \lambda = 0 \\ \int_a^t (d\tau)^{-\lambda} & \lambda \leq 0 \end{cases} \quad (1.39)$$

Genellikle kesir dereceli hesaplamalar Grünwald-Letnikov, Riemann-Liouville ve Caputo metotları kullanılarak tanımlanmaktadır [55]. Grünwald-Letnikov metodu için kesir dereceli operatörün denklemi, denklem (1.40)'ta verilmiştir.

$${}_a D_t^\lambda = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^\lambda} + \sum_{j=0}^{\frac{t-a}{h}} (-1)^j \frac{\Gamma(m+1)}{\Gamma(j+1)\Gamma(m-j+1)} f(t-jh) \quad (1.40)$$

Burada h adım zaman aralığını göstermektedir. m ise $m-1 < \lambda < m$ koşulunu gösterebilmek adına bir değişken olarak kullanılmıştır. $\Gamma(\cdot)$ Euler-gama fonksiyonudur ve denklem (1.41)'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\Gamma(m+1) = \int_0^\infty t^{m-1} e^{-t} dt \quad (1.41)$$

Riemann-Liouville metodu için kesir dereceli operatör, denklem (1.42)'de verilmiştir. Bu yöntem toplam sembolü ve limit işlemlerinden bağımsızdır [55].

$${}_a D_t^\lambda = \frac{1}{\Gamma(m-\lambda)} \left(\frac{d}{dt} \right)^m \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{\lambda-m+1}} d\tau \quad (1.42)$$

Caputo metodunun kesir dereceli operatör tanımı ise Riemann-Liouville tanımına oldukça benzerdir. Denklem (1.43) ile Caputo metodunun bu tanımı verilmiştir.

$${}_a D_t^\lambda = \frac{1}{\Gamma(m-\lambda)} \int_a^t \frac{f^{(m)}(\tau)}{(t-\tau)^{\lambda-m+1}} d\tau \quad (1.43)$$

Verilen denklemlerden de görüldüğü üzere, tüm bu metotlar ayrık zamanlı olduğundan çeşitli hesaplama zorlukları içerirler [56]. Fakat Oustaloup Metodu, Matsuda Metodu, Carlson Metodu, Chareff Metodu ve Sürekli Kesir Açılımı Metodu gibi yaklaşım metotlarının kullanılması ile kesir dereceli hesaplama yapılması gereken sistemler için çözüm elde edilebilmektedir [54]. Bu tez çalışmasında denetleyiciler için kesir dereceli integratör ve kesir dereceli türev alıcı operatörler kullanılmıştır. Kesir dereceli hesaplama için Oustaloup Metodu tercih edilmiştir.

Oustaloup Metodu, kutupları ve sıfırları olan tamsayı dereceli bir transfer fonksiyonu oluşturmak için bir bant geçiren filtre oluşturma fırsatı vermektedir. Oluşturulan bu transfer fonksiyonu yaklaşık olarak kesir dereceli operatörü (s^λ) temsil etmektedir. Denklem (1.44) ile bu operatörün tanımı verilmiştir.

$$s^\lambda = K \prod_{k=-N}^N \frac{s + \omega_k^s}{s + \omega_k^k} \quad (1.44)$$

Burada ω_k^s ve ω_k^k sırasıyla k dizisinin sıfırları ve kutuplarını temsil etmektedir ve denklem (1.45) ile (1.46) yardımıyla bulunmaktadır.

$$\omega_k^s = \omega_L \left(\frac{\omega_U}{\omega_L} \right)^{\frac{k+N+0.5(1-\lambda)}{2N+1}} \quad (1.45)$$

$$\omega_k^k = \omega_L \left(\frac{\omega_U}{\omega_L} \right)^{\frac{k+N+0.5(1+\lambda)}{2N+1}} \quad (1.46)$$

Burada ω_L ve ω_U sırasıyla bant geçiren filtrenin alt frekans ve üst frekans değerleridir. K katsayısı ise denklem (1.47) ile bulunur.

$$K = \left(\frac{\omega_u}{\omega_L} \right)^{-0.5\lambda} \prod_{k=-N}^N \frac{\omega_k^k}{\omega_k^s} \quad (1.47)$$

Oluşturulan transfer fonksiyonu $(2N+1)$ tane kutup ve sıfır değerine sahiptir. Bu çalışmada yakınsama derecesi 6 olarak ($N=6$) alınmıştır. Filtre frekansının alt ve üst değerleri sırasıyla 0.001 ile 1000 rad/s olarak alınmıştır.

Bir kesir dereceli operatör oluşturulurken Oustaloup Metodu kullanılarak 13 adet sıfır ve 13 adet kutup değerine sahip tamsayı dereceli bir transfer fonksiyonu oluşturulmuş, bu transfer fonksiyonu ile kesir dereceli operatöre ulaşılmıştır.

Kesir dereceli operatörlerin optimizasyon sonucu bulunan ideal parametreleri ileriki bölümlerde verilmiştir. Kesir dereceli operatörlerin uygulama sürecini açıklayabilmek adına, ara ısıtılmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ yük değişim durumunda

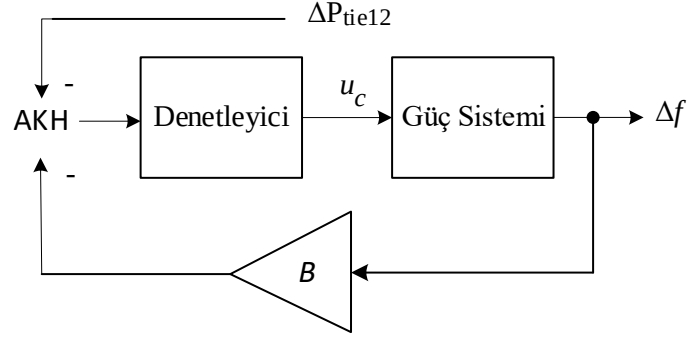
birinci bölgedeki TIDFF denetleyici için bulunan ideal filtre kesim frekansı ve kesir dereceli türevin derecesini içeren kesir dereceli operatöre ulaşmak için uygulanan Oustaloup Yakınsama Metodu ve sonucu verilmiştir.

Ara ısıtılmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ yük değişim durumu için filtre kesim frekansı (NN) 6.1489, kesir dereceli türevin derecesi (λf) ise 0.761 olarak bulunmuştur. Bu parametreleri bulabilmek için tamsayı dereceli transfer fonksiyonu oluşturabilme imkanı veren Oustaloup Yakınsama Metodu'nun kullanılabilmesi adına bir kod dizini optimizasyon döngüsünün içerisine entegre edilmiştir. Böylece bu kesir dereceli operatörün ideal parametreleri, optimizasyon yöntemi ve kod dizini kullanılarak birçok sayı değeri ve dolayısıyla bu sayılar kadar tamsayı dereceli transfer fonksiyonları oluşturularak bulunmuştur. Elde edilen ideal parametrelerden oluşan kesir dereceli operatör yaklaşık olarak, yakınsama derecesi 6 olduğundan $2N+1$ sayıda yani 13. dereceden bir tamsayı dereceli transfer fonksiyonu ile ifade edilmektedir. Yani $\frac{6.1489}{s^{0.761+6.1489}}$ kesir dereceli operatörü, payı 13. dereceden başlayıp 0. derecenin katsayısını belirtmek üzere 6.149, 8275, 2.859e06, 3.136e08, 1.156e10, 1.458e11, 6.33e11, 9.485e11, 4.903e11, 8.728e10, 5.317e09, 1.089e08, 7.073e05, 1180 ve paydası 13. dereceden başlayıp 0. derecenin katsayılarını belirtmek üzere 198.1, 1.233e05, 2.056e07, 1.178e09, 2.575e10, 2.255e11, 7.7873e11, 1.051e12, 5.14e11, 8.916e10, 5.368e09, 1.093e08, 7.086e05, 1181 değerlerinden oluşan bir tamsayı dereceli transfer fonksiyonu ile ifade edilmektedir.

Bu çalışmada kutuplar ve sıfırlar oluşturularak, kesir dereceli operatörün yaklaşık olarak karşılığını veren tamsayı dereceli bir transfer fonksiyonunu modele dahil edebilme imkanı vermesinden ve diğer zamana bağlı metotlardan çok daha kolay uygulanabilir olmasından dolayı Oustaloup Metodu, yakınsama metodu olarak tercih edilmiştir.

1.3.3. Denetleyici Yapıları

Denetleyiciler, kendi bölgelerindeki hatayı algılayarak hatayı sıfırlayıp, sürekli durum hatasını ortadan kaldırmaktadır. Şekil 1.19'da denetleyicilerin güç sistemi modeline uygulanmasına ait blok diyagram verilmiştir. u_c , denetleyicinin ürettiği ve değişimi düzenleyen kontrol işaretidir. Uygulamada her iki bölge için de birer adet kullanılan birbirinden farklı iki denetleyici, güç sistemine ait birinci bölgedeki frekans değişimi, ikinci bölgedeki frekans değişimi ve bağlantı hattındaki güç değişiminin oluşturduğu AKH işaretine göre işlem yapmakta ve bu değişimlerin sıfıra indirilmesini amaçlamaktadır.



Şekil 1.19. Denetleyicinin güç sistemi modeline uygulanması

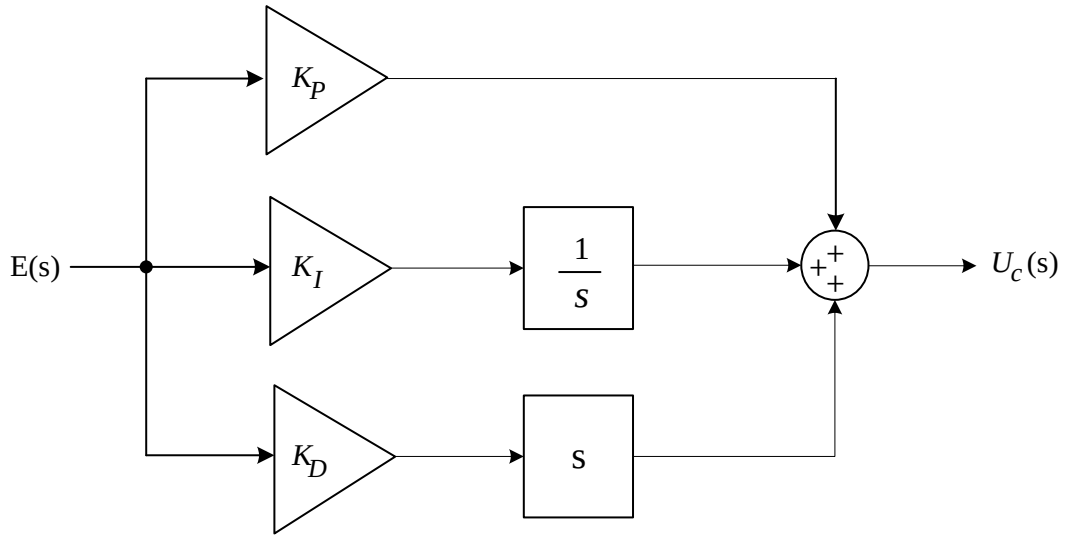
Bu tez çalışmasında PID, TID, TIDF ve TIDFF olmak üzere dört tip denetleyici kullanılmıştır. Bu bölümde bu denetleyicilerin yapıları, blok diyagramları, transfer fonksiyonları ve hangi parametrelere sahip oldukları verilecektir.

1.3.3.1. PID Denetleyici

PID denetleyiciler literatürde yaygın olarak kullanılan denetleyicilerden biridir. Denetleyici içerisinde bir oransal kazanç (K_P), integral kazancı (K_I) ve bir türev kazancı (K_D) barındırmaktadır. Denklem (1.48), PID denetleyicinin transfer fonksiyonudur.

$$C_{PID}(s) = \frac{U_c(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} + sK_D \quad (1.48)$$

Şekil 1.20’de PID denetleyici blok diyagramı verilmiştir.



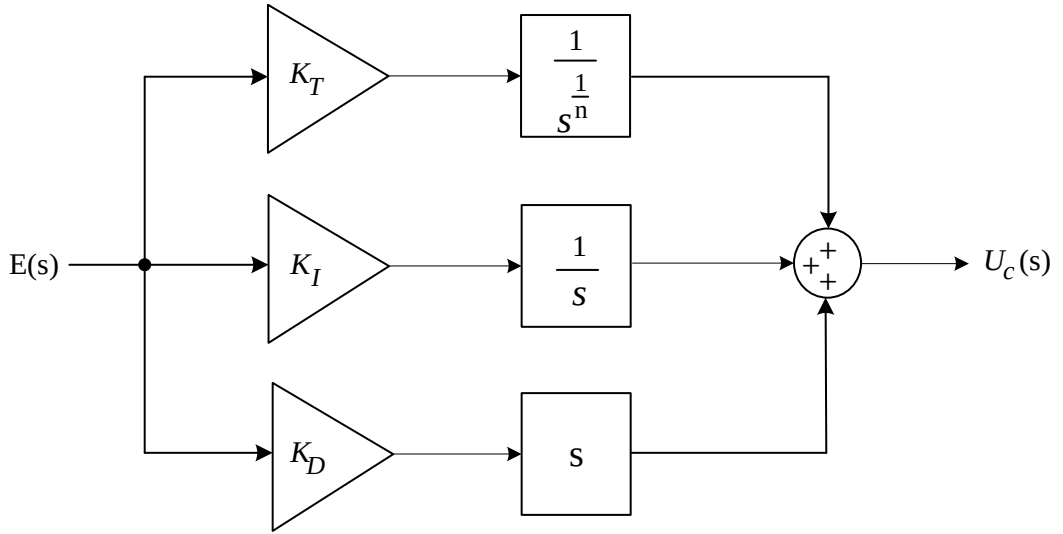
Şekil 1.20. PID denetleyici blok diyagramı

1.3.3.2. TID Denetleyici

TID denetleyici, PID denetleyiciden farklı olarak oransal kazanç yerine eğim kazancı (K_T), ve kesirli bir integratör içerir. $\frac{1}{s^n}$, kesirli integratörün derecesidir ve TID denetleyicinin parametrelerinden biridir. Denklem (1.49), TID denetleyicinin transfer fonksiyonudur.

$$C_{TID}(s) = \frac{U_c(s)}{E(s)} = K_T \frac{1}{s^n} + \frac{K_I}{s} + sK_D \quad (1.49)$$

Transfer fonksiyonundan elde edilen TID denetleyici blok diyagramı şekil 1.21’de verilmiştir.



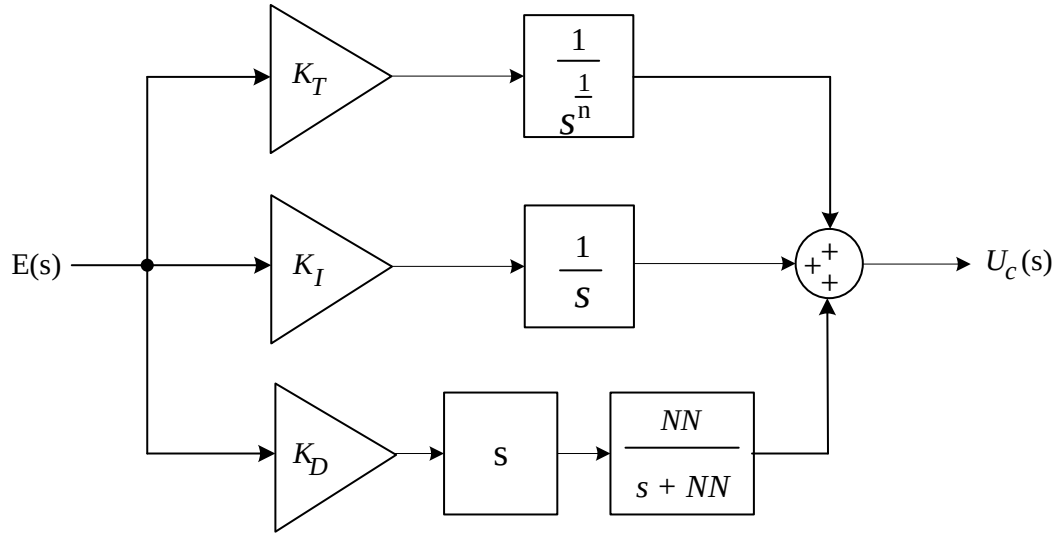
Şekil 1.21. TID denetleyici blok diyagramı

1.3.3.3. TIDF Denetleyici

TIDF denetleyici, klasik TID denetleyicinin filtreli halidir. Beş parametreden oluşmaktadır. TID denetleyici parametrelerine ek olarak bir filtre kesme frekansına (NN), sahiptir. Filtre kesme frekansı dışında, aynı zamanda TID denetleyici parametreleri de olan K_T , K_I , K_D ve kesirli integratör derecesi $\left(\frac{1}{n}\right)$ parametrelerini de içermektedir. TIDF denetleyicinin transfer fonksiyonu denklem (1.50)'de verilmiştir.

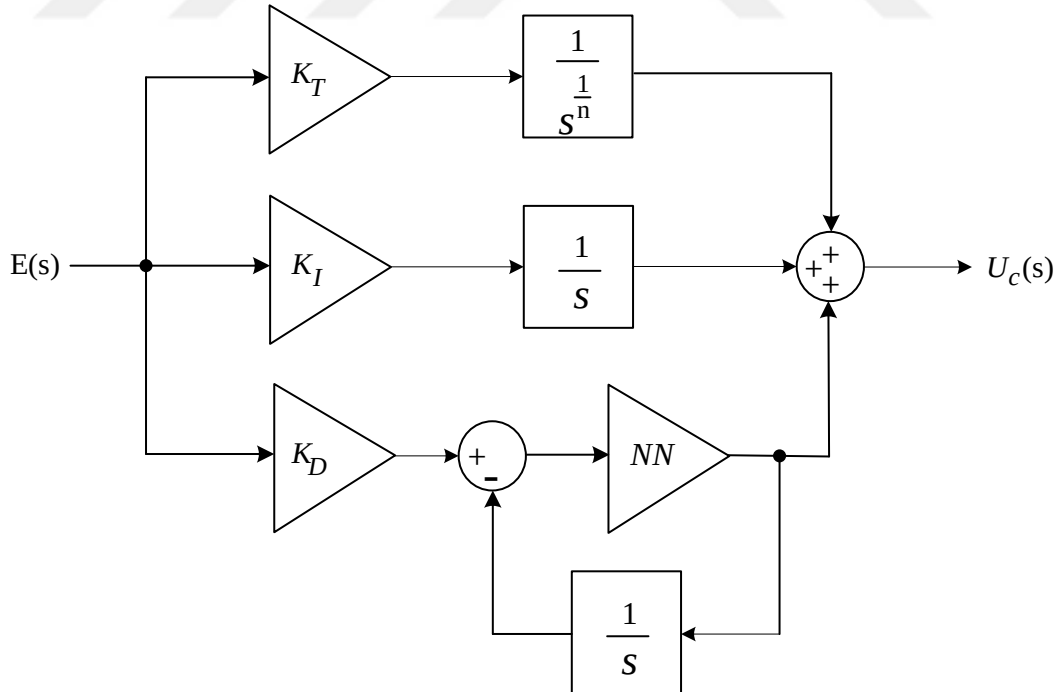
$$C_{TIDF}(s) = \frac{U_c(s)}{E(s)} = K_T \frac{1}{s^{\frac{1}{n}}} + \frac{K_I}{s} + sK_D \frac{NN}{s+NN} \quad (1.50)$$

Şekil 1.22'de TIDF denetleyicinin blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 1.22. TIDF denetleyici blok diyagramı

TIDF denetleyicinin geribeslemeli bir blok diyagram gösterimi de mevcuttur. Şekil 1.23'te bu gösterim verilmiştir. Benzetim çalışmaları kısmında MATLAB/Simulink üstünden yapılan çalışmalarda da TIDF denetleyici için bu blok diyagramı kullanılmıştır.



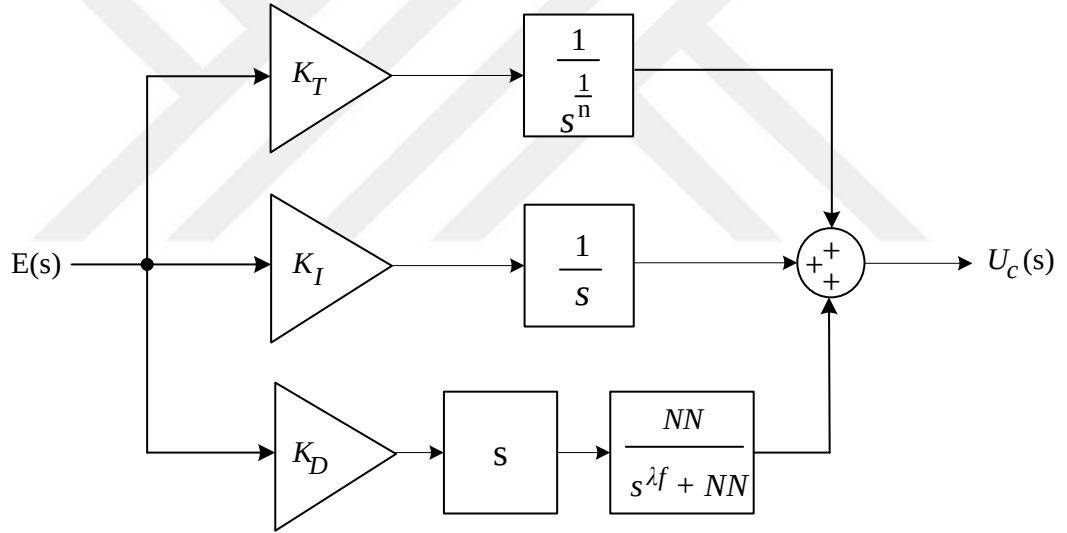
Şekil 1.23. TIDF denetleyici geribeslemeli blok diyagramı

1.3.3.4. TIDFF Denetleyici

TIDFF denetleyici, kesir dereceli bir filtreye sahiptir. Altı parametreden oluşmaktadır. TIDF denetleyici parametreleri de olan K_T , K_I , K_D , $\frac{1}{n}$ ve NN parametrelerine sahip olmakla birlikte filtresinde kesirli bir türev derecesine (λf) de sahiptir. Denklem (1.51)'de TIDFF denetleyicinin transfer fonksiyonu verilmiştir.

$$C_{TIDFF}(s) = \frac{U_c(s)}{E(s)} = K_T \frac{1}{s^{\frac{1}{n}}} + \frac{K_I}{s} + sK_D \frac{NN}{s^{\lambda f} + NN} \quad (1.51)$$

Şekil 1.24'te TIDFF denetleyicinin blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 1.24. TIDFF denetleyici blok diyagramı

1.3.4. Denge Optimizasyon Algoritması

Denge Optimizasyon Algoritması (DOA), Faramarzi, A. ve arkadaşları tarafından 2019 yılında denge durumlarını kestirmek için fizik kuralları tabanlı dinamik kaynak ve yutak modellerinden esinlenilerek oluşturulan optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma temelinde kütle dengesi denklemini kullanmaktadır. Kütle dengesi denklemi, bir kontrol hacmine giriş yapan, çıkış yapan ve kontrol hacminde üretilen kütlenin korunumunu belirtmektedir. Kütledeki değişim, kontrol hacmine giriş yapan ve içeride üretilen kütlenin

toplamı ile kontrol hacminden çıkış yapan kütlenin farkına eşittir [54]. Denklem (1.52), kütle dengesi denklemini vermektedir.

$$V \frac{dC}{dt} = QC_{eq} - QC + G \quad (1.52)$$

Burada V kontrol hacmini, C konsantrasyon değerini, C_{eq} denge durumunda kontrol hacminde kütle üretimi olmaması durumundaki konsantrasyon değerini, Q kontrol hacminin akış oranını, G ise kontrol hacmindeki kütle üretim oranıdır. Denge optimizasyon algoritmasının son denklemine ulaşmak için temelde dört adım kullanılır [55].

1.3.4.1. Başlatma Adımı

Optimizasyon süreci başlangıç popülasyonu oluşturularak başlamaktadır. Parçacıkların başlangıç konsantrasyon değeri, denklem (1.53) kullanılarak güncellenir.

$$C_i^{başlangıç} = C_{min} + rand_i (C_{maks} - C_{min}) \quad i = 1, 2, 3, \dots, k \quad (1.53)$$

Burada $C_i^{başlangıç}$ başlangıç konsantrasyon vektörünü, C_{min} ve C_{maks} sırasıyla minimum ve maksimum değerleri, $rand_i$ ise 0 ile 1 değerleri arasında rastgele bir vektörü ifade etmektedir. Parçacık sayısı k ile ifade edilmektedir. Parçacıklar amaç fonksiyonlarına göre değerlendirilip denge durumu için aday olup olamayacakları belirlenmektedir [55].

1.3.4.2. Denge Havuzu Oluşturma

Başlangıçta denge durumu olmadığından sadece denge durumunu oluşturacak adaylar belirlenir ve parçacıklar deneme yapmak için bu adayları kullanırlar. Bu adaylar çeşitli denemeler sonunda en iyi dört tanesi ve onların toplamının ortalama değeri alınacak şekilde seçilir ve bu beş adaydan bir denge havuzu oluşturulur. Her parçacık, her iterasyonda aynı seçim oranıyla, adayların arasından rastgele bir aday seçerek kendi konsantrasyon değerini güncellemektedir [57, 58].

Denklem (1.54), seçilen en iyi dört adayın toplamının ortalama değerini, denklem (1.55) ise denge havuzunu belirtmektedir [59].

$$C_{eq,ort} = \frac{C_{eq1} + C_{eq2} + C_{eq3} + C_{eq4}}{4} \quad (1.54)$$

$$C_{d.havuzu} = \{C_{eq1}, C_{eq2}, C_{eq3}, C_{eq4}, C_{eq,ort}\} \quad (1.55)$$

1.3.4.3. Üstel Terim Oluşturma

Algoritmanın son denklemine ulaşmak için F üstel terimi oluşturulmaktadır. Denklem (1.56) bu üstel terimi vermektedir.

$$\vec{F} = e^{-\vec{\lambda}(t - t_0)} \quad (1.56)$$

$\vec{\lambda}$, 0 ile 1 arasında değişen rastgele bir vektörü belirtmektedir. t ve t_0 fonksiyonları sırasıyla denklem (1.57) ve (1.58) ile ifade edilmektedir.

$$t = 1 - \left(\frac{\text{Iter}_{(anlık)}}{\text{Iter}_{(maks)}} \right)^{\left(a_2 \frac{\text{Iter}_{(anlık)}}{\text{Iter}_{(maks)}} \right)} \quad (1.57)$$

$$\vec{t}_0 = \frac{1}{\vec{\lambda}} \ln \left(-a_1 \text{sign}(\vec{r} - 0.5) [1 - e^{-\vec{\lambda}t}] \right) + t \quad (1.58)$$

Burada $\text{Iter}_{anlık}$ o anki iterasyon sayısını, Iter_{maks} maksimum iterasyon sayısını temsil etmektedir. a_1 keşif aşamasında, a_2 sömürü aşamasında kullanılan sabit değerlerdir. $\vec{r}$, 0 ile 1 arasında rastgele bir vektördür [60]. Denklem (1.57) ve (1.58), denklem (1.56)'da yerine konulup düzenlenirse üstel terimin son denklemini elde edilir.

$$\vec{F} = a_1 \text{sign}(\vec{r} - 0.5) (e^{-\vec{\lambda}t} - 1) \quad (1.59)$$

1.3.4.4. Üretim Oranının Uygulanması

Üretim oranı, algoritmanın sömürü aşamasını geliştirerek tam sonuca ulaşmaya yardımcı olur. Denklem (1.60), üretim oranı denklemidir. $\vec{G}$ üretim oranını belirtmektedir.

$$\vec{G} = \vec{G_0} \vec{F} \quad (1.60)$$

Burada $\vec{G_0}$ üretim oranının başlangıç değeridir ve denklem (1.61) ile ifade edilir.

$$\vec{G_0} = \vec{ÜKP} (\vec{C_{eq}} - \vec{\lambda} C) \quad (1.61)$$

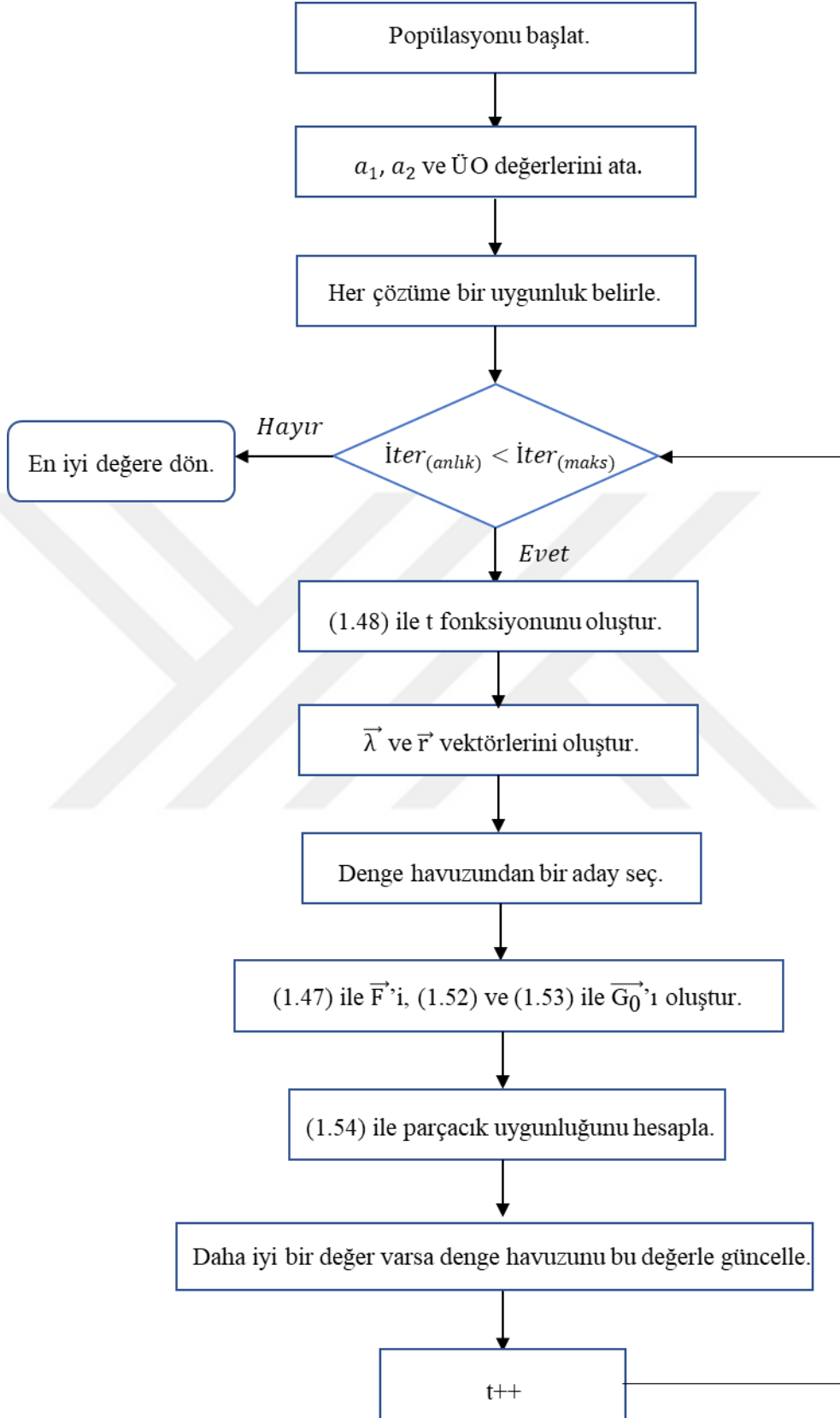
$\vec{ÜKP}$, parçacıkların güncelleme işlemi esnasında terimlerin üretilme olasılığını içeren üretim oranı kontrol parametresidir. Denklem (1.62)'de $\vec{ÜKP}$ denklemi verilmiştir.

$$\vec{ÜKP} = \begin{cases} 0.5r_1 & r_2 \geq \vec{ÜO} \\ 0 & r_2 < \vec{ÜO} \end{cases} \quad (1.62)$$

$\vec{ÜO}$, kendini güncellemek için üretim terimini kullanacak olan parçacık sayısını belirten üretim olasılığıdır. r_1 ve r_2 0 ile 1 arasında rastgele sayılardır. Keşif ve sömürü aşamasındaki dengeyi sağlamak için $\vec{ÜO} = 0.5$ alınmaktadır [57].

Tüm bu adımlar sonunda denklem (1.63) elde edilmektedir. Bu denklem denge optimizasyon algoritmasının son denklemidir. Akış şeması şekil 1.25'te verilmiştir.

$$\vec{C} = \vec{C_{eq}} + (\vec{C} - \vec{C_{eq}})\vec{F} + \frac{\vec{G}}{\vec{\lambda} V} (1 - \vec{F}) \quad (1.63)$$



Şekil 1.25. Denge optimizasyon algoritması akış şeması

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

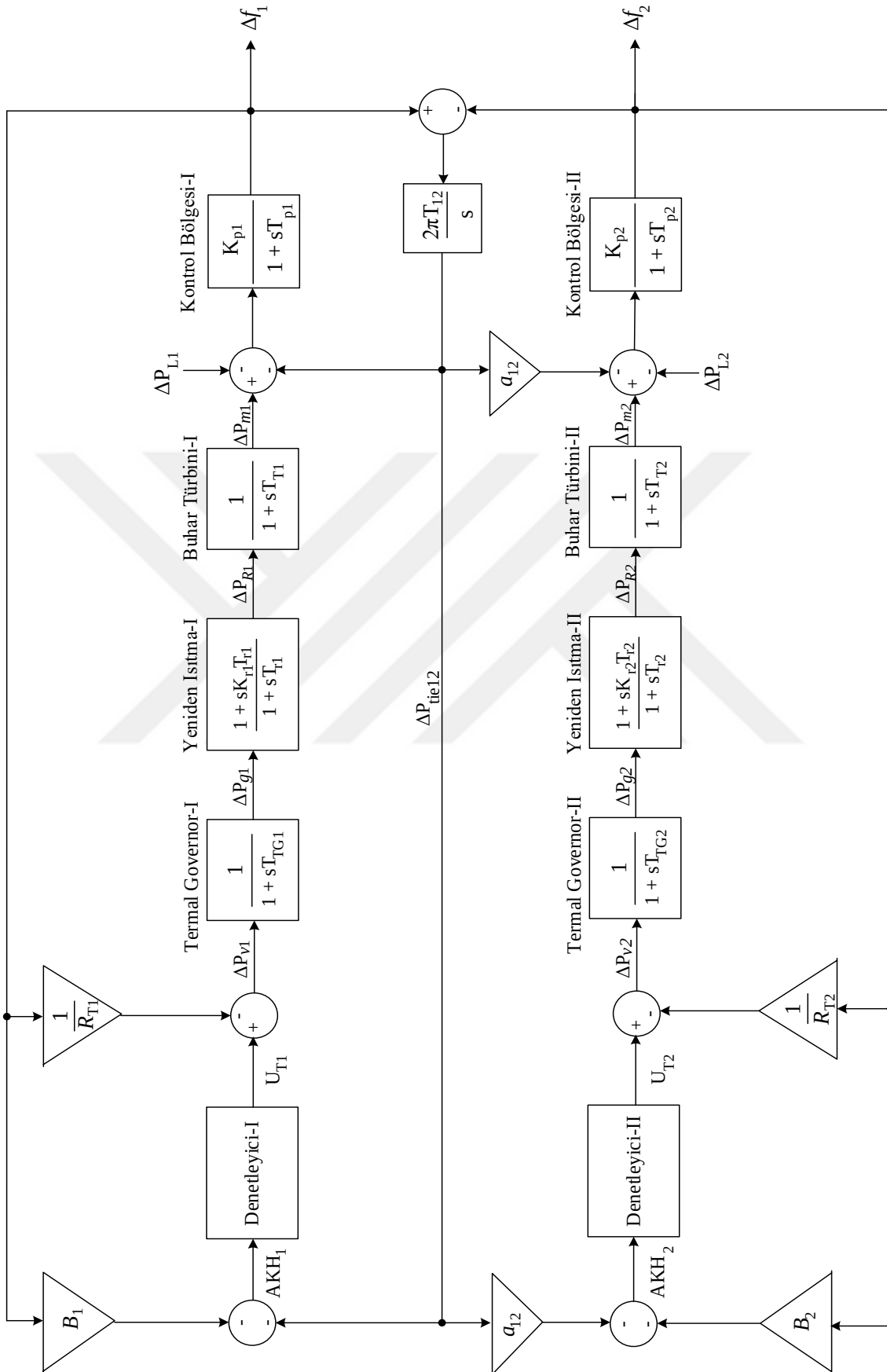
2.1. Yük Frekans Kontrolü Yapılan Güç Sistemleri

Bu tez çalışmasında üç farklı güç sistemi modelinin MATLAB/Simulink kullanılarak yük frekans kontrolü yapılmıştır. Her güç sistemi için sadece birinci bölgede yük değişiminin olduğu durumun yanı sıra iki bölgede de yük değişiminin olduğu durum da ele alınmıştır. Güç sistemi modellerinde ara ısıtmalı termal, ara ısıtmasız termal, hidro ve gaz üretim kaynaklarının modelleri kullanılmış, çok kaynaklı olan güç sistemlerinin biri için doğrusallığı bozucu GÖB ve ÜOK gibi parametreler de göz önünde bulundurulmuştur. Yük frekans kontrolü yapılan güç sistemlerine ait parametreler Ekler bölümünde verilmiştir.

2.1.1. İki Bölge Ara Isıtmalı Termal Güç Sistemi

İki bölge ara ısıtmalı termal güç sistemi modelinde, üretim kaynağı olarak yalnızca ara ısıtmalı termal güç ünitesi bulunmaktadır. İki bölgenin de simetrik olduğu kabul edilmiştir.

İki bölge ara ısıtmalı termal güç sistemine ait doğrusal model şekil 2.1’de verilmiştir. Burada B_1 ve B_2 sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin frekans kutuplama sabitlerini, R_{T1} ve R_{T2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin termal hız regülasyon sabitlerini, T_{TG1} ve T_{TG2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin termal governor zaman sabitlerini, K_{r1} ve K_{r2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin yeniden ısıtma kazanç sabitlerini, T_{r1} ve T_{r2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin yeniden ısıtma zaman sabitlerini, T_{T1} ve T_{T2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin buhar türbininin zaman sabitlerini, K_{P1} ve K_{P2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin kontrol bölgesinin kazanç sabitlerini, T_{P1} ve T_{P2} birinci ve ikinci bölgenin kontrol bölgesinin zaman sabitlerini göstermektedir. İki bölge de simetrik kabul edildiğinden birinci ve ikinci bölgedeki aynı sabitleri ifade eden parametrelerin değeri birbirine eşit olarak alınmıştır. ΔP_{L1} ve ΔP_{L2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgedeki yük değişimini temsil etmektedir. Bu güç sistemi modeli için, $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ durumu ile $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. durumu ele alınmıştır. 0.01 p.u.’luk bir yük değişimi o bölgede %1’lik bir yük değişiminin olduğu anlamını taşımaktadır.

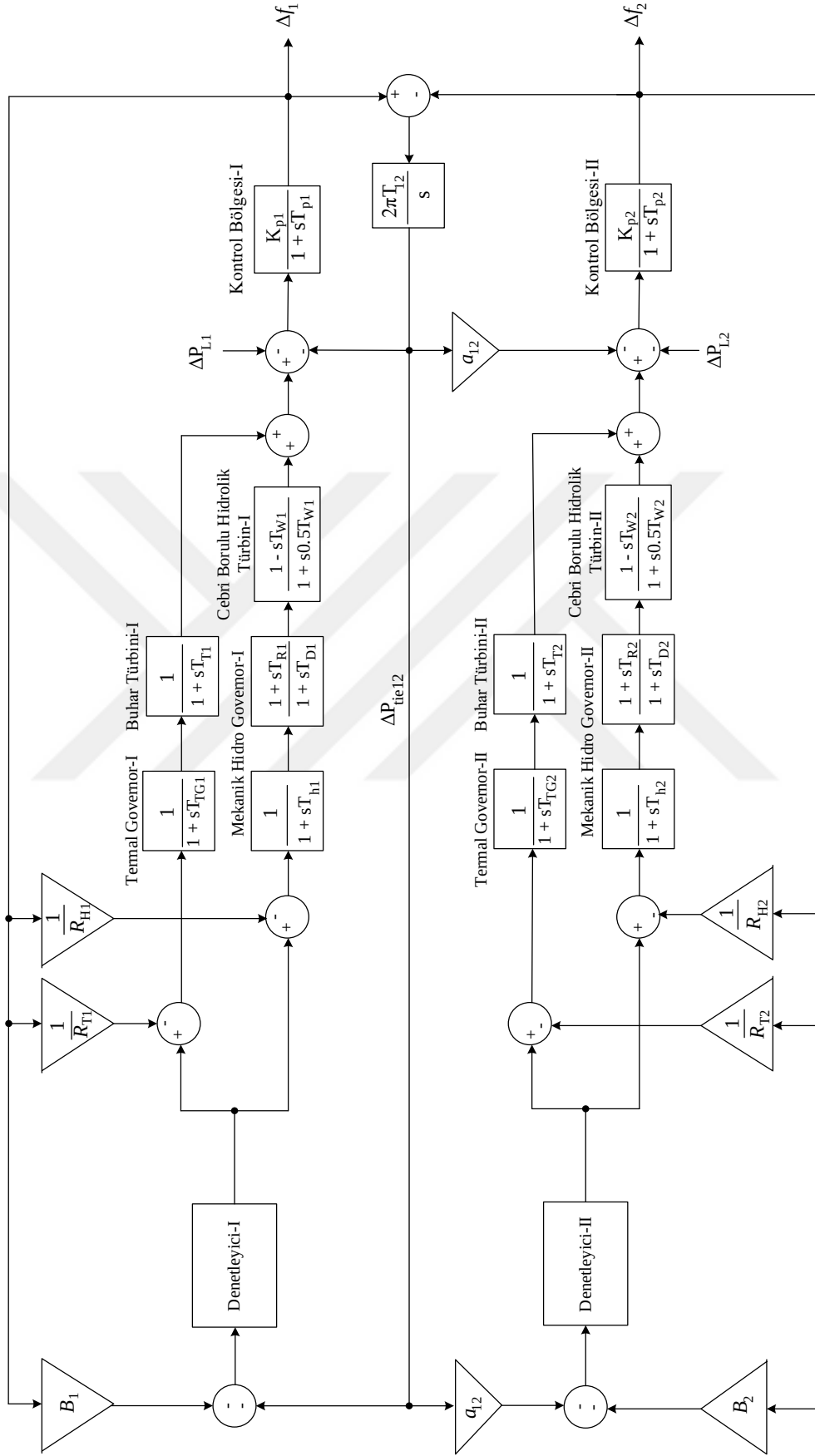


Şekil 2.1. İki bölge arası ısıtımli termal güç sistemi doğrusal modeli

2.1.2. İki Bölge Çok Kaynaklı Güç Sistemi

Çalışmada tercih edilen iki bölge çok kaynaklı güç sistemi modelinde iki bölgede de üretim kaynağı olarak ara ısıtmasız termal ve hidro güç üniteleri bulunmaktadır. İki bölgenin de simetrik olduğu kabul edilmiştir.

Şekil 2.2’de iki bölge çok kaynaklı güç sistemine ait doğrusal model verilmiştir. Burada ara ısıtmalı termal güç ünitesi yerine ara ısıtmasız termal güç ünitesi tercih edildiğinden ısıtıcı bloğu bulunmamaktadır. B_1 ve B_2 sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin frekans kutuplama sabitlerini, R_{T1} ve R_{T2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin termal hız regülasyon sabitlerini, T_{TG1} ve T_{TG2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin termal governor zaman sabitlerini, T_{T1} ve T_{T2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin buhar türbininin zaman sabitlerini, T_{h1} ve T_{h2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin hidro governor zaman sabitlerini, T_{R1} ve T_{R2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin hidro governor sıfırlama zamanlarını, T_{D1} ve T_{D2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin hidro governor geçici düşüş zaman sabitlerini, T_{w1} ve T_{w2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgede cebri borudaki suyun nominal başlangıç zamanlarını, R_{H1} ve R_{H2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin hidro hız regülasyon sabitlerini, K_{P1} ve K_{P2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin kontrol bölgesinin kazanç sabitlerini, T_{P1} ve T_{P2} birinci ve ikinci bölgenin kontrol bölgesinin zaman sabitlerini ifade etmektedir. İki bölge de simetrik kabul edildiğinden birinci ve ikinci bölgedeki aynı sabitleri ifade eden parametrelerin değeri birbirine eşit olarak alınmıştır. İki bölge de simetrik kabul edildiğinden birinci ve ikinci bölgedeki aynı sabitleri ifade eden parametrelerin değeri birbirine eşit olarak alınmıştır. ΔP_{L1} ve ΔP_{L2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgedeki yük değişimini temsil etmektedir. Bu güç sistemi modeli için, $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ durumu ile $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. durumu ele alınmıştır. 0.015 p.u.’luk bir yük değişimi o bölgede %1,5’luk bir yük değişiminin olduğu anlamını taşımaktadır.



Şekil 2.2. İki bölge çok kaynaklı güç sistemi doğrusal modeli

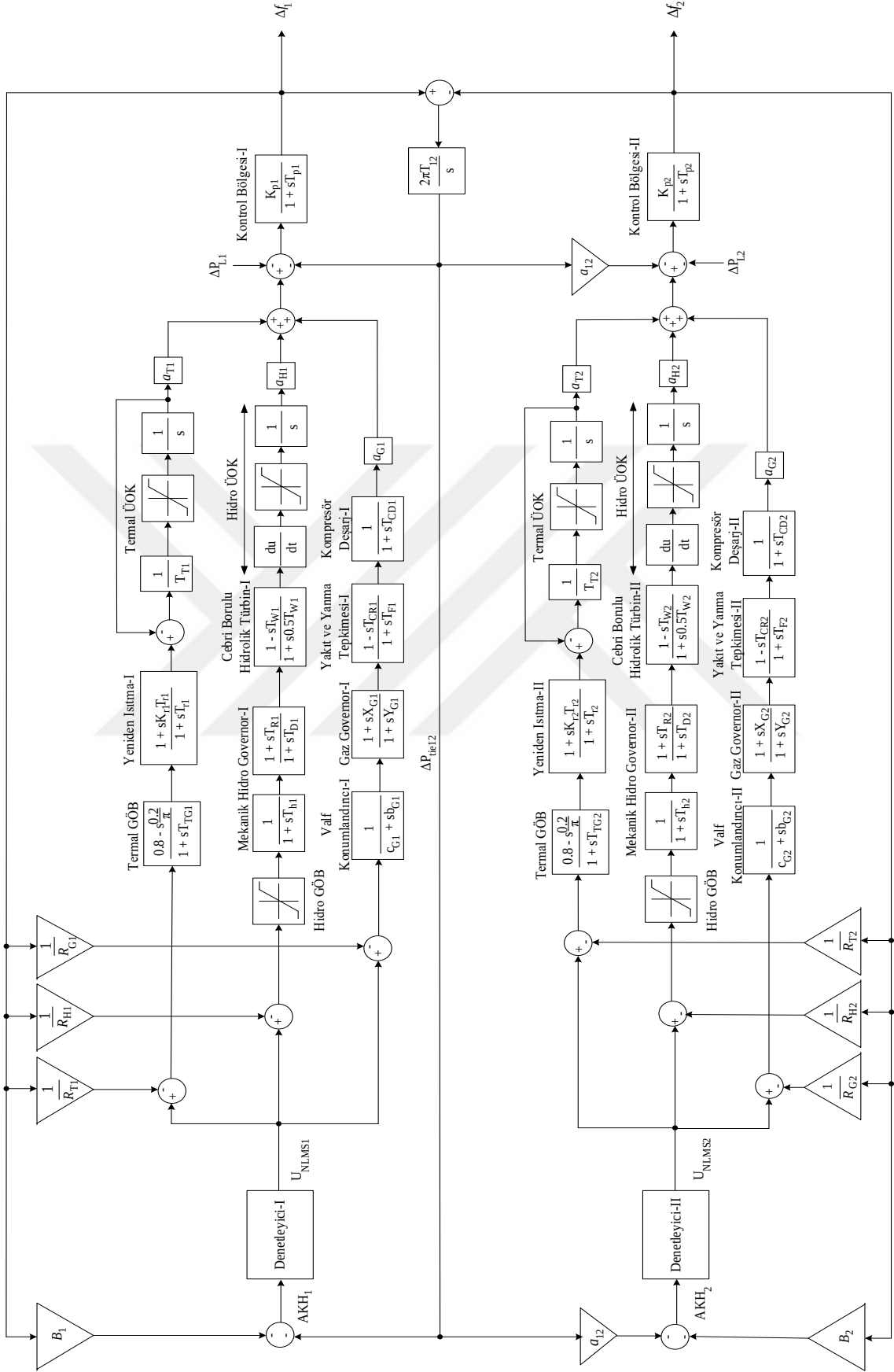
2.1.3. Doğrusal Olmayan İki Bölge Çok Kaynaklı Güç Sistemi

Bu güç sistemi modelinde, ara ısıtmalı termal ve hidro üretim kaynaklarının yanında gaz üretim kaynağı da göz önünde bulundurulmuştur. Her iki bölgede de bu üç üretim kaynağının modeli bulunmaktadır. Bu modelde ek olarak GÖB ve ÜOK gibi doğrusallığı bozan durumlar ara ısıtmalı termal ve hidro kaynaklar için modellemeye dahil edilmiş, etkileri gözlemlenmiştir. Şekil 2.3'te doğrusal olmayan iki bölge çok kaynaklı güç sistemine ait model verilmiştir. B_1 ve B_2 sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin frekans kutuplama sabitlerini, R_{T1} ve R_{T2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin termal hız regülasyon sabitlerini, T_{TG1} ve T_{TG2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin termal governor zaman sabitlerini, K_{r1} ve K_{r2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin yeniden ısıtma kazanç sabitlerini, T_{r1} ve T_{r2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin yeniden ısıtma zaman sabitlerini, T_{T1} ve T_{T2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin buhar türbininin zaman sabitlerini, a_{T1} ve a_{T2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin termal ünite katılım faktörlerini, T_{h1} ve T_{h2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin hidro governor zaman sabitlerini, T_{R1} ve T_{R2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin hidro governor sıfırlama zamanlarını, T_{D1} ve T_{D2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin hidro governor geçici düşüş zaman sabitlerini, T_{w1} ve T_{w2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgede cebri borudaki suyun nominal başlangıç zamanlarını, R_{H1} ve R_{H2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin hidro hız regülasyon sabitlerini, a_{H1} ve a_{H2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin hidro ünite katılım faktörlerini, R_{G1} ve R_{G2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin gaz hız regülasyon sabitlerini, c_{G1} ve c_{G2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin valf konumlandırıcı sabitlerini, b_{G1} ve b_{G2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin valf konumlandırıcı zaman sabitlerini, X_{G1} ve X_{G2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin gaz governor ilerleme süresi sabitlerini, Y_{G1} ve Y_{G2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin gaz governor gecikme süresi sabitlerini, T_{CR1} ve T_{CR2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin gaz türbinlerinin yanma tepkimelerindeki gecikme sürelerini, T_{F1} ve T_{F2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin gaz türbinlerinin yakıt zaman sabitlerini, T_{CD1} ve T_{CD2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin kompresör deşarj sürelerini, a_{G1} ve a_{G2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin gaz ünite katılım faktörlerini ifade etmektedir. İki bölge de simetrik kabul edildiğinden birinci ve ikinci bölgedeki aynı sabitleri ifade eden parametrelerin değeri birbirine eşit olarak alınmıştır.

Ara ısıtmalı termal güç ünitesinin GÖB değeri ± 0.05 ve ÜOK değeri $\%3/\text{dk}$ (± 0.0005 p.u. MW/s) olarak alınmıştır. Hidro güç ünitesinin GÖB değeri ± 0.06 ve ÜOK değeri yükselme zamanı göz önünde bulundurularak $\%270/\text{dk}$ (± 0.045 p.u. MW/s) olarak

alınmıştır. Bu değerler her iki bölge için de aynıdır. ΔP_{L1} ve ΔP_{L2} sırasıyla birinci ve ikinci bölgedeki yük değişimini temsil etmektedir. Bu güç sistemi modeli için, ilk güç sistemi modelinde olduğu gibi $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ durumu ile $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. durumu ele alınmıştır.





Şekil 2.3. Doğrusal olmayan iki bölgei çok kaynaklı güç sistemi modeli

2.2. Denetleyici Parametrelerinin Optimizasyonu

Çalışmada PID, TID, TIDF ve TIDFF olmak üzere dört tip denetleyici kullanılmıştır. Bu denetleyiciler literatürde bulunan bazı çalışmalarla kıyaslanmıştır. Kıyaslama kriterleri olarak amaç fonksiyonu, oturma süresi, üst ve alt aşma göz önünde bulundurulmuştur. Amaç fonksiyonu olarak zaman ağırlıklı mutlak hatanın toplamı (ITAE) kullanılmıştır. Denklem (2.1), amaç fonksiyonunu belirtmektedir.

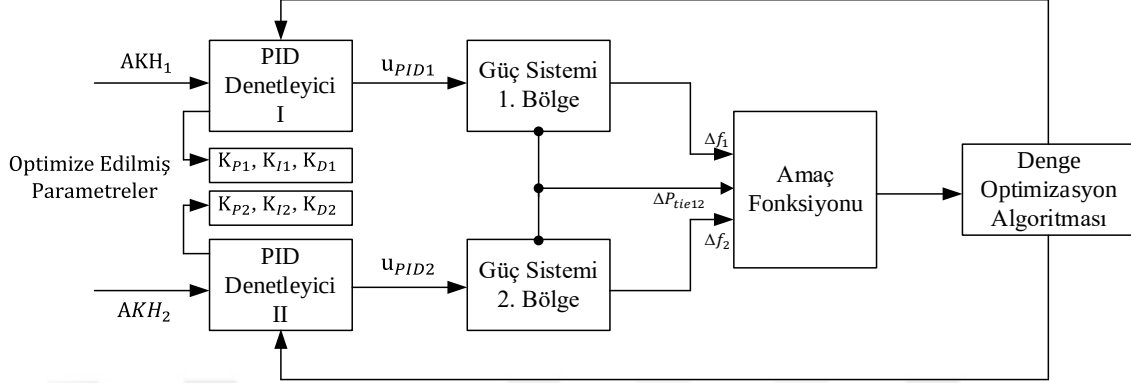
$$ITAE = \int_{t=0}^{t_{simulation}} t(|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + |\Delta P_{tie12}|) dt \quad (2.1)$$

Burada $t_{simulation}$ simülasyon süresini, Δf_1 birinci bölgedeki frekans değişimini, Δf_2 ikinci bölgedeki frekans değişimini, ΔP_{tie12} ise bağlantı hattındaki güç değişimini belirtmektedir. Bu amaç fonksiyonu doğrultusunda denetleyici parametreleri DOA ile optimize edilmiş ve en iyi sonuçlar kayıt altına alınmıştır. Bütün denetleyici parametrelerinin optimizasyonu için algoritmanın parçacık sayısı 30 alınmıştır. İki bölgeyi ara ısıtmalı termal güç sistemi ve iki bölgeyi çok kaynaklı güç sistemi için tasarlanan denetleyicilerin ideal parametreleri, optimizasyon algoritması ile 100 iterasyon, iki bölgeyi doğrusal olmayan çok kaynaklı güç sistemi için ise 50 iterasyon aratılmıştır. Simülasyon süresi iki bölgeyi ara ısıtmalı termal güç sistemi ve iki bölgeyi çok kaynaklı güç sistemi için 15 saniye, iki bölgeyi doğrusal olmayan çok kaynaklı güç sistemi için ise 50 saniye olarak alınmıştır. Güç sistemindeki iki bölge için de birer adet denetleyici tasarlanmış, parametreleri optimize edilmiştir. Oturma süresi bandı, iki bölgeyi ara ısıtmalı termal güç sistemi ve iki bölgeyi çok kaynaklı güç sistemi için ± 0.0005 , doğrusal olmayan iki bölgeyi çok kaynaklı güç sistemi için ± 0.0002 alınmıştır. Literatürdeki çalışmalarda, oturma süresi bandı için bu tez çalışmasında referans olarak alınan bu iki değerin dışında, ± 0.002 ve ± 0.005 değerleri de kullanılmaktadır [37, 47].

2.2.1. PID Denetleyici Optimizasyonu

PID denetleyici oransal kazanç (K_P), integral kazancı (K_I) ve türev kazancı (K_D) olmak üzere üç adet parametreye sahiptir. Her iki bölge için denetleyici parametrelerinin optimizasyonu yapıldığından dolayı her bir güç sistemi için altışar adet parametrenin optimizasyonu yapılmıştır. Amaç fonksiyonuna göre en iyi değerleri veren PID denetleyici

parametreleri, DOA ile aratılmıştır. Şekil 2.4'te yük frekans kontrolü için PID denetleyicilerin optimizasyonunun blok şeması verilmiştir.



Şekil 2.4. PID denetleyici optimizasyonunun blok şeması

u_{PID1} birinci bölgedeki PID denetleyicinin çıkışını, u_{PID2} ise ikinci bölgedeki PID denetleyicinin çıkışını ifade etmektedir. Denklem (2.2) ve (2.3) ile bu çıkış değerlerinin denklemi verilmiştir.

$$u_{PID1} = K_{P1}AKH_1 + K_{I1} \int AKH_1 + K_{D1} \frac{dAKH_1}{dt} \quad (2.2)$$

$$u_{PID2} = K_{P2}AKH_2 + K_{I2} \int AKH_2 + K_{D2} \frac{dAKH_2}{dt} \quad (2.3)$$

2.2.1.1. İki Bölge İli İrtımalı Termal Güç Sisteminde PID Denetleyici Optimizasyonu

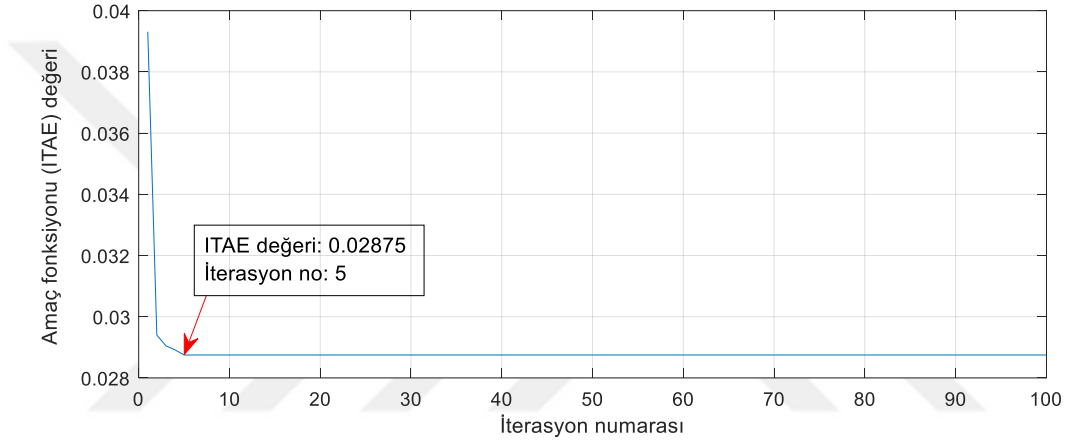
İki bölge İli ısıtılmalı termal güç sistemi için tüm PID denetleyici parametreleri (0.01,6) aralığında aratılmıştır.

Tablo 2.1, İki bölge İli ısıtılmalı termal güç sisteminde sadece birinci bölgede yük değışimi olması durumunda bulunan İdeal PID denetleyici parametreleri verilmiştir.

Tablo 2.1. İki bölgeci ara ısıtılmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ideal PID denetleyici parametreleri

	K_{P1}	K_{I1}	K_{D1}	K_{P2}	K_{I2}	K_{D2}
DOA	6	6	3.0523	6	6	3.0895

Şekil 2.5'te iki bölgeci ara ısıtılmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA ile optimize edilmiş PID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.5. İki bölgeci ara ısıtılmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA-PID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi

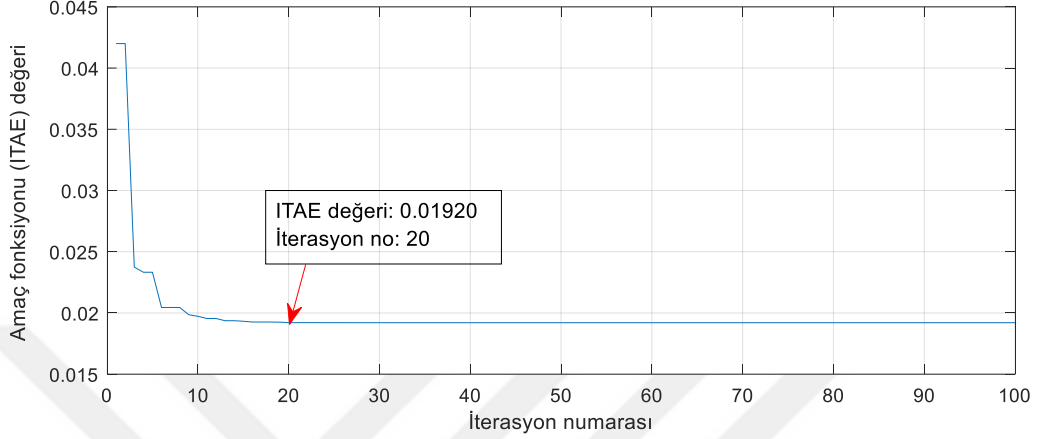
Denetleyici, en iyi ITAE değeri olan 0.02875 değerine 100 iterasyon üzerinden 5. iterasyonda ulaşmıştır.

Tablo 2.2 ile iki bölgeci ara ısıtılmalı termal güç sisteminde iki bölgede de yük değişimi olması durumunda bulunan ideal PID denetleyici parametreleri verilmiştir.

Tablo 2.2. İki bölgeci ara ısıtılmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için ideal PID denetleyici parametreleri

	K_{P1}	K_{I1}	K_{D1}	K_{P2}	K_{I2}	K_{D2}
DOA	6	6	1.5376	6	6	1.5396

Şekil 2.6’da iki bölgeci ara ısıtılmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için DOA ile optimize edilmiş PID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.6. İki bölgeci ara ısıtılmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için DOA-PID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi

Denetleyici, en iyi ITAE değeri olan 0.01920 değerine 100 iterasyon üzerinden 20. iterasyonda ulaşmıştır.

2.2.1.2. İki Bölgeci Çok Kaynaklı Güç Sisteminde PID Denetleyici Optimizasyonu

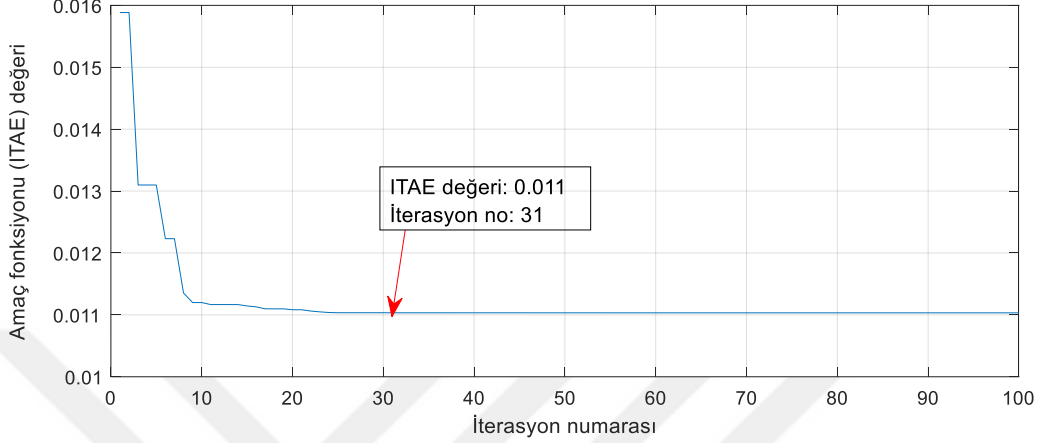
İki bölgeci çok kaynaklı güç sistemi için tüm PID denetleyici parametreleri (0.01,6) aralığında aratılmıştır.

Tablo 2.3, iki bölgeci çok kaynaklı güç sisteminde sadece birinci bölgede yük değişimi olması durumunda bulunan ideal PID denetleyici parametreleri verilmiştir.

Tablo 2.3. İki bölgeci çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ideal PID denetleyici parametreleri

	K_{P1}	K_{I1}	K_{D1}	K_{P2}	K_{I2}	K_{D2}
DOA	6	6	1.4202	0.01	0.3508	2.9040

Şekil 2.7’de iki bölgele çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA ile optimize edilmiş PID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.7. İki bölgele çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA-PID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi

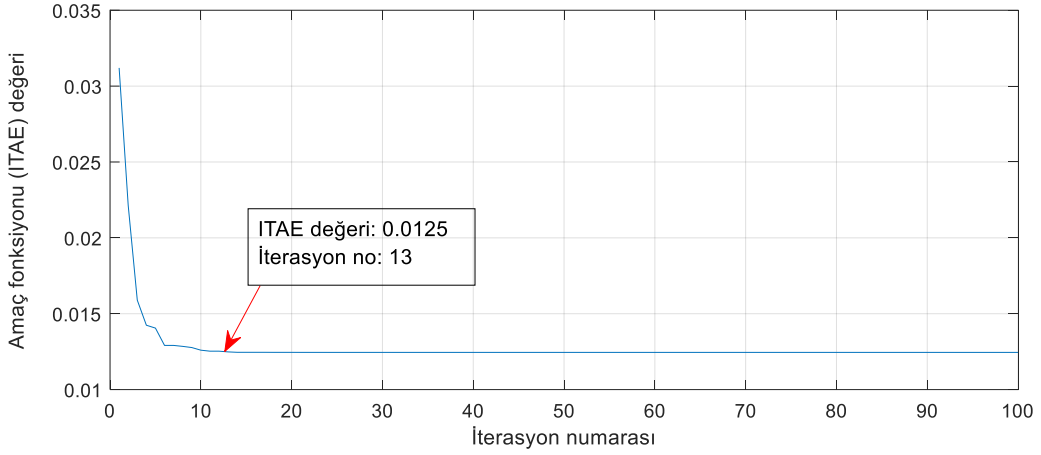
Denetleyici, en iyi ITAE değeri olan 0.011 değerine 100 iterasyon üzerinden 31. iterasyonda ulaşmıştır.

Tablo 2.4 ile iki bölgele çok kaynaklı güç sisteminde iki bölgede de yük değişimi olması durumunda bulunan ideal PID denetleyici parametreleri verilmiştir.

Tablo 2.4. İki bölgele çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için ideal PID denetleyici parametreleri

	K_{P1}	K_{I1}	K_{D1}	K_{P2}	K_{I2}	K_{D2}
DOA	6	6	1.7608	6	6	1.76

Şekil 2.8’de iki bölgele çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için DOA ile optimize edilmiş PID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.8. İki bölgeci çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için DOA-PID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi

Denetleyici en iyi ITAE değeri olan 0.0125 değerine 100 iterasyon üzerinden 13. iterasyonda ulaşmıştır.

2.2.1.3. Doğrusal Olmayan İki Bölgeci Çok Kaynaklı Güç Sisteminde PID Denetleyici Optimizasyonu

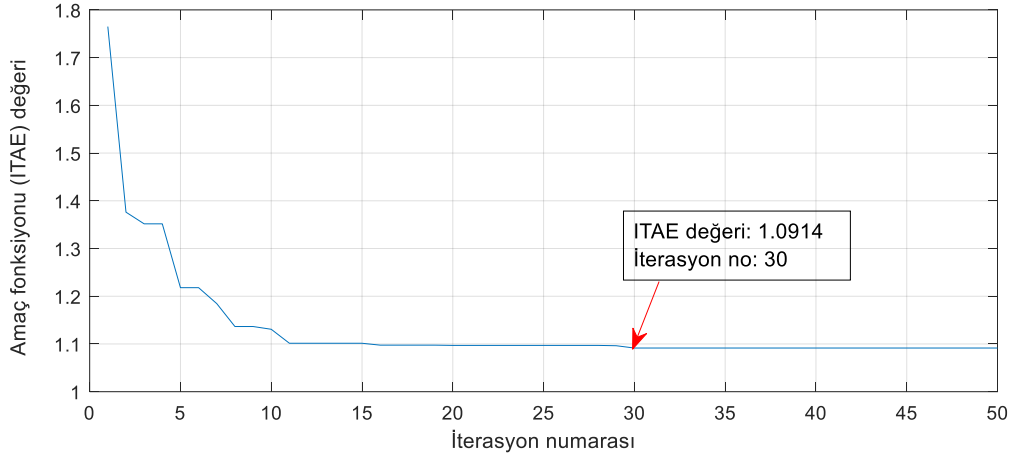
Doğrusal olmayan iki bölgeci çok kaynaklı güç sistemi için tüm PID denetleyici parametreleri (0,2) aralığında aratılmıştır.

Tablo 2.5, doğrusal olmayan iki bölgeci çok kaynaklı güç sisteminde sadece birinci bölgede yük değişimi olması durumunda bulunan ideal PID denetleyici parametreleri verilmiştir.

Tablo 2.5. Doğrusal olmayan iki bölgeci çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ideal PID denetleyici parametreleri

	K_{P1}	K_{I1}	K_{D1}	K_{P2}	K_{I2}	K_{D2}
YBA [42]	1.6213	2	0.8264	1.2369	0.7627	2
DOA	1.9594	2	0.8035	1.2402	0.8251	2

Şekil 2.9’da doğrusal olmayan iki bölgeci çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA ile optimize edilmiş PID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.9. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA-PID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi

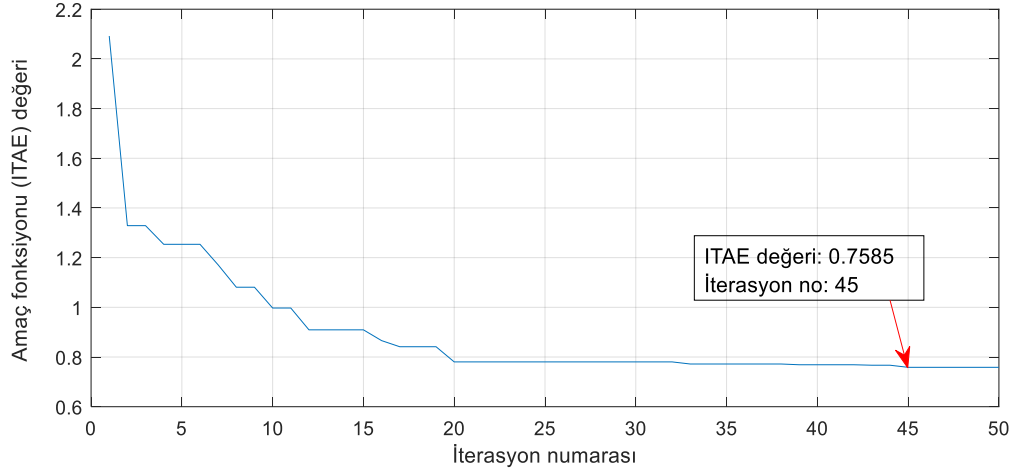
Denetleyici, en iyi ITAE değeri olan 1.0914 değerine 50 iterasyon üzerinden 30. iterasyonda ulaşmıştır. YBA'nın bulduğu ITAE değeri 1.3589'dur [42]. DOA, YBA'ya üstünlük sağlamıştır.

Tablo 2.6 ile doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde iki bölgede de yük değişimi olması durumunda bulunan ideal PID denetleyici parametreleri verilmiştir.

Tablo 2.6. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için ideal PID denetleyici parametreleri

	K_{P1}	K_{I1}	K_{D1}	K_{P2}	K_{I2}	K_{D2}
DOA	0.3385	1.9922	2	0.3521	1.9951	1.9997

Şekil 2.6'da doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için DOA ile optimize edilmiş PID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi verilmiştir.



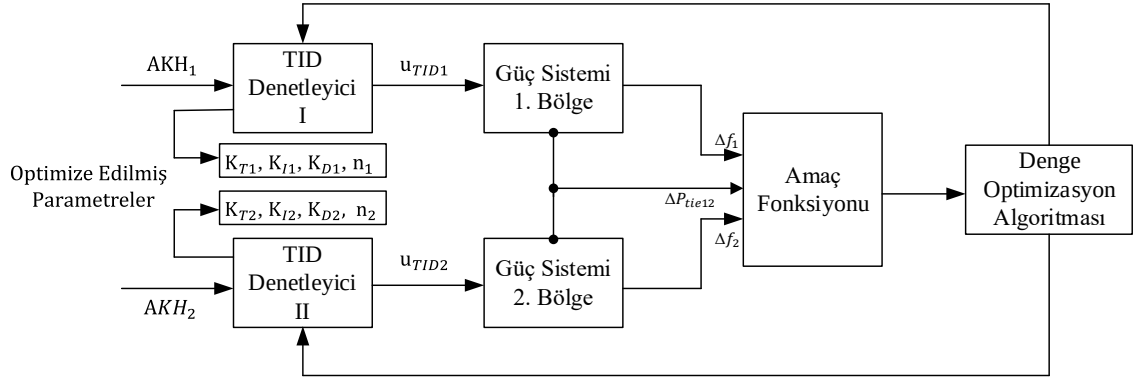
Şekil 2.10. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için DOA-PID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi

Denetleyici en iyi ITAE değeri olan 0.7585 değerine 50 iterasyon üzerinden 45. iterasyonda ulaşmıştır.

PID denetleyicinin amaç fonksiyonu değeri, iki bölgeli ara ısıtılmalı termal güç sistemi ve doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde iki bölgede de yük değişimi olan durumda, sadece bir bölgede yük değişimi olan durumdan daha düşük olduğu görülürken, iki bölgeli çok kaynaklı güç sistemi için bu durumun tersi olduğu gözlemlenmiştir.

2.2.2. TID Denetleyici Optimizasyonu

TID denetleyici eğim kazancı (K_T), integral kazancı (K_I) ve türev kazancı (K_D) ve kesirli integratör derecesi (n) olmak üzere dört adet parametreye sahiptir. Her iki bölge için denetleyici parametrelerinin optimizasyonu yapıldığından dolayı her bir güç sistemi için sekizer adet parametrenin optimizasyonu yapılmıştır. Amaç fonksiyonuna göre en iyi değerleri veren TID denetleyici parametreleri, DOA ile aratılmıştır. Şekil 2.11’de yük frekans kontrolü için TID denetleyicilerin optimizasyonunun blok şeması verilmiştir.



Şekil 2.11. TID denetleyici optimizasyonunun blok şeması

2.2.2.1. İki Bölge Ara Isıtmalı Termal Güç Sisteminde TID Denetleyici Optimizasyonu

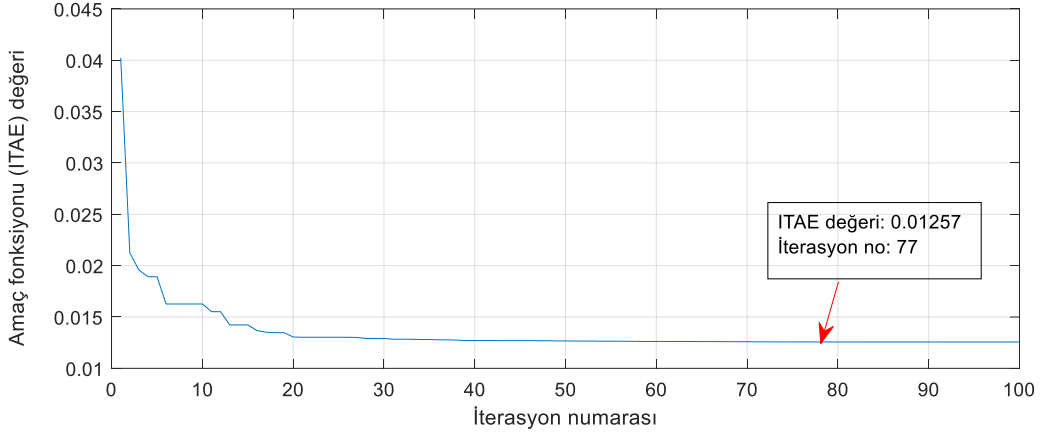
İki bölge ara ısıtmalı termal güç sistemi için K_T , K_I ve K_D parametreleri (0.01,6) aralığında, n parametresi ise (0.01,3) aralığında aratılmıştır.

Tablo 2.7, iki bölge ara ısıtmalı termal güç sisteminde sadece birinci bölgede yük değişimi olması durumunda bulunan ideal TID denetleyici parametreleri verilmiştir.

Tablo 2.7. İki bölge ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ideal TID denetleyici parametreleri

	GKOA [49]	SSOA [49]	DOA
K_{T1}	6	5.99929	5.9999
K_{I1}	5.90565	2.03755	2.0125
K_{D1}	1.80331	1.9398	1.9195
n_1	1.90377	2.24377	2.2851
K_{T2}	5.59866	4.16632	3.0267
K_{I2}	5.90732	2.0156	1.4510
K_{D2}	4.89975	4.35521	2.9462
n_2	1.79894	2.99896	2.9995

Şekil 2.12’de iki bölge ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA ile optimize edilmiş TID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.12. İki bölge ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA-TID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi

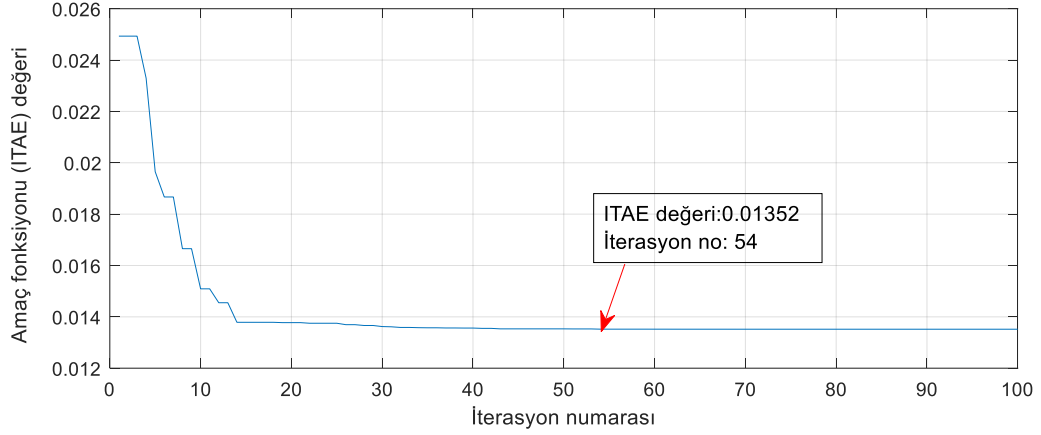
Denetleyici, en iyi ITAE değeri olan 0.01257 değerine 100 iterasyon üzerinden 77. iterasyonda ulaşmıştır. GKOA ile optimize edilmiş TID denetleyicinin ITAE değeri 0.0269 iken SSOA ile optimize edilmiş TID denetleyicinin ITAE değeri 0.01275'tir [49]. DOA ile optimize edilmiş TID denetleyici bu değerlere üstünlük sağlamıştır.

Tablo 2.8 ile iki bölge ara ısıtmalı termal güç sisteminde iki bölgede de yük değişimi olması durumunda bulunan ideal TID denetleyici parametreleri verilmiştir.

Tablo 2.8. İki bölge ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için ideal TID denetleyici parametreleri

	DOA
K_{T1}	6
K_{I1}	5.9997
K_{D1}	2.2437
n_1	3
K_{T2}	6
K_{I2}	6
K_{D2}	2.2614
n_2	3

Şekil 2.13'te iki bölge ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için DOA ile optimize edilmiş TID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.13. İki bölgele ara ısıtılmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için DOA-TID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi

Denetleyici, en iyi ITAE değeri olan 0.01352 değerine 100 iterasyon üzerinden 54. iterasyonda ulaşmıştır.

2.2.2.2. İki Bölgele Çok Kaynaklı Güç Sisteminde TID Denetleyici Optimizasyonu

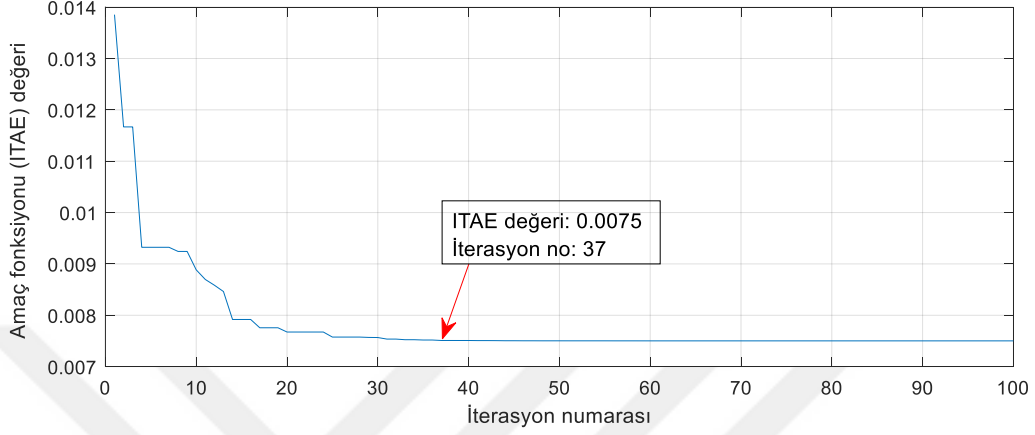
İki bölgele çok kaynaklı güç sistemi için K_T , K_I ve K_D parametreleri (0.01,6) aralığında, n parametresi ise (0.01,3) aralığında aratılmıştır.

Tablo 2.9, iki bölgele çok kaynaklı güç sisteminde sadece birinci bölgede yük değişimi olması durumunda bulunan ideal TID denetleyici parametreleri verilmiştir.

Tablo 2.9. İki bölgele çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ideal TID denetleyici parametreleri

	GKOA [49]	SSOA [49]	DOA
K_{T1}	6	5.99916	6
K_{I1}	5.1002	5.99703	6
K_{D1}	1.76329	1.78555	1.7432
n_1	1.95619	2.99999	3
K_{T2}	3.18806	0.00017	0.0101
K_{I2}	4.51488	0.36256	0.3764
K_{D2}	6	5.79008	6
n_2	1.04218	2.05954	0.01

Şekil 2.14'te iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA ile optimize edilmiş TID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.14. İki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA-TID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi

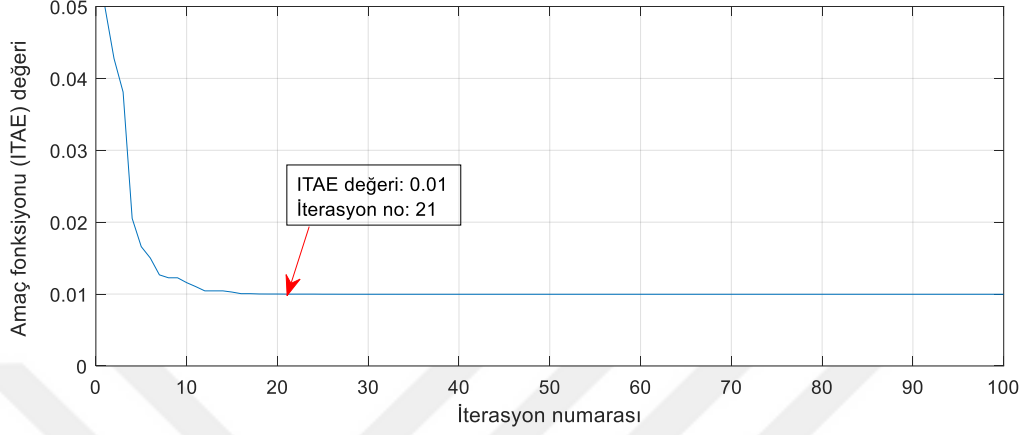
Denetleyici, en iyi ITAE değeri olan 0.0075 değerine 100 iterasyon üzerinden 37. iterasyonda ulaşmıştır. GKOA ile optimize edilmiş TID denetleyicinin ITAE değeri 0.0138 iken SSOA ile optimize edilmiş TID denetleyicinin ITAE değeri 0.0075'tir [49]. DOA ile optimize edilmiş TID denetleyici, GKOA ile optimize edilmiş denetleyiciye üstünlük sağlarken, SSOA ile optimize edilmiş denetleyicinin sahip olduğu değere ulaşmıştır.

Tablo 2.10 ile iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde iki bölgede de yük değişimi olması durumunda bulunan ideal TID denetleyici parametreleri verilmiştir.

Tablo 2.10. İki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için ideal TID denetleyici parametreleri

	DOA
K_{T1}	6
K_{I1}	6
K_{D1}	1.8389
n_1	3
K_{T2}	6
K_{I2}	6
K_{D2}	1.8407
n_2	3

Şekil 2.15'te iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için DOA ile optimize edilmiş TID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.15. İki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için DOA-TID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi

Denetleyici en iyi ITAE değeri olan 0.01 değerine 100 iterasyon üzerinden 21. iterasyonda ulaşmıştır.

2.2.2.3. Doğrusal Olmayan İki Bölgeli Çok Kaynaklı Güç Sisteminde TID Denetleyici Optimizasyonu

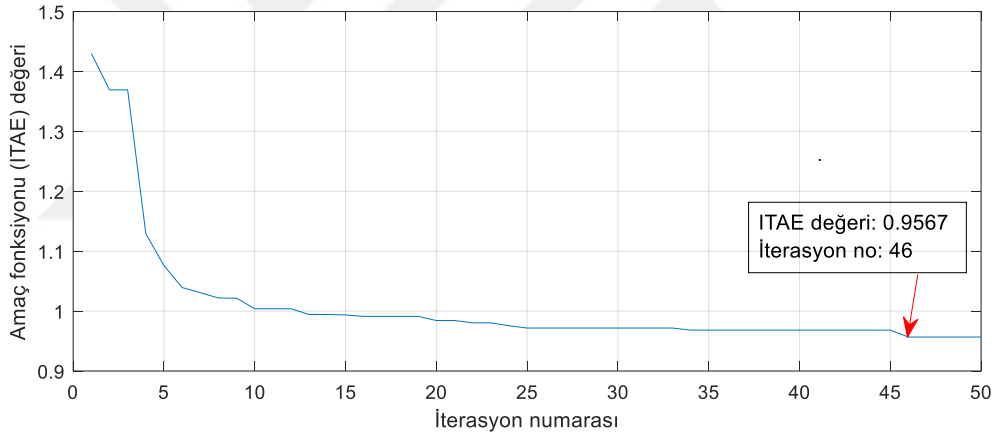
Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sistemi için K_T , K_I ve K_D parametreleri (0,2) aralığında, n parametresi ise (2,3) aralığında aratılmıştır.

Tablo 2.11, doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde sadece birinci bölgede yük değişimi olması durumunda bulunan ideal TID denetleyici parametreleri verilmiştir.

Tablo 2.11. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ideal TID denetleyici parametreleri

	YBA [42]	DOA
K_{T1}	2	1.865
K_{I1}	2	1.7598
K_{D1}	2	1.633
n_1	2.3166	2.0358
K_{T2}	0.8031	0.5926
K_{I2}	0	0.0248
K_{D2}	2	1.9537
n_2	3	3

Şekil 2.16’da doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA ile optimize edilmiş TID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.16. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA-TID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi

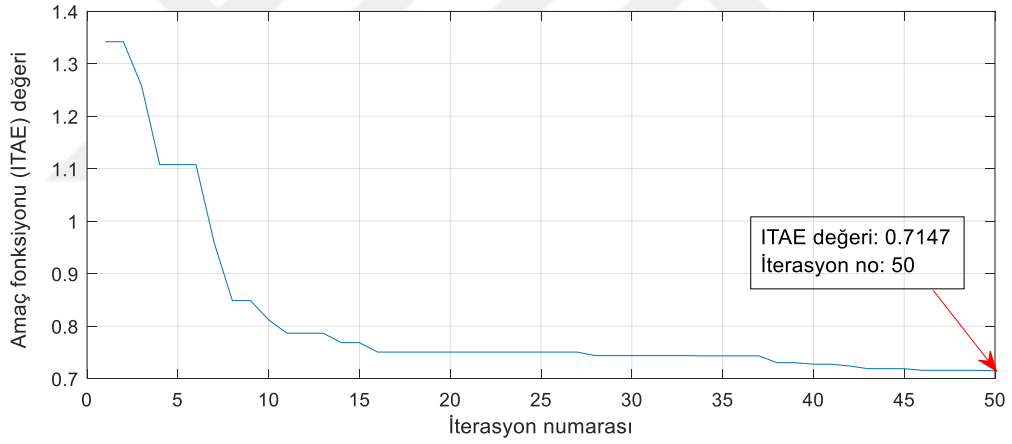
Denetleyici, en iyi ITAE değeri olan 0.9567 değerine 50 iterasyon üzerinden 46. iterasyonda ulaşmıştır. YBA’nın bulduğu ITAE değeri 1.0996’dır [42]. DOA, YBA’ya üstünlük sağlamıştır.

Tablo 2.12 ile doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde iki bölgede de yük değişimi olması durumunda bulunan ideal TID denetleyici parametreleri verilmiştir.

Tablo 2.12. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için ideal TID denetleyici parametreleri

	DOA
K_{T1}	1.4063
K_{I1}	1.522
K_{D1}	1.9964
n_1	2.017
K_{T2}	1.4375
K_{I2}	1.4644
K_{D2}	1.9954
n_2	2.0002

Şekil 2.17’de doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için DOA ile optimize edilmiş TID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi verilmiştir.

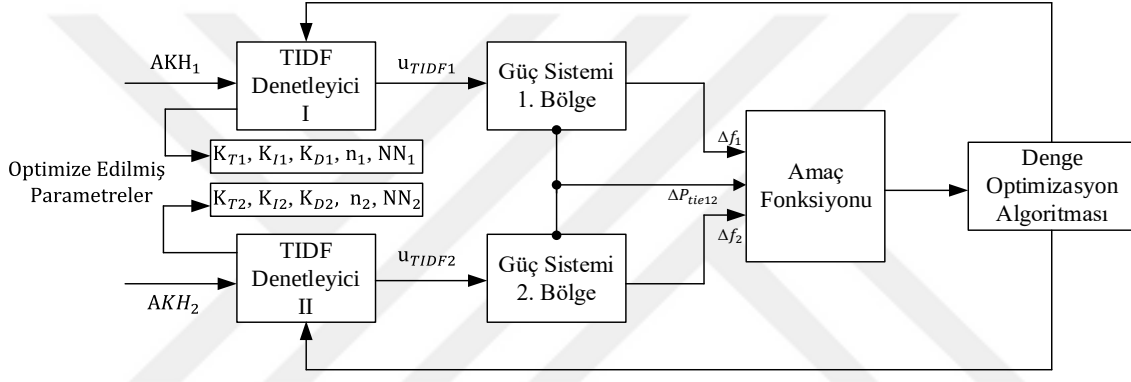


Şekil 2.17. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için DOA-TID denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi

Denetleyici en iyi ITAE değeri olan 0.7147 değerine 50 iterasyon üzerinden 50. iterasyonda ulaşmıştır.

2.2.3. TIDF Denetleyici Optimizasyonu

TIDF denetleyici eğim kazancı (K_T), integral kazancı (K_I), türev kazancı (K_D), kesirli integratör derecesi (n) ve filtre kesim frekansı (NN) olmak üzere beş adet parametreye sahiptir. Her iki bölge için denetleyici parametrelerinin optimizasyonu yapıldığından dolayı her bir güç sistemi için onar adet parametrenin optimizasyonu yapılmıştır. Amaç fonksiyonuna göre en iyi değerleri veren TIDF denetleyici parametreleri, DOA ile aratılmıştır. Şekil 2.18’de yük frekans kontrolü için TIDF denetleyicilerin optimizasyonunun blok şeması verilmiştir.



Şekil 2.18. TIDF denetleyici optimizasyonunun blok şeması

2.2.3.1. İki Bölge Ara Isıtmalı Termal Güç Sisteminde TIDF Denetleyici Optimizasyonu

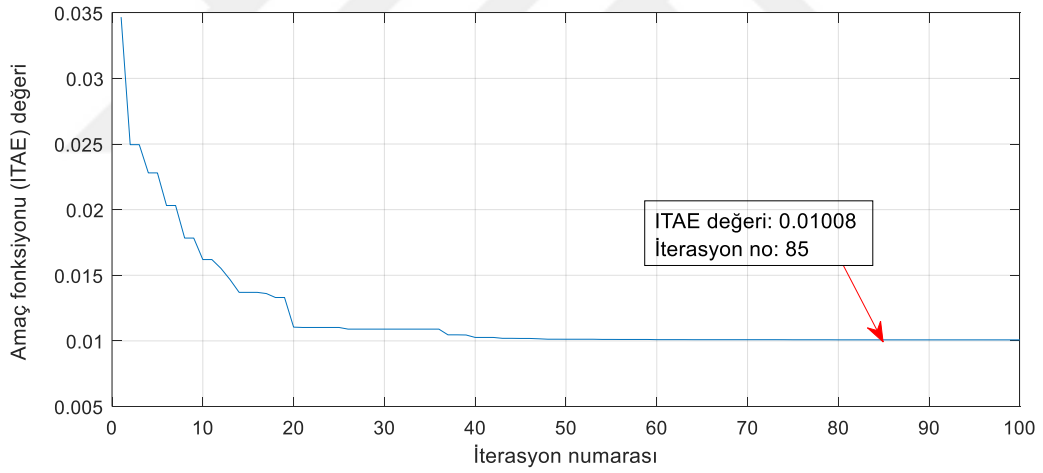
İki bölge ara ısıtmalı termal güç sistemi için K_T , K_I ve K_D parametreleri (0,01,6) aralığında, n parametresi (0,01,3) aralığında, NN parametresi (0,300) aralığında aratılmıştır.

Tablo 2.13, iki bölge ara ısıtmalı termal güç sisteminde sadece birinci bölgede yük değişimi olması durumunda bulunan ideal TIDF denetleyici parametreleri verilmiştir.

Tablo 2.13. İki bölgele ara ısıtılmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ideal TIDF denetleyici parametreleri

	DOA
K_{T1}	5.9998
K_{I1}	1.9872
K_{D1}	1.74
n_1	1.9584
NN_1	10.9075
K_{T2}	5.8884
K_{I2}	2.2148
K_{D2}	5.0465
n_2	2.9999
NN_2	266.4636

Şekil 2.19’da iki bölgele ara ısıtılmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA ile optimize edilmiş TIDF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.19. İki bölgele ara ısıtılmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA-TIDF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi

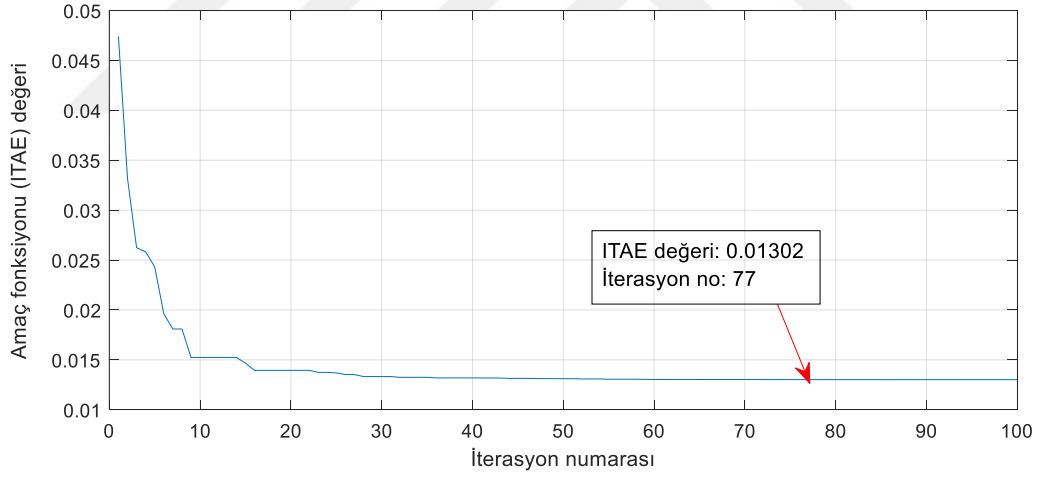
Denetleyici, en iyi ITAE değeri olan 0.01008 değerine 100 iterasyon üzerinden 85. iterasyonda ulaşmıştır.

Tablo 2.14 ile iki bölgele ara ısıtılmalı termal güç sisteminde iki bölgede de yük değişimi olması durumunda bulunan ideal TIDF denetleyici parametreleri verilmiştir.

Tablo 2.14. İki bölgele ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için ideal TIDF denetleyici parametreleri

	DOA
K_{T1}	5.9999
K_{I1}	5.9382
K_{D1}	2.1564
n_1	3
NN_1	270.2259
K_{T2}	5.9490
K_{I2}	6
K_{D2}	2.0615
n_2	2.7434
NN_2	16.9682

Şekil 2.20’de iki bölgele ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için DOA ile optimize edilmiş TIDF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.20. İki bölgele ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için DOA-TIDF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi

Denetleyici, en iyi ITAE değeri olan 0.01302 değerine 100 iterasyon üzerinden 77. iterasyonda ulaşmıştır.

2.2.3.2. İki Bölge Çok Kaynaklı Güç Sisteminde TIDF Denetleyici Optimizasyonu

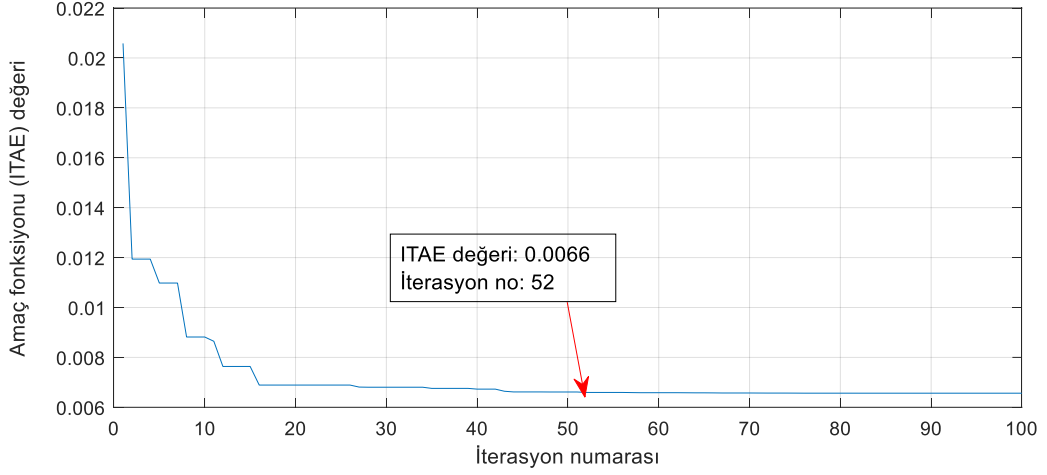
İki bölge çok kaynaklı güç sistemi için K_T , K_I ve K_D parametreleri (0.01,6) aralığında, n parametresi (0.01,3) aralığında ve NN parametresi (0,300) aralığında aratılmıştır.

Tablo 2.15, iki bölge çok kaynaklı güç sisteminde sadece birinci bölgede yük değişimi olması durumunda bulunan ideal TIDF denetleyici parametreleri verilmiştir.

Tablo 2.15. İki bölge çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ideal TIDF denetleyici parametreleri

	DOA
K_{T1}	6
K_{I1}	6
K_{D1}	1.6178
n_1	2.9588
NN_1	20.4448
K_{T2}	0.3309
K_{I2}	0.01
K_{D2}	5.7198
n_2	0.9874
NN_2	154.6621

Şekil 2.21’de iki bölge çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA ile optimize edilmiş TIDF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.21. İki bölge çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA-TIDF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi

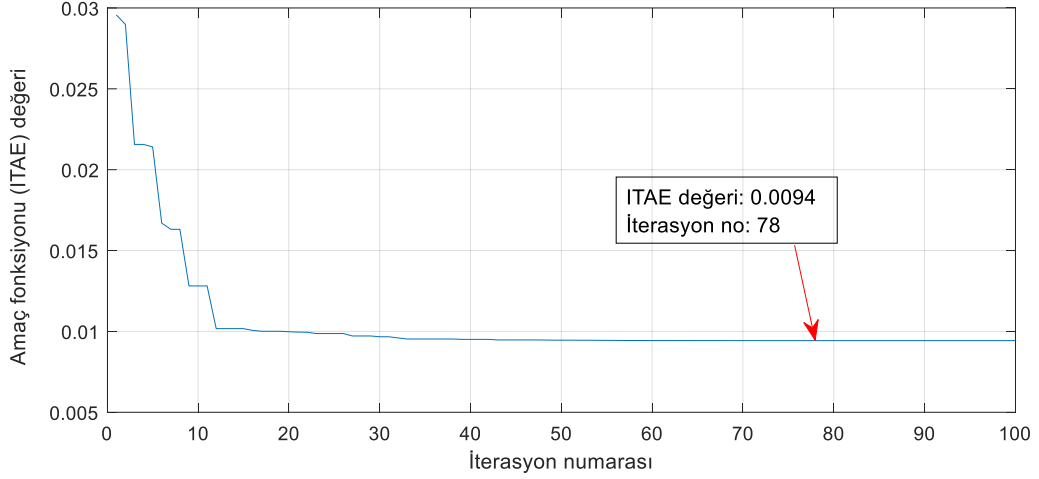
Denetleyici, en iyi ITAE değeri olan 0.0066 değerine 100 iterasyon üzerinden 52. iterasyonda ulaşmıştır.

Tablo 2.16 ile iki bölge çok kaynaklı güç sisteminde iki bölgede de yük değişimi olması durumunda bulunan ideal TIDF denetleyici parametreleri verilmiştir.

Tablo 2.16. İki bölge çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için ideal TIDF denetleyici parametreleri

	DOA
K_{T1}	6
K_{I1}	5.9999
K_{D1}	1.9450
n_1	2.9992
NN_1	29.6015
K_{T2}	6
K_{I2}	6
K_{D2}	1.9440
n_2	3
NN_2	30.1333

Şekil 2.22’de iki bölge çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için DOA ile optimize edilmiş TIDF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.22. İki bölge çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için DOA-TIDF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi

Denetleyici en iyi ITAE değeri olan 0.0094 değerine 100 iterasyon üzerinden 78. iterasyonda ulaşmıştır.

2.2.3.3. Doğrusal Olmayan İki Bölge Çok Kaynaklı Güç Sisteminde TIDF Denetleyici Optimizasyonu

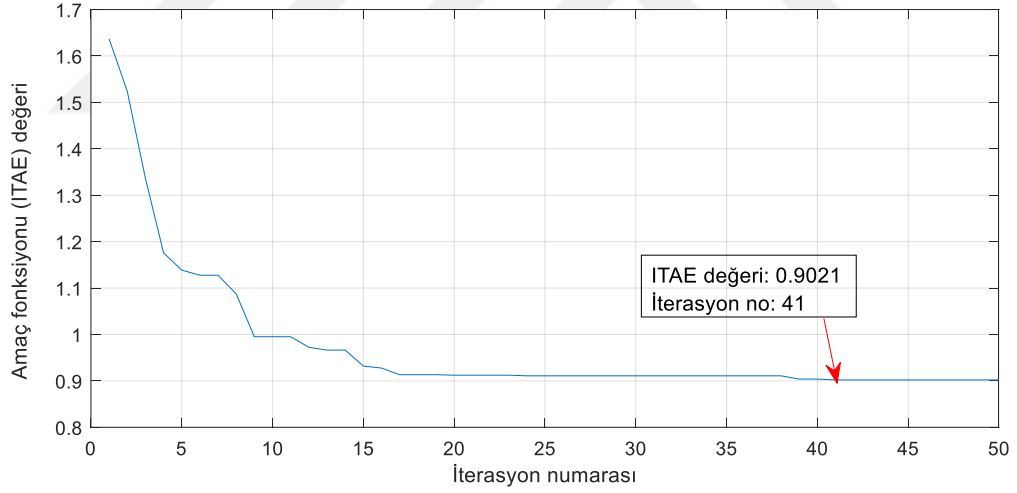
Doğrusal olmayan iki bölge çok kaynaklı güç sistemi için K_T , K_I ve K_D parametreleri (0,2) aralığında, n parametresi (2,3) aralığında ve NN parametresi (0,300) aralığında aratılmıştır.

Tablo 2.17, doğrusal olmayan iki bölge çok kaynaklı güç sisteminde sadece birinci bölgede yük değişimi olması durumunda bulunan ideal TIDF denetleyici parametreleri verilmiştir.

Tablo 2.17. Doğrusal olmayan iki bölgeci çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ideal TIDF denetleyici parametreleri

	DOA
K_{T1}	1.8447
K_{I1}	1.8635
K_{D1}	2
n_1	2
NN_1	214.6095
K_{T2}	0.0099
K_{I2}	0
K_{D2}	1.9935
n_2	2.2516
NN_2	104.5778

Şekil 2.23'te doğrusal olmayan iki bölgeci çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA ile optimize edilmiş TIDF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.23. Doğrusal olmayan iki bölgeci çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA-TIDF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi

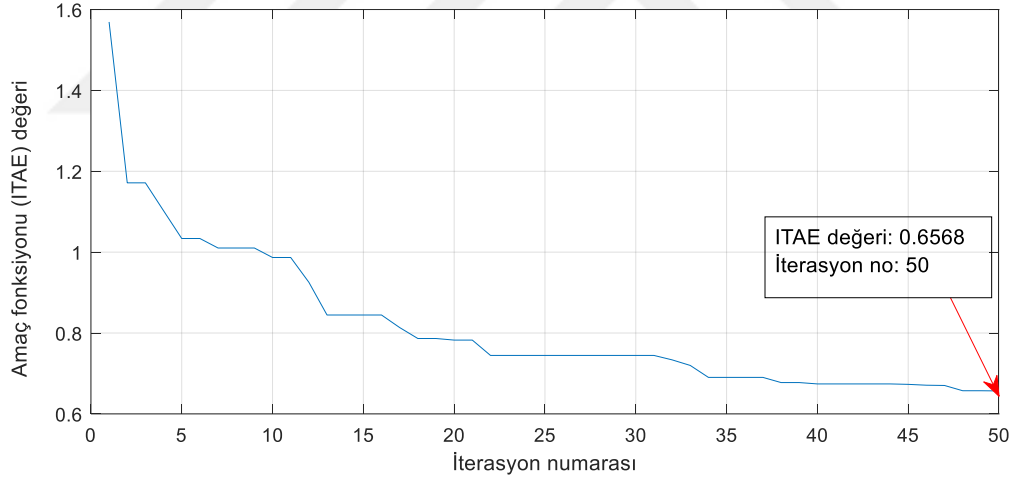
Denetleyici, en iyi ITAE değeri olan 0.9021 değerine 50 iterasyon üzerinden 41. iterasyonda ulaşmıştır.

Tablo 2.18 ile doğrusal olmayan iki bölgeci çok kaynaklı güç sisteminde iki bölgede de yük değişimi olması durumunda bulunan ideal TIDF denetleyici parametreleri verilmiştir.

Tablo 2.18. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için ideal TIDF denetleyici parametreleri

	DOA
K_{T1}	1.3070
K_{I1}	1.9827
K_{D1}	1.9962
n_1	2.0476
NN_1	134.6562
K_{T2}	1.3120
K_{I2}	1.9653
K_{D2}	1.9982
n_2	2.0013
NN_2	251.7575

Şekil 2.24'te doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için DOA ile optimize edilmiş TIDF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.24. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için DOA-TIDF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi

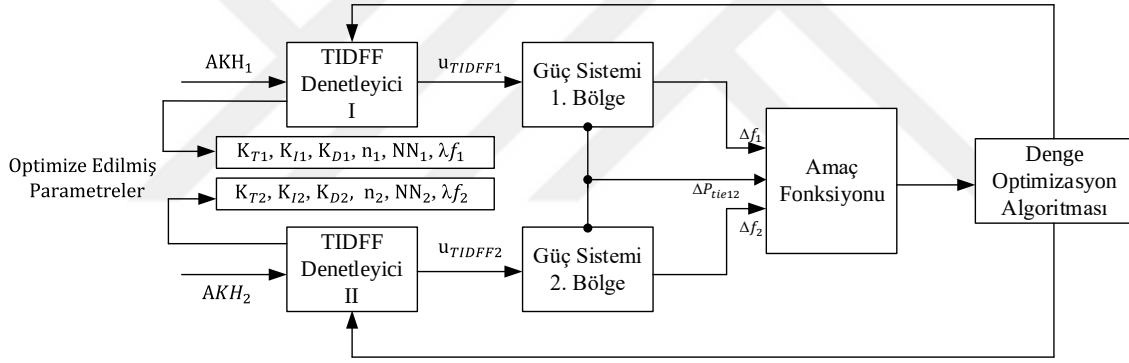
Denetleyici en iyi ITAE değeri olan 0.6568 değerine 50 iterasyon üzerinden 50. iterasyonda ulaşmıştır.

TIDF denetleyicinin amaç fonksiyonu değeri, iki bölgeli ara ısıtılmalı termal güç sistemi ve doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde iki bölgede de yük değişimi olan durumda, sadece bir bölgede yük değişimi olan durumdan daha düşük olduğu

görüldürken, iki bölge çok kaynaklı güç sistemi için bu durumun tersi olduğu gözlemlenmiştir.

2.2.4. TIDFF Denetleyici Optimizasyonu

TIDFF denetleyici eğim kazancı (K_T), integral kazancı (K_I), türev kazancı (K_D), kesirli integratör derecesi (n), filtre kesim frekansı (NN) ve kesirli türev derecesi (λf) olmak üzere altı adet parametreye sahiptir. Her iki bölge için denetleyici parametrelerinin optimizasyonu yapıldığından dolayı her bir güç sistemi için on ikişer adet parametrenin optimizasyonu yapılmıştır. Amaç fonksiyonuna göre en iyi değerleri veren TIDFF denetleyici parametreleri, DOA ile aratılmıştır. Şekil 2.25'te yük frekans kontrolü için TIDFF denetleyicilerin optimizasyonunun blok şeması verilmiştir.



Şekil 2.25. TIDFF denetleyici optimizasyonunun blok şeması

2.2.4.1. İki Bölge Ara Isıtmalı Termal Güç Sisteminde TIDFF Denetleyici Optimizasyonu

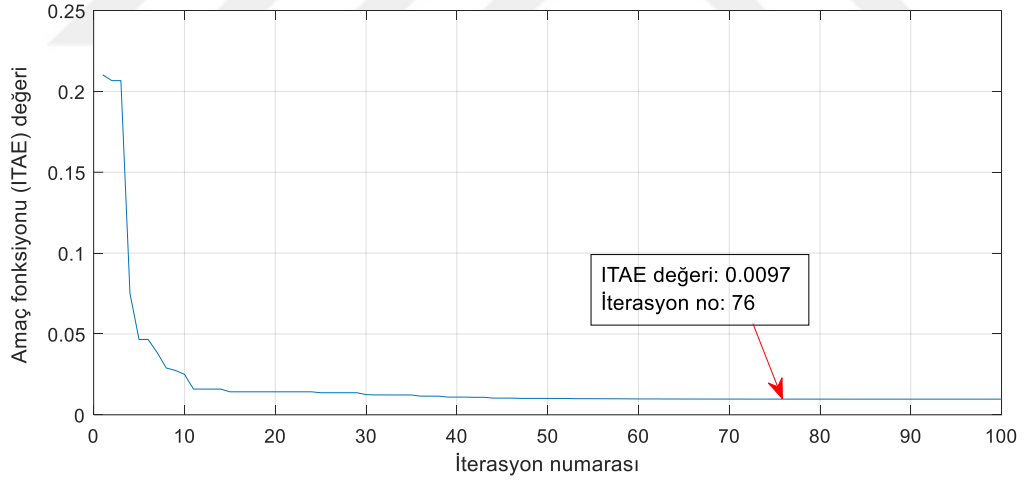
İki bölge ara ısıtmalı termal güç sistemi için K_T , K_I ve K_D parametreleri (0.01,6) aralığında, n ve λf parametreleri (0.01,3) aralığında, NN parametresi (0,300) aralığında aratılmıştır.

Tablo 2.19, iki bölge ara ısıtmalı termal güç sisteminde sadece birinci bölgede yük değişimi olması durumunda bulunan ideal TIDFF denetleyici parametreleri verilmiştir.

Tablo 2.19. İki bölgeli ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ideal TIDFF denetleyici parametreleri

	DOA
K_{T1}	6
K_{I1}	1.9243
K_{D1}	2.0190
n_1	1.9160
λf_1	0.7610
NN_1	6.1489
K_{T2}	5.5233
K_{I2}	0.0366
K_{D2}	3.6493
n_2	2.1494
λf_2	0.2643
NN_2	119.0419

Şekil 2.26'da iki bölgeli ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA ile optimize edilmiş TIDFF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.26. İki bölgeli ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA-TIDFF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi

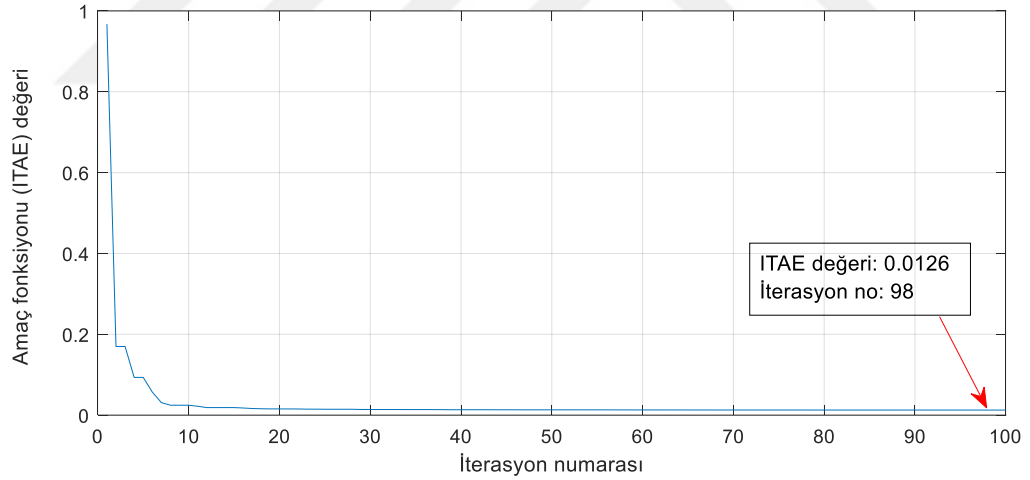
Denetleyici, en iyi ITAE değeri olan 0.0097 değerine 100 iterasyon üzerinden 76. iterasyonda ulaşmıştır.

Tablo 2.20 ile iki bölgeli ara ısıtmalı termal güç sisteminde iki bölgede de yük değişimi olması durumunda bulunan ideal TIDFF denetleyici parametreleri verilmiştir.

Tablo 2.20. İki bölgele ara ısıtılmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için ideal TIDFF denetleyici parametreleri

	DOA
K_{T1}	5.9997
K_{I1}	6
K_{D1}	2.2869
n_1	2.7944
λf_1	0.9136
NN_1	19.7883
K_{T2}	5.9999
K_{I2}	5.9964
K_{D2}	2.2420
n_2	2.7345
λf_2	0.8637
NN_2	16.0938

Şekil 2.27’de iki bölgele ara ısıtılmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için DOA ile optimize edilmiş TIDFF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.27. İki bölgele ara ısıtılmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için DOA-TIDFF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi

Denetleyici, en iyi ITAE değeri olan 0.0126 değerine 100 iterasyon üzerinden 98. iterasyonda ulaşmıştır.

2.2.4.2. İki Bölgele Çok Kaynaklı Güç Sisteminde TIDFF Denetleyici Optimizasyonu

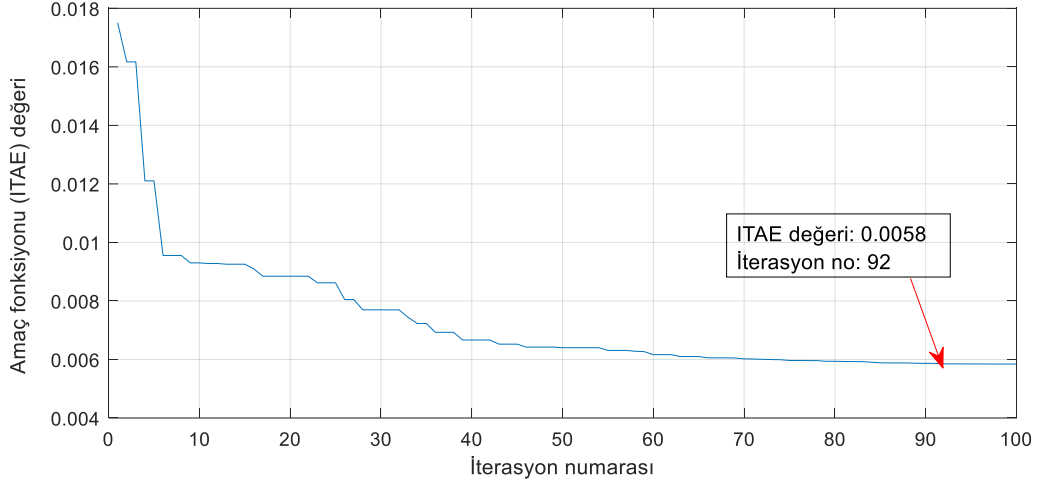
İki bölgele çok kaynaklı güç sistemi için K_T , K_I ve K_D parametreleri (0.01,6) aralığında, n ve λf parametreleri (0.01,3) aralığında, NN parametresi (0,300) aralığında aratılmıştır.

Tablo 2.21, iki bölgele çok kaynaklı güç sisteminde sadece birinci bölgede yük değişimi olması durumunda bulunan ideal TIDFF denetleyici parametreleri verilmiştir.

Tablo 2.21. İki bölgele çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ideal TIDFF denetleyici parametreleri

	DOA
K_{T1}	6
K_{I1}	6
K_{D1}	4.3697
n_1	2.4176
λf_1	0.3406
NN_1	1.1319
K_{T2}	0.0299
K_{I2}	0.2617
K_{D2}	4.8809
n_2	2.6849
λf_2	0.8474
NN_2	289.6864

Şekil 2.28’de iki bölgele çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA ile optimize edilmiş TIDFF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.28. İki bölge çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA-TIDFF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi

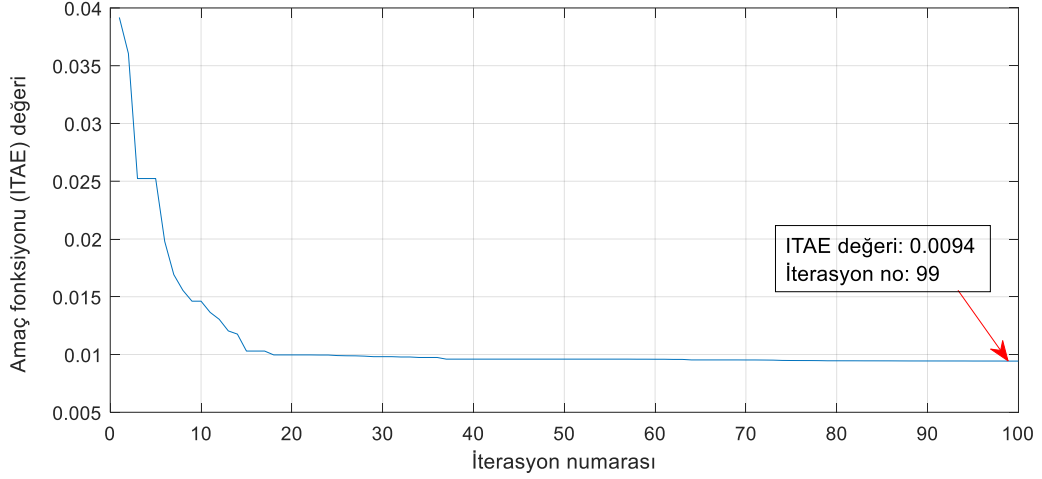
Denetleyici, en iyi ITAE değeri olan 0.0058 değerine 100 iterasyon üzerinden 92. iterasyonda ulaşmıştır.

Tablo 2.22 ile iki bölge çok kaynaklı güç sisteminde iki bölgede de yük değişimi olması durumunda bulunan ideal TIDFF denetleyici parametreleri verilmiştir.

Tablo 2.22. İki bölge çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için ideal TIDFF denetleyici parametreleri

	DOA
K_{T1}	6
K_{I1}	6
K_{D1}	1.7256
n_1	2.9843
λf_1	0.9977
NN_1	36.0735
K_{T2}	6
K_{I2}	5.9950
K_{D2}	2.0920
n_2	3
λf_2	0.2276
NN_2	5.4445

Şekil 2.29’da iki bölge çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ için DOA ile optimize edilmiş TIDFF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.29. İki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için DOA-TIDFF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi

Denetleyici en iyi ITAE değeri olan 0.0094 değerine 100 iterasyon üzerinden 99. iterasyonda ulaşmıştır.

2.2.4.3. Doğrusal Olmayan İki Bölgeli Çok Kaynaklı Güç Sisteminde TIDFF Denetleyici Optimizasyonu

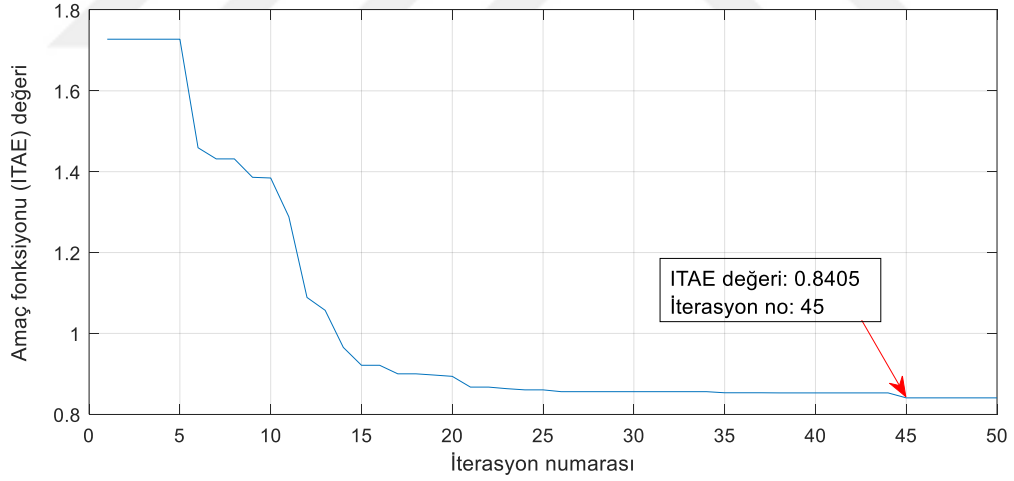
Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sistemi için K_T , K_I ve K_D parametreleri (0,2) aralığında, n parametresi (2,3) aralığında, λf parametresi (0.01,3) aralığında ve NN parametresi (0,300) aralığında aratılmıştır.

Tablo 2.23, doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde sadece birinci bölgede yük değişimi olması durumunda bulunan ideal TIDFF denetleyici parametreleri verilmiştir.

Tablo 2.23. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ideal TIDFF denetleyici parametreleri

	DOA
K_{T1}	2
K_{I1}	1.9984
K_{D1}	1.9901
n_1	2.1546
λf_1	0.5244
NN_1	186.6655
K_{T2}	0.5933
K_{I2}	0.003
K_{D2}	1.9874
n_2	2.9129
λf_2	1.9655
NN_2	198.3093

Şekil 2.30'da doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA ile optimize edilmiş TIDFF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.30. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için DOA-TIDFF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi

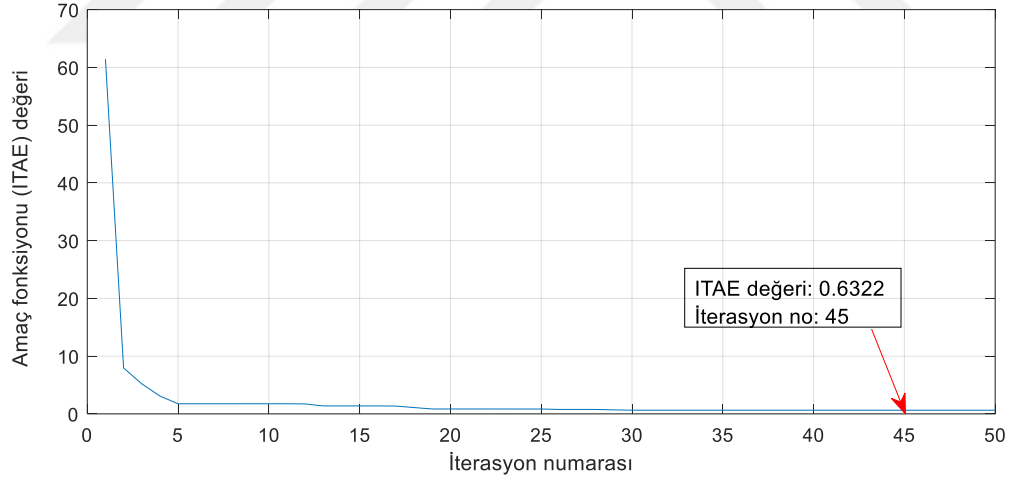
Denetleyici, en iyi ITAE değeri olan 0.8405 değerine 50 iterasyon üzerinden 45. iterasyonda ulaşmıştır.

Tablo 2.24 ile doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde iki bölgede de yük değişimi olması durumunda bulunan ideal TIDFF denetleyici parametreleri verilmiştir.

Tablo 2.24. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için ideal TIDFF denetleyici parametreleri

	DOA
K_{T1}	0.9872
K_{I1}	2
K_{D1}	2
n_1	2.0029
λf_1	0.5004
NN_1	300
K_{T2}	0.9787
K_{I2}	2
K_{D2}	1.9627
n_2	2.1172
λf_2	0.8898
NN_2	280.0012

Şekil 2.31’de doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için DOA ile optimize edilmiş TIDFF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.31. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için DOA-TIDFF denetleyici amaç fonksiyonu değişim eğrisi

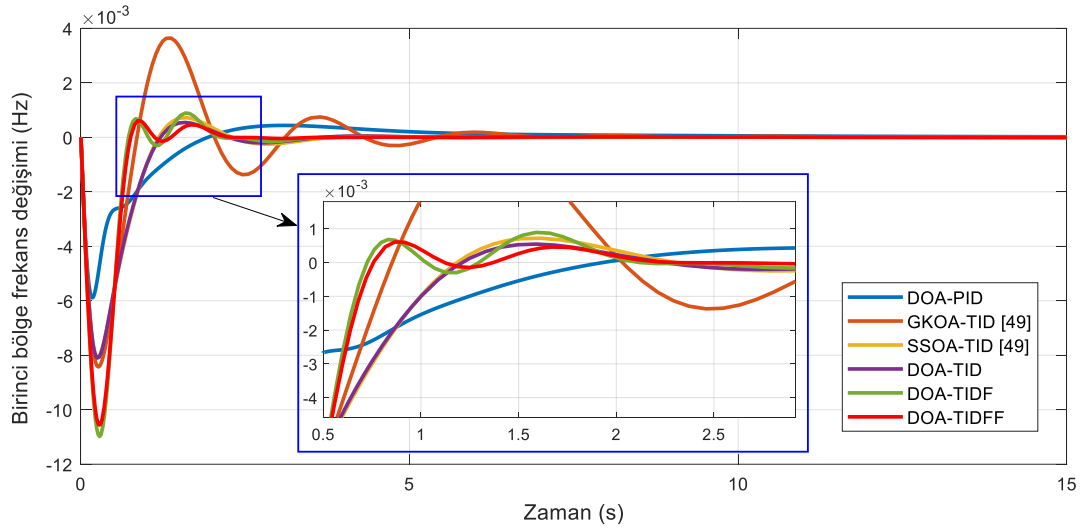
3. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Bu bölümde, önceki bölümde verilen optimize edilmiş denetleyici parametreleri vasıtasıyla üzerinde çalışılan üç farklı güç sisteminin, frekans ve bağlantı hattındaki güç değişimleri için oturma süresi, üst ve alt aşma değerleri gösterilmiştir. Tasarlanmış denetleyiciler aralarında performans açısından karşılaştırılmış, birbirlerine karşı üstünlükleri ortaya konmuştur. Sonuçlar grafikler ve tablolar halinde verilmiştir.

3.1. İki Bölge Ara Isıtmalı Termal Güç Sistemi Benzetim Sonuçları

Simülasyon çalışmaları, yalnızca bir bölgede yük değişimi olması durumu ve iki bölgede de yük değişimi olması durumu için çalıştırılmış, bu iki durum için de denetleyici tasarımları yapılmıştır.

Şekil 3.1’de iki bölge ara ısıtmalı termal güç sisteminde yalnızca birinci bölgede yük değişimi durumu için birinci bölgedeki frekans değişimi grafiği verilmiştir.

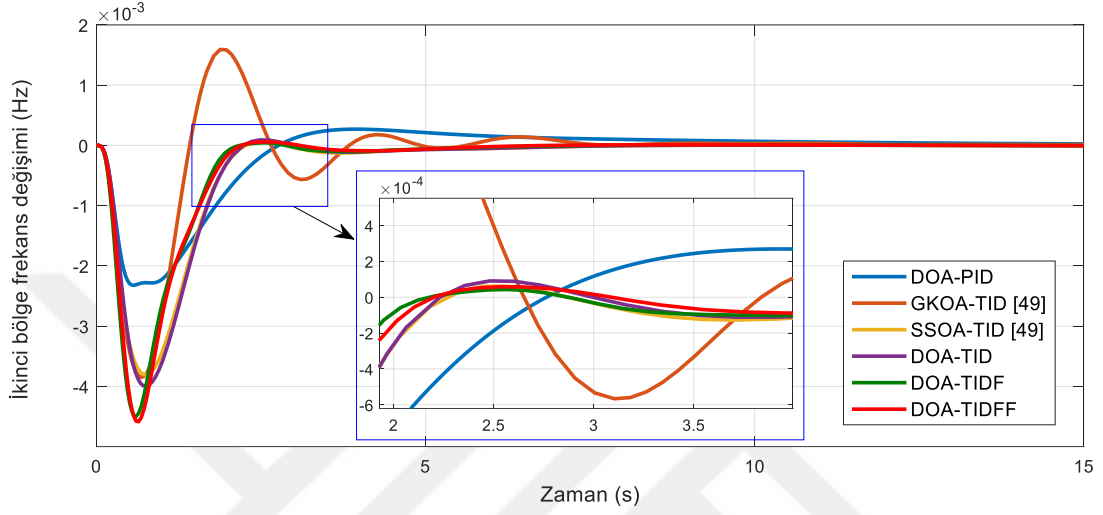


Şekil 3.1. İki bölge ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için birinci bölge frekans değişimi eğrisi

Şekil 3.1’den görüldüğü üzere birinci bölgedeki frekans değişimi için ± 0.0005 bandında en iyi oturma süresi 0.97 saniye ile DOA-TIDFF denetleyiciye aittir. Fakat bu denetleyici birinci bölgedeki frekans değişiminin alt ve üst aşma değerleri bakımından en iyi

performansı gösterememiştir. Birinci bölgedeki frekans değişimi için alt ve üst aşma değerleri bakımından en iyi performansı DOA-PID denetleyici göstermiştir.

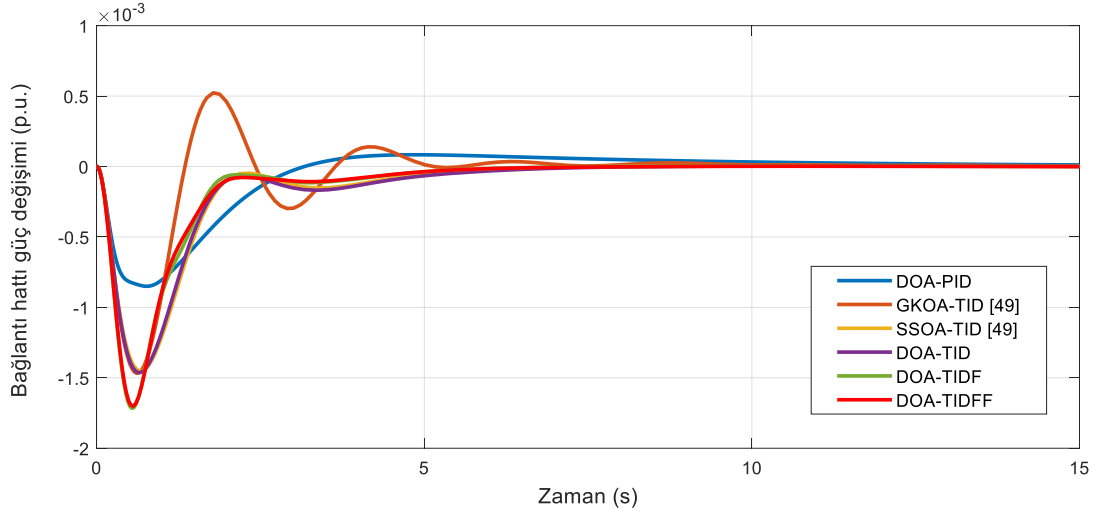
Şekil 3.2’de iki bölgeli ara ısıtılmalı termal güç sisteminde yalnızca birinci bölgede yük değişimi durumu için ikinci bölgedeki frekans değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 3.2. İki bölgeli ara ısıtılmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ikinci bölge frekans değişimi eğrisi

İkinci bölgedeki frekans değişimi için ± 0.0005 bandında en iyi oturma süresi 1.74 saniye ile DOA-TIDF denetleyiciye aittir. Alt aşma değeri için en iyi performansı DOA-PID gösterirken üst aşma için en iyi performansı DOA-TIDF göstermiştir.

Şekil 3.3’te iki bölgeli ara ısıtılmalı termal güç sisteminde yalnızca birinci bölgede yük değişimi durumu bağlantı hattındaki güç değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 3.3. İki bölgeci ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için bağlantı hattı güç değişimi eğrisi

Bağlantı hattındaki güç değişimi için ± 0.0005 bandında en iyi oturma süresi 1.33 saniye ile DOA-TIDFF denetleyiciye aittir. Alt aşma değeri için en iyi performansı DOA-PID gösterirken üst aşma için en iyi performansı DOA-TIDFF göstermiştir.

Tablo 3.1’de iki bölgeci ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için tasarlanan denetleyicilerin grafiklerinden elde edilen performans değerleri verilmiştir.

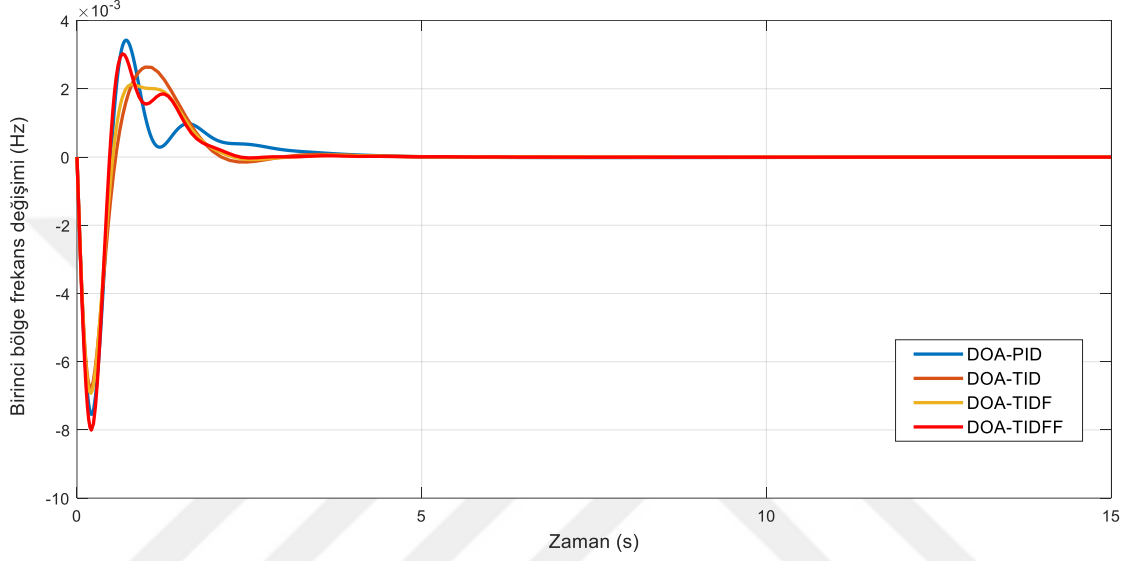
Tablo 3.1. İki bölgeci ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için $\Delta P_{L2} = 0$ için tasarlanan denetleyicilerin performansları

		DOA-PID	GKOA-TID [49]	SSOA-TID [49]	DOA-TID	DOA-TIDF	DOA-TIDFF
Oturma Süresi (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	0.000043	0.000058
	ΔP_{tie12}	0.000084	0.0005	0.000004	0.0000046	0.0000036	0.0000019
ITAE		0.02875	0.0269	0.01275	0.01257	0.01008	0.0097

Oturma süresi bakımından DOA-TIDFF iyi bir performans gösterirken, alt aşma değeri için DOA-PID diğer denetleyicilere üstünlük sağlamıştır. Birinci bölgedeki frekans değişiminin üst aşma değeri için DOA-PID, ikinci bölgedeki frekans değişiminin üst aşma

değeri için DOA-TIDF ve bağlantı hattındaki güç değişiminin üst aşma değeri için ise DOA-TIDFF en iyi performansları göstermişlerdir. En iyi ITAE değerine (0.0097), DOA-TIDFF denetleyici ulaşmıştır.

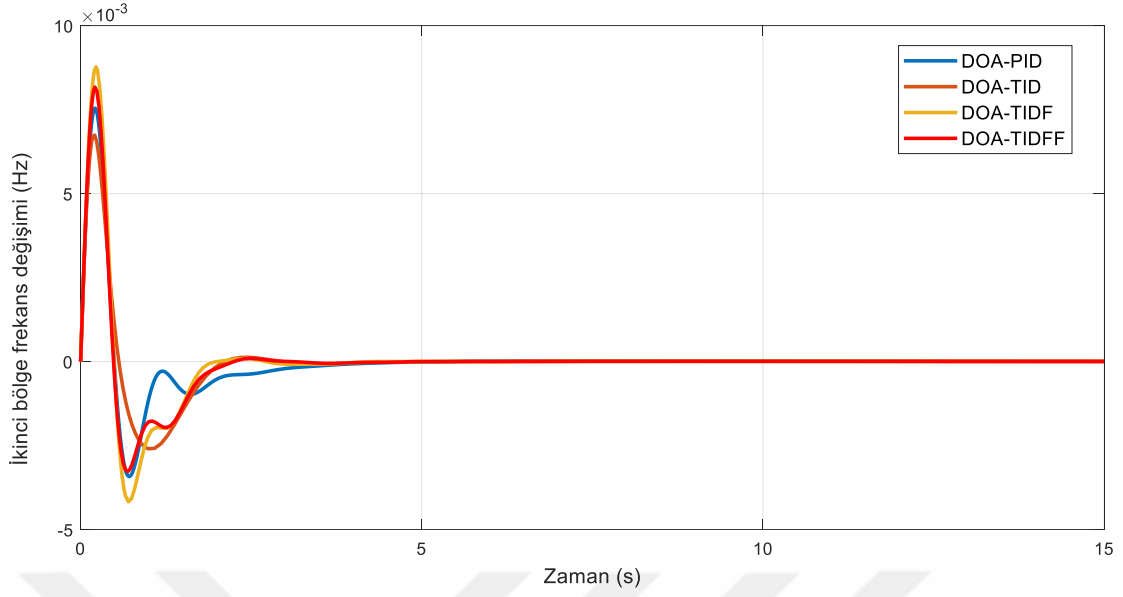
Şekil 3.4'te iki bölgeli ara ısıtmalı termal güç sisteminde iki bölgede de yük değişimi olması durumu için denetleyicilerin birinci bölgedeki frekans değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 3.4. İki bölgeli ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için birinci bölge frekans değişimi eğrisi

Birinci bölgedeki frekans değişimi için ± 0.0005 bandında en iyi oturma süresi 1.77 saniye ile DOA-TIDFF denetleyiciye aittir. Birinci bölgedeki frekans değişiminin alt aşma değerinde en iyi performans gösteren denetleyici DOA-TID olurken, üst aşma değeri için en iyi denetleyici DOA-TIDF olmuştur.

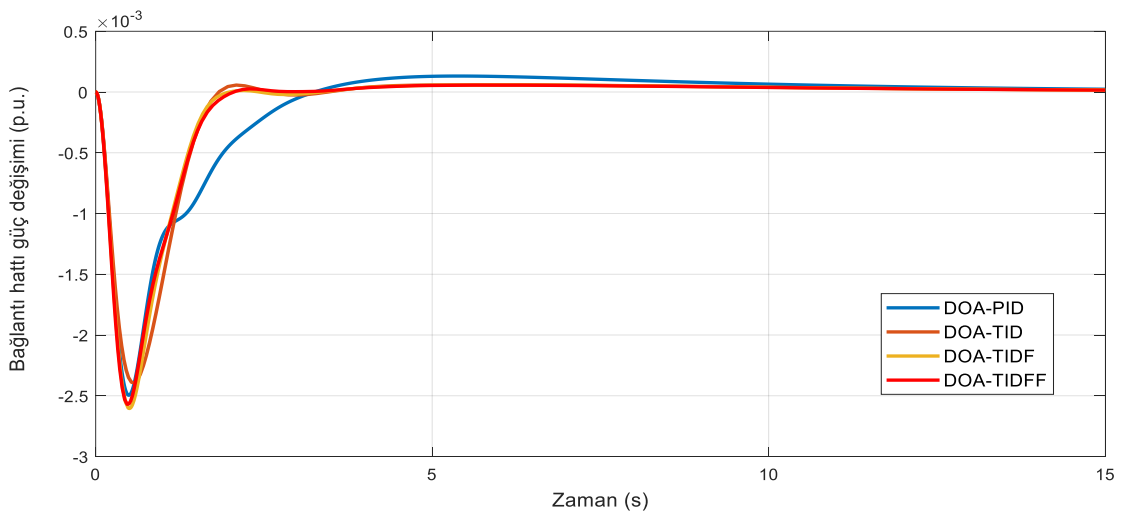
Şekil 3.5'te iki bölgeli ara ısıtmalı termal güç sisteminde iki bölgede de yük değişimi olması durumu için denetleyicilerin ikinci bölgedeki frekans değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 3.5. İki bölgeci ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için ikinci bölge frekans değişimi eğrisi

İkinci bölgedeki frekans değişimi için ± 0.0005 bandında en iyi oturma süresi 1.68 saniye ile DOA-TIDF denetleyiciye aittir. İkinci bölgedeki frekans değişiminin alt aşma ve üst aşma değerlerinin ikisinde de DOA-TID en iyi performansı göstermiştir.

Şekil 3.6'da iki bölgeci ara ısıtmalı termal güç sisteminde iki bölgede de yük değişimi olması durumu için denetleyicilerin bağlantı hattı güç değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 3.6. İki bölgeci ara ısıtmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için bağlantı hattı güç değişimi eğrisi

Bağlantı hattındaki güç değişimi için ± 0.0005 bandında en iyi oturma süresi 1.38 saniye ile DOA-TIDF denetleyiciye aittir. Alt aşma değeri için en iyi performansı DOA-TID gösterirken üst aşma için en iyi performansı DOA-TIDFF göstermiştir.

Tablo 3.2’de iki bölgeli ara ısıtılmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için tasarlanan denetleyicilerin grafiklerinden elde edilen performans değerleri verilmiştir.

Tablo 3.2. İki bölgeli ara ısıtılmalı termal güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için tasarlanan denetleyicilerin performansları

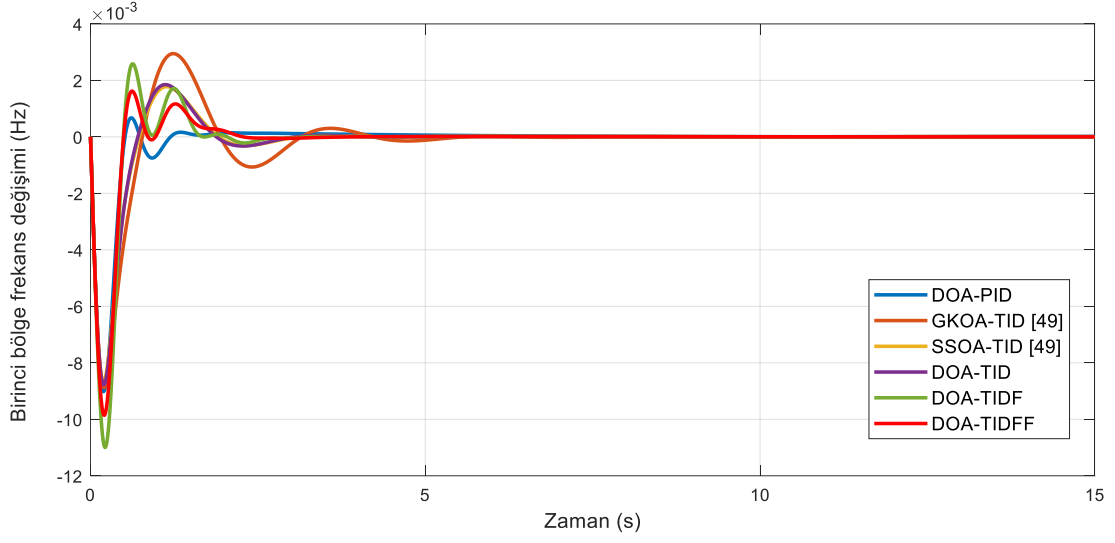
		DOA-PID	DOA-TID	DOA-TIDF	DOA-TIDFF
Oturma Süresi (s) ± 0.0005 bant	Δf_1	2.03	1.82	1.81	1.77
	Δf_2	2.03	1.82	1.68	1.76
	ΔP_{tie12}	1.9	1.41	1.38	1.40
Alt Aşma Değerleri	Δf_1	-0.0075	-0.0067	-0.0069	-0.008
	Δf_2	-0.0034	-0.0026	-0.0041	-0.0032
	ΔP_{tie12}	-0.0025	-0.0024	-0.0026	-0.0025
Üst Aşma Değerleri	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

Oturma süresi bakımından genel olarak DOA-TIDF ve DOA-TIDFF denetleyiciler iyi performans ortaya koymuştur. Alt aşma değerleri için DOA-TID denetleyici en iyi denetleyici olurken birinci bölgedeki frekans değişiminin alt aşması için DOA-TIDF, ikinci bölgedeki frekans değişiminin alt aşması için DOA-TID ve bağlantı hattındaki güç değişiminin alt aşması için DOA-TIDFF en iyi performansları göstermişlerdir. En iyi ITAE değerine (0.0126), DOA-TIDFF denetleyici ulaşmıştır.

3.2. İki Bölgeli Çok Kaynaklı Güç Sistemi Benzetim Sonuçları

Simülasyon çalışmaları, yalnızca bir bölgede yük değişimi olması durumu ve iki bölgede de yük değişimi olması durumu için çalıştırılmış, bu iki durum için de denetleyici tasarımları yapılmıştır.

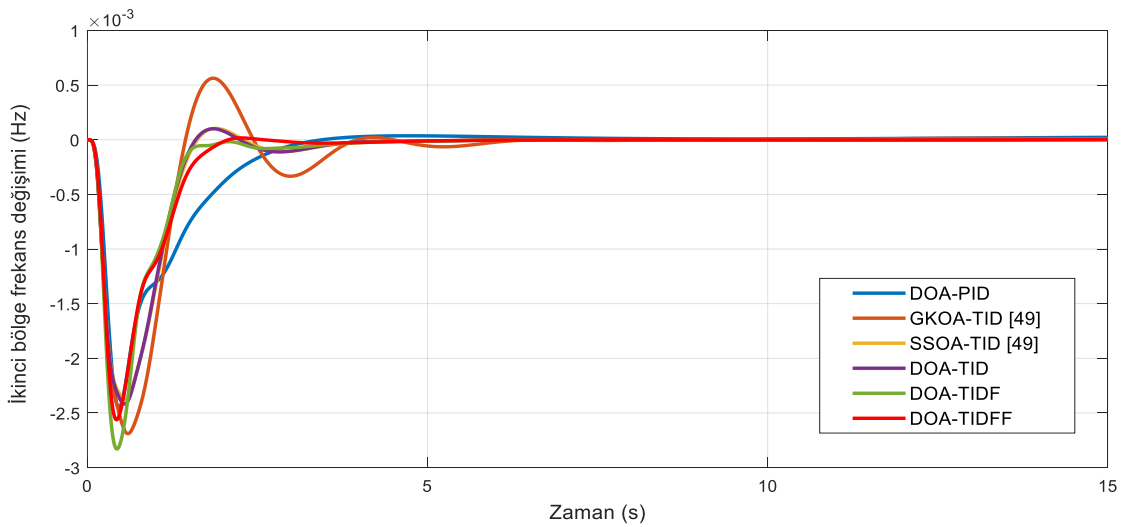
Şekil 3.7’de iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde yalnızca birinci bölgede yük değişimi durumu için birinci bölgedeki frekans değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 3.7. İki bölge çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için birinci bölge frekans değişimi eğrisi

Birinci bölgedeki frekans değişimi için ± 0.0005 bandında en iyi oturma süresi 1.05 saniye ile DOA-PID denetleyiciye aittir. Birinci bölgedeki frekans değişiminin alt aşma değerinde en iyi performans gösteren denetleyici SSOA-TID olurken, üst aşma değeri için en iyi denetleyici DOA-PID olmuştur.

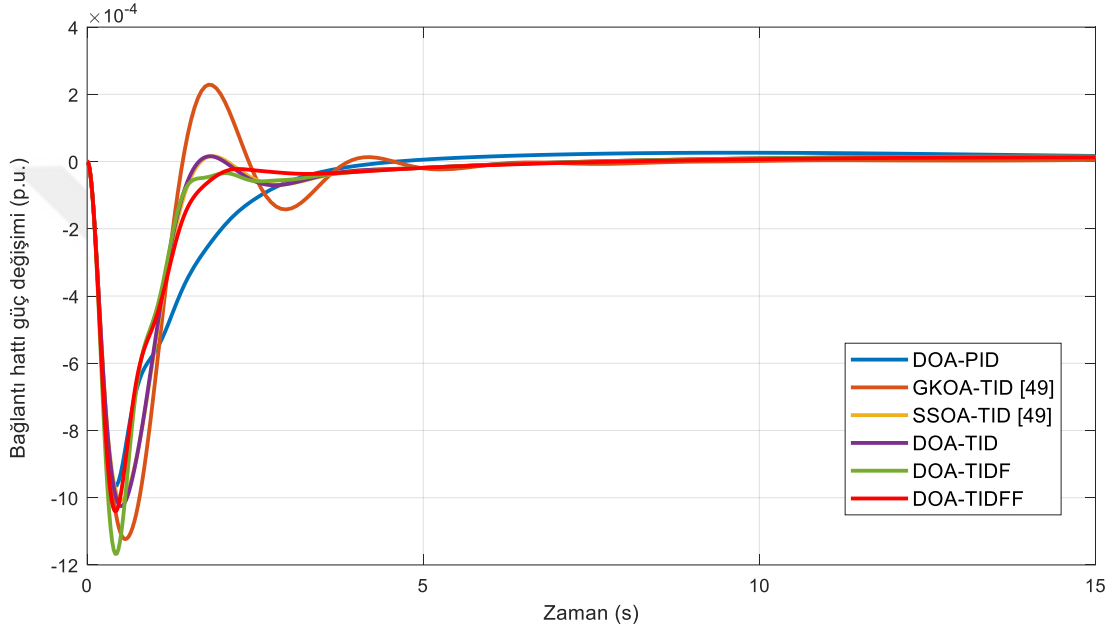
Şekil 3.8’de iki bölge çok kaynaklı güç sisteminde yalnızca birinci bölgede yük değişimi durumu için ikinci bölgedeki frekans değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 3.8. İki bölge çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ikinci bölge frekans değişimi eğrisi

İkinci bölgedeki frekans değişimi için ± 0.0005 bandında en iyi oturma süresi 1.29 saniyedir. Hem DOA-TID hem de SSOA-TID aynı oturma süresine sahiptir. Alt aşma değeri için en iyi performansı SSOA-TID gösterirken üst aşma için en iyi performansı DOA-TIDF göstermiştir.

Şekil 3.9’da iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde yalnızca bir bölgede yük değişimi olması durumu için denetleyicilerin bağlantı hattı güç değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 3.9. İki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için bağlantı hattı güç değişimi eğrisi

Bağılantı hattındaki güç değişimi için ± 0.0005 bandında en iyi oturma süresi 0.94 saniye ile DOA-TIDF denetleyiciye aittir. Alt aşma değeri için en iyi performansı DOA-PID gösterirken üst aşma için en iyi performansı DOA-TIDFF göstermiştir.

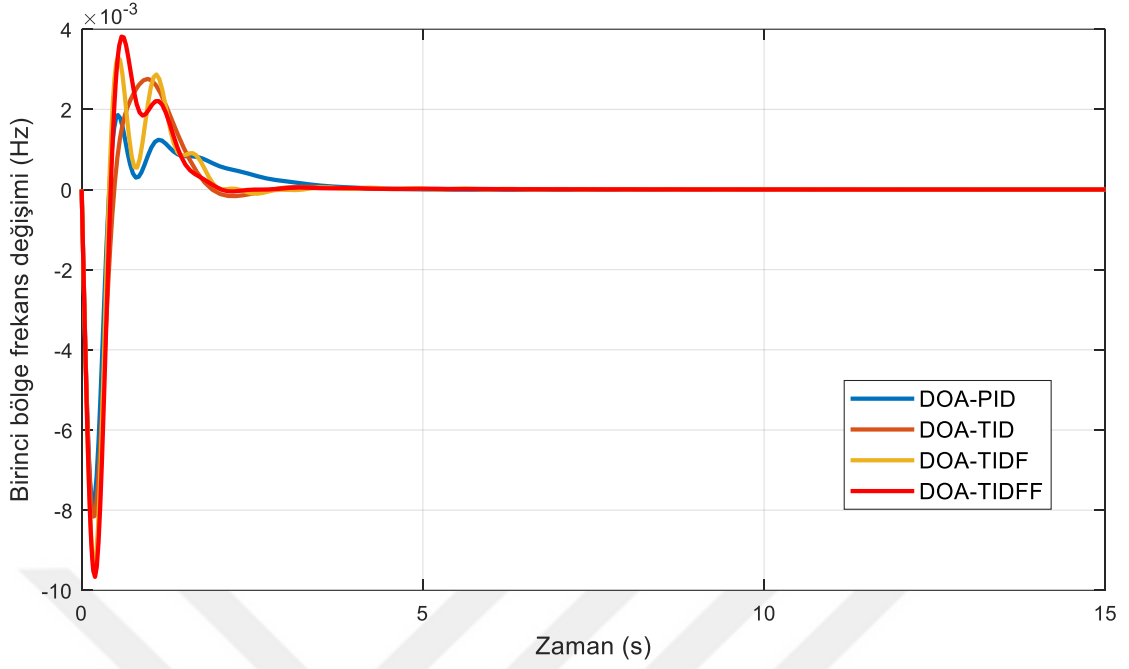
Tablo 3.3’te iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için tasarlanan denetleyicilerin grafiklerinden elde edilen performans değerleri verilmiştir.

Tablo 3.3. İki bölgele çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için tasarlanan denetleyicilerin performansları

		DOA-PID	GKOA-TID [49]	SSOA-TID [49]	DOA-TID	DOA-TIDF	DOA-TIDFF
Oturma Süresi (s) ± 0.0005 bant	Δf_1	1.05	2.86	1.69	1.67	1.51	1.56
	Δf_2	1.83	2.01	1.29	1.29	1.28	1.35
	ΔP_{tie12}	1.18	1.09	1.04	1.04	0.94	0.97
Alt Aşma Değerleri	Δf_1	-0.009	-0.0087	-0.0085	-0.0087	-0.01	-0.0098
	Δf_2	-0.0024	-0.0026	-0.0023	-0.0024	-0.0028	-0.0025
	ΔP_{tie12}	-0.00096	-0.0011	-0.001	-0.001	-0.0011	-0.001
Üst Aşma Değerleri	Δf_1	0.00067	0.0029	0.0017	0.0018	0.0025	0.0016
	Δf_2	0.000036	0.000564	0.000104	0.0001	0.0000016	0.000016
	ΔP_{tie12}	0.000026	0.000229	0.000016	0.000015	0.000014	0.000012
ITAE		0.1100	0.0138	0.0075	0.0075	0.0066	0.0058

Birinci bölgedeki frekans değişiminin en iyi oturma süresi DOA-PID, ikinci bölgedeki frekans değişiminin en iyi oturma süresi DOA-TID ve SSOA-TID, bağlantı hattındaki güç değişiminin en iyi oturma süresi ise DOA-TIDF tarafından sağlanmıştır. Birinci ve ikinci bölgedeki frekans değişimlerinin en iyi alt aşma değerlerini bulan denetleyici SSOA-TID olurken bağlantı hattındaki gücün değişiminin en iyi alt aşma değerini bulan denetleyici DOA-PID olmuştur. Birinci bölgedeki frekans değişiminin en iyi üst aşma değerini DOA-PID, ikinci bölgedeki frekans değişiminin en iyi üst aşma değerini DOA-TIDF, bağlantı hattındaki gücün değişiminin en iyi üst aşma değerini ise DOA-TIDFF bulmuştur. En iyi ITAE değerine (0.0058), DOA-TIDFF denetleyici ulaşmıştır.

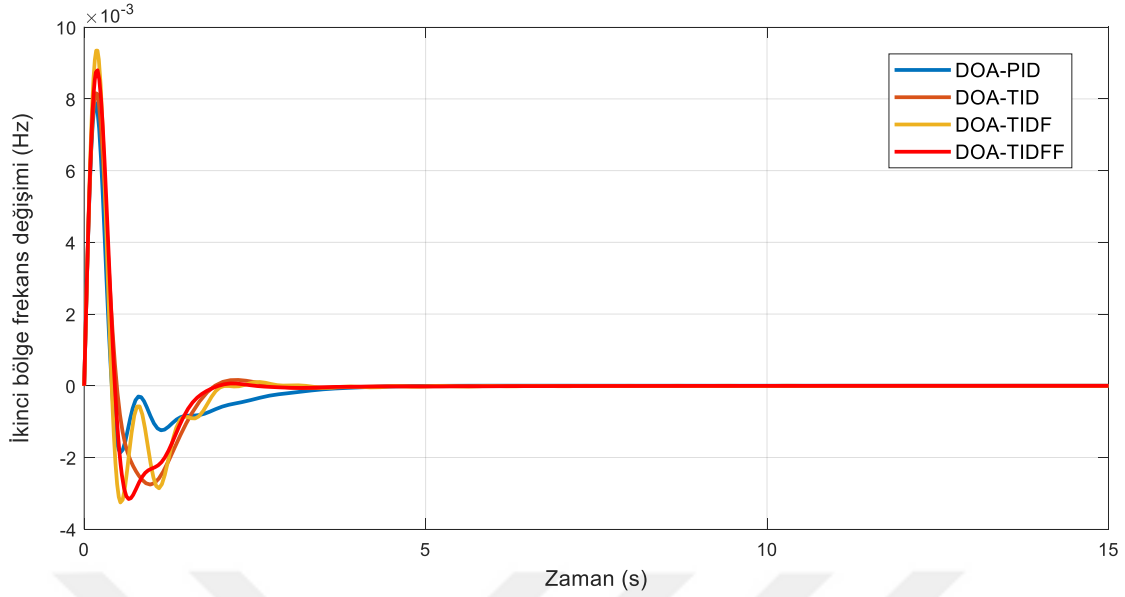
Şekil 3.10'da iki bölgele çok kaynaklı güç sisteminde iki bölgede de yük değişimi olması durumu için denetleyicilerin birinci bölgedeki frekans değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 3.10. İki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için birinci bölge frekans değişimi eğrisi

Birinci bölgedeki frekans değişimi için ± 0.0005 bandında en iyi oturma süresi 1.57 saniye ile DOA-TIDFF denetleyiciye aittir. Birinci bölgedeki frekans değişiminin alt aşma ve üst aşma değerlerinde en iyi performans gösteren denetleyici DOA-PID olmuştur.

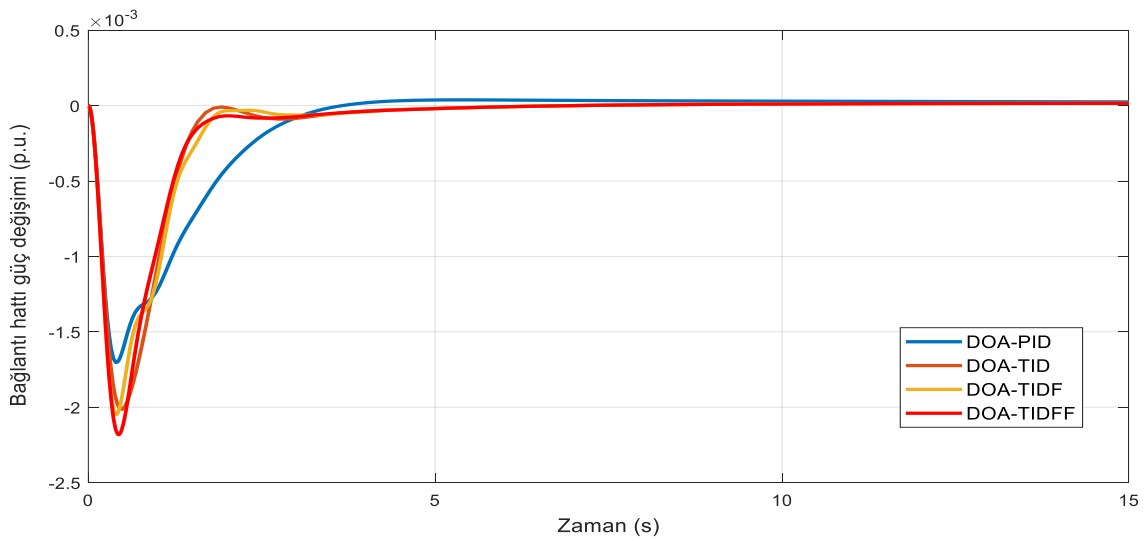
Şekil 3.11’de iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde iki bölgede de yük değişimi olması durumu için ikinci bölgedeki frekans değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 3.11. İki bölge çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için ikinci bölge frekans değişimi eğrisi

İkinci bölgedeki frekans değişimi için ± 0.0005 bandında en iyi oturma süresi 1.58 saniye ile DOA-TIDFF denetleyiciye aittir. İkinci bölgedeki frekans değişiminin alt aşma ve üst aşma değerlerinde en iyi performans gösteren denetleyici DOA-PID olmuştur.

Şekil 3.12’de iki bölge çok kaynaklı güç sisteminde iki bölgede de yük değişimi olması durumu için bağlantı hattındaki güç değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 3.12. İki bölge çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için bağlantı hattı güç değişimi eğrisi

Bağlantı hattındaki güç değişimi için ± 0.0005 bandında en iyi oturma süresi 1.23 saniye ile DOA-TIDFF denetleyiciye aittir. Bağlantı hattındaki güç değişiminin alt aşma değerinde en iyi performans gösteren denetleyici DOA-PID, üst aşma değerinde ise DOA-TID, DOA-TIDF ve DOA-TIDFF denetleyiciler en iyi performansı göstermişlerdir.

Tablo 3.4'te iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için tasarlanan denetleyicilerin grafiklerinden elde edilen performans değerleri verilmiştir.

Tablo 3.4. İki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.015$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.015$ p.u. için tasarlanan denetleyicilerin performansları

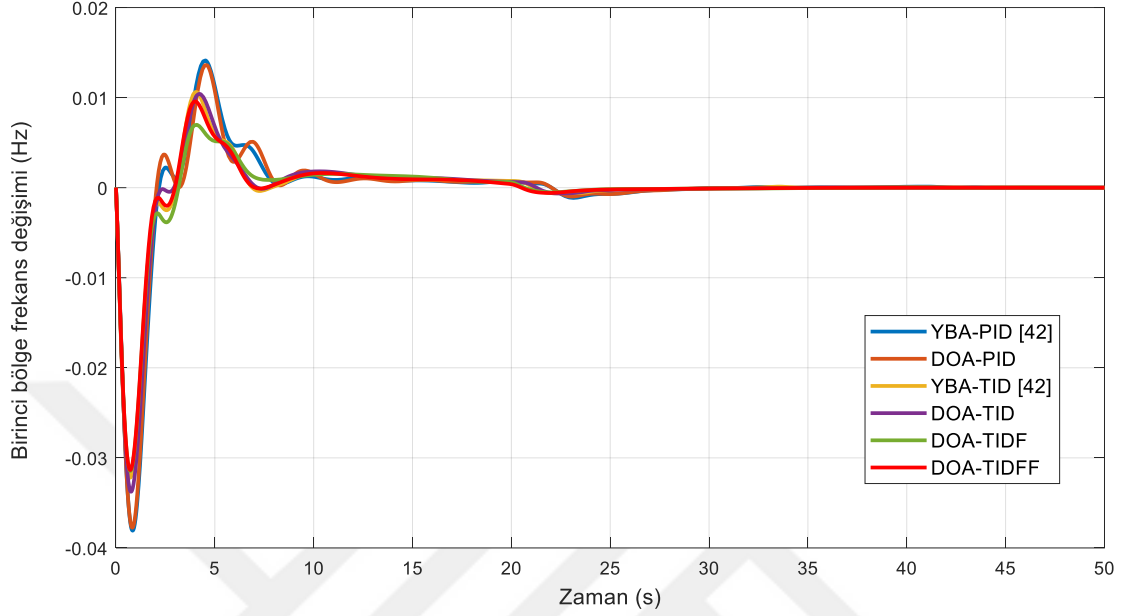
		DOA-PID	DOA-TID	DOA-TIDF	DOA-TIDFF
Oturma Süresi (s) ± 0.0005 bant	Δf_1	2.2	1.67	1.82	1.59
	Δf_2	2.2	1.67	1.82	1.58
	ΔP_{tie12}	1.86	1.26	1.29	1.23
Alt Aşma Değerleri	Δf_1	-0.008	-0.0082	-0.0094	-0.0096
	Δf_2	-0.0019	-0.0027	-0.0032	-0.0031
	ΔP_{tie12}	-0.0017	-0.002	-0.002	-0.0021
Üst Aşma Değerleri	Δf_1	0.0019	0.0027	0.0033	0.0038
	Δf_2	0.008	0.0081	0.0093	0.0088
	ΔP_{tie12}	0.000037	0.000015	0.000015	0.000015
ITAE		0.0125	0.0100	0.0094	0.0094

Birinci bölgedeki frekans değişimi, ikinci bölgedeki frekans değişimi ve bağlantı hattındaki güç değişimi için en iyi oturma süresi değerine DOA-TIDFF ulaşmıştır. Bağlantı hattındaki güç değişiminin en iyi üst aşma değeri DOA-TID, DOA-TIDF ve DOA-TIDFF tarafından bulunsa da diğer bütün aşma değerleri için DOA-PID denetleyici en iyi değerleri bulmuştur. En iyi ITAE değerine (0.0094) ise DOA-TIDF ve DOA-TIDFF denetleyiciler ulaşmıştır. DOA-TIDFF, DOA-TIDF denetleyiciye sadece oturma süreleri ve ikinci bölgedeki frekans değişiminin alt ve üst aşma değerlerinde üstünlük kurabilmiştir.

3.3. Doğrusal Olmayan İki Bölgeli Çok Kaynaklı Güç Sistemi Benzetim Sonuçları

Simülasyon çalışmaları, yalnızca bir bölgede yük değişimi olması durumu ve iki bölgede de yük değişimi olması durumu için çalıştırılmış, bu iki durum için de denetleyici tasarımları yapılmıştır.

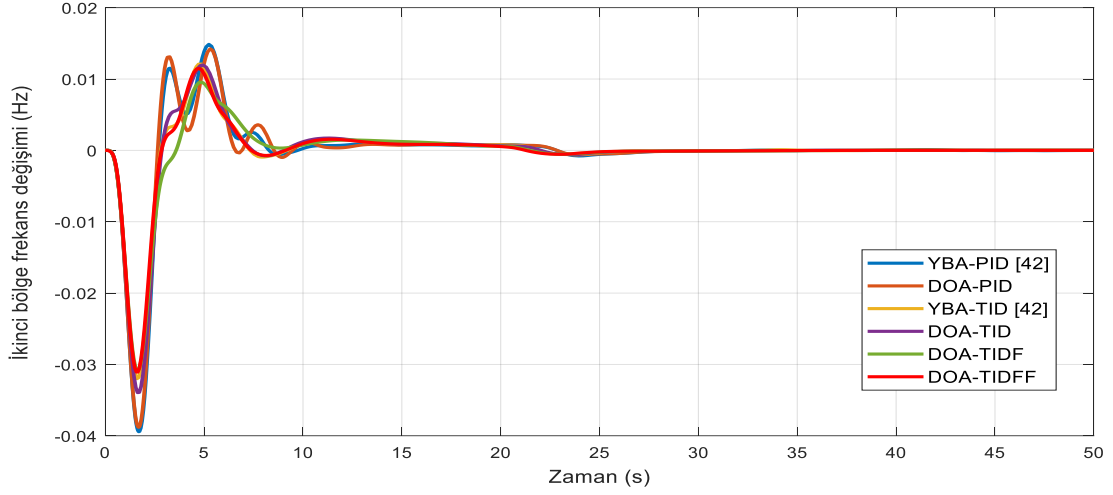
Şekil 3.13'te doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde yalnızca birinci bölgede yük değişimi durumu için birinci bölgedeki frekans değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 3.13. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için birinci bölge frekans değişimi eğrisi

Birinci bölgedeki frekans değişimi için ± 0.0002 bandında en iyi oturma süresi 23.54 saniye ile DOA-TID denetleyiciye aittir. Birinci bölgedeki frekans değişiminin alt aşma değerinde en iyi performans gösteren denetleyiciler DOA-TIDF ve DOA-TIDFF olurken, üst aşma değeri için en iyi denetleyici tek başına DOA-TIDF olmuştur.

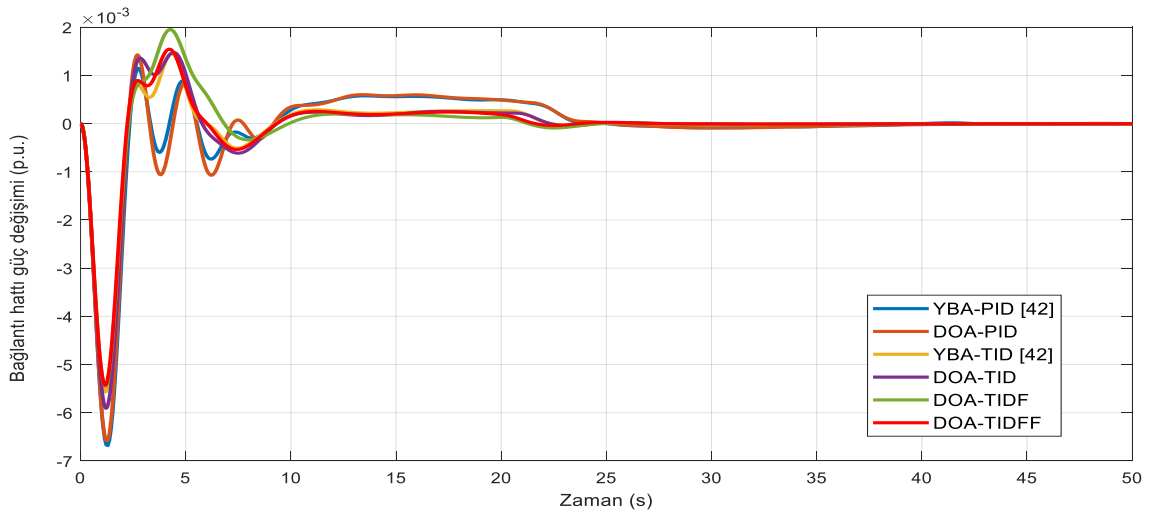
Şekil 3.14'te doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde yalnızca birinci bölgede yük değişimi durumu için ikinci bölgedeki frekans değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 3.14. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için ikinci bölge frekans değişimi eğrisi

İkinci bölgedeki frekans değişimi için ± 0.0002 bandında en iyi oturma süresi 24.24 saniye ile DOA-TID denetleyiciye aittir. İkinci bölgedeki frekans değişiminin alt aşma değerinde en iyi performans gösteren denetleyiciler DOA-TIDF ve DOA-TIDFF olurken, üst aşma değeri için en iyi denetleyici tek başına DOA-TIDF olmuştur.

Şekil 3.15'te doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde yalnızca bir bölgede yük değişimi olması durumu için denetleyicilerin bağlantı hattı güç değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 3.15. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için bağlantı hattı güç değişimi eğrisi

Bağlantı hattındaki güç değişimi için ± 0.0002 bandında en iyi oturma süresi 8.11 saniye ile DOA-TID denetleyiciye aittir. Alt aşma değeri için en iyi performansı DOA-TIDFF gösterirken üst aşma için en iyi performansı DOA-PID göstermiştir.

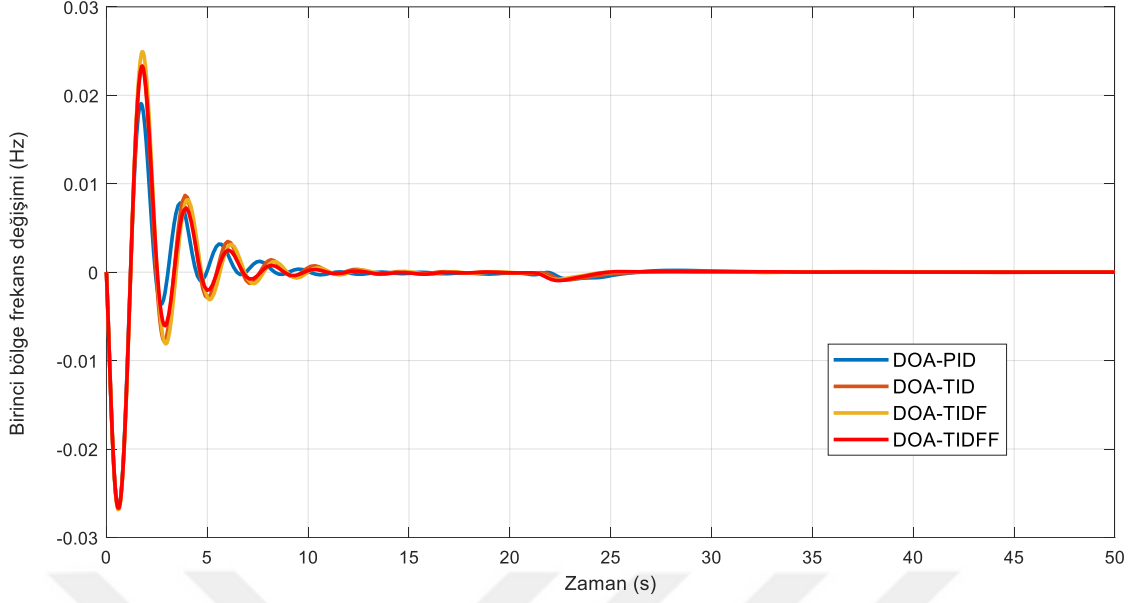
Tablo 3.5'te doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için tasarlanan denetleyicilerin grafiklerinden elde edilen performans değerleri verilmiştir.

Tablo 3.5. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = 0$ için tasarlanan denetleyicilerin performansları

		YBA-PID [42]	DOA-PID	YBA-TID [42]	DOA-TID	DOA-TIDF	DOA-TIDFF
Oturma Süresi (s) ± 0.0002 bant	Δf_1	29.14	28.3	26.8	23.54	24.42	25
	Δf_2	28.45	27.39	26.73	24.24	25.32	25.01
	ΔP_{tie12}	23.65	22.76	21.95	8.11	9	8.74
Alt Aşma Değerleri	Δf_1	-0.0396	-0.0377	-0.0346	-0.033	-0.031	-0.031
	Δf_2	-0.0411	-0.0388	-0.0325	-0.033	-0.031	-0.031
	ΔP_{tie12}	-0.007	-0.0065	-0.0058	-0.0059	-0.0055	-0.0054
Üst Aşma Değerleri	Δf_1	0.015	0.013	0.0109	0.01	0.007	0.0095
	Δf_2	0.0167	0.0142	0.0126	0.012	0.0095	0.0115
	ΔP_{tie12}	0.0021	0.0014	0.0016	0.0015	0.0019	0.0015
ITAE		1.3589	1.0914	1.0996	0.9567	0.9021	0.8405

Birinci bölgedeki frekans ve ikinci bölgedeki frekans değişimleri ile bağlantı hattındaki gücün değişiminin oturma sürelerinin hepsinde en başarılı denetleyici DOA-TID olmuştur. DOA-TID denetleyicinin bağlantı hattındaki gücün değişiminin oturma süresini YBA-TID denetleyiciye göre neredeyse üçte biri değerine indirebilmesi kayda değerdir. Birinci ve ikinci bölgedeki frekans değişimlerinin en iyi alt aşma değerlerini bulan denetleyiciler DOA-TIDF ve DOA-TIDFF olurken bağlantı hattındaki gücün değişiminin en iyi alt aşma değerini bulan denetleyici DOA-TIDFF olmuştur. Birinci ve ikinci bölgedeki frekans değişiminin en iyi üst aşma değerlerini DOA-TIDF, bağlantı hattındaki gücün değişiminin en iyi üst aşma değerini ise DOA-PID bulmuştur. En iyi ITAE değerine (0.8405), DOA-TIDFF denetleyici ulaşmıştır.

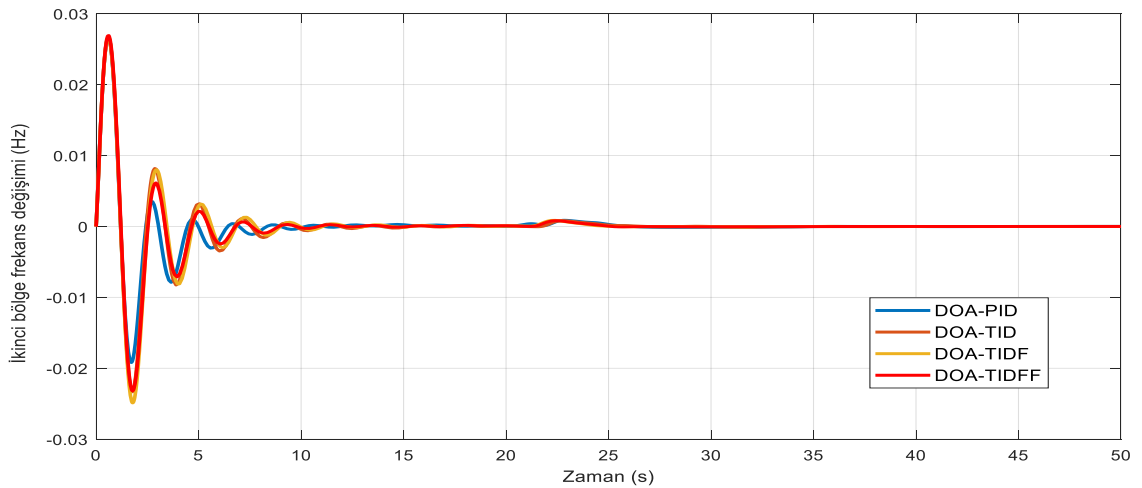
Şekil 3.16'da doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde iki bölgede de yük değişimi olması durumu için denetleyicilerin birinci bölgedeki frekans değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 3.16. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için birinci bölge frekans değişimi eğrisi

Birinci bölgedeki frekans değişimi için ± 0.0002 bandında en iyi oturma süresi 24.09 saniye ile DOA-TIDF denetleyiciye aittir. Bütün denetleyiciler alt aşma değerini aynı bulmuşlardır. Üst aşma değerinde ise DOA-PID denetleyici daha üstündür.

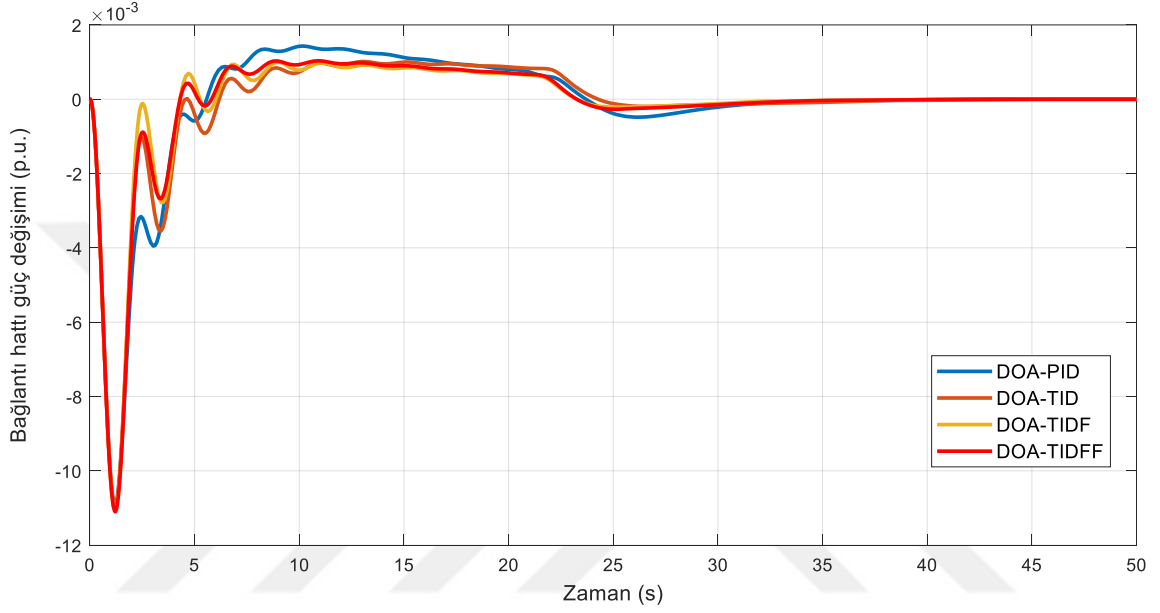
Şekil 3.17’de doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde iki bölgede de yük değişimi olması durumu için ikinci bölgedeki frekans değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 3.17. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için ikinci bölge frekans değişimi eğrisi

İkinci bölgedeki frekans değişimi için ± 0.0002 bandında en iyi oturma süresi 24.13 saniye ile DOA-TIDF denetleyiciye aittir. İkinci bölgedeki frekans değişiminin alt aşma ve üst aşma değerlerinde en iyi performans gösteren denetleyici DOA-PID olmuştur.

Şekil 3.18’de doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde iki bölgede de yük değişimi olması durumu için bağlantı hattındaki güç değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 3.18. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için bağlantı hattı güç değişimi eğrisi

Bağlantı hattındaki güç değişimi için ± 0.0002 bandında en iyi oturma süresi 23.57 saniye ile DOA-TID denetleyiciye aittir. Bağlantı hattındaki güç değişiminin alt aşma değerinde bütün denetleyiciler aynı performansı gösterirken, üst aşma değerinde ise DOA-TIDF denetleyici en iyi performansı göstermiştir.

Tablo 3.6’da doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için tasarlanan denetleyicilerin grafiklerinden elde edilen performans değerleri verilmiştir.

Tablo 3.6. Doğrusal olmayan iki bölgeli çok kaynaklı güç sisteminde $\Delta P_{L1} = 0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ p.u. için tasarlanan denetleyicilerin performansları

		DOA-PID	DOA-TID	DOA-TIDF	DOA-TIDFF
Oturma Süresi (s) ± 0.0002 bant	Δf_1	25.56	24.97	24.09	24.27
	Δf_2	25.23	24.98	24.13	24.49
	ΔP_{tie12}	30.2	23.57	26.25	28.17
Alt Aşma Değerleri	Δf_1	-0.0266	-0.0266	-0.0269	-0.0266
	Δf_2	-0.019	-0.023	-0.025	-0.023
	ΔP_{tie12}	-0.011	-0.011	-0.011	-0.011
Üst Aşma Değerleri	Δf_1	0.019	0.023	0.025	0.023
	Δf_2	0.0266	0.0266	0.0267	0.0269
	ΔP_{tie12}	0.0014	0.0017	0.00099	0.001
ITAE		0.7585	0.7147	0.6568	0.6322

Birinci ve ikinci bölgedeki frekans değişimi için en iyi oturma süresini DOA-TIDF denetleyici elde etmiştir. Bağlantı hattındaki güç değişiminin en iyi oturma süresini ise DOA-TID elde etmiştir. İki denetleyicinin oturma süresi arasında 2.68 saniye gibi bir fark mevcuttur. Diğer güç sistemlerine göre nispeten daha karmaşık olan bu güç sisteminde basit yapıli denetleyicilerin daha verimli olduğu gözlemlenmiştir. En iyi ITAE değeri olan 0.6322 değerine diğer denetleyicilerden daha karmaşık yapıli olan DOA-TIDFF ulaşmıştır fakat oturma süresi konusunda diğer denetleyiciler daha verimlidir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma dahilinde ara ısıtmalı termal güç sistemi, çok kaynaklı güç sistemi ve doğrusal olmayan çok kaynaklı güç sistemi modellenmiş, bu güç sistemlerinin yük frekans kontrolünü yapmaya uygun denetleyiciler tasarlanmıştır. PID, TID, TIDF ve TIDFF denetleyiciler DOA ile optimize edilip bu üç güç sisteminin kontrolü için kullanılmıştır. Yalnızca birinci bölgede yük değişimi olması durumu ile iki bölgede de yük değişimi olması durumu üç güç sistemi için de göz önüne alınmış, bu varyasyonlarla birlikte toplam 24 adet denetleyicinin optimizasyonu yapılmıştır.

Literatürde bulunan çalışmalardan daha iyi ITAE, oturma süresi, alt ve üst aşma değerlerine ulaşabilmek denetleyici optimizasyonunun ana amacıdır. Performans metriği olan ITAE değeri için her zaman en iyi değeri veren denetleyicinin, DOA ile optimize edilmiş kesirli filtreli TID (TIDFF) olduğu gözlemlenmiştir. Kesirli filtrenin net bir yaklaşımla hata değerinde etkili olduğu çıkarımı yapılabilmektedir. TIDFF denetleyici bazı durumlarda en iyi oturma süresi veya alt ve üst aşma değerlerini verse de özellikle doğrusal olmayan çok kaynaklı güç sistemi gibi karmaşık yapılarda bu değerlerin kontrolü açısından diğer daha basit yapılı denetleyicilere nazaran zorlandığı görülmüştür.

Klasik PID denetleyicinin alt ve üst aşma değerlerinde başarılı olduğu görülse de oturma süresi ve hata değeri gibi performans ölçütlerinde oldukça yetersiz kalmıştır ve bu tablolarındaki ITAE değerlerinden açıkça görülmektedir.

Özetle karmaşık olmayan yapılarda TIDFF denetleyici yüksek bir performans gösterirken, karmaşık yapılarda TID ve TIDF denetleyicilerin oturma süresini düşürmek için yeterli olduğu görülmüştür. Bazı durumlarda TID, TIDF ve TIDFF denetleyiciler alt aşma ile üst aşma değerlerini düşürdüğü görülse de genel olarak PID denetleyicinin aşma değerleri konusunda iyi bir performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışması ile kesir hesabına dayalı eğimli-integral-türev tipi denetleyiciler, klasik PID denetleyiciler ile karşılaştırılarak performans analizi yapılmıştır. Kesir hesabına dayalı denetleyicilerin performans metriği ve oturma süresi açısından üstün olduğu gösterilmiş, alt ve üst aşma değerlerinde de çoğu durum için klasik PID denetleyiciden geride kalmadığı görülmüştür. Gelecekte yapılacak olan çalışmalarda performans metriği incelemesi için frekans değişimleri ve bağlantı hattındaki güç değişiminin yanı sıra, oturma süresi, alt aşma ve üst aşma değerleri de göz önünde bulundurulabilir.

5. KAYNAKLAR

1. Yılmaz, Z., Y., Güç Sistemlerinde Yük-Frekans Kontrolünde PID Denetleyici ve Parametrelerinin Simbiyotik Organizmalar Arama Algoritması ile Ayarı, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce, 2020.
2. Görel, G., Güneş Enerji Sistemli İki Bölgeli Enterkonnekte Şebekede Modern Kontrol Teknikleri ile Yük-Frekans Kontrolü, Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 2017.
3. Özdemirci, E., Bir Elektrik Güç Sisteminde Yük-Frekans Kontrolü İncelemesi ve Modellemesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2002.
4. Alıç, O., Güç Sistemlerinde Optimizasyon Tabanlı Bulanık Mantık Denetleyici ile Yük Frekans Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2014.
5. Karyeyen, A., Çok Bölgeli Elektrik Güç Sistemlerinde Optimum Yük Frekans Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2009.
6. Yalçın, E., Çam, E., Vardar, T. ve Lüy, M., PID Kontrolör ile İki Bölgeli Güç Sistemlerinde Yük Frekans Kontrolünün İncelenmesi, International Journal of Engineering Research and Development, 5, 2 (2013) 7-11.
7. Gözde, H., Güç Sistemlerinde Yapay Arı Kolonisi Algoritması Yöntemi ile Yük-Frekans Kontrolü Optimizasyonu, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.
8. Elgerd, O., I. ve Fosha, C., E., Optimum Megawatt-Frequency Control of Multiarea Electric Energy Systems, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 89, 4 (1970) 556-563.
9. Fisher, J., Load Frequency Control of An Interconnected Power System Using Integral Control, TENCON'91 Region 10 International Conference on EC3- Energy, Computer Communication Control Systems, August 1991, India, 58-62.
10. Wang, Y., Zhou, R. ve Wen, C., Robust Controller Design for Power System Load Frequency Control, Proceedings 1992 The First IEEE Conference on Control Applications, September 1992, USA, vol.2, 642-646.
11. Chang, C., S. ve Fu, W., Area Load Frequency Control Using Fuzzy Gain Scheduling of PI Controllers, Electric Power Systems Research, 42, 2 (1997) 145-152.
12. Yılmaz, A., S., Yanıkoğlu, E. ve Turan, M., Enerji Sistemlerinde PID Denetleyiciler ile Yük Frekans Denetimi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 1, 2 (1997) 105-109.

13. Yang, M. ve Lu, H., Sliding Mode Load-Frequency Controller Design for Dynamic Stability Enhancement of Large-Scale Interconnected Power Systems, ISIE'99. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, July 1999, Slovenia, vol.3, 1316-1321.
14. Demiroren, A., Zeynelgil, H., L. ve Sengor, N., S., The application of ANN Technique to Load-Frequency Control for Three-Area Power System, 2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings, September 2001, Portugal, pp. 5 pp. vol.2.
15. Juang, C. ve Lu, C., Power System Load Frequency Control with Fuzzy Gain Scheduling Designed by New Genetic Algorithms, 2002 IEEE World Congress on Computational Intelligence. 2002 IEEE International Conference on Fuzzy Systems. FUZZ-IEEE'02, May 2002, USA, vol.1, 64-68.
16. Meng, X., Gong, Q., Feng, L., Zheng, W. ve Zhang, W., PI Fuzzy Sliding Mode Load Frequency Control of Multiarea Interconnected Power Systems, Proceedings of the 2003 International Symposium on Intelligent Control, October 2003, USA, 1023-1027.
17. Juang, C. ve Lu, C., Power System Load Frequency Control by Evolutionary Fuzzy PI Controller, 2004 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, July 2004, Hungary, vol.2, 715-719.
18. Khodabakhshian, A., Rahimi, H. ve Golbon, N., QFT Design for Load Frequency Control of Non-Minimum Phase Hydro Power Plant, 2006 IEEE conference on Computer Aided Control System Design, 2006 IEEE International Conference on Control Applications, 2006 IEEE International Symposium on Intelligent Control, October 2006, Germany, 1380-1385.
19. Sabahi, K, Nekoui, M., A., Teshnehlav, M., Aliyari, M. ve Mansouri, M., Load Frequency Control in Interconnected Power System Using Modified Dynamic Neural Networks, 2007 Mediterranean Conference on Control & Automation, June 2007, Greece, 1-5.
20. Sheikh, M., R., I., Muyeen, S., M., Takahashi, R., Murata, T. ve Tamura, J., Improvement of Load Frequency Control with Fuzzy Gain Scheduled Superconducting Magnetic Energy Storage Unit, 2008 18th International Conference on Electrical Machines, September 2008, Portugal, 1-6.
21. Shibasaki, S., Onishi, H. ve Iwamoto, S., A Study on Load Frequency Control Combining a PID Controller and a Disturbance Observer, 2009 Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, October 2009, South Korea, 1-4.
22. Yalçın, E., Çam, E. ve Lüy, M., Dört Bölgeli Güç Sisteminde PID Kontrolör ile Yük Frekans Kontrolü, ELECO'2010 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Aralık 2010, Bursa, 72-77.
23. Rathor, S., Acharya, D., S., Gude, S. ve Mishra, P., Application of Artificial Bee Colony Optimization for Load Frequency Control, 2011 World Congress on Information and Communication Technologies, December 2011, India, 743-747.

24. Jeddi, S., A., Abbasi, S., H. ve Shabaninia, F., Load Frequency Control of Two Area Interconnected Power System (Diesel Generator and Solar PV) with PI and FGSPi Controller, AISP'2012 The 16th CSI International Symposium on Artificial Intelligence and Signal Processing, May 2012, Iran, 526-531.
25. Ali, E., S. ve Abd-Elazim, S., M., BFOA Based Design of PID Controller for Two Area Load Frequency Control with Nonlinearities, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 51 (2013) 224-231.
26. Sahu, R., K., Panda, S. ve Rout, U., K., 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 (2013) 19-33.
27. Parmar, K., P., S., Load Frequency Control of Multi-Source Power System with Redox Flow Batteries: An Analysis, International Journal of Computer Applications, 88, 8 (2014) 46-52.
28. Debbarma, S., Saikia, L., C. ve Sinha, N., Automatic Generation Control Using Two Degree of Freedom Fractional Order PID Controller, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 58 (2014) 120-129.
29. Sönmez, S., Ayasun, S., Stability Region in the Parameter Space of PI Controller for a Single-Area Load Frequency Control System with Time Delay, IEEE Transactions on Power Systems, 31, 1 (2016) 829-830.
30. Topno, P., N. ve Chanana, S., Tilt Integral Derivative Control for Two-Area Load Frequency Control Problem, 2015 2nd International Conference on Recent Advances in Engineering & Computational Sciences (RAECS), December 2015, India, 1-6.
31. Sekhar, G., T., C., Sahu, R., K., Baliarsingh, A., K. ve Panda, S., Load Frequency Control of Power System Under Deregulated Environment Using Optimal Firefly Algorithm, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 74 (2016) 195-211.
32. Sahu, R., K., Panda, S., Biswal, A. ve Sekhar, G., T., C., Design and Analysis of Tilt Integral Derivative Controller with Filter for Load Frequency Control of Multi-Area Interconnected Power Systems, ISA Transactions, 61 (2016) 251-264.
33. Kumar, A. ve Suhag, S., Multiverse Optimized Fuzzy-PID Controller with a Derivative Filter for Load Frequency Control of Multisource Hydrothermal Power System, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 25, 5 (2017) 4187-4199.
34. Mishra, D., K., Panigrahi, T., K., Ray, P., K. ve Mohanty, A., Application of Integral Double Derivative with Filter for Load Frequency Control in Multi Area Power System, 2017 IEEE Calcutta Conference (CALCON), December 2017, India, 220-225.
35. Padhy, S., Khadanga, R., K. ve Panda, S., A Modified GWO Technique Based Fractional Order PID Controller with Derivative Filter Coefficient for AGC of Power Systems with Plug in Electric Vehicles, 2018 Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP), March 2018, India, 1-5.

36. Behera, S., P., Biswal, A., Samantray, S., S. ve Swain, B., 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)*, March 2018, India, 1-6.
37. Gheisarnejad, M. ve Khooban, M., H., 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 (2019) 2563-2581.
38. Sahoo, B., P. ve Panda, S., 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)*, January 2020, India, 188-193.
39. Mohanty, P. ve Sahu, R., K., 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)*, July 2020, India, 1-4.
40. Sahin, E., 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 (2020) 12327-12342.
41. Singh, K., Amir, M., Ahmad, F. ve Khan, M., A., An Integral Tilt Derivative Control Strategy for Frequency Control in Multimicrogrid System, *IEEE Systems Journal*, 15,1 (2021) 1477-1488.
42. Priyadarshani, S., Subashini, K., R. ve Satapathy, J., K., Pathfinder Algorithm Optimized Fractional Order Tilt-Integral-Derivative (FOTID) Controller for Automatic Generation Control of Multi-Source Power System, *Microsystem Technologies*, 27 (2021) 23-35.
43. Daraz, A., Malik, S., A., Azar, A., T., Aslam, S., Alkhalifah, T. ve Alturise, F., Optimized Fractional Order Integral-Tilt Derivative Controller for Frequency Regulation of Interconnected Diverse Renewable Energy Resources, *IEEE Access*, 10 (2022) 43514-43527.
44. Khudhair, M., Ragab, M., AboRas, K., M. ve Abbasy, N., H., A Newly Resilient Combination of PID2 and PD Controllers to Boost the Frequency Response in a Two-Area Hybrid Power System with Nonlinearities Using Wild Horse Optimizer, *2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*, July 2022, Czech Republic, 1-11.
45. Sharma, D., Load Frequency Control: A Literature Overview, *International Journal of Scientific & Technology Research*, 9, 2 (2020) 6421-6437.
46. Doğan, A., Analysis of Soccer League Competition Algorithm for Load Frequency Control in Nonlinear Interconnected Power System, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 9, 3 (2021) 866-879.

47. Çakıcı, F. N., Eke, İ., Saka, M. ve Taplamacioğlu M., Performance Analysis for Load Frequency Control of Interconnected Power Systems with Different Techniques, International Journal of Engineering Research and Development, 12,3 (2020) 89-106.
48. Gözde, H., Taplamacioğlu, M., C., Kocaarslan, İ. ve Şenol, M., A., İki Bölgeli Ara-Isıtmalı Termal Güç Sisteminin Yük-Frekans Kontrolü için Parçacık Sürüşü Optimizasyonu Tabanlı PI-Kontrolör, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 30, 1 (2010) 13-21.
49. Sharma, M., Prakash, S. Saxena, S. ve Dhundhara, S., 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 (2021) 1912-1931.
50. Saadat, H., Power System Analysis, McGraw-Hill, USA, 2002.
51. Gözde, H., Taplamacioğlu, M., C. ve Kocaarslan, İ., A Swarm Optimization Based Load Frequency Control Application in a Two Area Thermal Power System, ELECO'2009 International Conference on Electrical and Electronics Engineering, November 2009, Bursa, 124-128.
52. Morsali, J., Zare, K. ve Hagh, M., T., Appropriate Generation Rate Constraint (GRC) Modeling Method for Reheat Thermal Units to Obtain Optimal Load Frequency Controller (LFC), 2014 5th Conference on Thermal Power Plants (CTPP), June 2014, Iran, 29-34.
53. Morsali, J., Zare, K. ve Hagh, M., T., AGC of Interconnected Multi-Source Power System with Considering GDB and GRC Nonlinearity Effects, 2016 6th Conference on Thermal Power Plants (CTPP), January 2016, Iran, 12-17.
54. Ayas, M., S., Design of an Optimized Fractional High-Order Differential Feedback Controller for an AVR System, Electrical Engineering, 101 (2019) 1221-1233.
55. Ahmed, E., M., Selim, A., Alnuman, H., Alhosaini, W., Aly, M. ve Mohamed, E., A., Modified Frequency Regulator Based on TI^{λ} - TD^{μ} FF Controller for Interconnected Microgrids with Incorporating Hybrid Renewable Energy Sources, Mathematics 2023, 11, 1 (2022) 28.
56. Ayas, M., S. ve Sahin, E., FOPID Controller with Fractional Filter for an Automatic Voltage Regulator, Computers & Electrical Engineering, 90 (2021) 106895.
57. Faramarzi, A., Heidarinejad, M., Stephens, B. ve Mirjalili, S., Equilibrium Optimizer: A Novel Optimization Algorithm, Knowledge-Based Systems, 191 (2020) 105190.
58. Soliman, M., A., Al-Durra, A. ve Hasanien, H., M., Electrical Parameters Identification of Three-Diode Photovoltaic Model Based on Equilibrium Optimizer Algorithm, IEEE Access, 9 (2021) 41891-41901.
59. Mostafa, A., Ebeed, M., Kamel, S. ve Abdel-Moamen, M., A., Optimal Power Flow Solution Using Levy Spiral Flight Equilibrium Optimizer with Incorporating CUPFC, IEEE Access, 9 (2021) 69985-69998.

60. Sun, R., Zhu, X., Lin, S., Zhu, T. ve Wang, J., Optimal Control Design of VSC-HVDC Systems Integrated with Offshore Wind Farm via Enhanced Equilibrium Optimizer, RPG 2021, The 10th Renewable Power Generation Conference, October 2021, 699-704.



6. EKLER

Ek 1. İki Bölgele Ara Isıtmalı Termal Güç Sistemi Parametreleri

Tablo 6.1. İki bölgele ara ısıtmalı termal güç sistemi parametreleri [49].

f	60 Hz
$B_1 = B_2$	0.425 p.u. MW/Hz
$R_{T1} = R_{T2}$	2.4 Hz/p.u. MW
T_{12}	0.0866 p.u. MW/rad
$T_{TG1} = T_{TG2}$	0.08 s
$T_{T1} = T_{T2}$	0.3 s
$T_{r1} = T_{r2}$	10 s
$K_{r1} = K_{r2}$	0.5
$K_{P1} = K_{P2}$	120 Hz/p.u. MW
$T_{P1} = T_{P2}$	20 s
a_{12}	-1

Ek 2. İki Bölge Çok Kaynaklı Güç Sistemi Parametreleri

Tablo 6.2. İki bölge çok kaynaklı güç sistemi parametreleri [49].

f	60 Hz
$B_1 = B_2$	0.425 p.u. MW/Hz
$R_{T1} = R_{T2}$	2 Hz/p.u. MW
$R_{H1} = R_{H2}$	2.4 Hz/p.u. MW
T_{12}	0.0707 p.u. MW/rad
$T_{TG1} = T_{TG2}$	0.08 s
$T_{T1} = T_{T2}$	0.3 s
$T_{h1} = T_{h2}$	0.513 s
$T_{R1} = T_{R2}$	5 s
$T_{D1} = T_{D2}$	48.7 s
$T_{W1} = T_{W2}$	1 s
$K_{P1} = K_{P2}$	100 Hz/p.u. MW
$T_{P1} = T_{P2}$	20 s
a_{12}	-1

Ek 3. Doğrusal Olmayan İki Bölge Çok Kaynaklı Güç Sistemi Parametreleri

Tablo 6.3. Doğrusal olmayan iki bölge çok kaynaklı güç sistemi parametreleri [42].

f	60 Hz
$B_1 = B_2$	0.4312 p.u. MW/Hz
$R_{T1} = R_{T2}$	2.4 Hz/p.u. MW
$R_{H1} = R_{H2}$	2.4 Hz/p.u. MW
$R_{G1} = R_{G2}$	2.4 Hz/p.u. MW
T_{12}	0.0433 p.u. MW/rad
$T_{TG1} = T_{TG2}$	0.08 s
$T_{T1} = T_{T2}$	0.3 s
$K_{r1} = K_{r2}$	0.3
$T_{r1} = T_{r2}$	10 s
$T_{h1} = T_{h2}$	0.2 s
$T_{R1} = T_{R2}$	5 s
$T_{D1} = T_{D2}$	28.75 s
$T_{W1} = T_{W2}$	1 s
$c_{G1} = c_{G2}$	1
$b_{G1} = b_{G2}$	0.05 s
$X_{G1} = X_{G2}$	0.6 s
$Y_{G1} = Y_{G2}$	1 s
$T_{CR1} = T_{CR2}$	0.01 s
$T_{F1} = T_{F2}$	0.23 s
$T_{CD1} = T_{CD2}$	0.2 s
$a_{T1} = a_{T2}$	0.543478
$a_{H1} = a_{H2}$	0.326084
$a_{G1} = a_{G2}$	0.130438
$K_{P1} = K_{P2}$	68.9566 Hz/p.u. MW
$T_{P1} = T_{P2}$	11.49 s
a_{12}	-1

ÖZGEÇMİŞ

İlkokul ve ortaokul eğitimini İstanbul, lise eğitimini Ordu'da tamamladı. Üniversite eğitimine 2014 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde başladı ve 2018 yılında mezun oldu. 2019 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Mühendisliği Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Yabancı dili İngilizce'dir.

