

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İKİ BÖLGELİ GÜÇ SİSTEMLERİNDE YÜK FREKANS KONTROLÜ
İÇİN ADAPTİF DENETLEYİCİ TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İsmail Hakkı KÖSE

AĞUSTOS 2025

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İKİ BÖLGELİ GÜÇ SİSTEMLERİNDE YÜK FREKANS KONTROLÜ
İÇİN ADAPTİF DENETLEYİCİ TASARIMI

İsmail Hakkı KÖSE

ORCID :

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 / 07 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 22 / 08 / 2025

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mustafa Şinasi AYAS

ORCID :

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı kapsamında yapılan bu tez çalışmasında, farklı güç sistem modelleri için denetleyici parametreleri hippopotamus optimizasyon algoritmasıyla ayarlanan adaptif tanjant hiperbolik PID denetleyici tasarımı ile yük frekans kontrolü gerçekleştirdim.

Yapılan 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 ve değerli dostum Sayın Araş. Gör. Ali Kıvanç ŞAHİN'e teşekkürlerimi sunarım.

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

İsmail Hakkı KÖSE
Trabzon, 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “İki Bölgeli Güç Sistemlerinde Yük Frekans Kontrolü İçin Adaptif Denetleyici Tasarımı” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım 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. 22/08/2025

İsmail Hakkı KÖSE

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Taraması	2
1.3. Yük Frekans Kontrolü	8
1.3.1. Birincil (Primer) Kontrol Çevrimi	10
1.3.2. İkincil (Sekonder) Kontrol Çevrimi	10
1.3.3. Üçüncül (Tersiyer) Kontrol Çevrimi.....	12
1.4. Güç Sistem Modeli	12
1.4.1. Generatör Modeli	13
1.4.2. Yük Modeli	15
1.4.3. Governor Modeli	15
1.4.4. Ara Isıtmasız Termal Governor Modeli	16
1.4.5. Ara Isıtmalı Termal Güç Sistemi	17
1.4.6. Hidro Güç Santral Modeli	18
1.4.7. Gaz Güç Ünitesi Modeli	22
1.4.8. Governor Ölü Bantlı Termal Governor Modeli	24
1.4.9. Üretim Oranı Kısıtlaması Modeli	25
1.4.10. Kontrol Bölgesi Modeli	27
1.4.11. Bağlantı Hattı Modeli.....	28
1.4.12. İki Bölgeli Güç Sistem Modeli	29
1.5. Denetleyici Yapıları	31
1.5.1. Geleneksel ve Kesir Dereceli PID Denetleyiciler	31

1.5.2. Üstel PID Denetleyici	34
1.5.3. Önerilen TANH PID Denetleyici.....	38
1.6. Metasezgisel Optimizasyon Algoritmaları.....	41
1.6.1. Hippopotamus Optimizasyon Algoritması.....	43
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	51
2.1. İki Bölgele Ara-Isıtmasız Termal Güç Sistemi.....	51
2.2. Doğrusal Olmayan İki Bölgele Ölü Bantlı Governor (GDB) Özellikli Ara-Isıtmasız Termal Güç Sistemi	52
2.3. Doğrusal Olmayan İki Bölgele GRC Özellikli Ara-Isıtmasız Termal Güç Sistemi	53
2.4. Çok Kaynaklı Tek Bölgele Güç Sistemi	55
2.5. Çok Kaynaklı İki Bölgele Güç Sistemi.....	55
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	58
3.1. İki Bölgele Ara-Isıtmasız Termal Güç Sistemi Analiz Değerlendirmeleri.....	58
3.2. Doğrusal Olmayan İki Bölgele Ölü Bantlı Governor (GDB) Özellikli Ara-Isıtmasız Termal Güç Sistemi Analiz Değerlendirmeleri	64
3.3. Doğrusal Olmayan İki Bölgele GRC Özellikli Ara-Isıtmasız Termal Güç Sistemi Analiz Değerlendirmeleri	70
3.4. Çok Kaynaklı Tek Bölgele Güç Sistemi Analiz Değerlendirmeleri.....	75
3.5. Çok Kaynaklı İki Bölgele Güç Sistemi Analiz Değerlendirmeleri.....	79
3.6. Gürbüzlük Analizleri	86
3.7. İstatistiksel Analiz Değerlendirmeleri.....	94
4. SONUÇLAR.....	98
5. ÖNERİLER.....	99
6. KAYNAKLAR	100
7. EKLER.....	105

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

İKİ BÖLGELİ GÜÇ SİSTEMLERİNDE YÜK FREKANS KONTROLÜ İÇİN ADAPTİF DENETLEYİCİ TASARIMI

İsmail Hakkı KÖSE

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Mustafa Şinasi AYAS
2025, 108 Sayfa

Bu tezde, güç sistemlerinde yük frekans kontrolünü daha etkin bir biçimde yapabilmek adına literatürde çalışmalarda sıklıkla tercih edilen farklı yapıdaki beş güç sistem modeli ele alınmıştır. Çalışmada; iki bölgeli ara ısıtmasız termal güç sistemi, doğrusal olmayan GDB ve GRC özellikli ara ısıtmasız termal güç sistemi, çok kaynaklı tek bölgeli ve çok kaynaklı iki bölgeli güç sistemleri incelenmiştir. Her bir model için, literatürde etkinliği ispatlanan denetleyiciler ile bu tez kapsamında önerilen adaptif TANH-PID denetleyicisinin performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Denetleyici tasarımı, sistem tepkisinde aşımın azaltılması ve kısa sürede kararlı duruma ulaşılması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda geliştirilen adaptif TANH-PID denetleyici, hippopotamus optimizasyon algoritması ve ITAE performans indeksiyle entegre çalıştırılarak, her sistem için en uygun denetleyici parametreleri elde edilmiştir. Yapılan analizlerde; frekans değişimi, bağlantı hattı güç değişimi ve oturma zamanı gibi performans ölçütleri dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen denetleyicinin tüm sistemlerde literatürdeki mevcut yöntemlere kıyasla daha üstün performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu üstünlük, önerilen denetleyicinin adaptif tanjant hiperbolik yapısı sayesinde geçici durumlarda hızlı ve kararlı tepki verebilmesi, dış etkilere ve sistem parametrelerindeki değişimlere karşı da yüksek dayanıklılık göstermesinden kaynaklanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yük frekans kontrolü, TANH-PID denetleyici, hippopotamus optimizasyon algoritması

Master Thesis

SUMMARY

ADAPTIVE CONTROLLER DESIGN FOR LOAD FREQUENCY IN TWO AREA POWER SYSTEMS

İsmail Hakkı KÖSE

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical-Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Mustafa Şinasi AYAS
2025, 108 Pages

In this thesis, five different power system models, frequently preferred in the literature, are examined to achieve more effective load frequency control in power systems. The study investigates a two area non reheat thermal power system, nonlinear non reheat thermal power systems with GDB and GRC features, as well as multi source single area and multi source two area power systems. For each model, the performance of controllers that have been proven effective in the literature is comparatively evaluated with the adaptive TANH-PID controller proposed in this thesis. The controller design aims to minimize overshoot and achieve a fast transition to the steady state. To this end, the adaptive TANH-PID controller is integrated with the hippopotamus optimization algorithm and the ITAE performance index to obtain optimal controller parameters for each system. In the analysis, performance criteria such as frequency deviation, tie-line power variation, and settling time are considered. The results demonstrate that the proposed controller shows superior performance compared to existing methods in the literature across all examined systems. This superiority stems from the adaptive hyperbolic tangent structure of the proposed controller, which enables a fast and stable response during transient conditions, along with high robustness against external disturbances and variations in system parameters.

Key Words: Load frequency control, TANH-PID controller, hippopotamus optimization algorithm

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	İki bölgeli güç sistemi için yük frekans kontrolü çevrimleri.....	9
Şekil 2.	Birincil /ikincil kontrol çevrimleri için karakteristik grafik	11
Şekil 3.	Birincil/ikincil/üçüncül kontrol çevrimlerinin frekans bölge karakteristiği	12
Şekil 4.	Tek bölgeli hidroelektrik santral modeli (Köse vd., 2023).....	13
Şekil 5.	Generatör sistemi fiziksel modeli	14
Şekil 6.	Generatör doğrusal modeli	14
Şekil 7.	Generatör ve yük doğrusal modeli.....	15
Şekil 8.	Governor doğrusal modeli	16
Şekil 9.	Ara ısıtmasız termal güç ünitesi doğrusal modeli.....	17
Şekil 10.	Ara ısıtmalı termal güç ünitesi doğrusal modeli.....	18
Şekil 11.	Hidroelektrik santral modeli için yük frekans kontrolü şematik gösterimi	19
Şekil 12.	Hidro güç ünitesi doğrusal modeli.....	20
Şekil 13.	(a) Hidroelektrik türbin modeli - (b) hidroelektrik türbin mekanik mil yapısı.....	21
Şekil 14.	Hidroelektrik türbin su akış kontrol mekanizmaları	21
Şekil 15.	Gaz türbini çalışma modeli.....	22
Şekil 16.	Gaz güç ünitesi doğrusal modeli.....	24
Şekil 17.	Termal güç ünitesi üretim oranı kısıtlaması doğrusal modeli	25
Şekil 18.	Termal güç ünitesi üretim oranı kısıtlaması doğrusal modeli	26
Şekil 19.	Hidro güç ünitesi üretim oranı kısıtlaması doğrusal modeli.....	26
Şekil 20.	Kontrol bölgesi doğrusal modeli	28
Şekil 21.	Bağlantı hattı doğrusal modeli.....	29
Şekil 22.	İki bölgeli ara ısıtmasız termal güç sistemi modeli	29
Şekil 23.	PID denetleyici blok diyagramı	32
Şekil 24.	FOPID denetleyici blok diyagramı	33
Şekil 25.	(a) PID - (b) FOPID üssel parametre değerleri.....	34
Şekil 26.	Üssel PID denetleyici blok diyagramı	34
Şekil 27.	Farklı G ve τ değerleri için exp eğrileri (Çelik, 2024).....	35
Şekil 28.	TANH PID blok diyagramı	38
Şekil 29.	Farklı M ve A değerleri için yakınsama eğrileri.....	40

Şekil 30.	TANH-PID denetleyici ile denetlenen elektrik güç santrali modeli.....	42
Şekil 31.	HOA akış şeması	50
Şekil 32.	Doğrusal olmayan iki bölge ölü bantlı governor (GDB) özellikli ara-ısıtmasız termal güç sistemi.....	53
Şekil 33.	Doğrusal olmayan iki bölge, GRC özellikli ara-ısıtmasız termal güç sistemi.....	54
Şekil 34.	Çok kaynaklı tek bölge güç sistemi.....	55
Şekil 35.	Çok kaynaklı iki bölge güç sistemi	57
Şekil 36.	İki bölge ara ısıtmasız termal güç sisteminde birinci bölgenin frekans değişim eğrisinin farklı tekniklerle karşılaştırılması	60
Şekil 37.	İki bölge ara ısıtmasız termal güç sisteminde ikinci bölgenin frekans değişim eğrisinin farklı tekniklerle karşılaştırılması	61
Şekil 38.	İki bölge ara ısıtmasız termal güç sisteminde bağlantı hattı güç değişim eğrisinin farklı tekniklerle karşılaştırılması	62
Şekil 39.	İki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminde üretilen kontrol sinyalleri (a) birinci bölge (b) ikinci bölge.....	63
Şekil 40.	Doğrusal olmayan iki bölge GDB özellikli ara-ısıtmasız termal güç sisteminde Birinci Bölgenin frekans değişim eğrisinin farklı tekniklerle karşılaştırılması.....	66
Şekil 41.	Doğrusal olmayan iki bölge GDB özellikli ara-ısıtmasız termal güç sisteminde ikinci bölgenin frekans değişim eğrisinin farklı tekniklerle karşılaştırılması.....	67
Şekil 42.	Doğrusal olmayan iki bölge GDB özellikli ara-ısıtmasız termal güç sisteminde bağlantı hattı güç değişim eğrisinin farklı tekniklerle karşılaştırılması.....	68
Şekil 43.	Doğrusal olmayan iki bölge ölü bantlı governor (GDB) özellikli ara-ısıtmasız termal güç sisteminde üretilen kontrol sinyalleri (a) birinci bölge (b) ikinci bölge.....	69
Şekil 44.	Doğrusal olmayan iki bölge GRC özellikli ara-ısıtmasız termal güç sisteminde birinci bölgenin frekans değişim eğrisinin farklı tekniklerle karşılaştırılması.....	71
Şekil 45.	Doğrusal olmayan iki bölge GRC özellikli ara-ısıtmasız termal güç sisteminde ikinci bölgenin frekans değişim eğrisinin farklı tekniklerle karşılaştırılması.....	72
Şekil 46.	Doğrusal olmayan iki bölge GRC özellikli ara-ısıtmasız termal güç sisteminde bağlantı hattı güç değişim eğrisinin farklı tekniklerle karşılaştırılması.....	73
Şekil 47.	Doğrusal olmayan iki bölge GRC özellikli ara-ısıtmasız termal güç sisteminde üretilen kontrol sinyalleri (a) birinci bölge (b) ikinci bölge	74
Şekil 48.	Çok kaynaklı tek alanlı güç sistemi için frekans değişim eğrisinin farklı tekniklerle karşılaştırılması.....	77

Şekil 49.	Çok kaynaklı tek bölgeli güç sisteminde üretilen kontrol sinyalleri (a) Yeniden ısıtılmalı termal güç bölgesi (b) Hidro güç bölgesi (c) Gaz türbini bölgesi	78
Şekil 50.	Çok kaynaklı iki alanlı güç sisteminde birinci bölgenin frekans değişim eğrisinin farklı tekniklerle karşılaştırılması	81
Şekil 51.	Çok kaynaklı iki alanlı güç sisteminde ikinci bölgenin frekans değişim eğrisinin farklı tekniklerle karşılaştırılması	82
Şekil 52.	Çok kaynaklı iki alanlı güç sisteminde bağlantı hattı güç değişim eğrisinin farklı tekniklerle karşılaştırılması	83
Şekil 53.	Çok kaynaklı iki bölgeli güç sisteminde birinci bölge için üretilen kontrol sinyalleri (a) Yeniden ısıtılmalı termal güç bölgesi (b) Hidro güç bölgesi (c) Gaz türbini bölgesi.....	84
Şekil 54.	Çok kaynaklı iki bölgeli güç sisteminde ikinci bölge için üretilen kontrol sinyalleri (a) Yeniden ısıtılmalı termal güç bölgesi (b) Hidro güç bölgesi (c) Gaz türbini bölgesi.....	85
Şekil 55.	İki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminde B parametre değişimi ile TANH-PID denetleyici için elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 , (c) ΔP_{tie12} tepki eğrileri.....	88
Şekil 56.	İki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminde R parametre değişimi ile TANH-PID denetleyici için elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 , (c) ΔP_{tie12} tepki eğrileri.....	89
Şekil 57.	İki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminde ΔP_L parametre değişimi ile TANH-PID denetleyici için elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 , (c) ΔP_{tie12} tepki eğrileri.....	90
Şekil 58.	İki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminde T_G parametre değişimi ile TANH-PID denetleyici için elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 , (c) ΔP_{tie12} tepki eğrileri	91
Şekil 59.	İki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminde T_T parametre değişimi ile TANH-PID denetleyici için elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 , (c) ΔP_{tie12} tepki eğrileri	92
Şekil 60.	İki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminde T_{12} parametre değişimi ile TANH-PID denetleyici için elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 , (c) ΔP_{tie12} tepki eğrileri	93
Şekil 61.	İki bölgeli ara ısıtmasız termal güç sistemi için istatistiksel analiz sonuçları.....	95
Şekil 62.	Doğrusal olmayan iki bölgeli ölü banthı governor (GDB) özellikli ara-ısıtmasız termal güç sistemi için istatistiksel analiz sonuçları.....	95
Şekil 63.	Doğrusal olmayan iki bölgeli GRC özellikli ara-ısıtmasız termal güç sistemi için istatistiksel analiz sonuçları.....	96
Şekil 64.	Çok kaynaklı tek bölgeli güç sistemi için istatistiksel analiz sonuçları.....	96
Şekil 65.	Çok kaynaklı iki bölgeli güç sistemi için istatistiksel analiz sonuçları	97

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. GDB'li/GDB'siz sistemlerin karşılaştırılması	52
Tablo 2. GRC'li / GRC'siz sistemlerin karşılaştırılması.....	54
Tablo 3. İki bölgeli ara-ısıtmasız termal güç sistemi için denetleyici parametreleri ve elde edilen sonuçlar	59
Tablo 4. Doğrusal olmayan iki bölgeli ölü bantlı governor (GDB) özellikli ara-ısıtmasız termal güç sistemi için denetleyici parametreleri ve elde edilen sonuçlar	65
Tablo 5. Doğrusal olmayan iki bölgeli GRC özellikli ara-ısıtmasız termal güç sistemi için denetleyici parametreleri ve elde edilen sonuçlar	70
Tablo 6. Çok kaynaklı tek bölgeli güç sistemi için denetleyici parametreleri ve elde edilen sonuçlar	76
Tablo 7. Çok kaynaklı iki bölgeli güç sistemi için denetleyici parametreleri ve elde edilen sonuçlar	79
Tablo 8. Gürbüzlük analizi için parametre değişimleri.....	86
Tablo 9. HOA için istatistiksel analiz sonuçları	93
Tablo 10. İki bölgeli ara ısıtmasız termal güç sistemi parametreleri (Çelik, 2024).....	104
Tablo 11. Doğrusal olmayan iki bölgeli ölü bantlı governor (GDB) özellikli ara ısıtmasız termal güç sistemi parametreleri (Çelik, 2024)	104
Tablo 12. Doğrusal olmayan iki bölgeli GRC özellikli ara-ısıtmasız termal güç sistemi parametreleri (Sahin, 2020).....	105
Tablo 13. Çok kaynaklı tek bölgeli güç sistemi parametreleri (Çelik, 2024)	105
Tablo 14. Çok kaynaklı iki bölgeli güç sistemi parametreleri (Barakat, 2022).....	106

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

B	Frekans kutuplama sabiti
R	Governor hız düzenleme sabiti
T_{12}	Bağlantı hattındaki senkronize edici moment katsayısı
ΔP_{L1}	Birinci bölgedeki yük değişimi
ΔP_{L2}	İkinci bölgedeki yük değişimi
$f_{yüksüz}$	Yüksüz durumdaki frekans
$f_{tamyük}$	Tam yük durumundaki frekans
f	Nominal sistem frekansı
ΔP_m	Hidrolik türbin sisteminin sağladığı mekanik güç
ΔP_r	Referans güç
ΔP_p	Valf pozisyonu değişimi
ΔP	Dış ortamın sisteme verdiği bozucu yük (sistemdeki yük değişimi)
Δf	Frekans değişimi
R	Governer hız regülasyon sabiti
T_t	Türbin zaman sabiti
T_G	Governor zaman sabiti
H	Generatör atalet sabiti
M	Açısal moment,
$\Delta \omega$	Açısal hız değişimi
P_m	Türbinin ürettiği mekanik güç
P_e	Elektriksel güç
D	Yük sönümleme sabiti
ΔP_v	Vana pozisyonu değişimi
T_H	Hidrolik yükselteç zaman sabiti
T_{TG}	Termal governorun zaman sabiti
T_T	Buhar türbini zaman sabiti
R_T	Termal ünite hız regülasyon sabiti
K_r	Yeniden ısıtma işlemini yapan ısıtıcının kazanç sabiti
T_r	Isıtıcı zaman sabiti

ΔP_h	Hidroelektrik governor çıkış gücü değişimi
T_H	Hidroelektrik governor zaman sabiti
T_R	Hidroelektrik governor zaman sıfırlama zamanı
T_D	Hidroelektrik governor geçici düşüş zaman sabiti
c_G	Valf konumlandırıcı sabiti
b_G	Valf konumlandırıcı zaman sabiti
X_G	Gaz governor ilerleme süresi sabiti
Y_G	Gaz governor gecikme süresi sabiti
T_{CR}	Gaz türbini yanma tepkimesi gecikme süresi
T_F	Gaz türbini yakıt zaman sabiti
T_{CD}	Gaz türbininin kompresör deşarj süresi
R_G	Gaz ünitenin hız regülasyon sabiti
K_p	Kontrol bölgesinin kazancı,
T_p	Kontrol bölgesinin zaman sabiti
ΔP	Yük değişimi
ΔP_{tie12}	Bağlantı hattındaki gücün değişimi
N_1, N_2	Governor ölü bandı Fourier katsayıları
WK_n	Depolanan kinetik enerjinin nominal değeri
PPS	Sistemin nominal üretim gücü
AA	Ateşböceği Algoritması
AKH	Alan Kontrolü Hatası
DEA	Diferansiyel Evrim Algoritması
FHODF	Yüksek Kesir Dereceli Diferansiyel Geri Beslemeli
FOPID	Kesir Dereceli PID
FOPIDF	Filtreli Kesir Dereceli PID
FPID	Bulanık Mantık Oransal İntegral Türev
GA	Genetik Algoritma
GWO	Gri Kurt Optimizasyon Algoritması
GDB	Governor Ölü Bandı
PID	Oransal-İntegral-Türev
GRC	Generatör Hız Kısıt Oranı
BFOA	Bakteri Yemleme Optimizasyon Algoritması
HOA	Hippopotamus Optimizasyon Algoritması

WCA	Su Döngüsü Algoritması
HODFC	Yüksek Dereceli Diferansiyel Geri Beslemeli Denetleyici
FHODFC	Gelişmiş Kesirli Yüksek Dereceli Diferansiyel Geri Beslemeli Denetleyici
UCTE	Avrupa Elektrik İletimi Koordinasyonu Birliği
PIDF	Filtreli Oransal-İntegral-Türev
TIDF	Filtreli Eğimli-İntegral-Türev
ÜOK	Üretim Oranı Kısıtlaması
2-DOF FOPID	İki Serbestlik Dereceli Kesir Dereceli Oransal-İntegral-Türev
IAE	Mutlak Hata Toplamı
ISE	Hata Kareleri Toplamı
ITAE	Zaman Ağırlıklı Mutlak Hata Toplamı
ITSE	Zaman Ağırlıklı Hata Kareleri Toplamı
YFK	Yük Frekans Kontrolü
OS	Oturma Süresi
MA	Maximum Aşım
YS	Yükselme Süresi
EXP-PID	Üstel Oransal-İntegral-Türev
TANH-PID	Tanjant Hiperbolik Oransal-İntegral-Türev
YBA	Yol Bulucu Algoritması
HVDC	Yüksek Gerilimli Doğru Akım

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Günümüzde gelişen teknoloji ve artan sanayileşme yatırımları sebebiyle enerjiye olan talep sürekli artış eğilimindedir. Enerji kaynaklarının sınırlı oluşu ve enerji maliyetlerinde yaşanan artışlar sebebiyle yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik yatırımlar ve araştırmalar günden güne artmaktadır (Duque vd.,2016).

Enerji talebine ek olarak, var olan enerjinin en verimli şekilde kullanılabilmesi adına kontrol sistemleri üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Kontrol sistemlerinin varlığı sayesinde enerji verimliliğinde artış gözlenirken, maliyetlerin düşürülmesi noktasında da pozitif katkı sağlamaktadır (Mishra vd.,2015).

Çok sayıda elektrik enerji üretim ve tüketim merkezini birbirine bağlayan elektrik enerji sistemi enterkonnekte şebeke olarak bilinmektedir. Günümüzde geleneksel ve yenilenebilir enerji üretim santralleri aracılığıyla üretilen elektrik enerjisi enterkonnekte şebekenin bağlantı hatları aracılığıyla farklı noktalardaki tüketim alanlarına aktarılmaktadır.

Enterkonnekte şebekede frekansı kontrol altında tutabilmek için öncelikle üretim – tüketim noktaları arasında yapılan enerji alışverişinde güç senkronizasyonu sağlanmalıdır. Enerji tüketim noktaları ile üretim noktalarındaki ani frekans değişimlerine bağlı olarak (sistemdeki ani yük değişimleri vb.) sistem frekansında dalgalanmalar gözlenmektedir. Sistemde tüketim noktalarında enerji gereksinimine bağlı olarak üretim sahalarında bulunan generatörlerin hızı değişmektedir. Generatörlerin hızındaki artışa ya da azalışa bağlı olarak sistem frekansı da doğrudan etkilenmektedir (Kundur, 1994).

Enterkonnekte şebeke sisteminin verimli ve doğru çalışabilmesi adına öncelikle frekans kararlılığının sağlanarak frekansın belli bir değerde sabit ya da sistem tarafından tolerans gösterilebilecek bir aralıkta tutulması gerekmektedir. Avrupa Elektrik İletimi Koordinasyonu Birliği (Union for the Coordination of Transmission of Electricity-UCTE)'ne göre sistem frekansı 49,2 Hz - 50,8 Hz frekansları arasında olmalıdır (UCTE, 2004). Türkiye'de de 50 Hz frekans ile çalışılmakta olup sistem frekans tolerans aralığı UCTE standartlarına uygun olarak iletim sisteminde 49,8 Hz - 50,2 Hz arasında tutulmaya çalışılmaktadır.

Güç sistemlerinde sistem frekansının belirlenen aralıkta kalabilmesi adına

gerçekleştirilen çalışmalar literatürde yük frekans kontrolü (YFK) olarak bilinmektedir. Yük frekans kontrolünün temel amacı enerji üretim ve tüketim noktalarında oluşan frekans dalgalanmalarını minimize ederek ülkelere göre belirlenen frekans değerine en yakın frekansta sistemin çalışmasını sağlamaktır (Khodabakhshian vd.,2012).

YFK’de iki aşamalı kontrol adımı bulunmaktadır. İlk aşama governor (hız regülatörü) olarak bilinen santrallerde bulunan cihazlar tarafından yapılan kontrol adımıdır. İkinci kontrol ise literatürde de çalışmaların yapıldığı ilk aşamada governor cihazının yetersiz kaldığı durumlarda devreye giren kontrol adımı olup sitem çıkışı ile governor çıkış sinyalinin kıyaslayarak frekans aralığını belirlenen değere getirmeye çalışan kontrol adımıdır (Göktürk, 2009).

Sistem frekansında oluşan ani değişimlere karşın kontrol sistemlerinin görevini yapamaması ve frekansın belirlenen alt ve üst sınır değerleri aşması durumunda sistemde kararsızlık oluşmasına, sisteme bağlı santrallerin durmasına (trip) ve müdahale sağlanmazsa ilerleyen süreçte tüm elektrik sisteminin çökmesine (blackout) sebebiyet verebilmektedir. Dünya genelinde YFK’nın yetersiz kalması nedeniyle uzun sürelerde enerji kesintilerinin yaşanmasına dair birçok örnek bulunmaktadır. Mart 1999’ da Brezilya’da, 2001 ve 2002 baharlarında İran’da, Eylül 2003’te İsviçre ve İtalya’da, Temmuz 2012’de Hindistan’ın kuzeydoğu kesiminde, Kasım 2014’te Bangladeş’te ve Mart 2019’da dünyanın en uzun elektrik kesintisi Venezuela’da yaşanan örnekler arasındadır (Pathak vd., 2023).

Yeni enerji üretim santralleri devreye alındıkça enterkonnekte şebekeye bağlanmaktadır. Şebekede sistem kararlılığının sürdürülebilmesi adına sisteme eklenen güç santralleri diğer şebeke elemanlarıyla senkron frekansta çalışmak zorundadır (Karyeyen, 2009).

Bu tez kapsamında güç sistemlerinde YFK için adaptif denetleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir. Parametreleri farklı güç santral modelleri için zaman ağırlıklı mutlak hata toplamı (ITAE) amaç fonksiyonuna göre hippopotamus optimizasyon algoritması ile ayarlanan TANH-PID denetleyici literatürde etkinliği ispatlanan, analiz kriterlerinde en iyi sonuçları veren denetleyicilerle kıyaslanarak üstün tarafları ön plana çıkarılmış, sonuçlar tablo verileri ve simülasyon sonuçları ile desteklenmiştir.

1.2. Literatür Taraması

Son yıllarda tasarlanan sistemlerin daha kararlı ve etkin çalışabilmeleri adına kontrol

sistemleri tasarımı üzerine yapılan çalışma trendinde artış gözlemlenmektedir. Yazılım tabanlı geliştirilen (makine öğrenmesi, metasezgisel algoritmalar v.b) denetleyiciler üzerine yapılan çalışmalar vasıtasıyla, denetleyicilerin simülasyon ortamında modellenen farklı sistemlere entegre edilmesiyle sistem denetiminde oldukça verimli sonuçlar alınmıştır. YFK için son yıllarda literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde de bu durumun pozitif etkisi ön plana çıkmaktadır.

İki bölgeli güç sisteminin YFK'nü sağlamak amacıyla PI, geleneksel PID ve PSO-PID denetleyici tasarlanan bir çalışmada, denetleyicilerin performans analizleri yapılarak etkinliklerini göstermek üzere elde edilen sonuçlar kendi aralarında kıyaslanmıştır. Çıkarılan performans analizlerine istinaden parçacık sürü optimizasyon (PSO) algoritmasıyla parametreleri ayarlanan denetleyicinin diğer klasik denetleyicilerden daha iyi tepki verdiği görülmüştür (Lokanatha & Vasu, 2009).

İki bölgeli termal güç sistemi üzerine yapılan bir çalışmada PSO ve yapay arı kolonisi (ABC) algoritmalarıyla PI ve PID denetleyiciler tasarlanmıştır. Denetleyici parametreleri literatürde yer alan farklı amaç fonksiyonlarına (mutlak hata toplamı (IAE), hata kareleri toplamı (ISE), zaman ağırlıklı hata kareleri toplamı (ITSE), (ITAE)) göre optimize edilen denetleyiciler kendi aralarında kıyaslanmıştır (Gozde vd., 2012).

Çok kaynaklı güç sistemleri üzerinde YFK amacıyla gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ITAE amaç fonksiyonuna göre sezgisel tabanlı hibrit optimizasyon tekniği ile optimize edilmiş PID denetleyici yaklaşımı (HIO-PID) önerilmiştir, önerilen denetleyici Ateşböceği Algoritması (AA), PSO ve Yerçekimsel Arama Algoritması (GSA) ile optimize edilen PID denetleyicilerle kıyaslanarak önerilen denetleyicinin üstün tarafları ön plana çıkarılmıştır (Gupta vd., 2021).

Yapılan diğer bir çalışmada kesir dereceli PID (FOPID) denetleyici ile tek bölgeli hidroelektrik santral modeli için yük frekans kontrolü MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir. FOPID denetleyicinin parametreleri güç santral modeli üzerinde ITAE amaç fonksiyonuna uygun olarak, değişken yükler altında Gri Kurt (GWO), PSO ve Mayıs Sineği (MA) algoritmaları kullanılarak optimize edilmiştir. Tasarlanan denetleyicilerin performansları her bir yük değeri için kendi aralarında kıyaslanarak algoritmaların farklı yükler altında birbirlerine göre üstünlükleri kıyaslanmıştır (Köse vd., 2023).

Yapılan bir diğer çalışmada, gaz türbinli santral modelinin güç kontrolünde kullanılmak istenen FOPID denetleyici parametreleri optimizasyon algoritmaları (PSO, ABC, GWO, MFC, WOA, SCA, SSA, ASO) ve farklı amaç fonksiyonları altında (IAE, ISE,

ITAE, ITSE) optimize edilerek denetleyiciler tasarlanmıştır. Sistem üzerinde denetim yapılan kontrolörler için sonuç grafikleri verilerek yükselme süresi (YS), maximum aşım (MA) ve oturma süresi (OS) kriterlerine göre tepki değerleri verilerek hangi durumda hangi denetleyicinin daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir (Sezer, 2021).

Yapılan diğer bir çalışmada çok alanlı güç sistemlerinin YFK için yüksek dereceli diferansiyel geri beslemeli denetleyici (HODFC) ve gelişmiş bir kesirli yüksek dereceli diferansiyel geri beslemeli denetleyiciyi (FHODFC) ilk kez önerilmiştir. Önerilen denetleyiciler PSO optimizasyon algoritması kullanılarak ITAE amaç fonksiyonuna uygun olarak optimize edilmiştir. Çalışmada aynı sistemler için literatürde etkinliği ispatlanan denetleyicilerle önerilen denetleyiciler kıyaslanarak üstün yanları ortaya çıkarılmıştır. (Sahin, 2020).

Güç sistemlerinde frekans salınımlarını azaltmak amacıyla su döngüsü algoritması (WCA) ile optimize edilen bulanık mantık oransal-integral-türev (FPID) denetleyici önerilmiştir. İki alanlı yeniden ısıtmasız santral sistemine uygulanan WCA tabanlı PID ve FPID denetleyicilerin etkinliği test edilerek duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada tasarlanan denetleyicilerin kararlılığını ispatlamak adına iki bölgeyi yeniden ısıtmasız santral modeline fiziksel kısıtlar eklenerek ve farklı yük pertürbasyonları uygulanmıştır. Farklı amaç fonksiyonları ile optimize edilen denetleyici sistem üzerinde test edilerek önerilen yaklaşımın etkinliği gösterilmiştir (Barakat, 2022).

Yapılan bir diğer çalışmada integral kesir dereceli filtrelenmiş türev eylemli ve kesirli mertebeden integratörlü bulanık denetleyici (fuzzy $PI^{\lambda}DF$) YFK amacıyla tasarlanmıştır. Önerilen denetleyici parametreleri guguk kuşu optimizasyon algoritması (COA) ile optimize edilmiştir. Tasarlanan denetleyici termal iki bölgeyi yeniden ısıtmasız, iki bölgeyi çok kaynaklı, üç bölgeyi termik ve üç bölgeyi hidro-termal enerji santral modelleri üzerinde literatürde etkinliği sistemlerde ispatlanan diğer denetleyici yaklaşımlarıyla kıyaslanmış ve önerilen denetleyicinin üstün tarafları ön plana çıkarılmıştır. Önerilen yaklaşımın pratik zorlukların üstesinden gelebileceğini ispatlamak adına üç bölgeyi çok kaynaklı sisteme fiziksel kısıtlar olan üretim hızı kısıtı (GRC) ve regülatör ölü bandı (GDB) gibi doğrusal olmayan özellikler eklenerek denetleyici performansı izlenmiştir (Gheisarnejad & Khooban, 2019).

Diğer bir çalışmada ilk olarak iki alanlı ısıtmasız termal sistemi YFK için tasarlanan bulanık PI kontrolör parametreleri Hibrit PSO ve PS (hPSO-PS) optimizasyon algoritmaları ile optimize edilerek önerilen denetleyici, literatürde Bakteri Yemleme Optimizasyon

Algoritması (BFOA), Genetik Algoritma (GA), geleneksel Ziegler Nichols (ZN), Diferansiyel Evrim (DE) ve hibrit BFOA ve PSO tabanlı PI kontrolörler ile kıyaslanmıştır. Ek olarak önerilen denetleyici yüksek gerilimli doğru akım (HVDC) iletim sistemine sahip ve HVDC içermeyen çok kaynaklı çok alanlı hidro termal güç sistemine de uygulanarak yakın zamanda yapılan çalışmalarla kıyaslanmıştır (Sahu vd.,2015; Rout vd.,2013, Ali & Abd-Elazim ,2011; Panda vd., 2013).

Diğer bir çalışma kapsamında elektrik güç santralleri için kaskad bulanık kesirli dereceli PI-FOPID (CFFOPI-FOPID) denetleyici parametreleri yeni bir stokastik emperyalist rekabetçi algoritma kullanılarak belirlenmiştir. Tasarlanan denetleyici tek ve çok alanlı sistemlere uygulanarak tasarlanan CFFOPI–FOPID denetleyicinin üstün kararlı davranışları grafiklerle ortaya koyulmuştur (Arya, 2020).

İki Serbestlik Dereceli-Kısmi Dereceli PID (2-DOF-FOPID) kontrolör ve regülatörler hız düzenleme sabiti eşzamanlı optimizasyonu için Ateşböceği Algoritması (AA) kullanılarak güç sistemlerinin otomatik üretim kontrolü (AGC) önerilmiştir. Önerilen AA ile optimize edilen 2-DOF-FOPID denetleyicinin sistemde OS ve salınımların azaltılması açısından üstünlüğü PSO, BFO ve ABC algoritmaları ile de kıyaslanarak gösterilmiştir. Ek olarak önerilen denetleyici performansı daha yüksek pertürbasyon derecesine ve rastgele yük modeline karşı da test edilmiştir (Debbarma, 2014).

Yol Bulucu Algoritması (YBA) ile parametreleri optimize edilen kesir dereceli TID (FOTID) denetleyici iki bölgeyi ara ısıtılmalı termal, hidro ve gaz ünitelerine ek olarak fiziksel kısıtlar olan GDB ve GRC dahil edilen bir sisteme YFK için uygulanmıştır. Önerilen denetleyici geleneksel PID ve TID denetleyici ile karşılaştırılarak daha iyi sonuçlar verdiği ortaya konmuştur. Önerilen denetleyicinin farklı adım yükleri ve rastgele yük değişimleri altında etkinliğini gösterebilmek adına duyarlılık ve kararlılık analizleri yapılmıştır (Priyadarshani, 2021).

Hibrit Uygunluk Bağımlı-Sinüs Kosinüs Algoritması ile parametreleri optimize edilen kesir dereceli integral-filtreli eğimli-türev (FOI-TDN) denetleyici iki bölgeyi çok kaynaklı fiziksel kısıtları GDB ve GRC dahil edilen bir güç sistemine YFK için uyarlanmıştır. Önerilen algoritma literatürde etkinliği bilinen uygunluğa bağlı optimize edici AA, PSO gibi algoritmalarla kıyaslanarak daha iyi performans göstermiştir. Çalışma kapsamında önerilen hSC-FDO tabanlı FOI-TDN denetleyici sistem yük ve parametreleri değiştirilerek FOTID, FOPID, geleneksel PID denetleyicilerle kıyaslanmış önerilen denetleyicinin kararlı davranışları ön plana çıkarılmıştır (Daraz, 2022).

Oransal integral türev ivmeli (PIDA) denetleyici, yüksek dereceli sistemlerde büyük aşım ve yerleşme süresini kontrol altına almak amacıyla kullanılmaktadır. Yapılan çalışma kapsamında katsayı diyagramı algoritması (CDA) tabanlı PIDA denetleyici fiziksel kısıtlar GDB ve GRC dahil edilen iki bölgeli güç sistemi üzerinde YFK için tercih edilmiştir. Tasarlanan denetleyici IMC-PID, DS-PID, TLBO-PIDD ve MFO-PI denetleyicilerle kıyaslanarak üstünlüğü ve kararlılığı ortaya konmuştur (Kumar & Hote, 2018).

Adaptif bulanık mantık tabanlı diferansiyel evrim (DE) algoritması ile PID denetleyici parametreleri optimize ederek iki alanlı çok kaynaklı enerji üretim sistemi için YFK MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Önerilen bulanık mantık tabanlı diferansiyel evrim PID (fuzzy DE-PID) denetleyici, geleneksel PID ve DE algoritması tabanlı PID (DE-PID) denetleyici ile kıyaslanarak önerilen denetleyicinin daha az aşım, daha hızlı OS sağladığı gözlenmiştir (Ajith Priyadarsini vd., 2019).

Güç sistemlerinde YFK için farklı bir matematiksel yaklaşımla yeni bir adaptif kayma kipli kontrol tasarımı gerçekleştirilmiştir. Önerilen yaklaşımla tasarlanan yeni denetleyici klasik kayan kipli denetleyici ile karşılaştırılarak dış bozucular ve parametre değişimlerine daha iyi tepki verdiği, MA ve OS açısından daha iyi sonuçlar verdiği simülasyon sonuçları ile de ortaya konulmuştur (Guo, 2021).

İki bölgeli ara ısıtmasız termal bir güç sisteminde YFK için diferansiyel evrim (DE) algoritması tabanlı integral-eğimli-türev (I-TD) denetleyici önerilmiştir. Denetleyicinin performans indexlerini belirlemek için ITAE amaç fonksiyonu kullanılmıştır, sistem denetimi hem TID hem de I-TD kontrolör ile gerçekleştirilerek performans analizleri yapılmış ve önerilen I-TD yaklaşımının üstün tarafları ön plana çıkarılmıştır (Behera, 2021).

İki bölgeli yeniden ısıtma türbinli termik santral modeli güç sisteminde YFK için hibrit kaskad eğimli-integral-eğimli-integral-türev (TI-TID) denetleyici önerilmiştir. Önerilen denetleyici parametreleri DE algoritması ile optimize edilerek literatürde yer alan yeni denetleyicilerle kıyaslandığında daha üstün performans sergilediği ortaya konulmuştur. Çalışma kapsamında gerçek zamanlı yaklaşım için önerilen ve literatürde yer alan bazı denetleyiciler için OPAL-RT (OP5700) üzerinde Döngüde Donanım (HIL) simülasyonu gerçekleştirilerek önerilen denetleyicinin üstünlüğü ön plana çıkarılmıştır (Mohanty & Sahu, 2019).

Çok bölgeli yeniden ısıtım GDB ve GRC fiziksel kısıtların dahil edildiği termal güç sisteminde YFK için DE algoritması tabanlı filtreli ayarlı eğim integral türev (TIDF) denetleyici ITAE amaç fonksiyonu ile parametreleri optimize edilecek şekilde önerilmiştir.

Önerilen yaklaşımın etkinliğini ortaya koyabilmek adına PI, PID, TIDF denetleyicileri için de parametreler DE algoritması ile optimize edilerek denetleyici performansları kendi aralarında kıyaslanmıştır. Önerilen denetleyicinin etkinliği rastgele ve sinüzoidal yük bozulması gibi durumlarda da test edilerek gözlemlenmiştir (Sahu vd., 2021).

Hız türbinleri ve regülatörler için fiziksel kısıtlamaların dahil edildiği iki bölgeli çok üniteli bir güç santral modelinde YFK gerçekleştirmek amacıyla parametreleri Vahşi At (WHO) optimizasyon algoritmasıyla optimize edilen kaskat oransal-integral-çift türev-oransal-türev (PIDD2-PD) denetleyici tasarlanmıştır. Önerilen WHO tabanlı PIDD2-PD denetleyicinin performansı literatürde tanıtılan (kademeli PID-TID, ID-T) denetleyicilerle karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Rastgele yük bozulmaları, sistem parametresi değişiklikleri gibi birçok çeşitli senaryolarla denetleyicilerin sağlamlığı test edildiğinde önerilen denetleyicinin OS ve MA gibi değerlendirme kriterlerinde daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir (Khudhair vd., 2022).

Farklı bir çalışmada kalkülüs tabanlı kaskat (CC-TI-TID) denetleyici su döngüsü algoritması (WCA) ile parametreleri optimize edilerek serbestleştirilmiş dört bölgeli bir güç sisteminin YFK gerçekleştirmek amacıyla önerilmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle önerilen WCA algoritmasının literatürde yer alan GA, DE ve öğretme-öğrenme (TLBO) algoritmalarından üstünlüğünü göstermek adına, CC-TI-TID denetleyici bu algoritmalarla tasarlanarak destekli dört bölgeli güç sisteminde performans analizleri yapılmıştır. İkinci aşamada üstünlüğü ispatlanan WCA algoritması tabanlı CC-TI-TID, CC-PI-TD ve PID denetleyiciler tasarlanarak belirlenen amaç fonksiyonu, performans indexleri, OS ve MA gibi kriterler baz alınarak kendi aralarında kıyaslanmış, önerilen WCA tabanlı CC-TI-TID denetleyicinin daha iyi performans gösterdiği ortaya koyulmuştur (Kumari, 2020).

FOPID denetleyici parametreleri kaos parçacık sürüsü optimizasyonu (CPSO) algoritması ile optimize edilerek pompaj depolamalı enerji santrallerinde bölgesel YFK sağlayabilmek amacıyla önerilmiştir. Çalışma kapsamında tasarlanan denetleyici IEEE standartlarına uygun iki bölgeli pompaj depolama santral modeline simülasyonu ortamında uygulanarak etkinliği ispatlanmıştır (Gong vd., 2023).

Filtreli PID (PIDn) kontrolör ve PI kontrolörün entegrasyonu ile tasarlanan yeni bir kaskad denetleyici (PIDn-PI) yeniden ısıtılmalı termal generatör ve bir fotovoltaiik üniteden oluşan iki bölgeli bir güç santral modeline uyarlanmıştır. Kaos oyunu optimizasyon (CGO) algoritması ile PI, PIDn, ve PIDn-PI denetleyici parametreleri ITAE amaç fonksiyonu kullanılarak optimize edilmiştir. YFK çözümüne yönelik ilk etapta CGO- PIDn kullanmıştır.

Sistem parametrelerini yüksek oranda değiştirebilen (%50) bir bozucu etkiye maruz kalınması durumunda tasarlanan CGO-PIDn-PI etkinliğini ispatlamak adına çeşitli senaryolar uygulanmıştır. Yapılan analizlere istinaden onerilen yaklaşım, OS ve frekans kararlılığı gibi durumlarda daha iyi performans göstermiştir (Barakat vd., 2023).

1.3. Yük Frekans Kontrolü

Enterkonnekte şebekede, çeşitli enerji üretim santralleri ve birçok tüketim merkezi arası bağlantı kurulduğundan genel sistem ağı oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. şebekenin enerji üretim noktaları incelendiğinde farklı noktalarda farklı enerji üretim kaynaklarının yer alması ve zamanla farklı yapıda farklı çalışma prensiplerine sahip üretim santrallerinin devreye alınarak şebekeye eklenmesi sebebiyle günden güne şebeke analizi daha zor ve karmaşık bir yapıya dönüşmektedir.

Sistemde g birimleri birbirlerine bağlantı hatları vasıtasıyla bağlanmakta ve bağlı bulunan tüm birimler sistemin kararlı yapıda davranabilmesi adına senkronize çalışmak zorundadır (Yalin vd., 2013). Sistemin senkronize çalışması için öncelikle frekans kararlılığı sağlanmalıdır. şebekede frekans kararlılığını sağlamak için öncelikle üretilen gücün ile talep edilen gücü karşılamasının yanı sıra sistem işleyişi sırasında oluşabilecek enerji kayıplarının da dengede tutulması gerekmektedir. Üretilen gücün talep edilenden fazla olması durumunda genaratrlerin birim zamanda dönüş hızı artacağından frekans artacaktır, tam tersi durumda üretilen gücün talep edilen gten az olması halinde ise genaratrlerin birim zamanda dönüş hızı azalacağından sistem frekansında düşüş gözlemlenecektir (Güler vd., 2024).

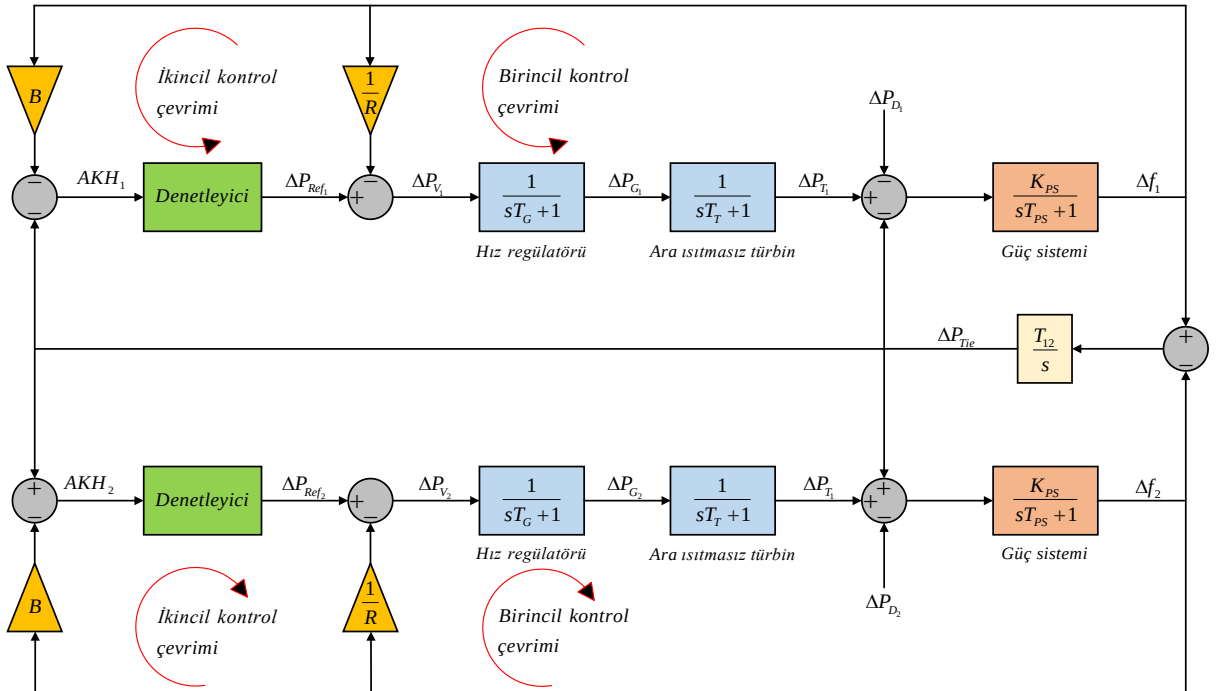
Enerji retim santrallerinde sisteme yükün girmesi ya da sistemden yükün çıkması gibi durumlarda üretilen aktif gte dalgalanmalar dolayısıyla sistem frekansında salınımlar meydana gelmektedir. Enterkonnekte şebekede bölgesel olarak başlayan frekans salınımları bağlantı hatları üzerinden farklı bölgeleri de etkileyebilmektedir, sistemin genel işleyişinde kararlı davranışa olumsuz etki yaratan bu frekans salınımlarının tolere edilebilecek frekans bölgesine getirilebilmesi adına yapılan kontrol işlemi yük frekans kontrolü olarak bilinmektedir (Yılmaz vd., 2021). Sistem frekansını kontrol etmek esasen genaratrn hızını buna bağlı olarak genaratrn rotor hızını kontrol etmekle eşdeğerdir, genaratrn dönüş hızı da türbine bağlı olması sebebiyle frekansı kontrol altında tutabilmek için türbinin dönüş hızını kontrol etmek gerekmektedir. Sistem frekansı ile sisteme giren yük arasında ters

orantılı ilişki bulunmaktadır, yük arttığında frekans azalmakta, yük azaldığında frekans artmaktadır (Özdemir & Yildiz, 2016). YFK'nün esas amacı sistem frekansını belirlenen değerde sabit veya sistemin kararlı çalışabileceği tolerans aralıklarında tutmak ve hız regülasyonunu sağlayarak optimum çalışma noktasını yakalamaktır.

Güç sistemlerinde frekans denetimini sağlayabilmek için birincil (primer) kontrolü ve ikincil (sekonder) kontrolü kontrol çevrim yöntemleri bulunmaktadır. İki ana kontrol yönteminin yetersiz kaldığı durumlarda, sisteme üçüncül kontrol katmanı olarak optimizasyon ve karar destek sistemleri entegre edilmekte ve çok katmanlı kontrol sistemleri tasarlanmaktadır.

Şekil 1'de iki bölgeyi ara ısıtmasız termal güç sistemi denetimi için kontrol çevrimleri gösterilmiştir. Modelleme üzerindeki katsayılar detaylandırılırsa;

- B , frekans kutuplama sabiti,
 - R , governor hız düzenleme sabiti,
 - T_{12} , bağlantı hattındaki senkronize edici moment katsayısı,
 - ΔP_{L1} , birinci bölgedeki yük değişimi,
 - ΔP_{L2} , ikinci bölgedeki yük değişimi,
- olarak ifade edilmektedir.



Şekil 1. İki bölgeyi güç sistemi için yük frekans kontrolü çevrimleri

1.3.1. Birincil (Primer) Kontrol Çevrimi

Şebekede oluşan enerji talebine istinaden güç sistemine binen yükün artması durumunda sistem frekansı düşüşe geçmektedir. Bu aşamada güç sistemi bünyesinde bulunan ekipmanlar vasıtasıyla türbin milinin hız değişiklikleri algılanarak dönüş hızı belirlenen referans hız düzeyine çıkarılmaya çalışılmaktadır. Türbin hız değişikliklerini ayarlama işlemi hidroelektrik güç sistemlerinde hidrolik yükselteç (ayar kanatçıkları) ile türbine girecek su miktarına göre belirlenirken, doğalgaz ile çalışan güç sistemlerinde valfler yardımıyla türbine giren buhar miktarı referans hıza ulaşılmasında etkili olmaktadır.

Türbin çıkışında alınan güç türbin dönüş hızına bağlıdır, gücün sabit bir değerde alınması noktasında ise governor adı verilen hız regülatör cihazları bulunmaktadır. Governor sistem çıkış frekansını sürekli izlemekte frekans tolerans bölgesi dışına çıkılması durumunda türbin mil hızının artırılması veya azaltılması noktasında ilgili mekanik yapılara sinyal vererek bir nevi denetleyici gibi davranarak sistem frekansını belirlenen değere getirecek aksiyonları tetikler. Sistemde tolerans gösterilen frekans bölgesinin dışına çıkılması durumunda (± 20 mHz) UCTE tarafından belirlenen standartlara göre birincil frekans kontrolü çok hızlı bir biçimde devreye girmelidir.

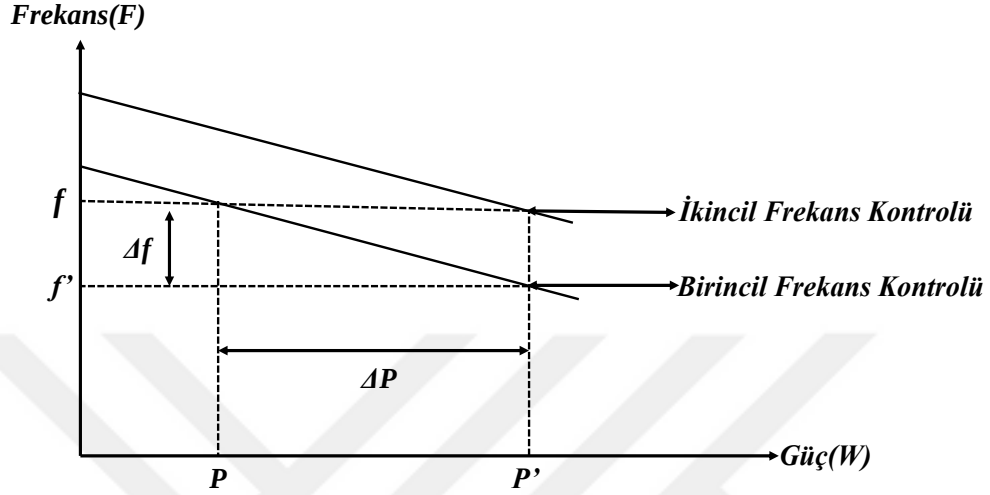
Güç santrallerinde çok fazla mekanik yapı olması sebebiyle birincil kontrol sistem denetimi açısından yetersiz kalmakta ve sistemde kalıcı durum hatasına sebebiyet vermektedir. Bu sorunu aşmak için ikincil kontrol yöntemleriyle sisteme uygun denetleyici tasarımları gerçekleştirilmektedir (Mohamed vd., 2016).

1.3.2. İkincil (Sekonder) Kontrol Çevrimi

Yük frekans kontrollerinde birincil kontrol aşamasında oluşan kalıcı durum hatasının minimize edilerek daha hassas kontrol sağlaması adına ikincil kontrol aşamasında tasarlanan denetleyiciler ön plana çıkmaktadır. İkincil kontrol birincil kontrole göre daha yavaş kalsa da güç iletiminde istikrar ve verimliliğin korunmasında kilit rol oynamaktadır. İkincil kontrol sayesinde güç sisteminin daha esnek koşullar altında çalışabilmesi frekans sapmalarına daha iyi tepki vererek kararlılığın sağlanması gibi yetenekler elde edilmektedir (Görel, 2017).

Şekil 2’de güç sistemi f nominal frekansta çalışırken çıkışa P nominal gücü iletmektedir. Sisteme yük binmesi durumunda, nominal frekanstan Δf kadar frekans

düşümü olacağı sistemin sürekli durumda bu frekansta P' güç üreterek çalışacağı gözükmemektedir. Sürekli halde sistemin nominal frekansa tekrar ulaşabilmesi adına P' güç çıkışı değerini sağlayan ikincil frekans kontrolcileri sisteme entegre edilmelidir.



Şekil 2. Birincil /ikincil kontrol çevrimleri için karakteristik grafik

Hız düzenleyici sabiti, sistem frekans değişiminin yük değişimine oranıdır, bu oran sistemde kullanılan generatöre göre farklılık göstermektedir, oran hesabı için denklem (1) kullanılmaktadır.

$$R = \frac{f' - f}{P' - P} = \frac{\Delta f}{\Delta P} \quad (1)$$

Hız düzenleyici sabitinin yüzdesel değişimi denklem (2)'de verilmiştir.

$$\%R = \frac{f_{yüksüz} - f_{tamyük}}{f} * 100 \quad (2)$$

Bu denklemde verilen parametreler;

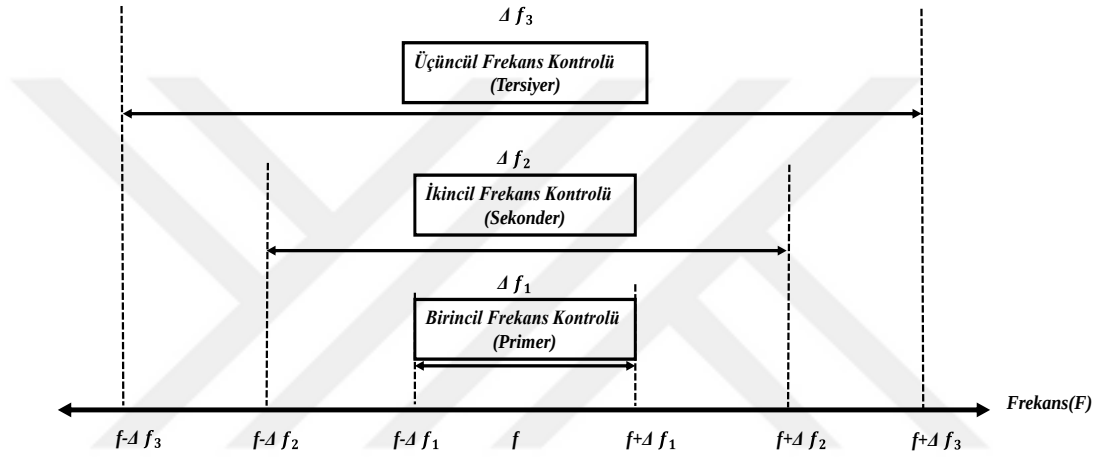
- $f_{yüksüz}$; yüksüz durumdaki frekans;
- $f_{tamyük}$; tam yük durumundaki frekans;
- f ; nominal sistem frekans

olarak ifade edilmektedir.

1.3.3. Üçüncül (Tersiyer) Kontrol Çevrimi

Güç sistemlerinde birincil ve ikincil kontrol katmanlarının üstünde yer alan, uzun zaman aralıklarında çalışan, tasarlanan sistemin ekonomik ve güvenli işletilmesine imkan tanıyan kontrol katmanını üçüncül kontrol olarak bilinmektedir (Kundur, 1994).

Sistemde yaşanan frekans dalgalanmalarına birincil kontrol 0-30 sn, ikincil kontrol 30 sn-15 dk, üçüncül kontrol ise 15 dk ve sonrası zaman aralıklarında devreye girebilmektedir. Şekil 3'te kontrol çevrimleri için frekans bölge karakteristikleri verilmiştir.



Şekil 3. Birincil/ikincil/üçüncül kontrol çevrimlerinin frekans bölge karakteristiği

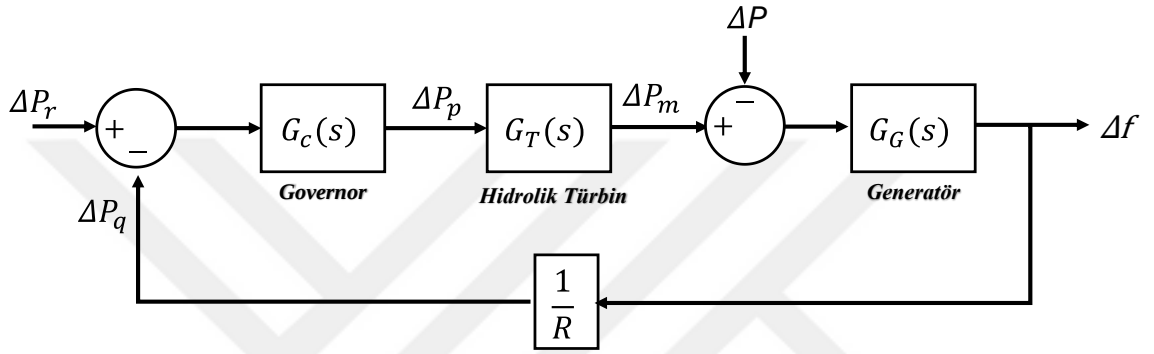
Üçüncül kontrol, şebekedeki dengeyi ekonomik, güvenli ve sürdürülebilir şekilde yönetmek için kullanılan planlama odaklı ve daha yavaş bir kontrol aşamasıdır. Kritik anlık frekans sapmalarından çok, orta-uzun vadeli yük ve üretim optimizasyonu ile ilgilidir.

Üçüncül kontrol adımı uzun süreli çalışmalar ve planlamalarla sistem kayıplarını minimize ederek sistem güvenlik limitleri korunmaya çalışılmaktadır. Sistem güvenliği ve kesintisiz enerji akışı adına yedek üretim planlamaları gerçekleştirilmektedir. Ek olarak minimum maliyetle enerji gereksiniminin karşılanmasına katkıda bulunmaktadır.

1.4. Güç Sistem Modeli

Elektrik güç sistemleri üzerinde denetim yapılabilmesi için öncelikle kontrol edilmek istenen sistemde yer alan mekanik yapıların matematiksel modellerinin çıkarılarak simülasyon ortamında tasarlanması gerekmektedir. Güç santrallerinde üretim kaynaklarına

bağımlı olarak sistem dizaynı ve sistemde yer alan mekanik yapılar değişmekle beraber genel yapıda governor, türbin ve üretim birimleri yer almaktadır. Elektrik güç sistemlerinde yer alan bileşenler genellikle doğrusal olmayan sistemlerdir, ancak modeller genel kabuller çerçevesinde doğrusal biçimde yapılmaktadır (Çakıcı vd., 2020; Guha vd., 2017; Gheisarnejad, 2018; Güler, 2023; Fathy & Soliman, 2021; Zhang vd., 2023). Şekil 4'te tek bölge bir hidroelektrik güç santral modelinin doğrusal yapısı modellenmiştir.



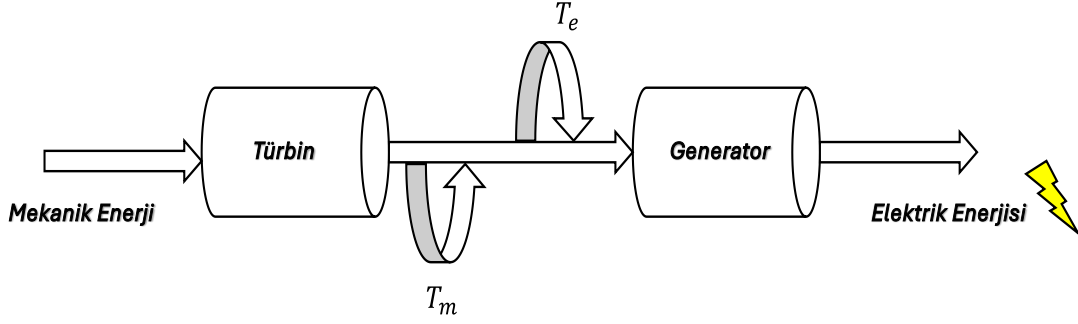
Şekil 4. Tek bölge hidroelektrik santral modeli (Köse vd., 2023).

1.4.1. Generatör Modeli

Elektrik enerji üretim santrallerinde, türbin sistemleri aracılığıyla oluşan mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi görevini generatör sistemleri gerçekleştirmektedir.

Güç sistemlerinde aktif güç dengesinin sağlanabilmesi için, türbinin ürettiği mekanik güce (P_m) eşdeğer bir elektriksel güç (P_e) üretilmelidir, güç dengesi sağlanması durumunda sistem frekansı anma değerinde kalacaktır. Türbinde üretilen mekanik tork mil aracılığıyla generatöre aktarılmaktadır, türbin miline bağlı generatör milin dönüşü sayesinde mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmektedir.

Şekil 5'te elektrik döndürme momenti T_e , mekanik döndürme momenti T_m sembolleri ile gösterilir. Elektriksel moment yükü, mekaniksel moment ise üretimi ifade etmektedir.



Şekil 5. Generatör sistemi fiziksel modeli

Güç sistemlerinde sistem çıkışında alınan aktif güç doğrudan sistem frekansı ile ilişkili olduğundan generatör modellemelerinde aktif güç-açısal moment ilişkisinden yararlanılmaktadır. Aktif güç ile açısal hız değişimi arasındaki ilişki denklem (3)'te verilmiştir.

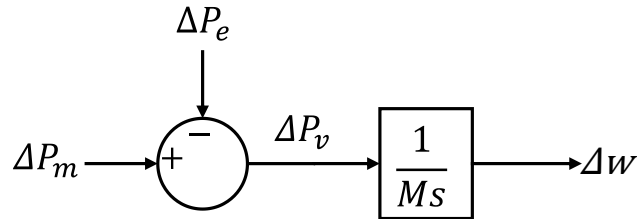
$$\Delta P_m - \Delta P_e = M \frac{d\Delta w}{dt} \quad (3)$$

Denklem (3)'te yer alan parametreler incelendiğinde M açısal momenti, Δw açısal hız değişimini, P_m türbinin ürettiği mekanik gücü, P_e elektriksel gücü ifade etmektedir.

Denklem (3) üzerinden başlangıç koşullarının sıfır kabul edildiği durumda Laplace dönüşümü alınırsa, denklem (4) elde edilir.

$$\Delta P_m(s) - \Delta P_e(s) = Ms\Delta w(s) \quad (4)$$

Matematiksel denklemler üzerinden generatör için çıkarılan doğrusal model Şekil 6'da sunulmuştur.



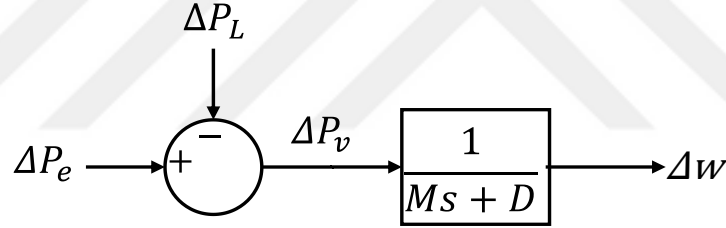
Şekil 6. Generatör doğrusal modeli

1.4.2. Yük Modeli

Enterkonnekte şebekede üretilen güç tüketim noktalarında omik, endüktif ve kapasitif yükler üzerinden harcanmaktadır. Omik yükler (ısıtma, aydınlatma vb.) direnç etkisi ile çalıştığından frekans değişimlerine karşı duyarsız hareket ederken endüktif ve kapasitif şebeke elemanları (motor, fan vb. cihazlar) frekansa bağlı çalıştığından frekans değişimleri çalışma performanslarını etkilemektedir. Açısal hız yük karakteristiği denklem (5) ile ifade edilmektedir.

$$\Delta P_e = \Delta P_L + MD\Delta w \quad (5)$$

Denklem (5)'te yer alan D parametresi yük sönümleme sabitini ifade etmektedir. Şekil 7'de generatör ve yük modeline dair doğrusal model paylaşılmıştır.



Şekil 7. Generatör ve yük doğrusal modeli

1.4.3. Governor Modeli

Enterkonnekte şebekelerde güç talebinin değişimine bağlı olarak güç santrallerinde yük değişimi oluşmakta yükün artış ve azalışına bağlı olarak sistem frekansında dalgalanmalar gözlemlenmektedir. Sistemde birincil kontrolör görevi gören governor cihazının doğrusal modeli incelendiğinde hidrolik yükselteç ve hız regülatörlerinin varlığı görülmektedir.

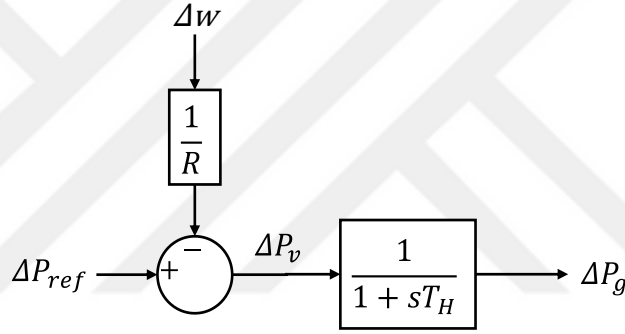
Governor cihazı generatör hızını anlık olarak takip ederek generatör çıkışında belirlenen aktif gücün alınabilmesi için sistemde yer alan vanaların konumlarını ayarlayarak mekanik türbine giren suyun/buharın hızını ayarlamakta dolayısıyla generatör dönüş hızını istenen değere getirmeye çalışmaktadır. Hidrolik yükseltecin transfer fonksiyonu denklem (6)'da verilmiştir.

$$G_H(s) = \frac{1}{1 + sT_H} \quad (6)$$

Türbine uygulanacak mekanik güç değişimi denklem (7) ile ifade edilmektedir.

$$\Delta P_g(s) = G_H(s)\Delta P_v(s) \quad (7)$$

Denklem (7)'de yer alan parametre detayları R governor hız regülasyon sabitini, Δf frekans değişimini, ΔP_v vana pozisyonu değişimini ve T_H hidrolik yükselteç zaman sabitini ifade etmektedir.



Şekil 8. Governor doğrusal modeli

1.4.4. Ara Isıtmasız Termal Governor Modeli

Ara ısıtmasız termal governor için transfer fonksiyonunu denklem (8)'de verilmiştir. Denklemden yer alan T_{TG} parametresi termal governorun zaman sabitini ifade etmektedir.

$$G_{TG}(s) = \frac{1}{1 + sT_{TG}} \quad (8)$$

Buhar türbinine ait doğrusal modeli denklem (9)'daki gibi ifade edilmektedir.

$$T_T \frac{d\Delta P_m}{dt} = -\Delta P_m + \Delta P_g \quad (9)$$

Bu denklem üzerinden başlangıç koşullarının sıfır olduğu kabul edilmesi durumunda Laplace domainindeki ifade denklem (10)'da verilmiştir.

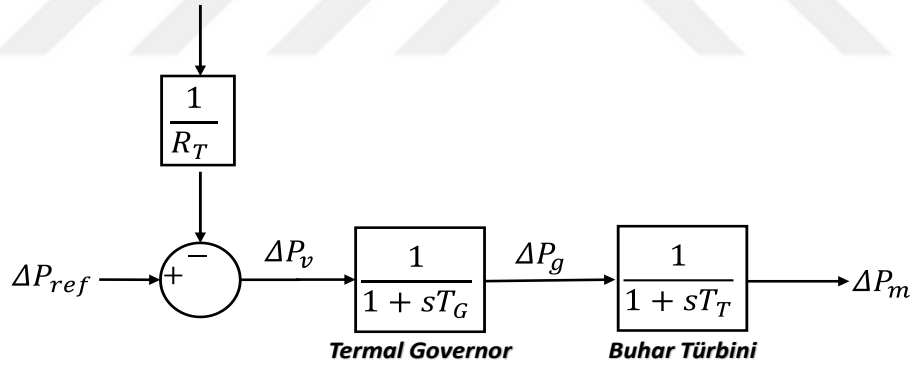
$$sT_T \Delta P_m(s) = -\Delta P_m(s) + \Delta P_g(s) \quad (10)$$

Elde edilen denklem taraf tarafa eşitlenerek çıkış/giriş formatına alındığında buhar türbini transfer fonksiyonu denklem (11) ile bulunur.

$$G_T(s) = \frac{\Delta P_m(s)}{\Delta P_g(s)} = \frac{1}{1 + sT_T} \quad (11)$$

Denklem (11)'de yer alan parametre detayları incelenecek olursa, T_T buhar türbini zaman sabitini, R_T termal ünite hız regülasyon sabiti olarak ifade edilmektedir.

Termal governor ve buhar türbini vasıtasıyla elde edilen transfer fonksiyonları üzerinden güç sistemi için doğrusal model Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Ara ısıtmasız termal güç ünitesi doğrusal modeli

1.4.5. Ara Isıtmalı Termal Güç Sistemi

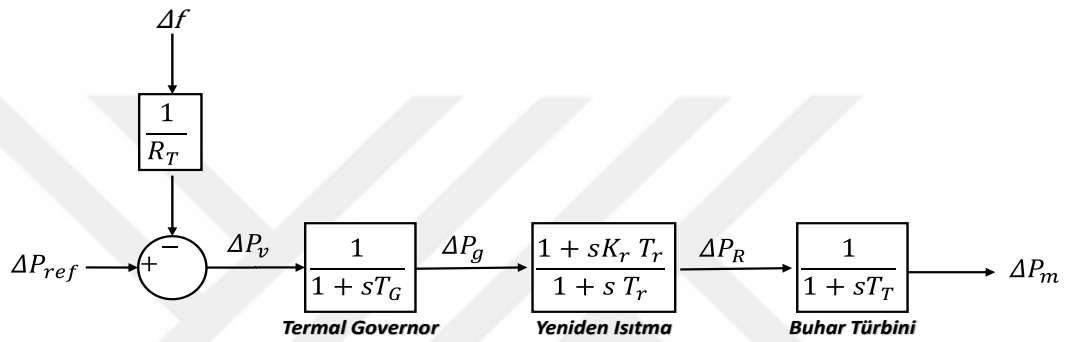
Ara ısıtmalı termal güç ünitesi doğrusal modeli incelendiğinde ara ısıtmasız modele ek olarak yeniden ısıtma ünitesini bünyesinde bulundurmasıdır.

Yeniden ısıtma, termal döngünün en üst seviyesine yakın bir noktada ısı verilmesine imkan sağlayarak termal verimliliğe katkı sağlar. Yeniden ısıtma işlemi yapan ısıtıcının transfer fonksiyonu denklem (12)'de verilmiştir.

$$G_R(s) = \frac{1 + sK_r T_r}{1 + s T_r} \quad (12)$$

Ara ısıtmasız modele ek olarak ara ısıtmalı güç santral modelinde yer alan parametre detayları incelenirse, K_r yeniden ısıtma işlemini yapan ısıtıcının kazanç sabitini, T_r ısıtıcı zaman sabitini ifade etmektedir.

Ara ısıtmalı termal güç ünitesinin doğrusal modeli şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Ara ısıtmalı termal güç ünitesi doğrusal modeli

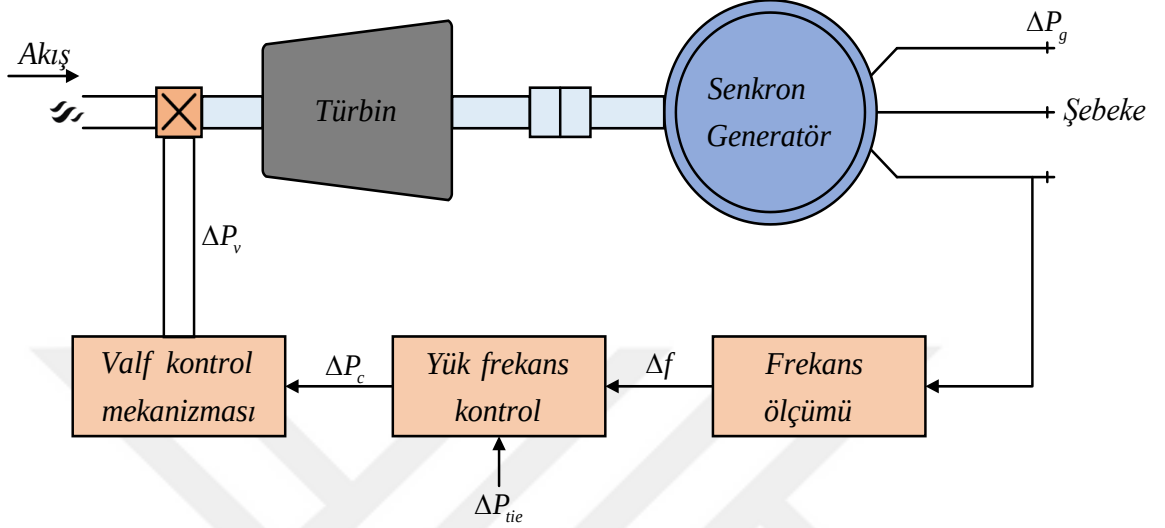
1.4.6. Hidro Güç Santral Modeli

Hidroelektrik santral modelleri, regülatör havuzunda yüksek bir noktada konumlandırılan suya ait potansiyel enerjinin bir cebri boru yardımıyla hidrolik türbinlere aktararak mekanik enerjiye dönüşümünü sağlayan sistemlerdir. Hidrolik türbin miline bağlı generatör sistemleri ise türbinin dönüşüyle elde edilen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedir.

Hidroelektrik santrallerin genel yapısı incelendiğinde;

- Cebri boru, regülatörde depolanan suyun türbine aktarılmasını sağlayan yapı,
- Governor, hız düzenleyici sistemdir, mekanik-elektriksel güç dengesini sağlamak için sistem dönüş hızlarını kontrol altında tutan sistem,
- Hidrolik türbin, potansiyel enerjiyi mekanik enerjiye dönüştüren yapı, olarak özetlenebilir.

Hidroelektrik santral sisteminin genel yapısı üzerinden çıkarılan matematiksel modeli Şekil 12’de sunulmuştur.



Şekil 11. Hidroelektrik santral modeli için yük frekans kontrolü şematik gösterimi

Şekil 11’de ise hidro güç santral sistemi YFK çalışma biçimi şematik olarak sunulmuştur. Güç sisteminde yükün değişimine bağlı olarak Δf (frekans değişimi) ve ΔP_{tie} (bağlantı hattı güç değişimi) anlık olarak izlenmekte ve bu iki ana kriterde yaşanan değişim bir araya getirildiğinde çıkış gücü için bir değişim sinyali ΔP_v üretilmektedir. Bu sinyal güç sistem şematik modelinde yer alan mekanik vananın konumunu, çıkış referans sinyaline uygun şekilde türbin dönüş hızının belirlenmesi adına su girişi miktarını belirleyerek türbinin dönüş hızını değiştirmektedir. Sistemde yükün azalması durumunda frekans artacağından dönüş hızını azaltmak için su girişinin azaltılması, sistemde yükün artışına bağlı olarak frekans azalacağından türbine giren suyun artırılması gerekecektir. Türbine mil üzerinden bağlantılı olan generatör dönüş hızı sistemin çıkış gücünü (ΔP_g) etkilediğinden yük değişimleri bu veriyi doğrudan etkileyecektir.

Hidroelektrik santralin doğrusal modeli incelendiğinde genel yapıda hidrolik governor ve cebri borulu hidroelektrik türbin yer almaktadır. Governor için transfer fonksiyonu denklem (13)’te verilmiştir.

$$G_{HG}(s) = \frac{\Delta P_h(s)}{\Delta P_v(s)} = \left(\frac{1}{1 + s T_h} \right) \left(\frac{1 + s T_R}{1 + s T_D} \right) \quad (13)$$

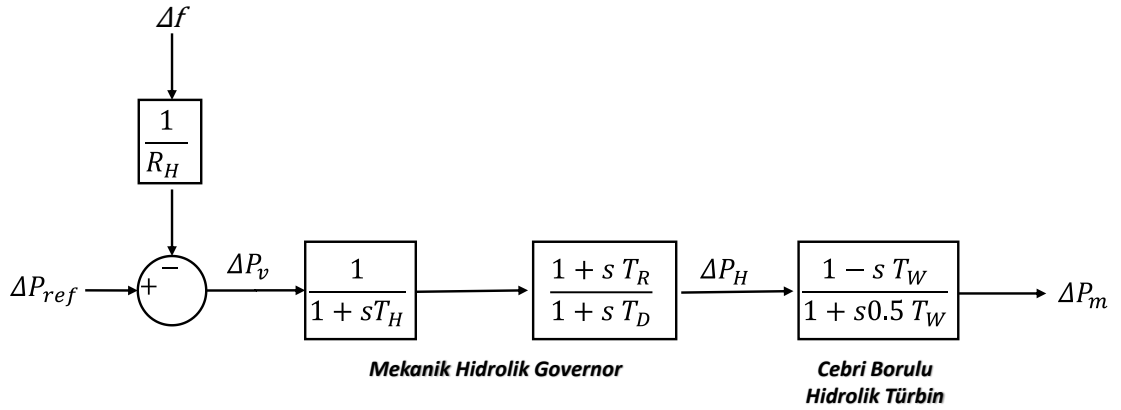
Cebri borulu hidro türbin ünitesi için transfer fonksiyonu denklem (14)'te verilmiştir.

$$G_W(s) = \left(\frac{1 - s T_W}{1 + s 0.5 T_W} \right) \quad (14)$$

Şekil 12' de yer alan sistem modeli parametreleri detaylandırıldığında;

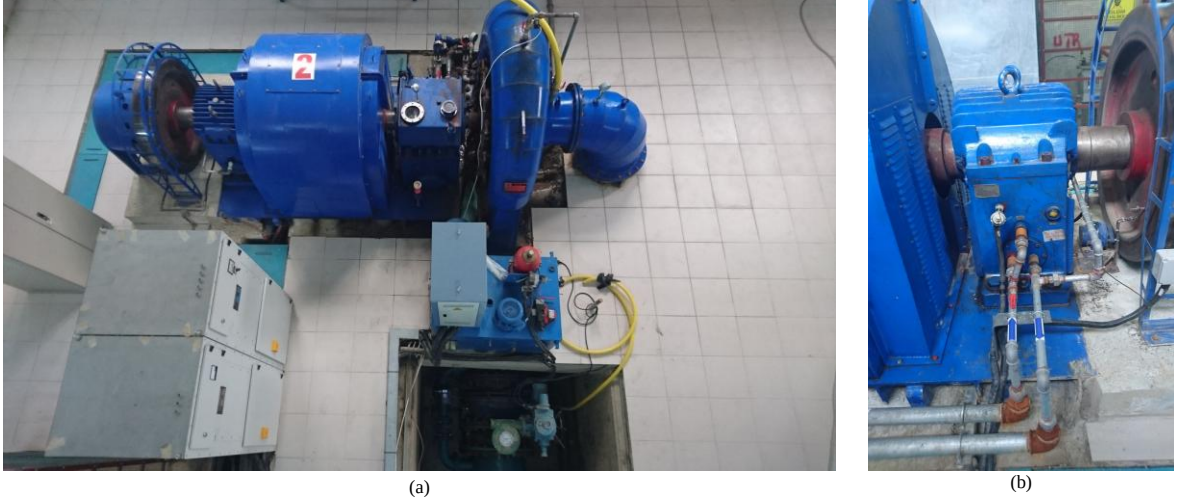
- ΔP_h : hidroelektrik governor çıkış gücü değişimi,
- T_h : hidroelektrik governor zaman sabiti,
- T_R : hidroelektrik governor zaman sıfırlama zamanı,
- T_D : hidroelektrik governor geçici düşüş zaman sabiti,
- T_W : cebri borudaki suyun nominal başlangıç zamanı,
- ΔP_m : hidrolik türbin sisteminin sağladığı mekanik güç,
- ΔP_{ref} : referans güç,
- ΔP_v : valf pozisyonu değişimi,
- Δf : frekans değişimi
- R_H : governor hız regülasyon sabiti,

olarak ifade edilmektedir.



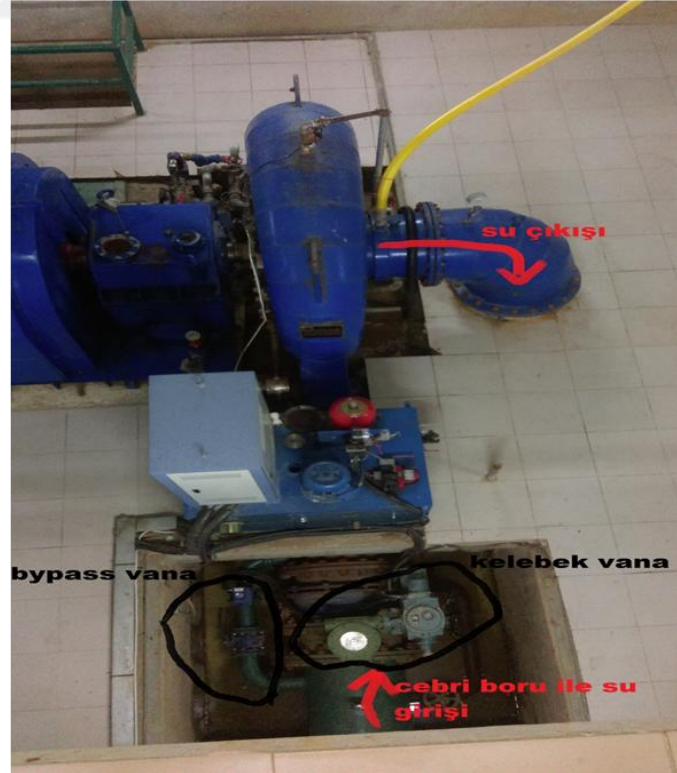
Şekil 12. Hidro güç ünitesi doğrusal modeli

Hidroelektrik santraller için kurulumu gerçekleştirilen yatay Francis türbin modeli ve türbin mekanik miline ait örnek görüntü Şekil 13'te sunulmuştur.



Şekil 13. (a) Hidroelektrik türbin modeli - (b) hidroelektrik türbin mekanik mil yapısı

Hidroelektrik santrallerin çalışma prensibi incelendiğinde, enerji üretimi sırasında türbine iletilen suyun, sistemin beklenmedik şekilde durması hâlinde güvenli bir şekilde tahliye edilebilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu işlevi yerine getiren mekanik vanalar, sistemin sürekliliği ve güvenliği açısından kritik bir role sahiptir.



Şekil 14. Hidroelektrik türbin su akış kontrol mekanizmaları

Şekil 14’te, hidroelektrik santrallerde su akışını kontrol etmek ve sistem güvenliğini sağlamak amacıyla kullanılan kelebek vana ve bypass vanasının, türbine su giriş ve çıkışındaki çalışma prensibi gösterilmektedir.

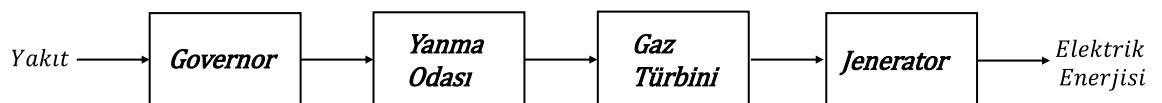
Kelebek vana; büyük çaplı boru hatlarında suyun akışını hızlı bir şekilde açmak veya kapatmak için kullanılan döner diskli bir vana’dır. Bu vana, türbin bakımdayken suyun geçişini engellemek, acil durumlarda türbine su girişini kesmek ve sistemi aşırı basınca karşı korumak gibi önemli işlevler üstlenir.

Bypass vanası ise, kelebek vanadan önce devreye girerek hattaki basıncı dengelemeye ve suyun sisteme kontrollü bir şekilde iletilmesine yardımcı olur. Böylece ani basınç değişimi önlenir, sistemin güvenli ve kademeli bir şekilde devreye alınması sağlanır, ayrıca boru hattı ve türbinin olası zarar görmesi engellenir.

Çalışma sırası şu şekildedir: Türbin devreye alınmadan önce bypass vanası açılır, sistem yavaşça suyla dolar ve iç basınç dengelenir. Basınç farkı güvenli seviyeye ulaştığında kelebek vana açılır ve su tam debiyle türbine yönlendirilir. Kapatma aşamasında ise önce kelebek vana, ardından bypass vanası kapatılarak sistem, ani duruşların yol açabileceği hidrolik darbelere karşı korunur.

1.4.7. Gaz Güç Ünitesi Modeli

Genel olarak gaz türbinli santrallerin çalışma prensibi incelendiğinde kompresör sistemine giriş yapılan gazın sıkıştırılarak yanma odasına aktarımı sağlanır. Yanma odasında yakıt ile karıştırılan gaz daha sonra ateşleme sistemleri ile yakılır ve sıcaklığın etkisiyle genleşir. Yanma odasında belli hacimde hareketlenen ve enerjisi artan gaz aktarıcı sistemler aracılığıyla türbin sistemlerine iletilir, türbin üzerinden gazda depolanan enerji mekanik enerjiye dönüştürülür. Gazda depolanan enerjinin tamamı reel sistemlerde mekanik enerjiye dönüşmez, aktarıcı sistemler ve kompresör sistemleri üzerinde bir miktar kayıp yaşanır. Sistem modellemelerinde genellikle bu kayıplar ihmal edilmektedir.



Şekil 15. Gaz türbini çalışma modeli

Valf konumlandırıcı sistemin transfer fonksiyonu denklem (15)'te verilmiştir.

$$G_v(s) = \frac{1}{c_G + s b_G} \quad (15)$$

Gaz governor transfer fonksiyonu denklem (16)'da verilmiştir.

$$G_G(s) = \frac{1 + s X_G}{1 + s Y_G} \quad (16)$$

Sistemde kullanılan yakıt ve kullanılan yakıta bağlı olarak yanma süresi doğrusal modeli çıkarıldığında, transfer fonksiyonu denklem (17)'de verilmiştir.

$$G_F(s) = \frac{1 - s T_{CR}}{1 + s T_F} \quad (17)$$

Kompresör deşarj işlemi için kullanılan doğrusal modelin transfer fonksiyonu denklem (18)'de verilmiştir.

$$G_{CD}(s) = \frac{1}{1 + s T_{CD}} \quad (18)$$

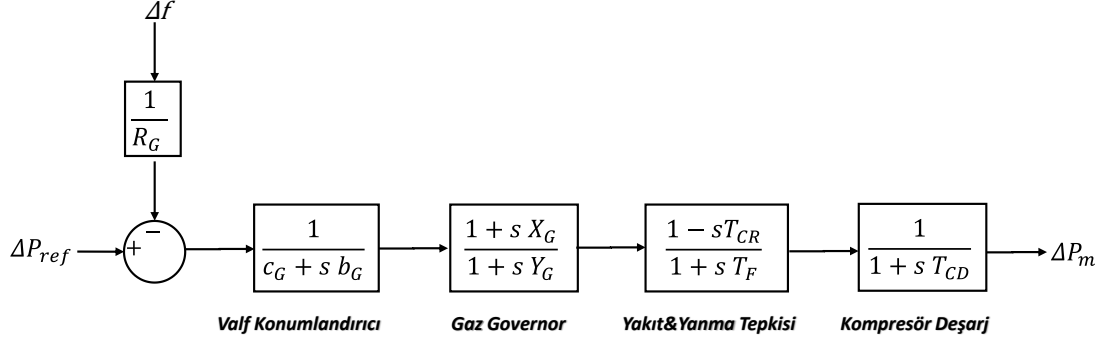
Denklemlerin parametre detayları;

- c_G : valf konumlandırıcı sabiti,
- b_G : valf konumlandırıcı zaman sabiti
- X_G : gaz governor ilerleme süresi sabiti,
- Y_G : gaz governor gecikme süresi sabiti,
- T_{CR} : gaz türbini yanma tepkimesi gecikme süresi,
- T_F : gaz türbini yakıt zaman sabiti,
- T_{CD} : gaz türbininin kompresör deşarj süresi,
- R_G : gaz ünitenin hız regülasyon sabiti

olarak ifade edilmektedir.

Termal governor ve buhar türbini için elde edilen transfer fonksiyonları üzerinden güç ünitesi için doğrusal model, denklemlerde elde edilen transfer fonksiyonlarının

birleştirilmesiyle ifade edilmektedir. Şekil 16’da gaz güç ünitesi doğrusal modeli sunulmuştur.



Şekil 16. Gaz güç ünitesi doğrusal modeli

1.4.8. Governor Ölü Banlı Termal Governor Modeli

Governor ölü bandı, bir elektrik güç santrali sisteminde, sistem frekansındaki değişimlerin tolerans gösterilen sınırı aşmadığı sürece governorun tepkisiz kaldığı kontrol aralığını ifade etmektedir. Governor ölü bandında sinüsoidal salınımlar etkili olduğundan doğrusal bir halde değildir. Doğrusal modeli oluşturabilmek adına fourier serileri ile düzenleme yapılabilen ve Histerezis denklemler, denklem (19)’daki gibi gösterilebilir.

$$y = F(x, x') \quad (19)$$

Denklem (19)’da belirtilen x değişkeni, sinüsoidal osilasyondur ve denklem (20)’deki gibi ifade edilmektedir.

$$y = A \sin(w_0 t) \quad (20)$$

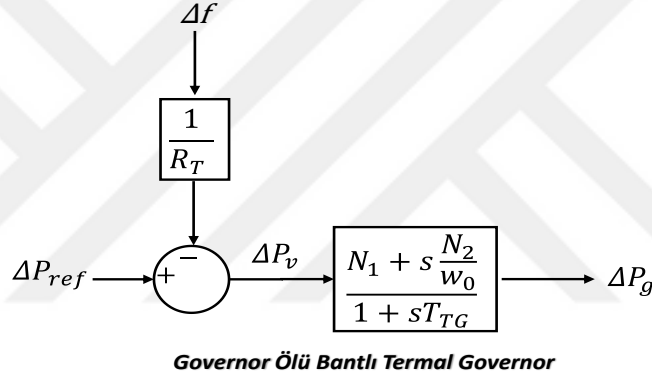
Denklem (20), Fourier serisine açılırsa denklem (21) elde edilmektedir.

$$F(x, x') = F_0 + N_1 x + \frac{N_2}{w_0} \frac{d_x}{d_t} + \dots \quad (21)$$

Bu denklemde F_0 değeri sıfır olarak kabul edilerek denklem (21)'in Laplace dönüşümü alındığında governor ölü bandının doğrusal denklemi denklem (22) üzerinden elde edilmektedir.

$$G_{CDB}(s) = \frac{N_1 + s \frac{N_2}{w_0}}{1 + sT_{TG}} \quad (22)$$

Denklem (22)'de yer alan N_1 ölü bant içinde governor kazancını, N_2 dinamik tepkiyi, T_{TG} governor zaman sabitini ifade etmektedir.



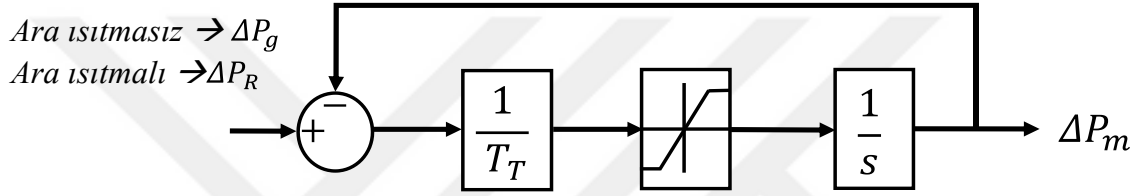
Şekil 17. Governor ölü bantlı termal governor doğrusal modeli

1.4.9. Üretim Oranı Kısıtlaması Modeli

Üretim Oranı Kısıtlaması modeli, yük frekans kontrolü üzerine yapılan çalışmalarda gerçek zamanlı uygulamalarda var olan bazı etkilerin sisteme dahil edilebilmesi amacıyla yapılan çok değerli fiziksel sınırlamaların modellenmiş hali olup ve özellikle generatör dinamiklerinin daha gerçekçi şekilde ortaya konulabilmesi amacıyla sistem simülasyon modellerinde dikkate alınmaktadır. Üretim oranı kısıtlaması termal ve hidro üretim kısıt modelleri olarak incelenebilmektedir.

Termal güç ünitesi üretim oranı kısıtlaması, kontrol sisteminin fiziksel gerçeklik koşullarına uygun bir biçimde tasarlanarak sistem üzerinde optimum noktada çalışmaya imkan vermektedir. Termal santraller bünyesinde barındırdığı mekanik sistemler sebebiyle

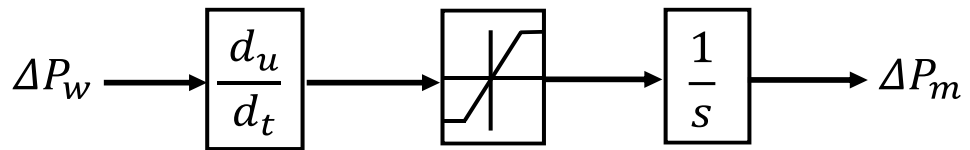
bir termal atalete sahiptir (ısıtma-soğutma zaman alır), bu sebeple sistemlerde buhar üretimi ve türbin tepkisi yavaştır. Bu durum özellikle ani yük değişimlerinde mekanik gerilim veya verim kaybına sebebiyet vermektedir. Bu olumsuz etkileri sınırlandırabilmek adına kontrol parametrelerinin ayarlanması noktasında fiziksel sınırlandırma modelleri kilit rol oynamaktadır. Modellemelerde termal güç ünitesi için, ara ısıtmalı termal güç ünitesi yeniden ısıtma bloğunun çıkışında, ara ısıtmasız termal güç ünitesi için ise termal governorun çıkışında yer almaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda termal güç üniteleri için üretim oranı kısıtlaması, %3/dk veya %10/dk olarak alınmaktadır (Priyadarshani, 2021).



Şekil 18. Termal güç ünitesi üretim oranı kısıtlaması doğrusal modeli

Hidroelektrik santraller için türbinin çıkışa verdiği güç, doğrudan su debisinin kontrolü ile ilişkilidir. Yüksek bir noktadan cebri boru vasıtasıyla sisteme alınan suyun potansiyel enerjisi türbini döndürmekte, ancak sisteme alınan suyun miktarı ve debisi mekanik yapılar yardımıyla (vanalar, yönlendirme kanatları) kontrol altında tutulduğundan birim zamanda yapılabilecek değişiklikler sınırlıdır. Fiziksel sınırlamaların dahil edilerek parametreleri ayarlanan denetleyici modelleri sistemde ani yük değişikliklerinde daha geç cevap vermesi sebebiyle frekans regülasyonu daha stabil olarak sağlanmakta ve sistem kararlılığına pozitif etki sağlamaktadır.

Yapılan çalışmalar için literatürde yer alan kısıtlar yükselme durumu için %270/dk, düşüş durumu için ise %360/dk olarak kabul edilmektedir (Priyadarshani, 2021).



Şekil 19. Hidro güç ünitesi üretim oranı kısıtlaması doğrusal modeli

1.4.10. Kontrol Bölgesi Modeli

Kontrol bölgesi modeli özellikle çok bölgeli olarak çalışan karmaşık güç sistemlerinde her bir bölgenin kendi içinde referans frekansa yönelik bağımsız kontrolünü ele almaktadır. Her bir kontrol bölgesi kendi içinde bulunan santral modellemesine en uygun yük frekans denetimini sağlayarak sistem performansını en iyi noktada tutmaya çalışmaktadır. Her bölgede bulunan denetleyici frekans dalgalanmalarını en aza indirgeyerek tüm sistemin daha kararlı çalışmasına katkı sağlamaktadır.

Denklem (23)'te tanımlanan H parametresi, generatörün eylemsizlik sabiti olarak belirtilmektedir. Bu sabit, generatör mil sisteminde depolanan kinetik enerjinin nominal değeri W_{Kn} ile sistemin nominal üretim gücü P_{PS} değerine oranı şeklinde hesaplanmaktadır.

$$H = \frac{W_{Kn}}{P_{PS}} \quad (23)$$

Kontrol bölgesinin doğrusal modeline ulaşmak için sistemin temel dinamiklerini tanımlayan aşağıdaki denklem (24) kullanılır:

$$[\Delta P_U(s) - \Delta P_C(s) - \Delta P_{tie12}(s)] \frac{f_N}{2Hs + f_N D} = \Delta f(s) \quad (24)$$

Denklem (24)'te yer alan parametre detayları;

- ΔP_U : üretim gücünü,
- ΔP_C : tüketim gücünü,
- ΔP_{tie12} : bağlantı hattındaki gücü,
- f_N : frekansın nominal değeri

ifade edilebilmektedir.

Denklem (24)'ten kontrol bölgesinin doğrusal denklemi (25)'teki gibi düzenlenebilir.

Bu ifadeden yola çıkarak kontrol bölgesinin transfer fonksiyonu şeklindeki doğrusal modeli aşağıdaki gibi elde edilir:

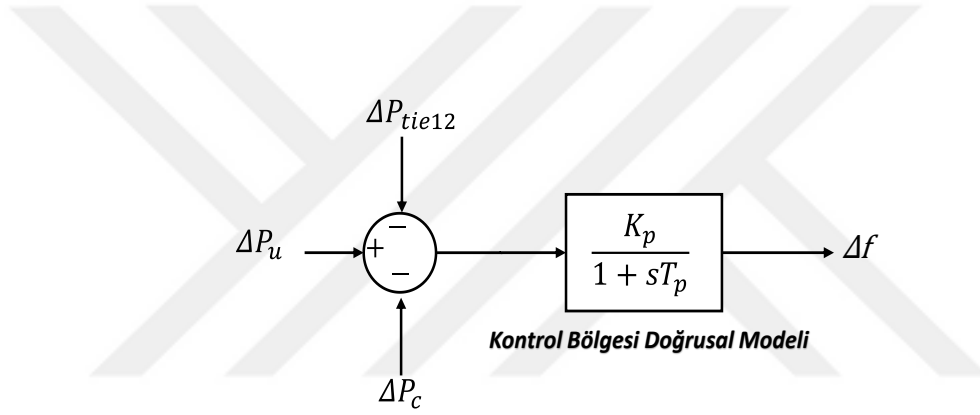
$$\frac{f_N}{2Hs + f_N D} = \frac{K_p}{1 + sT_p} \quad (25)$$

Denklem 25'te yer alan parametreler, K_p kontrol bölgesi kazancı ve T_p kontrol bölgesinin zaman sabiti olarak ifade edilmekte ve denklem (26) ve (27) ile açıkça detaylandırılabilir.

$$K_p = \frac{1}{D} \quad (26)$$

$$T_p = \frac{2H}{f_N D} \quad (27)$$

Kontrol bölgesi kazancının birimi Hz/p.u. MW, kontrol bölgesi zaman sabitinin birimi ise saniyedir. Şekil 20'de kontrol bölgesinin doğrusal modeli verilmiştir.



Şekil 20. Kontrol bölgesi doğrusal modeli

1.4.11. Bağlantı Hattı Modeli

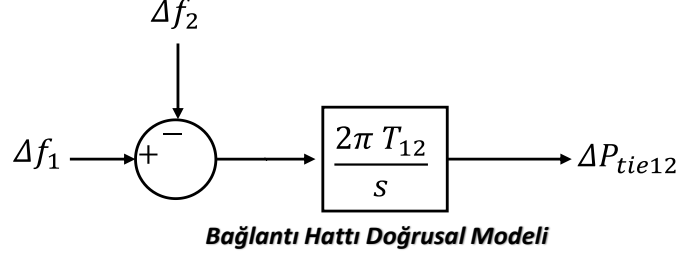
Güç sistemlerinde enerji sistemleri ve bölgeler arası bağlantı, bağlantı hatları üzerinden sağlanmaktadır. Çok bölgeli sistemlerde bölgeler arası üretim-tüketim dengesinin sağlanmasında, frekans ve voltaj kararlılığının sürdürülmesinde kritik rol oynamaktadır.

Bağlantı hattının doğrusal denklemi denklem (28)'de verilmiştir, denklemde yer alan parametre detayları;

- T_{12} : bağlantı hattı senkronize edici moment katsayısını,
- ΔP_{tie12} : bağlantı hattının güç değişimini,
- $\Delta f_1, \Delta f_2$: sırasıyla birinci ve ikinci bölgedeki frekans değişimini ifade edilmektedir.

$$\Delta P_{tie12}(s) = \frac{2\pi T_{12}}{s} [\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)] \quad (28)$$

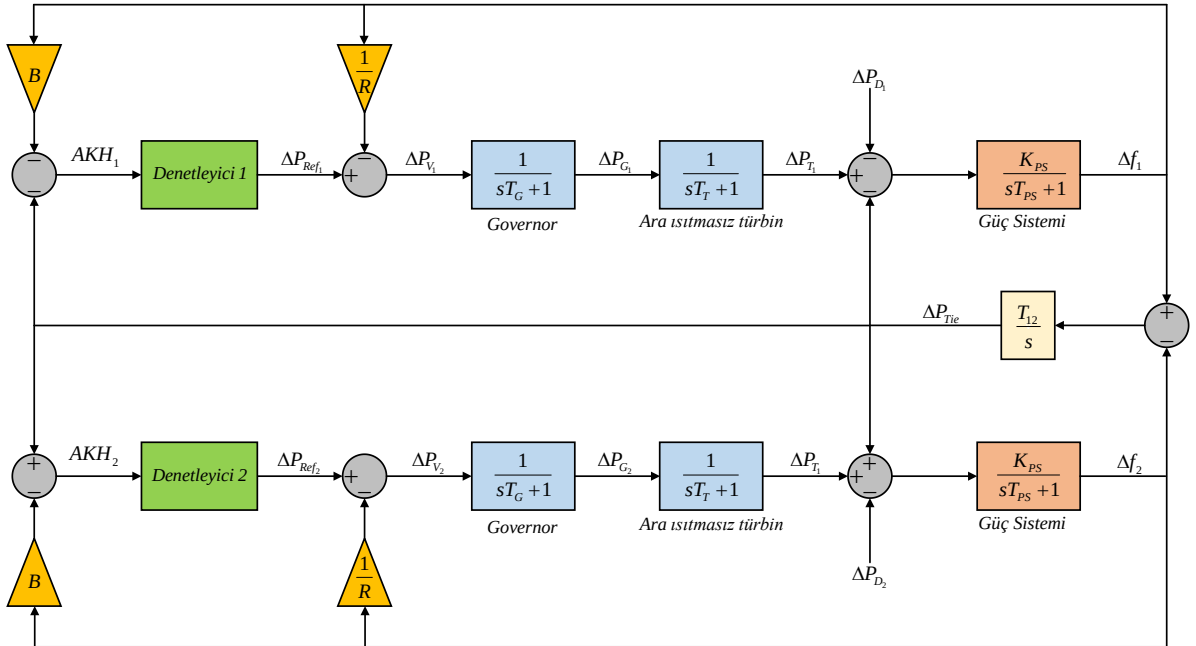
Şekil 21’de bağlantı hattının doğrusal modeli oluşturulmuştur.



Şekil 21. Bağlantı hattı doğrusal modeli

1.4.12. İki Bölge Güç Sistemi Modeli

Önceki bölümlerde matematiksel ifadeleri çıkarılan güç sistem ekipmanlarının birleştirilmesiyle iki bölge ara ısıtmasız termal bir güç sisteminin modellenmesi Şekil 22’deki gibi gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 22. İki bölge ara ısıtmasız termal güç sistemi modeli

Sistem üzerinde kontrol edilmesi gereken çıkış değişkenleri;

- ΔP_{D1} 'lik bir yük değişimi için frekans değişimi Δf ,
- ΔP_{tie12} bağlantı hattındaki gücün değişimi,

$$\Delta f = - \frac{\Delta P_{D1}}{D_1 + \frac{1}{R_1} + D_2 + \frac{1}{R_2}} \quad (29)$$

$$\Delta P_{tie12} = - \frac{\Delta P_{D1} (D_2 + \frac{1}{R_2})}{D_1 + \frac{1}{R_1} + D_2 + \frac{1}{R_2}} \quad (30)$$

Verilen Δf ve ΔP_{tie12} denklemlerinde birinci ve ikinci bölgede simetrik olarak yer alan D ve R sabit değerleri üzerinden yazılan ifadeler frekans kutuplama sabiti olarak ifade edilebilir. Denklemleri daha sade ifade ile yazmak istenmesi durumunda sabit değerler iki bölge için aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$B_1 = D_1 + \frac{1}{R_1} \quad (31)$$

$$B_2 = D_2 + \frac{1}{R_2} \quad (32)$$

Frekans kutuplama sabitleri ilk denklemlerde yerine koyulursa daha sade yazılan bağlantı hattındaki gücün değişimi ve frekans değişimi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta f = - \frac{\Delta P_{D1}}{B_1 + B_2} \quad (33)$$

$$\Delta P_{tie12} = - \frac{\Delta P_{D1} B_2}{B_1 + B_2} \quad (34)$$

Frekans değişimleri sonucu denetleyici girişine iletilen hata sinyali alan kontrol hatası (AKH) olarak adlandırılmaktadır. İki bölgele güç sistemlerinde her bir bölge için yazılacak denklemler frekans kutuplama sabitleri cinsinden aşağıda belirtilmiştir.

$$AKH_1 = -\Delta P_{tie12} - B_1 \Delta f \quad (35)$$

$$AKH_2 = \Delta P_{tie12} - B_2 \Delta f \quad (36)$$

AKH denklemlerinde ilk denklemlerde verilen bağlantı hattındaki gücün değişimi ve frekans değişimi ifadeleri yerine yazılırsa iki bölge için denklemler ağıdaki gibi açık biçimde ifade edilir.

$$AKH_1 = \left(\frac{\Delta P_{D1} B_2}{B_1 + B_2} \right) - (B_1) \left(-\frac{\Delta P_{D1}}{B_1 + B_2} \right) = \Delta P_{D1} \quad (37)$$

$$AKH_2 = \left(-\frac{\Delta P_{D1} B_2}{B_1 + B_2} \right) - (B_2) \left(-\frac{\Delta P_{D1}}{B_1 + B_2} \right) = 0 \quad (38)$$

Birinci ve ikinci bölge için sunulan AKH denklemlerinde esas amaç kendi bölgelerindeki hata sinyalini algılayarak hata değerini sıfırlamaktır.

1.5. Denetleyici Yapıları

1.5.1. Geleneksel ve Kesir Dereceli PID Denetleyiciler

PID denetleyiciler endüstride yaygın biçimde kullanımı olan, hayatımızda çok fazla sisteme kolaylıkla entegre edilen basit yapılu geleneksel denetleyicilerden biridir. Kullanım kolaylığı, genel ölçekte hassas kontrol gerektirmeyen isterleri karşılaması gibi sebeplerden ötürü sıklıkla kontrol uygulamalarında tercih edilmektedir.

Zaman domainindeki PID denetleyicinin matematiksel ifadesi denklem (39)'da verilmiştir.

$$U(t) = K(e(t) + \frac{1}{Ti} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (39)$$

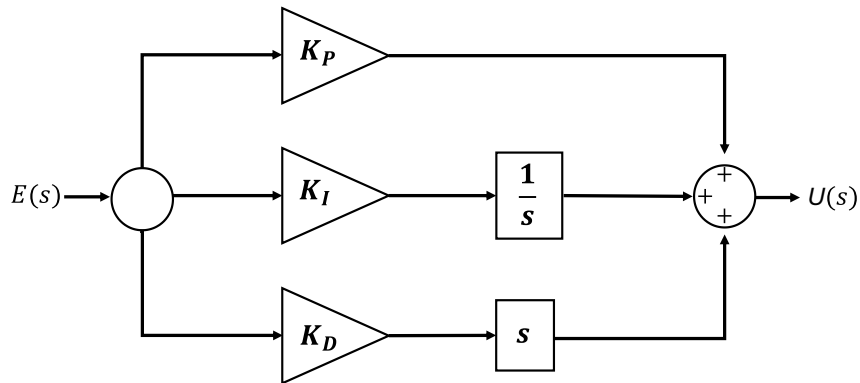
$$U(t) = P(t) + I(t) + D(t) \quad (40)$$

Bu denklemin s domainine çevrilmesi durumunda oluşacak PID denetleyici transfer fonksiyonu denklem (41)'de verilmektedir, denklem (41)'deki ifade paydaları s ortak paydasına alındığında denklem (42)'de yer alan ifade elde edilmektedir.

$$C(s) = (K_P + \frac{K_I}{s} + sK_D) \quad (41)$$

$$C(s) = \frac{s^2 K_D + K_P s + K_I}{s} \quad (42)$$

Genel haliyle PID denetleyici tasarımı için denklem (41)'de yer alan s domeini üzerinden elde edilen blok diyagram Şekil 23'deki gibi ifade edilebilmektedir.



Şekil 23. PID denetleyici blok diyagramı

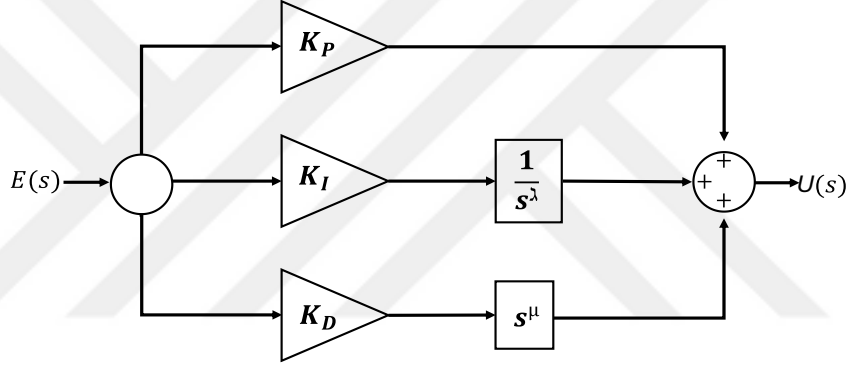
PID denetleyicilerin hassas kontrol gerektiren uygulamalarda yetersiz kalması sebebiyle, literatürde kontrol uygulamalarında sıklıkla tercih edilen basit yapılı PID tabanlı oluşturulan FOPID denetleyici gibi tasarımları ön plana çıkarmaktadır. Geleneksel PID

denetleyicilerde integral ve türev parametre tasarımlarında yer alan üstel ifadeler 1 değerini alırken, FOPID denetleyiciler için önerilen yeni tasarımda üstel ifadeler [0-1] aralığındaki kesirli değerleri de alabilmekte ve uygulamalarda hassas denetim adına geleneksel denetleyicilere nazaran tatmin edici sonuçları ortaya koymaktadır.

FOPID denetleyici için transfer fonksiyonu denklem (43)'te verilmiştir.

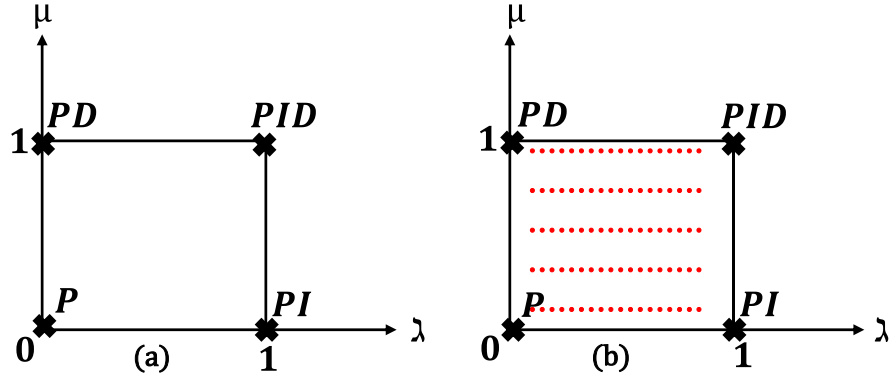
$$C(s) = (K_P + \frac{K_I}{s^\lambda} + s^\mu K_D) \quad (43)$$

Bu denklem üzerinden Şekil 24'te yer alan FOPID denetleyici blok diyagramı elde edilebilmektedir.



Şekil 24. FOPID denetleyici blok diyagramı

Geleneksel PID denetleyicilere nazaran FOPID denetleyicinin daha dayanıklı hareket ederek hassas kontrole imkan vermesinin ana nedeni daha geniş arama uzayına sahip olması ve fazladan 2 parametrenin (λ , μ) optimizasyonuna imkan sağlamasıdır. Bu durum için oluşturulan yük kuvvet haritaları Şekil 25'te sunulmuştur. Şekil 25 (a)'da geleneksel PID için λ ve μ değerleri 1 tamsayı değerini almakta, Şekil 25 (b)'de ise bu değerler [0-1] aralığındaki tüm değerleri alabildiğinden daha hassas kontrol kabiliyeti elde edilmektedir (Arpacı,2018).

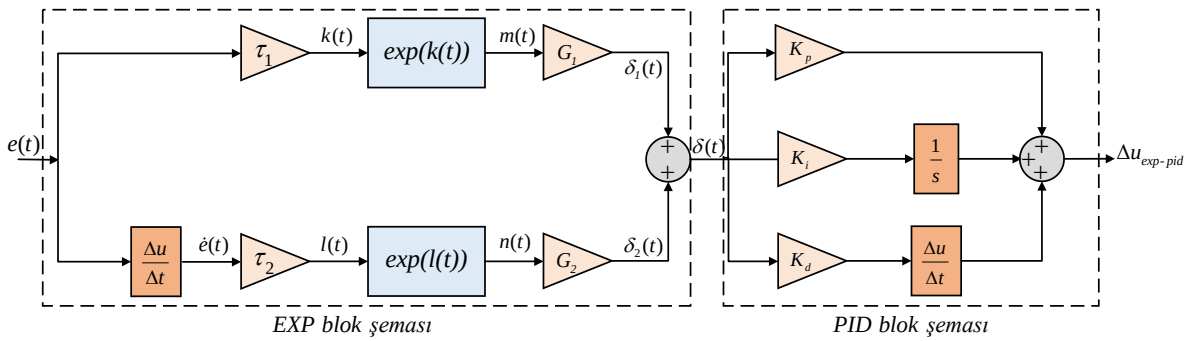


Şekil 25. (a) PID - (b) FOPID üssel parametre değerleri

1.5.2. Üstel PID Denetleyici

Üstel (Exponential) PID, özellikle PID bileşenlerinin etkisini sınırlandırmak veya yumuşatmak amacıyla, hata fonksiyonuna veya türev/integral terimlerine üstel ağırlıklar uygulayan bir yaklaşımdır.

Karmaşık kontrol yapılarıyla karşılaştırıldığında, bu kontrol yöntemi PID denetleyicinin sadelik özelliğini büyük ölçüde zayıflatmaz ve mühendislik uygulamaları için pratik bir çözüm sunar. Ayrıca, herhangi bir klasik PID benzeri kontrol cihazına ya da diğer kontrol yapılarında doğrusallık dışı öğeler eklenerek performansın artırılabilme potansiyeli sayesinde, bu şekilde yapılacak araştırmalar için yeni alanlar açılacağı öngörülmektedir (Çelik, 2024).



Şekil 26. Üssel PID denetleyici blok diyagramı

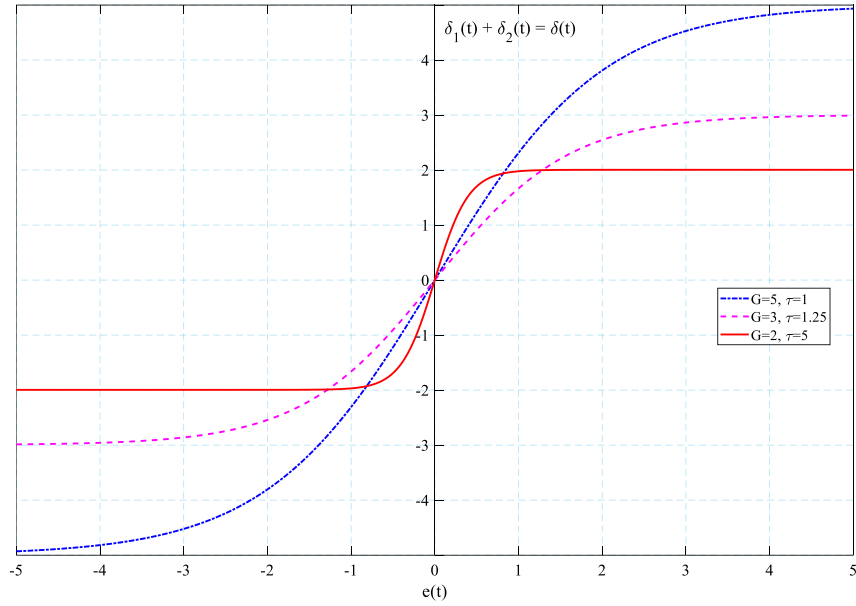
EXP bloğunda, en önemli unsur $e(t)$ den $\delta(t)$ 'ya doğrusal olmayan dönüşümü gerçekleştiren fonksiyondur. Bu amaçla iki ayarlanabilir üstel fonksiyon, sırasıyla $e(t)$ ve $\dot{e}(t)$ sinyalleri için dikkate alınmaktadır.

$$\delta_1(t) = G_1 \left(\frac{2}{1 + e^{-\tau_1 e(t)}} - 1 \right) \quad (44)$$

$$\delta_2(t) = G_2 \left(\frac{2}{1 + e^{-\tau_2 \dot{e}(t)}} - 1 \right) \quad (45)$$

Denklem (44) ve (45)'te yer alan G_1, G_2, τ_1 ve τ_2 ayarlanabilen sabitlerdir. Bu parametreler denetleyici tasarımında performansı iyileştirebilmek adına daha fazla serbestlik derecesi sağlamaktadır. G_1 ve G_2 değerleri fonksiyonun maximum değerlerini temsil ederken τ_1 ve τ_2 fonksiyonların eğimini değiştirebilmek amacıyla denkleme dahil edilmiştir.

Denetleyici modellemesinden de anlaşılabacağı üzere G değeri kazanç katsayısı gibi davranarak fonksiyon çıktısını büyütme veya zayıflatma rolü ile limitleri sınırlarken, τ değeri eğrinin eğimini ayarlamak için kullanılmaktadır. İlgili parametre değerlerinin değişimlerine bağlı etkileri Şekil 27'de gösterilmiştir.



Şekil 27. Farklı G ve τ değerleri için exp eğrileri (Çelik, 2024).

Şekil 26’da verilen sistem modeli üzerinden EXP-PID denetleyici çıktısı denklem (46)’da verilmiştir.

$$\Delta u_{EXP-PID}(t) = K_P \delta(t) + K_i \int_0^t \delta(t) dt + K_d \frac{d\delta(t)}{dt} \quad (46)$$

K_P, K_i, K_d PID denetleyicinin kazanç parametre değerlerini ifade ederken, $\delta(t)$ değeri hata sinyali $e(t)$ ‘nin doğrusal olmayan ifadesi olup, tasarımda yer alan iki alanın toplamı şeklinde denklem (47)’deki gibi ifade edilmektedir.

$$\delta(t) = \delta_1(t) + \delta_2(t) \quad (47)$$

Geleneksel PID kontrol yasası göz önüne alındığında denklem (48)’de yer alan üstel PID denetleyici ifadesi elde edilecektir.

$$\Delta u_{PID}(t) = \overline{K_P}(t)e(t) + \overline{K_i}(t) \int_0^t e(t) dt + \overline{K_d}(t) \frac{de(t)}{dt} \quad (48)$$

Denklemden K_P, K_i, K_d zamanla değişen uyarlamalı parametrelere sahip olduğu varsayılırsa, aşağıda yer alan eşitliklerin sağlanması gerekmektedir.

$$\begin{aligned} \overline{K_P}(t)e(t) &= K_P \delta(t) \\ \overline{K_i}(t) \int_0^t e(t) dt &= K_i \int_0^t \delta(t) dt \\ \overline{K_d}(t) \frac{de(t)}{dt} &= K_d \frac{d\delta(t)}{dt} \end{aligned} \quad (49)$$

Buradan hareketle doğrusal hata sinyalinin doğrusal olmayan hale çevrilirken elde edilen eşitlik ifadeleri;

$$\begin{aligned} \overline{K_P}(t)e(t) &= K_P \delta(t) \\ \overline{K_i}(t)e(t) &= K_i \delta(t) \\ \overline{K_d}(t)e(t) &= K_d \delta(t) \end{aligned} \quad (50)$$

Bu eşitlik sonucunda da;

$$\begin{aligned}\overline{K_p}(t) &= K_p f(t) \\ \overline{K_i}(t) &= K_i f(t) \\ \overline{K_d}(t) &= K_d f(t)\end{aligned}\tag{51}$$

Denklemlerden de anlaşılacağı üzere $f(t) = \frac{\delta(t)}{e(t)}$ olarak tanımlanmaktadır. Denklem (51)'de de görüleceği üzere PID denetleyici parametreleri $f(t)$ fonksiyonu ile değişmektedir. Denetleyici modelinde $f(t)$ fonksiyonu zamana bağlı olarak ifade edilen $\frac{\delta(t)}{e(t)}$ bölümü şeklinde ifade edildiğinden $\delta(t)$ exponential bloğunda $e(t)$ hata sinyalinin doğrusal olmayan fonksiyonu olarak hesaplanmaktadır.

Matematiksel teorik analizler sonucu önerilen denetleyici için aşağıda yer alan yorumlar yapılabilmektedir.

- EXP-PID denetleyici sabit parametrelere sahip değildir; bunun yerine, hata sinyali ve bu sinyalin türevine bağlı olarak doğrusal olmayan bir dönüşüm aracılığıyla parametrelerini değiştirme yeteneğine sahiptir.
- Hata ve hata değişim hızı büyük olduğunda, denetleyici sistem çıktısını hedefe hızlıca yönlendirmek için güçlü bir düzeltici kontrol sinyali üretir. Sistem referansına ulaştıktan sonra (yani hata ve hata türevi küçüldüğünde), denetleyici çıkışı otomatik olarak zayıflatılır. Bu da sistem yanıtında aşırı salınımları ve istenmeyen aşmaları engellemeye yardımcı olur.
- Hata ve hata türevi büyük olduğunda, kontrolör büyük bir düzeltici kontrol etkisi üretir; böylece sistem çıktısı hedefe hızla yönlendirilir. Sistem referans değerine yaklaştığında (hata ve hata türevi azaldığında), denetleyici çıkışı otomatik olarak azaltılır. Bu da aşırı salınım ve istenmeyen aşmaları önler.

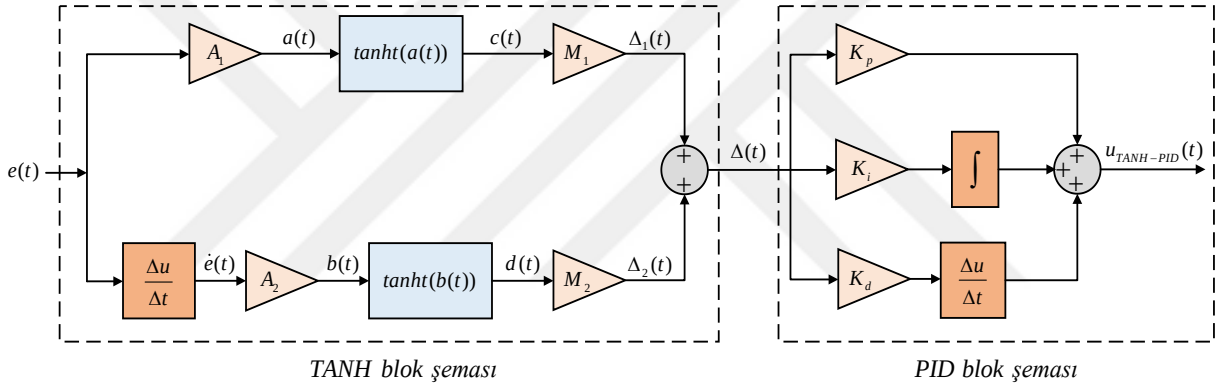
Bu nedenle, burada sunulan kontrol stratejisi, hem hızlı hem de salınımsız bir yanıt gibi birbiriyle çelişen iki kontrol hedefini aynı anda gerçekleştirme kapasitesine sahiptir.

$G_1, G_2, \tau_1, \tau_2, K_p, K_i, K_d$ denetleyici parametrelerini tanımlayan pozitif sabit değerlerdir. Denetleyici tasarımında belirtilen bu parametreler, istenen kontrol hedeflerini sağlamak için sisteme uygun bir biçimde ayarlanmalıdır. Ancak parametreleri ayarlamak her

zaman kolay bir görev olmadığından, genellikle optimizasyon tekniklerinden faydalanarak sisteme en uygun değerler belirlenmektedir.

1.5.3. Önerilen TANH PID Denetleyici

Çalışma kapsamında geleneksel PID denetleyiciye doğrusal olmayan matematiksel bir yaklaşım TANH fonksiyonu entegre edilerek yeni bir denetleyici önerilmiştir. Önerilen denetleyicinin blok diyagramı Şekil 28’de verilmiştir. TANH bloğunda, en önemli unsur $e(t)$ den $\Delta(t)$ ’ya doğrusal olmayan dönüşümü gerçekleştiren fonksiyondur. Bu amaçla iki ayarlanabilir üstel fonksiyon, sırasıyla $e(t)$ ve $\dot{e}(t)$ sinyalleri için dikkate alınmaktadır.



Şekil 28. TANH PID blok diyagramı

Denetleyici girişine gönderilen hata sinyali ve bu sinyalin zamana göre türevi TANH doğrusal olmayan bloklardan geçirilmektedir.

$$\Delta_1(t) = M_1 \cdot \tanh(A_1 e(t)) \quad (52)$$

$$\Delta_2(t) = M_2 \cdot \tanh(A_2 \dot{e}(t)) \quad (53)$$

Bu denklemlerde yer alan parametreler incelendiğinde, M_1 ve M_2 değişkenleri genlik katsayıları olup çıkış sinyalinin büyüklüğünü, A_1 ve A_2 değişkenleri ise eğim parametreleri olup fonksiyonun hassasiyetini kontrol etmektedir.

Blok diyagramın TANH bloğunda alt ve üst kolundan gelen hata sinyalleri toplanarak $\Delta(t)$ sinyalini oluşturulmakta ($\Delta(t) = \Delta_1(t) + \Delta_2(t)$) ve klasik PID denetleyici girişine aktarılmaktadır.

Bu durumda çıkışta elde edilecek olan TANH-PID denetleyicinin matematiksel ifadesi;

$$\Delta u_{TANH-PID}(t) = K_P \Delta(t) + K_I \int_0^t \Delta(t) dt + K_d \frac{d\Delta(t)}{dt} \quad (54)$$

Ele alınan yeni denetleyici yapısında, klasik PID' nin avantajları korunurken, giriş sinyallerine uygulanan TANH dönüşümleri sayesinde uyarlanabilir ve sınırlandırılmış kontrol davranışı sunulmaktadır.

Denetleyici denklemlerinde $f(t) = \frac{\Delta(t)}{e(t)}$ tanımı yapılması durumunda, sistem zamanla değişen bir PID denetleyicisi gibi davranır, bu durumda parametreler denklem (55)' deki gibi ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} K_P(t) &= K_P f(t) \\ K_I(t) &= K_I f(t) \\ K_d(t) &= K_d f(t) \end{aligned} \quad (55)$$

TANH fonksiyonu (-1,1) aralığında değerler almaktadır, küçük sinyal girişlerinde çıkışta yaklaşık olarak verilen giriş alınmakta (kısmen doğrusal davranış sergilemekte), büyük değerlerde sinyaller uygulandığında ise doyuma ulaşarak kontrol sinyalini sınırlama şeklinde davranış sergilemektedir (girdi sonsuz olduğunda çıkış 1, girdi eksi sonsuz olduğunda çıkış -1 olarak alınır). Denklem (56)'da tanh fonksiyonu verilmiştir.

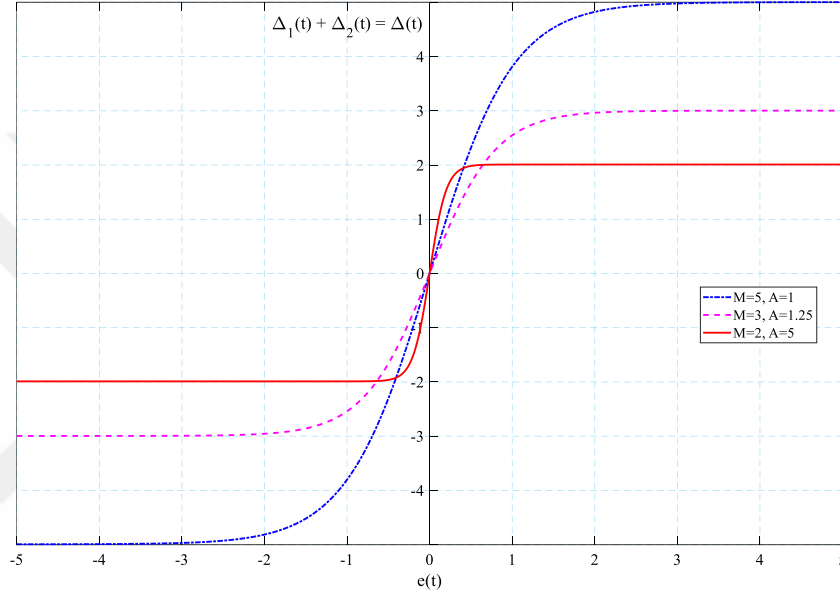
$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (56)$$

TANH-PID denetleyicinin spesifik fonksiyon davranışı sayesinde kazanç parametreleri dolaylı olarak hata büyüklüğüne bağlı şekilde adaptif bir davranış sergilemektedir. Hata büyüdükçe, tanh fonksiyonu doygunluğa ulaşarak sistemin kontrol tepkisini sınırlarken, hata küçüldükçe sistem için daha hassas kontrol sağlanır. Böylece:

- Büyük hata durumlarında hızlı tepki elde edilir,
- Hata azaldığında salınımsız ve dengeli bir sistem yanıtı sağlanır.

Bu yapı, sabit kazançlı klasik PID denetleyicilerin başaramadığı hızlı ve kararlı cevap gibi çelişkili kontrol hedeflerinin aynı anda elde edilmesini mümkün kılar.

Şekil 29 denetleyici TANH bloğunda bulunan parametrelerinin (M ve A) TANH fonksiyonu üzerindeki etkisini ifade etmektedir.



Şekil 29. Farklı M ve A değerleri için yakınsama eğrileri

Denetleyici parametreleri için şu yorumlar yapılabilir.

- M parametresi arttıkça fonksiyonun maksimum çıkış değeri yükselir; bu, daha güçlü kontrol tepkisi sağlar.
- A parametresi arttıkça fonksiyonun orijin yakınındaki eğimi artır; bu da küçük hatalara karşı daha hassas tepki üretir.

İki parametrenin ayarlandığı durumlarda oluşana etkiler aşağıda ifade edilmiştir.

- Büyük M, ve büyük A değerlerinde hızlı ve güçlü kontrol tepkisi, fakat gürültüye karşı hassasiyet,
- Küçük M ve küçük A değerlerinde yumuşak ve kararlı yanıt, gürültülü sistemlere uygun yapı,

- Orta düzey değerlerde, hız, kararlılık ve eyleyici sınırlamaları arasında ayarlanabilir bir denge sunulmaktadır.

Önerilen TANH-PID denetleyici parametreleri farklı sistemlere uygun kontrol senaryoları için esnetilerek etkin bir kontrole imkan tanımaktadır.

1.6. Metasezgisel Optimizasyon Algoritmaları

Metasezgisel optimizasyon algoritmaları doğaları gereği, sistem modellerine uygulanması esnasında elde edilen sonuçların daha nesnel bir biçimde değerlendirilebilmesi adına uygun bir amaç fonksiyonuna ihtiyaç duymaktadır.

Literatürde, kontrol sistemlerinin performansını nicel olarak ölçmek amacıyla yaygın biçimde kullanılan dört temel amaç fonksiyonu bulunmaktadır. Bu amaç fonksiyonları, denklem (57)'de IAE, denklem (58)'de ISE, denklem (59)'da ITAE ve denklem (60)'ta ITSE olmak üzere matematiksel ifadeleri verilmiştir (Kılıç & Özdemir, 2018; Tabakoglu, 2009).

$$IAE = \int_0^T |e| dt \quad (57)$$

$$ISE = \int_0^T e^2 dt \quad (58)$$

$$ITAE = \int_0^T t|e(t)| dt \quad (59)$$

$$ITSE = \int_0^T te^2 dt \quad (60)$$

Bu çalışmada amaç fonksiyonu olarak ITAE amaç fonksiyonu tercih edilmiştir. ITAE, hata sinyalinin sıfıra yakın bir seviyede tutmayı hedeflerken, literatürde yer alan diğer amaç fonksiyonlarıyla karşılaştırıldığında daha düşük MA ve daha kısa OS sağladığından sıklıkla çalışmalarda tercih edilmektedir.

Optimizasyon algoritmaları, belirlenen sistem modeline uyarlandığında, sistem çıkış değerleri ile giriş verilen referans değer arasında oluşan farkın (hata sinyalinin) en kısa

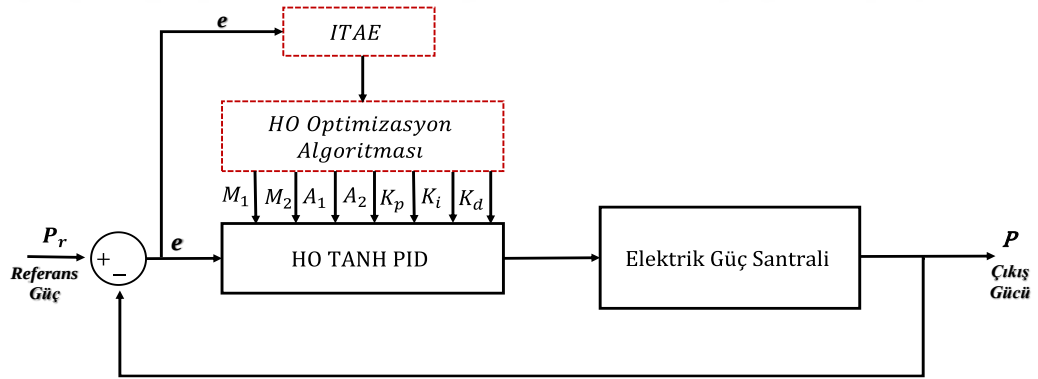
sürede sıfırlanması amacıyla denetleyici parametrelerinin çalışılan modele en uygun değerlere ayarlanmasına olanak sağlamaktadır.

Optimizasyon sürecinde kullanılan algoritma, ilk aşamada tasarlanan denetleyiciye ait her bir parametre için, belirlenen alt ve üst sınırlar dâhilinde rastgele oluşturulan popülasyon bireylerini çözüm uzayında konumlandırır.

İkinci aşamada, her bireyin temsil ettiği parametre değerleri sistem modeline entegre edilerek, seçilen amaç fonksiyonu aracılığıyla uygunluk değerleri hesaplanır. Bu değerlendirme süreci, popülasyondaki tüm bireyler için gerçekleştirilir.

Her iterasyon sürecinde, popülasyonda yer alan bireylerin konumları, ilgili optimizasyon algoritmasının güncelleme stratejilerine uygun şekilde yeniden düzenlenir. Güncellenen konumlara göre bireylerin uygunluk değerleri tekrar hesaplanır. İterasyonlar boyunca elde edilen sonuçlar doğrultusunda, amaç fonksiyonu açısından en yüksek uygunluk değerine sahip parametre grubu algoritmanın optimal çözümü olarak belirlenir. ($G_1, G_2, \tau_1, \tau_2, K_p, K_i, K_d$)

Şekil 30'da çalışmada tercih edilen HOA ve ITAE amaç fonksiyonu çerçevesinde TANH-PID parametre değerlerinin optimizasyon süreci gösterilmiştir.



Şekil 30. TANH-PID denetleyici ile denetlenen elektrik güç santrali modeli

Bu çalışmada tercih edilen HOA'nın, literatürde yer alan diğer yöntemlerle adil bir şekilde karşılaştırılabilmesi amacıyla; popülasyon büyüklüğü 16, karar değişkenlerinin alt ve üst sınır aralığı [0-5] ve iterasyon sayısı 100 alınarak optimizasyon işlemleri her bir santral modelinde gerçekleştirilmiştir.

1.6.1. Hippopotamus Optimizasyon Algoritması

HOA, su aygırlarının doğuştan gelen davranışlarından esinlenerek oluşturulan yaratıcı metasezgisel bir teknik halinde ifade edilmektedir. HOA, teorik anlamda üç aşamalı bir yöntem şeklinde ortaya konulmuştur; bu aşamalar kaçış teknikleri, yırtıcılara karşı savunma yöntemleri ve su aygırlarının gölet ya da nehirlerdeki konum güncellemelerinin matematiksel formüllerle ifadelerini belirtmektedir (Amiri, 2024).

HOA, popülasyon tabanlı bir optimizasyon tekniğidir ve su aygırları algoritmada arama ajanları olarak kullanılmaktadır. HOA yönteminde su aygırları, optimizasyon probleminin potansiyel çözümlerini temsil etmektedir, bu durum da her bir su aygırının arama alanındaki konum güncellemesinin karar değişkenleri için değerleri yansıttığı anlamına gelmektedir. Sonuç olarak, her su aygırı bir vektör olarak tanımlanmakta ve su aygırı popülasyonu matematiksel olarak bir matrisle ifade edilmektedir. HOA'nın başlangıç adımı, diğer optimizasyon algoritmalarındaki gibi rastgele dağılımla başlangıç çözümlerinin oluşturulmasına dayanmaktadır (Amiri, 2024). Bu aşamada, karar değişkenlerine karşılık gelen vektörü oluşturmak için denklem (61)'deki formül kullanılmaktadır, denklemde yer alan j ve k değerleri pozitif tam sayı değerlerini almaktadır.

$$Y_j: y_{jk} = LB_k + s(UB_k - LB_k), j = 1, 2, 3 \dots N, k = 1, 2, \dots, m \quad (61)$$

Denklem (61)'de, s 0 ile 1 arasında rastgele bir tamsayıyı, Y_j , j 'nci aday çözüme karşılık gelen su aygırının konumunu ifade etmektedir. UB ve LB değerleri, sırasıyla k 'nci karar değişkeninin üst ve alt sınırlarını belirtmektedir.

Denklem (62)'de popülasyondaki bireylerin matrisi oluşturur; denklemde yer alan O parametresi sürüdeki su aygırı sayısını, n parametresi problemdeki karar değişkeni sayısını temsil etmektedir.

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_j \\ \vdots \\ Y_O \end{bmatrix}_{N \times m} = \begin{bmatrix} y_{1,1} & \dots & y_{1,k} & \dots & y_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{j,1} & \dots & y_{j,k} & \dots & y_{j,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{O,1} & \dots & y_{O,k} & \dots & y_{O,n} \end{bmatrix}_{O \times n} \quad (62)$$

Bir su aygırı sürüsü; çok sayıda yetişkin dişi su aygırı, yavrular, çok sayıda yetişkin erkek su aygırı ve baskın erkek su aygırından (sürünün lideri) oluşur. Uygunluk fonksiyonu değerinin yinelenmesine göre minimizasyon problemlerinde en düşük, maksimizasyon görevlerinde ise en yüksek değere sahip olan baskın su aygırı belirlenmektedir.

Su aygırları genellikle birbirlerine yakın bölgelerde toplanma eğilimindedir. Baskın erkek su aygırları, bölgelerini ve sürülerini dış tehditlere karşı savunur. Erkek su aygırlarının çevresi, çok sayıda dişi birey tarafından çevrenmiştir. Erkek su aygırları, yetişkinliğe ulaştıklarında baskın erkek tarafından sürüden kovulurlar.

Bu nedenle, kendi baskınlıklarını kurabilmek için bu sürüden kovulan erkek bireylerin ya dişi bireyleri yanlarına çekmeleri ya da sürüdeki diğer yerleşik erkek bireylerle rekabet etmeleri gerekir. Gölde veya su birikintisi çevresinde bulunan erkek su aygırı sürü üyelerine ait konum, matematiksel olarak denklem (63) ile belirlenmektedir.

$$Y_j: y_{jk} = LB_k + s(UB_k - LB_k) \quad (63)$$

$$j = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{O}{2} \right\rfloor \text{ ve } k = 1, 2, \dots, n$$

Denklem (63)'te erkek su aygırının konumu $Y_j^{N_Hippo}$ ile gösterilirken, baskın su aygırının konumu E_Hippo (mevcut yinelemede en yüksek maliyet değerine sahip su aygırları) değişkeni ile ifade edilmektedir.

Denklem (64)'te yer alan s_5 parametresi 0 ile 1 arasında rastgele bir sayıyı temsil etmektedir, J_1 ve J_2 değişkenleri 1 ile 2 arasındaki değerleri, $s_1, \dots, s_4$, 0 ile 1 arasında rastgele bir vektörü ifade etmektedir. (denklem 63 - 66).

Denklem (63)'te z_1 0 ile 1 arasında rastgele bir tamsayıyı, nH_j , mevcut Y_j su aygırlarını içerebilecek olasılıkla rastgele seçilmiş belirli su aygırlarının ortalama değerlerini temsil eder. Denklem (64)'te yer alan ρ_1 ve ρ_2 değerleri de rastgele tamsayılar olup, 0 veya 1 değerini alabilir.

$$i = \begin{cases} J_2 x_{s_1} \rightarrow +(\sim \rho_1) \\ 2 x \overrightarrow{s_2} - 1 \\ \overrightarrow{s_3} \\ J_1 x \overrightarrow{s_4} +(\sim \rho_2) \\ s_5 \end{cases} \quad (64)$$

$$U = \exp\left(-\frac{u}{U}\right) \quad (65)$$

$$Y_j^{GC Hippo} : y_{jk}^{GC Hippo} = \begin{cases} y_{jk} + i_1 \cdot (E_Hippo - J_2 NH_j) & U > 0.6 \\ \bar{E} & else \end{cases} \quad (66)$$

$$\bar{E} = \begin{cases} y_{jk} + i_2 (NH_j - E_Hippo) s_6 > 0.5 \\ LB_k + s_7 \cdot (UB_k - LB_k) & else \end{cases}, j = 1, 2, \dots, \left\lceil \frac{0}{2} \right\rceil, j = 1, 2, \dots, m \quad (67)$$

Denklemler (68) ve (69), dişi veya genç su aygırlarının $Y_j^{GC Hippo}$ konumlarını sürü ile olan ilişkilerine göre tanımlamaktadır.

Genç su aygırlarının çoğu annelerinin yakınında bulunur; ancak zaman zaman merak nedeniyle sürüden veya annelerinden uzaklaşabilirler. Denklem (65)'te matematiksel ifade olarak verilen durumda U değerinin 0.6'dan büyük olması, genç su aygırının annesinden ayrıldığını göstermektedir. Denklem (67) ele alındığında, s_6 (0 ile 1 arasında bir değer) 0.5'ten büyükse, genç su aygırının annesinden ayrıldığını ancak hâlâ sürü içinde ya da sürüye yakın olduğunu belirtir. Aksi takdirde, tamamen ayrıldığı kabul edilir. Denklem (66) ve (67), genç ve dişi su aygırlarının davranışlarını taklit etmek amacıyla kullanılmaktadır. Denkleminde yer alan i_1 ve i_2 , beş farklı durumdan rastgele seçilmiş tamsayılar veya vektörlerdir. Denklem (67)'deki s_7 , 0 ile 1 arasında rastgele seçilen bir sayıyı temsil eder.

Denklemler (62) ve (63)'te ise, sürü içerisindeki genç, erkek ve dişi su aygırlarının konum güncellemelerini tanımlamaktadır. G_j , uygunluk fonksiyonunun değerini göstermektedir.

$$Y_j = \begin{cases} Y_j^{N Hippo} G_j^{N Hippo} & < G_j \\ Y_j & else \end{cases} \quad (68)$$

$$Y_j = \begin{cases} Y_j^{GC Hippo} G_j^{GC Hippo} & < G_j \\ Y_j & else \end{cases} \quad (69)$$

Önerilen teknikte yer alan J_1 ve J_2 durumları, i vektörlerinin kullanımı yoluyla keşif yeteneğini ve küresel arama kapasitesini artırmaktadır. Bu durum, önerilen algoritmanın keşif sürecini geliştirerek daha etkin bir küresel arama gerçekleştirilmesini sağlamaktadır.

Su aygırlarının temel savunma manevrası, yırtıcıya doğru hızla dönerek yüksek sesler çıkarmak ve onu yaklaştırmamaya çalışmaktır. Bu aşamada su aygırları, yırtıcıya yaklaşarak onun geri çekilmesine neden olabilir ve böylece potansiyel tehdidi bertaraf edebilirler. Arama uzayında yırtıcının konumu denklem (70) ile gösterilmektedir.

$$Avcl : Avcl\ r_k = LB_k + \overrightarrow{s_8}(UB_k - LB_k), k = 1, 2, \dots, n \quad (70)$$

Burada $\overrightarrow{s_8}$, 0 ile 1 aralığında değerler alan rastgele bir vektörü temsil etmektedir.

$$\vec{E} = |Avcl\ r_k - y_{jk}| \quad (71)$$

Denklem (71), yırtıcının j . su aygırına olan uzaklığını göstermektedir. Bu dönemde, su aygırı kendisini yırtıcıdan korumak amacıyla, G_{Avcl_k} faktörüne dayalı bir savunma davranışı geliştirir. Eğer G_{Avcl_k} , G_j 'den küçükse, bu durum yırtıcının su aygırına oldukça yakın olduğunu gösterir; su aygırı bu durumda hızla dönerek yırtıcının üzerine doğru ilerler ve onun geri çekilmesini sağlamaya çalışır. Öte yandan, G_{Avcl} değeri daha yüksekse, bu, yırtıcının ya da diğer istilacı nesnelerin su aygırının bulunduğu bölgeye daha yakın olduğu anlamına gelir (bkz. Denklem (72)). Bu durumda su aygırı yine yırtıcıya yönelir; ancak hareket menzili daha sınırlıdır. Bu davranışın amacı, bulunduğu bölgede varlığını hissettirmek ve yırtıcıları ya da istilacıları uyarmaktır.

$$Y_j^{HippoS} : y_{jk}^{HippoS} = \begin{cases} \overrightarrow{SM} \oplus Avcl_k + \left(\frac{g}{\sigma_{exc} \cos(2\pi h)} \right) \left(\frac{f}{\vec{E}} \right) G_{Avcl_k} G_j < F_i \\ \overrightarrow{SM} \oplus Avcl_k + \left(\frac{g}{\sigma_{exc} \cos(2\pi h)} \right) \left(\frac{f}{2x\vec{E} + \overrightarrow{s_9}} \right) G_{Avcl_k} \geq G_j \end{cases} \quad (72)$$

$$j = \left[\frac{0}{2} \right] + 1, \left[\frac{0}{2} \right] + 2, \dots, 0 \text{ and } k = 1, 2, \dots, n$$

Y_j^{HippoS} konumundaki bir su aygırı, bir avcıyla karşı karşıyadır. $\overrightarrow{SM}$, su aygırının saldırısı sırasında avcının konumunda ani değişiklikler olduğunda kullanılan Levy dağılımlı rastgele bir vektörü ifade eder.

Levy hareketinin rastgele hareketini hesaplayan matematiksel yöntem, denklem (73) ile verilir. Değişkenler x ve w , sırasıyla $[0,1]$ aralığında rastgele tamsayılardır; v bir sabittir ($v = 1.5$), Γ Gamma fonksiyonunu temsil etmektedir, σ_x ise denklem (74) kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$Levy(v) = 0.05x \frac{x * \sigma_x}{|w|^{\frac{1}{v}}} \quad (73)$$

$$\sigma_x = \left[\frac{\Gamma(1+v) \sin(\frac{\pi v}{2})}{\Gamma(\frac{1+v}{2}) v 2^{\frac{(v-1)}{2}}} \right]^{\frac{1}{v}} \quad (74)$$

Denklem (72)'de yer alan g ve e değerleri, sırasıyla $[2, 4]$ ve $[1, 1]$ aralığında yer alan düzgün (uniform) rastgele sayılardır. E , $[2, 3]$ aralığında sabit bir rastgele sayıyı ifade eder. h , $[-1, 1]$ aralığında bir uniform rastgele sayıdır. $\overrightarrow{s_9}$, boyutu $1 \times n$ olan rastgele bir vektör olarak tanımlanmaktadır.

Denklem (75)'te, G_j^{HippoS} değerinin G_j 'den büyük olması durumunda, ilgili su aygırının avlandığını ve sürüde başka bir su aygırıyla değiştirileceğini belirtir. Eğer $G_j^{HippoS} < G_j$ koşulu sağlanırsa, avcı kaçar ve su aygırı yeniden sürüye katılır. İkinci aşama sırasında, küresel arama sürecinde önemli iyileşmeler gözlemlenmiştir. Birinci ve ikinci aşamalar birlikte çalışarak algoritmanın yerel minimumlarda takılı kalma olasılığını azaltmada etkili olmuştur.

$$Y_j = \begin{cases} Y_j^{HippoS} G_j^{HippoS} & < G_j \\ Y_j G_j^{HippoS} & \geq G_j \end{cases} \quad (75)$$

Bir su aygırı birden fazla yırtıcıyla karşı karşıya kaldığında ya da koruyucu davranışıyla yırtıcıyı savuşturamadığında, başka davranışlar sergilemeye başlar. Bu

durumda su aygırı, bulunduğu ortamdan uzaklaşmayı dener. Benekli aslanlar ve sırtlanlar genellikle göllere veya göletlere girmediklerinden, su aygırı bir tehlike hissettiğinde genellikle en yakın su kaynağına doğru kaçmaya çalışır. Bu stratejiyle su aygırı, mevcut konumuna yakın güvenli bir alan tespit edebilmektedir.

HOA'nın üçüncü aşamasında bu davranış modellenerek, yerel arama işlemi açısından daha etkin bir biçimde kullanılabilir hâle getirilmiştir. Bu davranışı taklit edebilmek adına, su aygırı konumlarına yakın rastgele bir yer oluşturulur. Su aygırlarının bu davranışları, Denklemler (76)–(79) ile temsil edilmektedir.

Eğer yeni oluşturulan konum, maliyet fonksiyonu değerini artırıyorsa, bu durum su aygırının mevcut konumuna yakın daha güvenli bir yer keşfettiğini ve bu nedenle konumunu değiştirdiğini gösterir. Burada U , maksimum iterasyon sayısını, u ise mevcut iterasyonu ifade etmektedir.

$$LB_k^{yrel} = \frac{LB_k}{u}, UB_k^{yrel} = \frac{UB_k}{u}, u = 1, 2, \dots, U \quad (76)$$

$$Y_j^{Hippo \varepsilon}: y_{jk}^{Hippo \varepsilon} = y_{jk} + s_{10} \dots (LB_k^{yrel} + t_1 \dots (UB_k^{yrel} - LB_k^{yrel})), \quad j=1, 2, 3, \dots, n \quad (77)$$

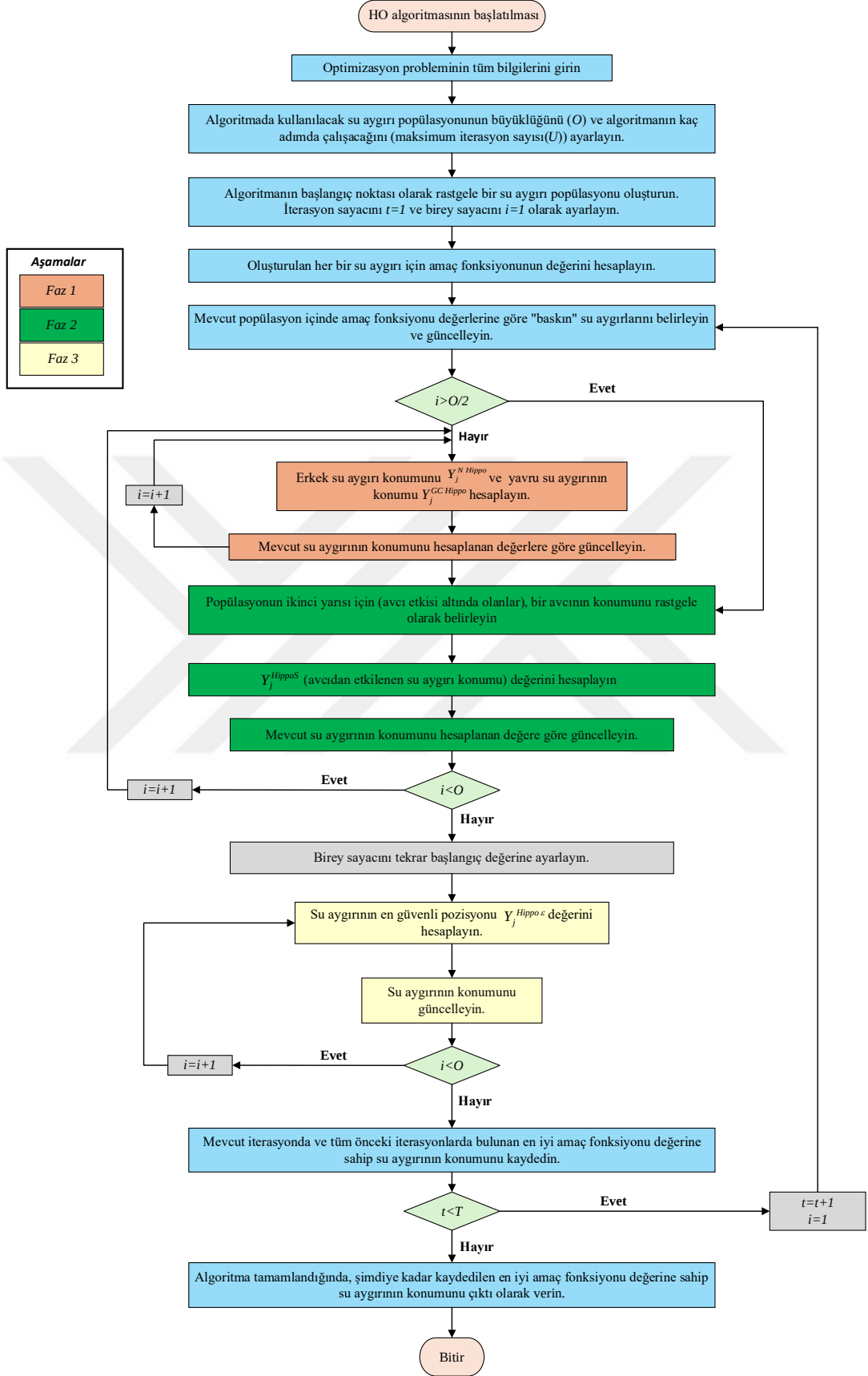
Su aygırlarıyla ilişkili konum, en yakın güvenli alanı belirlemek amacıyla taranmıştır ve bu durumdaki konum denklem (77)'de belirtilen $Y_j^{Hippo \varepsilon}$ ile temsil edilmektedir. Üç farklı durumu ifade eden t , rastgele seçilen t_1 adlı bir rastgele vektör veya tamsayı ile tanımlanmakta olup, bu seçim denklem (78) kullanılarak yapılmaktadır. Ele alınan bu t durumları, algoritma açısından daha uygun bir yerel arama süreci ile sonuçlanmakta; başka bir ifadeyle, önerilen algoritmanın sömürü yeteneğini artırmaktadır.

$$t = \begin{cases} 2 \times \overrightarrow{s_{11}} - 1 \\ s_{12} \\ s_{13} \end{cases} \quad (78)$$

Denklem (77)'de yer alan s_{10} ve denklem (78)'de yer alan s_{13} , $[0, 1]$ aralığında oluşturulmuş rastgele tamsayıları temsil ederken; denklem (78)'de yer alan $\overrightarrow{s_{11}}$, $[0, 1]$ aralığında bir rastgele vektörü ifade etmektedir. Ayrıca denklem (78)'de yer alan s_{12} , normal dağılıma sahip bir rastgele tamsayıyı temsil etmektedir.

$$Y_j = \begin{cases} Y_j^{Hippo \varepsilon} G_j^{Hippo \varepsilon} & < G_j \\ Y_j G_j^{Hippo \varepsilon} & \geq G_j \end{cases} \quad (79)$$

HOA'nın her bir iterasyonunun tamamlanmasının ardından, denklemler (63) – (79) temel alınarak tüm popülasyonun konum güncellenmesi süreci, son iterasyona kadar devam etmektedir. Algoritma çalışıkça, en uygun çözüm sürekli olarak izlenmekte ve kaydedilmektedir. Tüm süreç tamamlandığında, baskın su aygırı çözümü olarak adlandırılan en uygun aday, problemin nihai çözümü olarak ortaya konmaktadır.



Şekil 31. HOA akış şeması

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında beş farklı güç sistemi modeli MATLAB/Simulink ortamında modellenerek modeller üzerinden YFK çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarla karşılaştırma yapılması adına her bir güç sistemi için sadece birinci bölgede yük değişiminin olduğu durumlar ele alınarak simülasyon ortamında analizler gerçekleştirilmiştir. Güç sistemi modelleri olarak ara ısıtmasız termal, ara ısıtmasız GDB'li termal, ara ısıtmasız GRC'li termal, çok kaynaklı tek bölgesi ve çok kaynaklı iki bölgesi santral modelleri kullanılmıştır. Modellenen her bir sisteme dair parametre detayları Ekler bölümünde sunulmuştur.

2.1. İki Bölge Ara-Isıtmasız Termal Güç Sistemi

Bu çalışmada analiz edilen ilk sistem, simetrik yapıya sahip iki ayrı sistemin, bir bağlantı hattı üzerinden birbirine bağlandığı ara-ısıtmasız doğrusal termal güç sistem olup ilgili sistem modeli Şekil 22'de sunulmuştur.

Sistem üzerinden kontrol sağlanacak parametreler incelendiğinde;

- ΔP_{L1} 'lik bir yük değişimi için frekans değişimi Δf ,
- ΔP_{tie12} bağlantı hattındaki gücün değişimi, olarak belirlenmiştir.

Çalışmanın amacı, literatürdeki benzer çalışmalarda olduğu gibi mevcut güç sisteminin YFK denetimini iyileştirmektir.

İki bölgesi güç sisteminde bir bölgeye bağlantı hattı üzerinden iletilen işaret pozitif geri besleme ile etki ederken diğer ikinci alana ise negatif olarak etki etmektedir.

Sistemde bir alanın yükünü artırmak her iki alan için frekansın azalmasına sebebiyet vermektedir. Bu durumun temel sebebi modellemede de görüleceği üzere yükün sisteme eksi değer olarak sisteme uygulanmasıdır, ΔP_{D1} ve ΔP_{D2} ifadeleriyle iki bölgeye uygulanan yük değişimi güç sistemi girişindeki frekansa negatif etki yaratmaktadır.

AKH, bağlantı hattı güç sapması ile B katsayısı ile ağırlıklandırılmış frekans sapmasının birleşiminden oluşmaktadır ve bu sinyal aracılığıyla her bölgenin ikincil denetleyicisi (önerilen/tasarlanan denetleyici) etkili bir kontrol sinyali üretir. Başka bir

ifadeyle, ikincil denetleyici, generatörlerin referans güçlerini belirlenen düzeye getirerek üretim ile talep arasındaki dengeyi sağlar. Bu denge, sistem frekansının ve bağlantı hattı güç akışlarının önerilen sınırlar içinde tutulmasına olanak tanır. Bu çerçevede, bir adım büyüklüğündeki yük değişimi sonrasında AKH sıfır değerinden sapar ve bu sapmanın mümkün olan en kısa sürede giderilerek sistem kararlı durumda iken AKH' nın sifıra yakın tutulması gerekmektedir. Bu hedef, yalnızca iyi tasarlanmış ve yüksek performanslı ikincil frekans kontrol sistemi aracılığıyla gerçekleştirilebilir.

2.2. Doğrusal Olmayan İki Bölge Ölü Bantlı Governor (GDB) Özellikli Ara-Isıtmasız Termal Güç Sistemi

Ölü bant, tasarlanan sistemin küçük bozucu etkilere duyarsız kaldığı, bir bakıma hassasiyet ayarını ifade eder. Fiziksel sistemlerde doğrusallığı bozan birçok etki yer aldığından sisteme eklenen GDB modellemeleri vasıtasıyla yapılan analizler simülasyon ortamında YFK'nın test kapsamını da artırmaktadır.

GDB eklenen sistemde belirlenen bozucu tolerans aralıkları için sistemde valf pozisyonu değişmeden aynı kalırken hızda salınımlara sebep olur, bu sebeple sistem davranışında da doğrusallığın bozulmasına yol açar. GDB eklenen güç sistemi giriş sinyalindeki ani değişikliklerin çıkışa gecikmeli olarak iletilmesine sebep olur. Tablo 1'de GDB içeren ve GDB içermeyen sistemlerin karşılaştırması sunulmuştur.

Tablo 1. GDB'li/GDB'siz sistemlerin karşılaştırılması

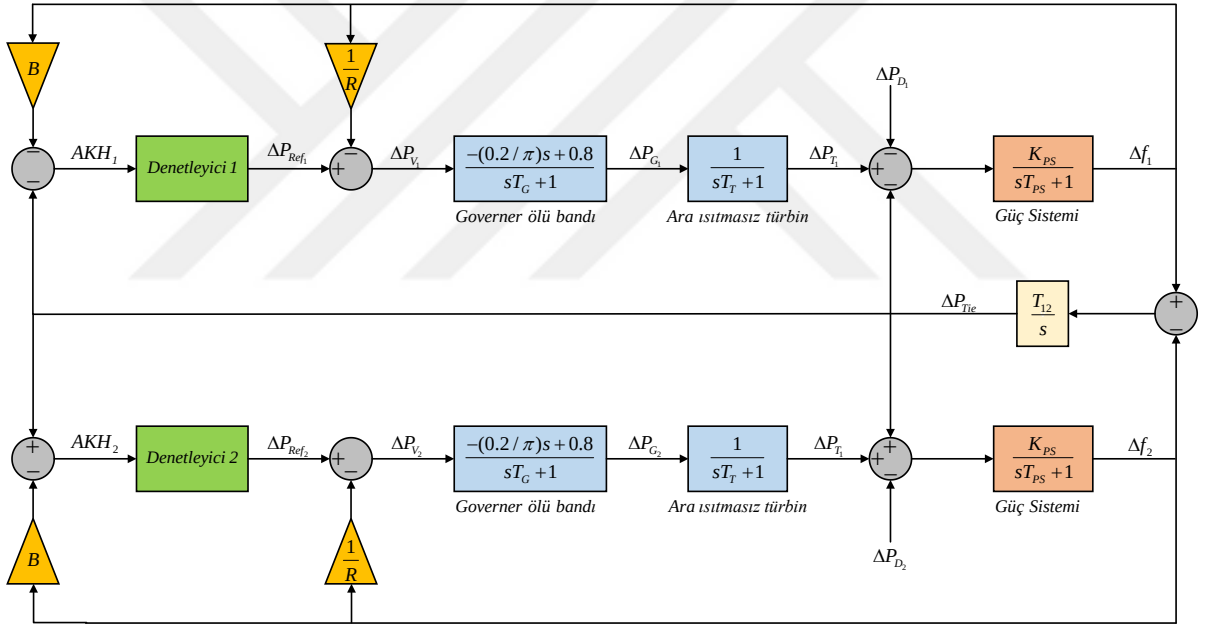
Özellik	GDB'siz Sistem	GDB'li Sistem
Governor Tepkisi	Her sapmaya cevap verir	Sadece belli eşik üstünde tepki verir.
Sistem Tepkisi	Daha hızlı	Daha gecikmeli
Salınım	Daha az	Daha fazla, zayıf sönümleme
Gerçekçilik	Düşük	Yüksek

GDB transfer fonksiyonu üzerinden literatürde yapılan çalışmalarda $f_0=0.5$ ve governor ölü bandı değeri ± 0.05 için $N_1=0.8$ ve $N_2=-0.2$ olarak alınmıştır, bu çalışmada

da parametre değerleri aynı biçimde tercih edilmiştir (Priyadarshani, 2021). İlgili parametrelerle transfer fonksiyonu yeniden yazıldığında transfer fonksiyonu denklem (80)'deki gibi ifade edilecektir. GDB, güç sistemin yaklaşık $f_0=0.5$ Hz doğal frekansta salınım yapmasına sebep olur.

$$G_{GDB}(s) = \frac{0.8 - s \frac{0.2}{\pi}}{1 + sT_{TG}} \quad (80)$$

Elde edilen fonksiyon sisteme eklendiğinde iki bölgeyi ara ısıtmasız GDB'li sistemin matematiksel modeli Şekil 32'de verilmiştir.



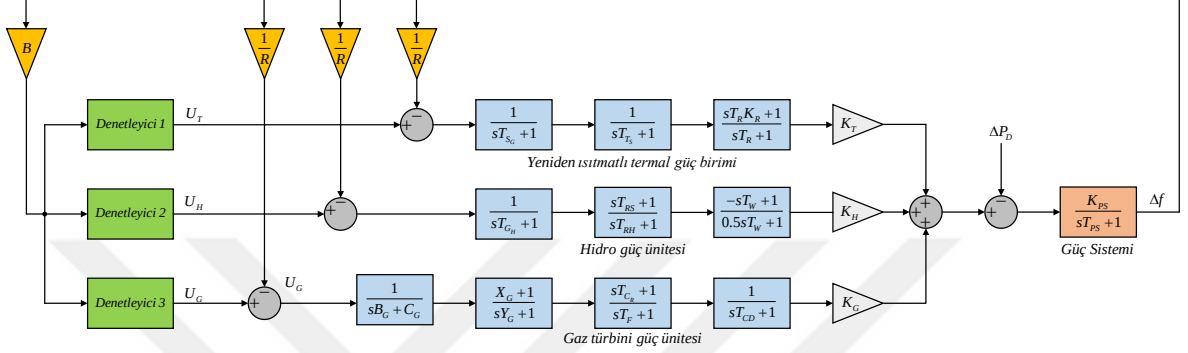
Şekil 32. Doğrusal olmayan iki bölgeyi ölü bantlı governor (GDB) özellikli ara-ısıtmasız termal güç sistemi

2.3. Doğrusal Olmayan İki Bölgeyi GRC Özellikli Ara-Isıtmasız Termal Güç Sistemi

Üretim hızı sınırlaması, YFK çalışmalarında, simülasyon ortamında fiziksel etkilerin modellenerek test kapsamına dahil edildiği temel kısıtlardan biridir. GRC dahil edilen

2.4. Çok Kaynaklı Tek Bölge Güç Sistemi

Çok kaynaklı tek bölge güç sisteminin matematiksel modeli Şekil 34'te sunulmuştur. Sistem modelinde yer alan parametrelerin detayları bölüm 1.4'te sistem modelleri başlıklarında altında detaylı biçimde verilmiştir.



Şekil 34. Çok kaynaklı tek bölge güç sistemi

Çok kaynaklı tek bölge güç sistemi yapısal açıdan incelendiğinde birden fazla elektrik üretim kaynağını (termik santraller, hidroelektrik santraller, gaz türbinleri, yenilenebilir enerji kaynakları vb.) bünyesinde barındıran ancak güç sistem çıkışında tek bir frekans denetiminin çalıştığı yapılardır. Sistemde bulunan farklı enerji üretim santralleri çalışma yapıları bakımından farklı dinamik özelliklere sahiptir, bu durum gerçek hayatta da frekans denetimini zorlaştırmaktadır.

Bu tarz güç sistemleri için AKH sadece frekans değişimi tabanlı oluşmaktadır, çünkü bağlantı hattı üzerinden iki farklı güç santral bölgesi arası bir etkileşim bulunmamaktadır, dolayısıyla bağlantı hattında güç denetimi yapılabilmesi söz konusu değildir.

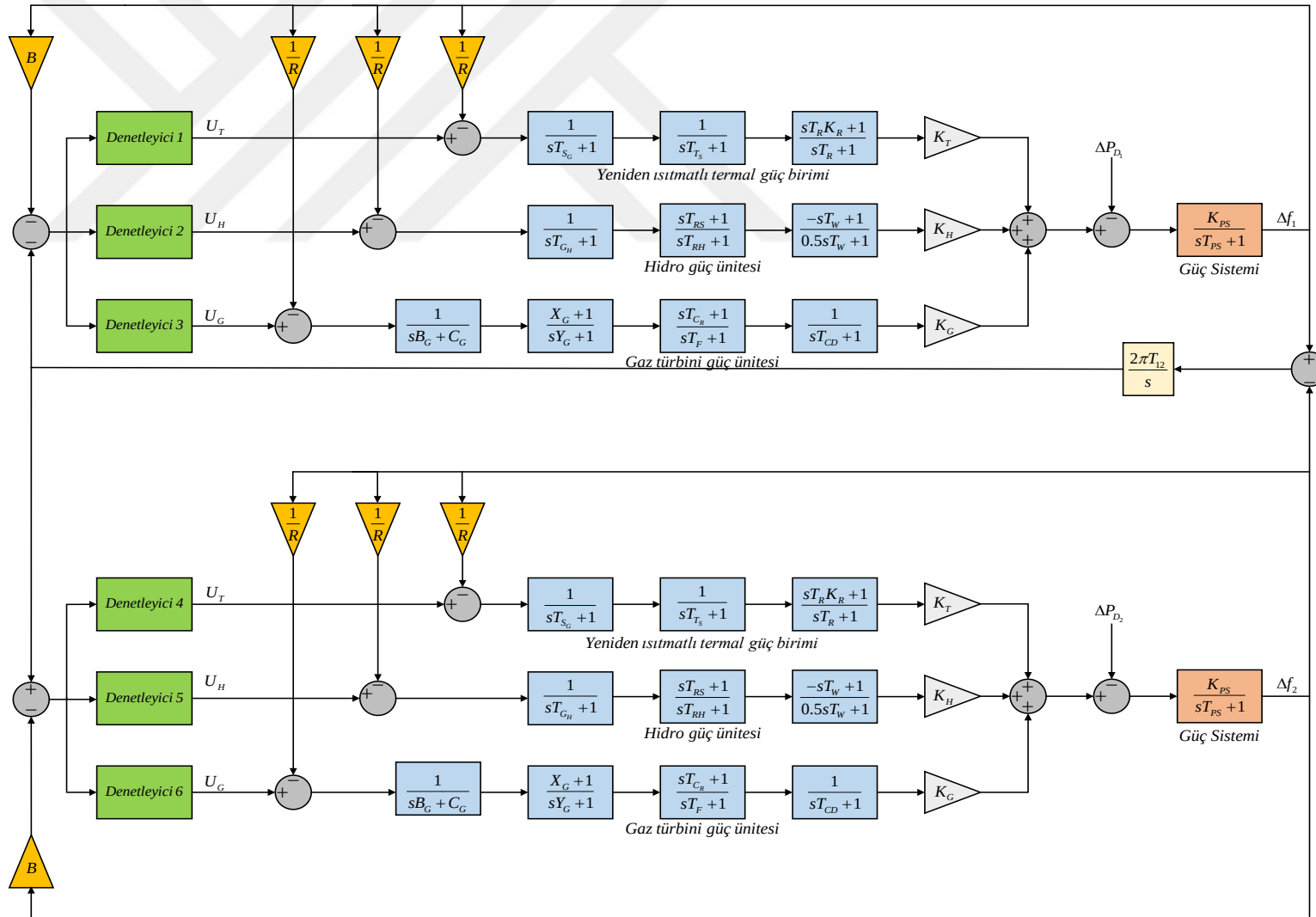
2.5. Çok Kaynaklı İki Bölge Güç Sistemi

Çok kaynaklı iki bölge güç sistemi, iki ayrı kontrol alanına sahip, her biri birden fazla üretim kaynağından oluşan, aralarında bağlantı hattı bulunan, entegre bir elektrik güç sistemidir. Her bir bölge kendi iç enerji tüketimini karşılamaya çalışmakta, ancak gerektiğinde de bölgeler arası güç alışverişi de yapılabilmektedir. Güç sisteminin herhangi bir bölgesine yük girmesi ya da bölgelerden birinden yük çıkışı olması durumunda ilgili

bölgenin frekansında dalgalanmalar gözlemlenmektedir. Çok kaynaklı iki bölgeli güç sisteminin matematiksel modeli Şekil 35’te sunulmuştur.

Şekil 35’ten de görülebileceği üzere çok kaynaklı tek bölgeli sistemde olduğu gibi bu sistem de farklı kaynaklar, farklı dinamiklere sahip olduklarından, kaynaklar sistem dinamiğine farklı tepkilerde bulunmaktadır. İki bölge arasında sisteme etki eden yük sebebiyle enerji ihtiyacına bağlı olarak bağlantı hattı üzerinden çift yönlü güç aktarımı sağlanmaktadır. Sistemin kararlı çalışabilmesi adına bağlantı hattının güç değişim denetimi diğer çok bölgeli sistemlerde olduğu gibi kritik önem arz etmektedir.





Şekil 35. Çok kaynaklı iki bölgeci güç sistemi

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, çalışma kapsamında önerilen TANH-PID denetleyicinin performansı, literatürde yaygın olarak denetleyici performans analizi yapılan beş farklı güç sistemi üzerinden değerlendirilmiştir. Her bir sistem için, literatürde günümüzde en iyi performansı sergileyen denetleyiciler ile önerilen denetleyici karşılaştırılmıştır. Çalışmada önerilen yeni denetleyicinin parametreleri, HOA kullanılarak ayarlanmıştır ve ayarlanan parametreler, ilgili sistemler için tablolara eklenmiştir. Optimizasyon sürecinde, çalışma kapsamında MA ve minimum OS elde edilmesi amacıyla, literatürde yer alan çalışmalarda da tercih edilen ITAE amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Tablolarda, ilgili denetleyici parametrelerinin yanı sıra, ITAE değerleri de verilmiştir. Tablolarda yer alan "n/a" sembolü, herhangi bir verinin bulunmadığını ifade etmektedir. Ayrıca, her bir güç sistemi için yapılan simülasyon süreleri 10s, 15s, 20s ve 30s olarak belirlenmiş olup, denetleyici performanslarını net bir şekilde görebilmek amacıyla tüm denetleyicilerin tepkileri aynı grafikte sunulmuştur.

3.1. İki Bölgeli Ara-Isıtmasız Termal Güç Sistemi Analiz Değerlendirmeleri

Çalışma kapsamında literatürde yük frekans kontrolüne yönelik en iyi sonuçları veren denetleyiciler; ISFS:PID (Çelik, 2020), DSA:FOPID (Çelik, 2021), DSA:FOPI-FOPD (Çelik, 2021), CGO:FOPID-FOPI (Barakat, 2022), co-SO:EXP-PID (Çelik, 2024) ile karşılaştırma yoluna gidilerek önerilen denetleyicinin etkinliği ispatlanmaya çalışılmıştır.

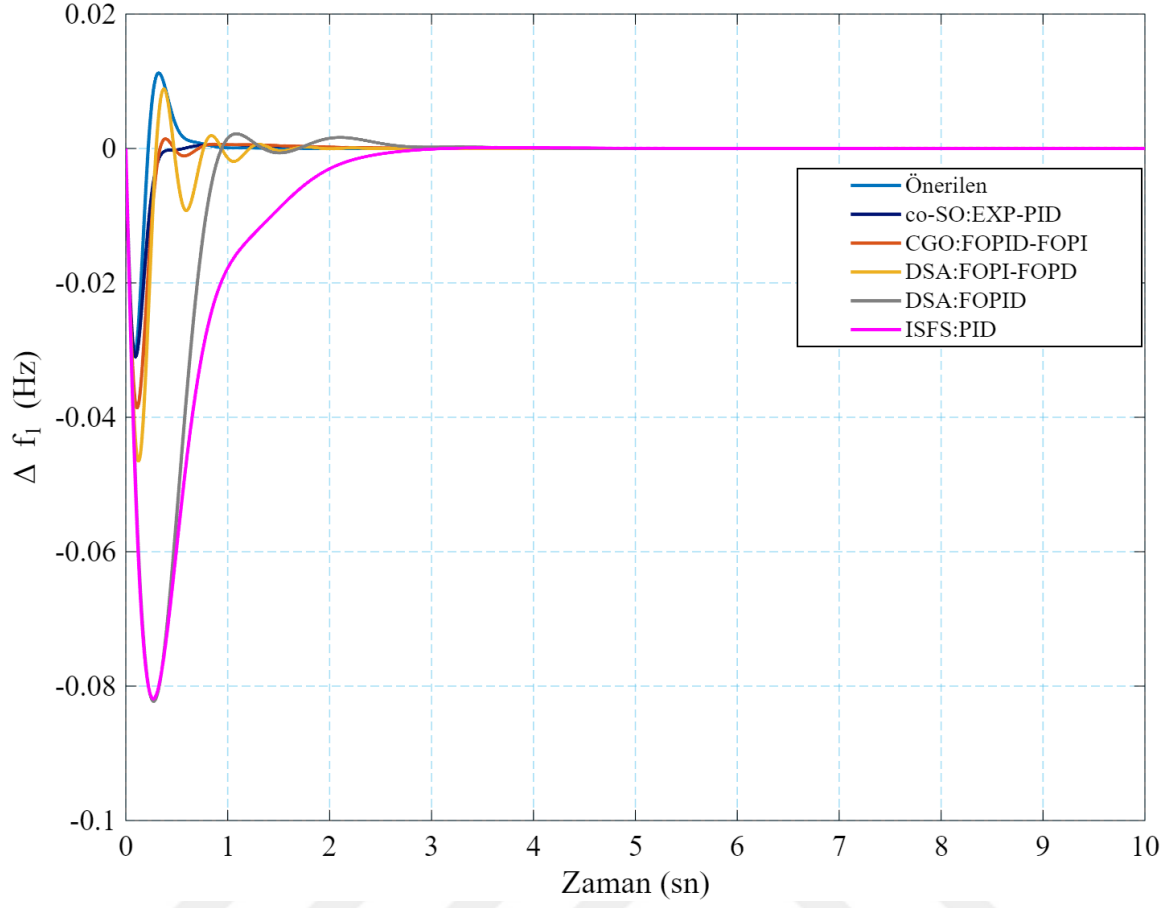
Tablo 3'te literatürde etkinliği ispatlanan farklı optimizasyon algoritmaları ile parametreleri ayarlanan denetleyicilerin parametre değerleri, frekans bağlantı hattı değişimi sonrası oturma zamanı ve ITAE değerleri verilmiştir. Tabloda "n/a" olarak verilen değerler için bir değer bulunmamaktadır.

Tablo 3. İki bölgeli ara-ısıtmasız termal güç sistemi için denetleyici parametreleri ve elde edilen sonuçlar

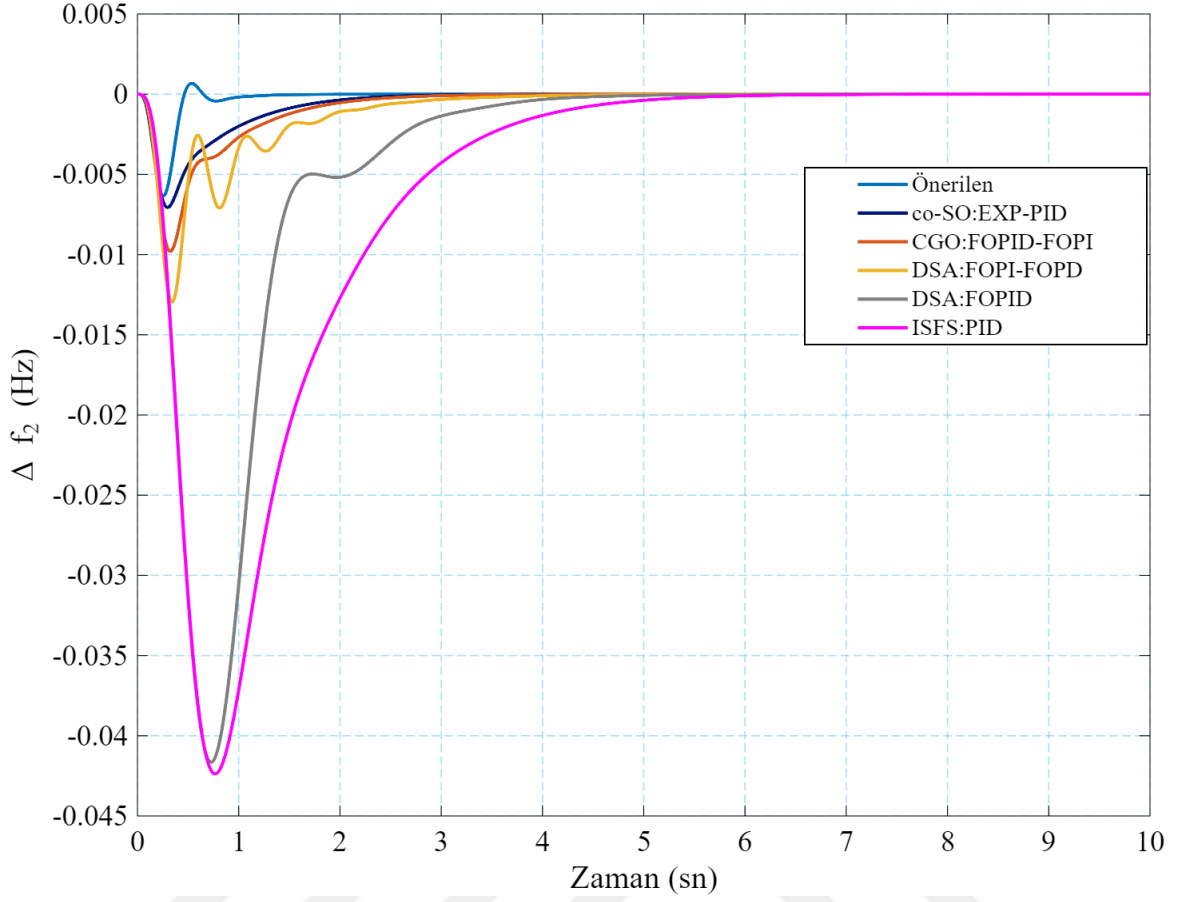
Optimizasyon Teknikleri		ISFS:PID	DSA:FOPI D	DSA: FOPI-FOPD	CGO: FOPID-FOPI	co-SO:EXP-PID	HO:TANH-PID (Önerilen)
Denetleyici Parametreleri		$K_p=1.6290$ $K_i=2.0000$ $K_d=0.5880$	$K_p=2.0331$ $K_i=2.9999$ $K_d=0.4670$ $\lambda=1.1007$ $\mu=1.0517$	$K_{p1}=1.2480$ $K_{p2}=2.9990$ $K_i=2.9990$ $K_d=3.0000$ $\lambda=1.1100$ $\mu=0.6310$	$K_{p1}=3.0000$ $K_{p2}=0.9700$ $K_{i1}=2.9750$ $K_{i2}=3.0000$ $K_d=2.1678$ $\lambda_1=0.0298$ $\lambda_2=0.9977$ $\mu=0.9078$	$\tau_1=1.9625$ $\tau_2=0.1158$ $G_1=4.9885$ $G_2=0.1510$ $K_p=3.1557$ $K_i=4.9969$ $K_d=0.4176$	$M_1=5$ $M_2=0.0286$ $A_1=3.4188$ $A_2=0.0177$ $K_p=1.1681$ $K_i=4.6623$ $K_d=0.1224$
Ts (s) (± 0.002 bant)	Δf_1	2.15	1.13	0.72	0.46	0.313	0.544
	Δf_2	3.66	2.73	1.48	1.18	0.998	0.397
	ΔP_{tie12}	2.56	2.23	0.86	0.61	0.423	0.200
ITAE		n/a	0.0778	0.0180	0.0091	0.0069	0.0022

Çalışma kapsamında iki bölgeli ara ısıtmasız güç santraline yönelik literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, Tablo 3'te de yer alan birinci bölgedeki frekans değişimi (Δf_1) için co-SO:EXP-PID denetleyicinin en iyi sonucu verdiği, Δf_2 , ΔP_{tie12} ve ITAE değerleri bakımından ise önerilen HO:TANH-PID denetleyicinin en iyi performansı sergilediği gözükmemektedir. Simülasyon sonuçları, birinci bölgeye ΔP_{D1} olarak uygulanan 0.1 pu yük uygulanması, ikinci bölgeye herhangi bir yük uygulanmaması durumu için Matlab ortamında analiz edilerek alınmıştır. Tüm denetleyicilerin performans tepkileri aynı grafiklerde sırasıyla Δf_1 , Δf_2 ve ΔP_{tie12} Şekil 36, Şekil 37 ve Şekil 38'de verilmiştir.

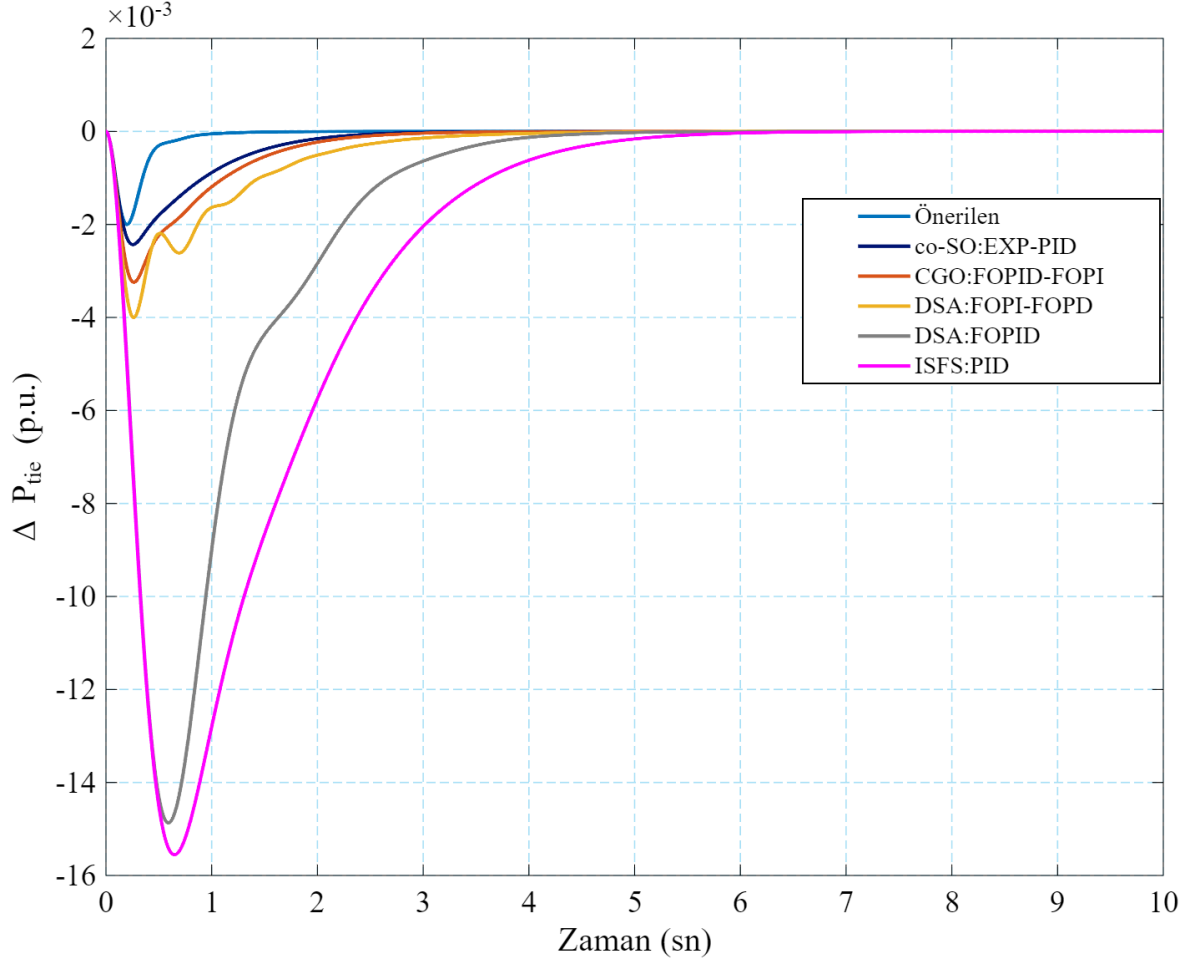
Çalışmada önerilen denetleyici en yakın rakibine göre Δf_2 isterinde %60.22 oranında, ΔP_{tie12} isterinde %52.72 oranında ve ITAE değerinde %63.93 oranında iyileşme sağlamıştır.



Şekil 36. İki bölgeli ara ısıtmasız termal güç sisteminde birinci bölgenin frekans değişim eğrisinin farklı tekniklerle karşılaştırılması

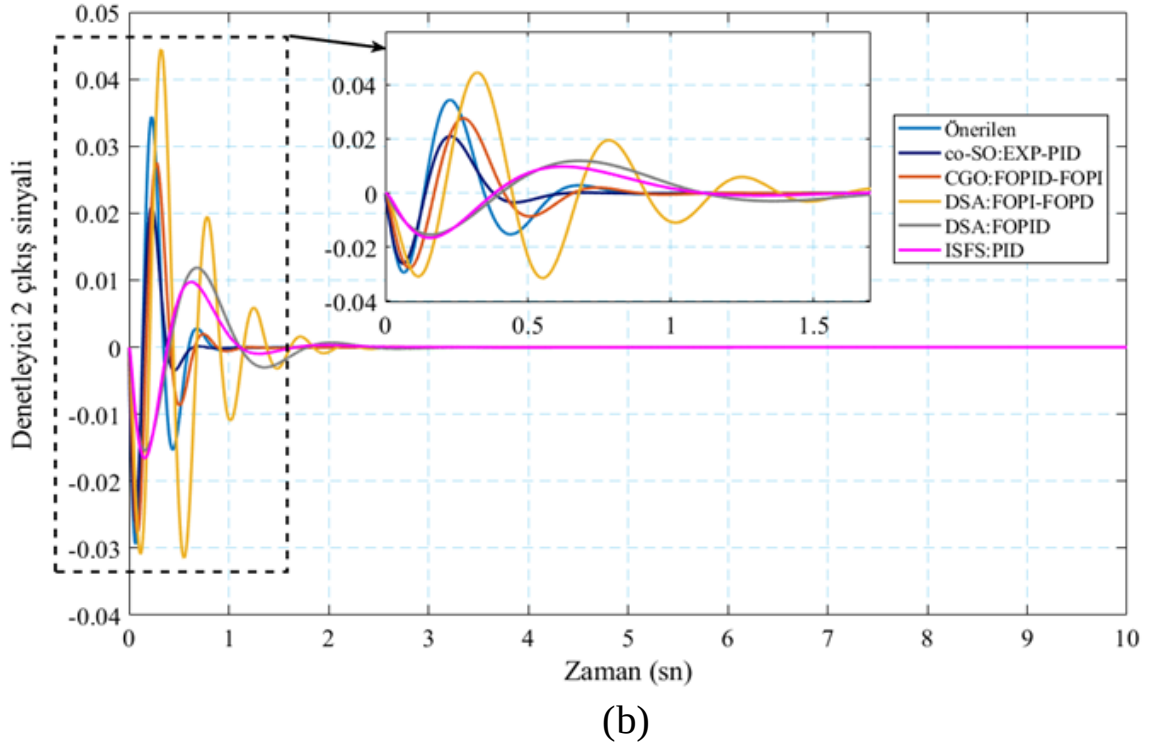
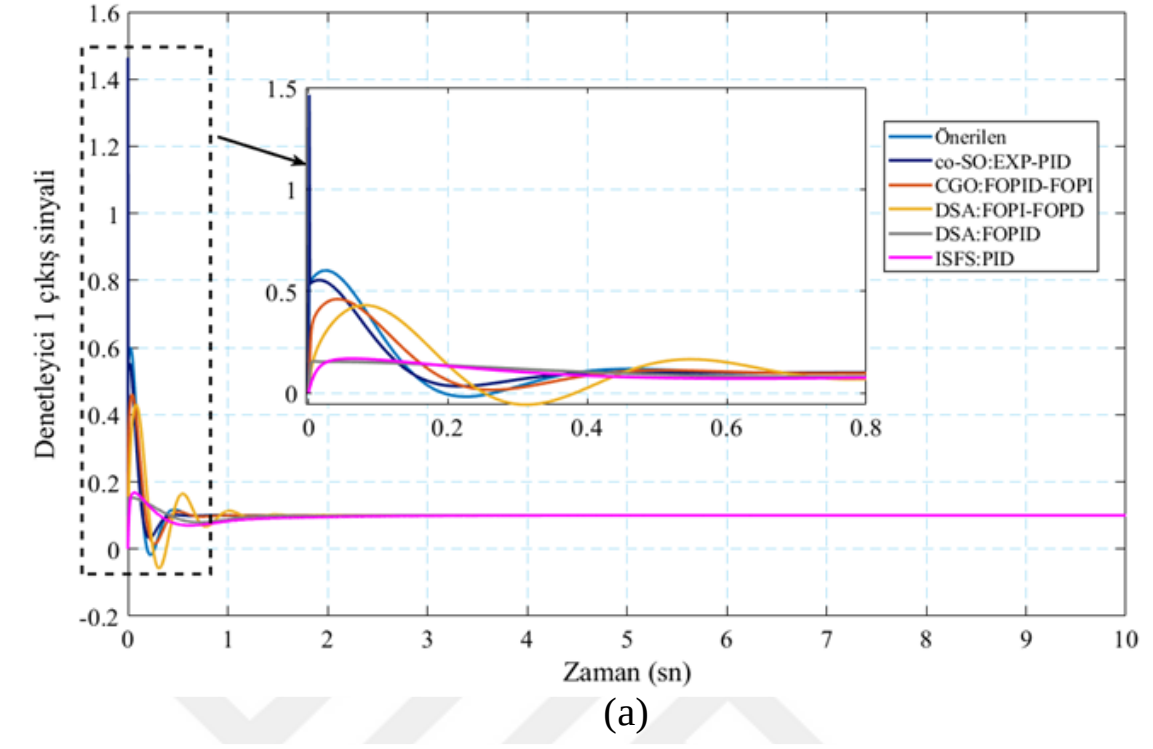


Şekil 37. İki bölge ara ısıtmasız termal güç sisteminde ikinci bölgenin frekans değişim eğrisinin farklı tekniklerle karşılaştırılması



Şekil 38. İki bölgele ara ısıtmasız termal güç sisteminde bağlantı hattı güç değişim eğrisinin farklı tekniklerle karşılaştırılması

Şekil 39’da iki bölgede yer alan her iki denetleyici için ((a) ve (b) olmak üzere) kontrol sinyalleri önerilen yaklaşım ve farklı denetleyicileri içerecek şekilde sunulmuştur. Önerilen denetleyici literatürde yer alan bazı yöntemlere (ISFS:PID, DSA:FOPID) göre daha yüksek genlikli sinyal üretmiştir. Bu durumda, YFK uygulamalarında denetleyici başlangıçta daha güçlü bir düzeltme çabası göstermektedir. Bu çaba sayesinde frekans bozulması daha hızlı bastırılabilmekte ve sistem daha hızlı bir toparlanma eğilimi göstermektedir. Ancak bunun karşılığında aktüatörler üzerinde daha fazla yük oluşmaktadır. YFK açısından frekans sapmasının hızlı kontrolü avantaj sağlarken, yüksek kontrol enerjisi ihtiyacı dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır. Grafikler incelendiğinde 0.5 s gibi minimal sürelerde salınımların sönümlendiği gözlenmektedir.



Şekil 39. İki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminde üretilen kontrol sinyalleri (a) birinci bölge (b) ikinci bölge

3.2. Doğrusal Olmayan İki Bölge Ölü Bantlı Governor (GDB) Özellikli Ara-Isıtmasız Termal Güç Sistemi Analiz Değerlendirmeleri

Çalışma kapsamında literatürde yük frekans kontrolüne yönelik en iyi sonuçları veren denetleyiciler; ISFS:PID (Çelik, 2020), DSA:FOPID (Çelik, 2021), DSA:FOPI-FOPD (Çelik, 2021), CGO:FOPID-FOPI (Barakat, 2022), co-SO:EXP-PID (Çelik, 2024), PSO;HODFC (Sahin, 2020), PSO:FHODFC (Sahin, 2020) ile karşılaştırma yoluna gidilerek önerilen denetleyicinin etkinliği ispatlanmaya çalışılmıştır.

GDB içeren ara ısıtmasız termal santral modeli için literatürde farklı algoritmalar ile parametre değerleri ayarlanan denetleyicilerin parametre, ITAE ve OS değerleri Tablo 4'te sunulmuştur.

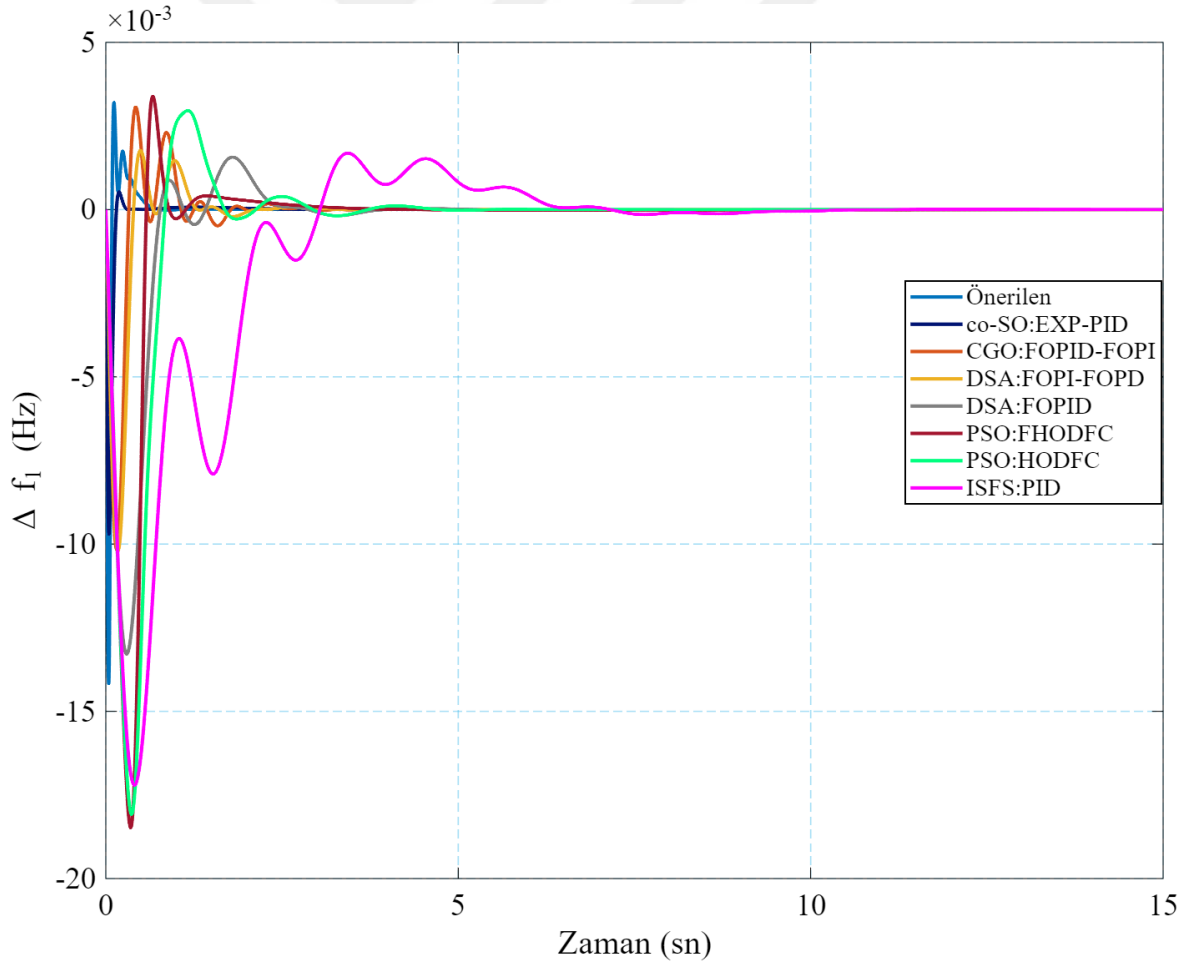
Tablo 4. Doğrusal olmayan iki bölgeli ölü bantlı governor (GDB) özellikli ara-ısıtmasız termal güç sistemi için denetleyici parametreleri ve elde edilen sonuçlar

Optimizasyon Teknikleri		ISFS:PID	PSO:HOD FC	PSO:FHODFC	DSA:FOPID	DSA:FOPI-FOPD	CGO:FOPI D-FOPI	co-SO:EXP-PID	HO:TANH-PID(Önerilen)
Denetleyici Parametreleri		$K_p=0.3898$ $K_i=1.0113$ $K_d=0.7695$	$K_1=0.8400$ $K_2=0.5400$ $K_3=0.1590$ $K_4=3.9600$ $K_5=7.1900$ $K_f=2.8371$	$K_1=0.5750$ $K_2=0.6790$ $K_3=0.3700$ $K_4=3.0600e-4$ $K_5=4.2800e-4$ $K_f=5.0021$ $\lambda_1=0.6650$ $\lambda_2=0.7110$ $\lambda_3=0.6900$ $\lambda_4=0.8950$ $\lambda_5=0.8580$	$K_p=2.5578$ $K_i=2.9999$ $K_d=0.7937$ $\lambda=1.0020$ $\mu=1.2510$	$K_{p1}=2.3181$ $K_{p2}=2.9999$ $K_i=2.9879$ $K_d=0.4391$ $\lambda=1.0000$ $\mu=1.4642$	$K_{p1}=2.3126$ $K_{p2}=1.6944$ $K_{i1}=2.9913$ $K_{i2}=2.6311$ $K_d=0.6339$ $\lambda_1=1e-8$ $\lambda_2=1.0000$ $\mu=1.5000$	$\tau_1=2$ $\tau_2=1.3242$ $G_1=4.9864$ $G_2=0.6594$ $K_p=3.1328$ $K_i=4.9484$ $K_d=0.6303$	$M_1=4.8989$ $M_2=1.8864$ $A_1=3.0808$ $A_2=0.7221$ $K_p=1.4360$ $K_i=4.8901$ $K_d=0.2177$
Ts (s) (± 0.002 bant)	Δf_1	6.25	2.766	2.322	2.34	1.22	1.708	0.241	0.556
	Δf_2	6.48	3.246	2.959	3.63	2.25	1.95	1.065	0.272
	ΔP_{tie12}	4.40	2.760	2.384	2.33	1.05	0.84	0.459	0.145
ITAE		n/r	0.01807	0.01268	0.0121	0.0034	0.0028	7.28e-04	3.07e-04

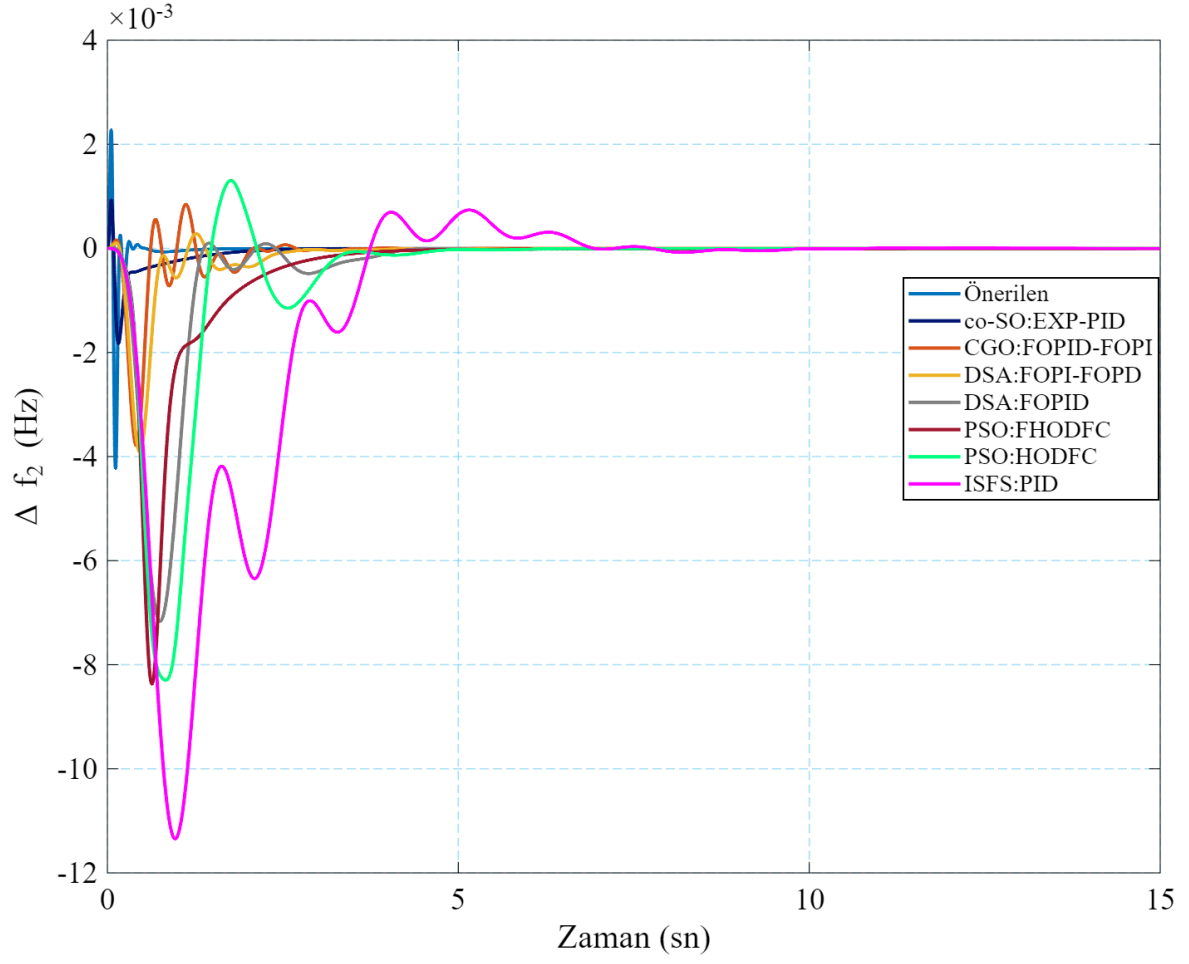
Önerilen denetleyici HO algoritması ile 1. bölgeye 0.01 p.u yük uygulanması, 2. bölgede herhangi bir yük olmaması durumunda optimize edilerek parametre değerleri ayarlanmıştır. Tablo 4'te de görüleceği üzere literatürde yer alan denetleyicilere nazaran GDB içeren ara ısıtmasız termal santral modeli üzerinde Δf_2 , ΔP_{tie12} ve ITAE değerleri bakımından önerilen HO:TANH-PID denetleyici en iyi sonuçları vermiştir. Δf_1 isterinde ise en iyi sonucu 0.241 değeri ile co:SO EXP-PID göstermektedir.

Literatürde yer alan GDB özelliği barındıran sistem üzerinde en iyi sonucu veren denetleyiciler ile tasarlanan yeni denetleyici kıyaslanarak 15 sn simülasyon süresinde sonuçlar karşılaştırılmıştır.

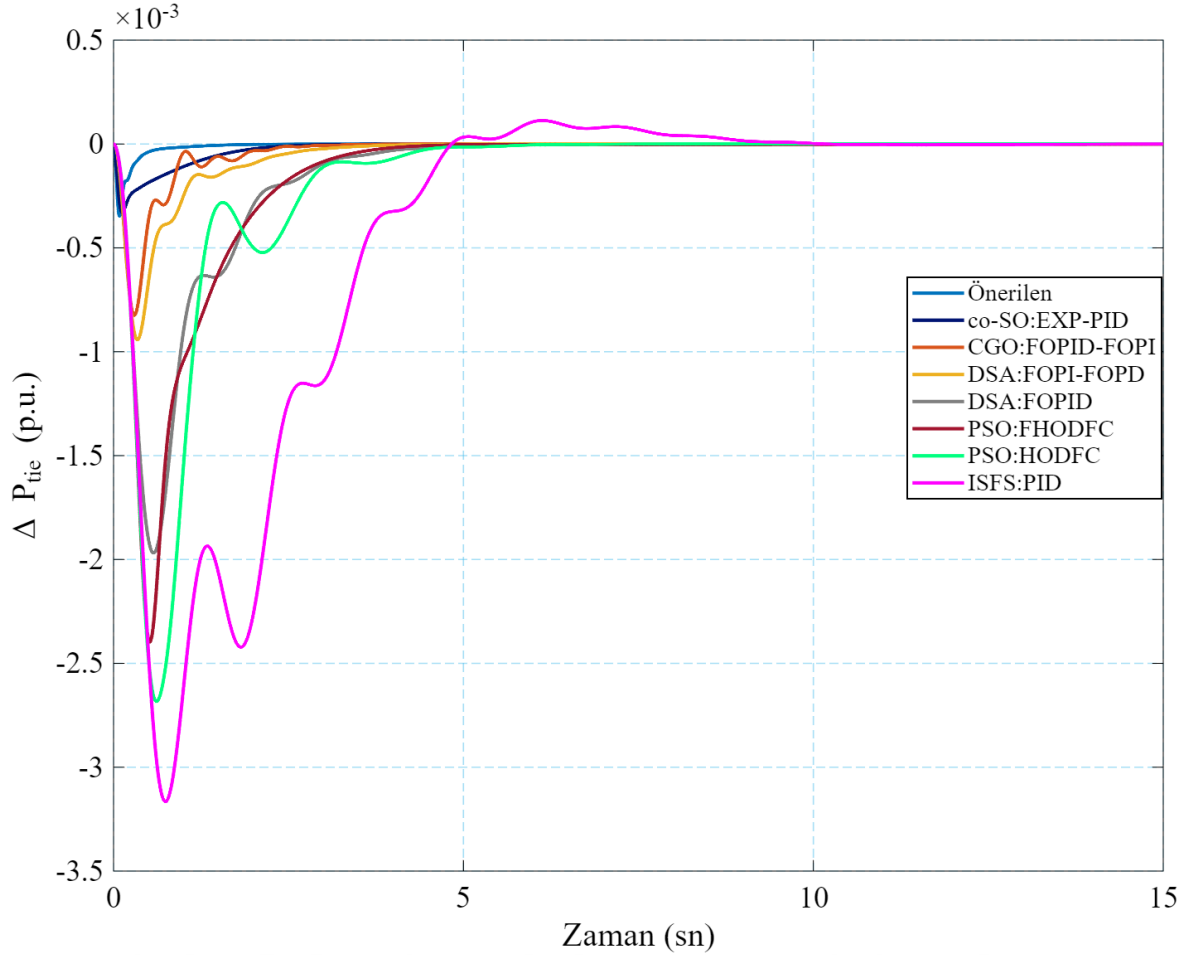
Çalışmada önerilen denetleyici en yakın rakibine göre Δf_2 isterinde %74.47 oranında, ΔP_{tie12} isterinde %68.42 oranında ve ITAE değerinde %57.83 oranında iyileşme sağlamıştır.



Şekil 40. Doğrusal olmayan iki bölge GDB özellikli ara-ısıtmasız termal güç sisteminde Birinci Bölgenin frekans değişim eğrisinin farklı tekniklerle karşılaştırılması

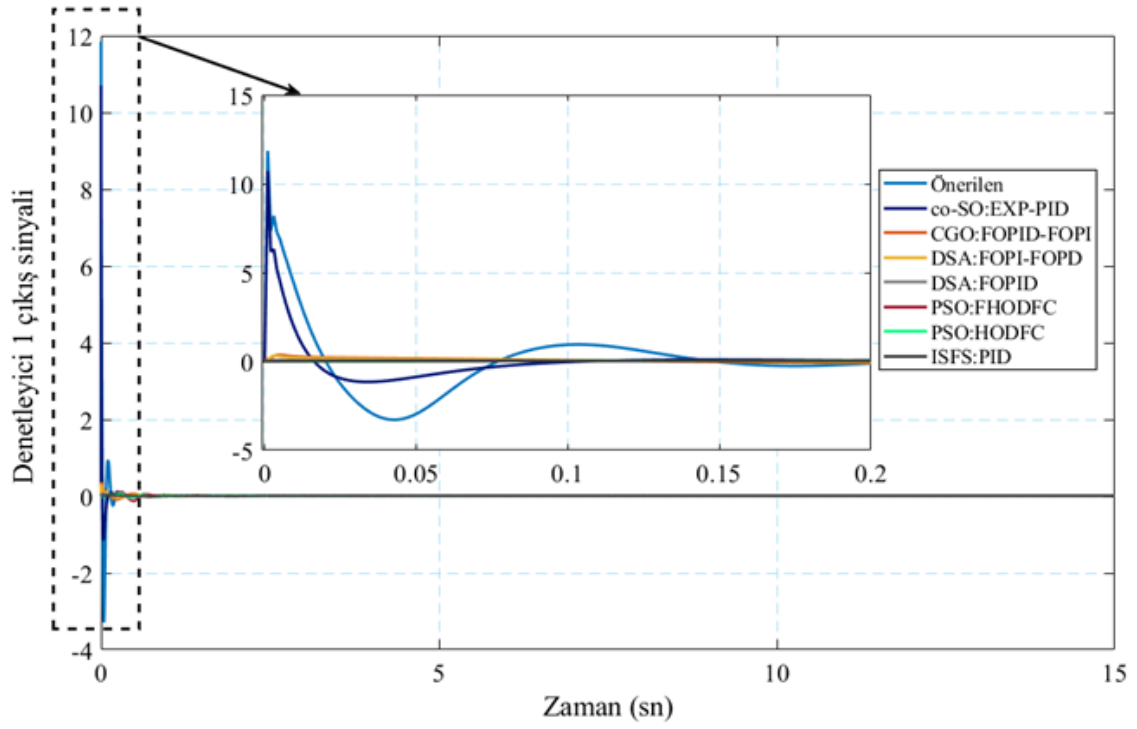


Şekil 41. Doğrusal olmayan iki bölge GDB özellikli ara-ısıtmasız termal güç sisteminde ikinci bölgenin frekans değişim eğrisinin farklı tekniklerle karşılaştırılması

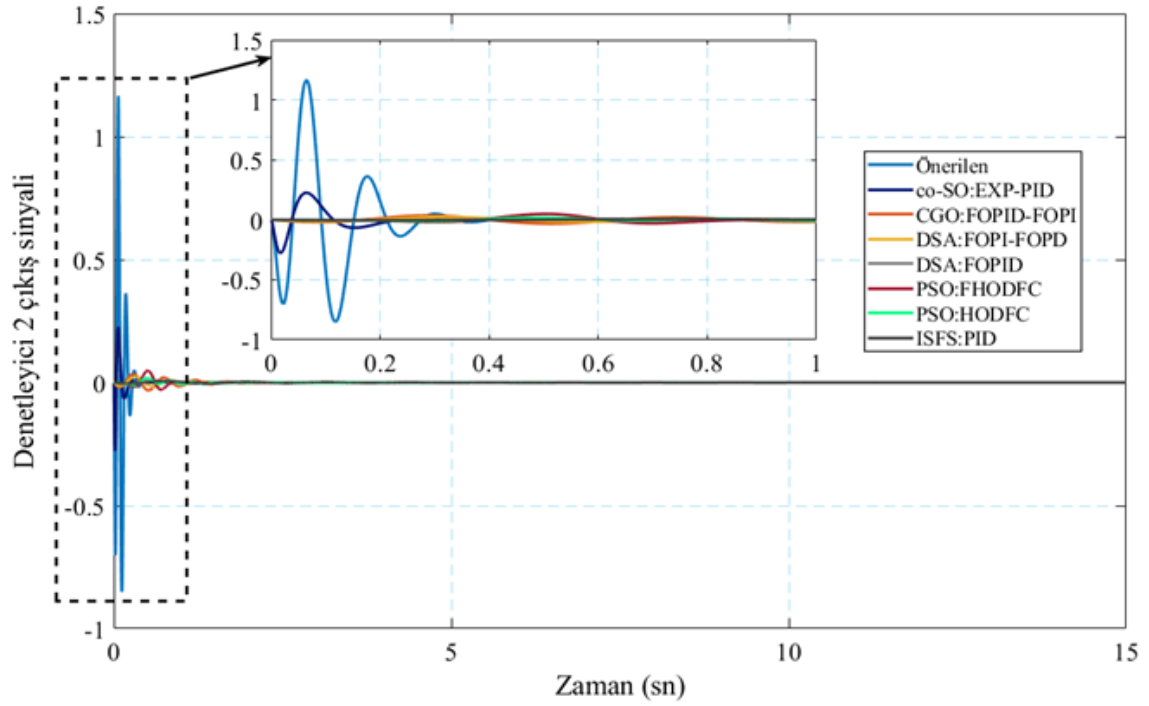


Şekil 42. Doğrusal olmayan iki bölge GDB özellikli ara-ısıtmasız termal güç sisteminde bağlantı hattı güç değişim eğrisinin farklı tekniklerle karşılaştırılması

Şekil 43'te iki bölgede yer alan her iki denetleyici için kontrol sinyalleri önerilen yaklaşım ve farklı denetleyicileri içerecek şekilde sunulmuştur. Önerilen denetleyici her iki kontrol bölgesinde de en yüksek genlikli sinyalleri üretmiştir. Bu durum, YFK uygulamalarında önerilen yöntemin daha fazla enerji harcamasına agresif tepki vererek salınımların hızlı bir biçimde sönümlenmesine imkan tanımıştır. Önerilen yaklaşımla YFK açısından frekans sapması hızlıca kontrolü altına alınmış, literatürdeki diğer yöntemlere oranla çok kısa bir sürede salınımlar sönümlenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 43. Doğrusal olmayan iki bölgeli ölü banthı governor (GDB) özellikli ara-ısıtmasız termal güç sisteminde üretilen kontrol sinyalleri (a) birinci bölge (b) ikinci bölge

3.3. Doğrusal Olmayan İki Bölge GRC Özellikli Ara-Isıtmasız Termal Güç Sistemi Analiz Değerlendirmeleri

GRC içeren ara ısıtmasız termal santral modeli için literatürde farklı algoritmalar ile parametre değerleri ayarlanan denetleyicilerin parametre değerleri, ITAE değerleri ve OS bilgileri Tablo 5’te sunulmuştur.

Çalışma kapsamında literatürde yük frekans kontrolüne yönelik en iyi sonuçları veren denetleyiciler; co-SO:EXP-PID (Çelik, 2024), PSO:HODFC (Sahin, 2020), PSO:FHODFC (Sahin, 2020), QQHS:PID (Shiva vd., 2015) ile karşılaştırma yoluna gidilerek önerilen denetleyicinin etkinliği ispatlanmaya çalışılmıştır.

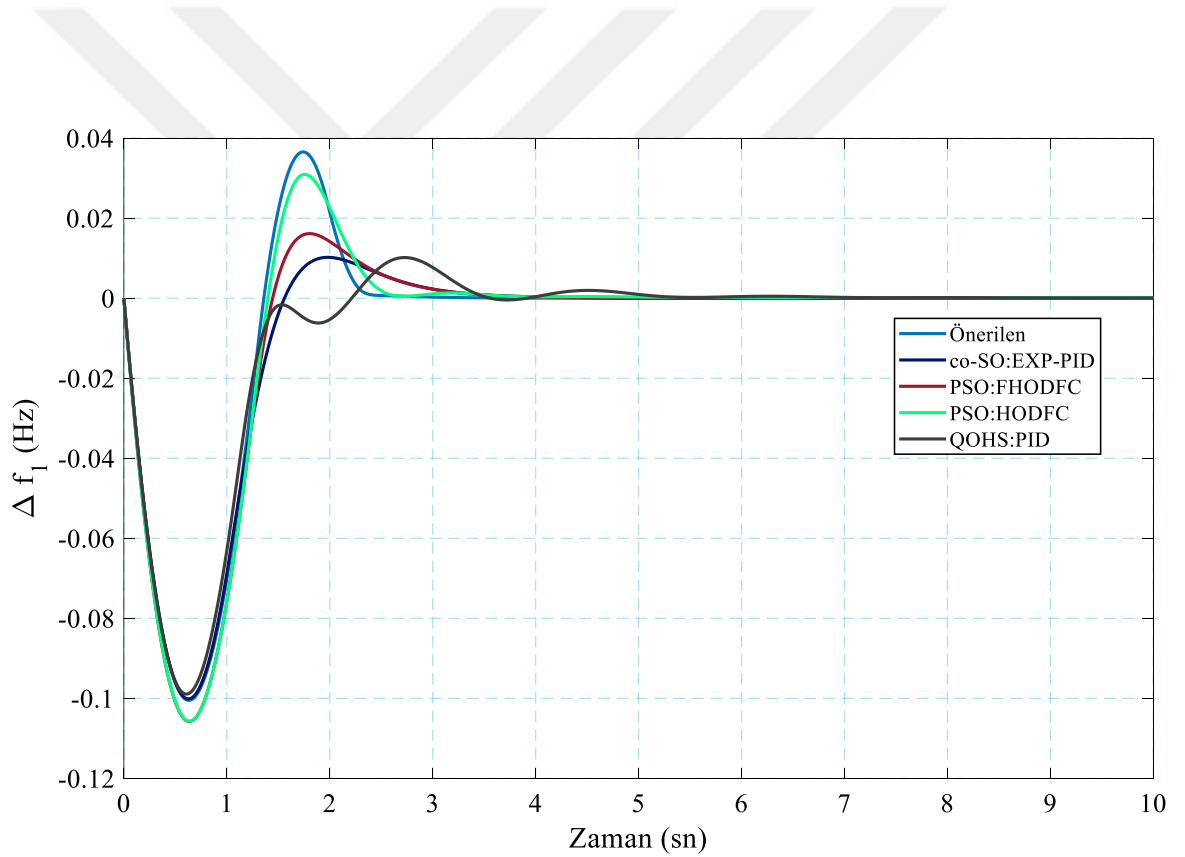
Tablo 5. Doğrusal olmayan iki bölge GRC özellikli ara-ısıtmasız termal güç sistemi için denetleyici parametreleri ve elde edilen sonuçlar

Optimizasyon Teknikleri		QQHS: PID	PSO: HODFC	PSO: FHODFC	co-SO:EXP-PID(*)	HO:TANH-PID(Önerilen)
Denetleyici Parametreleri		$K_p=0.3898$ $K_i=1.0113$ $K_d=0.7695$	$K_1=2.5570$ $K_2=0.8750$ $K_3=0.1610$ $K_4=7.5800e-4$ $K_5=2.5400e-4$ $K_f=0.3210$	$K_1=1.8040$ $K_2=0.7620$ $K_3=0.1860$ $K_4=4.0700e-4$ $K_5=4.5100e-4$ $K_f=0.4123$ $\lambda_1=0.8180$ $\lambda_2=0.8890$ $\lambda_3=0.7490$ $\lambda_4=0.6900$ $\lambda_5=0.9980$	$\tau_1=0.6900$ $\tau_2=4.6128$ $G_1=1.0200$ $G_2=1.5878$ $K_p=1.1694$ $K_i=0.4587$ $K_d=0.3026$	$M_1=1.8046$ $M_2=0.0651$ $A_1=1.0204$ $A_2=1.7026$ $K_p=4.7633$ $K_i=0.4736$ $K_d=1.2619$
Ts (s) (± 0.001 bant)	Δf_1	4.981	3.435	3.395	3.419	2.375
	Δf_2	4.551	3.367	2.464	2.804	2.106
	ΔP_{tie12}	3.186	2.208	2.776	2.889	2.118
ITAE		n/a	0.259	0.237	0.22996	0.2004

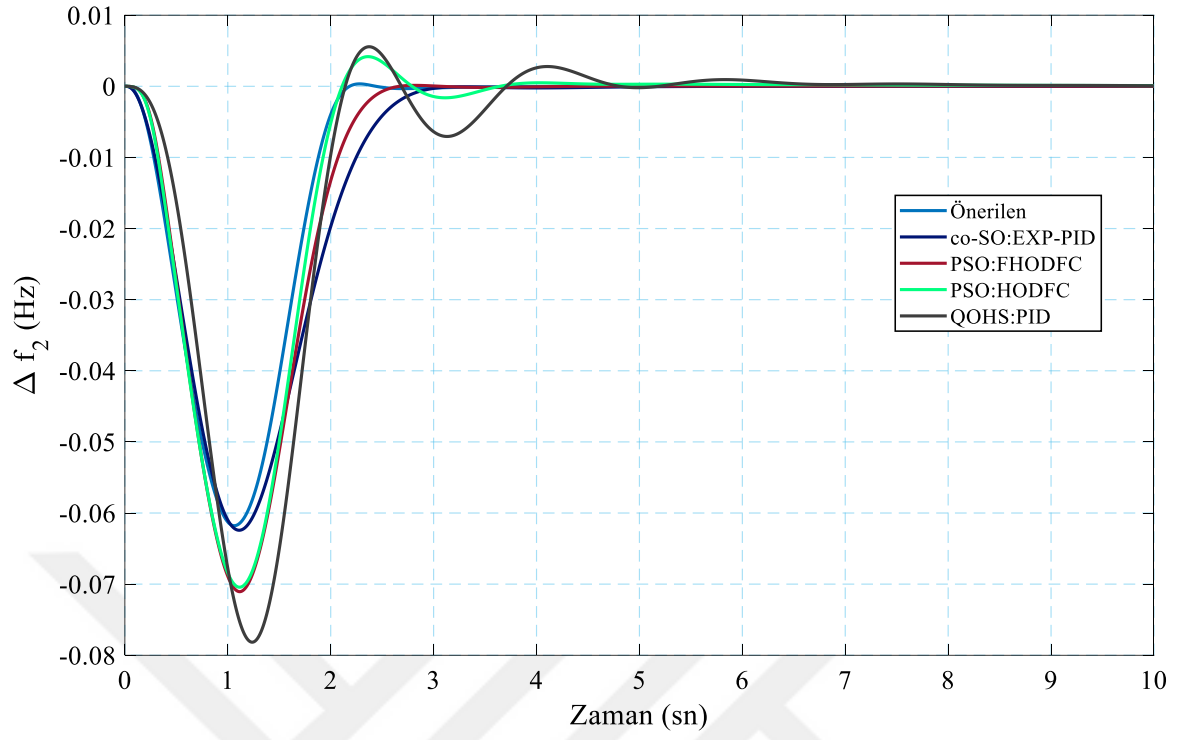
Önerilen HO:TANH-PID denetleyici parametreleri, 1. bölgede 0.05 p.u yük uygulanması, 2. bölgeye herhangi bir yük etki etmemesi durumu için değerlendirilerek

optimizasyon yapılmıştır. Tablo 5 üzerinden de anlaşılacağı üzere literatürde yer alan denetleyicilere nazaran GRC içeren ara ısıtmasız termal santral modeli üzerinde $\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta P_{tie12}$ ve ITAE değerleri bakımından önerilen HO:TANH-PID denetleyici sistem dinamiği ve kontrol adına en tatmin edici sonuçları vermiştir. Tablo 5'te (*) ile belirtilen co-SO:EXP-PID denetleyici için bu çalışma kapsamında parametre optimizasyon işlemleri yapılarak HO:TANH-PID ile ayrıca kıyaslamaya dahil edilmiştir.

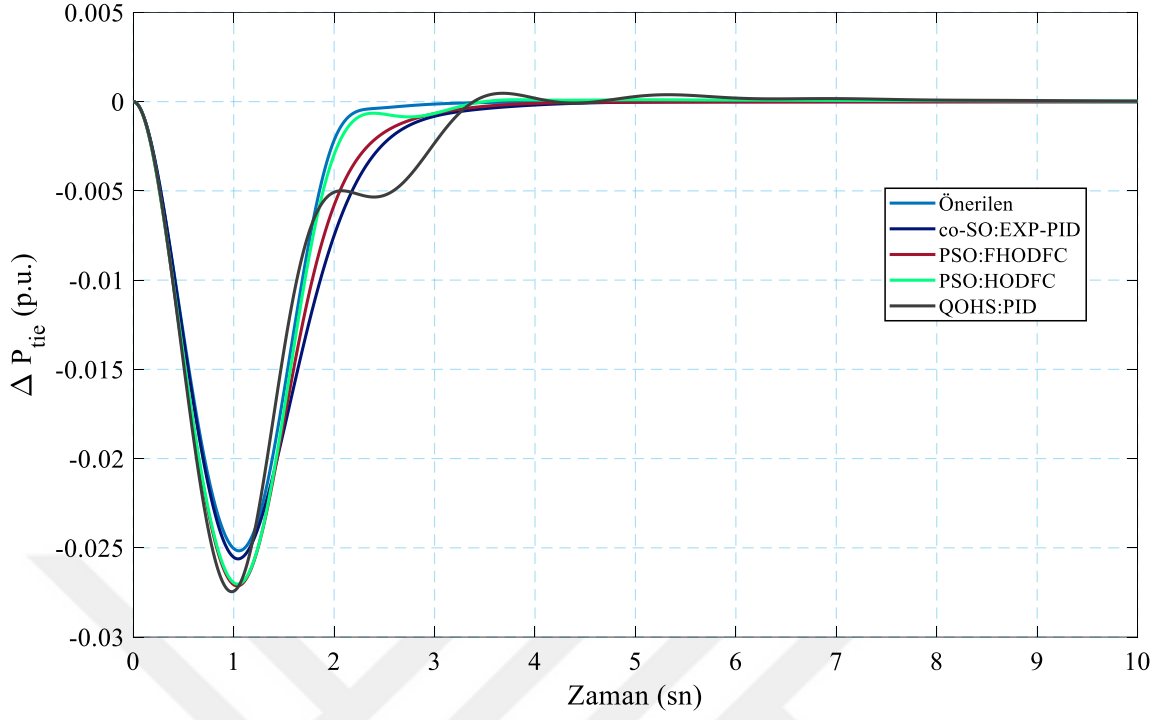
Çalışmada önerilen denetleyici en yakın rakibine göre Δf_1 isterinde %30.04, Δf_2 isterinde %14.39 oranında, ΔP_{tie12} isterinde %4.07 oranında ve ITAE değerinde %12.86 oranında iyileşme sağlamıştır. $\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta P_{tie12}$ simülasyon çıktıları sırasıyla Şekil 44, Şekil 45 ve Şekil 46'da sunulmuştur.



Şekil 44. Doğrusal olmayan iki bölge GRC özellikli ara-ısıtmasız termal güç sisteminde birinci bölgenin frekans değişim eğrisinin farklı tekniklerle karşılaştırılması

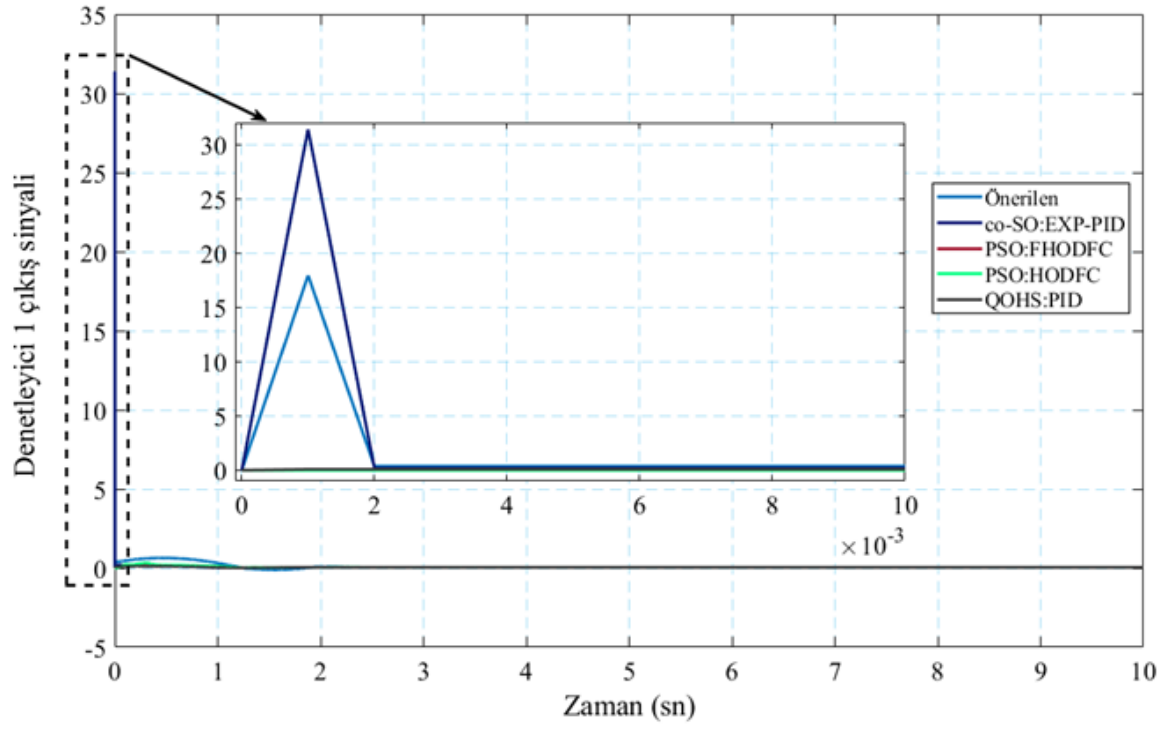


Şekil 45. Doğrusal olmayan iki bölgeci GRC özellikli ara-ısıtmasız termal güç sisteminde ikinci bölgenin frekans değişim eğrisinin farklı tekniklerle karşılaştırılması

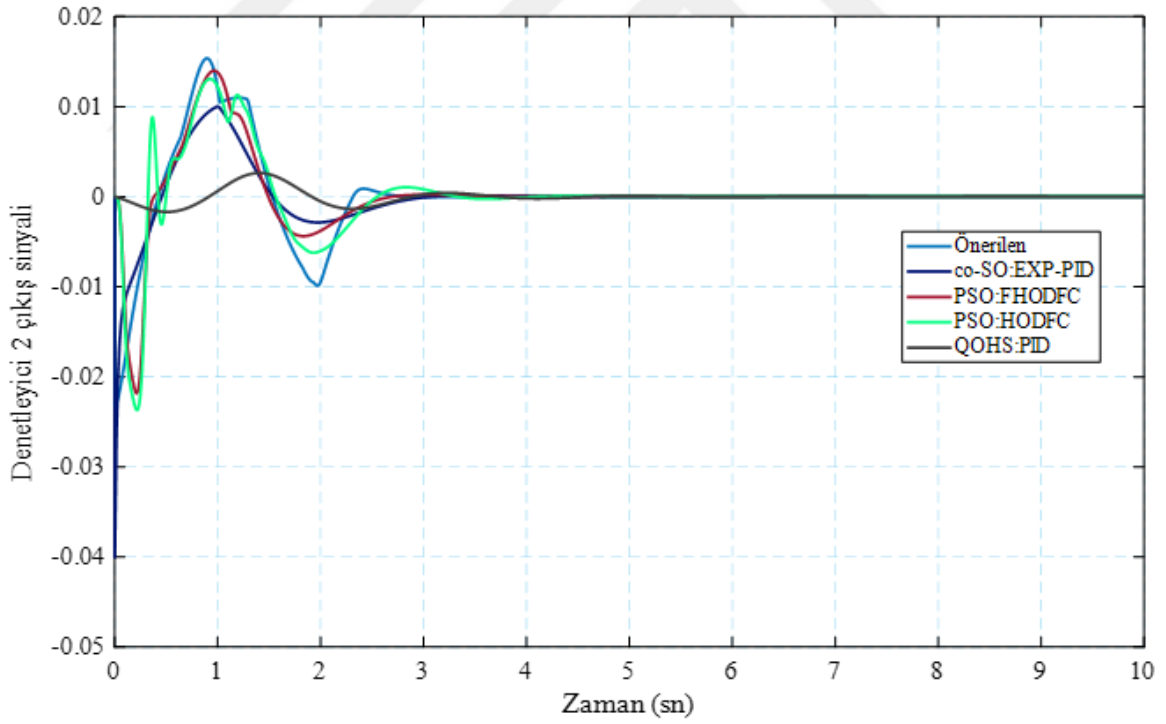


Şekil 46. Doğrusal olmayan iki bölge GRC özellikli ara-ısıtmasız termal güç sisteminde bağlantı hattı güç değişim eğrisinin farklı tekniklerle karşılaştırılması

Şekil 47’de iki bölgede yer alan her iki denetleyici için kontrol sinyalleri önerilen yaklaşım ve farklı denetleyicileri içerecek şekilde sunulmuştur. Önerilen yaklaşım için birinci bölgede co-SO: EXP-PID denetleyiciye oranla daha az salınımlı bir tepki ve daha az bir kontrol eforu gerektirdiği gözlemlenirken, ikinci bölge için diğer yöntemlere kıyasla biraz daha fazla kontrol eforu gerektirdiği ancak diğer yöntemlere göre daha kısa sürede salınımların sönümlendirildiği gözlenmektedir.



(a)



(b)

Şekil 47. Doğrusal olmayan iki bölgeyi GRC özellikli ara-ısıtmasız termal güç sisteminde üretilen kontrol sinyalleri (a) birinci bölge (b) ikinci bölge

3.4. Çok Kaynaklı Tek Bölge Güç Sistemi Analiz Değerlendirmeleri

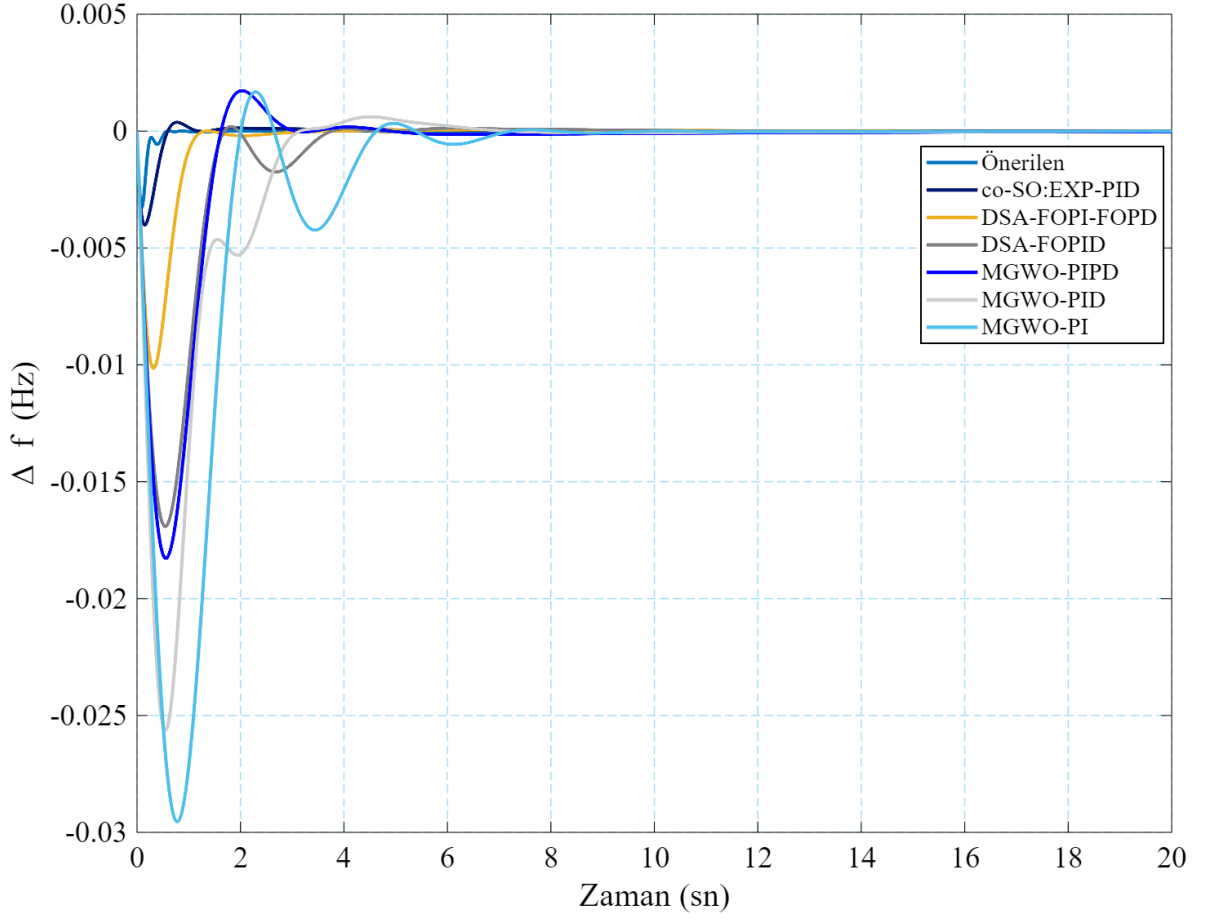
Literatürde tasarlanan denetleyici yapılarının çok kaynaklı tek bölge güç sistemleri üzerine uyarlanarak performans analizi yapılması popüler bir yaklaşımdır. Bu çalışmada da literatürde etkinliği ispatlanan denetleyicilerle önerilen denetleyicinin performansı ilgili güç sistemi üzerinde kıyaslanmaya çalışılmıştır. Kıyas yoluna gidilen denetleyiciler; DSA:FOPID (Çelik, 2021), DSA:FOPI-FOPD (Çelik, 2021), co-SO:EXP-PID (Çelik, 2024), MGWO:PI (Khadanga, 2022), MGWO:PID (Khadanga, 2022), MGWO:PID (Khadanga, 2022) olmak üzere çalışma kapsamında ele alınmıştır. Çalışmada tek bölge sisteme 0.01 pu yük uygulanarak optimizasyon işlemi yapılmıştır. HOA ile optimize edilen önerilen denetleyici ve literatürde etkinliği ispatlanan denetleyici parametre değerleri bu kapsamda Tablo 6' da sunulmuştur.

Tablo 6'dan da anlaşılacağı üzere, güç sistem modeli tek bölge olduğundan sadece ± 0.001 bant aralığında Δf ve ITAE değerleri bakımından analiz yapılmıştır. Önerilen HO:TANH-PID denetleyici ± 0.001 bant aralığında en iyi OS ve ITAE değerini vermiştir. Tüm simülasyon sonuçlarının bir arada verildiği Şekil 48'de yer alan grafik çıktısı için simülasyon süresi çalışma kapsamında da 20 sn olarak alınmıştır.

Çalışmada önerilen denetleyici en yakın rakibine göre Δf isterinde %14.87 oranında ve ITAE değerinde %96.27 oranında iyileşme sağlamıştır.

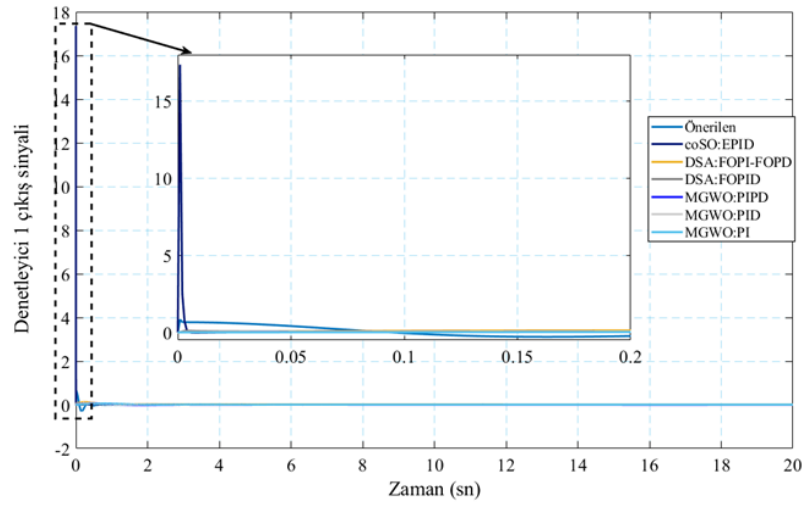
Tablo 6. Çok kaynaklı tek bölgeli güç sistemi için denetleyici parametreleri ve elde edilen sonuçlar

Optimizasyon Teknikleri	MGWO:PI	MGWO:PID	MGWO:PIPD	DSA:FOPID	DSA:FOPI-FOPD	co-SO:EXP-PID	HO:TANH-PID(Önerilen)
Denetleyici Parametreleri	Termal $K_p=1.9995$ $K_i=0.2391$	Termal $K_p=1.9995$ $K_i=0.1637$ $K_d=0.4633$	Termal $K_{p1}=-0.2828$ $K_{p2}=0.0084$ $K_i=-1.7898$ $K_d=-1.9978$	Termal $K_p=1.9999$ $K_i=2.0000$ $K_d=0.5826$ $\lambda=0.4049$ $\mu=1.2184$	Termal $K_{p1}=-2.0000$ $K_{p2}=-2.0000$ $K_i=-2.0000$ $K_d=-2.0000$ $\lambda=0.8883$ $\mu=0.5116$	Termal $\tau_1=1.9414$ $\tau_2=0.6907$ $G_1=4.7039$ $G_2=1.1616$ $K_p=3.6832$ $K_i=4.9852$ $K_d=0.6651$	Termal $M_1=0.7509$ $M_2=1.0889$ $A_1=1.2945$ $A_2=5$ $K_p=2.0885$ $K_i=0.7790$ $K_d=5.4862e-04$
	Hidro $K_p=0.0189$ $K_i=0.0048$	Hidro $K_p=0.4779$ $K_i=0.0906$ $K_d=0.9258$	Hidro $K_{p1}=0.1610$ $K_{p2}=-0.6917$ $K_i=-0.5022$ $K_d=-0.4581$	Hidro $K_p=-1.2615$ $K_i=0.3340$ $K_d=0.6897$ $\lambda=0.98890$ $\mu=0.4366$	Hidro $K_{p1}=-1.2377$ $K_{p2}=1.3189$ $K_i=0.3657$ $K_d=0.6020$ $\lambda=0.6953$ $\mu=0.8743$	Hidro $\tau_1=0.6422$ $\tau_2=0.2659$ $G_1=2.9614$ $G_2=1.0619$ $K_p=2.0944$ $K_i=1.4917$ $K_d=0.3896$	Hidro $M_1=8.3874e-04$ $M_2=1.0434$ $A_1=5$ $A_2=9.9631e-04$ $K_p=4.9831$ $K_i=4.9263$ $K_d=0.4211$
	Gaz $K_p=0.0507$ $K_i=0.9633$	Gaz $K_p=0.1918$ $K_i=1.9995$ $K_d=0.1192$	Gaz $K_{p1}=0.0115$ $K_{p2}=-1.9978$ $K_i=-1.9978$ $K_d=-0.1134$	Gaz $K_p=2.0000$ $K_i=1.9899$ $K_d=0.0407$ $\lambda=1.1440$ $\mu=0.8043$	Gaz $K_{p1}=-2.0000$ $K_{p2}=-1.3423$ $K_i=2.0000$ $K_d=1.2254$ $\lambda=0.7158$ $\mu=0.5336$	Gaz $\tau_1=1.9810$ $\tau_2=0.0126$ $G_1=4.9998$ $G_2=2.6501$ $K_p=3.8076$ $K_i=4.9320$ $K_d=0.4136$	Gaz $M_1=4.9998$ $M_2=0.2464$ $A_1=5$ $A_2=4.9576$ $K_p=4.7061$ $K_i=4.9997$ $K_d=0.0015$
Δf Ts (s) (± 0.001 bant)	6.85	6.10	2.83	3.58	2.24	0.586	0.499
ITAE	0.572	0.0375	0.0292	0.0187	0.0070	0.0035	1.3040e-04

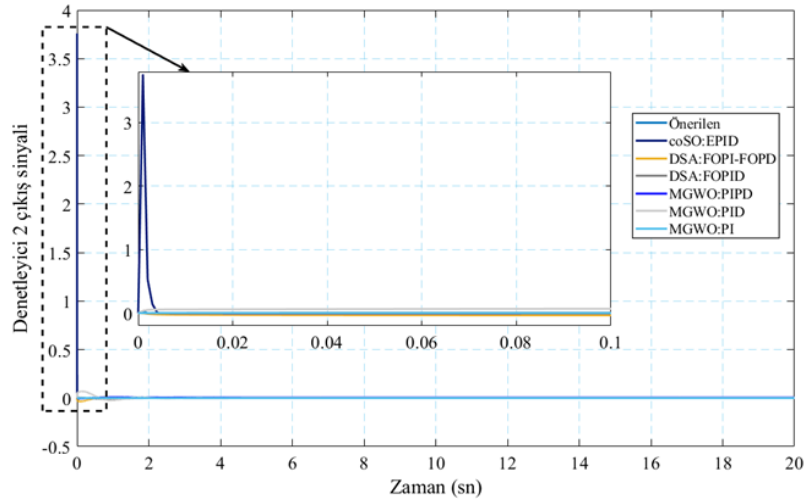


Şekil 48. Çok kaynaklı tek alanlı güç sistemi için frekans değişim eğrisinin farklı tekniklerle karşılaştırılması

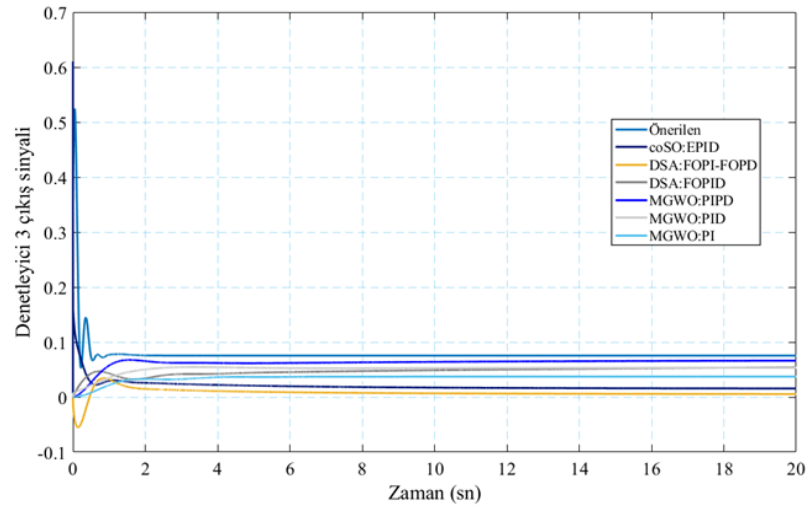
Şekil 49’da tek bölge sistemde yer alan üç farklı denetleyici için kontrol sinyalleri sunulmuştur. Birinci denetleyici sinyali (a) bölgesi için co-SO: EXP-PID denetleyicinin agresif tepki vererek en fazla kontrol eforu gerektirirken, DSA: FOPI-FOPD denetleyicinin minimum kontrol eforu gerektirerek daha hızlı kararlı hale geldiği, ikinci denetleyici sinyali (b) performansında önerilen yaklaşımın grafiksel sonucunda minimum aşım ve minimum salınımla performans sergilediği, (c) olarak ifade edilen üçüncü denetleyici performansında da diğer yöntemlere kıyasla önerilen yaklaşımın daha fazla kontrol eforu gerektirdiği ancak salınımların daha hızlı sönümlendirilerek kararlı hale geldiği gözlenmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 49. Çok kaynaklı tek bölgeci güç sisteminde üretilen kontrol sinyalleri (a) Yeniden ısıtılmalı termal güç bölgesi (b) Hidro güç bölgesi (c) Gaz türbini bölgesi

3.5. Çok Kaynaklı İki Bölge Güç Sistemi Analiz Değerlendirmeleri

Literatürde çok kaynaklı iki bölge güç sistemi üzerinde, önerilen yaklaşımla karşılaştırma yoluna gidilen, ilgili sistemde en iyi denetim sonuçlarını veren denetleyiciler; DSA:FOPID (Çelik, 2021), DSA:FOPI-FOPD (Çelik, 2021), co-SO:EXP-PID (Çelik, 2024), MGWO:PID (Khadanga, 2022), CGO:FOPID-FOPI (Barakat, 2022) ele alınmış olup optimize edilen denetleyici parametreleri, her iki bölgenin frekans değişimleri ve bağlantı hattı güç değişim değerleri Tablo 7’de sunulmuştur.

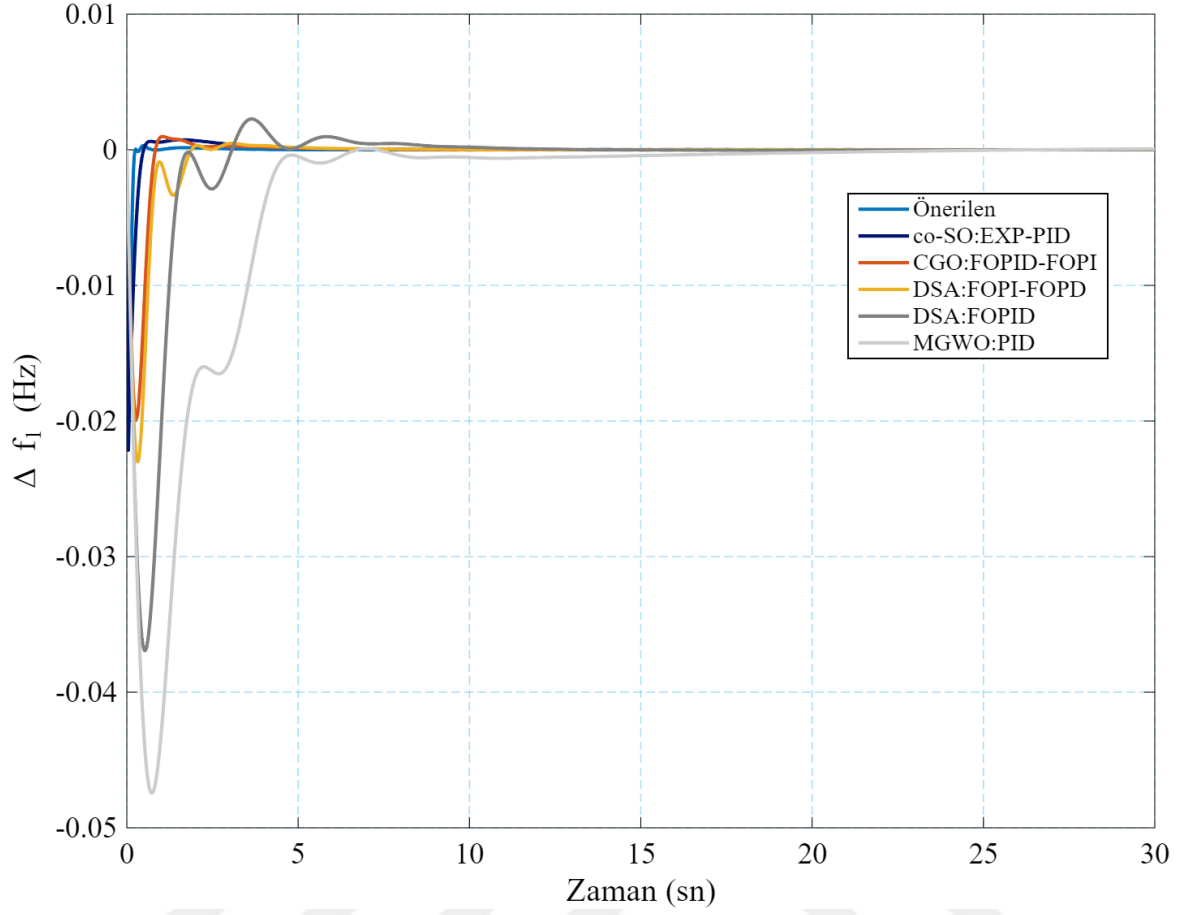
Tablo 7. Çok kaynaklı iki bölge güç sistemi için denetleyici parametreleri ve elde edilen sonuçlar

Optimizasyon Teknikleri		MGWO:PID	DSA:FOPID	DSA:FOPI-FOPD	CGO:FOPID-FOPI	co-SO:EXP-PID	HO:TANH-PID(Önerilen)
Denetleyici Parametreleri		Termal $K_p=1.7502$ $K_i=-0.0087$ $K_d=0.7499$	Termal $K_p=1.9998$ $K_i=2.0000$ $K_d=1.9999$ $\lambda=0.5021$ $\mu=0.2386$	Termal $K_{p1}=-2.000$ $K_{p2}=-2.000$ $K_i=-2.0000$ $K_d=-2.0000$ $\lambda=0.5040$ $\mu=0.0100$	Termal $K_{p1}=1.9999$ $K_{p2}=1.9787$ $K_{i1}=1.9878$ $K_{i2}=2.0000$ $K_d=1.9715$ $\lambda_1=0.3023$ $\lambda_2=0.3023$ $\mu=1e-9$	Termal $\tau_1=1.9694$ $\tau_2=0.4368$ $G_1=4.9983$ $G_2=2.1835$ $K_p=4.3917$ $K_i=4.9868$ $K_d=0.4287$	Termal $M_1=0.0179$ $M_2=4.9485$ $A_1=4.9661$ $A_2=1e-05$ $K_p=4.5404$ $K_i=2.5605$ $K_d=4.8775$
		Hidro $K_p=0.3110$ $K_i=0.3102$ $K_d=0.0034$	Hidro $K_p=1.2029$ $K_i=1.1908$ $K_d=-0.4375$ $\lambda=0.5072$ $\mu=0.3748$	Hidro $K_{p1}=-1.7433$ $K_{p2}=-2.0000$ $K_i=-2.0000$ $K_d=-1.3626$ $\lambda=0.9506$ $\mu=0.0877$	Hidro $K_{p1}=2e-7$ $K_{p2}=0.1269$ $K_{i1}=2.1e-8$ $K_{i2}=1.9642$ $K_d=1.8441$ $\lambda_1=0.0061$ $\lambda_2=1.0000$ $\mu=1.5e-6$	Hidro $\tau_1=0.2550$ $\tau_2=1.6823$ $G_1=1.7787$ $G_2=1.1064$ $K_p=3.3372$ $K_i=1.6354$ $K_d=0.5998$	Hidro $M_1=2.6146$ $M_2=0.9058$ $A_1=0.0152$ $A_2=0.1245$ $K_p=0.0621$ $K_i=0.0356$ $K_d=3.7001$
		Gaz $K_p=0.0091$ $K_i=1.2409$ $K_d=0.6901$	Gaz $K_p=0.9272$ $K_i=2.0000$ $K_d=1.9999$ $\lambda=1.2105$ $\mu=1.2682$	Gaz $K_{p1}=-2.0000$ $K_{p2}=-1.7815$ $K_i=-2.0000$ $K_d=-2.0000$ $\lambda=0.8692$ $\mu=1.2000$	Gaz $K_{p1}=1.5012$ $K_{p2}=2.0000$ $K_{i1}=2.0000$ $K_{i2}=2.0000$ $K_d=1.6228$ $\lambda_1=1.267$ $\lambda_2=1.1e-4$ $\mu=1.3075$	Gaz $\tau_1=1.8337$ $\tau_2=0.0778$ $G_1=4.9938$ $G_2=0.3471$ $K_p=3.5966$ $K_i=4.7883$ $K_d=0.2893$	Gaz $M_1=4.9933$ $M_2=2.8663$ $A_1=4.9990$ $A_2=1.2384$ $K_p=4.9983$ $K_i=4.9970$ $K_d=0.4183$
Ts (s) (±0.001 bant)	Δf_1	15.69	8.31	1.81	1.74	3.027	0.219
	Δf_2	20.05	6.25	4.51	3.53	1.799	1.477
	ΔP_{tie12}	17.82	6.51	3.98	2.86	1.294	0.355
ITAE		0.9197	1.557	0.0461	0.0259	0.0244	0.0033

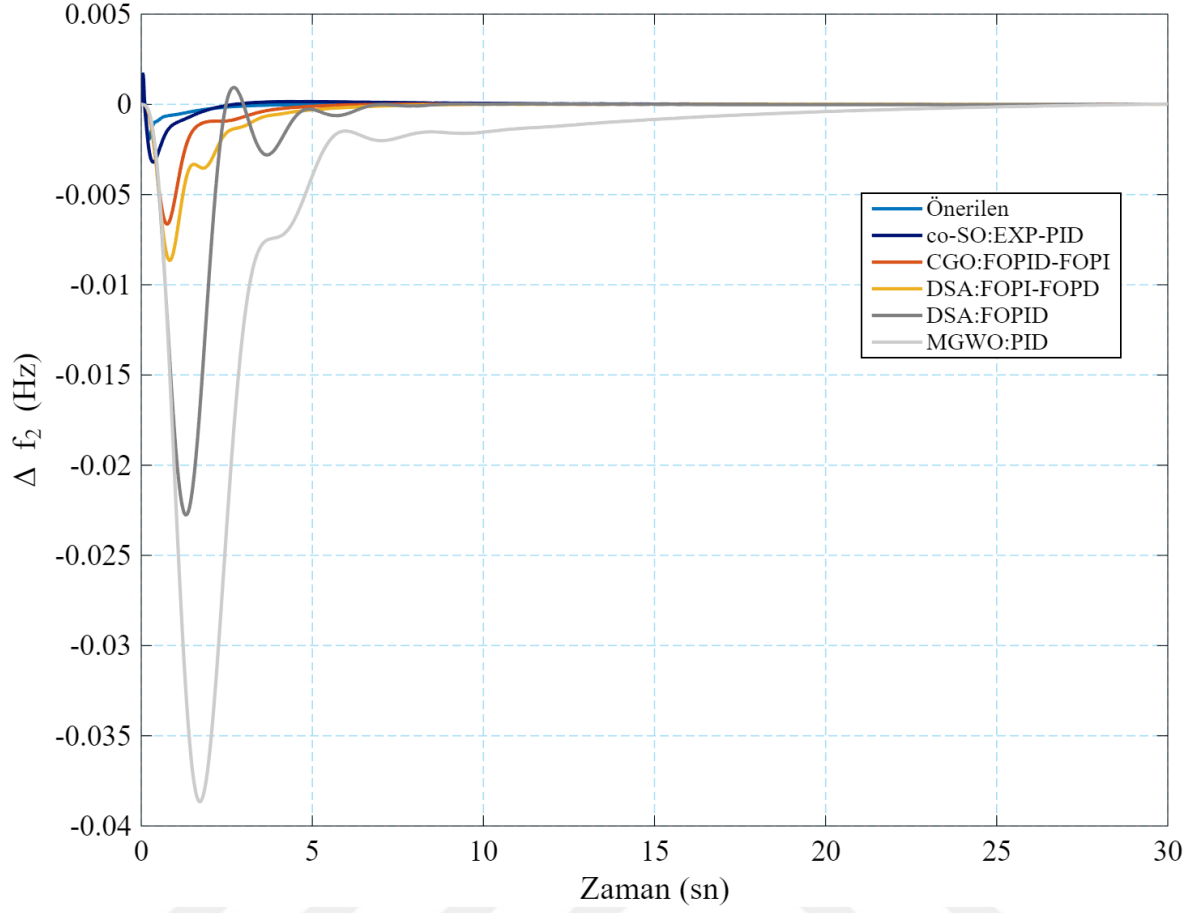
Önerilen HO:TANH-PID denetleyici ± 0.001 bant aralığında 1. bölgeye 0.02 p.u yük uygulanması, 2. bölgeye herhangi bir yük uygulanmaması durumunda optimize edilerek parametre değerleri ayarlanmıştır. Tablo 7’de de görüleceği üzere literatürde yer alan denetleyicilere iki bölgeli çok kaynaklı güç santral modeli üzerinde $\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta P_{tie12}$ ve ITAE performans isterleri bakımından çalışma kapsamında önerilen HO:TANH-PID denetleyici en iyi performansı sergilemiştir. Model sistemde yer alan parametre detayları, Bölüm 1.4. alt başlıklarında yer almaktadır.

Literatürde etkinliği ispatlanan denetleyiciler ve önerilen denetleyicinin simülasyon tepki sonuçları aynı grafikte verilmiştir. MATLAB ortamında alınan sonuçlar için ilgili güç sistem modelinde simülasyon çalışma süresi 30 sn olarak alınmıştır. $\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta P_{tie12}$ simülasyon çıktıları sırasıyla şekil 50, şekil 51 ve şekil 52’de sunulmuştur.

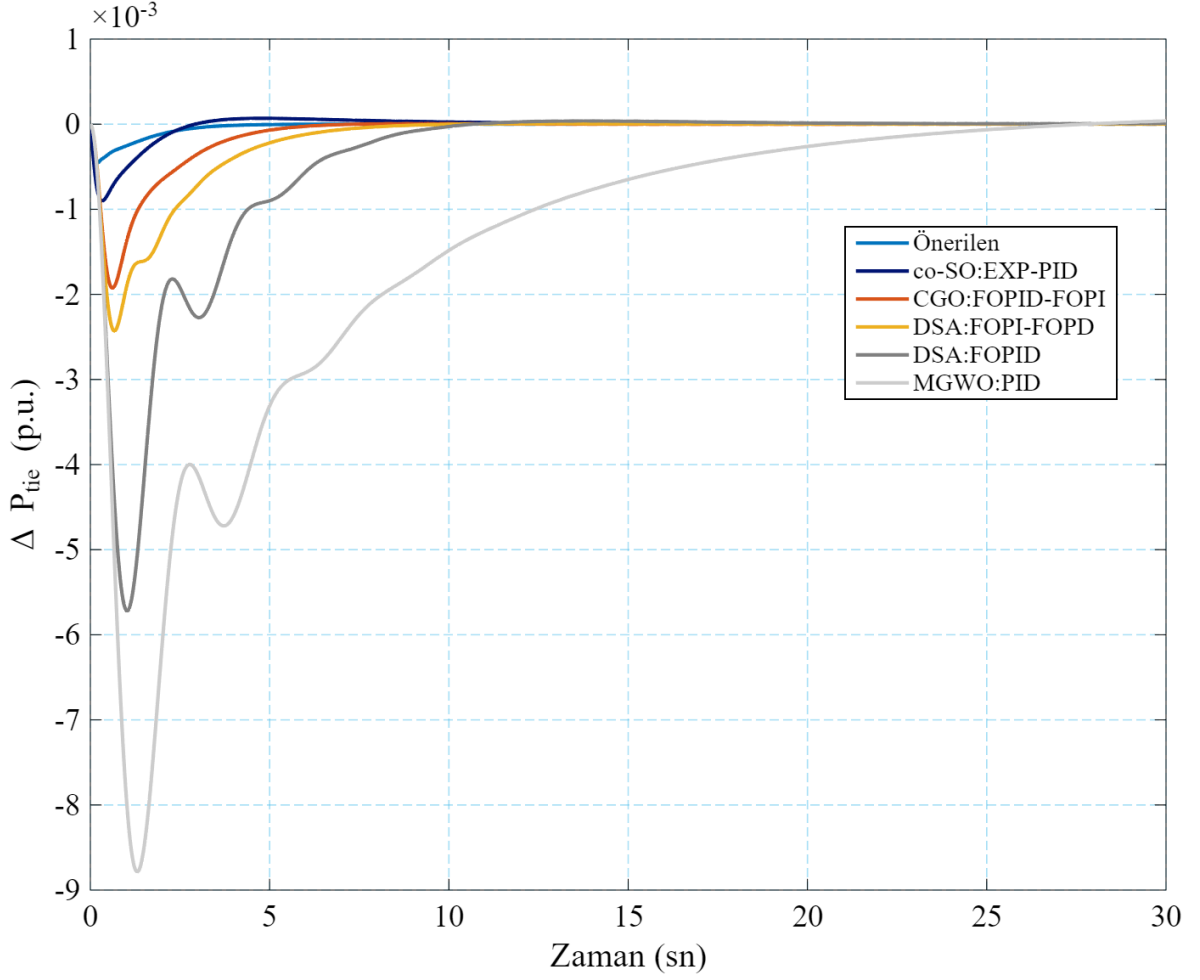
Çalışmada önerilen denetleyici en yakın rakibine göre Δf_1 isterinde %87.41 oranında, Δf_2 isterinde %58.16 oranında, ΔP_{tie12} isterinde %72.56 oranında ve ITAE değerinde %86.48 oranında iyileşme sağlamıştır.



Şekil 50. Çok kaynaklı iki alanlı güç sisteminde birinci bölgenin frekans değişim eğrisinin farklı tekniklerle karşılaştırılması

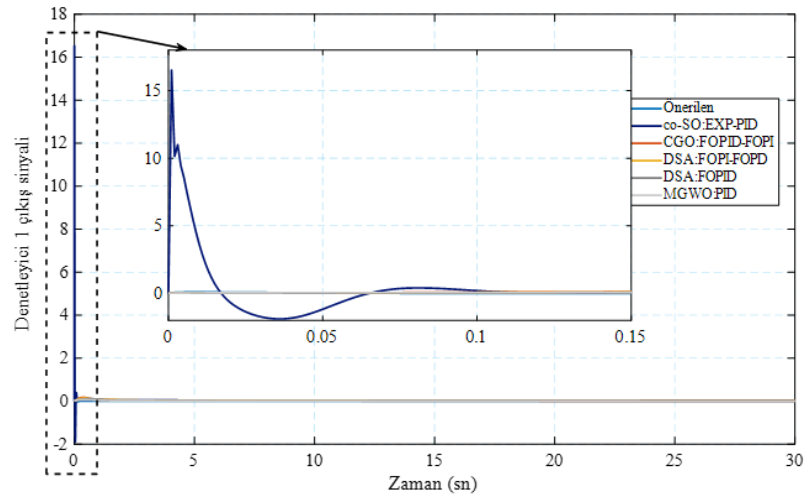


Şekil 51. Çok kaynaklı iki alanlı güç sisteminde ikinci bölgenin frekans değişim eğrisinin farklı tekniklerle karşılaştırılması

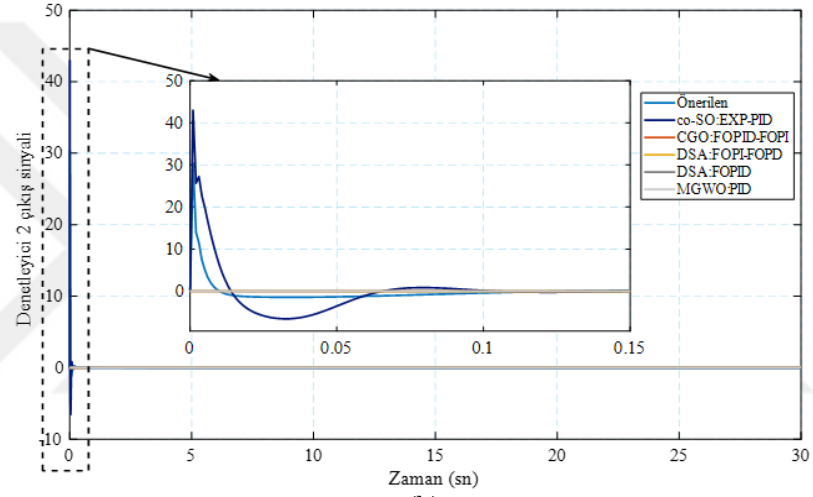


Şekil 52. Çok kaynaklı iki alanlı güç sisteminde bağlantı hattı güç değişim eğrisinin farklı tekniklerle karşılaştırılması

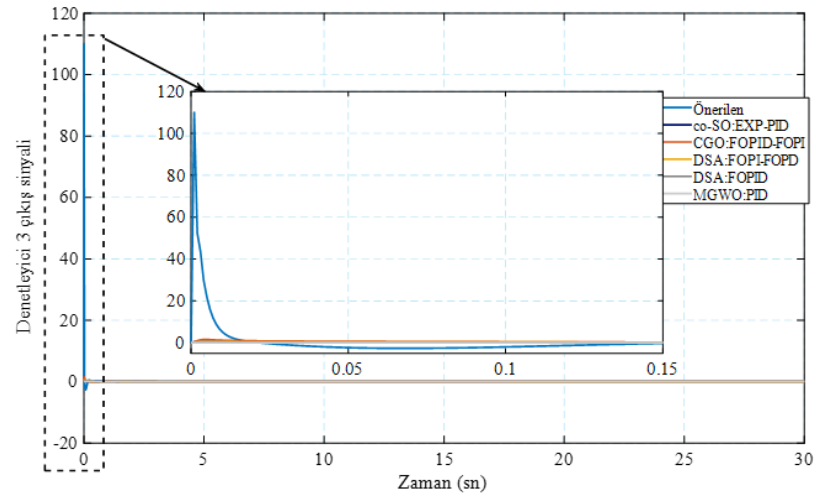
Şekil 53 ve Şekil 54'te iki bölgeci sistemde yer alan altı farklı denetleyici için kontrol sinyalleri sunulmuştur. Birinci bölgede yer alan (b) grafiksel sonucunda co-SO:EXP-PID yaklaşımına oranla daha küçük genlikli salınımlar sergilemiş gözükmemektedir, birinci bölge için (c) grafiğinde salınım genlikleri dolayısıyla da kontrol eforu diğer denetleyicilere göre daha yüksek seyretmektedir. İkinci bölgede için simülasyon sonuçları incelendiğinde ise genel olarak salınım genlikleri çok küçük bir biçimde değişmekte, çok kısa zaman aralıklarında salınımlar sönümlenmektedir. 30 s simülasyon süresi içerisinde, ikinci bölgede gözlemlenen çok düşük seviyede genlik tepkisi ve 1 saniyenin altındaki sönümlenme durumu önerilen yaklaşımın etkinliğini daha net bir biçimde ortaya koymaktadır.



(a)

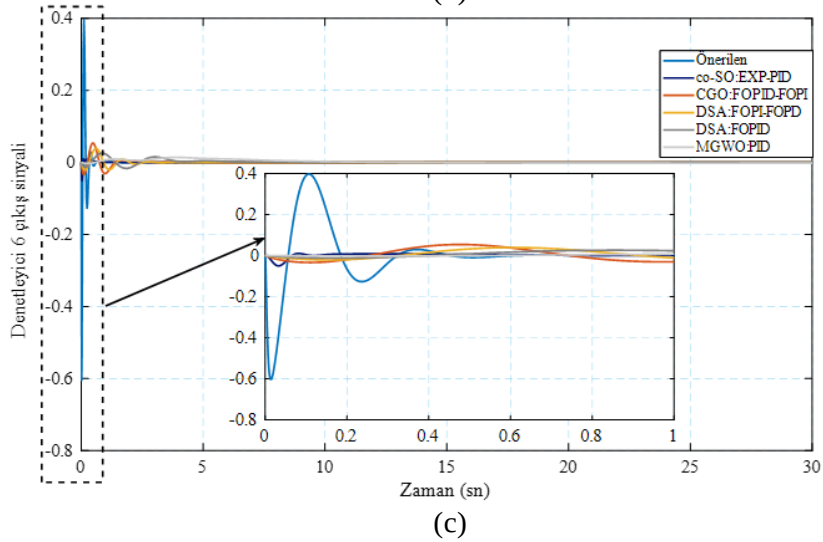
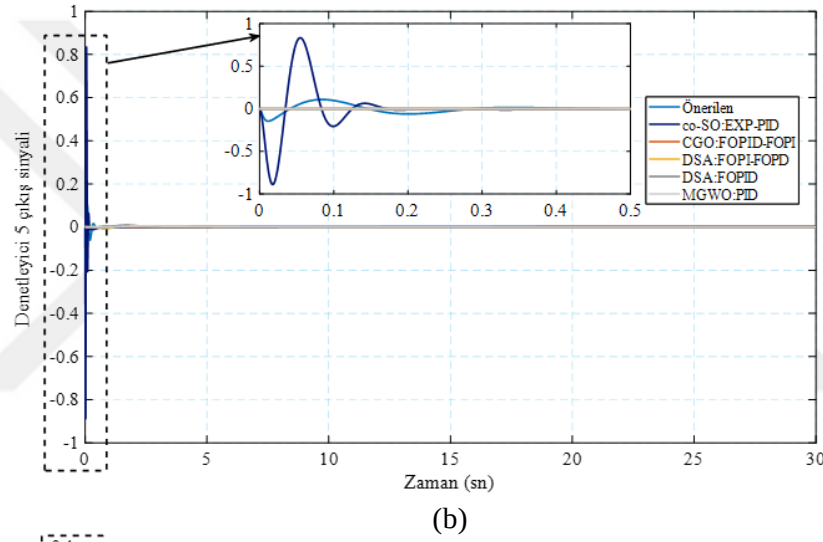
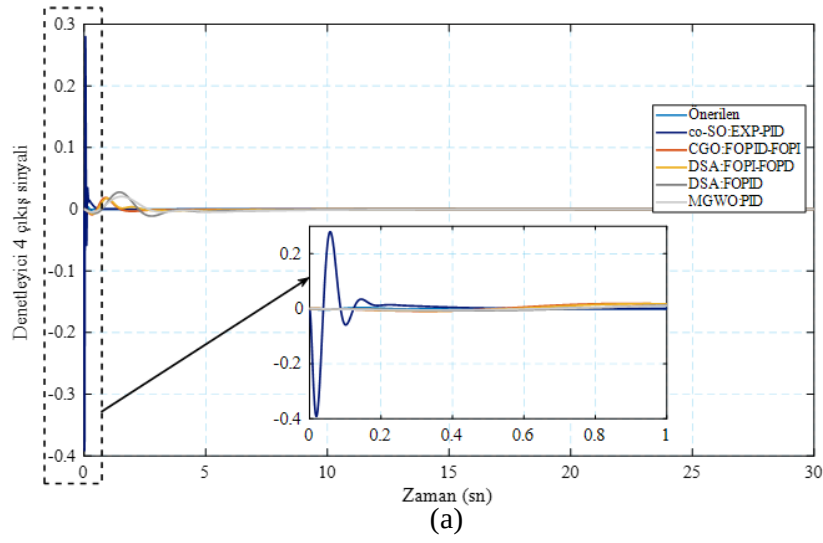


(b)



(c)

Şekil 53. Çok kaynaklı iki bölgeli güç sisteminde birinci bölge için üretilen kontrol sinyalleri (a) Yeniden ısıtılmalı termal güç bölgesi (b) Hidro güç bölgesi (c) Gaz türbini bölgesi



Şekil 54. Çok kaynaklı iki bölgeli güç sisteminde ikinci bölge için üretilen kontrol sinyalleri (a) Yeniden ısıtılmalı termal güç bölgesi (b) Hidro güç bölgesi (c) Gaz türbini bölgesi

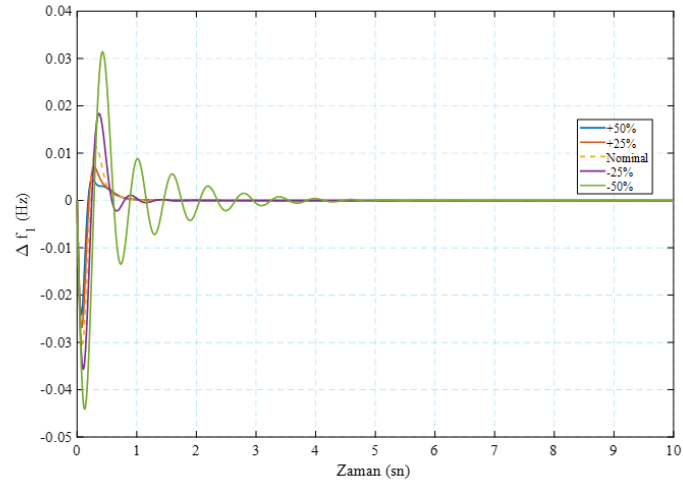
3.6. Gürbüzlük Analizleri

HOA ile optimize edilen TANH-PID denetleyicinin sağlamlığını ve dayanıklılığını değerlendirmek amacıyla kapsamlı bir gürbüzlük(sağlamlık) analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz kapsamında, YFK'nde iki bölgeli ara ısıtmasız güç santral modelinde yer alan sistem parametreleri ve yük koşulları nominal değerlerinin $\pm\%50$ 'si oranında değiştirilerek, kontrolcünün bu belirsizliklere karşı performansı test edilmiştir. Bu yaklaşım, gerçek işletme koşullarındaki değişkenlikleri simüle ederek sistemde kontrol başarısının sürdürülebilirliğini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Gürbüzlük analizinde, birinci alan yük sapması ΔP_{L1} , sönüm katsayısı (B), hız regülasyon parametresi (R), regülatör zaman sabiti (T_G), türbin zaman sabiti (T_T) ve alanlar arası bağlayıcı katsayısı (T_{12}) gibi temel parametreler ayrı ayrı ele alınmıştır. Performans ölçütleri olarak ITAE, 0.002 pu frekans bandı içerisinde oturma zamanı ve bölge gücü sapması (ΔP_{tie}) değerlendirilmiştir.

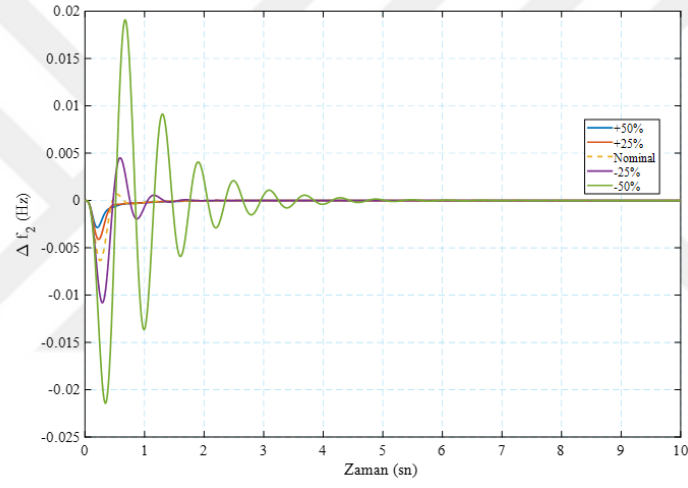
Tablo 8'de parametre değişimlerine istinaden frekans salınımları ve bağlantı hattı gücündeki değişim değerleri sunulmuştur, (*) ile ifade edilen OS değerleri standart tolerans bandı olan ± 0.002 değerinde 0 olarak raporlanmaktadır. Bu durumun nedeni, sistemin söz konusu geniş tolerans bandı içerisinde çok hızlı bir şekilde kararlı hale gelmesi ve ölçüm hassasiyetinin sınırlı olmasıdır; bu nedenle yerleşme süresi 0 olarak ifade edilmiştir. Daha hassas ve ayrıntılı bir performans analizi yapabilmek için (*) ile belirtilen değerlerde tolerans bandı ± 0.0002 olarak daraltılmıştır. Bu daraltılmış bant altında yerleşme süresi değerleri sıfırdan farklı olup, sistemin sağlamlık analizinin daha gerçekçi bir ölçümünü sağlamaktadır. Δf_1 , Δf_2 ve ΔP_{tie12} denetim analizi simülasyon sonuçları her bir parametre değişimi için Şekil 55-Şekil 60 aralığında verilmiştir.

Tablo 8. Gürbüzlük analizi için parametre değişimleri

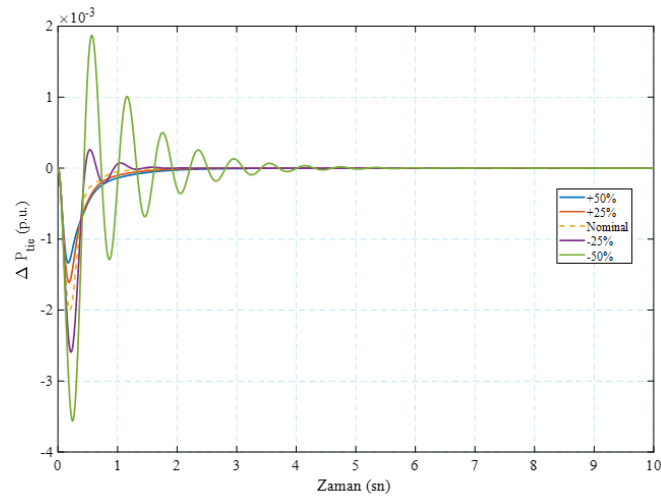
Parametreler	Değişim oranı	ITAE	Oturma zamanı (0.002 bant)		
			Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}
Nominal durum	-	0.0022	0.544	0.397	0.200
ΔP_{L_1}	+50%	0.0034	0.595	0.415	0.307
	+25%	0.0028	0.569	0.407	0.277
	-25%	0.0017	0.515	0.380	0.534*
	-50%	0.0011	0.478	0.348	0.454*
B	+50%	0.0019	0.561	0.285	0.810*
	+25%	0.0020	0.585	0.345	0.729*
	-25%	0.0044	0.693	0.696	0.299
	-50%	0.0383	2.530	2.521	0.357
R	+50%	0.0023	0.553	0.400	0.212
	+25%	0.0023	0.549	0.399	0.209
	-25%	0.0022	0.534	0.393	0.674*
	-50%	0.0022	0.514	0.387	0.701*
T_G	+50%	0.0032	0.782	0.560	0.252
	+25%	0.0024	0.484	0.390	0.237
	-25%	0.0022	0.593	0.410	0.611*
	-50%	0.0022	0.620	0.428	0.608*
T_T	+50%	0.0076	1.029	1.007	0.325
	+25%	0.0036	0.546	0.650	0.287
	-25%	0.0020	0.598	0.376	0.752*
	-50%	0.0019	0.212	0.419	0.873*
T_{12}	+50%	0.0021	0.484	0.528	0.267
	+25%	0.0021	0.512	0.388	0.256
	-25%	0.0027	0.575	0.401	0.767*
	-50%	0.0036	0.600	0.390	0.942*



(a)

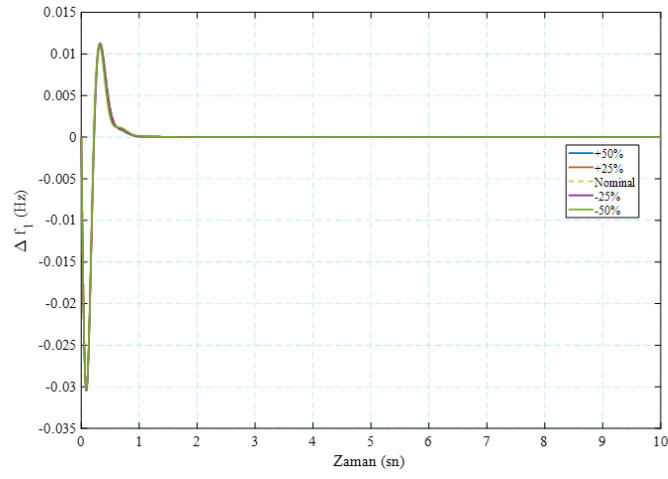


(b)

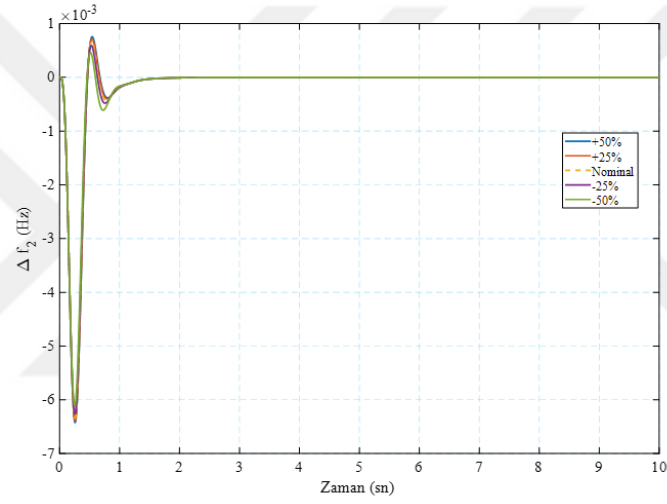


(c)

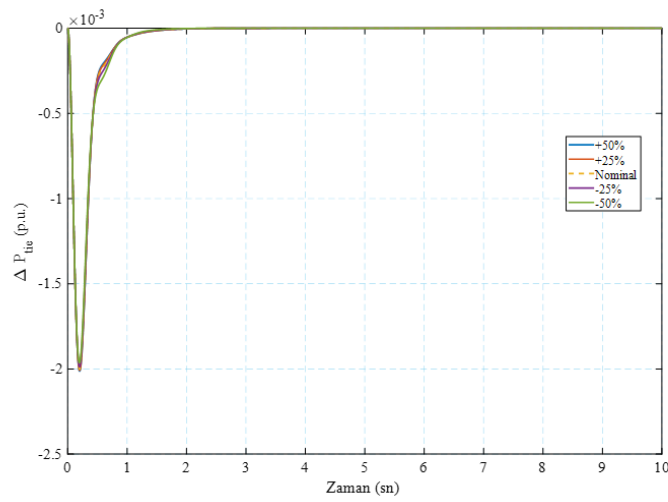
Şekil 55.İki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminde B parametre değişimi ile TANH-PID denetleyici için elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 , (c) ΔP_{tie12} tepki eğrileri



(a)

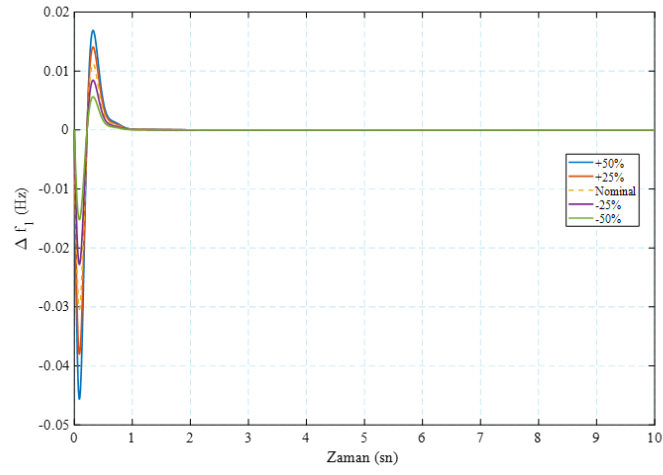


(b)

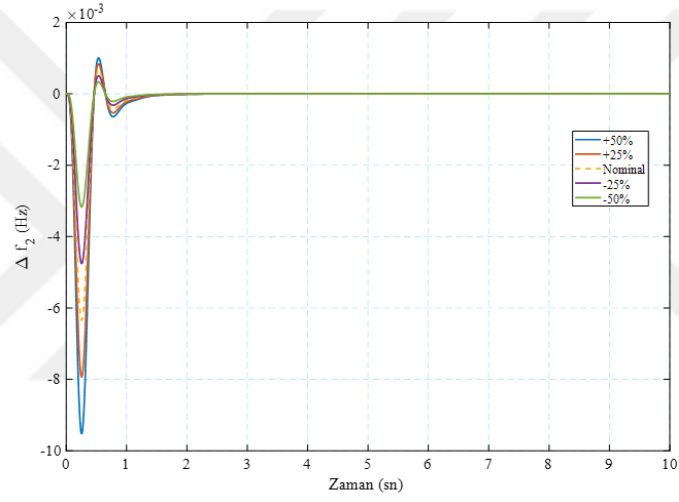


(c)

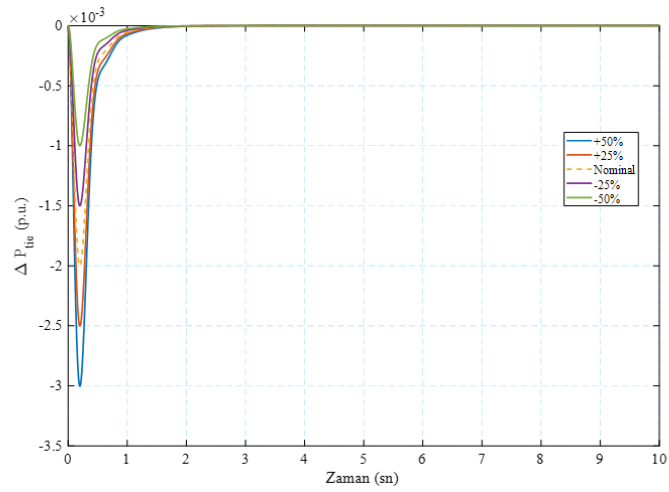
Şekil 56. İki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminde R parametre değişimi ile TANH-PID denetleyici için elde edilen edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 , (c) ΔP_{tie12} tepki eğrileri



(a)

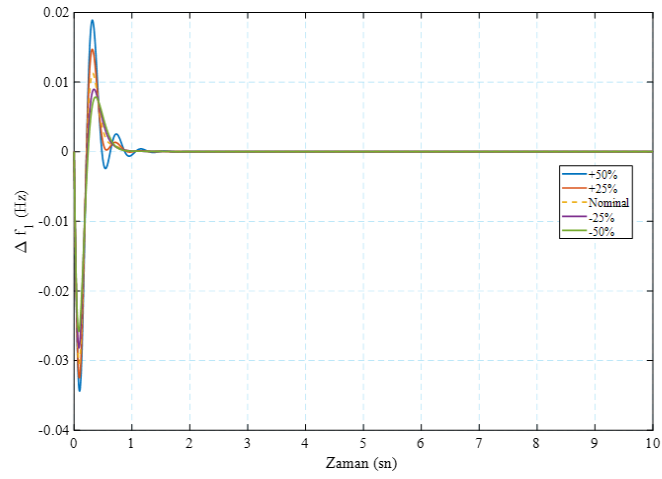


(b)

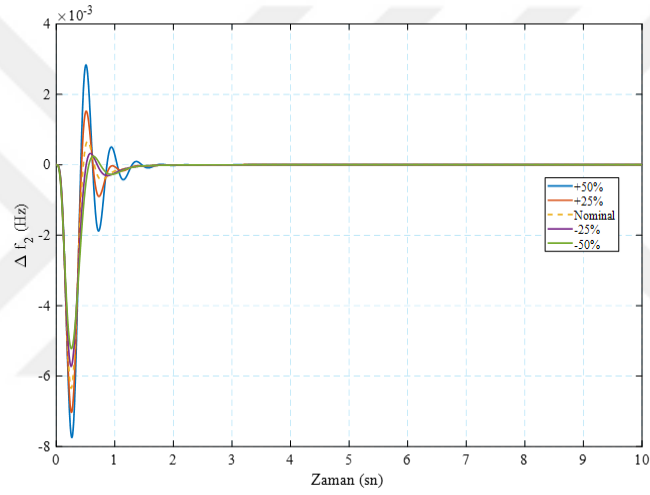


(c)

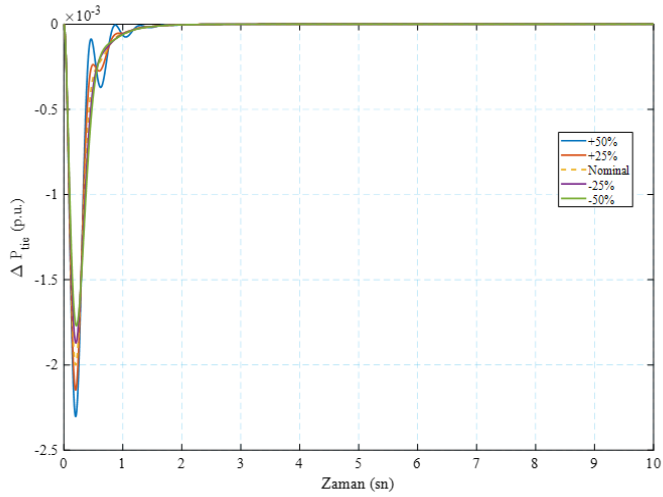
Şekil 57. İki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminde ΔP_L parametre değişimi ile TANH-PID denetleyici için elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 , (c) ΔP_{tie12} tepki eğrileri



(a)

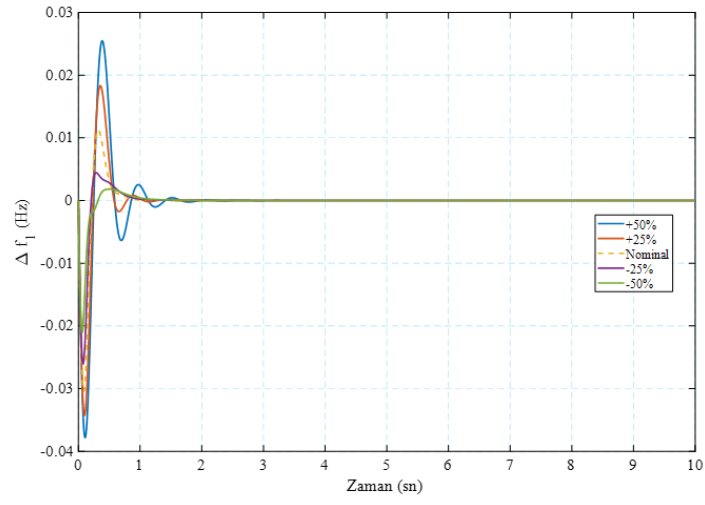


(b)

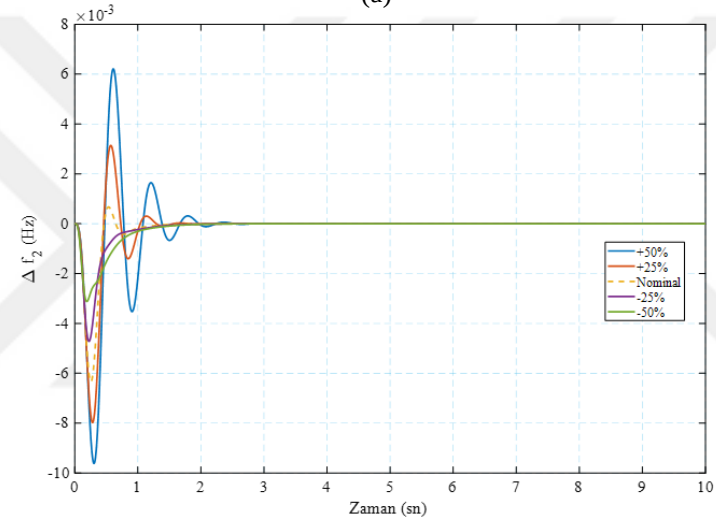


(c)

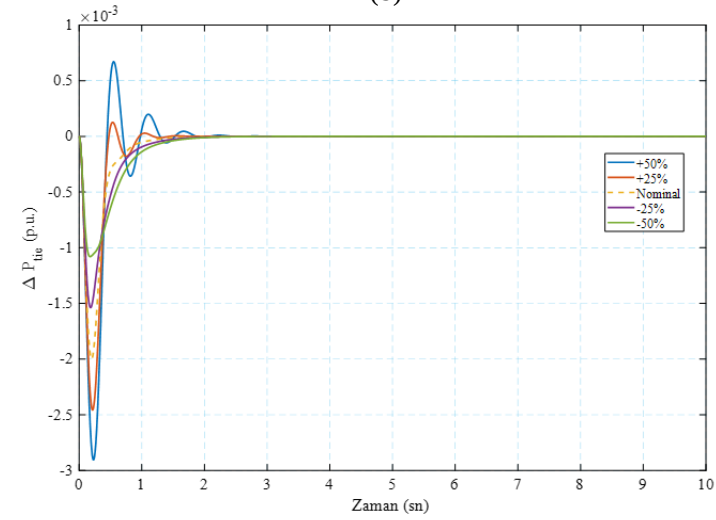
Şekil 58. İki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminde T_G parametre değişimi ile TANH-PID denetleyici için elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 , (c) ΔP_{tie12} tepki eğrileri



(a)

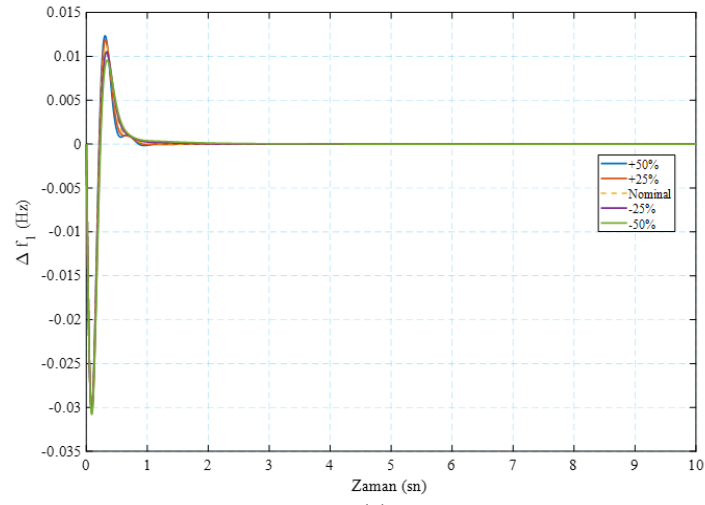


(b)

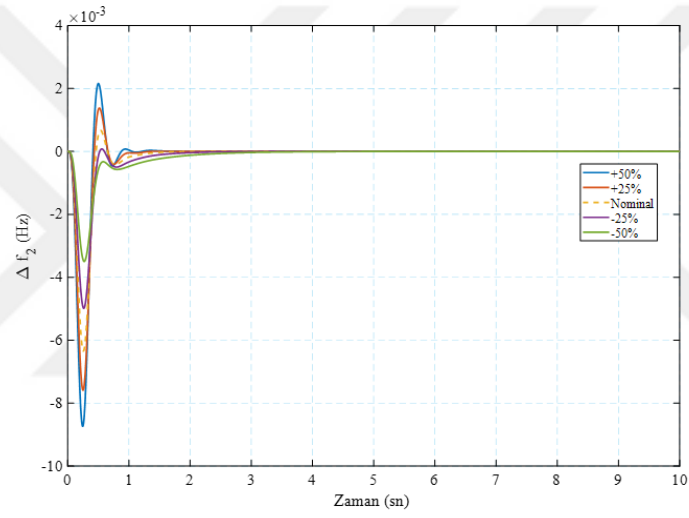


(c)

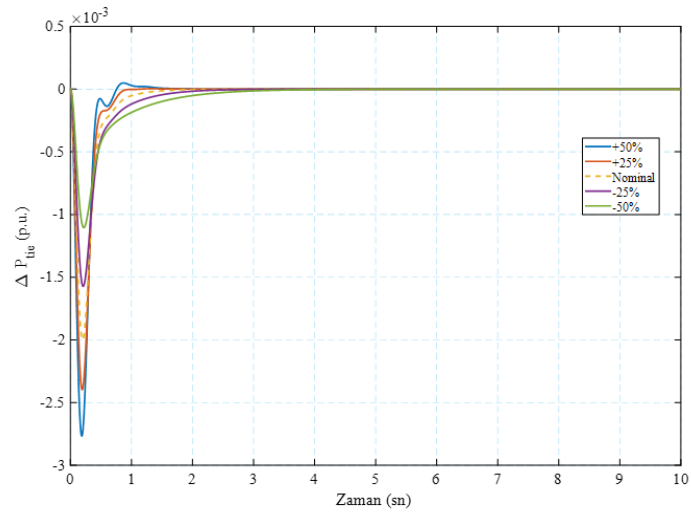
Şekil 59. İki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminde T_T parametre değişimi ile TANH-PID denetleyici için elde edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 , (c) ΔP_{tie12} tepki eğrileri



(a)



(b)



(c)

Şekil 60. İki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminde T_{12} parametre değişimi ile TANH-PID denetleyici için elde edilen edilen (a) Δf_1 , (b) Δf_2 , (c) ΔP_{tie12} tepki eğrileri

3.7. İstatistiksel Analiz Değerlendirmeleri

Kontrol sistemlerinin performansını ve sağlamlığını belirsizlik, gürültü, modelleme hataları ve stokastik girdiler altında analiz edebilmek adına istatistiksel sonuçlardan yararlanılmaktadır. Optimizasyon algoritmaları kullanılarak tasarlanan ve rasgele durumların dahil edileceği sistemlerde istatistiksel analiz sonuçları üzerinden sistem davranışları daha gerçekçi biçimde ortaya konulmaktadır.

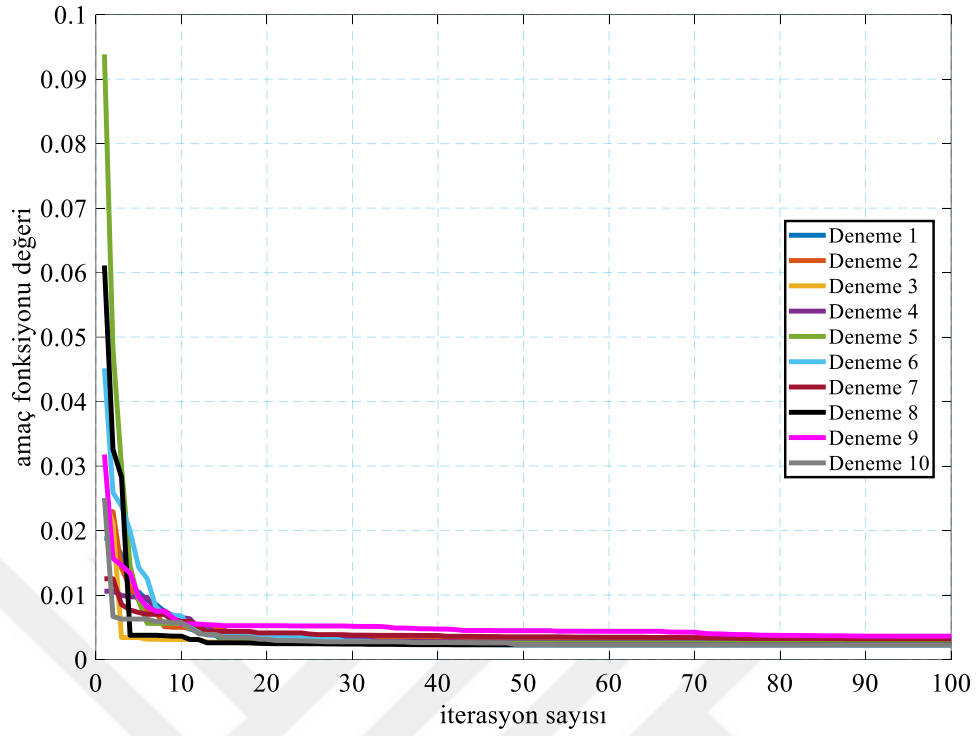
Bu çalışmada HOA tabanlı optimizasyon sürecine dair değerli bir içgörü sağlamak amacıyla, istatistiksel bir analiz gerçekleştirilmiştir. ITAE değerlerinin en iyi, ortalama, en kötü ve standart sapma bilgileri, her bir test sistemi için 10 bağımsız çalıştırma üzerinden elde edilerek Tablo 9’da sunulmuştur.

Tablo 9’dan da açıkça görüldüğü üzere, örnek test sistemi-3 (durum 3) için HOA ile ayarlanmış TANH-PID denetleyici, en iyi ITAE değeri olan 0.200393’i elde etmiştir ve bu değer en kötü çözüme yalnızca %3,23 oranında sapmaktadır. Bu durum, 2.08×10^{-3} gibi oldukça düşük bir standart sapma ile HOA yönteminin sağlamlığını doğrulamaktadır. Diğer test sistemleri için de benzer sonuçlara ulaşmak mümkündür. Modellenen sistemlerin parametreleri ve karmaşıklığı arttıkça çalışmalar açısından simülasyon ve optimizasyon süresi artmaktadır.

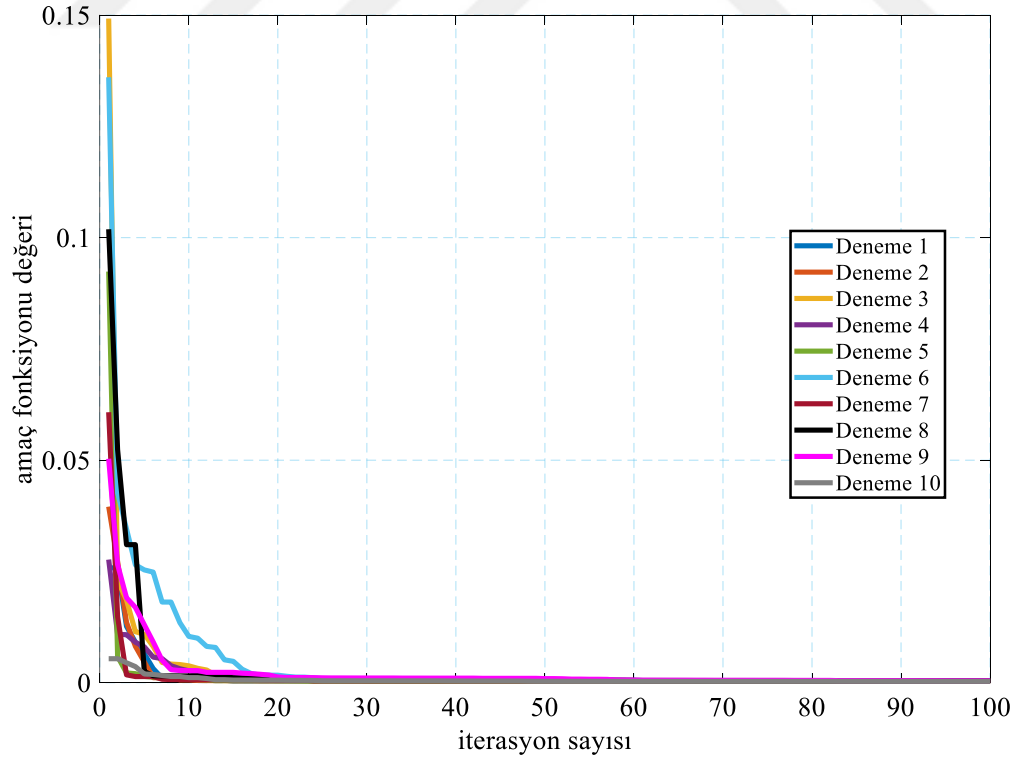
Tablo 9. HOA için istatistiksel analiz sonuçları

Güç sistemi modeli	En iyi değer	Ortalama değer	En kötü değer	Standart sapma
Durum 1	0.002248	0.002676	0.003625	0.000437
Durum 2	0.000307	0.000389	0.000452	0.000056
Durum 3	0.200393	0.202906	0.206868	0.002080
Durum 4	0.000130	0.000556	0.001003	0.000299
Durum 5	0.003343	0.004626	0.007030	0.001065

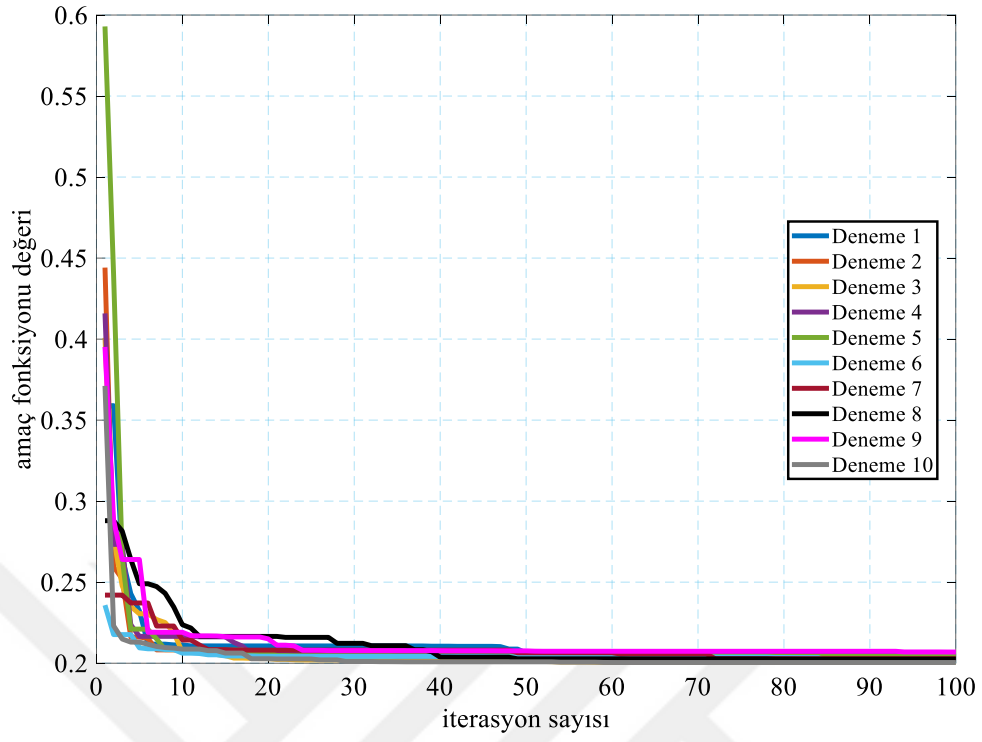
Tablo 9’da yer alan Durum 1; İki bölgeli ara ısıtmasız termal güç sistemi, Durum 2; Doğrusal olmayan iki bölgeli (GDB) özellikli ara-ısıtmasız termal güç sistemi, Durum 3; Doğrusal olmayan iki bölgeli GRC özellikli ara-ısıtmasız termal güç sistemi, Durum 4; Çok kaynaklı tek bölgeli güç sistemi, Durum 5; Çok kaynaklı iki bölgeli güç sistemini temsil etmektedir. Çalışmada analizi gerçekleştirilen her bir güç sisteminin istatistiksel analiz grafiksel sonuçları paylaşılmıştır. (Şekil 61-Şekil 65)



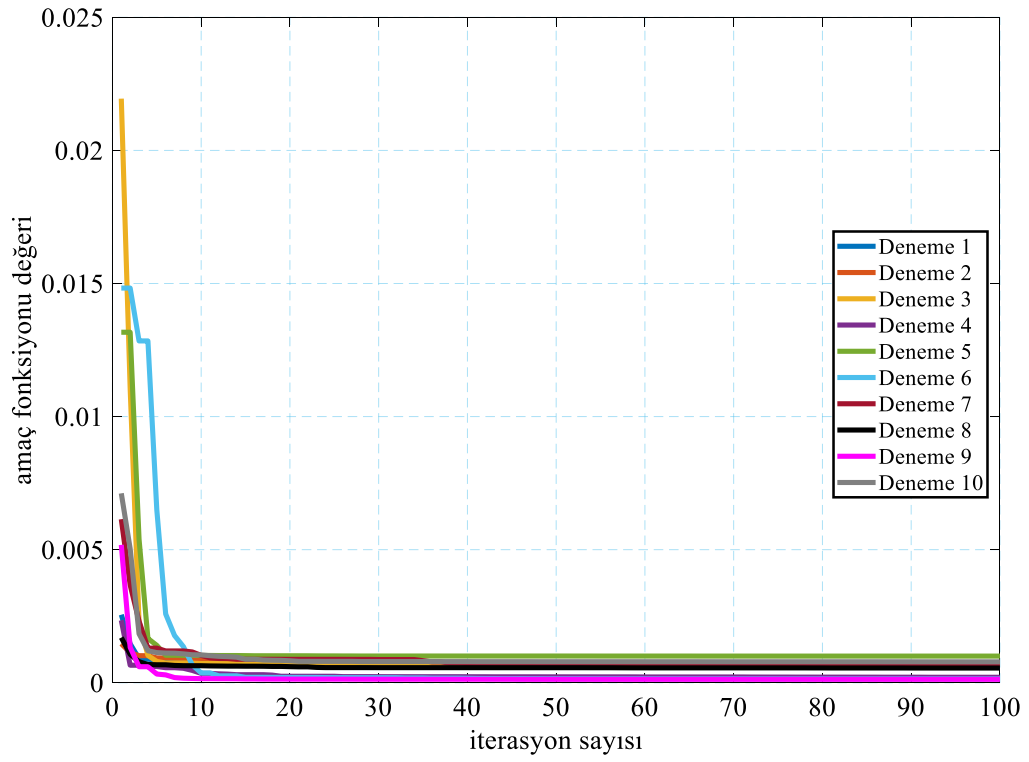
Şekil 61. İki bölgeci ara ısıtmasız termal güç sistemi için istatistiksel analiz sonuçları



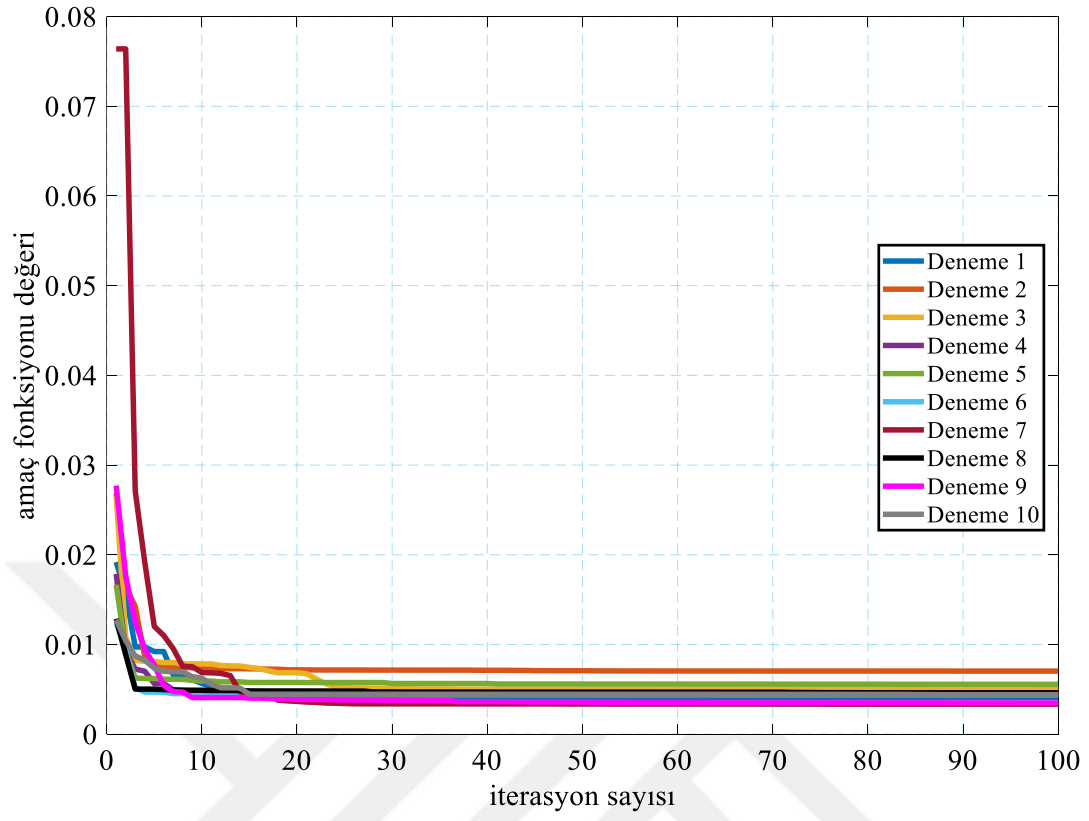
Şekil 62. Doğrusal olmayan iki bölgeci ölü bantlı governor (GDB) özellikli ara-ısıtmasız termal güç sistemi için istatistiksel analiz sonuçları



Şekil 63. Doğrusal olmayan iki bölge GRC özellikli ara-ısıtmasız termal güç sistemi için istatistiksel analiz sonuçları



Şekil 64. Çok kaynaklı tek bölge güç sistemi için istatistiksel analiz sonuçları



Şekil 65. Çok kaynaklı iki bölgeli güç sistemi için istatistiksel analiz sonuçları

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında güç sistemlerinde yük frekans kontrolünü etkin bir biçimde gerçekleştirebilmek adına geleneksel PID denetleyiciye farklı bir yaklaşımla TANH fonksiyonunun özellikleri entegre edilerek yeni bir denetleyici önerilmiştir. Çalışma kapsamında literatürde çalışmalarda sıklıkla tercih edilen iki bölgeli ara ısıtmasız termal güç sistemi, doğrusal olmayan iki bölgeli GDB özellikli ara ısıtmasız termal güç sistemi, doğrusal olmayan iki bölgeli GRC özellikli ara ısıtmasız termal güç sistemi, çok kaynaklı tek bölgeli güç sistemi ve çok kaynaklı iki bölgeli güç sistem modelleri Matlab-Simulink ortamında oluşturulmuştur. Sistem modelleri üzerinde önerilen yeni denetleyicinin parametreleri her bir model üzerinde HOA ve ITAE amaç fonksiyonu altında optimize edilmiştir.

Güç sistemlerinde YFK'nde esas amaç sistemin en az aşım ve mümkün olan en kısa OS ve en düşük ITAE değeri ile sağlamaktır. Çalışma kapsamında önerilen yeni denetleyici tüm performans isterlerinde en iyi sonuçları vermiştir. YFK'nde kontrol edilen bölgeler arası frekans değişimleri ve bağlantı hattı güç değişimi gibi kriterlerde önerilen denetleyicinin sonuçları her bir sistem için alınarak literatürde var olan etkinliği ispatlanan denetleyici verileri ile kıyaslanmış ve her bir sistem için oluşturulan tabloya ilgili veriler eklenmiştir. Sistemler üzerinde denetleyici tepkilerini bir arada görebilmek adına tüm sonuçlar aynı simülasyon grafiklerine eklenerek sunulmuştur.

Çalışmada klasik PID denetleyicilere entegre edilen matematiksel TANH fonksiyonu ile oluşturulan denetim mekanizmasının her bir performans ölçütünde iyileştirme sağladığı, hatalara karşı adaptif özellikler getirdiği ve uzun süreli çalışma durumlarında sistem kararlılığına katkı sağladığı ortaya konulmuştur. Özetle güç sistemlerinde YFK amacıyla önerilen HO:TANH-PID denetleyici tüm performans isterlerinde en tatmin edici sonuçları sağlamanın yanı sıra, ilerleyen süreçlerde yeni tasarlanacak denetleyici yapılarına da bir ilham kaynağı olabilecek bir çalışma olmuştur. Çalışma kapsamında önerilen denetleyicinin etkinliği Δf_1 , Δf_2 , ΔP_{tie12} ve ITAE performans isterlerinde en yakın rakibine göre yüzdesel olarak değerlendirilmiş ve performans bakımından iyileştirme oranları her bir sistem için sunulmuştur.

5. ÖNERİLER

Güç sistemlerinde yükün ani değişimleri, sistem frekansında salınımlara yol açmaktadır. Enerji sistemlerinin kaliteli ve kesintisiz bir şekilde sürdürülebilmesi adına salınımların mümkün olan en kısa sürede sönümlendirilmesi ve sistem frekansının referans değerine geri döndürülmesi büyük önem taşımaktadır. Bu noktada, güç sistemlerinin dahili kontrol yapılarının yetersiz kaldığı durumlarda, sisteme harici olarak entegre edilen ikincil kontrolörlerin hızlı ve etkili bir şekilde devreye girmesi gerekmektedir.

Günümüzde enerji şebekeleri, enterkonnekte sistemler aracılığıyla yönetilmektedir. Bu sistemlerde farklı bölgeler birbiriyle bağlantılı olduğundan, herhangi bir bölgede meydana gelen kararsızlık diğer bölgelerin de dengesini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Frekans tolerans aralığının dışına çıkan ve zamanında müdahale edilemeyen kararsız sistemler, bağlı oldukları diğer şebekelerde de çökme riskini artırmaktadır.

Bu çalışma kapsamında önerilen yeni kontrol yaklaşımının, YFK açısından literatüre önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Araştırmacılara farklı bir bakış açısı kazandırması hedeflenen bu çalışmadan yola çıkılarak, farklı matematiksel fonksiyonlar ve gelişmiş algoritma yapıları ile daha etkin sonuçlar elde edilebileceği öngörülmektedir.

Bu çalışmada önerilen HO:TANH-PID tabanlı kontrol yapısı, YFK açısından başarılı sonuçlar vermiştir. Ancak, bazı sınırlılıklar gelecekteki çalışmalar için geliştirme fırsatları sunmaktadır. Çalışma yalnızca simülasyon ortamında test edilmiş, gerçek zamanlı uygulamalar değerlendirilmemiştir. Bu nedenle, tasarlanan yaklaşımların donanım tabanlı sistemlerde test edilmesi gerçekçi sonuçlar elde edebilmek adına önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Duque, E. A., González, J. D., & Restrepo, J. C. (2016). Developing sustainable infrastructure for small hydro power plants through clean development mechanisms in Colombia. *Procedia Engineering*, **, 224–233. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.066>
- Mishra, M. K., Khare, N., & Agrawal, A. B. (2015). Small hydro power in India: Current status and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 101–115. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.05.075>
- Kundur, P. (1994). *Power system stability and control* (pp. 45–138). McGraw-Hill.
- Union for the Coordination of the Transmission of Electricity [UCTE]. (2004). *UCTE Operation Handbook-A1: Load-Frequency Control and Performance*.
- Khodabakhshian, A., Pour, M. E., & Hooshmand, R. (2012). Design of a robust load frequency control using sequential quadratic programming approach. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 40(1), 1–8.
- Göktürk, E. (2009). Kesirli PID tasarım yöntemi ve klasik PID ile karşılaştırmalar (Doktora tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Pathak, P. K., Yadav, A. K., Shastri, A., & Alvi, P. A. (2023). BWO assisted PID F-(1+I) controller for intelligent load frequency management of standalone micro-grid. *ISA Transactions*, 132, 387–401.
- Karyeyen, A. (2009). Çok bölgeli elektrik güç sistemlerinde optimum yük frekans kontrolü (Yüksek lisans tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Lokanatha, M., & Vasu, K. (2014). Load frequency control of two area power system using PID controller. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 3(11), 687–692.
- Gözde, H., Taplamacıoğlu, M. C., & Kocaarslan, I. (2012). Comparative performance analysis of Artificial Bee Colony algorithm in automatic generation control for interconnected reheat thermal power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 42, 167–178.
- Gupta, D. K., Jha, A. V., Appasani, B., Srinivasulu, A., Bizon, N., & Thounthong, P. (2021). Load frequency control using hybrid intelligent optimization technique for multi-source power systems. *Energies*, 14(6), 1581. <https://doi.org/10.3390/en14061581>
- Köse, İ. H., Danayiyen, Y., & Çavdar, B. (2023). Fractional order PID controller design for hydroelectric power plant model with PSO, GWO and MA optimization algorithms.

In 2023 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU) (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ASYU58738.2023.10296772>.

- Sezer, K. S. (2021). Metasezgisel algoritmalarla optimize edilmiş kesir dereceli PID kontrolörler ile gaz türbin elektrik santralinin kontrolü (Yüksek lisans tezi). İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Sahin, E. (2020). Design of an optimized fractional high order differential feedback controller for load frequency control of a multi-area multi-source power system with nonlinearity. *IEEE Access*, 8, 12327–12342. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2966261>
- Barakat, M. (2022). Optimal design of fuzzy-PID controller for automatic generation control of multi-source interconnected power system. *Neural Computing and Applications*. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07470-4>
- Gheisarnejad, M., & Khooban, M. H. (2019). Design an optimal fuzzy fractional proportional integral derivative controller with derivative filter for load frequency control in power systems. *Measurement and Control*, 41(9), 2563–2581. <https://doi.org/10.1177/0142331218804309>
- Sahu, R. K., Panda, S., & Sekhar, G. T. (2015). A novel hybrid PSO-PS optimized fuzzy PI controller for AGC in multi area interconnected power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 64, 880–893.
- Rout, U. K., Sahu, R. K., & Panda, S. (2013). Design and analysis of differential evolution algorithm based automatic generation control for interconnected power system. *Ain Shams Engineering Journal*, 4(3), 409–421.
- Ali, E. S., & Abd-Elazim, S. M. (2011). Bacteria foraging optimization algorithm based load frequency controller for interconnected power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 33, 633–638.
- Panda, S., Mohanty, B., & Hota, P. K. (2013). Hybrid BFOA-PSO algorithm for automatic generation control of linear and nonlinear interconnected power systems. *Applied Soft Computing*, 13(12), 4718–4730.
- Arya, Y. (2020). A novel CFFOPI-FOPID controller for AGC performance enhancement of single and multi-area electric power systems. *ISA Transactions*, 100, 126–135. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.11.025>
- Debbarma, S., Saikia, L. C., & Sinha, N. (2014). Automatic generation control using two degree of freedom fractional order PID controller. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 58, 120–129.
- Priyadarshani, S., Subashini, R., & Satapathy, J. K. (2021). Pathfinder algorithm optimized fractional order tilt-integral-derivative (FOTID) controller for automatic generation control of multi-source power system. *Microsystem Technologies*, 27, 23–35.

- Daraz, A., Malik, S. A., Azar, A. T., Aslam, S., Alkhalifah, T., & Alturise, F. (2022). Optimized fractional order integral-tilt derivative controller for frequency regulation of interconnected diverse renewable energy resources. *IEEE Access*, 10, 43514–43527.
- Kumar, M., & Hote, Y. V. (2018). Robust CDA-PIDA control scheme for load frequency control of interconnected power systems. *IFAC-PapersOnLine*, 51(4), 616–621. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.164>
- Priyadarsini, S. A., Mary, P. M., & Iruthayaraj, M. E. (2019). Automatic generation control of a multi-area power system with renewable energy source under deregulated environment: Adaptive fuzzy logic-based differential evolution (DE) algorithm. *Soft Computing*, 23(22), 12087–12101. <https://doi.org/10.1007/s00500-019-03765-2>
- Guo, J. (2021). Application of a novel adaptive sliding mode control method to the load frequency control. *European Journal of Control*, 57, 172–178. <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2020.03.007>
- Behera, S. P., Biswal, A. S., Samantray, S. S., & Swain, B. (2018, March). Modeling and stability analysis of I-TD controller for load frequency control of two-area power system using differential evolution (DE) algorithm. In *Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP-2018)* (pp. 1–6). IEEE.
- Mohanty, P., & Sahu, R. K. (2020). Analysis of hybrid tilt integral derivative controller for multi area power system with real time simulation. In *2020 International Conference on Computational Intelligence for Smart Power System and Sustainable Energy (CISPSSE)* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CISPSSE49931.2020.9212226>
- Sahu, R. K., Sekhar, G. T. C., & Priyadarshani, S. (2021). Differential evolution algorithm tuned tilt integral derivative controller with filter controller for automatic generation control. *Evolutionary Intelligence*, 14, 5–20. <https://doi.org/10.1007/s12065-019-00215-8>
- Khudhair, M., Ragab, M. A., AboRas, K. M., & Abbasy, N. H. (2022, July). A newly resilient combination of PID and PD controllers to boost the frequency response in a two-area hybrid power system with nonlinearities using Wild Horse Optimizer. In *2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)* (pp. 1–11).
- Kumari, S., & Shankar, G. (n.d.). Maiden application of cascade tilt-integral-derivative controller in load frequency control of deregulated power system. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1002/etep.12257>
- Gong, X., Yang, K., Dong, X., Jiang, X., Liu, D., & Luo, Z. (2023). Fractional Order PID Optimal Control Method of Regional Load Frequency Containing Pumped Storage Plants. *Energies*, 16(4), 1703. <https://doi.org/10.3390/en16041703>

- Barakat, M., Mabrouk, A. M., & Donkol, A. (2023). Optimal design of a cascade controller for frequency stability of photovoltaic-reheat thermal power systems considering nonlinearities. *Optical and Quantum Electronics*, 55(4), 295. <https://doi.org/10.1007/s11082-023-04583-5>
- Yalçın, E., Vardar, T., & Lüy, M. (2013). PID kontrolör ile iki bölgesi güç sistemlerinde yük frekans kontrolünün incelenmesi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 5(2), 7–11.
- Güler, Y., Nalbantoğlu, M., & Kaya, I. (2024). Cascade controller design via controller synthesis for load frequency control of electrical power systems. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 32(2), 285–304. <https://doi.org/10.55730/1300-0632.4069>
- Yılmaz, Z. Y., Bal, G., Çelik, E., Öztürk, N., Güvenç, U., & Yogendra, A. (2021). Yük frekans kontrolünde kullanılan ikincil denetleyicilerin optimizasyonuna yönelik yeni bir hedef fonksiyonu tasarımı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(4), 2053–2067.
- Özdemir, M. T., & Yıldız, S. (2016). Yüksek gerilimli doğru akım bağlantı hattının çok bölgesi güç sisteminde yük frekans kontrolüne etkileri. *Güç Sistemleri Konferansı, Ankara, Türkiye*, 15–16.
- Mohamed, T. H., Shabib, G., & Ali, H. (2016). Distributed load frequency control in an interconnected power system using ecological technique and coefficient diagram method. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 82, 496–507. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.04.023>
- Görel, G. (2017). Güneş enerji sistemli iki bölgesi enterkonnekte şebekede modern kontrol teknikleri ile yük frekans kontrolü (Doktora tezi). *Kırıkkale Üniversitesi*.
- Çakıcı, F. N., Eke, İ., Saka, M., & Taplamacıoğlu, M. (2020). Performance analysis for load frequency control of interconnected power systems with different techniques. *International Journal of Engineering Research and Development*, 12(3), 89–106.
- Guha, D., Roy, P. K., & Banerjee, S. (2017). Study of differential search algorithm based automatic generation control of an interconnected thermal-thermal system with governor dead-band. *Applied Soft Computing*, 52, 160–175.
- Gheisarnejad, M. (2018). An effective hybrid harmony search and cuckoo optimization algorithm based fuzzy PID controller for load frequency control. *Applied Soft Computing*, 65, 121–138.
- Güler, Y., & Kaya, I. (2023). Load frequency control of single-area power system with PI-PD controller design for performance improvement. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 18(4), 2633–2648. <https://doi.org/10.1007/s42835-022-01371-1>
- Fathy, M., & Soliman, M. (2021). FOPID-based load frequency control of nonlinear multi-area power systems via Mayfly optimization algorithm. In *22nd International*

Middle East Power Systems Conference (MEPCON 2021) (pp.90–95). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/MEPCON50283.2021.9686195>

- Zhang, N., Feng, C., Shan, Y., Sun, N., Xue, X., & Shi, L. (2023). A universal stability quantification method for grid-connected hydropower plant considering FOPI controller and complex nonlinear characteristics based on improved GWO. *Renewable Energy*. Advance online publication.
<https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2023.05.019>
- Arpacı, H. (2018). Yapay sinir ağları ile kesir dereceli PID denetleyici katsayılarının ayarlanması. *Elektrik–Elektronik Mühendislik Dergisi*, 9, 156–173.
- Çelik, E. (2024, October). Exponential PID controller for effective load frequency regulation of electric power systems. *ISA Transactions*, 153, 364–383.
<https://doi.org/10.1016/j.isatra.2024.07.038>
- Kılıç, E., & Özdemir, M. (2018). Güç sistemlerindeki optimum otomatik gerilim regülasyonu için çoklu amaç fonksiyonunun belirlenmesi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10(1), 1–12.
- Tabakoğlu, B. (2009). Üç alanlı güç sisteminde genetik algoritma ile otomatik üretim kontrolü (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Amiri, M. H., Mehrabi Hashjin, N., Montazeri, M., et al. (2024). Hippopotamus optimization algorithm: A novel nature-inspired optimization algorithm. *Scientific Reports*, 14, 5032. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54910-3>
- Çelik, E. (2020). Improved stochastic fractal search algorithm and modified cost function for automatic generation control of interconnected electric power systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 88, 103407.
- Çelik, E. (2021). Design of new fractional order PI–fractional order PD cascade controller through dragon fly search algorithm for advanced load frequency control of power systems. *Soft Computing*, 25, 1193–1217.
- Barakat, M. (2022). Novel chaos game optimization tuned-fractional-order PID fractional-order PI controller for load-frequency control of interconnected power systems. In *Protection and Control of Modern Power Systems*, 7(2), 1–20.
<https://doi.org/10.1186/s41601-022-00238-x>
- Shiva, C. K., Shankar, G., & Mukherjee, V. (2015). Automatic generation control of power system using a novel quasi-oppositional harmony search algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 73, 787–804.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.05.048>
- Khadanga, R. K., Kumar, A., & Panda, S. (2022). A modified grey wolf optimization with cuckoo search algorithm for load frequency controller design of hybrid power system. *Applied Soft Computing*, 124, 109011. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109011>

7. EKLER

Ek 1. İki Bölgele Ara Isıtmasız Termal Güç Sistemi Parametreleri

Tablo 10. İki bölgele ara ısıtmasız termal güç sistemi parametreleri (Çelik, 2024).

f_0	60 Hz
B	0.425 p.u. MW/Hz
R	2.4 Hz/p.u
T_G	0.03 s
T_T	0.3s
T_{12}	0.545p.uMW/rad
K_{PS}	120Hz/pu
T_{PS}	20s

Ek 2. Doğrusal Olmayan İki Bölgele Ölü Bantlı Governor (GDB) Özellikli Ara-Isıtmasız (Non-Reheat) Termal Güç Sistemi Parametreleri

Tablo 11. Doğrusal olmayan iki bölgele ölü bantlı governor (GDB) özellikli ara ısıtmasız termal güç sistemi parametreleri (Çelik, 2024).

f_0	60 Hz
B	0.425 p.u. MW/Hz
R	2.4 Hz/p.u
T_G	0.2 s
T_T	0.3s
T_{12}	0.444 p.uMW/rad
K_{PS}	120Hz/pu
T_{PS}	20s

Ek 3. Doğrusal Olmayan İki Bölgeci GRC Özellikli Ara-Isıtmasız (Non-Reheat) Termal Güç Sistemi Parametreleri

Tablo 12. Doğrusal olmayan iki bölgeci GRC özellikli ara-ısıtmasız termal güç sistemi parametreleri (Sahin, 2020).

f_0	60 Hz
B	0.425 p.u. MW/Hz
R	2.4 Hz/p.u
T_G	0.08 s
T_T	0.3s
T_{12}	0.545 p.uMW/rad
K_{PS}	120Hz/pu
T_{PS}	20s

Ek 4. Çok Kaynaklı Tek Bölgeci Güç Sistemi Parametreleri

Tablo 13. Çok kaynaklı tek bölgeci güç sistemi parametreleri (Çelik, 2024).

f_0	60 Hz
B	0.425 p.u. MW/Hz
R	2.4 Hz/p.u
T_{SG}	0.08 s
K_r	0.3s
T_r	10 s
T_t	0.3 s
T_{gh}	0.2 s
T_{rs}	5 s
T_{rh}	28.75s
T_w	1 s
b_g	0.05 s
c_g	1
X_c	0.6 s
Y_c	1 s
T_{cr}	0.01 s
T_f	0.23 s
T_{cd}	0.2 s
K_T	0.543478 p.u
K_H	0.326084 p.u
K_G	0.130438 p.u
K_{ps}	68.9566Hz/p.u MW
T_{ps}	11.49 s

Ek 5. Çok Kaynaklı İki Bölge Güç Sistemi Parametreleri

Tablo 14. Çok kaynaklı iki bölge güç sistemi parametreleri (Barakat, 2022).

f_0	60 Hz
B	0.4312 p.u
R	2.4 Hz/p.u
T_{SG}	0.08 s
K_r	0.3s
T_r	10 s
T_t	0.3 s
T_{gh}	0.2 s
T_{rs}	5 s
T_{rh}	28.75 s
T_w	1 s
b_g	0.05 s
c_g	1
X_c	0.6 s
Y_c	1 s
T_{cr}	0.01 s
T_f	0.23 s
T_{cd}	0.2 s
K_T	0.543478 p.u
K_H	0.326084 p.u
K_G	0.130438 p.u
K_{ps}	68.9566Hz/p.u MW
T_{ps}	11.49 s
T_{12}	0.0433

ÖZGEÇMİŞ

2013-2014 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2018 yılında bu bölümden mezun oldu. Mezuniyetinin ardından enerji sektöründe kariyerine başladı. İlerleyen süreçte telekomünikasyon sektöründe bilgi teknolojileri uzmanı olarak görev aldı. Kariyerine Sistem Mühendisi olarak devam etmektedir. 2021 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kontrol ve Kumanda Anabilim Dalında tezli yüksek lisans programına başladı.

