



**YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI İÇEREN GÜÇ
SİSTEMLERİNDE YÜK FREKANS KONTROLÜNÜN YENİ SEZGİSEL
YÖNTEMLERLE OPTİMİZASYONU**

Mustafa SAKA

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mustafa SAKA

10/06/2022

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI İÇEREN GÜÇ SİSTEMLERİNDE YÜK FREKANS KONTROLÜNÜN YENİ SEZGİSEL YÖNTEMLERLE OPTİMİZASYONU

(Doktora Tezi)

Mustafa SAKA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2022

ÖZET

Gelişen teknoloji ve artan nüfus ile birlikte enerjiye olan ihtiyaç günden güne artmaktadır. Günümüzde enerji üretiminde fosil kaynaklı güç sistemleri büyük bir paya sahipken, gelecekteki güç sistemlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının ve enerji depolama sistemlerinin payının da giderek artması öngörülmektedir. Elektrik enerjisinin kaliteli ve sürdürülebilir bir şekilde son tüketiciye kadar iletilebilmesi için elektrik güç sisteminin yük frekans kontrolü oldukça önemli konulardan birisidir. Bu tez çalışması kapsamında, geleneksel ve modern tek bölgeli ve çok bölgeli güç sistemlerinin yük frekans kontrolü analizleri farklı kontrolörler ve farklı sezgisel optimizasyon teknikleri kullanılarak ve karşılaştırmalı olarak gerçekleştirilmiştir. Güç sistemleri ve kontrol merkezleri arasındaki haberleşme altyapısı nedeniyle oluşan haberleşme zaman gecikmeleri, gerek literatür çalışmalarındaki değerlerler kullanılarak gerekse de gerçek varsayımlarla hesaplanarak farklı yük frekans kontrol modellerine dahil edilmiştir. Ayrıca haberleşme zaman gecikmelerinin olumsuz etkisini ortadan kaldırmak amacıyla sinir ağı tabanlı hibrit adaptif bir PID kontrolör geliştirilmiştir. Güç sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve batarya enerji depolama sistemlerinin eklenmesi ile birlikte çok daha kompleks ve zor bir hale gelmektedir. Bu kapsamda bu tür komplike güç sistemlerinin analizlerini gerçekleştirmek ve daha iyi performans çıktıları elde edebilmek için iki serbestlik dereceli kaskat kesir dereceli PID tabanlı kontrolör geliştirilmiştir. Bu kontrolöre ait parametrelerin belirlenmesi için yeni bir sezgisel teknik olan hibrit Taguchi girdap arama algoritması geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının (rüzgâr ve güneş) ve enerji depolama sistemlerinin (batarya) yük frekans kontrolü üzerine olan etkileri geliştirilen algoritma üzerinden ayrı ayrı incelenmiştir. Geliştirilen kontrolör yapılarının, hibrit sezgisel optimizasyon tekniğinin detaylı analizleri yapılmış, literatüre katkı sağlanmış ve referans bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Bilim Kodu : 90515

Anahtar Kelimeler : Yük frekans kontrolü, optimizasyon teknikleri, kontrolörler, yenilenebilir enerji kaynakları, enerji depolama sistemleri

Sayfa Adedi : 132

Danışman : Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

İkinci Danışman : Dr. Öğr. Üyesi İbrahim EKE

OPTIMIZATION OF LOAD FREQUENCY CONTROL WITH NEW HEURISTIC
METHODS IN POWER SYSTEMS INCLUDING RENEWABLE ENERGY SOURCES

(Ph. D. Thesis)

Mustafa SAKA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2022

ABSTRACT

With the developing technology and increasing population, the need for energy is increasing day by day. While fossil-based power systems have a large share in energy production today, the share of renewable energy sources and energy storage systems in future power systems is expected to increase gradually. Load frequency control of the electrical power system is one of the most important issues in order to transmit the electrical energy to the end consumer in a quality and sustainable manner. Within the scope of this thesis, load frequency control analyses of traditional and modern single-area and multi-area power systems have been carried out comparatively using different controllers and different heuristic optimization techniques. Communication time delays due to the communication infrastructure between power systems and control centers are included in different load frequency control models by using values from literature studies and calculated with real assumptions. In addition, a neural network based hybrid adaptive PID controller has been developed to eliminate the negative effects of communication time delays. Power systems become much more complex and difficult with the addition of renewable energy sources and battery energy storage systems. In this context, a cascade fractional PID-based controller with two degrees of freedom has been developed in order to analyze such complicated power systems and to obtain better performance outputs. A new heuristic technique, hybrid Taguchi vortex search algorithm, has been developed and used to determine the parameters of this controller. The effects of renewable energy sources (wind and solar) and energy storage systems (battery) on load frequency control have been examined separately through the developed algorithm. Detailed analyses of the developed controller structures and the hybrid heuristic optimization technique have been made, a contribution has been made to the literature and a reference study has been carried out.

Science Code : 90515

Key Words : Load frequency control, optimization techniques, controllers,
renewable energy sources, energy storage systems

Page Number : 132

Supervisor : Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOGLU

Co-Supervisor : Assist. Prof. Dr. Ibrahim EKE

TEŞEKKÜR

Hayatım boyunca benden desteklerini esirgemeyen ve her daim bana güvenen Anneme, Babama, Kardeşime ve sabırlarından ve desteklerinden dolayı Eşime ve Oğluma teşekkürü bir borç bilirim.

Tez boyunca beni destekleyen, öneri ve görüşleriyle katkı sağlayan danışman hocam Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU'na ve ikinci danışmanım Dr. Öğretim Üyesi İbrahim EKE'ye teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım sırasında değerli vakitlerini, bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen Doç. Dr. Haluk GÖZDE'ye ve tez izleme sürecinde katkılar sağlayan Doç. Dr. Süleyman Sungur TEZCAN'a ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. YÜK FREKANS KONTROLÜ	11
3.1. Governor Modeli	12
3.2. Türbin Modeli	13
3.3. Yük Modeli	13
3.4. Tek Bölgei Yük Frekans Kontrol Modeli	14
3.5. Haberleşme Zaman Gecikmeli Tek Bölgei Yük Frekans Kontrol Modeli	17
3.6. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını İçeren Tek Bölgei Yük Frekans Kontrol Modeli	18
3.7. Enerji Depolama Sistemlerinin İçeren Tek Bölgei Yük Frekans Kontrol Modeli	19
3.8. Çok Bölgei Yük Frekans Kontrol Modeli.....	20
3.9. Bölüm 3 İçin Genel Değerlendirme	23
4. KONTROLÖR YAPILARI VE SEZGİSEL OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ	25
4.1. Kontrolör Yapıları	25

	Sayfa
4.1.1. PID kontrolör	26
4.1.2. FOPID kontrolör	27
4.1.3. 2DOF-FOPID kontrolör	29
4.1.4. Kaskat PD-PI kontrolör	30
4.1.5. 2DOF-(RA+FOPD)-(FOPID) kontrolör	30
4.1.6. NN-FOPID kontrolör	31
4.2. Sezgisel Optimizasyon Yöntemleri	33
4.2.1. Sinüs kosinüs algoritması (SCA)	35
4.2.2. Balçık küfü algoritması (SMA)	36
4.2.3. Girdap arama algoritması (VSA)	37
4.2.4. Gri kurt optimizasyonu (GWO)	38
4.2.5. Denge optimizasyonu (EO)	40
4.2.6. Hibrit Taguchi girdap arama algoritması (HTVS)	40
4.3. Bölüm 4 İçin Genel Değerlendirme	43
5. YÜK FREKANS KONTROL MODELLERİ, ANALİZLERİ VE BULGULAR	45
5.1. Yük Frekans Kontrol Sistemi-1	46
5.2. Yük Frekans Kontrol Sistemi-2	48
5.3. Yük Frekans Kontrol Sistemi-3	50
5.4. Yük Frekans Kontrol Sistemi-4	53
5.5. Yük Frekans Kontrol Sistemi-5	56
5.5.1. Haberleşme zaman gecikmelerinin hesaplanması	58
5.5.2. NN-FOPID kontrolörün haberleşme zaman gecikmeleri dahil edilmeyen sistem için performans analizi	59

Sayfa

5.5.3. NN-FOPID kontrolörün haberleşme zaman gecikmeleri içeren sistem için performans analizi.....	62
5.5.4. NN-FOPID kontrolörün farklı haberleşme zaman gecikmeleri için performans analizi.....	65
5.6. Yük Frekans Kontrol Sistemi-6.....	69
5.7. Yük Frekans Kontrol Sistemi-7.....	71
5.7.1. FOPID kontrolör ve EO tekniğinin performansları	72
5.7.2. Zaman gecikmelerindeki değişimlerin etkisi	74
5.7.3. Zaman sabitlerindeki değişimlerin etkisi	75
5.8. Yük Frekans Kontrol Sistemi-8.....	76
5.8.1. Test Sistemi-1.....	77
5.8.2. Test Sistemi-2.....	80
5.8.3. Yenilenebilir enerji kaynakları içeren çok bölgeli yük frekans kontrol modeli.....	84
5.8.4. Enerji depolama sistemleri ve yenilenebilir enerji kaynakları içeren çok bölgeli yük frekans kontrol modeli	88
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	97
KAYNAKLAR	99
EKLER.....	107
EK-1. NN-FOPID kontrolör için elde edilen veri seti	108
ÖZGEÇMİŞ	131

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Örnek bir ortogonal dizi - OA(9,4,3,2)	41
Çizelge 5.1. Model 1 için FOPID kontrolör parametreleri	47
Çizelge 5.2. Model 1 için karşılaştırmalı performans sonuçları	47
Çizelge 5.3. Model 2 için FOPID kontrolör parametreleri	49
Çizelge 5.4. Model 2 için karşılaştırmalı performans sonuçları	49
Çizelge 5.5. Model 3 için kontrolör parametreleri	51
Çizelge 5.6. Model 3 için karşılaştırmalı performans sonuçları	52
Çizelge 5.7. Model 4 kontrolör parametreleri	54
Çizelge 5.8. Model 4 için sistem performansları	56
Çizelge 5.9. Zaman gecikmesi içermeyen sistem için kontrolör parametreleri.....	60
Çizelge 5.10. Zaman gecikmesi içermeyen sistem için karşılaştırmalı performans analizleri	63
Çizelge 5.11. Zaman gecikmesi içeren sistem için kontrolör parametreleri ve zaman gecikmeleri	63
Çizelge 5.12. Zaman gecikmesi içeren sistem için karşılaştırmalı performans analizleri	65
Çizelge 5.13. Zaman gecikmelerindeki değişimlere karşı sistem performansları	69
Çizelge 5.14. Model 6 için kontrolör parametreleri	70
Çizelge 5.15. Model 6 için sistem performansları	71
Çizelge 5.16. Model 7 için kontrolör parametreleri	73
Çizelge 5.17. Model 7 için performans sonuçları	73
Çizelge 5.18. Farklı zaman gecikmeleri için kontrolör parametreleri	74
Çizelge 5.19. Farklı zaman gecikmeleri için sistem performansları	75
Çizelge 5.20. Farklı zaman sabitleri için kontrolör parametreleri	75

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.21. Farklı zaman sabitleri için sistem performansları.....	76
Çizelge 5.22. Birinci test sistemi için kontrolör parametreleri	78
Çizelge 5.23. Birinci test sistemi için sistem performans sonuçları.....	80
Çizelge 5.24. İkinci test sistemi için kontrolör parametreleri	83
Çizelge 5.25. İkinci test sistemi için karşılaştırmalı performans sonuçları.....	84
Çizelge 5.26. RES içeren sistem için kontrolör parametreleri.....	87
Çizelge 5.27. RES içeren sistem için performans sonuçları	88
Çizelge 5.28. RES ve BESS içeren sistem için kontrolör parametreleri.....	94
Çizelge 5.29. RES ve BESS içeren sistem için performans sonuçları	94

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Governor modeli.....	12
Şekil 3.2. Türbin modeli	13
Şekil 3.3. Yük modeli	14
Şekil 3.4. Temel yük frekans kontrol modeli.....	14
Şekil 3.5. Düşüm karakteristiği ve regülasyon katsayısının gösterimi	15
Şekil 3.6. Primer kontrolün sistem frekans sapmasına etkisi.....	16
Şekil 3.7. Tek bölgesi güç sistemi için yük frekans kontrol modeli	16
Şekil 3.8. Düşüm karakteristiğinin yeniden ayarlanması.....	17
Şekil 3.9. Sekonder kontrolün sistem frekans sapmasına etkisi	17
Şekil 3.10. Haberleşme zaman gecikmesini içeren tek bölgesi yük frekans kontrol modeli	18
Şekil 3.11. Yenilenebilir enerji kaynaklarını içeren tek bölgesi yük frekans kontrol modeli.....	19
Şekil 3.12. Enerji depolama sistemlerinin dahil edildiği yük frekans kontrol modeli....	20
Şekil 3.13. İki bölgesi bir güç sisteminin yaklaşık eşdeğer gösterimi	20
Şekil 3.14. İki bölgesi temel yük frekans kontrol modeli	22
Şekil 4.1. PID kontrolör yapısı	26
Şekil 4.2. λ ve μ üstel terimlerine göre PID uzayının taranması	28
Şekil 4.3. FOPID kontrolörünün blok gösterimi.....	28
Şekil 4.4. 2DOF-FOPID kontrolörünün blok gösterimi	29
Şekil 4.5. Kaskat PD-PI kontrolör için blok gösterimi	30
Şekil 4.6. 2DOF-(RA+FOPD)-(FOPID) kontrolör için blok gösterimi.....	31
Şekil 4.7. NN-FOPID kontrolör için blok gösterimi.....	32
Şekil 4.8. Sezgisel optimizasyon teknikleri için temel akış diyagramı.....	34

Şekil	Sayfa
Şekil 4.9. Aday çözümlerin OA'ya göre arama uzayında dağılımı	42
Şekil 4.10. HTVS için akış diyagramı	43
Şekil 5.1. Ara ısıtılmalı sistem modeli	46
Şekil 5.2. Ara ısıtılmalı türbine sahip sistem için frekans sapmaları grafiği	47
Şekil 5.3. Bir bölgeyi zaman gecikmeli sistem modeli.....	48
Şekil 5.4. Zaman gecikmeli yük frekans kontrol sistemi için frekans sapmaları	49
Şekil 5.5. İki bölgeyi ara ısıtılmalı yük frekans kontrol sistemi	50
Şekil 5.6. Model 3 için Bölge-1 frekans sapmaları grafiği	51
Şekil 5.7. Model 3 için Bölge-2 için frekans sapmaları grafiği	52
Şekil 5.8. Model 3 için Ara bağlantı hattı güç sapmaları grafiği	52
Şekil 5.9. Haberleşme zaman gecikmesine sahip iki bölgeyi yük frekans kontrol sistemi	54
Şekil 5.10. Model 4 için Bölge-1 için frekans sapmaları grafiği	55
Şekil 5.11. Model 4 için Bölge-2 için frekans sapmaları grafiği	55
Şekil 5.12. Model 4 için Ara bağlantı hattı güç sapmaları grafiği	55
Şekil 5.13. İki bölgeyi zaman gecikmesine sahip ara ısıtıcılı yük frekans kontrol sistemi	57
Şekil 5.14. Fiber-optik haberleşme sistemi bileşenleri	58
Şekil 5.15. Enterkonnekte sistemde oluşabilen zaman gecikmeleri	58
Şekil 5.16. Zaman gecikmesi içermeyen sistem için Bölge-1 için frekans sapmaları grafiği	60
Şekil 5.17. Zaman gecikmesi içermeyen sistem için Bölge-2 için frekans sapmaları grafiği	61
Şekil 5.18. Zaman gecikmesi içermeyen sistem için Ara bağlantı hattı için güç sapmaları grafiği	61
Şekil 5.19. Zaman gecikmesi içeren sistem için Bölge-1 için frekans sapmaları grafiği	63

Şekil	Sayfa
Şekil 5.20. Zaman gecikmesi içeren sistem için Bölge-2 için frekans sapmaları grafiği.....	64
Şekil 5.21. Zaman gecikmesi içeren sistem için Ara bağlantı hattı için güç sapmaları grafiği.....	64
Şekil 5.22. τ_1 değişimleri için Bölge-1 frekans sapmaları grafiği	66
Şekil 5.23. τ_1 değişimleri için Bölge-2 frekans sapmaları grafiği	66
Şekil 5.24. τ_1 değişimleri için ara bağlantı hattı güç sapmaları grafiği	66
Şekil 5.25. τ_2 değişimleri için Bölge-1 frekans sapmaları grafiği	67
Şekil 5.26. τ_2 değişimleri için Bölge-2 frekans sapmaları grafiği	67
Şekil 5.27. τ_2 değişimleri için ara bağlantı hattı güç sapmaları grafiği	67
Şekil 5.28. τ_1 ve τ_2 değişimleri için Bölge-1 frekans sapmaları grafiği.....	68
Şekil 5.29. τ_1 ve τ_2 değişimleri için Bölge-2 frekans sapmaları grafiği.....	68
Şekil 5.30. τ_1 ve τ_2 değişimleri için ara bağlantı hattı güç sapmaları grafiği.....	68
Şekil 5.31. Yakıt hücreli ve çok kaynaklı mikrogrid modeli.....	70
Şekil 5.32. Model 6 için frekans sapmaları grafiği.....	71
Şekil 5.33. Haberleşme zaman gecikmesine sahip yakıt hücreli mikrogrid modeli	72
Şekil 5.34. Model 7 için karşılaştırmalı frekans sapması grafiği.....	73
Şekil 5.35. Farklı zaman gecikmeleri için karşılaştırmalı frekans sapması grafiği	74
Şekil 5.36. Farklı zaman sabitleri için karşılaştırmalı frekans sapması grafiği	76
Şekil 5.37. Önerilen yaklaşım için birinci test sistemi	77
Şekil 5.38. Birinci test sistemi için Bölge-1 için karşılaştırmalı frekans sapması grafiği.....	78
Şekil 5.39. Birinci test sistemi için Bölge-2 için karşılaştırmalı frekans sapması grafiği.....	79
Şekil 5.40. Birinci test sistemi için Ara bağlantı hattı için karşılaştırmalı güç sapması grafiği.....	79
Şekil 5.41. Önerilen yaklaşım için ikinci test sistemi.....	81

Şekil	Sayfa
Şekil 5.42. İkinci test sistemi için Bölge-1 için karşılaştırmalı frekans sapması grafiği.....	82
Şekil 5.43. İkinci test sistemi için Bölge-2 için karşılaştırmalı frekans sapması grafiği.....	83
Şekil 5.44. İkinci test sistemi için Ara bağlantı hattı için karşılaştırmalı güç sapması grafiği.....	83
Şekil 5.45. RES'e sahip çok bölgeli yük frekans kontrol sistemi.....	85
Şekil 5.46. Solar güç için yenilenebilir enerji kaynağı modeli	85
Şekil 5.47. Solar çıkış gücü (p.u. MW).....	86
Şekil 5.48. Rüzgar gücü için yenilenebilir enerji kaynağı modeli	86
Şekil 5.49. Rüzgar çıkış gücü (p.u. MW)	86
Şekil 5.50. RES içeren sistem için bulunan sapma grafikleri	87
Şekil 5.51. RES ve BESS içeren çok bölgeli yük frekans kontrol sistemi	89
Şekil 5.52. BESS'in şematik gösterimi.....	90
Şekil 5.53. BESS için eşdeğer devre modeli.....	90
Şekil 5.54. BESS modeli.....	93
Şekil 5.55. RES ve BESS içeren sistem için bulunan sapma grafikleri.....	94
Şekil 5.56. RES ve BESS içeren sistem için Bölge-1 için karşılaştırmalı frekans sapması grafiği	91
Şekil 5.57. RES ve BESS içeren sistem için Bölge-2 için karşılaştırmalı frekans sapması grafiği	92
Şekil 5.58. RES ve BESS içeren sistem için Ara bağlantı hattı için karşılaştırmalı güç sapması grafiği	92

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
β	Frekans eğilim faktörü
Δf	Frekans sapması
$\Delta P_{\text{bağlantı hattı}}$	Ara bağlantı hattı güç sapması
ΔPL	Değişen güç miktarı
λ	İntegral operatör üstel terimi
μ	Türevsel operatör üstel terimi
τ	Haberleşme zaman gecikmesi
b_g	Valf konumlandırıcının gaz türbini sabiti
c_g	Gaz türbini valfi konumlandırıcısı
D	Yük sönüm sabiti
f	Frekans
K_D	Kontrolör türevsel kazancı
K_I	Kontrolör integral kazancı
K_P	Kontrolör oransal kazancı
K_r	Ara ısıtıcı kazancı
M	Eylemsizlik faktörü
R	Regülasyon sabiti
T_{12}	Senkronizasyon sabiti
T_{cd}	Kompresör deşarj hacmi zaman sabiti
T_{cr}	Gaz türbininin yanma reaksiyonu zaman gecikmesi sabiti
T_f	Yakıt zaman sabiti
T_g	Governor zaman sabiti
T_{gh}	Hidro türbin governor zaman sabiti
T_r	Ara ısıtıcı zaman sabiti
T_{rh}	Geçici düşüş zaman sabiti
T_{rs}	Hidro türbin governor sıfırlama zaman sabiti

Simgeler**Açıklamalar**

T_t	Türbin zaman sabiti
T_w	Cebri borudaki suyun başlangıç zamanı
X_c	Gaz türbini governorünün sağlama sabiti
Y_c	Gaz türbini governorünün gecikme sabiti

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ABC	Artificial bee colony
ACE	Area control error
AG	Analitik-grafik
BESS	Batarya enerji depolama sistemi
BFOA	Bacteria foraging optimization algorithm
CTD	Haberleşme zaman gecikmesi
DSA	Dragonfly search algorithm
EO	Equilibrium optimizer
EHO	Elephant herding optimization
FESS	Volan enerji depolama sistemi
FOPID	Kesir dereceli oransal-integral-türev kontrolör
GWO	Grey wolf optimizer
hBFOA-PSO	Hybrid bacteria foraging optimization algorithm and particle swarm optimization
HTVS	Hybrid Taguchi vortex search algorithm
IAE	Integral absolute error
IMC	Internal model control
ISE	Integral square error
ISFS	Improved stochastic fractal search algorithm
ITAE	Integral time absolute error
ITSE	Integral time square error
LFC	Load frequency control
LS	Laurent series
MGWO	Modified grey wolf optization

Kısaltmalar**Açıklamalar****NN-FOPID**

Yapay zeka tabanlı kesir dereceli oransal-integral-türev kontrolör

PD-PI

Kaskat oransal-türev oransal-integral kontrolör

PID

Oransal-integral-türev kontrolör

PSO

Particle swarm optimization

RES

Renewable energy sources

SCA

Sine-cosine algorithm

SBL

Stability boundary locus

SMA

Slime mould algorithm

SOSA

Symbiotic organisms search algorithm

TLBO

Teaching learning based optimization

TOAA

Taguchi ortogonal dizi yaklaşımı

VSA

Vortex search algorithm

WSRT

Wilcoxon sign rank test

2DOF-FOPID

İki serbestlik derecesine sahip kesir dereceli oransal-integral-türev kontrolör

2DOF-(RA+FOPD)-(FOPID)

İki serbestlik derecesine sahip rastgele kaskat kesir dereceli oransal- türev kontrolör- kesir dereceli oransal-integral-türev kontrolör

1. GİRİŞ

Geçmişten bugüne kadar güç sistemlerinin işletim ve kontrolü araştırmacılar ve uygulamacılar için en önemli konulardan birisidir. Elektrik enerjisinin kaliteli, güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde üretim merkezinden son tüketiciye kadar ulaştırılması gereklidir. Bunu gerçekleştirmek için en önemli konulardan bir tanesi üretim merkezlerinin değişken yük taleplerine göre sabit veya kabul edilebilir sınırlarda frekans sağlamasıdır.

Enerjiye olan talebin sürekli artmasından ve kaliteli ve sürekli enerji sağlanması gereğinden dolayı, güç sistemleri enterkonnekte olarak birbirlerine bağlanarak bu talep karşılanmaya çalışılmaktadır. Enterkonnekte sistemlerin birlikte kararlı bir şekilde çalışmaları için ulusal ve uluslararası bazı frekans değerleri belirlenmiştir. Avrupa Elektrik İletimi Koordinasyonu Birliği (Union for the Coordination of Transmission of Electricity-UCTE) için sistem frekansının 49,2 ile 50,8 Hz arasında olması gerekir [1]. Ülkemiz için de sistem frekansı 50 Hz seçilmekle birlikte iletim sisteminde 49,8 ile 50,2 Hz arasında tutulması hedeflenmektedir.

Güç sistemlerinin frekans değerlerinin belirli sınırlar içinde tutulması için gerçekleştirilen kontrol yük frekans kontrolü (Load Frequency Control-LFC) olarak adlandırılmaktadır. Yük frekans kontrolünün temel amacı, enterkonnekte güç sistemlerindeki bölgelere ait frekans sapmalarının ve bölgeler arası ara bağlantı hatlarındaki güç sapmalarının sıfır ya da sıfıra yakın belirli limitler içerisinde tutulmasını sağlamak olarak tanımlanmaktadır [2].

Güç sistemleri, LFC mekanizmasının ve üretim birimlerinin iletişim gereksinimlerini karşılamak için açık ve dağıtılmış iletişim ağlarını kullanır. İletişim ağlarının kullanılmasıyla birlikte paket kayıpları, iletişim kanallarının arızalanması ve merkezi kontrolör ile üretim birimleri arasında yoğun veri aktarımı gibi birçok nedenden dolayı LFC mekanizması için zaman gecikmesi problemleri kaçınılmazdır [3-5]. Frekans ölçümlerini almak ve kontrol sinyallerini iletmek için iletişim ağlarının LFC sistemlerine entegrasyonu gerekli olsa da gözlemlenen zaman gecikmeleri kontrolör performansını ciddi şekilde düşürür ve LFC sistemlerinin sönümleme etkisini azaltarak kararsızlığa neden olabilir [4-6]. Bu nedenle, LFC sistemlerinde kararlılık değerlendirmesi için

haberleşme zaman gecikmelerinin (Communication Time Delays-CTDs) sistem modeline dahil edilmesi oldukça önemlidir.

Günümüzde fosil kaynaklı güç sistemleri önemli bir yere sahiptir. Ancak, gerek fosil kaynakların sınırlı oluşu gerekse de çevreye verdikleri zararlar dikkate alındığından dolayı, yenilenebilir enerji kaynakları (Renewable Energy Sources-RESs) ve enerji depolama sistemlerinin (Energy Storage Systems-ESSs) güç sistemlerindeki payı hızla artmaktadır. Özellikle RES ve ESS sistemlerinin yaygınlaşmaya başlaması ile birlikte enterkonnekte güç sistemlerinden daha küçük mikrogrid sistemleri de giderek yaygınlaşmaktadır. Dolayısıyla, gelecekteki güç sistemleri düşünüldüğünde, bu sistemlere RES ve ESS'nin dahil edilerek LFC analizlerinin yapılması önemli bir konudur.

Bu tez çalışması kapsamında, tek bölgeli ve çok bölgeli güç sistemlerinin yük frekans kontrol analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde farklı kontrolör yapıları ve farklı sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. LFC sistemlerindeki CTD'lerin olumsuz etkisini azaltmak ve sistem performanslarının artırılması için bu tez kapsamında yapay zeka tabanlı hibrit adaptif kontrolör [7] geliştirilmiştir. Bu kontrolörün hem haberleşme zaman gecikmelerini hem de sistem performansları üzerindeki başarısı simülasyon analizleri ile gösterilmiştir. Buna ilave olarak, RES ve BESS'lerin dahil edildiği kompleks güç sistemlerinde daha iyi performans sonuçlarına ulaşmak için iki serbestlik derecesine sahip kaskat kontrolör ve hibrit bir algoritma olan hibrit Taguchi girdao arama algoritması [8] geliştirilmiş ve ilk defa yük frekans kontrol sistemlerine uygulanmıştır. Geliştirilen kontrolör ve sezgisel tekniğin başarısı iki farklı LFC sistemi için gösterilmiş ve daha sonra RES ve BESS yapılarının sistem performanslarına olan etkisini analiz etmek için kullanılmıştır.

Tezin ikinci bölümünde; yük frekans kontrolü ile ilgili yapılmış olan literatür çalışmaları verilmiştir. Tezin üçüncü bölümünde; yük frekans kontrol sistemlerinden bahsedilerek, bu sistemler için modeller önerilmiştir. Tezin dördüncü bölümünde; bu tez çalışması kapsamında kullanılan ve geliştirilen kontrolör yapıları ile sezgisel optimizasyon algoritmaları verilmiştir. Tezin beşinci bölümünde; analizleri gerçekleştirilen yük frekans kontrol sistem modelleri detaylandırılmıştır. Analizler sonucunda elde edilen frekans saptamaları ve ara bağlantı hattı güç saptamalarına ait grafikler verilmiştir. Ayrıca, sistem performanslarına ait sonuçlar, oturma zamanı, maksimum aşım ve minimum aşım değerleri

açısından incelenerek çizelgeler halinde sunulmuştur. Tezin son bölümünde ise elde edilen sonuçların detaylı değerlendirilmesi yapılarak önerilerde bulunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yük frekans kontrolü ile ilgili son yıllardaki literatür çalışmaları incelendiğinde, tek bölgeli ve çok bölgeli güç sistemlerinin farklı kontrolörler ve farklı sezgisel tekniklerle analiz edildiği, haberleşme zaman gecikmelerinin sistem modellerine dahil edilerek etkilerinin analiz edildiği gözlenmiştir. Ayrıca özellikle son birkaç yıldaki literatür çalışmalarında, yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama sistemlerini içeren yapılar ile bu sistemlerin LFC üzerine olan etkilerinin analiz edildiği gözlemlenmiştir. Bu kapsamda yük frekans kontrolü ile ilgili literatürde yer alan başlıca çalışmalar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Gözde ve diğerleri 2012 yılında yaptıkları çalışmada, iki bölgeli termal güç sistemini PI ve PID kontrolörler için parçacık sürü optimizasyonu (Particle Swarm Optimization-PSO) ve yapay arı kolonisi (Artificial Bee Colony-ABC) algoritmalarını kullanarak incelemişlerdir. Çalışmada hataların mutlak değerleri integrali (Integral Absolute Error-IAE), hataların karelerinin integrali (Integral Square Error-ISE), zaman çarpı hataların mutlak değerleri integrali (Integral Time Absolute Error-ITAE), zaman çarpı hataların karelerinin integrali (Integral Time Square Error-ITSE) amaç fonksiyonları için elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır [9].

Mi ve diğerleri 2013 yılında yaptıkları çalışmada merkezi olmayan kayan mod kontrolüne (Sliding Mode Control-SMC) dayalı olarak, yenilenebilir enerji kaynakları ve elektrik arabaların neden olduğu belirsizliklere sahip çok alanlı enterkonnekte güç sistemlerinin LFC analizleri için bir kontrolör tasarlamışlardır [10].

Shabani ve diğerleri 2013 yılında yaptıkları çalışmada LFC sistem performanslarını iyileştirmek için yeni bir PID tabanlı kontrolör önermişlerdir. Önerilen kontrolörün parametrelerini emperyalist rekabet algoritması (Imperialist Competitive Algorithm-ICA) kullanarak belirlemişlerdir. Çalışmada ayrıca yeni ve hibrit bir amaç fonksiyonu geliştirerek ICA için kullanmışlardır [11].

Debbarma ve diğerleri 2014 yılında yaptıkları çalışmada, LFC performanslarını iyileştirmek için iki serbestlik derecesine sahip kesir dereceli PID (Two-Degree-of-

Freedom-Fractional Order PID-2DOFFOPID) kontrolör önermişlerdir. Bazı kontrolör ve sistem parametrelerinin ayarlanması sırasında ateşböceği algoritmasını (Firefly Algorithm-FA) kullanmışlardır [12].

Naidu ve diğerleri 2014 yılında yaptıkları çalışmada, iki bölgeli ara ısıtmalı bir güç sisteminin yük frekans kontrolü analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, PID kontrolörün parametrelerinin ayarlanması için çok amaçlı optimizasyon tabanlı yapay arı kolonisi algoritmasının uygulamasını sunmuşlardır [13].

Barisal 2015 yılında yaptığı çalışmada çok bölgeli güç sistemini, öğretme öğrenme tabanlı optimizasyon (Teaching Learning Based Optimization-TLBO) yöntemini ve PID kontrolörü kullanarak incelemiştir. Çalışmada ISE, IAE, ITAE ve ITSE amaç fonksiyonları için sistem performans sonuçları verilmiştir [14].

Sahu ve arkadaşları 2015 yılında yaptıkları çalışmada, üretim oranı kısıtı (Generation Rate Constraint-GRC) ve governor ölü band (Governor Dead Band-GDB) lineersizliklerinin dahil edildiği çok bölgeli güç sisteminin yük frekans kontrolü analizleri için hibrit yerçekimi arama ve örüntü arama algoritması (Hybrid Gravitational Search and Pattern Search Algorithm-HGSPSA) önermişlerdir. Önerdikleri yöntemi, güç sisteminde kullanılan PI ve PID tabanlı kontrolöre uygulamışlardır [15].

Anwar ve Pan 2015 yılında yaptıkları çalışmada, doğrudan sentez (Direct Synthesis-DS) yaklaşımı ile yeni PID tasarımını önermişlerdir. Tek bölgeli ve çok bölgeli güç sistemlerini, üretim oranı kısıtlaması lineersizliliğini de dikkate alarak analiz etmişlerdir [16].

Guha ve diğerleri 2016 yılında yaptıkları çalışmada, iki bölgeli ara ısıtmasız güç sistemi, iki bölgeli hidro termal güç sistemi, iki bölgeli hidro, gaz ve termal güç kaynaklarına sahip çok üniteli güç sistemi ve üç bölgeli güç sistemlerini LFC analizlerini PI/PID kontrolör kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Kontrolör parametrelerini belirlemek için gri kurt optimizasyonunu (Grey Wolf Optimizer-GWO) uygulamışlardır. Ayrıca, sistem parametrelerinin belirli oranlardaki değişimlerini inceleyerek, sistem için hassaslık analizini de gerçekleştirmişlerdir [17].

Sönmez ve Ayasun 2016 yılında yaptıkları çalışmada, tek bölgeli haberleşme zaman gecikmesine bir güç sisteminin PI kontrolör için kararlılık bölgesini lokus sınırlı kararlılık (Stability Boundary Locus-SBL) yöntemini kullanarak göstermişlerdir. PI kontrolör için seçilen bazı parametreler aracılığıyla, bu bölgenin sistem kararlılığı üzerine olan etkisini analiz etmişlerdir [18].

Sönmez ve diğerleri 2016 yılında yaptıkları çalışmada, haberleşme zaman gecikmesine sahip bir bölgeli ve iki bölgeli güç sistemlerinin kararlılık bölgelerini dikkate alarak, sabit PI kontrolör parametrelerinin karşılayabileceği maksimum haberleşme zaman gecikmesi değerlerini hesaplamışlardır [19].

Guha ve diğerleri 2017 yılında yaptıkları çalışmada, yarı-karşıt simbiyotik organizma araması algoritmasını (Quasi-Oppositional Symbiotic Organism Search Algorithm-QOSOS) ilk defa GRC ve GDB lineersizliklerini de dikkate alarak iki bölgeli yük frekans kontrol sistemine uygulamışlardır. Önerdikleri yöntemin etkinliğini PID kontrolör kullanarak ve farklı çalışmalarla karşılaştırmalı olarak göstermişlerdir [20].

Guha ve diğerleri 2018 yılında Simbiyotik organizma arama algoritması (Symbiotic Organism Search Algorithm-SOSA) kullanarak farklı güç kaynaklarından oluşan iki bölgeli ve üç bölgeli güç sistemlerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada PID kontrolör ve amaç fonksiyonu olarak ITAE kullanmışlardır [21].

Gheisarnejad 2018 yılında yaptığı çalışmada iki bölgeli çok kaynaklı bir güç sistemini incelemiştir. Sistem performanslarını iyileştirmek için hibrit armoni arama ve guguk kuşu optimizasyon algoritması (Hybrid Harmony Search and Cuckoo Optimization Algorithm-HHSCOA) yöntemini geliştirmiş ve bulanık mantık tabanlı PID kontrolör önermiştir [22].

Saxena 2019 yılında yaptığı çalışmada, yük frekans kontrol problemlerinin çözümü için dahili model kontrolü (Internal Model Control-IMC) yöntemini kullanarak kesir dereceli kontrolör tasarımı önermiştir. Daha gerçekçi modeller oluşturmak amacıyla jeneratör ve türbine ait fiziksel kısıtları dikkate almış ve önerdiği yöntemi tek bölgeli ve çok bölgeli güç sistemine uygulamıştır [23].

Sönmez ve Ayasun 2019 yılında yaptıkları çalışmada, sabit haberleşme zaman gecikmesine sahip iki bölgeli yük frekans kontrol sistemine kazanç ve faz marjlerini (Gain and Phase Margin-GPM) dahil ederek, GPM'lerinin sistem kararlılık gecikme marjine olan etkisini incelemişlerdir. Kompleks köklerin ve gecikme marjlerini doğrulunu yarı polinom eşleme tabanlı kök bulucu (quasi-polynomial mapping-based root finder) yöntemini kullanarak doğrulamışlardır [24].

Sharma ve diğerleri 2019 yılında yaptıkları çalışmada, haberleşme zaman gecikmesine sahip ara ısıtmalı ve ara ısıtmasız tek bölgeli güç sistemleri için SBL metodunu kullanarak PID kontrolör tasarlamışlardır. Ayrıca, önerdikleri yaklaşımı, çok bölgeli IEEE-39 baralı Yeni İngiltere (New England) test sistemine uygulayarak doğrulamışlardır [25].

Hasanien ve El-Fergany 2019 yılında yaptıkları çalışmada, çok bölgeli yenilenebilir enerji kaynaklarına (güneş ve rüzgar) ve GRC-GDB lineersizliklerine sahip yük frekans kontrol sistemini PID kontrolör kullanarak analiz etmişlerdir. Sistem performanslarını iyileştirmek için PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesinde salp sürüsü algoritması (Salp Swarm Algorithm-SSA) kullanmışlardır. Ayrıca, sistem parametrelerini belirli oranlarda değiştirerek hassaslık analizini gerçekleştirmişlerdir [26].

Prasad ve diğerleri 2019 yılında yaptıkları çalışmada genelleştirilmiş genişletilmiş durum gözlemcisini ve doğrusal olmayan kayan mod kontrolünü birleştirerek, güç sisteminin frekans sapmasını analiz etmişlerdir [27].

Arya 2020 yılında yaptığı çalışmada, tek bölgeli ve çok bölgeli yük frekans kontrol sistemlerinin performanslarının iyileştirilmesi için yeni bir kaskat bulanık mantık kesir dereceli PI – kesir dereceli PID kontrolör (Cascade Fuzzy Fractional Order Proportional Integral- Fractional Order Proportional Integral Derivateive-CFFOPI-FOPID) önermiştir. Önerilen kontrolörün etkinliğini farklı çalışmalar ile karşılaştırmalı olarak göstermiştir [28].

Yılmaz ve diğerleri 2021 yılında yaptıkları çalışmada, optimal PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesi için simbiyotik organizmalar arama algoritmasını önermişlerdir. Önerdikleri yaklaşımı çok bölgeli ve çok kaynaklı yük frekans kontrol

sistemlerine uygulamış ve elde edilen sonuçları farklı yöntemler ile karşılaştırmalı olarak sunmuşlardır [29].

Arya ve diğerleri 2021 yılında yaptıkları çalışmada, çok bölgeli ve çok kaynaklı yük frekans kontrol sistemlerinin performanslarının artırılması için kaskat bulanık mantık filtre katsayılı PID - filtre katsayılı kesir dereceli PID (FPIDN-FOPIDN) kontrolör tasarlamışlardır. Önerdikleri kontrolörün etkinliğini farklı çalışmalar ile karşılaştırarak sunmuşlardır [30].

Abou El-Ela ve diğerleri 2022 yılında yaptıkları çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip yük frekans kontrolünü PI, PID ve kaskat filtre katsayılı PD ve PI kontrolör (PDn-PI) kontrolör için karşılaştırmalı analiz etmişlerdir. Kontrolörlere ait parametreleri belirlerken ITAE fonksiyonunu ve çakal optimizasyon algoritması (Coyote Optimization Algorithm-COA) kullanmışlardır [31].

Irudayaraj ve diğerleri 2022 yılında yaptıkları çalışmada, bir boyutlu kaotik haritalar aracılığıyla güçlendirilmiş kaotik tabanlı atom arama algoritmasının bir formunu önermişlerdir. Kaotik haritalar sezgisel teknikte kullanılan rastgele sayılar yerine belirli bir sayı dizillimleri önermektedir. Böylece, sezgisel teknikteki rastgele sayıların aynı değeri alma olasılığı azaltılmış olmaktadır. Kaotik haritalar sayesinde sezgisel tekniğin global minimumu bulma olasılığı artırılmış olur. Irudayaraj ve diğerleri önerdikleri yöntemi optimal kesir dereceli PID kontrolör parametrelerini belirlemek için kullanmışlar ve yenilenebilir enerji kaynaklarının dahil edildiği yük frekans kontrol sistemi için uygulamışlardır [32].

Bu son on yıla ait literatür çalışmaları ışığında;

- Çok bölgeli, çok kaynaklı güç sistemleri için yük frekans kontrol analizleri gerçekleştirilmiştir,
- Daha gerçekçi modeller oluşturmak için haberleşme zaman gecikmesine sahip yük frekans kontrol modelleri analiz edilmiştir,
- Yenilenebilir enerji kaynaklarına ve enerji depolama sistemlerine sahip mikrogrid sistemler için yük frekans kontrol analizleri gerçekleştirilmiştir,
- Farklı optimizasyon algoritmaları, farklı yük frekans kontrol sistemleri için

kullanılmıştır,

- Hibrit bir optimizasyon algoritması olan HTVS geliştirilerek ilk defa yük frekans kontrol sistemine uygulanmıştır,
- Sinir ağı tabanlı hibrit adaptif PID kontrolör ile kaskat 2DoF $(1+PD^\mu)-(PI^\lambda D^\mu)$ kontrolör tasarımları gerçekleştirilmiştir,
- Son olarak, GRC ve GDB lineersizliklerine sahip, yenilenebilir enerji kaynaklarına ve batarya enerji depolama sistemlerine sahip yük frekans kontrol analizleri, bu kaynakların sisteme olan etkileri gösterilerek gerçekleştirilmiştir.

3. YÜK FREKANS KONTROLÜ

Güç sistemlerinin çoğunlukla birbirleri ile enterkonnekte bağlantılı olduğu dikkate alındığında bu kontrol işlemi oldukça kompleks ve zordur. Güç sistemleri aracılığıyla üretilen elektrik enerjisinin üretim merkezinden son tüketiciye kadar kaliteli iletilmesini sağlamak ve güç sistemlerinin kararlı bir yapıya sahip olması frekans kararlılığı kilit bir rol oynamaktadır.

Sistem tarafından üretilen güç ile sistemden talep edilen (kayıplar dahil) güç dengeli olmak zorundadır. Eğer üretilen güç talep gücünden fazla ise, jeneratörler fazla dönüş ve üretim yapacağından sistem frekansı artar. Benzer şekilde, eğer sistemden talep edilen güç üretilen güçten fazla ise jeneratörler daha az dönüş yaparak aktif güç üretimi düşeceğinden sistem frekansı azalır. Ayrıca enterkonnekte güç sistemlerinde, herhangi bir bölgede meydana gelen yük değişimleri, hem diğer bölgelerdeki frekans değişimine neden olmakta, hem de ara bağlantı hatlarında güç değişimine neden olmaktadır. Güç sistemlerindeki aktif güç akışı ile üretilen gücü denetleyerek, frekans değişiminin minimize edilmesi işlemine yük frekans kontrolü denir [1]. Yük frekans kontrolünü temel amacı güç sistemlerinde frekans sapmalarının ve ara bağlantı hattı güç sapmalarının sıfır ya da sıfıra yakın belirli limitler içinde tutulmasını sağlamaktır [2]. Bu sayede son tüketiciye kadar kaliteli elektriğin şartı olan frekans kararlı enerji iletimi sağlanmış olur.

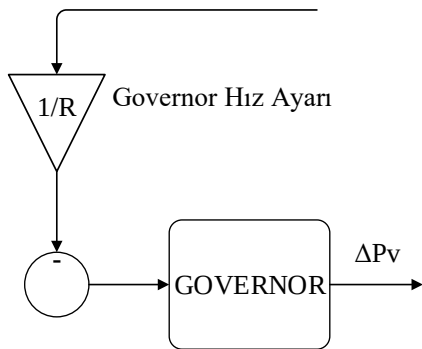
Güç sistemleri doğrusal olmayan bileşenlerden meydana gelmiştir. Güç sistemleri için yük frekans kontrol analizleri yapılırken, çeşitli varsayımlar yapılarak sistemler doğrusallaştırılır. Yük frekans kontrol sistemlerinde kullanılan güç sistem modelleri, bu yaklaşımlar eşliğinde tasarlanır. Çünkü normal zamanda yük dalgalanması nedeniyle oluşan frekans değişimleri sürekli durumdaki (steady-state) küçük ve yavaş değişimlerdir ve dinamikleri ihmal edilebilir. Buna Küçük İşaret Modeli (Small Signal Model) denmektedir. Eğer anlık ve büyük bir bozulma olursa, (örneğin yıldırım ya da kısa devre arızaları gibi) bu durumda doğrusallaştırma yapılamaz ve Transient Modelleri kullanılması gerekmektedir. Buna da Büyük İşaret Modeli (Large Signal Model) denir.

Temel bir yük frekans kontrol sistemi üç ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar, governor, türbin ve atalet-yük bileşenleridir. Bu bileşenlere ait bilgiler ve modellemeleri aşağıda verilmiştir.

3.1. Governor Modeli

Güç sistemlerinde, sistemden talep edilen güç, anlık olarak sürekli değişmektedir. Bu durum, sistemde bulunan jeneratörün dönüş sayısını etkilemektedir. Sistem yükü arttığında jeneratörün dönüş sayısı azalırken, sistem yükü azaldığında jeneratörün dönüş sayısı artmaktadır. Her iki durum ise sistem frekansının artmasına ya da azalmasına sebep olmakta ve frekansta sapmalara neden olmaktadır.

Governor bir çeşit devir sayısı sensörüdür. Suyun veya buharın akışını bir vana ile ayarlayarak bu suyun/buharın çevirdiği türbinin dakikadaki dönüş sayısını (RPM) sabitlemeye çalışır. Çok eskiden mekanik toplu Watt governorları kullanılırken, günümüzde ise elektronik bir kart olarak kullanılmaktadır. Sistemdeki governor ve hız regülatörü aracılığıyla, jeneratörün dönüş sayısı ve dolayısıyla sistem frekansı sürekli olarak takip edilerek, jeneratörün yüke bağlı olarak belirli sayıda dönüş yapması sağlanmaktadır. Governor Şekil 3.1’de verilen modeldeki gibi gösterilebilir:



Şekil 3.1. Governor modeli

Bu modelde, R governor hız ayarını, Δf frekans sapmasını, ΔP_v vana pozisyonunu temsil etmektedir. Governor bloğu ise aşağıdaki transfer fonksiyonunu temsil etmektedir [33].

$$\frac{1}{1+sT_g} \quad (3.1)$$

Burada T_g governor zaman sabitini temsil etmektedir.

3.2. Türbin Modeli

Güç üretimi yapan senkron jeneratörlere dönme hareketini sağlayan ilk hareket mekanizması türbinlerdir. Su veya buharın miktarını ayarlayan vana pozisyonundaki değişimler, türbinin çıkışındaki mekanik gücün değişmesini sağlamaktadır. Literatürde farklı güç sistemleri için farklı türbin modelleri olmakla birlikte, temel olarak bir kapalı kutu (black-box) modeli Şekil 3.2’de görüldüğü gibi gösterilebilir [33].



Şekil 3.2. Türbin modeli

Yük frekans kontrol sistemlerinde termal türbinler için sıklıkla kullanılan ara ısıtmasız ve ara ısıtmalı türbin modellerine ait transfer fonksiyonları sırasıyla aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$\frac{1}{1+sT_t} \quad (3.2)$$

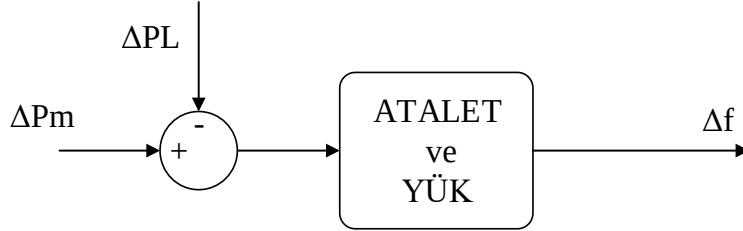
$$\frac{1+T_rK_rs}{(1+T_ts)(1+T_rs)} \quad (3.3)$$

Burada T_t türbin zaman sabitini, T_r ara ısıtıcı zaman sabitini ve K_r ise ara ısıtıcı kazancını temsil etmektedir. Literatürde gaz, hidro için farklı türbin modelleri de bulunmaktadır [34].

3.3. Yük Modeli

Güç sisteminde türbin vasıtasıyla üretilen güç, jeneratörün dönmesini sağlamaktadır. Ancak üretilen mekanik gücün jeneratörün ataletini ve sistemdeki bozucu yükü yenmesi gerekmektedir. Bu nedenle güç sistemindeki yük modeli oluşturulurken, jeneratörün

ataleti, sönüm katsayısı ve bozucu yük dikkate alınmaktadır ve Şekil 3.3'teki gibi gösterilmektedir [33].



Şekil 3.3. Yük modeli

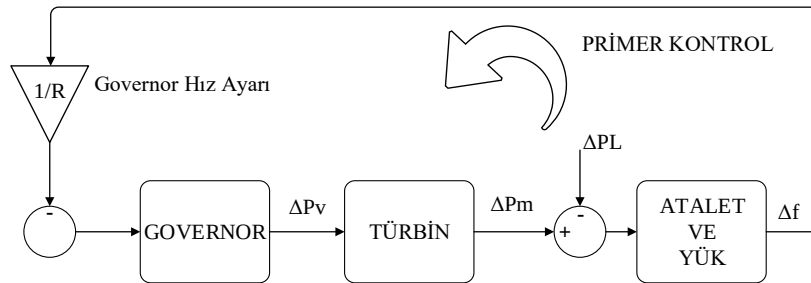
Atalet ve yük bloğuna ait transfer fonksiyonu aşağıdaki verilmektedir:

$$\frac{K_M}{D+sM} \quad (3.4)$$

Burada D sönüm katsayısını, M atalet sabitini, K_M sistem kazanç katsayısını ve ΔPL ise bozucu yükü temsil etmektedir.

3.4. Tek Bölge Yü k Frekans Kontrol Modeli

Yukarıda bahsedilen ve kısaca açıklanan üç model, bir güç sisteminin temelini oluşturmaktadır. Bu modeller kullanılarak en temel haliyle aşağıda belirtilen yük frekans kontrol modeli oluşturulur.

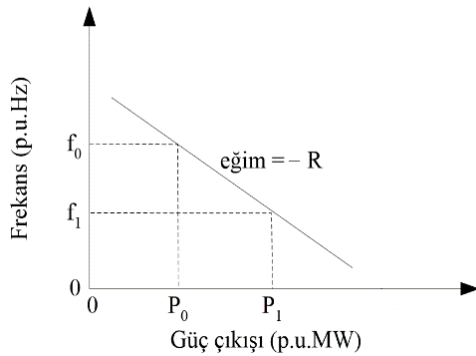


Şekil 3.4. Temel yük frekans kontrol modeli [33]

Şekil 3.4'te gösterilen yük frekans kontrolü ile, sistem frekansındaki değişimler gözlenerek, jeneratörün dönüş sayısının artması ya da azalması sağlanır. Bu sayede

sistemin kararsız hale düşmesi önlenir. Gerçekleştirilen bu kontrole aynı zamanda primer kontrol de denmektedir. Primer kontrolde sistem frekansı belirli sabit bir değerde tutularak, sistem frekansında meydana gelebilecek değişimlerin önüne geçilir. Primer kontrolde, sistemin kalıcı durumdaki frekans sapması sıfır ya da sıfıra yakın limitlerde tutulamayabilir. Bunun sebebi, frekans sapmasına göre sistemdeki rezerv gücün ne kadarlık bir kısmının sisteme aktarılacağına governor hız ayarı (düşüm karakteristiği) ile belirlenmesinden kaynaklanır.

Sistemin nominal gücü üretmesi durumunda (P_0), sistem frekansı nominal değerindedir (f_0). Çıkış gücünün artması durumunda jeneratörlerin dönüş hızı azalacağından sistem frekansı da nominal değerin altına düşecektir. Benzer şekilde, sistemin çıkış gücü azaldığında jeneratörlerin dönüş hızı artacağından sistem frekansı da nominal değerin üstüne çıkacaktır. Sistemdeki çıkış gücü ve sistem frekansı arasındaki ilişkiye bağlı olarak düşüm karakteristiğinin eğimi R regülasyon katsayısını ifade eder ve Şekil 3.5'teki gibi gösterilebilir:

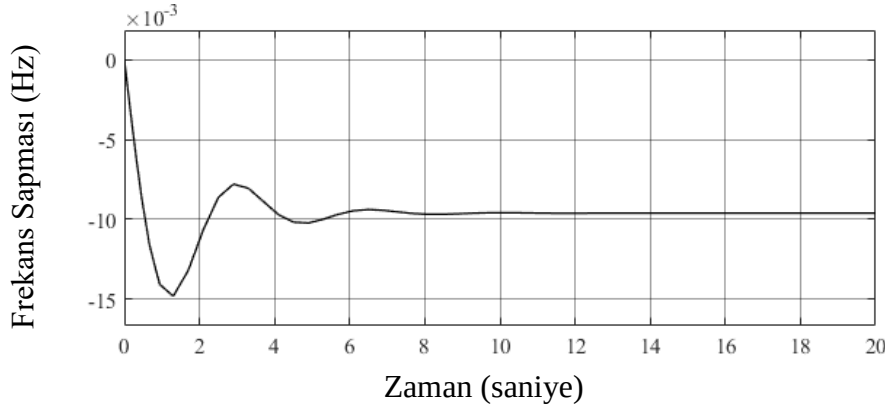


Şekil 3.5. Düşüm karakteristiği ve regülasyon katsayısının gösterimi [35]

Buradaki şekilden açıkça görüleceği üzere, sistem nominal gücü üretirken $P_1 - P_0$ p.u. MW kadarlık bir güç kadar daha yüklenirse, R 'ye bağlı olarak sistem frekansı da nominal değerinden $f_0 - f_1$ kadar düşer. R katsayısı sistemdeki frekans değişimine göre türbin çıkış gücünün ne kadar değişeceğini belirlemektedir ve aşağıdaki denklemle ifade edilebilir [35]:

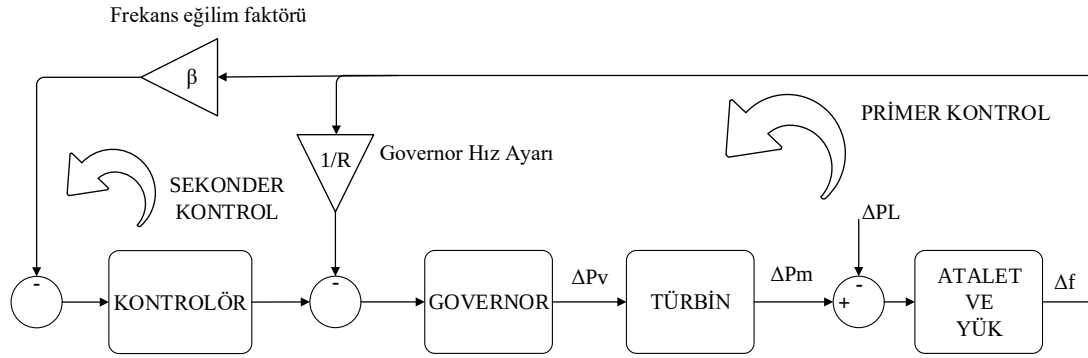
$$\%R = \frac{\text{Frekans Değişiminin \% de değeri}}{\text{Çıkış gücü değişiminin \% de değeri}} \times 100 \quad (3.5)$$

Şekil 3.6’da primer kontrolün etkisi gösterilmiştir:



Şekil 3.6. Primer kontrolün sistem frekans sapmasına etkisi [33]

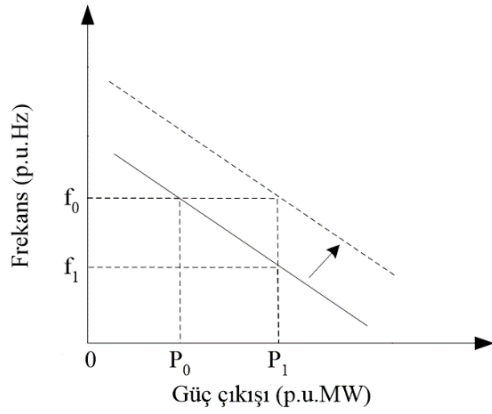
Primer kontrol sonucunda çoğu kez sistem frekansı tekrar nominal değerine getirilemez. Bu durumda, güç sisteminin frekans sapmasını sıfıra yaklaştırmak için çeşitli kontrolör yapıları kullanılmaktadır. Böyle bir durumda, tek bölgeli bir güç sistemi için yük frekans kontrol modeli Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Tek bölgeli güç sistemi için yük frekans kontrol modeli

Sistemdeki kontrolör parametreleri, bozucu yükteki değişimlere karşı belirlenerek, sistem çıkışındaki frekans sapmalarının sıfır ya da sıfıra yakın belirlenen limitler arasında tutulması sağlanır. Bu yaklaşıma sekonder kontrol de denmektedir. Sekonder kontrol, yük frekans kontrolünün temeli oluşturur ve primer kontrol sonucunda meydana gelen hatayı, kontrolörler aracılığıyla gidermeye çalışan kontrol mekanizmalarını içerir [36].

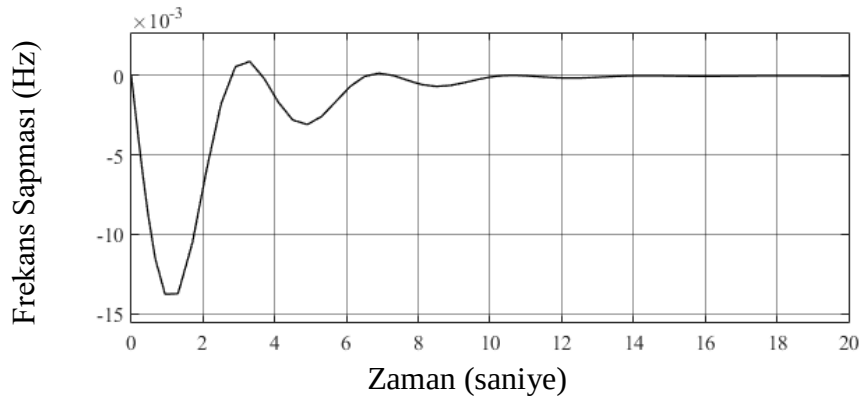
Sekonder kontrolde, düşüm karakteristiği, sisteme eklenen yük sonrası oluşan P1 çıkış gücünde, sistemin nominal frekans değerini verecek şekilde kaydırılır. Bu durum Şekil 3.8’de gösterilmiştir [35]:



Şekil 3.8. Düşüm karakteristiğinin yeniden ayarlanması [35]

Buradaki şekilden açıkça görüleceği üzere, sistemde bir kontrolör kullanılarak, sistem yeni yük değerindeyken (P_1) sistem frekansı nominal değerine getirilmiştir.

Şekil sekonder kontrolün önemi gösterilmiştir:

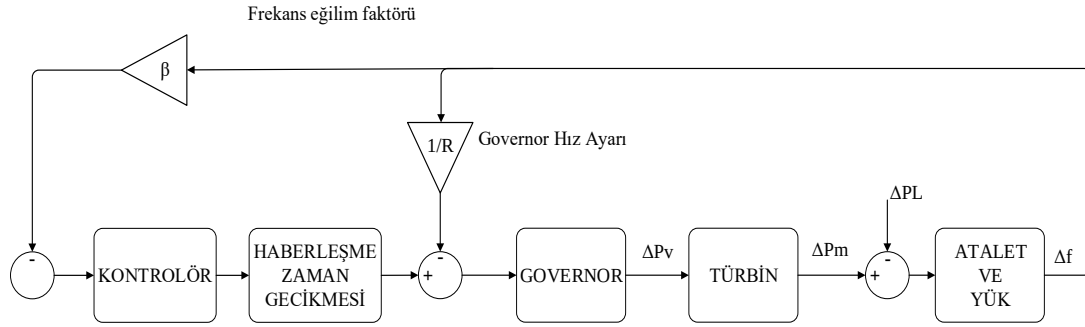


Şekil 3.9’da Sekonder kontrolün sistem frekans sapmasına etkisi [33]

3.5. Haberleşme Zaman Gecikmeli Tek Bölge Yükleme Frekans Kontrol Modeli

Yük frekans kontrol sistemlerinde kullanılan haberleşme altyapıları ve kanalları, fazör ölçüm birimleri (phasor measurement units-PMUs), geniş alan ölçüm izleme sistemleri (wide area measurement monitoring systems-WAMSs), merkezi denetleme kontrol ve veri

toplama (supervisory control and data acquisition-SCADA) gibi sistemler ve birimler nedeniyle, kontrol merkezleri ve güç sistemleri arasında haberleşme zaman gecikmeleri oluşmaktadır. Oluşan bu zaman gecikmelerinin toplamı sabit bir zaman gecikmesi değeri olarak alınabilir [19]. Haberleşme zaman gecikmelerinin dahil edildiği tek bölgesi yük frekans kontrol modeli Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Haberleşme zaman gecikmesini içeren tek bölgesi yük frekans kontrol modeli

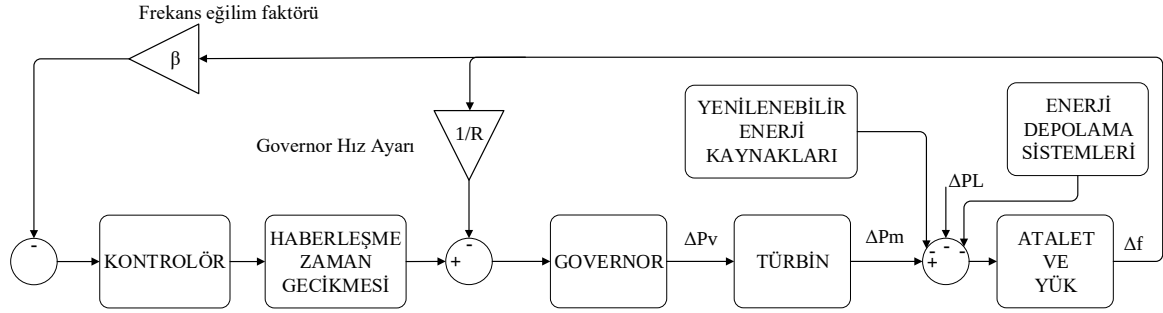
Yük frekans kontrol sisteminde oluşan haberleşme zaman gecikmeleri, sistem modeline aşağıda verilen denklem ile eklenmektedir:

$$CTD = e^{-s\tau} \quad (3.6)$$

Bu denklemde τ , sistemde görülen toplam zaman gecikmesi değerini temsil etmektedir. Mevcut tez çalışmasının gelecek bölümlerinde haberleşme gecikmesi hesabı fiber optik kablolar için detaylı olarak açıklanmıştır.

3.6. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını İçeren Tek Bölgesi Yük Frekans Kontrol Modeli

Günümüzde fosil kaynaklı güç sistemleri önemli bir paya sahiptir. Ancak fosil kaynakların sınırlı olması ve karbon emisyonunun azaltılmasının gerekliliği sebebiyle, gelecekteki güç sistemleri için alternatif enerji kaynakları ön plana çıkmaktadır. Bu nedenle günümüzde özellikle rüzgar tabanlı enerji sistemleri ve güneş tabanlı enerji sistemleri, güç sistemlerine entegre edilmeye başlanmıştır. İlerleyen zamanlarda, bu tür yenilenebilir enerji kaynakları, güç üretiminde önemli bir paya sahip olacaktır. Bu sayede, yenilenebilir enerji kaynakları

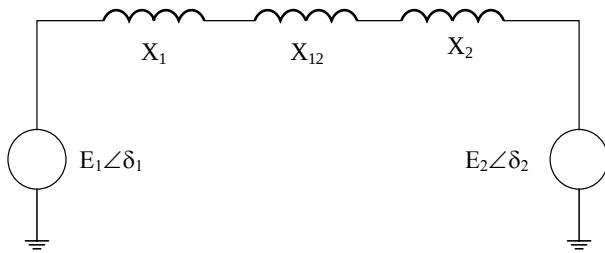


Şekil 3.12. Enerji depolama sistemlerinin dahil edildiği yük frekans kontrol modeli

3.8. Çok Bölge Yükle Frekans Kontrol Modeli

Günümüzde güç sistemleri artan enerji ihtiyacını karşılamak için ara bağlantı güç hatları aracılığıyla birbirlerine enterkonnekte olarak bağlıdır. Enterkonnekte güç sistemleri, talep edilen enerjiyi, ortak frekans referansı oluşturarak birlikte karşılamaktadır. Enterkonnekte güç sistemleri birden fazla bölgeden oluşur ve bu nedenle yük frekans kontrolü tek bölge güç sistemlerine göre oldukça karmaşık ve zordur. Bu nedenle bu bölümde, çok bölge güç sistemlerinin yük frekans kontrolünün daha kolay anlaşılması için, iki bölge bir güç sistemi dikkate alınmıştır.

İki bölge bir enterkonnekte güç sisteminin yaklaşık eşdeğer modeli Şekil 3.13'teki gibi gösterilebilir [33]:



Şekil 3.13. İki bölge bir güç sisteminin yaklaşık eşdeğer gösterimi

Bu modelde, her bir bölge E uç gerilimine, δ faz açısına ve X reaktansına sahip birer alternatif akım güç kaynağı olarak dikkate alınmıştır [35]. Normal işletim şartlarında, ara bağlantı hattı üzerinden aktarılan güç $E_{\text{Ş. 3.7}}$ ile ifade edilir [33]:

$$P_{12} = \frac{E_1 E_2}{X_T} \delta_{12} \quad (3.7)$$

Bu denklemde X_T toplam reaktansı ($X_T = X_1 + X_2 + X_{12}$) ve δ_{12} faz açıları arasındaki farkı ($\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2$) temsil etmektedir [33]. Burada, faz açılarının değişimine göre ara bağlantı gücü değişmektedir ve Eş. 3.8 ile ifade edilebilir [35]:

$$\Delta P_{12} = \frac{E_1 E_2}{X_T} \cos(\delta_{12} - \delta_{12}) (\Delta \delta_{12} - \Delta \delta_{12}) = T. (\Delta \delta_{12} - \Delta \delta_{12}) \quad (3.8)$$

Faz açısındaki değişim ise Eş. 3.9 ile ifade edilebilir [35]:

$$\Delta \delta = 2\pi \int \Delta f. dt \quad (3.9)$$

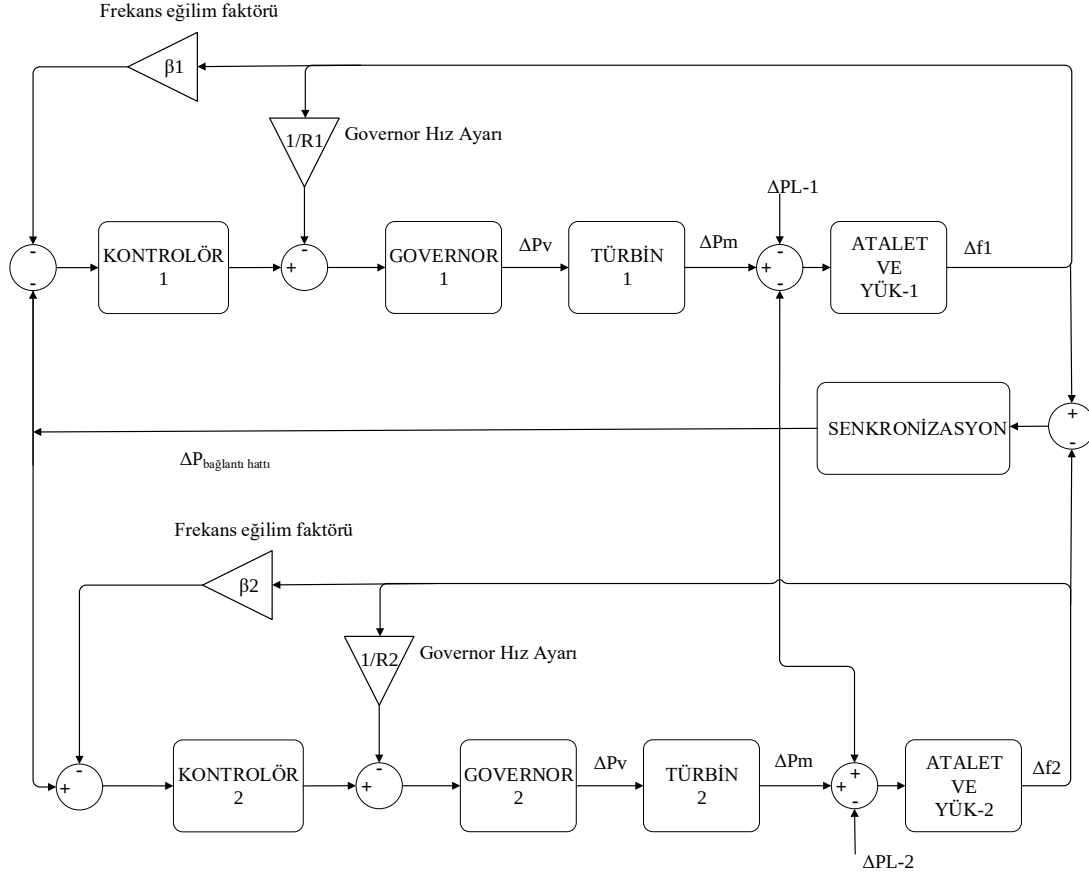
Eş. 3.8'deki denklem dikkate alınarak Eş. 3.9'teki denklem yeniden düzenlenirse, ara bağlantı hattı güç değişiminin zaman bölgesindeki ifadesi Eş. 3.10'daki gibi elde edilir [35]:

$$\Delta P_{12} = 2\pi T \left[\int \Delta f_1 dt - \int \Delta f_2 dt \right] \quad (3.10)$$

Eş. 3.10'daki denklem, frekans bölgesinde Eş. 3.11'deki gibi ifade edilir:

$$\Delta P_{12} = \frac{2\pi T}{s} [\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)] \quad (3.11)$$

Buradan, 2 bölgeli bir temel bir yük frekans kontrol modeli Şekil 3.14'teki gibi gösterilebilir:



Şekil 3.14. İki bölge temel yük frekans kontrol modeli

Bu modelde senkronizasyon ile gösterilen blok, Eş. 3.12 ile verilmektedir:

$$\Delta P_{12} = \frac{2\pi T_{12}}{s} \quad (3.12)$$

Burada T_{12} , birinci ve ikinci bölge arasındaki senkronizasyon katsayısını temsil etmektedir.

Yukarıda şekil için alan kontrol hataları (area control error-ACE) Eş. 3.13 ve Eş. 3.14 ile ifade edilmektedir:

$$ACE_1 = -(\Delta f_1 \beta_1 + \Delta P_{\text{bağlantı hattı}}) \quad (3.13)$$

$$ACE_2 = -(\Delta f_2 \beta_2 - \Delta P_{\text{bağlantı hattı}}) \quad (3.14)$$

3.9. Bölüm 3 İçin Genel Değerlendirme

Mevcut tez çalışmasında kullanılacak olan yük frekans kontrolü ile ilgili üç temel model olan;

- Governor,
- Türbin,
- Yük ve atalet

modelleri verilmiştir.

Ayrıca, tek bölgesi ve çok bölgesi yük frekans kontrol modelleri haberleşme zaman gecikmesi olmadan ve haberleşme zaman gecikmesi dahil edilerek analiz edilmiştir. İlave olarak, haberleşme zaman gecikmelerinin yük frekans kontrol sistemleri üzerine olan olumsuz etkilerini azaltmak ve ortadan kaldırmak için NN-FOPID kontrolör tasarlanmıştır. Son olarak, yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama sistem modellerine sahip çok bölgesi enterkonnekte güç sistemleri detaylı olarak analiz edilmiştir.

4. KONTROLÖR YAPILARI VE SEZGİSEL OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ

Yük frekans kontrolünde primer kontrol ile sistemin kararsızlığa düşmesi büyük ölçüde engellenirken, sekonder kontrolde, kullanılan kontrolörler aracılığıyla sistemin kararlı durum hatasının sıfır ya da sıfıra yakın değerlerde olması sağlanır. Bu nedenle, yük frekans kontrolünün temelini sekonder kontrol oluşturmaktadır. Dolayısıyla, yük frekans kontrolünde kullanılan kontrolör türleri ve bu kontrolörlere ait optimal parametrelerin belirlenmesi, sistem kararlılığı için oldukça önemlidir.

Yük frekans kontrol sistemlerinde, 2. Bölümde bahsedildiği üzere, sistem performanslarının iyileştirilmesi için farklı türde kontrol yapıları geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Kontrolörlere ait optimum parametrelerinin klasik iteratif matematiksel yöntemler ile belirlenmesi kolay değildir. Bu nedenle, gerek doğadaki canlıların gerekse maddelerin birbirleri ile olan ilişkileri referans alınarak geliştirilen sezgisel optimizasyon teknikleri, yük frekans kontrolünde kullanılan kontrolörlere ait optimal parametrelerin belirlenmesinde oldukça önemli bir role sahiptir.

Bu bölümde, bu tez çalışmasında kullanılan farklı kontrolör türleri ve literatüre kazandırılmış yeni kontrolör yapılarından bahsedilmiştir. Ayrıca, bu kontrolörlerin optimum parametrelerinin bulunmasında kullanılan sezgisel optimizasyon algoritmaları ve literatüre kazandırılmış yeni bir hibrit optimizasyon algoritmasından bahsedilmiştir.

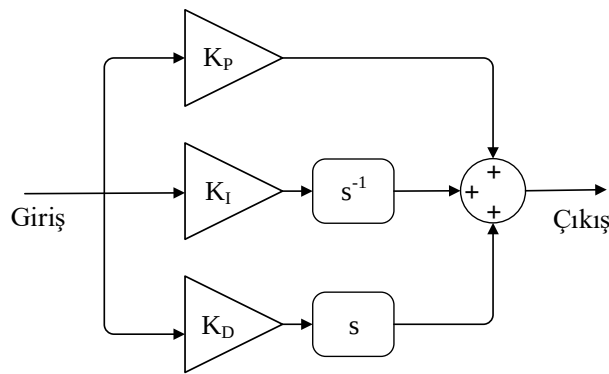
4.1. Kontrolör Yapıları

Yük frekans kontrolünde kullanılan kontrolörler incelendiğinde, temel olarak üç ana operatöre sahip olduğu görülmektedir. Bunlardan birincisi oransal (proportional) operatördür ve P ile temsil edilir. P operatörünün görevi, hata sinyalinin belirli oranlarda yükseltilmesini veya azaltılmasını sağlamaktır. Bunlardan ikincisi ise integral (integral) operatörüdür ve I ile temsil edilir. I operatörünün görevi, sistem çıkışının kararlı durumda referans değerine yaklaşmasını sağlamaktır yani sürekli durum (steady-state) hatasını sıfırlamaktır. Bunlardan sonuncusu ise türev (derivative) operatörüdür ve D ile temsil edilir. D operatörünün görevi ise, sistem çıkışında görülen dalgalanmaların azaltılmasını sağlamaktır yani geçici durum (transient) hatasını sıfırlamaktır.

Bu tez çalışması kapsamında, farklı yük frekans kontrol sistemlerinin performanslarının artırılması için uygulanmış, oran-integral-türev (PID) kontrolör, kesir dereceli oran-integral-türev (FOPID) kontrolör [41, 42], iki serbestlik derecesine sahip kesir dereceli oran-integral-türev (2DOF-FOPID) kontrolör [43], kaskat oran-türev oran-integral (PD-PI) kontrolör [44] yapıları açıklanmıştır. Ayrıca, yenilebilir enerji kaynakları ve enerji depolama sistemlerine sahip çok bölgeli yük frekans kontrol sisteminin, performanslarının analizlerini gerçekleştirmek için geliştirilmiş, iki serbestlik derecesine sahip kaskat kesir dereceli oran-türev kesir dereceli oran-integral-türev (2DOF-(RA+FOPD)-(FOPID)) ile yük frekans kontrolör sistemlerinde görülen haberleşme zaman gecikmelerinin olumsuz etkilerini azaltmak ve sistem performanslarının iyileştirilmesi için geliştirilmiş sinir ağı (neural network) tabanlı kesir dereceli oran-integral-türev (NN-FOPID) [7] kontrolör yapıları önerilmiştir.

4.1.1. PID kontrolör

PID kontrolörler basit yapısı ve kolay kullanımı nedeniyle güç sistem kontrollerinde (hem modelleme ve analizlerde hem de pratik uygulamalarda) sıklıkla kullanılan kontrolör yapısıdır. Sahip olduğu üç operatörden dolayı (P-I-D), sistem performanslarında tatmin edici bir iyileştirme sağlayabilmektedir. Ucuz ve basit yapısı nedeniyle de ayrıca çoğunlukla tercih edilmektedir. PID kontrolöre ait blok gösterimi Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. PID kontrolör yapısı

PID kontrolörün matematiksel ifadesi aşağıdaki denklemde verilmiştir:

$$u = \left[K_p + \frac{K_i}{s} + sK_d \right] . e_r \quad (4.1)$$

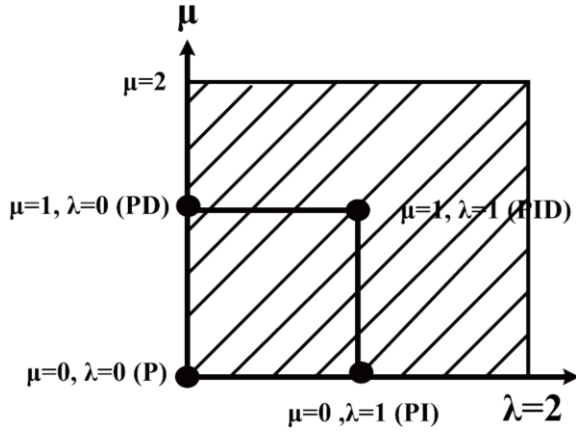
Burada, u kontrolör çıkış sinyalini temsil ederken, e_r ise kontrolöre giren hata (giriş) sinyalini temsil etmektedir.

Güç sisteminde yükün sürekli değişmesinden dolayı sistem çalışma noktası da sürekli kaymaktadır. Bu durum PID kontrolörün performansının zayıflamasına neden olmaktadır. PID kontrolöre ait parametreler belirlenirken, bu çalışma noktasına göre P, I ve D operatörlerine ait parametre değerleri bulunur. Ancak yükten dolayı çalışma noktası değiştiğinde (her ne kadar küçük işaret modelinde sistemin lineerliğini bozmayacak küçük değişimler de olsa) bu parametrelerin sağladığı kontrol performansı da etkilenmektedir. Bu nedenle, gerek sistemin çok bölgeli olması ve çok kaynaklı olması, gerekse de sistemin zaman gecikmelerine sahip olması gibi nedenlerden dolayı PID kontrolörler istenilen performansları sergileyemeyebilir. Dolayısıyla PID kontrolörler için yeni parametre değerlerinin bulunması için adaptif veya robust kontrol yapıları kullanmak gerekmektedir.

Bu sebeple, karmaşık ve doğrusal olmayan güç sistemlerinin yük frekans kontrolünü gerçekleştirmek amacıyla, farklı PID tabanlı kontrolör tasarımları geliştirilmiş ve uygulanmıştır.

4.1.2. FOPID kontrolör

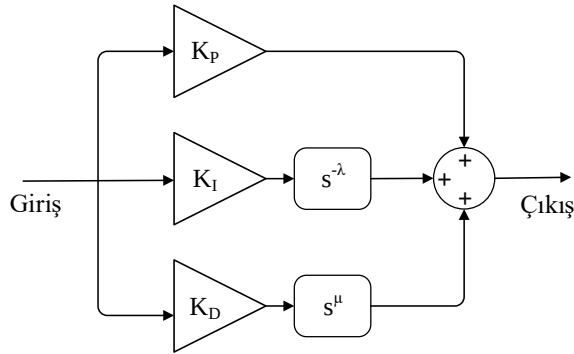
Bu kontrolör yapısında, I ve D operatörü üstel terimlere sahiptir. I operatörünün üstel terimi λ ile gösterilirken D operatörünün üstel terimi μ ile gösterilir. Bu nedenle FOPID kontrolör aynı zamanda $PI^\lambda D^\mu$ kontrolör olarak da tanımlanabilir. FOPID kontrolör ilk defa 1999 yılında Podlubny tarafından PID kontrolörün performanslarının artırılması için önerilmiştir [45]. Sahip olduğu üstel terimlerden dolayı, PID kontrolöre göre daha esnek ve performansı daha yüksek bir kontrolördür. Çünkü bu üstel terimler, Şekil 4.2’de gösterildiği üzere PID uzayını sürekli olarak tarama olanağı sağlar.



Şekil 4.2. λ ve μ üstel terimlerine göre PID uzayının taranması [46]

Yukarıdaki örnek şekilde, sadece sistem için ayarlanan PID parametreleri için değil, kontrolöre ait I ve D operatörlerine ait parametrelerin lamda kadar komşuluğundaki değerleri de kullanarak sistemin kontrol performansının sabit tutulması veya artırılması sağlanır.

FOPID kontrolöre ait blok gösterimi Şekil 4.3'teki gibi verilmektedir:



Şekil 4.3. FOPID kontrolörünün blok gösterimi

FOPID kontrolörün matematiksel ifadesi Eş. 4.2 ile verilmiştir:

$$u = \left[K_P + \frac{K_I}{s^{\lambda}} + s^{\mu} K_D \right] \cdot e_r \quad (4.2)$$

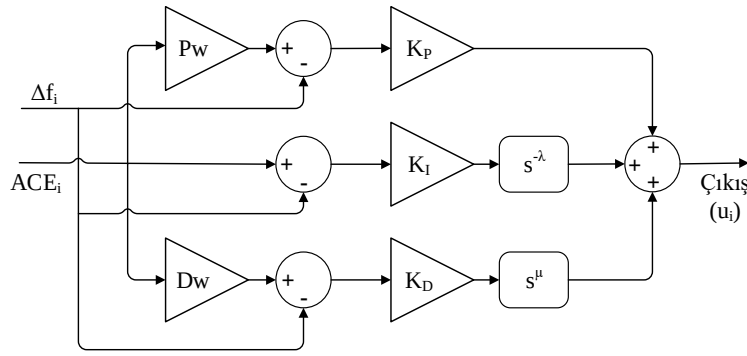
Burada, u kontrolör çıkış sinyalini temsil ederken, e_r ise kontrolöre giren hata (giriş) sinyalini temsil etmektedir.

4.1.3. 2DOF-FOPID kontrolör

FOPID kontrolörün etkinliğini artırmak ve istenen sistem performanslarını güçlendirmek için, FOPID kontrolöre iki serbestlik derecesi eklenmesi ile elde edilmiş kontrolör yapısıdır.

2DOF-FOPID kontrolörde iki adet giriş noktası ve bir adet çıkış noktası vardır. Ayrıca, P ve D operatörlerine ait giriş sinyalleri, belirli katsayılar eşliğinde ağırlıklandırılarak, kontrolörün esnekliğinin ve performansının artırılması sağlanmıştır.

2DOF-FOPID kontrolöre ait blok gösterimi Şekil 4.4'te verilmiştir:



Şekil 4.4. 2DOF-FOPID kontrolörünün blok gösterimi [47]

Burada, Δf_i ve ACE_i sırasıyla i 'nci bölgeye ait frekans sapmasını ve ilgili bölgedeki alan kontrol hatasını temsil etmektedir. D_w ve P_w ise sırasıyla türev ve oran ayar nokta ağırlığını temsil etmektedir. Bu sayede, ilgili bölge için frekans sapması ve alan kontrol hatası P ve D operatörleri için belirli oranda ağırlıklandırılarak, güçlü sistem performanslarına ulaşılması sağlanmıştır.

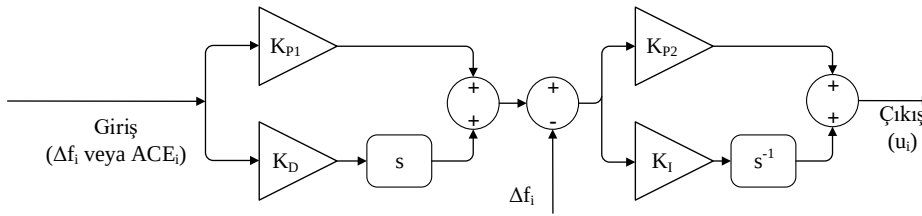
2DOF-FOPID kontrolörün matematiksel ifadesi Eş. 4.3 ile verilmiştir [47]:

$$u_i = K_p[ACE_i P_w - \Delta f_i] + \frac{K_I}{s^\lambda} [ACE_i - \Delta f_i] + K_D s^\mu [ACE_i D_w - \Delta f_i] \quad (4.3)$$

4.1.4. Kaskat PD-PI kontrolör

Kaskat kontrol stratejisi, iki döngüden oluşan birleşik bir süreçten oluşmaktadır [48]. Birinci (iç) döngüde kullanılan kontrolörün çıkışı, ikinci (dış) döngünün girişinde kullanılır [48]. Kaskat kontrolörlerin temel amacı, iç döngüde oluşan bozulmalara karşı iyileştirme sağlayarak, dış döngünün sistemdeki bozulmalara karşı direnci artırmaktır. Böylece, tek aşamalı kontrolörlere göre daha güçlü sistem performanslarına ulaşılmaktadır.

Şekil 4.5'te kaskat PD-PI kontrolör için blok gösterimi verilmiştir:



Şekil 4.5. Kaskat PD-PI kontrolör için blok gösterimi

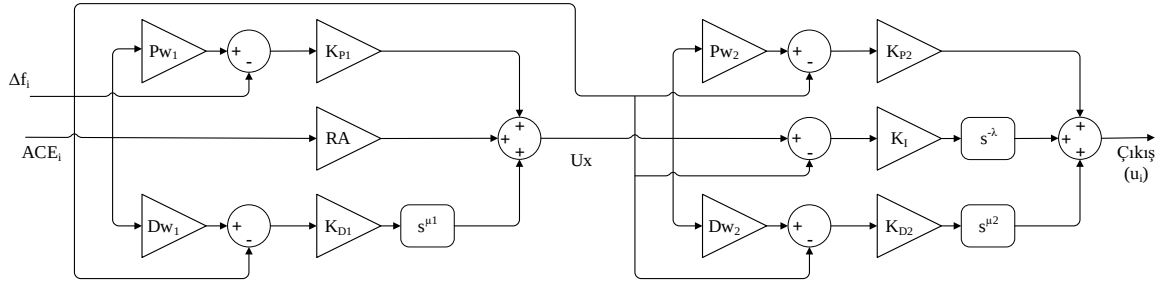
Burada giriş sinyali, tek bölgesli yük frekans kontrol sistemleri için Δf_i , çok bölgesli yük frekans kontrol sistemleri için ise ACE_i olarak kullanılabilir [48, 49]. Çıkış ise Eş. 4.4'te verildiği biçimde olacaktır.

$$u_i = \left(K_{P1} + \frac{K_I}{s} \right) \Delta f_i [K_{P2} + sK_d - 1] \quad (4.4)$$

4.1.5. 2DOF-(RA+FOPD)-(FOPID) kontrolör

Bu kontrol yapısı, bu tez çalışması kapsamında ilk defa bir yük frekans kontrol sistemine uygulanmak üzere geliştirilmiştir. Önerilmiş bu kontrolör, iki serbestlik derecesine sahip kaskat kesir dereceli kontrolörden oluşmaktadır. Bu sayede, kesir dereceli kontrolörün, kaskat kontrolörün ve serbestlik dereceli kontrolörün özellikleri ve avantajları tek bir kontrol yapısında birleştirilerek, doğrusal olmayan ve çok bölgesli-çok kaynaklı güç sistemlerinin yük frekans kontrolünde optimum sonuçlar alınması sağlanmıştır.

2DOF-(RA+FOPD)-(FOPID) kontrolöre ait blok gösterimi Şekil 4.6'da verilmiştir:



Şekil 4.6. 2DOF-(RA+FOPD)-(FOPID) kontrolör için blok gösterimi

Burada U_x ile gösterilen ara çıkış sinyalinin matematiksel ifadesi ise Eş. 4.5'te verilmektedir:

$$U_x = K_{p1}(P_{w1}ACE_i - \Delta f_i) + ACE_i RA + K_{D1}(D_{w1}ACE_i - \Delta f_i) \quad (4.5)$$

Bu denklemde verilen U_x ifadesi kullanılarak 2DOF-(RA+FOPD)-(FOPID) kontrolöre ait çıkış sinyalinin matematiksel ifadesi Eş. 4.6'daki gibi ifade edilebilir:

$$u_i = K_{p2}[U_x P_{w2} - \Delta f_i] + \frac{K_I}{s^\lambda} [U_x - \Delta f_i] + K_{D2}s^{\mu2}[U_x D_{w2} - \Delta f_i] \quad (4.6)$$

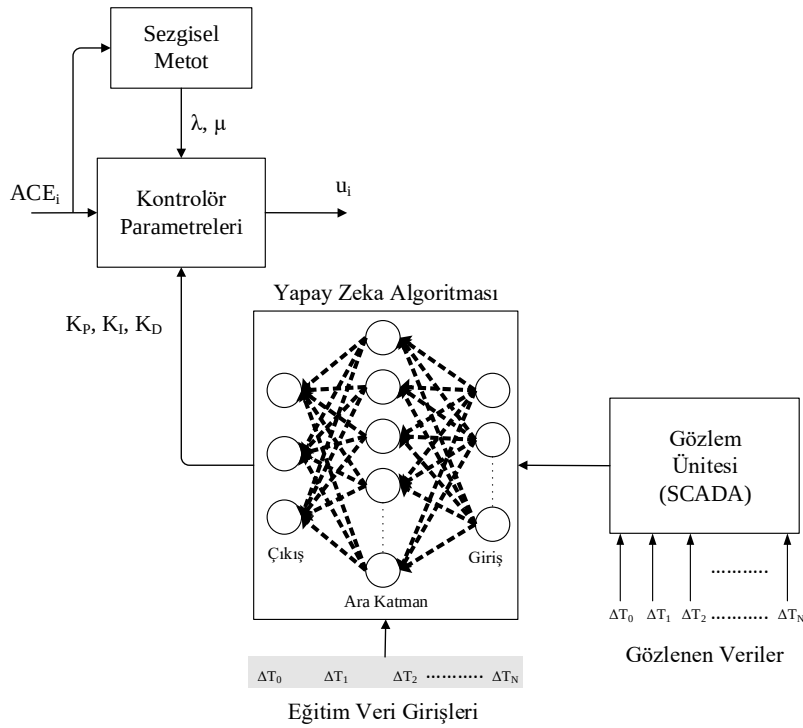
4.1.6. NN-FOPID kontrolör

Güç sistemlerinde çeşitli haberleşme kanalları, kontrol üniteleri arası haberleşme gibi nedenlerden dolayı haberleşme zaman gecikmeleri meydana gelmektedir. Bu haberleşme zaman gecikmeleri, yük frekans kontrol sistemlerinin performanslarını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle, sistemde görülen bu gecikmelerin etkisinin azaltılması oldukça önemlidir.

Sistemde oluşan haberleşme zaman gecikmeleri, zamanla değişen yapıya sahiptirler. Bundan dolayı sistemde kullanılan kontrolörün bu haberleşme zaman gecikmelerinin etkisini azaltması oldukça önemlidir. Haberleşme zaman gecikmelerinin yanı sıra, yük frekans kontrol sistemlerinin zaman sabitlerinde de değişimler meydana gelebilmekte ve bu değişimler de sistem çıkış performanslarını etkileyebilmektedir. Bu nedenle, zaman gecikmelerinin etkisinin azaltılması için, uyarlanabilir bir kontrol yapısı gereklidir. Adaptif bir kontrolör için ise, yapay zekâ tabanlı yöntemler önemli bir yere sahiptirler.

Bu tez çalışması kapsamında, sistem arızalarından dolayı elemanların zaman sabitlerinden kaynaklı zaman gecikmelerine ilave olarak, haberleşme zaman gecikmelerinin yol açabileceği olumsuz etkilere dikkat çekmek ve bu etkileri elimine etmek amacıyla yeni bir “yapay sinir ağı tabanlı-sezgisel kesir dereceli hibrit adaptif PID kontrolör” geliştirilmiştir.

Şekil 4.7’de önerilen kontrolöre ait blok şeması verilmiştir:



Şekil 4.7. NN-FOPID kontrolör için blok gösterimi

Geliştirilen NN-FOPID kontrolör ile yük frekans kontrol sistemindeki zaman sabiti parametreleri SCADA aracılığıyla sürekli olarak izlenerek, olası değişimlere karşı anlık olarak yeni PID setleri üretilmiştir. Bu aşamada, 8 girişli ve 3 çıkışlı, 100 nöronlu 1 ara katmana sahip MLP tipi bir yapay sinir ağı kullanılmıştır. Giriş ve çıkış katmanlarında doğrusal fonksiyon, ara katmanda ise Sigmoid transfer fonksiyonu bulunmaktadır. Öğrenme algoritması olarak Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmıştır. Eğitim ve test veri seti iki bölgeyi enterkonnekte yük-frekans kontrolü modelinden, zaman sabitlerinin çeşitli aralıklarda değişimi dikkate alınarak elde edilmiştir. Sistemde oluşan zaman gecikmelerinin olumsuz etkisinin azaltılması amacıyla da sezgisel bir algoritma kullanılarak, I ve D operatörlerine ait üstel terimler belirlenmiştir.

4.2. Sezgisel Optimizasyon Yöntemleri

Günümüzde giderek modernleşen güç sistemleri, kompleks bir yapıya sahip olmakla birlikte, karmaşık mühendislik problemlerini de beraberinde getirmektedir. Yük frekans kontrol sistemleri için optimal performansların elde edilmesi için, kontrolörlere ait optimal parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir.

Literatür araştırmalarından da görüleceği üzere, günümüzde yük frekans kontrolü ile ilgili birçok uygulamada sezgisel optimizasyon teknikleri kullanılmaktadır. Sezgisel optimizasyon teknikleri karmaşık ve çok kısıtlı problemler için en uygun çözümleri bulma kabiliyetine sahiptirler [50]. Bu optimizasyon teknikleri ile çözümlere çok hızlı ve kolaylıkla yakınsanabilmektedir [51].

Sezgisel optimizasyon yöntemleri doğadan ilham alınarak geliştirilmişlerdir ve genel olarak;

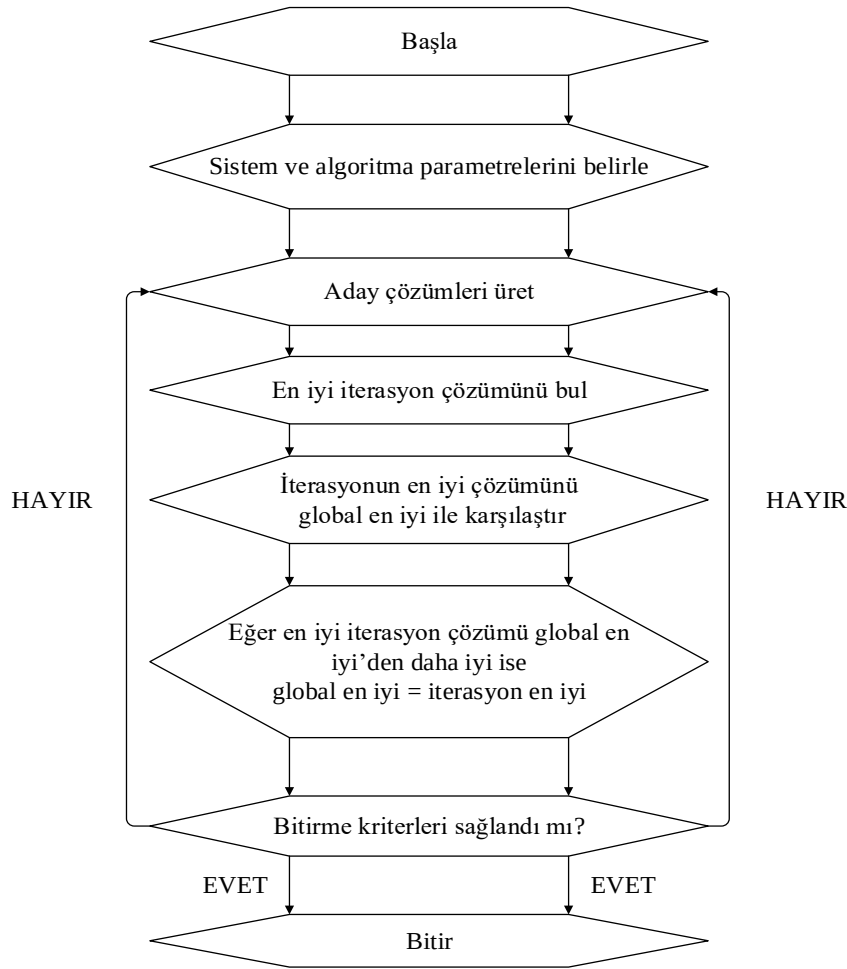
- Popülasyon tabanlı yöntemler; parçacık sürü optimizasyonu (particle swarm optimization-PSO) [52] ve diğerleri,
- Fizik tabanlı yöntemler; yerçekimsel arama algoritması (gravitational search algorithm-GSA) [53] ve diğerleri,
- Evrimsel tabanlı yöntemler; genetik algoritma (genetic algorithm-GA) [54] ve diğerleri,

olarak gruplandırılabilir.

Sezgisel tekniklerde, ilk olarak kullanılacak algoritmaya ait parametreler ve değerler tanımlanır. Daha sonra tanımlanan problemi çözmek amacıyla (yük frekans kontrol sistemleri için optimal kontrolör parametrelerinin belirlenmesi) kullanıcı tarafından aday çözümler oluşturulur. Bu aday çözümlerin kullanıcı tarafından tanımlanmış arama uzayı içerisinde olup olmadığı değerlendirilir ve tüm aday çözümlerin bu uzay içerisinde olması sağlanır. Bu aday çözümler içerisinde, en iyi aday çözüm seçilir ve hafızaya alınır. Daha sonraki iterasyonlarda, benzer şekilde aday çözümler üretilir ve her iterasyon sonucunda bulunan en iyi iterasyon değeri, o ana kadar bulunan en iyi çözüm (global en iyi) ile karşılaştırılır. Eğer en iyi iterasyon değeri global en iyiden daha iyi bir sonuca sahipse, en

iyi iterasyon değeri global en iyi olarak atanır ve hafızaya alınır. Ancak, en iyi iterasyon değeri global en iyiden daha kötü bir sonuca sahipse, global en iyi aynı değerde tutulur ve bir sonraki iterasyona geçilir. Sezgisel tekniği sonlandırma kriterleri sağlanıncaya kadar bu iteratif süreç devam eder.

Şekil 4.8’de, sezgisel optimizasyon tekniklerinin genel çalışmasına ait akış diyagramı verilmiştir:



Şekil 4.8. Sezgisel optimizasyon teknikleri için temel akış diyagramı

Bu tez kapsamında SCA [55], Balçık küfü algoritması (Slime Mould Algorithm-SMA) [56], Girdap arama algoritması (Vortex Search Algorithm-VSA) [57], GWO [58] ve Denge optimizasyonu (Equilibrium Optimizer-EO) [59] sezgisel teknikleri farklı LFC modellerine uygulanmıştır. Bu sezgisel optimizasyon tekniklerinin seçilme ve kullanılma nedeni aşağıda maddeler halinde verilmekle birlikte, ilerleyen bölümlerde açıklanmıştır:

- SCA, arama uzayının farklı bölgelerini keşfedebilir ve böylece arama uzayını etkin bir şekilde kullanabilir. Bu nedenle tanımsız arama uzayı için etkili olabilir.
- SMA, kullanımlar ve keşifler arasında olağanüstü bir dengeye sahiptir. Bu nedenle, daha iyi sonuç bulma eğilimi yüksektir.
- VSA algoritması, aday çözümlerin arama ve keşfetme özellikleri arasında oldukça iyi bir dengeye sahiptir. Bu nedenle sistem için optimal çözümleri bulma kabiliyeti yüksektir.
- GWO iyi bilinen sezgisel yöntemlerden biridir ve birçok farklı probleme uygulanmıştır. Bu nedenle başarısı birçok çalışma ile kanıtlanmış olup sistem için istenen çözümlere hızlı yakınsama özelliğine sahiptir.
- EO, yakın zamanda geliştirilmiş güçlü bir sezgisel yöntemdir. İyi bir yakınsama davranışına sahiptir ve bu sebeple yerel optimumdan kaçınabilme özelliğine sahiptir.

Sezgisel optimizasyon teknikleri, sistemler için iyi sonuçlar vermekle birlikte, karmaşık sistemler için yeterli olmayabilirler. Bu nedenle kompleks sistemlerde optimal sonuçların elde edilmesi için güçlendirilmiş algoritmaların kullanılması oldukça önemlidir. Bu tez kapsamında hibrit Taguchi girdap arama algoritması (Hybrid Taguchi Vortex Search Algorithm-HTVS) geliştirilmiştir. Bu yeni teknik, bu tez ile birlikte ilk defa yenilebilir enerji kaynaklarını ve enerji depolama sistemlerini içeren karmaşık yük frekans kontrol sistemlerinin analizlerinde kullanılmıştır.

4.2.1. Sinüs kosinüs algoritması (SCA)

Sinüs kosinüs algoritması, 2016 yılında Mirjalili tarafından sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının matematiksel modeline dayanarak geliştirilmiş bir optimizasyon algoritmasıdır [55]. SCA algoritmasında, ilk olarak rastgele aday çözümler üretilir ve bu çözümler probleme göre değerlendirilir. Daha sonraki adımlarda, aşağıda verilen sinüs ve kosinüs fonksiyonlarına bağlı iki ana fonksiyon yardımıyla (Eş. 4.7 ve Eş. 4.8), aday çözümlerin pozisyonları güncellenir:

$$X_i^{t+1} = X_i^t + r_1 \times \sin(r_2) \times |r_3 P_i^t - X_i^t|, \quad r_4 < 0.5 \quad (4.7)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + r_1 \times \cos(r_2) \times |r_3 P_i^t - X_i^t|, \quad r_4 \geq 0.5 \quad (4.8)$$

Bu denklemlerde, X_i^t güncel aday çözümü, X_i^{t+1} güncellenmiş olan bir sonraki aday çözümü, P_i^t i'nci boyuttaki varış noktası pozisyonunu ve r_1, r_2, r_3 ise rastgele katsayıları temsil etmektedir. Bu rastgele katsayılardan r_1 ; bir sonraki pozisyonun hareket yönünü, r_2 ; hedefe veya hedefin dışına ne kadar hareket edilmesi gerektiğini, r_3 ; mesafeyi tanımlamada hedefin etkisini stokastik olarak vurgulamak ($r_3 > 1$) veya önemini azaltmak ($r_3 < 1$) için rastgele bir ağırlığı ve r_4 ise kullanılacak olan sinüs ya da kosinüs fonksiyonunun seçimini belirlemek için kullanılmaktadır.

Eş. 4.7 ve Eş. 4.8'de verilen denklemler yardımıyla, aday çözümler kullanıcı tarafından belirlenen maksimum iterasyon sayısına gelinceye kadar güncellenerek, işlem sonucunda sistem için optimum değerlerin bulunması sağlanmaktadır.

4.2.2. Balçık küfü algoritması (SMA)

Balçık küfü algoritması, Li ve diğerleri tarafından balçık küflerinin yiyeceği yani optimal noktaya doğru yönelmelerine dayanarak 2020 yılında geliştirilmiş popülasyon tabanlı sezgisel bir algoritmadır [56]. SMA algoritmasında, ilk olarak rastgele balçık küfleri (aday çözümler) üretilerek, gerekli sistem için değerlendirilirler. Balçık küflerinin hedef noktaya doğru ilerleme davranışları Eş. 4.9'daki matematiksel denklemlerle ifade edilmektedir [56]:

$$X(t+1) = \begin{cases} X_b(t) + v_b \cdot (W \cdot X_A(t) - X_B(t)) & ; \quad r < p \\ v_c \cdot X(t) & ; \quad r \geq p \end{cases} \quad (4.9)$$

Burada, X_A ve X_B t iterasyonunda rastgele seçilen iki balçık küfünü, X_b o ana kadar olan/mevcut en iyi balçık küfünü, r rastgele bir katsayıyı, X balçık küfünün pozisyonunu ve v_b ise $[-a, a]$ arasında bir parametreyi temsil etmektedir. Burada, a Eş. 4.10'daki gibi verilmektedir [56]:

$$a = \operatorname{arctanh}\left(-\left(\frac{t}{\max_t}\right) + 1\right) \quad (4.10)$$

Bu denklemde $\max_t$, algoritmanın maksimum iterasyon sayısını ifade etmektedir. Eş. 4.9'da p ile gösterilen ifadenin matematiksel ifadesi ise Eş. 4.11 ile verilmiştir:

$$p = \tanh|S(i)-DF| \quad (4.11)$$

Bu denklemde, $i \in 1, 2, 3, \dots n$ olmak üzere; $S(i)$, X 'in çözüm değerini ve DF , o ana kadar elde edilmiş en iyi çözüm değerini ifade etmektedir. Ayrıca, Eş. 4.9'daki W ifadesi balçık küflerinin ağırlığını temsil etmekte ve Eş. 4.12 ile ifade edilmektedir:

$$W(\text{SmellIndex}(i)) = \begin{cases} 1+r \cdot \log\left(\frac{bF-S(i)}{bF-wF}\right)+1 & ; \text{koşul} \\ 1-r \cdot \log\left(\frac{bF-S(i)}{bF-wF}\right)+1 & ; \text{diğerleri} \end{cases} \quad (4.12)$$

Burada, bF , t iterasyonundaki en iyi çözüm değerini; wF , t iterasyonundaki en kötü çözüm değerini; r rastgele sayıyı temsil etmekte ve koşullar, $S(i)$ 'nin popülasyonun ilk yarısını oluşturduğunu göstermektedir.

SMA'da üretilen aday çözümler her bir iterasyonda yukarıda verilen denklemler vasıtasıyla güncellenmekte ve iterasyon sonucunda sistem için optimal çözüm değerleri elde edilmektedir.

4.2.3. Girdap arama algoritması (VSA)

Girdap arama algoritması, karıştırılan sıvıların oluşturduğu girdap şeklinden ilham alınarak 2015 yılında Doğan ve Ölmez tarafından geliştirilmiş sezgisel bir optimizasyon algoritmasıdır [57]. VSA algoritmasında, ilk başta bir çember oluşturulur ve aday çözümler bu çember içinde üretilirler. En büyük ve en dışta olan bu çemberin merkezi Eş. 4.13 ile ifade edilmektedir:

$$\mu_0 = (\text{üstlimit} + \text{altlimit}) / 2 \quad (4.13)$$

Burada; üst limit ve alt limit, kontrolöre ait parametre uzayının maksimum ve minimum sınırları ifade etmektedir.

Oluşturulan en büyük çembere ait yarıçap ise Eş. 4.14 ile ifade edilmektedir:

$$\sigma_0 = (\max(\text{upperlimit}) - \min(\text{lowerlimit})) / 2 \quad (4.14)$$

Çember içerisinde oluşturulan aday çözümler değerlendirilerek, içlerindeki en iyi aday çözüm belirlenir. Belirlenen bu en iyi aday çözüm, bir sonraki çemberin merkezi olarak atanır ve çemberin yarıçapı Eş. 4.15'te verildiği şekilde azaltılır.

$$r_t = \sigma_0 \times (1 / x) \times \text{gammaincinv}(x, a_t) \quad (4.15)$$

Burada; gammaincinv ters gama fonksiyonunu ve x ters gama fonksiyonunda kullanılmak üzere kullanıcı tarafından seçilen bir katsayıyı ifade etmektedir. a_t ise Eş. 4.16 ile ifade edilmektedir:

$$a_t = a_0 - (t / \text{MaxItr}) \quad (4.16)$$

Burada; t iterasyon sayısını, MaxItr , maksimum iterasyon sayısını temsil etmektedir. a_0 ise, Tüm arama uzayının taranması için 1 (bir) olarak seçilmektedir [57].

Daha sonraki aşamalarda, ilgili iterasyondaki en iyi çözüm, o ana kadar bulunmuş en iyi çözümle karşılaştırılır. Eğer, ilgili iterasyondaki en iyi çözüm, o ana kadar bulunan en iyi çözümünden daha iyi bir değere sahipse, bir sonraki çemberin merkezi, ilgili iterasyondaki en iyi çözüm olarak atanır ve yarıçap azaltılır. Eğer, ilgili iterasyondaki en iyi çözüm, o ana kadar bulunan en iyi çözümünden daha iyi bir değere sahip değilse, bir sonraki çemberin merkezi, o ana kadar bulunan en iyi çözüm olarak kalır ve yarıçap azaltılır.

Maksimum iterasyon sayısına ulaşılması ile birlikte, iterasyon süreci bitmekte ve sonuç olarak sistem gerekli optimal çözümlere ulaşılmaktadır.

4.2.4. Gri kurt optimizasyonu (GWO)

Gri kurt optimizasyonu, Mirjalili ve diğerleri tarafından, doğadaki gri kurtların liderlik hiyerarşisini ve avlanma mekanizmasını referans alarak 2014 yılında geliştirilmiş popülasyon tabanlı bir optimizasyon algoritmasıdır [58]. Gri kurtların (aday çözümlerin) avlarının etrafını çevirme davranışları (optimal noktaya doğru ilerleme davranışları) Eş. 4.17 ve Eş. 4.18 ile ifade edilmiştir [58]:

$$D = |C \cdot X_p(t) - X(t)| \quad (4.17)$$

$$X(t+1) = X_p(t) - A \cdot D \quad (4.18)$$

Burada; t iterasyon sayısını, A ve C katsayı vektörlerini, X_p ava (optimal çözüme) ait pozisyon vektörünü ve X gri kurda (aday çözüme) ait pozisyon vektörünü temsil etmektedir [58]. A ve C vektörleri ise Eş. 4.19 ve Eş. 4.20’de verildiği gibi ifade edilmektedir:

$$A = 2a \cdot r_1 - a \quad (4.19)$$

$$C = 2 \cdot r_2 \quad (4.20)$$

Buradaki denklemlerde, r_1 ve r_2 rastgele vektörlerdir. Bu rastgele vektörler sayesinde, aday çözümler optimal çözüm etrafında kendi pozisyonlarını Eş. 4.17 ve Eş. 4.18’i kullanarak güncelleyebilmektedirler.

GWO’da, en iyi üç aday çözüm (alfa (α), beta (β) ve sigma (δ)) dikkate alınmakta ve diğer aday çözümlerin pozisyon güncellemeleri bunlara göre yapılmaktadır. Eş.4.17 ve Eş. 4.18 dikkate alındığında, aday çözümlerin pozisyon güncellemelerinde Eş. 4.21, Eş. 4.22 ve Eş. 4.23’teki denklemler elde edilir:

$$D_\alpha = |C_1 \cdot X_\alpha - X|; \quad D_\beta = |C_2 \cdot X_\beta - X|; \quad D_\delta = |C_3 \cdot X_\delta - X|; \quad (4.21)$$

$$X_1 = X_\alpha - A_1 \cdot D_\alpha; \quad X_2 = X_\beta - A_2 \cdot D_\beta; \quad X_3 = X_\delta - A_3 \cdot D_\delta; \quad (4.22)$$

$$X(t+1) = \frac{X_1 X_2 X_3}{3} \quad (4.23)$$

Yukarıda belirtilen işlemler, maksimum iterasyona ulaşınca kadar her bir iterasyon aşamasında gerçekleştirilmekte ve sonuç olarak sistem gerekli optimal çözümlere ulaşılmaktadır.

4.2.5. Denge optimizasyonu (EO)

Denge optimizasyonu, hem dinamik hem de denge durumlarını tahmin etmek için kullanılan kontrol hacim kütle dengesi modellerinden esinlenilerek, Faramarzi ve diğerleri tarafından 2020 yılında geliştirilmiş fizik tabanlı bir optimizasyon algoritmasıdır [59]. EO'da, konsantrasyonu (konumu) ile her parçacık (çözelti) bir aday çözüm olarak görev yapmaktadır. Aday çözümler, optimizasyon sonunda denge durumuna (optimal sonuç) ulaşmak için, şimdiye kadar olan en iyi çözümlere, yani denge adaylarına göre konsantrasyonlarını rastgele güncellemektedirler.

EO'da öncelikle aday çözümler rastgele olarak oluşturulur. Bu aday çözümler, ilgili sistem için tek tek denir ve her bir iterasyon sonucunda bunlardan en iyi dört tanesi belirlenir. Bu dört adet belirlenen aday çözüm ve beşinci olarak bunların aritmetik ortalaması alınarak, Eş. 4.24'teki gibi bir denge havuzu oluşturulur [59].

$$C_{eq,havuz} = C_{eq_1} + C_{eq_2} + C_{eq_3} + C_{eq_4} + C_{eq_ortalama} \quad (4.24)$$

Her iterasyondaki her parçacık, aynı olasılıkla seçilen adaylar arasından rastgele seçim yaparak konsantrasyonunu güncellemektedir. Örneğin, ilk iterasyonda, ilk parçacık, C_{eq_1} 'e dayalı olarak tüm konsantrasyonlarını güncellemekte; daha sonra, ikinci iterasyonda, konsantrasyonlarını $C_{eq_ortalama}$ 'ya göre güncelleyebilmektedir. Optimizasyon sürecinin sonuna kadar, her parçacık, tüm aday çözümlerin her parçacık için yaklaşık olarak aynı sayıda güncellenmektedir [59]. Süreç sonunda ise sistem gerekli optimum parametreler elde edilmektedir.

4.2.6. Hibrit Taguchi girdap arama algoritması (HTVS)

Bu tez çalışmasında, çok bölgeli ve çok kaynaklı yük frekans kontrol sistem performanslarının iyileştirilmesi için, VSA sezgisel tekniği [57], Taguchi ortogonal dizi yaklaşımı (Taguchi Orthogonal Array Approximation-TOAA) [60] aracılığıyla güçlendirilerek geliştirilen hibrit Taguchi girdap arama algoritması (hybrid Taguchi vortex search algorithm-HTVS) [8] ilk defa LFC'ye uygulanmıştır. HTVS'nin performansı literatürde yer alan farklı optimizasyon test fonksiyonları ve gerçek mühendislik uygulama problemlerine uygulanarak test edilmiştir. Ayrıca bu algoritmanın istatistiksel olarak

analizi de Wilcoxon Signed Rank Test (WSRT) yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

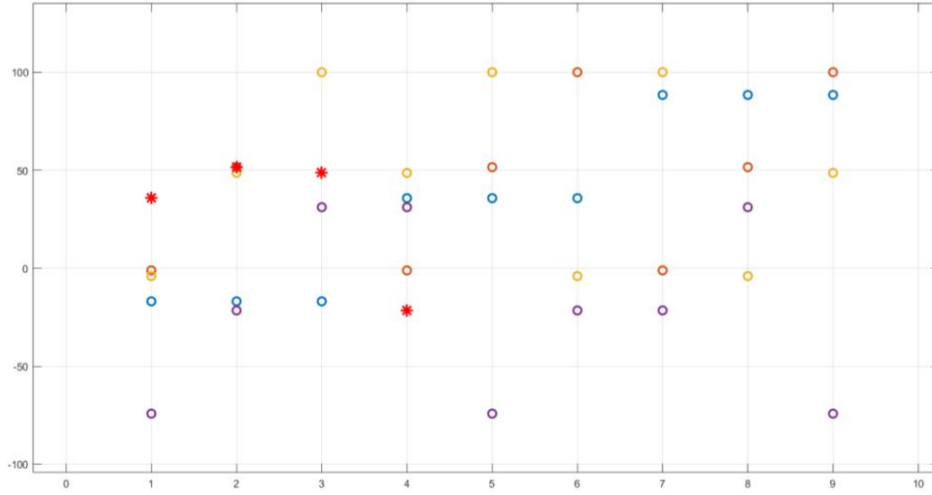
HTVS iki aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak rastgele üretilen aday çözümler, Taguchi ortogonal dizi yaklaşımı aracılığıyla arama uzayına dağıtılır. Bu dağıtım esnasında ortogonal diziler (OA) kullanılır. Bir ortogonal dizi OA(a, b, c, d) olarak gösterilir. Burada; a olasılık durumlarını, b optimize edilecek toplam parametre sayısını, c seviyeyi ve d ise OA'nın şiddetini temsil etmektedir. Çizelge 4.1'de örnek bir ortogonal dizi verilmiştir:

Çizelge 4.1. Örnek bir ortogonal dizi - OA(9, 4, 3, 2)

Olasılık Durumları	P1	P2	P3	P4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Bu çizelgeden görüldüğü üzere her bir parametre üç farklı seviyeye (1, 2, 3) sahiptir. Merkez seviye değeri, problem kısıtlarının üst ve alt limitlerinin orta noktası olarak alınmaktadır. Diğer parametre seviye değerleri ise merkez seviye değerlerine seviye farkının (level differences-LD) eklenmesi ve ya çıkarılması ile bulunmaktadır.

Aşağıdaki şekilde, aday çözümlerin OA'daki dağılımları gösterilmiştir ve burada kırmızı noktalar OA'da eğitime tabii tutulan aday çözümü temsil etmektedir.



Şekil 4.9. Aday çözümlerin OA'ya göre arama uzayında dağılımı [8]

LD, Eş. 4.25 ile ifade edilmektedir [60]:

$$LD_{i=1} = \frac{\text{üst limit-alt limit}}{\text{seviye}+1} \quad (4.25)$$

Parametre seviye değerleri tanımlandıktan sonra, aday çözümler bu seviye değerlerine göre dağıtılmaktadır. Daha sonra her bir aday çözüm için tüm olasılık durumları denenmekte ve eğitilmektedir. Her parametre için en uygun seviye değerleri ve sonraki iterasyonlar için merkez seviye değerleri bulunmaktadır. Her iterasyonda LD değeri, indirgenmiş oran katsayısı (RR) ile azaltılır ve bu denklem Eş. 4.26'daki gibi verilir [32]:

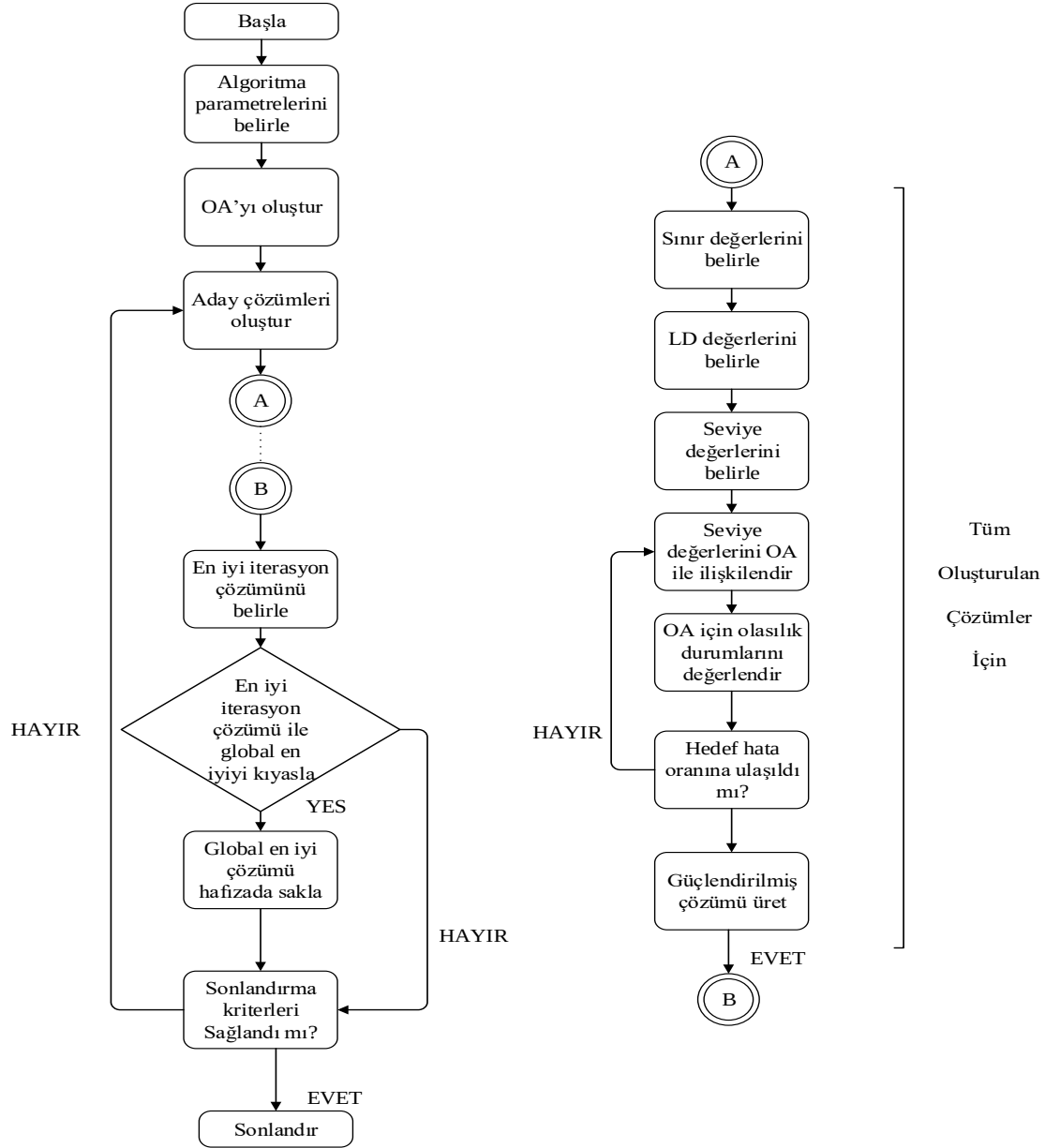
$$LD_{i+1} = LD_i \times RR \quad (4.26)$$

Bu eğitim ve iyileştirme süreci, kullanıcı tarafından tanımlanan bir hedef hata oranına gelinceye kadar devam ettirilmekte ve Eş. 4.27'deki gibi ifade edilmektedir:

$$\frac{LD_i}{LD_{i=1}} \quad (4.27)$$

Bu aşamanın sonucunda VSA'da kullanılmak üzere güçlendirilmiş aday çözümler belirlenmektedir. Daha sonra ise, güçlendirilmiş bu aday çözümler, VSA'da kullanılarak sistem için optimum parametreler seçilmektedir.

HTVS'ye ait akış diyagramı Şekil 4.10'da verilmiştir:



Şekil 4.10. HTVS için akış diyagramı

4.3. Bölüm 4 İçin Genel Değerlendirme

Tez çalışmasının bu bölümünde;

i) Kontrolör yapıları başlığı altında;

- PID kontrolör,
- FOPID kontrolör,

- 2DOF-FOPID kontrolör,
- Kaskat PD-PI kontrolör,
- 2DOF-(RA+FOPD)-(FOPID) kontrolör,
- NN-FOPID kontrolör

yapıları hakkında bilgiler, matematiksel ifadeler ve gerekli incelemeler detaylı olarak gösterilmiştir. Ayrıca, bu tez çalışması kapsamında 2DOF-(RA+FOPD)-(FOPID) kontrolör ve NN-FOPID kontrolör geliştirilmiş ve yük frekans kontrol sistemlerindeki başarıları gösterilmiştir.

ii) Sezgisel optimizasyon yöntemleri başlığı altında,

- Sinüs kosinüs algoritması (SCA),
- Balçık küfü algoritması (SMA),
- Girdap arama algoritması (VSA),
- Gri kurt optimizasyonu (GWO),
- Denge optimizasyonu (EO),

sezgisel optimizasyon teknikleri hakkında bilgiler ve matematiksel ifadeleri verilmiştir.

Ayrıca tez çalışması kapsamında Hibrit Taguchi girdap arama algoritması (HTVS) detaylı olarak gösterilmiş ve ilk defa yük frekans kontrolüne uygulanmış olup, literatüre katkılar sağlanmıştır.

5. YÜK FREKANS KONTROL SİSTEMLERİ, ANALİZLERİ VE BULGULAR

Bu bölümde, tez çalışmasında gerçekleştirilen yük frekans kontrol sistem modelleri, analizleri ve literatür ile karşılaştırmalı sonuçları verilmiştir. Bu kapsamda;

- Yük Frekans Kontrol Sistemi-1 için, SCA algoritması ve FOPID kontrolör ile ara ısıtıcılı tek bölgeli bir güç sisteminin analizleri gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları literatür ile karşılaştırılmıştır.
- Yük Frekans Kontrol Sistemi-2 için; SCA algoritması ve FOPID kontrolör kullanılarak haberleşme zaman gecikmesinin dahil edildiği tek bölgeli bir güç sisteminin analizleri gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları literatür ile karşılaştırılmıştır.
- Yük Frekans Kontrol Sistemi-3 için; SMA algoritması ve 2DOF-FOPID kontrolör kullanılarak ara ısıtıcılı enterkonnekte bir güç sisteminin analizleri gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları literatür ile karşılaştırılmıştır.
- Yük Frekans Kontrol Sistemi-4 için; SMA algoritması ve 2DOF-FOPID kontrolör kullanılarak haberleşme zaman gecikmelerine sahip enterkonnekte bir güç sisteminin analizleri gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları literatür ile karşılaştırılmıştır.
- Yük Frekans Kontrol Sistemi-5 için; tez çalışması ile geliştirilen NN-FOPID kontrolörün haberleşme zaman gecikmesine sahip sistemlerde, bu gecikmelerin olumsuz etkisini azalttığı gösterilmiştir. Bu sistem için haberleşme zaman gecikmeleri gerçek varsayımlar eşliğinde fiber optik kablolar için hesaplanmıştır. Ayrıca, NN-FOPID kontrolörün başarısı, zaman gecikmelerindeki farklı varyasyonlar için de kanıtlanmıştır.
- Yük Frekans Kontrol Sistemi-6 için; yakıt hücresi tabanlı, mikro türbin, dizel jeneratör ve enerji depolama sistemlerini içeren bir mikrogrid sistemi tasarlanmıştır. Kaskat PD-PI kullanılarak, GWO ve VSA tekniklerinin bu sistem için performansları karşılaştırılmıştır.
- Yük Frekans Kontrol Sistemi-7 için; EO algoritması ve FOPID kontrolör kullanılarak, haberleşme zaman gecikmesinin dahil edildiği yakıt hücresi tabanlı ve enerji depolama sistemlerini içeren bir mikrogrid sisteminin analizleri gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları literatür ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca

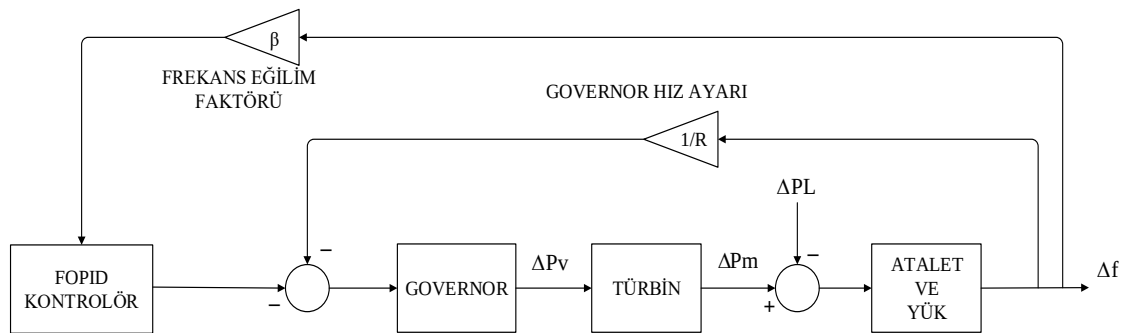
haberleşme zaman gecikmelerinin ve sistem zaman sabitlerinin farklı varyasyonları için önerilen kontrolör ve sezgisel yöntemin performansları incelenmiştir.

- Yük Frekans Kontrol Sistemi-8 için; ilk defa LFC konusuna uygulanan HTVS tekniği ve bu tez ile birlikte geliştirilen 2DOF-(RA+FOPD)-(FOPID) kontrolör farklı LFC sistemlerine uygulanmıştır. İlk olarak HTVS ve 2DOF-(RA+FOPD)-(FOPID) kontrolörün performansları, iki farklı LFC sistemi için gösterilmiştir. Daha sonra HTVS ve 2DOF-(RA+FOPD)-(FOPID) kontrolör, hem yenilenebilir enerji kaynaklarını içeren hem de yenilenebilir enerji kaynakları ve batarya enerji depolama sistemlerini içeren enterkonnekte bir güç sisteminin analizleri için kullanılmıştır.

5.1. Yük Frekans Kontrol Sistemi-1

Bu bölümde, bir bölgesel ara ısıtmalı yük frekans kontrol sisteminin analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu sistem için FOPID kontrolör önerilmiş ve önerilen kontrolörün parametreleri SCA sezgisel tekniği ile belirlenmiştir. Sistem performansları oturma zamanı (%0.002 bant aralığı), maksimum ve minimum aşım değerleri için literatürde yer alan fil sürüsü optimizasyonu (Elephant Herding Optimization-EHO) [61], IMC [62] ve laurent serisi (Laurent Series-LS) [63] yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Sistem için bozucu yük $\Delta PL=0.01$ p.u. olarak $t=1$ saniye anında uygulanmıştır. (Sistem parametrelerine alan [61], [62] ve [63] numaralı referanslardan ulaşılabilir.)

Analizi gerçekleştirilen sistemin modeli Şekil 5.1’de verilmektedir:



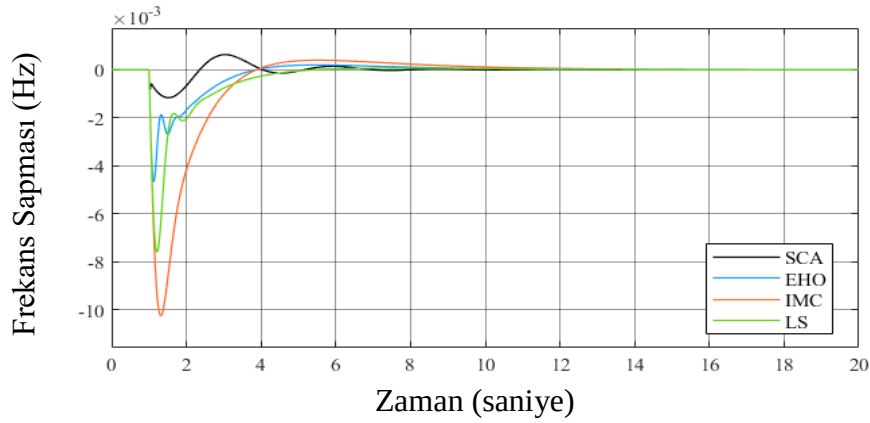
Şekil 5.1. Ara ısıtmalı sistem modeli

SCA yöntemi ve ITAE fonksiyonu kullanılarak elde edilen FOPID kontrolör parametreleri Çizelge 5.1’de verilmiştir:

Çizelge 5.1. Model 1 için FOPID kontrolör parametreleri

	Yöntem	K_P	K_I	K_D	λ	μ
	SCA	24.9975	20.6898	6.6189	1.0714	1.5313
[61]	EHO	7.8321	3.5559	3.2172	-	-
[62]	IMC	2.7900	1.2700	0.7870	-	-
[63]	LS	6.1600	1.9300	1.1600	-	-

Zaman bölgesinde elde edilen frekans sapmalarına ait grafik, karşılaştırmalı olarak Şekil 5.2’de görülmektedir:



Şekil 5.2. Ara ısıtılmalı türbine sahip sistem için frekans sapmaları grafiği

Bulunan oturma zamanı, maksimum aşım ve minimum aşım ait sayısal sonuçlar, Çizelge 5.2’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 5.2. Model 1 için karşılaştırmalı performans sonuçları

	Yöntem	Oturma zamanı	Maksimum aşım	Minimum aşım
	SCA	9.268	0.0006269	-0.001170
[61]	EHO	11.687	0.0001947	-0.004661

Çizelge 5.2. (devam) Model 1 için karşılaştırmalı performans sonuçları

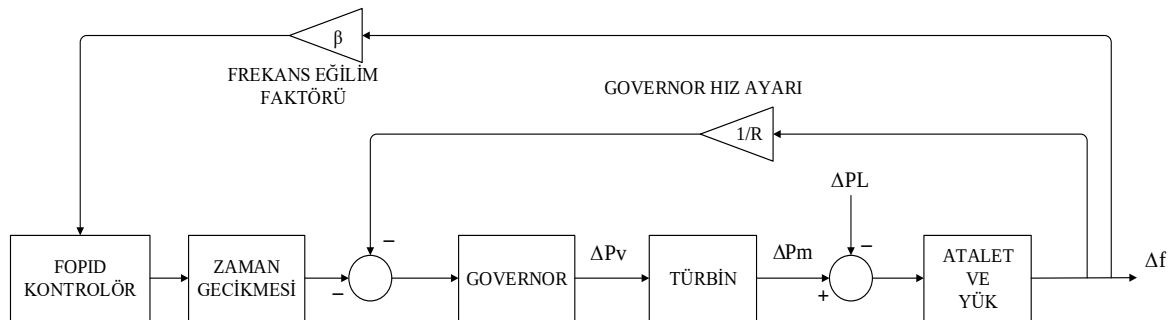
[62]	IMC	14.193	0.0003948	-0.010260
[63]	LS	12.790	0.0000603	-0.007601

Simulasyon sonuçları incelendiğinde, önerilen FOPID kontrolör ve SCA ile en kısa oturma zamanı ile daha düşük minimum aşım değeri elde edilmiş ve sistem performansları iyileştirilmiştir.

5.2. Yük Frekans Kontrol Sistemi-2

İkinci kontrol sisteminde, haberleşme zaman gecikmesine sahip bir bölgesi yük frekans kontrol sistemi analizleri gerçekleştirilmiştir. Sistem performanslarının iyileştirilmesi için FOPID kontrolör önerilmiş ve kontrolöre ait parametreler SCA ile belirlenmiştir. Sisteme $t=0$ saniye anında $\Delta PL=0.1$ p.u.'luk bozucu yük uygulanmış ve bulunan sonuçlar SBL [18] ve analitik grafik (AG) [64] yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. (Sistem parametrelerine [18] ve [64] numaralı referanslardan ulaşılabilir)

Şekil 5.3'te, sisteme ait blok diyagram şeklinde model verilmiştir:



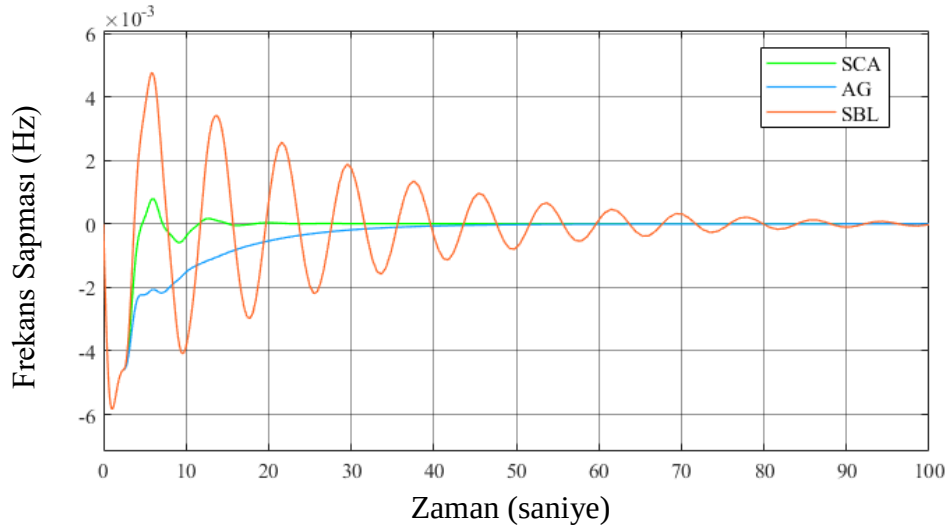
Şekil 5.3. Bir bölgesi zaman gecikmeli sistem modeli

Önerilen kontrolör ve yöntem ile bulunan optimum kontrolör parametreleri Çizelge 5.3'te verilmiştir:

Çizelge 5.3. Model 2 için FOPID kontrolör parametreleri

	Yöntem	K_P	K_I	K_D	λ	μ
	SCA	0,4169	0,2822	0,0041	1,0127	0,0102
[18]	SBL	0,5500	0,5500	---	---	---
[64]	AG	0,2900	0,1090	---	---	---

Sistem için bulunan frekans sapmaları karşılaştırmalı olarak Şekil 5.4'te gösterilmiştir:



Şekil 5.4. Zaman gecikmeli yük frekans kontrol sistemi için frekans sapmaları

Elde edilen sistem performanslarına ait sayısal sonuçlar, oturma zamanı (%0.002 bant aralığı için), maksimum aşım ve minimum aşım değerleri açısından karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4. Model 2 için karşılaştırmalı performans sonuçları

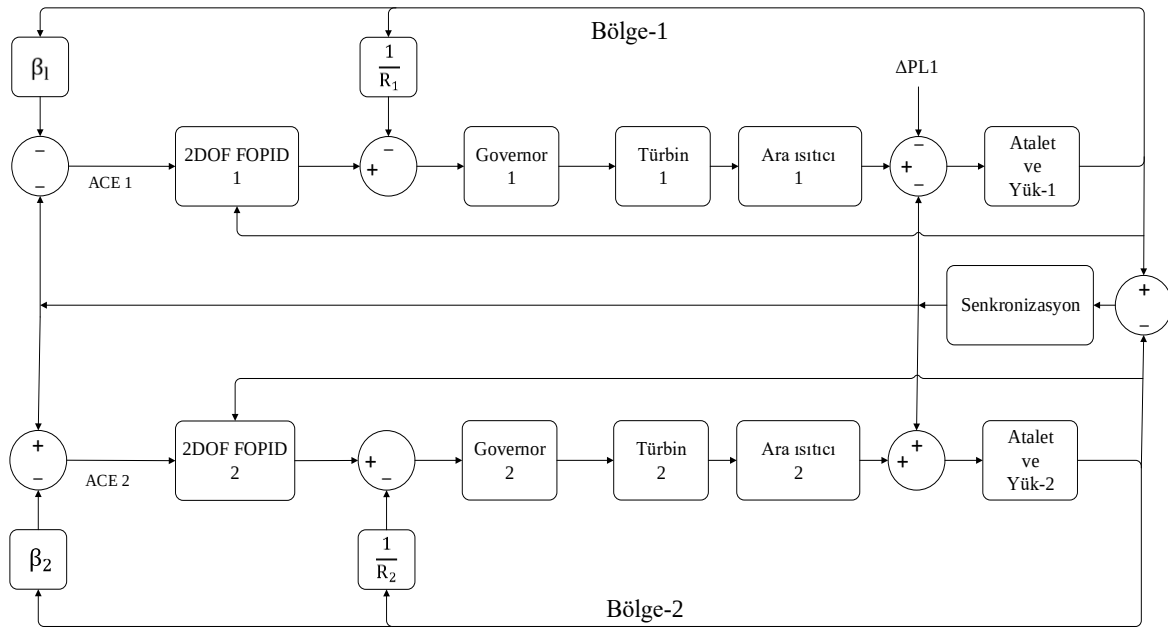
	Yöntem	Oturma zamanı	Maksimum aşım	Minimum aşım
	SCA	21,752	0,0007968	-0,005836
[18]	SBL	111,813	0,0047630	-0,005836
[64]	AG	51,299	0,0000000	-0,005836

Elde edilen çıktılar bir bütün olarak incelendiğinde, önerilen kontrolör ve yöntem ile SBL'den yaklaşık %80,54, AG'den ise yaklaşık %57,59 daha düşük oturma zamanı değerine ulaşıldığı açıkça görülmektedir. Ayrıca, önerilen yaklaşım ile SBL ve AG ile aynı minimum aşım değeri elde edilmişken, SBL'den yaklaşık %83,27 daha düşük maksimum aşım değeri bulunmuştur.

5.3. Yük Frekans Kontrol Modeli-3

Bu modelde, iki bölgeyi ara ısıtmalı türbine sahip yük frekans kontrol sistemi analizleri gerçekleştirilmiştir. Sisteme ait performansların iyileştirilmesi için, her iki bölgede farklı 2DOF FOPID kontrolör yapısı uygulanmıştır. Önerilen kontrolöre ait parametrelerin belirlenmesi için SMA tekniği uygulanmıştır. 2DOF FOPID kontrolörün sistem performanslarına etkisi, oturma zamanı (%0.005 bant aralığı), maksimum aşım ve minimum aşım değerleri dikkate alınarak ve sisteme sadece birinci bölgeden $\Delta PL1=0.01$ p.u.'luk bozucu yük uygulanarak [9] ve [65] numaralı referanslar ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. (Sisteme ait parametrelere [9] ve [65] numaralı referanslardan ulaşılabilir.)

Analizleri gerçekleştirilen sistem modeli Şekil 5.5'te verilmiştir:



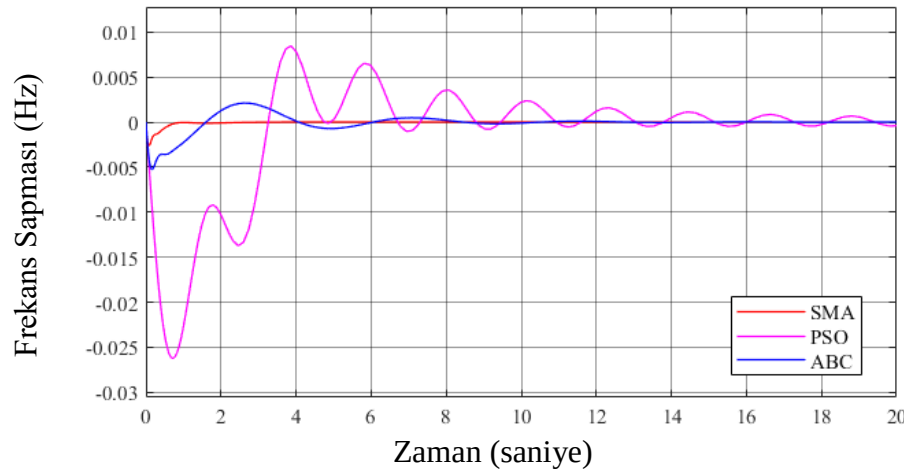
Şekil 5.5. İki bölgeyi ara ısıtmalı yük frekans kontrol sistemi

2DOF FOPID kontrolöre ait SMA ile bulunan parametreler aşağıdaki Çizelge 5.5'te verilmiştir:

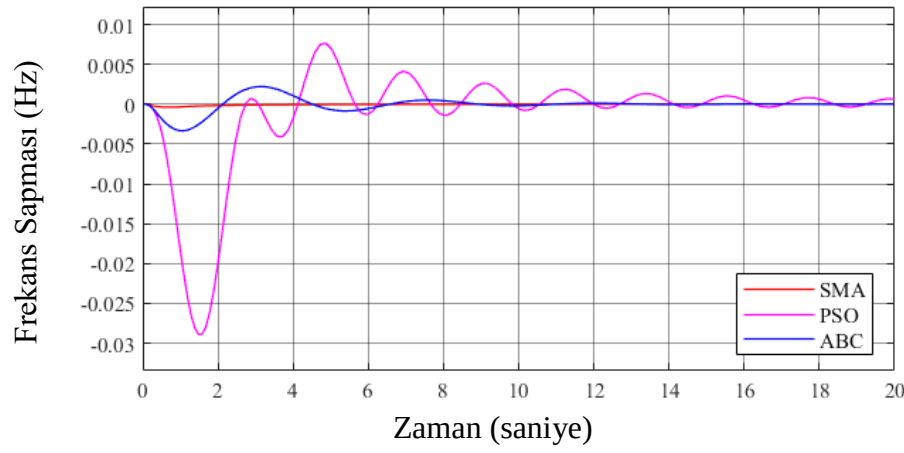
Çizelge 5.5. Model 3 için kontrolör parametreleri

Kontrolör-1								
		K_{P_1}	K_{I_1}	K_{D_1}	λ_1	μ_1	P_{W_1}	D_{W_1}
	SMA	5,000	5,000	1,8536	0,9387	1,2615	5,000	0,4076
[65]	PSO	-0,0360	0,4900	---	---	---	---	---
[9]	ABC	1,9660	9,5902	3,9320	---	---	---	---
Kontrolör-2								
		K_{P_2}	K_{I_2}	K_{D_2}	λ_2	μ_2	P_{W_2}	D_{W_2}
	SMA	4,5542	4,2583	1,4700	1,1420	0,9734	1,6920	0,1547
[65]	PSO	-0,0360	0,4900	---	---	---	---	---
[9]	ABC	0,7100	0,6827	0,7420	---	---	---	---

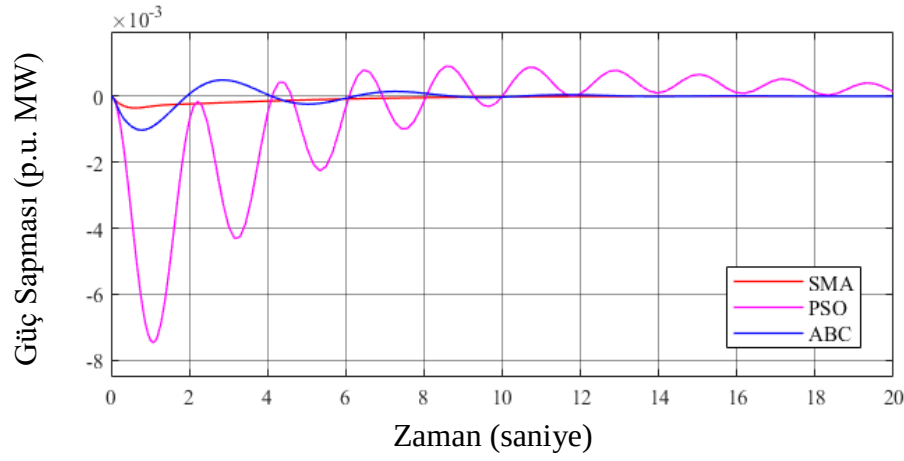
Bölge-1'de ve Bölge-2'deki frekans sapmalarına ait grafikler ile ara bağlantı hattı güç sapmasına ait değişim, sırasıyla Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de gösterilmiştir:



Şekil 5.6. Model 3 için Bölge-1 frekans sapmaları grafiği



Şekil 5.7. Model 3 için Bölge-2 frekans sapmaları grafiği



Şekil 5.8. Model 3 için Ara bağlantı hattı güç sapmaları grafiği

Elde edilen sayısal sistem performansları Çizelge 5.6’da verilmiştir:

Çizelge 5.6. Model 3 için karşılaştırmalı performans sonuçları

Bölge-1				
	Yöntem	Oturma Zamanı	Maksimum aşım	Minimum aşım
	SMA	2,435	1,411e-5	-2,625e-3
[65]	PSO	---	8,443e-3	-2,623e-2
[9]	ABC	12,368	2,109e-3	-5,256e-3

Çizelge 5.6. (devam) Model 3 için karşılaştırmalı performans sonuçları

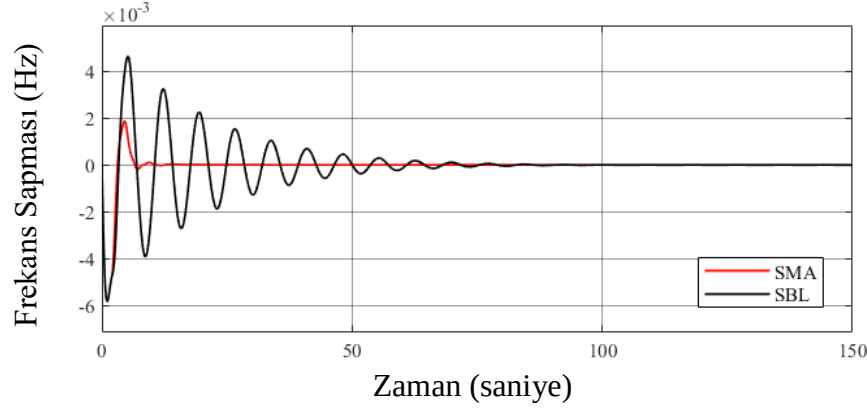
Bölge-2				
	Yöntem	Oturma Zamanı	Maksimum aşım	Minimum aşım
	SMA	4,759	8,524e-7	-3,806e-4
[9]	ABC	12,928	2,216e-3	3,343e-3
[65]	PSO	---	7,661e-3	-2,889e-2
Ara Bağlantı Hattı				
	Yöntem	Oturma Zamanı	Maksimum aşım	Minimum aşım
	SMA	7,346	2,873e-6	-3,536e-4
[9]	ABC	8,332	4,963e-4	-1,023e-3
[65]	PSO	---	9,095e-4	-7,460e-3

Analiz sonucunda bulunan değerler incelendiğinde PSO ile bulunan çıkış sinyalinin, %0,005 bant aralığına oturmadığı görülmektedir. Oturma zamanı değerleri ABC ile kıyaslandığında ise Bölge-1 için yaklaşık %80,31, Bölge-2 için yaklaşık %63,20 daha düşük değerlerde bulunmuştur. Ayrıca, maksimum aşım değeri Bölge-1 için PSO'dan yaklaşık %99,83 ve ABC'den yaklaşık için %99,33 daha düşük değerlerde elde edilmiştir. Buradaki sonuçlardan önerilen yaklaşımların sistem performanslarını önemli derecede artırdığı gözlemlenmiştir.

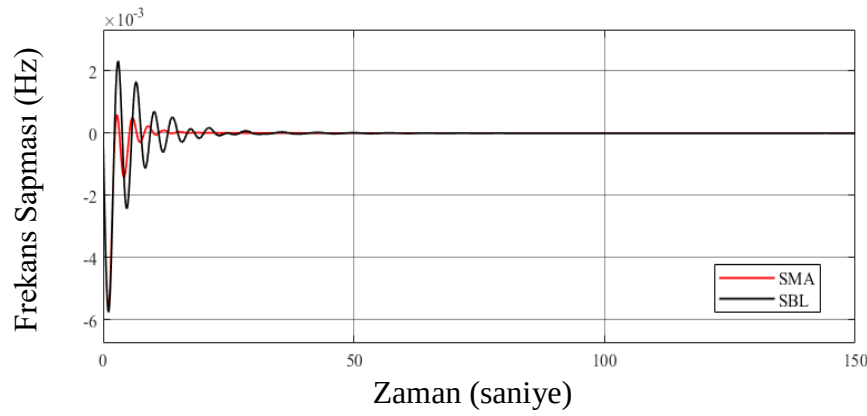
5.4. Yük Frekans Kontrol Modeli-4

Bu bölümde, haberleşme zaman gecikmesine sahip iki bölgeli yük frekans kontrol sisteminin analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu sistemde her iki bölgedeki zaman gecikmesi değerleri birbirinden farklı olarak Bölge-1 için $\tau_1=1.932$ saniye ve Bölge-2 için $\tau_2=0.518$ saniye alınmıştır [66]. Ayrıca, her iki bölgeden $\Delta PL1=\Delta PL2$ olmak üzere 0.1 p.u.'luk bozucu yük uygulanmıştır. Sistem performanslarını iyileştirilmesi için 2DOF FOPID kontrolör kullanılmış ve kontrolör parametreleri SMA ile bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, oturma zamanı (%0.005 bant aralığı), maksimum ve minimum aşım değerleri

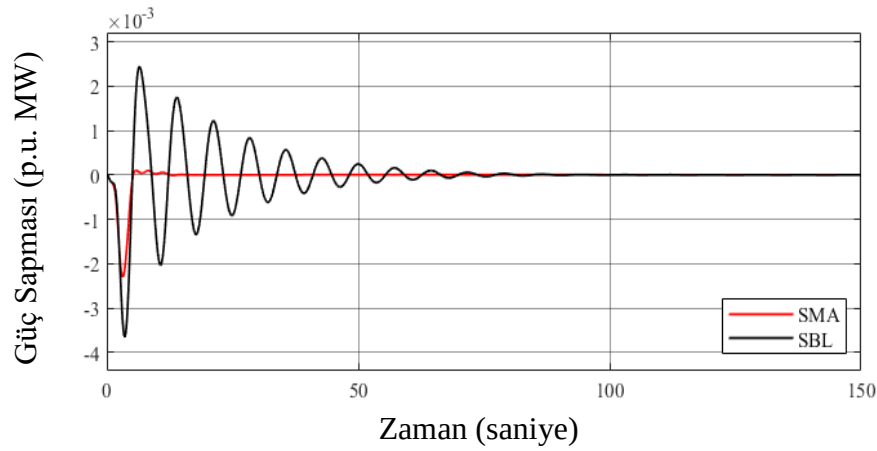
Bölgelere ait frekans ve ara bağlantı hattı güç sapmalarına ait karşılaştırmalı grafikler, sırasıyla Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de verilmiştir:



Şekil 5.10. Model 4 için Bölge-1 frekans sapmaları grafiği



Şekil 5.11. Model 4 için Bölge-2 frekans sapmaları grafiği



Şekil 5.12. Model 4 için Ara bağlantı hattı güç sapmaları grafiği

Sistem için elde edilen sayısal analiz verileri Çizelge 5.8’de verilmiştir:

Çizelge 5.8. Model 4 için sistem performansları

Bölge-1				
	Yöntem	Oturma zamanı	Maksimum aşım	Minimum aşım
	SMA	10,071	1,875e-3	-5,831e-3
[66]	SBL	77,759	4,641e-3	-5,831e-3
Bölge-2				
	Yöntem	Oturma zamanı	Maksimum aşım	Minimum aşım
	SMA	12,821	5,922e-4	-5,604e-3
[66]	SBL	29,078	2,318e-3	-5,746e-3
Ara Bağlantı Hattı				
	Yöntem	Oturma zamanı	Maksimum aşım	Minimum aşım
	SMA	11,476	1,051e-4	-2,296e-3
[66]	SBL	72,324	2,446e-3	-3,651e-3

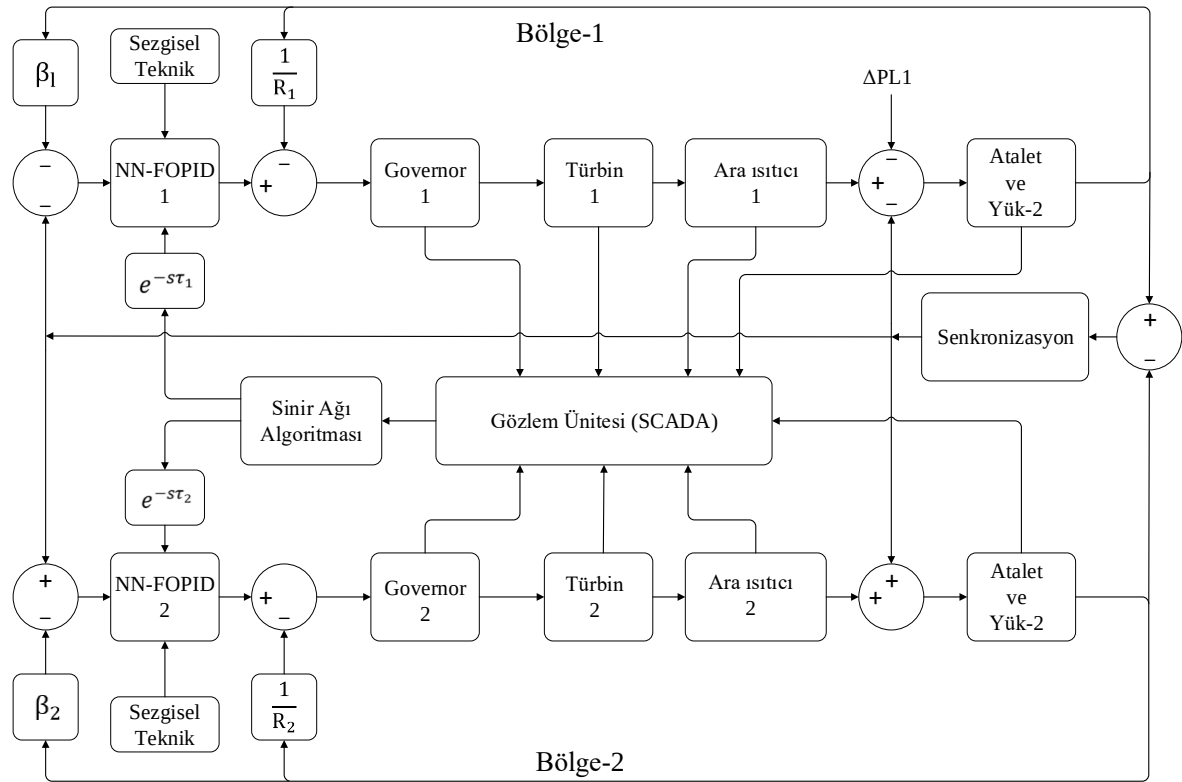
Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, oturma zamanı; Bölge-1 için yaklaşık %87,05, Bölge-2 için yaklaşık %55,91 ve ara bağlantı hattı için yaklaşık %84,13 iyileştirilmiştir. Ayrıca, maksimum aşım değeri; Bölge-1 için yaklaşık %59,60, Bölge-2 için yaklaşık %74,45 ve ara bağlantı hattı için ise yaklaşık %95,7 iyileştirilmiştir. Bölge-2 ve ara bağlantı hattı için daha düşük minimum aşım değerleri elde edilmiştir.

5.5. Yük Frekans Kontrol Modeli-5

Bu modelde, 2 bölge haberleşme zaman gecikmesine sahip ara ısıtılmalı bir yük frekans kontrol sistemi incelenmiştir. Analizleri gerçekleştirilen bu sistem için haberleşme zaman gecikmesi değerleri her bölge için ayrı olarak, fiber-optik haberleşme altyapısı dikkate alınarak gerçeğe yakın değerleri ile hesaplanmış ve yük frekans kontrol modeline dahil edilmiştir. Daha sonra bu model üzerinde, geliştirilen NN-FOPID kontrolör uygulanmıştır.

Analizlerde öncelikle, önerilen kontrolörün performansı Bölüm 5.5.2’de zaman gecikmesi olmayan sistemlerde analiz edilmiştir. Sistemde zaman gecikmesi olmadığından dolayı, kontrolörün üstel terimleri bu aşamada 1 olarak alınmıştır. Daha sonra Bölüm 5.5.3’te, haberleşme zaman gecikmelerinin, kontrolörün performansını yetersiz bıraktığı ve yük frekans kontrol sisteminin çıkışlarında bozulmalara neden olduğu gösterilmiştir. Son olarak Bölüm 5.5.4’te, NN-FOPID kontrolörün, zaman gecikmeli sistemlerdeki performansı ve sistemdeki zaman gecikmelerinin olumsuz etkisini minimize ettiği gösterilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde her iki bölgedeki kontrolör parametreleri birbirlerinin aynısı olarak alınmıştır.

Analizleri gerçekleştirilen yük frekans kontrol sistemi Şekil 5.13’te gösterilmiştir.

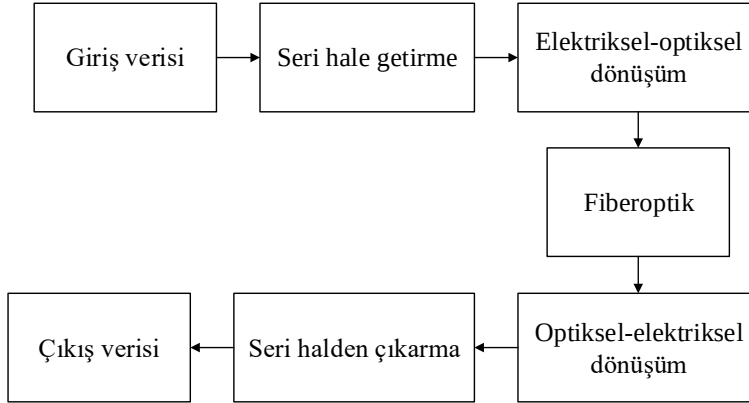


Şekil 5.13. İki bölgeye sahip zaman gecikmesine sahip ara ısıtıcılı yük frekans kontrol sistemi

Bu sisteme ait parametrelere [9] numaralı referanstan ulaşılabilirken, zaman gecikmesi değerlerinin hesaplanması ise Bölüm 5.5.1’de açıklanmıştır.

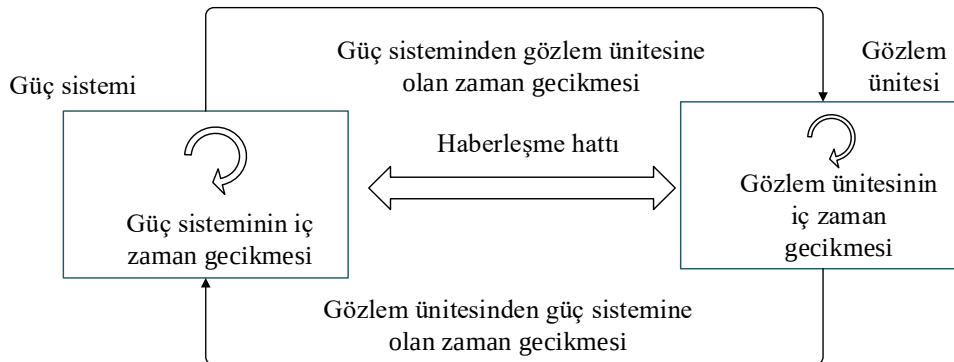
5.5.1 Haberleşme zaman gecikmelerinin hesaplanması

Günümüzde SCADA sistemlerinde haberleşme, veri kapasitesi, iletim hızı gibi nedenlerden dolayı çoğunlukla fiber-optik kablolar üzerinden yapılmaktadır. Şekil 5.14'te zaman gecikmesine sebep olan fiber optik haberleşme bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 5.14. Fiber-optik haberleşme sistemi bileşenleri

Şekil 5.14'ten de görüldüğü gibi sistemdeki haberleşme gecikmesi her iki taraftaki toplam sayısal veri dönüşümü gecikmelerinden, elektriksel/optik veri dönüşümlerinden ve fiber-optik kablo üzerindeki gecikmelerden kaynaklanmaktadır. Bu kapsamda, bir enterkonnekte yük-frekans kontrolü modelinde, haberleşme sistemleri ile güç ve SCADA sistemlerinin dahili zaman gecikmeleri Şekil 5.15'teki gibi gösterilebilir.



Şekil 5.15. Enterkonnekte sistemde oluşabilen zaman gecikmeleri

Buna göre, fiberoptik haberleşme hattında meydana gelen zaman gecikmesi Eş.5.1'deki gibi hesaplanır. Burada L haberleşme hattı mesafesi, c ışık hızı ve n kırılma indisi olarak tanımlanır [67].

$$\tau_{cl} = \frac{L}{c} \times n \quad (5.1)$$

Ek olarak, bu süreye sayısal veri dönüşümlerinden kaynaklı ilave dahili gecikmelerin de eklenmesi gerekir (Eş. 5.2).

$$\tau_t = \tau_{cl} + \tau_{rep} \quad (5.2)$$

Çift yönlü haberleşmede, verilerin güç sistemi bileşenlerinden SCADA'ya gelmesi ve SCADA'dan da kontrolöre ulaşması için gereken sürenin de Eş. 5.3'teki gibi hesaplanması gerekir.

$$\tau = 2 \times \tau_t \quad (5.3)$$

Mevcut tez çalışmasında örnek olarak, Bölge-1 içinde haberleşme hattı mesafesinin 760 km ve Bölge-2 içinde haberleşme hattı mesafesinin ise 500 km olduğu kabul edilmiştir. Sistemde fiber optik kablo olarak single mode tipi 1310 nm dalga boyunda ve 1.4677 kırılma indisine sahip Brand-A (G652) kablo seçilmiştir. Bu durumda her iki bölgede fiberoptik kabloda oluşan τ_{cl1} ve τ_{cl2} zaman gecikmeleri sırasıyla 3.72 ms ve 2.45 ms olarak hesaplanmıştır. Her iki bölge için sayısal veri dönüşümü gecikmeleri $\tau_{rep} = 1$ ms olarak alındığında, Bölge-1'e ait toplam zaman gecikmesi $\tau_1 = 9.44$ ms ve Bölge-2'ye ait toplam zaman gecikmesi $\tau_2 = 6.90$ ms olarak elde edilmiştir.

5.5.2. NN-FOPID kontrolörün haberleşme zaman gecikmeleri dahil edilmeyen sistem için performans analizi

Bu bölümde, NN-FOPID kontrolörün zaman gecikmesi dâhil olmayan klasik sistemler için performansı incelenmiştir. Burada, kontrolöre ait kazanç parametreleri sinir ağı algoritması ile bulunmuştur. Sistem, zaman gecikmesi içermediğinden dolayı, sezgisel teknik ile belirlenmesi gereken üstel katsayılar 1 olarak alınmıştır ($\lambda=1$ ve $\mu=1$). Sistem performansları, oturma zamanı (%0.002 bant aralığı), maksimum aşım ve minimum aşım

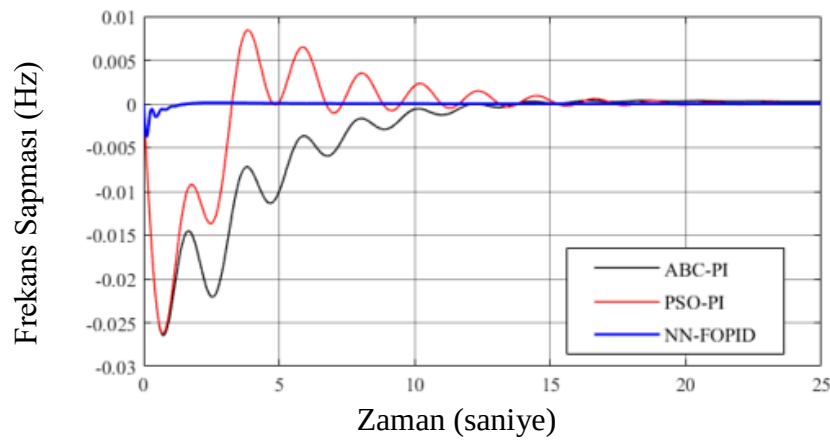
değerleri açısından literatürdeki [9] ve [65] numaralı referanslar ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Çizelge 5.9’da elde edilen kontrol parametreleri verilmiştir:

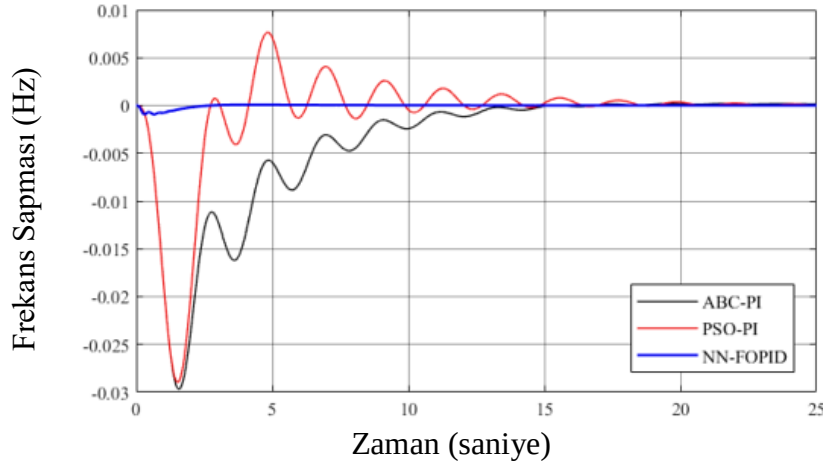
Çizelge 5.9. Zaman gecikmesi içermeyen sistem için kontrolör parametreleri

	Kontrolör	K_P	K_I	K_D	λ	μ
	NN-FOPID	17,1425	16,2811	6,0902	(1)	(1)
[9]	ABC-PI	0,00070	0,12680	---	---	---
[65]	PSO-PI	-0,0360	0,49000	---	---	---

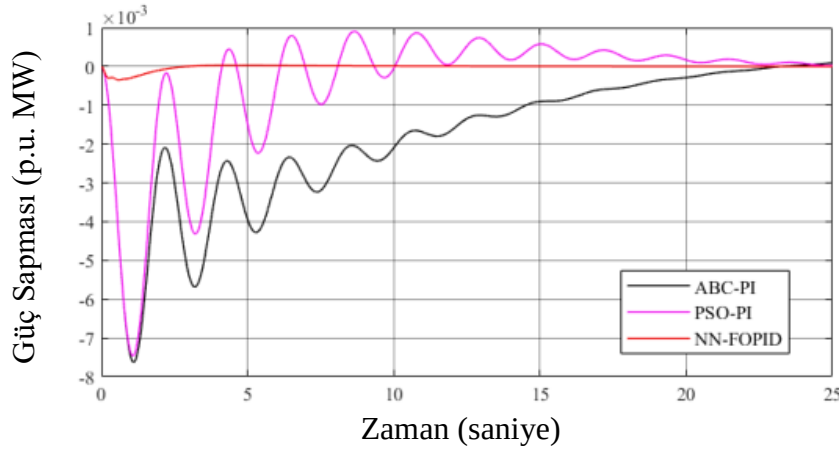
Bölgelerde meydana gelen frekans sapmaları ve ara bağlantı hattındaki güç saptmasına ait elde edilen grafikleri sırasıyla Şekil 5.16, Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’de verilmiştir:



Şekil 5.16. Zaman gecikmesi içermeyen sistem için Bölge-1 frekans sapmaları grafiği



Şekil 5.17. Zaman gecikmesi içermeyen sistem için Bölge-2 frekans saptmaları grafiği



Şekil 5.18. Zaman gecikmesi içermeyen sistem için Ara bağlantı hattı güç saptmaları grafiği

Elde edilen sayısal sonuçlar ise Çizelge 5.10’da görölmektedir:

Çizelge 5.10. Zaman gecikmesi içermeyen sistem için Karşılaştırmalı performans analizleri

Bölge-1				
	Kontrolör	Maksimum Aşım	Minimum Aşım	Oturma zamanı
	NN-FOPID	1,291e-4	-3,796e-3	10,167
[9]	ABC-PI	4,009e-4	-2,646e-2	42,165
[65]	PSO-PI	8,475e-3	-2,626e-2	32,023

Çizelge 5.10. (devam) Zaman gecikmesi içermeyen sistem için Karşılaştırmalı performans analizleri

Bölge-2				
	Kontrolör	Maksimum Aşım	Minimum Aşım	Oturma zamanı
	NN-FOPID	7,430e-5	-9,530e-4	11,075
[9]	ABC-PI	1,928e-4	-2,968e-2	50,870
[65]	PSO-PI	7,699e-3	-2,901e-2	33,041
Ara Bağlantı Hattı				
	Kontrolör	Maksimum Aşım	Minimum Aşım	Oturma zamanı
	NN-FOPID	2,967e-5	-3,501e-4	7,039
[9]	ABC-PI	2,558e-4	-7,624e-3	58,084
[65]	PSO-PI	9,076e-4	-7,471e-3	28,170

Elde edilen çıktılar incelendiğinde, hem bölgelerdeki frekans sapmaları için hem de ara bağlantı hattı güç sapması en düşük oturma zamanı, maksimum aşım ve minimum aşım değerleri elde edilmiştir. Böylece, analizleri gerçekleştirilen yük frekans kontrol sisteminin frekans salınıminin güvenlik marjini arttırılmıştır.

5.5.3. NN-FOPID kontrolörün haberleşme zaman gecikmeleri içeren sistem için performans analizi

Bu kısımda, haberleşme zaman gecikmelerinin, sistem performansları üzerine olan olumsuz etkileri ve geliştirilen NN-FOPID kontrolör ile bu gecikmelerin negatif etkisinin ortadan kaldırıldığı gösterilmiştir. Sistem, zaman gecikmesi içerdiğinden dolayı, NN-FOPID kontrolördeki I ve D operatörlerine ait üstel terimler EO sezgisel tekniği ile belirlenmiştir ($\lambda \neq 1$ ve $\mu \neq 1$). Haberleşme zaman gecikmelerinin, sistem performanslarına olan olumsuz etkileri, oturma zamanı (%0.002 bant aralığı), maksimum aşım ve minimum aşım değerleri açısından karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

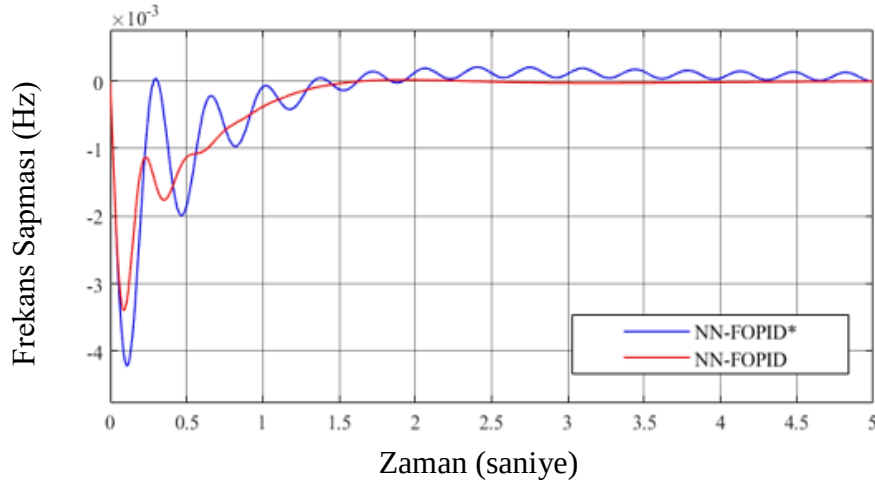
Çizelge 5.11’de elde edilen kontrolör parametreleri ile önceki bölümlerde gerçek yaklaşımlar ile hesaplanan haberleşme zaman gecikmesi değerleri verilmiştir:

Çizelge 5.11. Zaman gecikmesi içeren sistem için kontrolör parametreleri ve zaman gecikmeleri

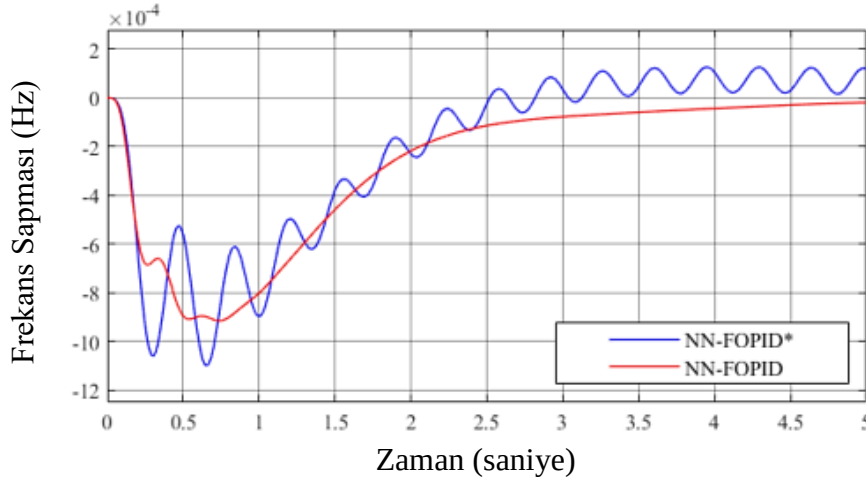
	K_P	K_I	K_D	λ	μ	$\tau_1(\text{ms})$	$\tau_2(\text{ms})$
NN-FOPID*	17,1425	16,2811	6,0902	(1)	(1)	9,44	6,90
NN-FOPID	17,1425	16,2811	6,0902	0,8227	1,1490	9,44	6,90

Burada NN-FOPID* ile sistemde zaman gecikmeleri olmadan belirlenen kontrol parametreleri verilmiştir. Daha sonra sisteme zaman gecikmeleri eklenerek zaman gecikmelerinin sistem performanslarına olan negatif etkisi incelenmiştir. Bir sonraki adımda ise, zaman gecikmeleri dahil olan sistem için NN-FOPID üstel terimleri sezgisel EO yöntemi ile belirlenerek, haberleşme zaman gecikmelerinin sistem performanslarına olan olumsuz etkisinin ortadan kaldırıldığı gözlemlenmiştir.

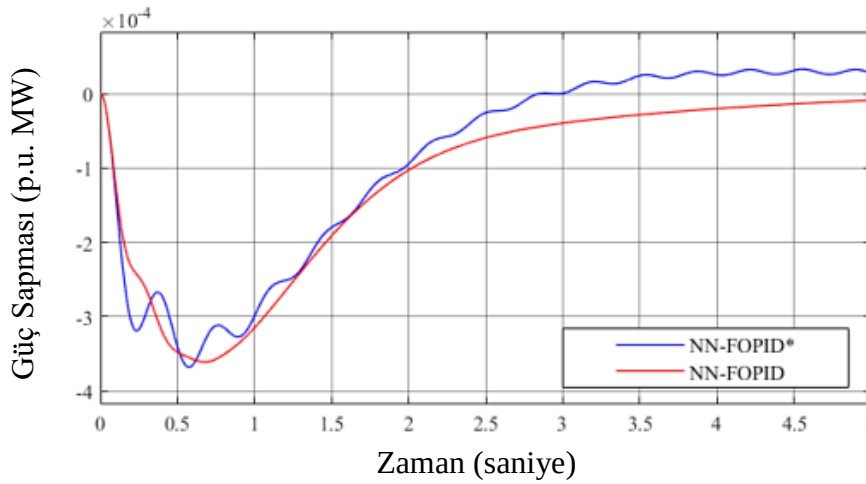
Şekil 5.19, Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’de, zaman gecikmesinin olumsuz etkileri ve geliştirilen NN-FOPID kontrolörün başarılı olduğu görülmüştür:



Şekil 5.19. Zaman gecikmeyi içeren sistem için Bölge-1 frekans sapmaları grafiği



Şekil 5.20. Zaman gecikmeyi içeren sistem için Bölge-2 frekans sapmaları grafiği



Şekil 5.21. Zaman gecikmeyi içeren sistem için Ara bağlantı hattı güç sapmaları grafiği

Sinir ağı tabanlı adaptif kontrolörün, sistem performanslarını güçlendirici yönde tepkiler verme yeteneğine sahip olduğu bir önceki bölümde net bir şekilde gösterilmişti. Ancak zamanla değişkenlik gösteren zaman gecikmeleri sisteme dahil edildiğinde, adaptif kontrolör ile elde edilen sistem performanslarındaki bozulmalar Şekil 5.19, Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’de verilen şekillerden açıkça görülmektedir. Adaptif kontrolörün zaman gecikmeli güç sistemlerindeki etkisini artırmak ve sistem çıkışlarında görülen osilasyonları azaltmak için, kontrolör sezgisel EO ile hibritlenmiştir. Simülasyonlardan elde edilen sonuçlardan, hibrit yapıya sahip NN-FOPID ile zaman gecikmelerinin bölgelerdeki frekans ve ara bağlantı hattı güç değişimlerinde oluşturduğu bozucu etkilerin elimine edildiği gözlemlenmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar ise Çizelge 5.12’de verilmiştir:

Çizelge 5.12. Zaman gecikmesi içeren sistem için karşılaştırmalı performans analizleri

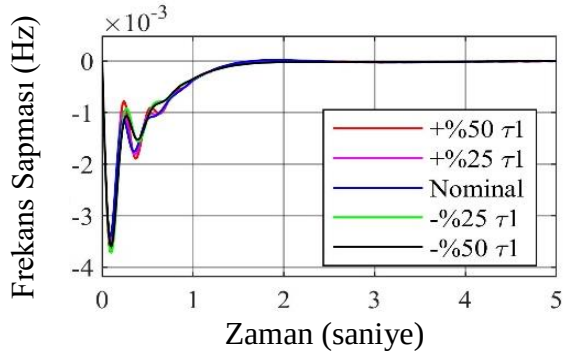
Bölge-1				
	Kontrolör	Maksimum Aşım	Minimum Aşım	Oturma zamanı
	NN-FOPID*	2,072e-4	-4,220e-3	---
	NN-FOPID	1,607e-5	-3,398e-3	3,803
Bölge-2				
	Kontrolör	Maksimum Aşım	Minimum Aşım	Oturma zamanı
	NN-FOPID*	1,273e-4	-1,098e-3	---
	NN-FOPID	3,522e-6	-9,145e-4	4,926
Ara Bağlantı Hattı				
	Kontrolör	Maksimum Aşım	Minimum Aşım	Oturma zamanı
	NN-FOPID*	3,299e-5	-3,680e-4	8,024
	NN-FOPID	1,590e-6	-3,609e-4	4,007

Çizelge 5.12’de gözlenen sonuçlar incelendiğinde, sistemde yer alan zaman gecikmelerinin etkilerinin ciddi oranda ortadan kaldırıldığı açıkça görülmektedir. Yaklaşık olarak maksimum aşım değerleri, Bölge 1 için %92,24, Bölge 2 için %97,23 ve ara bağlantı hattı için %95,18 oranında azaltılmıştır. Benzer şekilde yaklaşık olarak minimum aşım değerleri, Bölge 1 için %19,48, Bölge 2 için %16,71 ve ara bağlantı hattı için %1.93 oranında iyileştirilmiştir. İstenen bant aralığına oturmayan bölgelerdeki frekans değişimleri, NN-FOPID kontrolör ile Bölge 1 için 3.803 sn’de ve Bölge 2 için 4.926 sn’de bu bant aralığı içine oturmuştur. Ayrıca ara bağlantı hattı için çıkış sinyali daha düzgün olmakla birlikte, yaklaşık olarak %50,06 daha hızlı bir şekilde istenen bant aralığına oturmuştur.

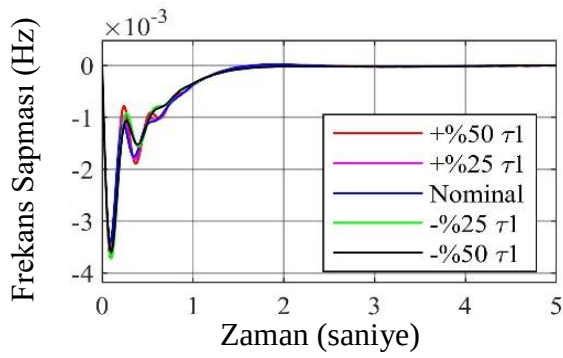
5.5.4. NN-FOPID kontrolörün farklı haberleşme zaman gecikmeleri için performans analizi

Bu incelemede bölgelerdeki iletişim zaman gecikmelerinin $\pm\%25$ ve $\pm\%50$ değişimleri dikkate alınarak, geliştirilen kontrolör ile gecikmelerin etkisi analiz edilmiştir. Haberleşme

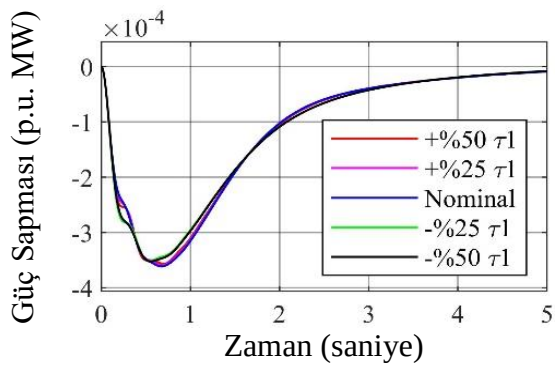
zaman gecikmelerinde oluşabilecek değişimlere karşı bölgelerdeki frekans saptmaları ve ara bağlantı hattı güç saptmaları Şekil 5.22 ile Şekil 5.30 arasındaki şekillerde gösterilmiş ve ardından önerilen kontrolörün üstünlüğü değerlendirilmiştir:



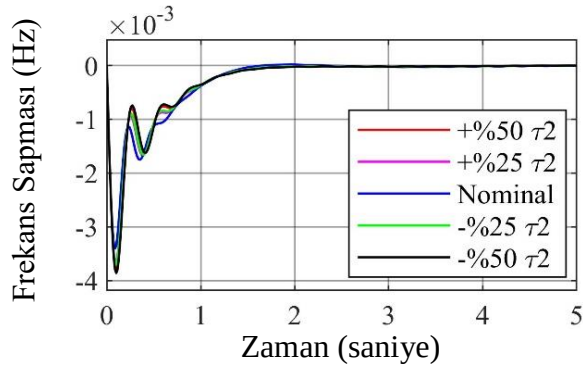
Şekil 5.22. τ_1 değişimleri için Bölge-1 frekans saptmaları grafiği



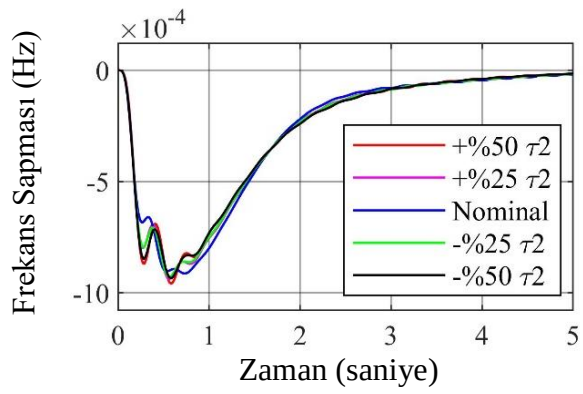
Şekil 5.23. τ_1 değişimleri için Bölge-2 frekans saptmaları grafiği



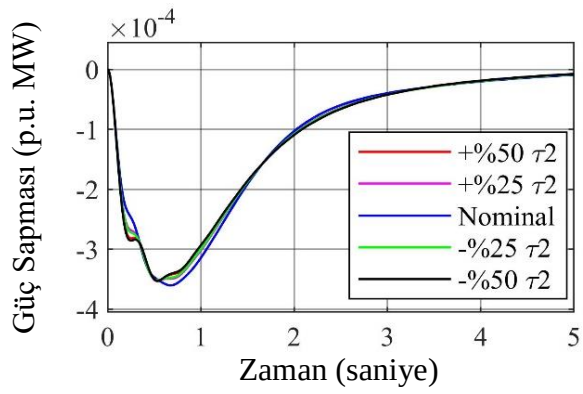
Şekil 5.24. τ_1 değişimleri için ara bağlantı hattı güç saptmaları grafiği



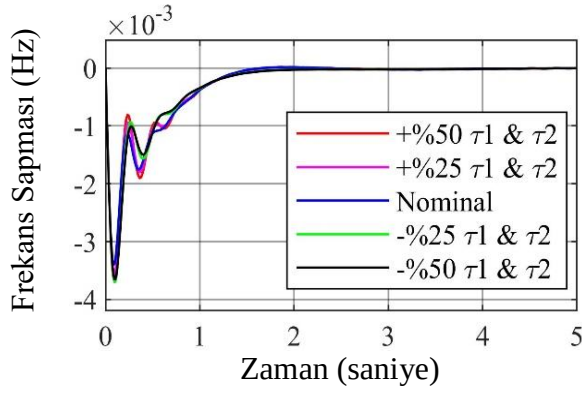
Şekil 5.25. τ_2 değişimleri için Bölge-1 frekans sapmaları grafiği



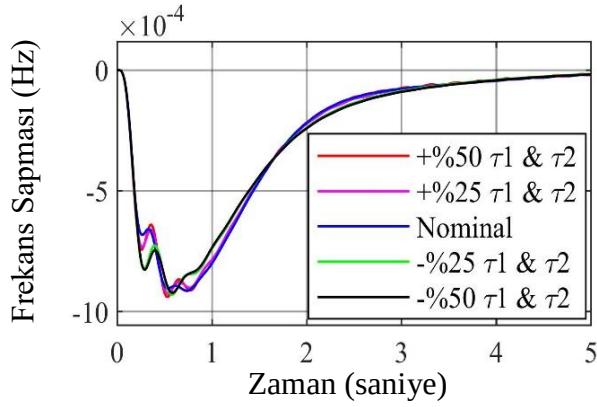
Şekil 5.26. τ_2 değişimleri için Bölge-2 frekans sapmaları grafiği



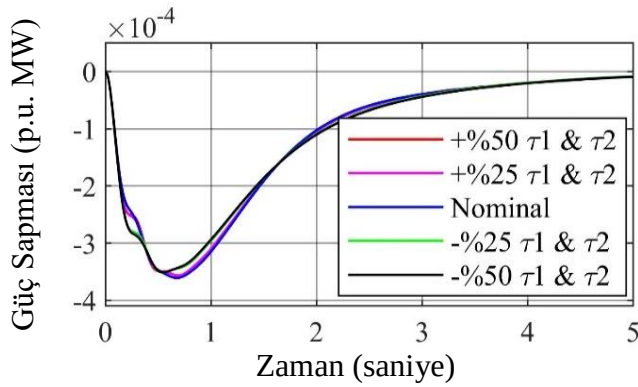
Şekil 5.27. τ_2 değişimleri için ara bağlantı hattı güç sapmaları grafiği



Şekil 5.28. τ_1 ve τ_2 değişimleri için Bölge-1 frekans sapmaları grafiği



Şekil 5.29. τ_1 ve τ_2 değişimleri için Bölge-2 frekans sapmaları grafiği



Şekil 5.30. τ_1 ve τ_2 değişimleri için ara bağlantı hattı güç sapmaları grafiği

Geliştirilen NN-FOPID ile haberleşme zaman gecikmelerindeki değişimlere karşı elde edilen sayısal sonuçlar aşağıdaki Çizelge 5.13'te verilmiştir:

Çizelge 5.13. Zaman gecikmelerindeki değişimlere karşı sistem performansları

	Bölge-1			Bölge-2			Ara bağlantı hattı		
τ	Maks. Aşım	Min. Aşım	Oturma zamanı	Maks. Aşım	Min. Aşım	Oturma zamanı	Maks. Aşım	Min. Aşım	Oturma zamanı
+%50 τ_1	1,549e-5	-3,703e-3	3,894	5,045e-6	-9,310e-4	4,852	1,970e-6	-3,566e-4	3,967
+%25 τ_1	1,568e-5	-3,539e-3	3,793	5,802e-6	-9,133e-4	4,932	1,924e-6	-3,595e-4	3,969
-%25 τ_1	5,708e-6	-3,719e-3	3,297	4,735e-6	-9,374e-4	4,804	2,080e-6	-3,520e-4	3,950
-%50 τ_1	5,374e-6	-3,600e-3	3,288	4,530e-6	-9,318e-4	4,818	2,000e-6	-3,523e-4	3,958
+%50 τ_2	6,291e-6	-3,291e-3	3,366	5,185e-6	-9,595e-4	4,721	2,223e-6	-3,531e-4	3,927
+%25 τ_2	5,853e-6	-3,661e-3	3,500	4,590e-6	-9,383e-4	4,783	1,897e-6	-3,514e-4	3,959
-%25 τ_2	5,407e-6	-3,705e-3	3,509	4,306e-6	-9,297e-4	4,799	1,872e-6	-3,514e-4	3,967
-%50 τ_2	6,036e-6	-3,861e-3	3,337	5,053e-6	-9,351e-4	4,712	2,233e-6	-3,525e-4	3,930
+%50 τ_1 & τ_2	1,770e-5	-3,672e-3	3,884	8,647e-6	-9,398e-4	5,056	2,062e-6	-3,582e-4	3,982
+%25 τ_1 & τ_2	6,650e-6	-3,592e-3	3,849	5,078e-6	-9,265e-4	5,015	1,703e-6	-3,565e-4	4,017
-%25 τ_1 & τ_2	5,322e-6	-3,701e-3	3,317	4,410e-6	-9,351e-4	4,822	1,956e-6	-3,515e-4	3,967
-%50 τ_1 & τ_2	4,604e-6	-3,652e-3	3,421	3,776e-6	-9,224e-4	4,883	1,693e-6	-3,510e-4	4,019

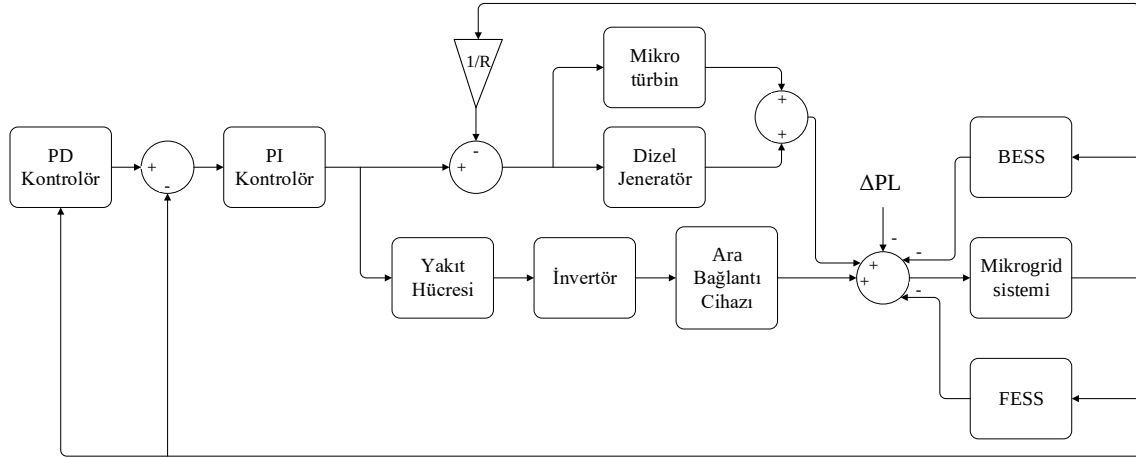
Elde edilen sonuçlardan, haberleşme zaman gecikmelerindeki $\pm\%25$ ve $\pm\%50$ değişimlerde bile nominal sistem performanslarına yakın çıktılara ulaşılmıştır. Bu sonuçlardan, geliştirilen NN-FOPID kontrolör ile bölgelerde meydana gelebilecek zaman gecikmelerindeki farklı varyasyonların, yük frekans kontrol sistemi üzerindeki etkisinin minimize edildiği ve nominal sistem performans değerlerine yakın çıktılar elde edildiği görülmektedir.

5.6. Yük Frekans Kontrol Sistemi-6

Bu bölümde, tek bölgeli bir mikrogrid sisteminin yük frekans kontrol analizleri, VSA ve GWO sezgisel teknikleri gerçekleştirilmiş ve iki sezgisel tekniğin performansları karşılaştırılmıştır. Yakıt hücresi, mikro türbin, dizel jeneratör, BESS ve FESS'ten oluşan bu mikrogrid sistem tez kapsamında tasarlandığından dolayı literatür ile doğrudan karşılaştırılması yapılamamıştır. Sisteme ait performans analizleri kaskat PD-PI kontrolör

kullanılarak, oturma zamanı (%0.002 bant aralığı), maksimum aşım ve minimum aşım değerleri açısından değerlendirilmiştir. (Sistem parametrelerine [44] numaralı referanstan ulaşılabilir.)

Analizleri gerçekleştirilen mikrogrid modeli Şekil 5.31’de gösterilmiştir:



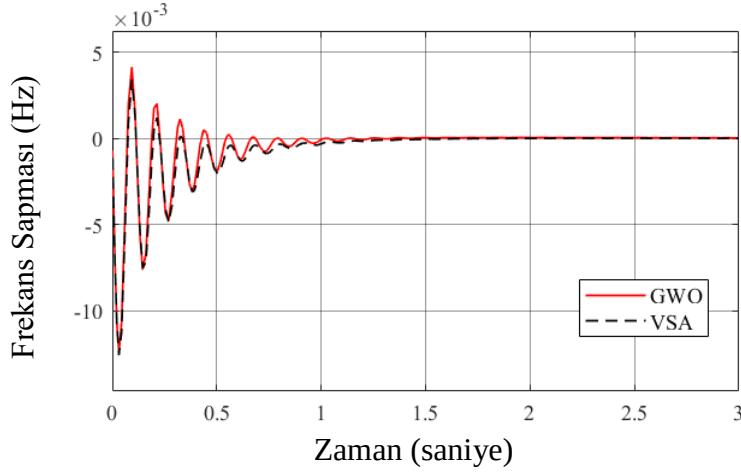
Şekil 5.31. Yakıt hücreli ve çok kaynaklı mikrogrid modeli

VSA ve GWO ile bulunan optimum PD-PI kontrolör parametreleri Çizelge 5.14’te verilmiştir:

Çizelge 5.14. Model 6 için kontrolör parametreleri

	K_{PI}	K_I	K_{PD}	K_D
VSA	-1,7945	-4,9489	4,9499	2,3019
GWO	2,8522	4,9500	-4,7296	-1,4668

VSA ve GWO ile elde edilen frekans saptmaları grafiği Şekil 5.32’de gösterilmiştir:



Şekil 5.32. Model 6 için frekans sapmaları grafiği

Elde edilen karşılaştırma sonuçları sayısal olarak Çizelge 5.15'te verilmiştir:

Çizelge 5.15. Model 6 için sistem performansları

	Maksimum aşım	Minimum aşım	Oturma zamanı
VSA	3,411e-3	-1,258e-2	0,5054
GWO	4,157e-3	-1,236e-2	0,4020

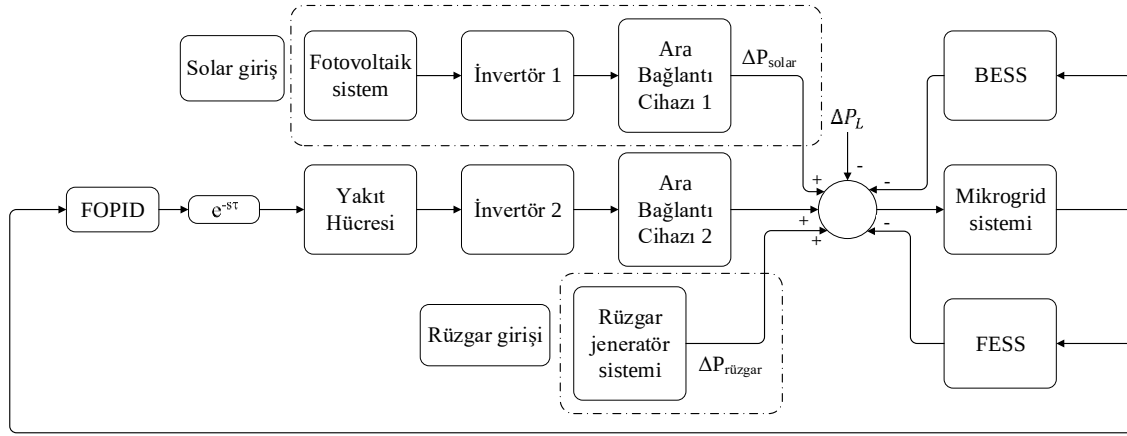
VSA ile elde edilen maksimum aşım değeri GWO'dan yaklaşık %17.94 daha düşüktür. Ancak GWO ile, VSA'ya göre yaklaşık %1.75 daha minimum aşım ve % 20.46 daha düşük oturma zamanı değerine ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlardan GWO'nun daha iyi performans sonuçları verme yeteneğine sahip olduğu söylenebilir.

5.7. Yük Frekans Kontrol Sistemi-7

Bu bölümde, haberleşme zaman gecikmesinin dikkate alındığı yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama sistemlerine sahip bir mikrogrid sistemin analizleri gerçekleştirilmiştir. Sistem performanslarının iyileştirilmesi için FOPID kontrolör kullanılmış ve kontrolöre ait parametreler EO sezgisel tekniği ile belirlenmiştir. Bu modelde ΔPL yükü, solar ışıma ve rüzgar hızı değişken girdiler olduğundan dolayı, bu üçünün toplamı yeni bir bozucu yük olarak tanımlanabilmektedir. Bu nedenle, sisteme uygulanan yeni bozucu yük Eş. 5.4 ile gösterilmiştir [68]:

$$\Delta P_{L,new} = \Delta P_L + \Delta P_{wind} + \Delta P_{PV} \quad (5.4)$$

Analizleri gerçekleştirilen mikrogrid modeli Şekil 5.33'te görülmektedir:



Şekil 5.33. Haberleşme zaman gecikmesine sahip yakıt hücreli mikrogrid modeli

Bu mikrogrid sistemi için öncelikle, önerilen FOPID kontrolör ve EO tekniğinin sonuçları [68] numaralı referans ile karşılaştırılmıştır. Sonrasında, zaman gecikmelerindeki $\pm\%10$ ve $\pm\%25$ değişimlerin, sistem performanslarına olan etkisi araştırılmıştır. En son analiz olarak, sistem zaman sabiti parametrelerindeki $\pm\%10$ ve $\pm\%25$ değişimlerin, sistem performanslarına olan etkisi incelenmiştir. Tüm analizler sistem performansları, oturma zamanı ($\%0.002$ bant aralığı), maksimum aşım ve minimum aşım değerleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. (Bu modele ait sistem parametrelerine [68] numaralı referanstan ulaşılabilir.)

5.7.1. FOPID kontrolör ve EO tekniğinin performansları

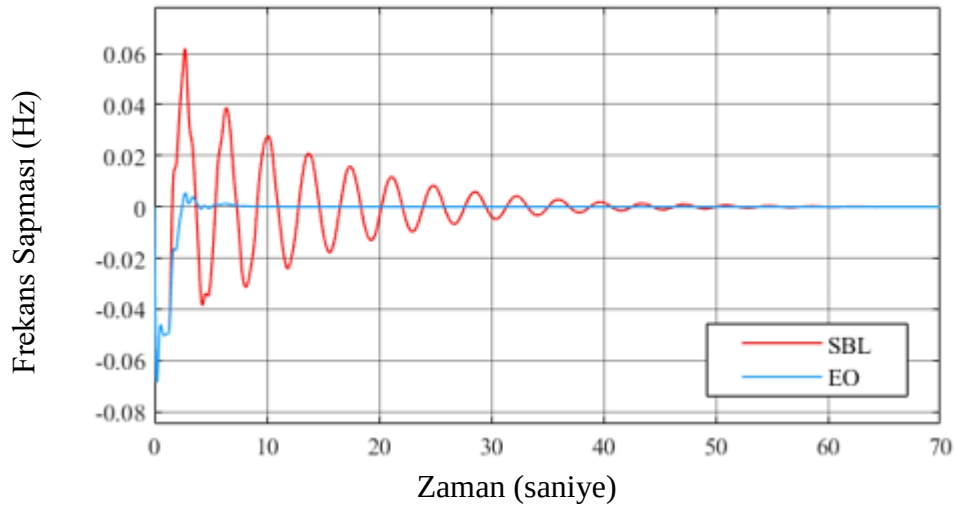
Bu çalışmada, mikrogrid sistem performanslarının iyileştirilmesi için önerilen FOPID kontrolöre ait optimum parametre değerleri EO aracılığıyla bulunmuş ve literatür ile karşılaştırılmıştır.

EO ile belirlenen kontrolör parametreleri Çizelge 5.16'da verilmiştir:

Çizelge 5.16. Model 7 için kontrolör parametreleri

	Yöntem	K_P	K_I	K_D	λ	μ
FOPID	EO	0,06812	1,27644	0,77232	1,00002	0,16302
[68]	SBL	2,00000	2,30000	----	1,20000	----

Elde edilen frekans sapmasına ait karşılaştırmalı grafik ve sayısal sonuçlar Şekil 5.34 ve Çizelge 5.17’de verilmiştir:



Şekil 5.34. Model 7 için karşılaştırmalı frekans sapması grafiği

Çizelge 5.17. Model 7 için performans sonuçları

	Yöntem	Maksimum Aşım	Minimum Aşım	Oturma zamanı
FOPID	EO	5,567e-3	-6,854e-2	3,685
[68]	SBL	6,186e-2	-6,854e-2	38,061

Elde edilen sonuçlardan, sistemdeki frekans sapmasının hızlı bir şekilde minimize edildiği açıkça görülmektedir. Ayrıca, maksimum aşım değeri yaklaşık %91 ve oturma zamanı ise yaklaşık %90,32 oranında azaltılmıştır.

5.7.2. Zaman gecikmelerindeki değişimlerin etkisi

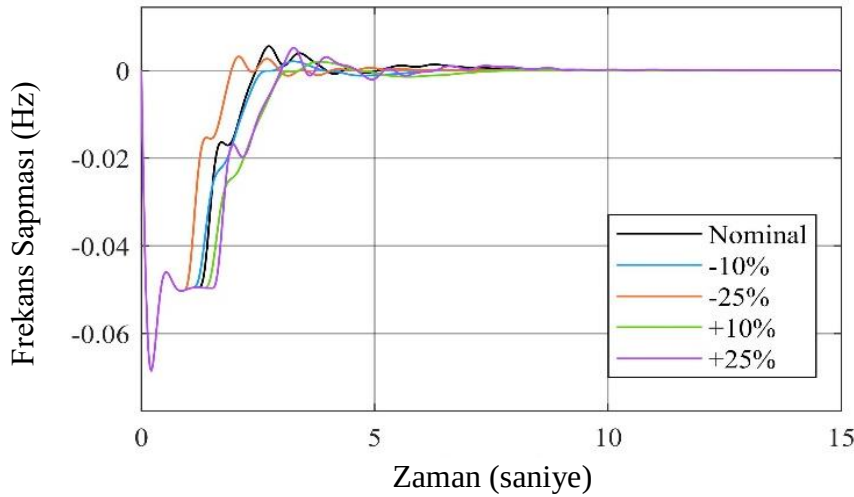
Sistemdeki zaman gecikmeleri $\pm\%10$ ve $\pm\%25$ değiştirilerek, önerilen yaklaşımın zaman gecikmeleri üzerine olan etkisi analiz edilmiştir.

Çizelge 5.18’de, farklı zaman gecikmesi değerleri için bulunmuş optimum kontrolör parametreleri verilmiştir:

Çizelge 5.18. Farklı zaman gecikmeleri için kontrolör parametreleri

τ	K_P	K_I	K_D	λ	μ
-10%	0,00738	1,15563	0,67287	1,00004	0,01859
-25%	0,78071	1,53048	0,14868	1,00003	0,69461
+10%	0,66229	0,96189	0,00132	1,00004	0,03434
+25%	0,62211	1,01287	0,28634	1,00003	0,45477

Sistemdeki zaman gecikmelerinin değişimlerine karşı frekans sapmalarına ait grafik Şekil 5.35’te gösterilmiştir:



Şekil 5.35. Farklı zaman gecikmeleri için karşılaştırmalı frekans sapması grafiği

Elde edilen performanslara ait sayısal sonuçlar Çizelge 5.19’da verilmiştir:

Çizelge 5.19. Farklı zaman gecikmeleri için sistem performansları

τ	Maksimum aşım	Minimum aşım	Oturma zamanı
-10%	2,088e-3	-6,854e-2	3,335
-25%	3,189e-3	-6,854e-2	2,802
+10%	1,988e-3	-6,854e-2	2,929
+25%	5,192e-3	-6,854e-2	4,974

Haberleşme zaman gecikmelerindeki değişimler dikkate alınarak gerçekleştirilen analizlerden, önerilen yaklaşımın bu gecikmeleri önemli ölçüde tolere edebildiği açıkça görülmektedir. Elde edilen sonuçların birbirlerine yakın değerlerde olduğu gözlemlenmiştir.

5.7.3. Zaman sabitlerindeki değişimlerin etkisi

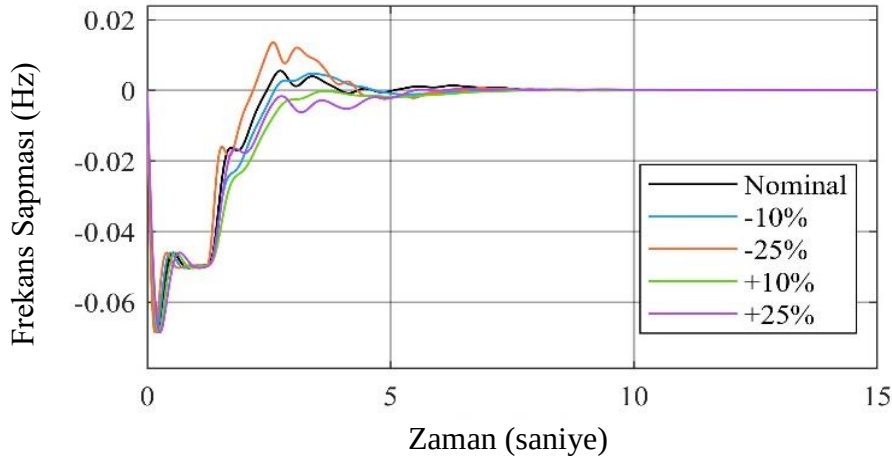
Sistemdeki tüm zaman sabitleri eş zamanlı olarak $\pm 10\%$ ve $\pm 25\%$ değiştirilerek, önerilen yaklaşımın zaman sabitleri üzerine olan etkisi analiz edilmiştir.

Çizelge 5.20’de, aynı anda ve aynı oranlarda değiştirilen zaman sabitleri değerleri için bulunmuş optimum kontrolör parametreleri verilmektedir:

Çizelge 5.20. Farklı zaman sabitleri için kontrolör parametreleri

Zaman Sabitleri	K_P	K_I	K_D	λ	μ
-10%	0,63225	1,11558	0,13266	1,00009	0,28615
-25%	0,65517	1,07369	0,00383	1,00003	0,05264
+10%	0,71801	1,08610	0,00283	1,00013	0,25120
+25%	0,64313	1,02580	0,06260	1,00006	0,20824

Sistemdeki zaman sabitlerindeki değişimlerine karşı frekans sapmalarına ait grafik Şekil 5.36’da gösterilmiştir:



Şekil 5.36. Farklı zaman sabitleri için karşılaştırmalı frekans sapması grafiği

Zaman sabitlerindeki değişimlerin sistem performanslarına etkisi ise sayısal olarak Çizelge 5.21’de verilmiştir:

Çizelge 5.21. Farklı zaman sabitleri için sistem performansları

Zaman Sabitleri	Maksimum aşım	Minimum aşım	Oturma zamanı
-10%	4,759e-3	-6,855e-2	4,080
-25%	1,361e-2	-6,844e-2	5,546
+10%	0,000e0	-6,854e-2	3,239
+25%	5,522e-4	-6,856e-2	5,076

Sonuçlardan sistemin, sistem sabitlerindeki değişimlere karşı etkili bir performans gösterdiği ve olası bu değişimleri tolere edebildiği görülmektedir.

5.8. Yük Frekans Kontrol Modeli-8

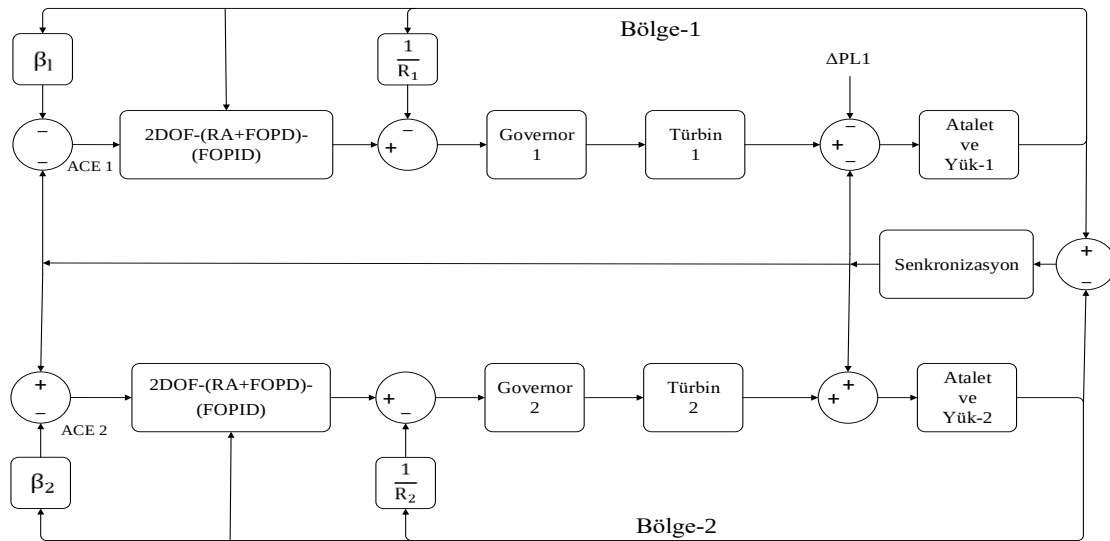
Bu modelde, yük frekans kontrol sistemlerinin performanslarının güçlendirilmesi ve yenilebilir enerji kaynakları, enerji depolama sistemleri vb. içeren yük frekans kontrol sistemlerinin analizlerini gerçekleştirmek için geliştirilen 2DOF-(RA+FOPD)-(FOPID) kontrolör ve HTVS tekniğinin uygulamaları ve sonuçları analiz edilmiştir.

İlk olarak önerilen kontrolör ve teknik, iki adet çok bölgeli yük frekans kontrol sistemi üzerinde test edilmiştir. Elde edilen olumlu sonuçların ardından, önerilen yaklaşımlar; GRC ve GDB lineersizliklerini içeren rüzgar ve güneş yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip ara ısıtmalı enterkonnekte yük frekans kontrol sistemi ile GRC ve GDB lineersizliklerini içeren batarya enerji depolama sistemine sahip ara ısıtmalı enterkonnekte yük frekans kontrol sistemine uygulanmıştır.

5.8.1. Test Sistemi-1

Bu bölümde, iki bölgeli bir yük frekans kontrol sistemi, önerilen yaklaşım için ilk test sistemi olarak seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar iyileştirilmiş stokastik fraktal arama algoritması (Improved Stochastic Fractal Search Algorithm-ISFS) [69], bakteri arama optimizasyon algoritması (Bacteria Foraging Optimization Algorithm-BFOA) [70], hibrit bakteri yiyecek arama optimizasyon algoritması ve parçacık sürüsü optimizasyonu (Hybrid Bacteria Foraging Optimization Algorithm and Particle Swarm Optimization-hBFOA-PSO) [71] ve TLBO [72] yöntemleri ile karşılaştırılarak, geliştirilen yöntemin etkinliği ve performansları incelenmiştir. (Test sistemine ait parametrelere [69] numaralı referanstan ulaşılabilir.)

Analizleri gerçekleştirilen ve birinci test sistemi olarak seçilen yük frekans kontrol modeli Şekil 5.37 ile gösterilmiştir:



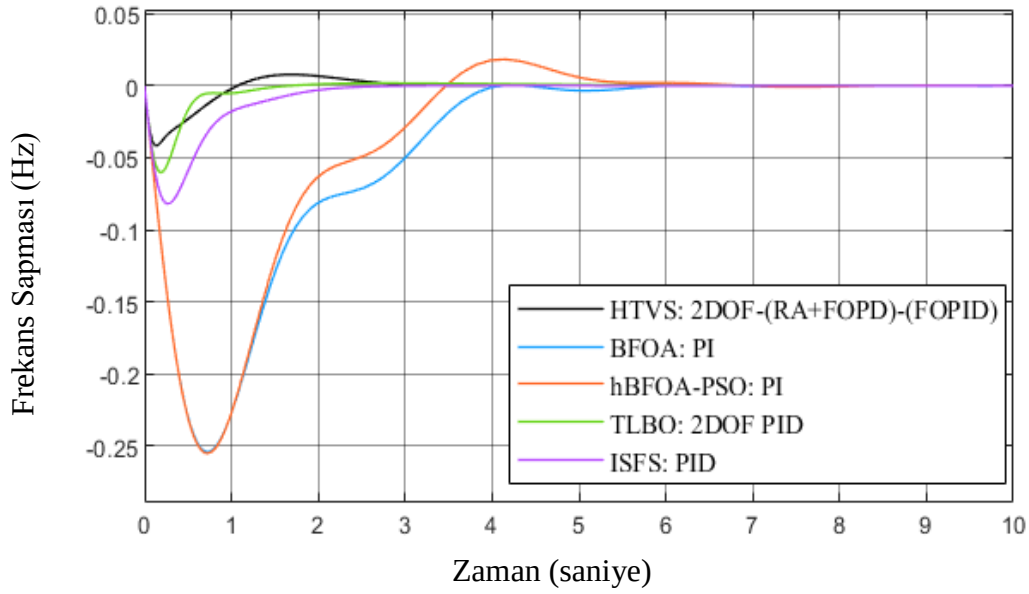
Şekil 5.37. Önerilen yaklaşım için seçilen birinci test sistemi

Sistem için HTVS ile elde edilmiş optimum 2DOF-(RA+FOPD)-(FOPID) kontrolör parametreleri Çizelge 5.22 ile verilmiştir:

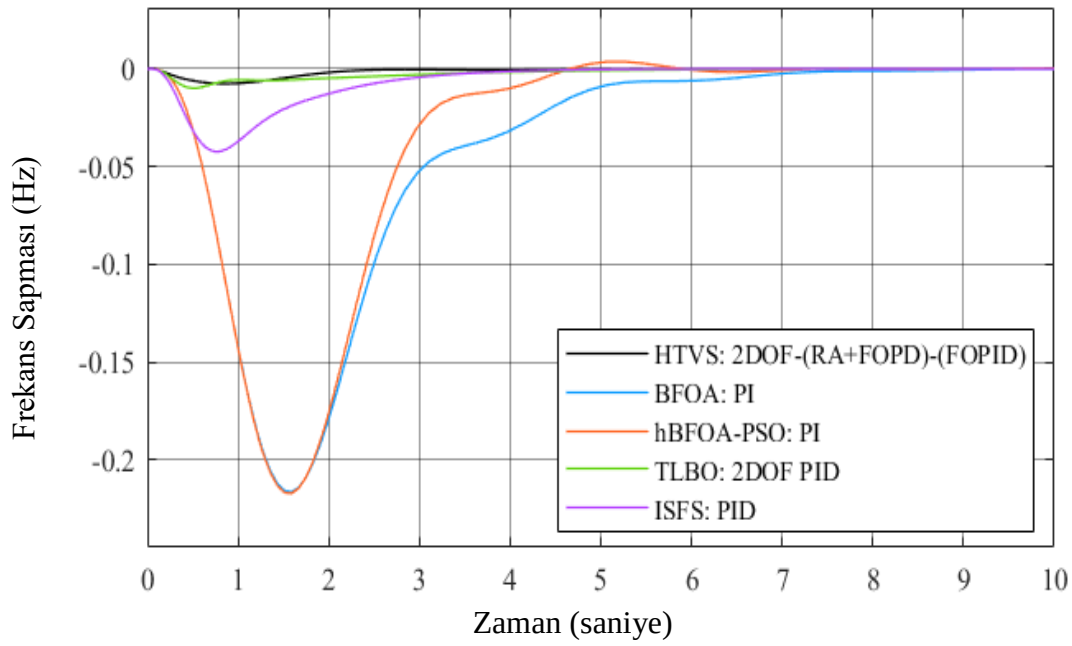
Çizelge 5.22. Birinci test sistemi için kontrolör parametreleri

	K_{P1}	K_{D1}	μ_1	P_{W1}	D_{W1}	RA
	0,999	0,999	0,001	0,999	0,999	0,999
K_{P2}	K_{I2}	λ	K_{D2}	μ_2	P_{W2}	D_{W2}
0,734	0,999	0,999	0,458	0,932	0,406	0,288

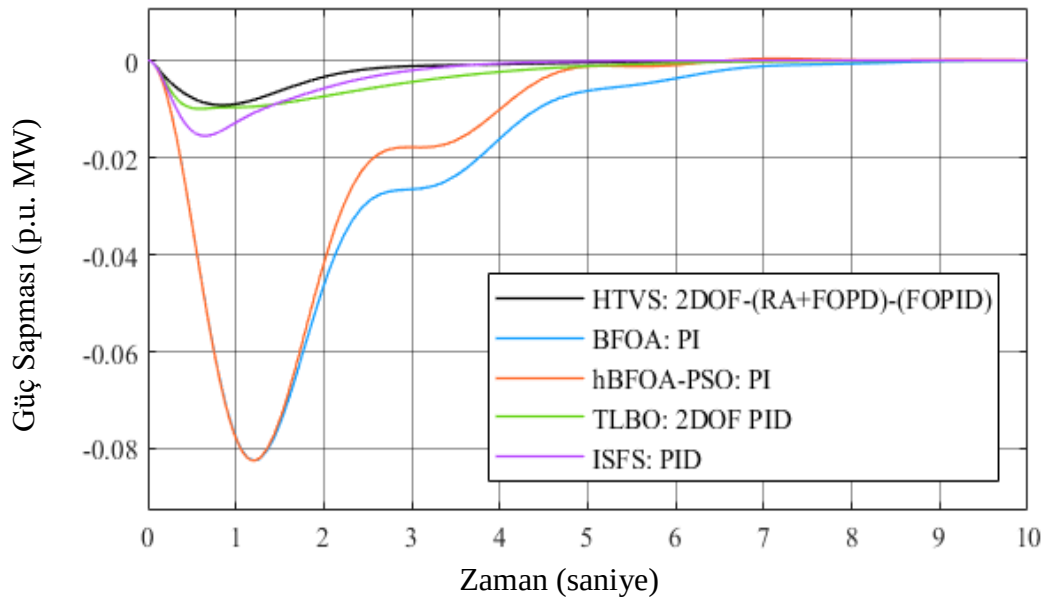
Elde edilen frekans sapmaları Şekil 5.38, Şekil 5.39 ve Şekil 5.40’da gösterilen literatür sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.38. Birinci test sistemi için Bölge-1 karşılaştırmalı frekans sapması grafiği



Şekil 5.39. Birinci test sistemi için Bölge-2 karşılaştırmalı frekans sapması grafiği



Şekil 5.40. Birinci test sistemi için Ara bağlantı hattı karşılaştırmalı güç sapması grafiği

Sistem performansları; oturma zamanı ($\pm 2e-4$ bant aralığı), maksimum aşım ve minimum aşım değerleri açısından hesaplanarak Çizelge 5.23'te verilmiştir:

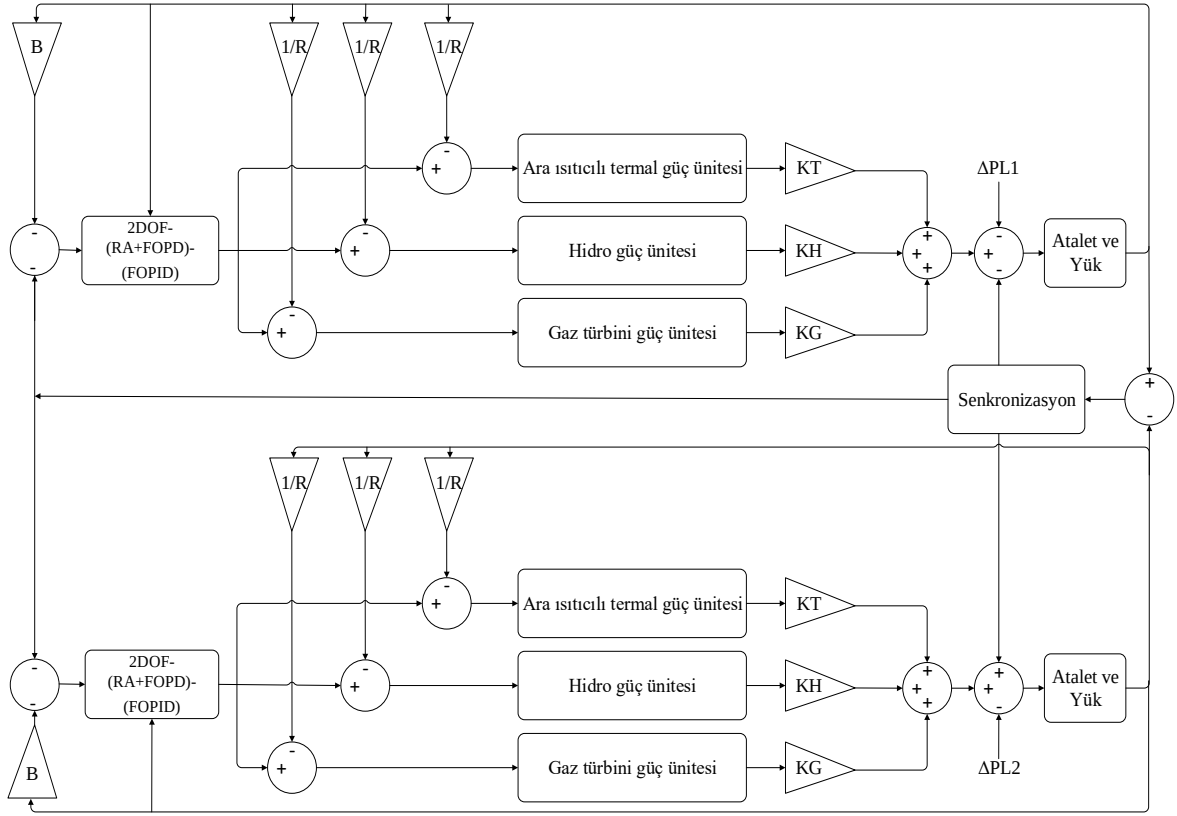
Çizelge 5.23. Birinci test sistemi için sistem performans sonuçları

		Bölge-1			Bölge-2			Ara bağlantı hattı		
	τ	Maks. Aşım	Min. Aşım	Oturma zamanı	Maks. Aşım	Min. Aşım	Oturma zamanı	Maks. Aşım	Min. Aşım	Oturma zamanı
	HTVS	7,726e-3	-4,160e-2	5,615	0,000e-0	-7,601e-3	5,356	0,000e-0	-9,206e-3	6,057
[69]	ISFS	1,190e-4	-8,187e-2	2,888	0,000e-0	-4,233e-2	5,491	5,122e-7	-1,555e-2	4,850
[70]	BFOA	4,222e-4	-2,540e-1	8,005	0,000e-0	-2,164e-1	9,576	0,000e-0	-8,242e-2	8,923
[71]	HBFOA-PSO	1,832e-2	-2,550e-1	8,309	3,668e-3	-2,171e-1	8,801	4,146e-4	-8,240e-2	7,729
[72]	TLBO	1,783e-3	-6,020e-2	6,827	0,000e-0	-9,864e-3	6,924	0,000e-0	-9,952e-3	7,140

Elde edilen yukarıdaki sonuçlar incelendiğinde, geliştirilen kontrolör ve sezgisel tekniğin yük frekans kontrol sistemi için rekabetçi sonuçlar verdiği açıkça görülmektedir. Ayrıca, önerilen yaklaşımlarla, tüm durumlar için en düşük minimum aşım değerlerini elde edilmiştir.

5.8.2 Test Sistemi-2

Bu bölümde, iki bölgeli ve çok kaynaklı bir yük frekans kontrol sistemi, önerilen yaklaşım için ikinci test sistemi olarak seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar simbiyotik organizmalar arama algoritması SOSA [29], yusufçuk arama algoritması (Dragonfly Search Algorithm-DSEA) [73] ve değiştirilmiş gri kurt optimizasyonu (Modified Grey Wolf Optimization-MGWO) [74] yöntemleri ile karşılaştırılarak, geliştirilen tekniğin çok bölgeli ve çok kaynaklı sistemlerdeki performansları incelenmiştir. (Test sistemine ait sistem parametrelerine [29], [73] ve [74] numaralı referanslardan ulaşılabilir.)



Şekil 5.41. Önerilen yaklaşım için seçilen ikinci test sistemi

Bu modelde ara ısıtıcılı termal, hidro ve gaz türbini güç üniteleri ile gösterilen bloklar sırasıyla Eş. 5.5, Eş. 5.6 ve Eş. 5.7’de verildiği gibidir:

$$\left(\frac{1}{sT_g+1}\right)\left(\frac{sK_rT_r}{sT_r+1}\right)\left(\frac{1}{sT_t+1}\right) \quad (5.5)$$

$$\left(\frac{1}{sT_{gh}+1}\right)\left(\frac{sT_{rs}}{sT_{rh}+1}\right)\left(\frac{-sT_w+1}{0.5sT_w+1}\right) \quad (5.6)$$

$$\left(\frac{1}{sb_g+c_g}\right)\left(\frac{sX_c+1}{sY_c+1}\right)\left(\frac{sT_{cr}+1}{sT_f+1}\right)\left(\frac{1}{sT_{cd}+1}\right) \quad (5.7)$$

Bu denklemlerde T_g governor zaman sabiti, K_r ara ısıtıcı kazancı, T_r ara ısıtıcı zaman sabiti, T_t türbin zaman sabiti, T_{gh} hidro türbin governor zaman sabiti, T_{rs} hidro türbin governor sıfırlama zaman sabiti, T_{rh} geçici düşüş zaman sabiti, T_w cebri borudaki suyun başlangıç zamanı, b_g valf konumlandırıcının gaz türbini sabiti, c_g gaz türbini valfi

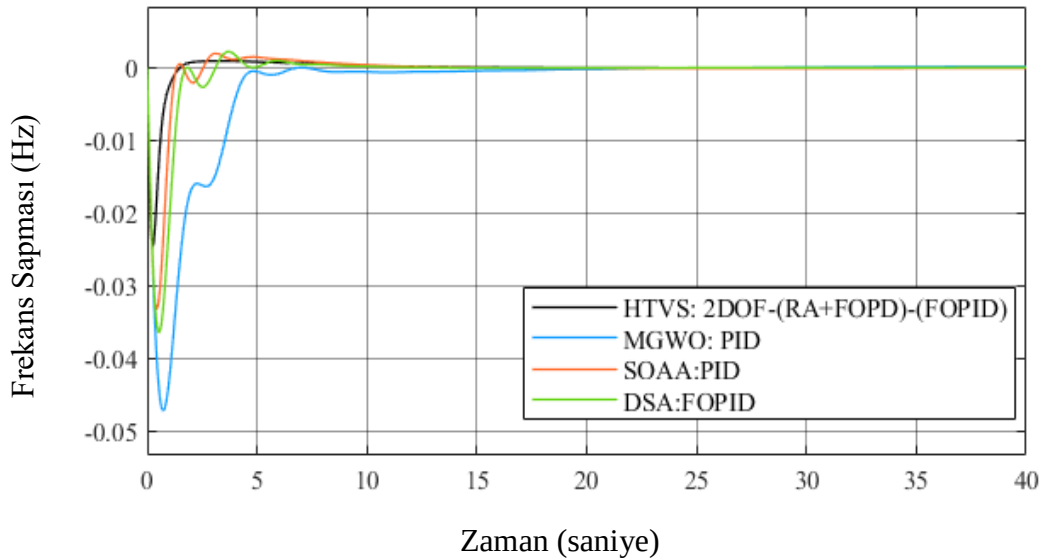
konumlandırıcısı, X_c gaz türbini governorünün sağlama sabiti, Y_c gaz türbini governorünün gecikme sabiti, T_f yakıt zaman sabiti, T_{cr} gaz türbininin yanma reaksiyonu zaman gecikmesi sabiti, T_{cd} kompresör deşarj hacmi zaman sabiti olarak temsil edilmektedir [29]. Ayrıca K_T , K_H ve K_G ise sırasıyla ara ısıtıcılı termal, hidro ve gaz türbini güç ünitelerinin güç sistemine katılım oranlarıdır.

İkinci test sistemi için HTVS ile elde edilmiş optimum 2DOF-(RA+FOPD)-(FOPID) kontrolör parametreleri Çizelge 5.24'te verilmiştir:

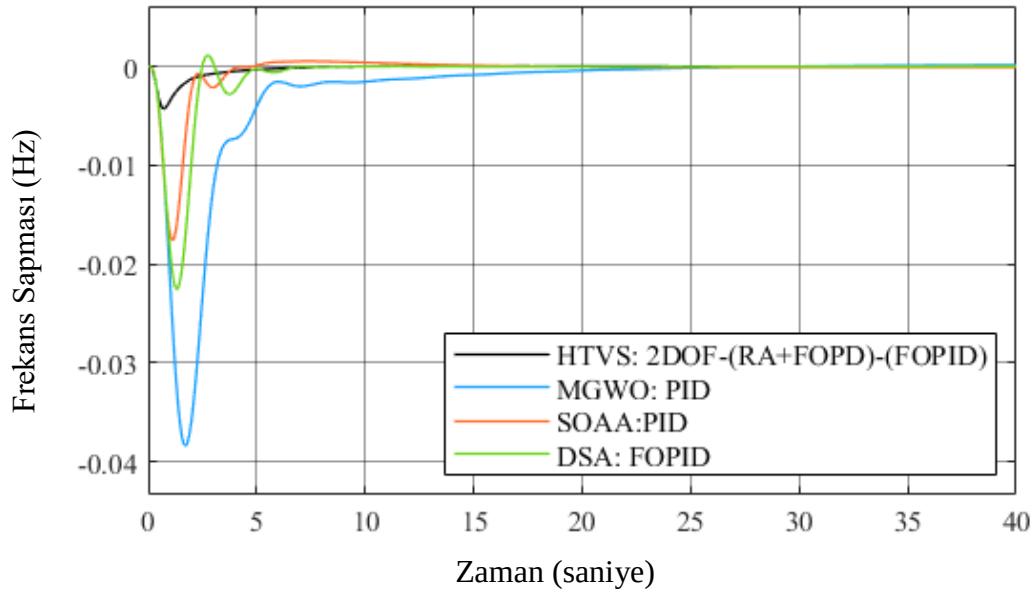
Çizelge 5.24. İkinci test sistemi için kontrolör parametreleri

	K_{P1}	K_{D1}	μ_1	P_{W1}	D_{W1}	RA
	0,7899	0,8661	0,7580	0,8108	0,9990	0,9990
K_{P2}	K_{I2}	λ	K_{D2}	μ_2	P_{W2}	D_{W2}
0,9990	0,9990	0,9022	0,5068	0,9688	0,7189	0,3572

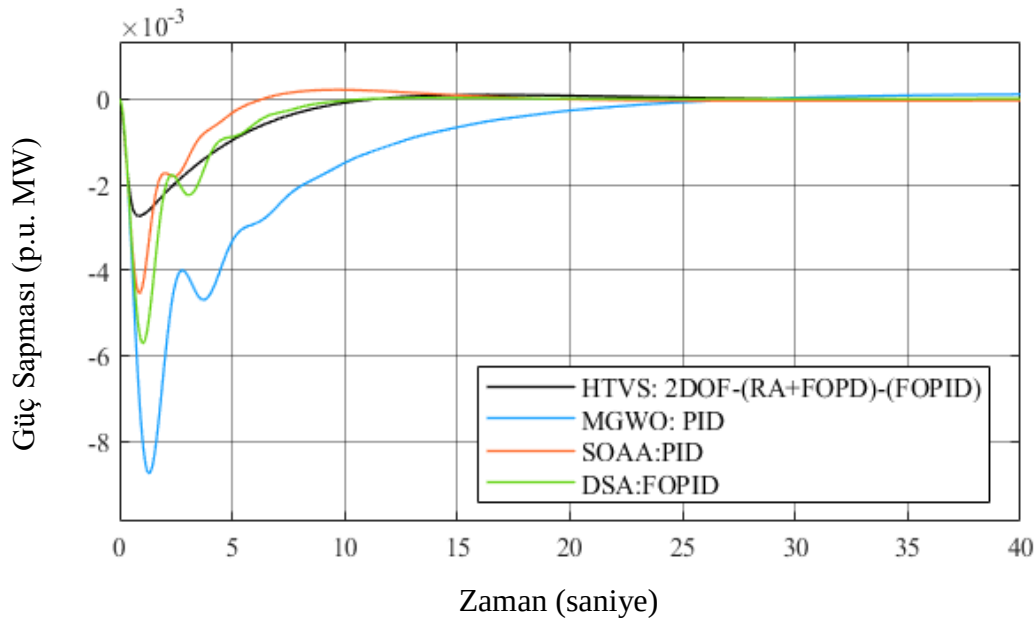
Elde edilen frekans sapmaları, literatür sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Şekil 5.42, Şekil 5.43 ve Şekil 5.44'te verilmiştir.



Şekil 5.42. İkinci test sistemi için Bölge-1 karşılaştırmalı frekans sapması grafiği



Şekil 5.43. İkinci test sistemi için Bölge-2 karşılaştırmalı frekans sapması grafiği



Şekil 5.44. İkinci test sistemi için Ara bağlantı hattı karşılaştırmalı güç sapması grafiği

Elde edilen karşılaştırmalı performans sonuçları; oturma zamanı ($\pm 2e-4$ bant aralığı), maksimum aşım ve minimum aşım değerleri açısından hesaplanarak Çizelge 5.25'te verilmiştir:

Çizelge 5.25. İkinci test sistemi için karşılaştırmalı performans sonuçları

		Bölge-1			Bölge-2			Ara Bağlantı Hattı		
		Maks. Aşım	Min. Aşım	Oturma Zamanı	Maks. Aşım	Min. Aşım	Oturma Zamanı	Maks. Aşım	Min. Aşım	Oturma Zamanı
	HTVS	0,936e-3	-24,5e-3	1,241	0,049e-3	-4,261e-3	2,335	0,104e-3	-2,731e-3	4,872
[29]	SOSA	1,973e-3	-33,2e-3	6,822	0,535e-3	-17,62e-3	3,528	0,222e-3	-4,541e-3	3,422
[73]	DSA	2,225e-3	-36,4e-3	4,245	1,173e-3	-22,59e-3	4,458	0,036e-3	-5,706e-3	4,381
[74]	MGWO	0,165e-3	-47,2e-3	4,488	0,155e-3	-38,43e-3	13,528	0,116e-3	-8,759e-3	12,424

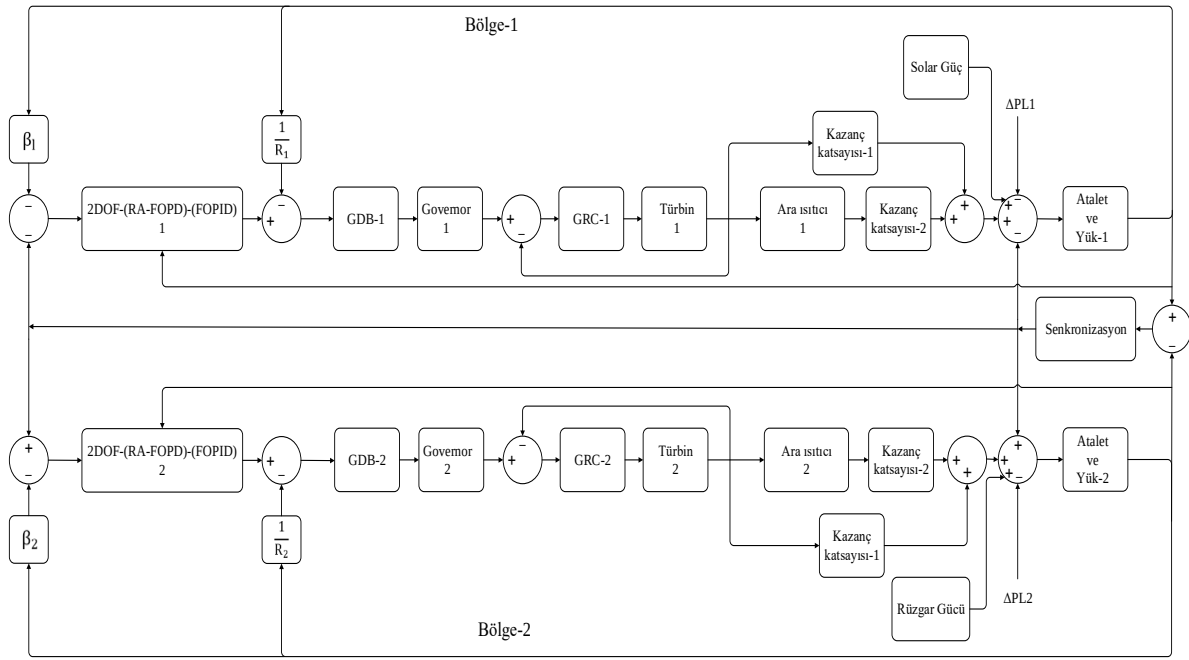
2DOF-(RA+FOPD)-(FOPID) kontrolör ve HTVS ile bulunan sonuçlar incelendiğinde, Bölge-1 için en düşük minimum aşım ve oturma zamanı değerleri ile ara bağlantı hattı için en düşük minimum aşım değeri elde edilmiştir. Ayrıca, Bölge-2 için tüm performans ölçütlerinde en düşük değerler bulunmuştur. Böylece, geliştirilen yaklaşımların, yük frekans kontrol sistemleri üzerine olan üstünlüğü ve uygulanabilirliği gösterilmiştir.

5.8.3. Yenilenebilir enerji kaynakları içeren çok bölgeli yük frekans kontrol modeli

Bu bölümde, güneş ve rüzgar yenilebilir enerji kaynaklarına ve GRC ile GDB lineersizliklerine sahip enterkonnekte bir güç sisteminin analizleri gerçekleştirilmiştir. Böylece, hem rüzgar ve güneş yenilebilir enerji kaynaklarının yük frekans kontrol sistem performanslarına olan etkisi incelenmiştir. Elde edilen sistem sonuçları oturma zamanı ($\pm 5e-3$ bant aralığı), maksimum ve minimum aşım değerleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

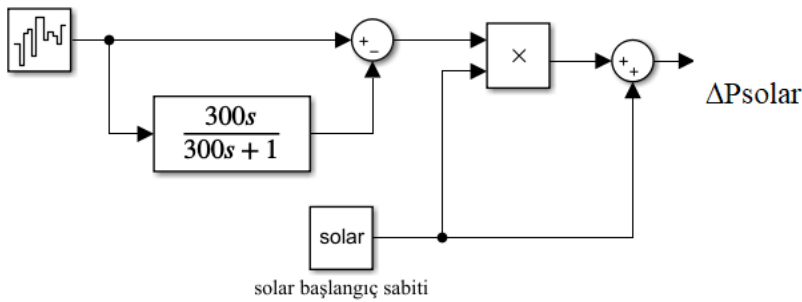
Güneş ve rüzgar enerji kaynakları, solar ışımaya ve rüzgar hızına bağımlı kaynaklardır. Bu nedenle günün her vaktinde değişkenlik göstermektedirler. Bu durum dikkate alınarak, analizleri gerçekleştirilen sistem için bu iki kaynak rastgele çıkış verecek şekilde modellenmiştir.

Şekil 5.45'te 2DOF-(RA+FOPD)-(FOPID) kontrolör ve HTVS ile analizleri gerçekleştirilen yük frekans kontrol sistemi görülmektedir:

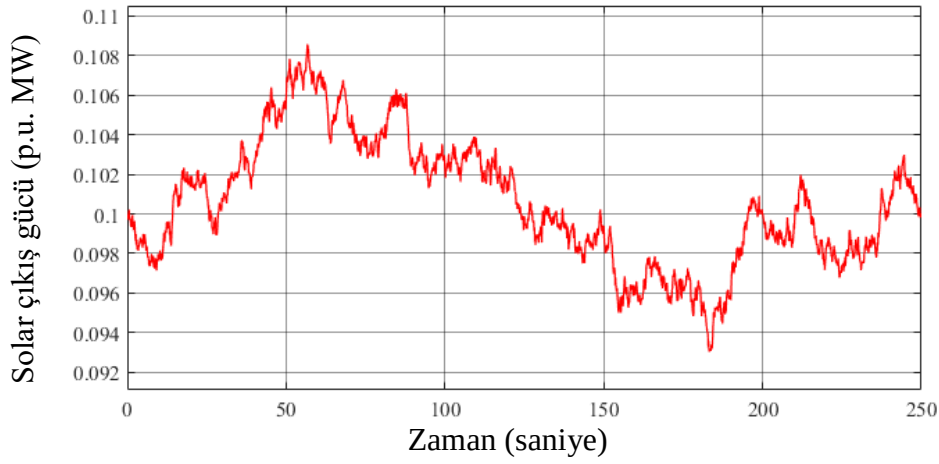


Şekil 5.45. RES'e sahip çok bölgeli yük frekans kontrol sistemi

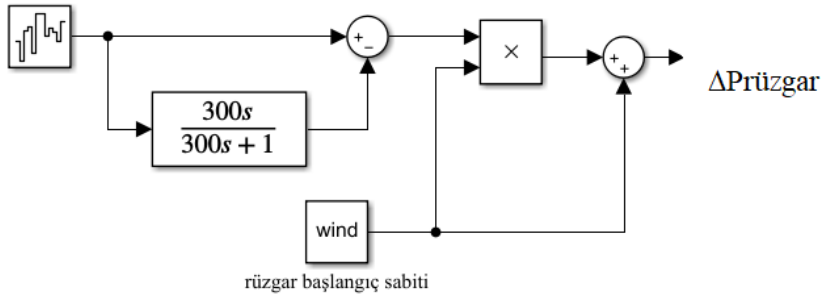
Bu modelde, güneş ve rüzgar yenilenebilir enerji kaynakları sistemde planlı olmayan bir davranış sergilemektedir. Bu tez çalışması kapsamında hem rüzgar çıkış gücünün hem de solar çıkış gücünün 0.1 p.u. MW civarında dalgalandığı varsayılmıştır. Bu nedenle güneş ve rüzgar kaynaklarına ait modeller ve oluşturulan çıkış güçleri sırasıyla Şekil 5.46, Şekil 5.47, Şekil 5.48 ve Şekil 5.49'da gösterilmiştir:



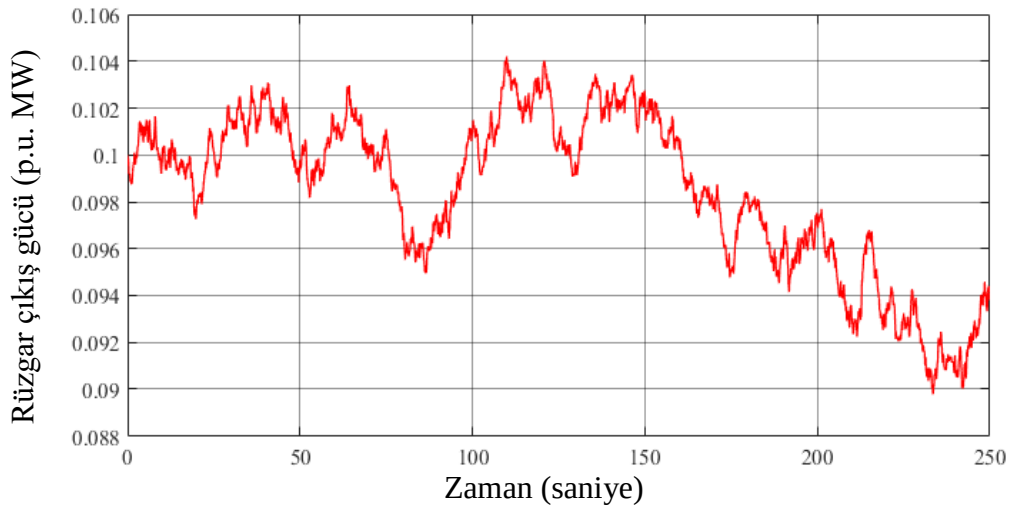
Şekil 5.46. Solar güç için yenilenebilir enerji kaynağı modeli



Şekil 5.47. Solar çıkış gücü (p.u. MW)



Şekil 5.48. Rüzgar gücü için yenilenebilir enerji kaynağı modeli



Şekil 5.49. Rüzgar çıkış gücü (p.u. MW)

Önerilen yaklaşımların yük frekans kontrol sistemlerine olan etkilerinin açık bir şekilde gözlemlenebilmesi için, sisteme $t=0$ saniye anında Bölge-1'den $\Delta PL1=0.1$ p.u MW'lık adım

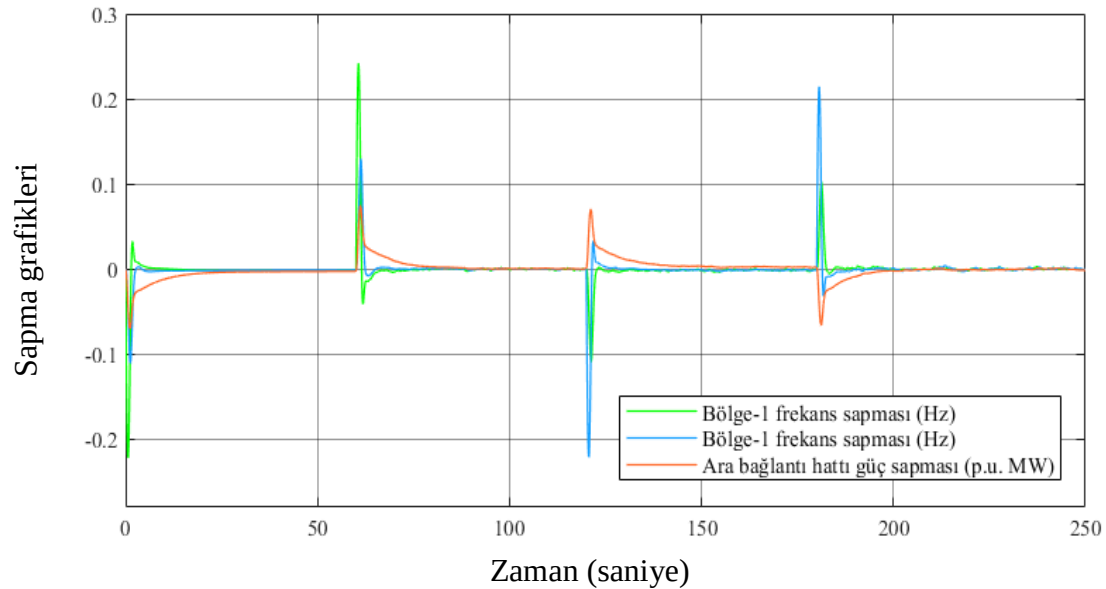
yük, $t=60$ saniye anında Şekil 5.47’de gösterilen solar güç, $t=120$ saniye anında Bölge-2’den $\Delta PL2=0.1$ p.u. MW’lık adım yük ve $t=180$ saniye anında Şekil 5.49’da gösterilen rüzgar gücü uygulanmıştır.

HTVS ile 2DOF-(RA+FOPD)-(FOPID) kontrolör için belirlenen optimal parametreler Çizelge 5.26’da verilmiştir.

Çizelge 5.26. RES içeren sistem için kontrolör parametreleri

	K_{P1}	K_{D1}	μ_1	P_{W1}	D_{W1}	RA
	0,8947	0,5637	0,7026	1,0000	-0,3404	1,0000
K_{P2}	K_{I2}	λ	K_{D2}	μ_2	P_{W2}	D_{W2}
0,9951	0,9556	0,5794	0,5788	0,7375	0,2385	0,8777

HTVS ile 2DOF-(RA+FOPD)-(FOPID) kontrolör ile bulunan bölgelerdeki frekans değişimleri ve ara bağlantı hattı güç değişimi Şekil 5.50 ile gösterilmiştir.



Şekil 5.50. RES içeren sistem için bulunan sapma grafikleri

Sisteme ait sayısal performans sonuçları aşağıdaki Çizelge 5.27 ile verilmiştir:

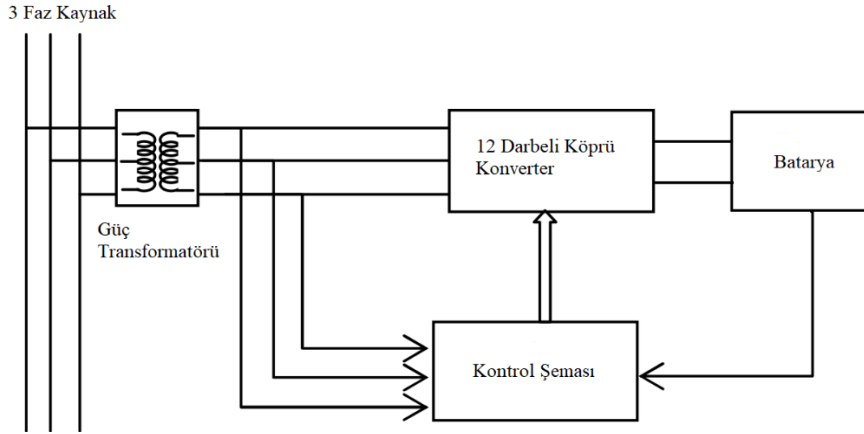
Çizelge 5.27. RES içeren sistem için performans sonuçları

	t=0-60 saniye	Maksimum aşım	Minimum aşım	Oturma zamanı
ΔP_L1	Bölge-1	3,266e-2	-2,220e-1	4,085
	Bölge-2	2,998e-3	-1,107e-1	2,409
	Ara Bağlantı Hattı	-2,458e-3	-7,012e-2	18,806
	t=60-120 saniye	Maksimum aşım	Minimum aşım	Oturma zamanı
$\Delta P_L1 + \Delta P_{solar}$	Bölge-1	2,426e-1	-4,084e-2	4,743
	Bölge-2	1,298e-1	-7,508e-3	4,047
	Ara Bağlantı Hattı	7,506e-2	-2,668e-3	14,924
	t=120-180 saniye	Maksimum aşım	Minimum aşım	Oturma zamanı
$\Delta P_L1 + \Delta P_{solar} + \Delta P_L2$	Bölge-1	2,325e-3	-1,093e-1	2,457
	Bölge-2	3,334e-2	-2,212e-1	3,850
	Ara Bağlantı Hattı	7,079e-2	1,578e-4	19,102
	t=180-250 saniye	Maksimum aşım	Minimum aşım	Oturma zamanı
$\Delta P_L1 + \Delta P_{solar} + \Delta P_L2 + \Delta P_{rüzgar}$	Bölge-1	1,028e-1	-4,858e-3	2,381
	Bölge-2	2,149e-1	-3,160e-2	4,725
	Ara Bağlantı Hattı	1,271e-3	-6,572e-2	12,338

Elde edilen çıktılar incelendiğinde, geliştirilen kontrolör ve hibrit sezgisel optimizasyon tekniğinin, yenilenebilir enerji kaynaklarını içeren yük frekans kontrol sistemlerindeki frekans ve ara bağlantı hattı güç sapmalarını etkin bir şekilde minimize ettiği net olarak görülmektedir.

5.8.4. Enerji depolama sistemleri ve yenilenebilir enerji kaynakları içeren çok bölgeli yük frekans kontrol modeli

Bu bölümde, güneş ve rüzgar yenilenebilir enerji kaynaklarına, GRC ile GDB lineersizliklerine ve bunlara ilave olarak batarya enerji depolama sistemlerine sahip enterkonnekte bir güç sisteminin analizleri gerçekleştirilmiştir. Böylece yenilenebilir enerji

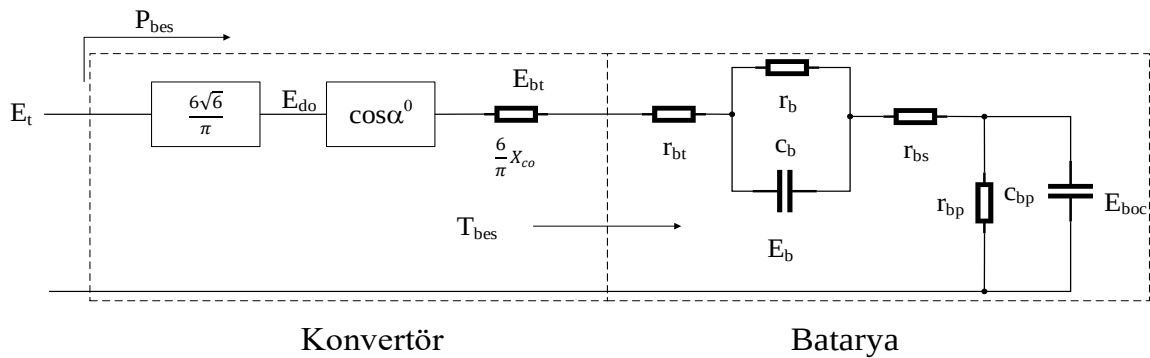


Şekil 5.52. BESS'in şematik gösterimi

İdeal ve yüksüz durumda 12 darbeli konvertere ait maksimum doğru akım gerilimi Eş. 5.8'deki gibi ifade edilebilir [78]:

$$E_{do} = E_{do1} + E_{do2} = \frac{6\sqrt{6}}{\pi} E_t \quad (5.8)$$

Burada E_t faz toptak arası rms gerilim değeridir. BES'in eşdeğer devresi, Şekil 5.53'te gösterildiği gibi eşdeğer bir bataryaya bağlı bir konvertör olarak gösterilebilir. Batarya eşdeğer devresinde [79], E_{boc} batarya açık devre gerilimini, E_b batarya aşırı gerilimini, r_{bt} , bağlantı direncini ve r_{bs} iç direnci temsil etmektedir [80].



Şekil 5.53. BESS için eşdeğer devre modeli [80]

Eşdeğer bataryanın uç gerilim değerleri Eş. 5.9'daki gibidir [80]:

$$E_{bt} = E_{do} \cos \alpha^0 - R_c I_{bes} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_t (\cos \alpha_1^0 + \cos \alpha_2^0) - \frac{6}{\pi} X_{co} I_{bes} \quad (5.9)$$

Burada; α_i^0 ($i=1, 2$) konverterin tetikleme gecikme açısını, X_{co} komutasyon reaktansını, I_{bes} bataryaya doğru akan doğru akımı, r_b aşırı gerilim direncini, c_b aşırı gerilim kapasitansını, r_{bp} deşarj direncini ve c_{bp} batarya kapasitansını temsil etmektedir [80]. Şekil 5.53'teki eşdeğer devreden I_{bes} akımı Eş. 5.10'dan bulunabilir:

$$I_{bes} = \frac{(E_{bt} - E_{boc} - E_b)}{r_{bt} + r_{bs}} \quad (5.10)$$

LFC sistemlerinde aktif güç dikkate alındığından dolayı, BES tarafından çekilen aktif güç Eş. 5.11'deki gibi ifade edilmektedir [78]:

$$P_{bes} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_t I_{bes} (\cos \alpha^0) = (E_{do} \cos \alpha) I_{bes} \quad (5.11)$$

Burada $E_{do} \cos \alpha = E_{co}$ olarak yazılırsa (E_{co} , örtüşme olmayan doğru akım gerilimi), BES gücündeki değişim Eş. 5.12'deki gibi ifade edilebilir [76]:

$$\Delta P_{bes} = E_{co}^0 \Delta I_{bes} + I_{bes}^0 \Delta E_{co} \quad (5.12)$$

BES sistemi için sabit akım çalışma modu en verimli olanıdır, ancak LFC sistemleri için ateşleme açısı ayarlanmaktadır (yani E_{co} sabit güç modunda BES'e ayarlanır). Bu durumda ΔE_{co} Eş. 5.13'de verildiği gibi iki bileşene ayrılır [76]:

$$\Delta E_{co} = \Delta E_p + \Delta E_d \quad (5.13)$$

Bu durumda ΔP_{bes} Eş. 5.14'deki gibi ifade edilebilir [76]:

$$\Delta P_{bes} = E_{co}^0 \Delta I_{bes} + I_{bes}^0 \Delta E_p + I_{bes}^0 \Delta E_d \quad (5.14)$$

Burada $I_{bes}^0 \Delta E_p$ terimi ΔI_{bes} 'in neden olduğu güç sapmasını telafi ederken, $I_{bes}^0 \Delta E_d$ terimi sistemdeki bozuculara karşı cevap vermektedir. Eş. 5.14'teki denklemde $E_{co}^0 \Delta I_{bes}$ ve $I_{bes}^0 \Delta E_p$ toplamının sıfır olduğu varsayıldığında ΔP_{bes} Eş. 5.15'teki gibi elde edilir [76]:

$$\Delta P_{bes} = I_{bes}^0 \Delta E_d \quad (5.15)$$

Burada ΔE_d Eş. 5.16 ile ifade edilmektedir [76]:

$$\Delta E_d = \frac{K_{bes}}{1+sT_{bes}} \Delta f \quad (5.16)$$

Batarya aşırı gerilim kapasitif akımı Eş. 5.17 ile ifade edilmektedir [81]:

$$I_{cb} = c_b \frac{d}{dt} E_b \quad (5.17)$$

Eğer batarya akımında sapmalar var ise, batarya aşırı gerilim kapasitif akımı (I_{cb}) ve gerilim (E_b) başlangıç değerleri kullanılarak Eş. 5.18 ve Eş. 5.19'dan bulunabilir [81]:

$$I_{cb} = I_{cb}^0 + \Delta I_{cb} \quad (5.18)$$

$$E_b = E_b^0 + \Delta E_b \quad (5.19)$$

Eş. 5.18 ve Eş. 5.19'daki denklemler kullanılarak ΔE_b 'nin zamanla değişimi Eş. 5.20'deki gibi ifade edilebilir [81]:

$$\frac{d}{dt} \Delta E_b = \frac{1}{c_b} (I_{cb}^0 + \Delta I_{cb}) \quad (5.20)$$

Aşırı gerilim kapasitansı üzerinden akan akım surasıyla Eş. 5.21, Eş. 5.22 ve Eş. 5.23'deki gibi ifade edilebilir [81]:

$$I_{cb} = \frac{r_b}{r_b + X_{cb}} I_{bes} \quad (5.21)$$

$$I_{cb}^0 = \frac{r_b}{r_b + X_{cb}} I_{bes}^0 \quad (5.22)$$

$$\Delta I_{cb} = \frac{r_b}{r_b + X_{cb}} \Delta I_{bes} \quad (5.23)$$

Bu denklemler yardımıyla ΔE_b 'nin zamanla değişimi Eş. 5.24'teki gibi yeniden düzenlenebilir [81]:

$$\frac{d}{dt} \Delta E_b = \frac{r_b}{c_b(r_b + X_{cb})} (\Delta I_{bes} + I_{bes}^0) \quad (5.24)$$

Buradan ΔE_b ve ΔE_{boc} Eş. 5.25 ve Eş. 5.26 ile ifade edilebilir [76]:

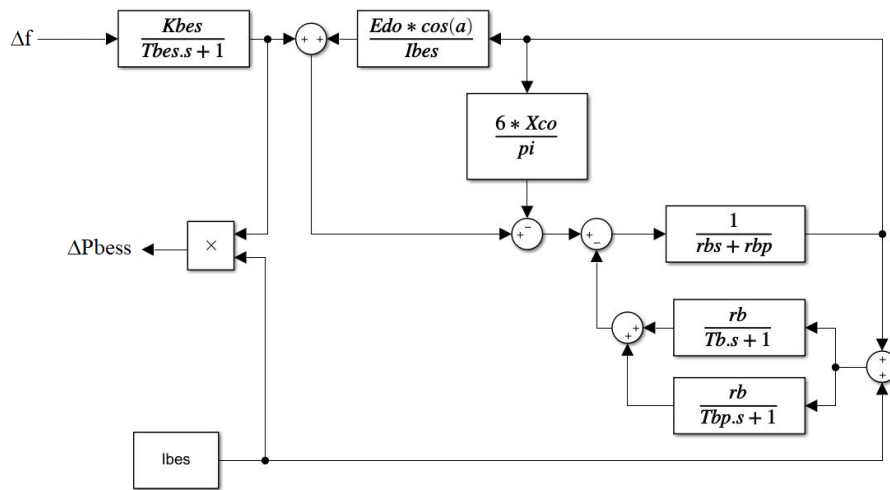
$$\Delta E_b = \frac{r_b}{1+sT_b} (\Delta I_{bes} + I_{bes}^0) \quad (5.25)$$

$$\Delta E_{boc} = \frac{r_{bp}}{1+sT_{bp}} (\Delta I_{bes} + I_{bes}^0) \quad (5.26)$$

Bu eşitliklerde T_b , r_b ve c_b değerlerinin çarpımı ve T_{bp} , r_{bp} ve c_{bp} değerlerinin çarpımı olarak bulunabilir. Bu denklemler yardımıyla ΔI_{bes} Eş. 5.27'deki gibi ifade edilebilir [76]:

$$\Delta I_{bes} = \frac{\Delta E_{bt} - \Delta E_b - \Delta E_{boc}}{r_{bs} + r_{bt}} \quad (5.27)$$

Eş. 5.15, Eş. 5.25 Eş. 5.26 ve Eş. 5.27 denklemleri kullanılarak BES'e ait model Şekil 5.54'teki gibi elde edilir [76]:



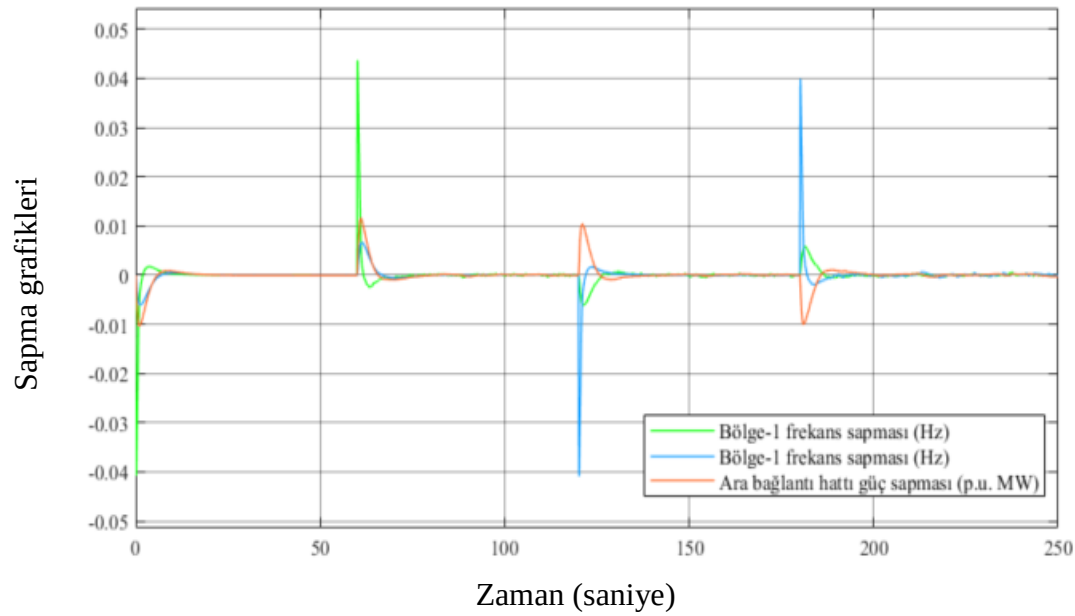
Şekil 5.54. BESS modeli [75-77]

HTVS ile 2DOF-(RA+FOPD)-(FOPID) kontrolör için belirlenen optimal parametreler Çizelge 5.28'de verilmiştir.

Çizelge 5.28. RES ve BESS içeren sistem için kontrolör parametreleri

	K_{P1}	K_{D1}	μ_1	P_{W1}	D_{W1}	RA
	0,9990	0,9714	0,0250	0,9990	0,9990	0,9990
K_{P2}	K_{I2}	λ	K_{D2}	μ_2	P_{W2}	D_{W2}
0,9214	0,9990	0,9333	0,3492	0,6766	0,9451	0,1193

HTVS ile 2DOF-(RA+FOPD)-(FOPID) kontrolör ile bulunan bölgelerdeki frekans değişimleri ve ara bağlantı hattı güç değişimi Şekil 5.55'te gösterilmiştir.



Şekil 5.55. RES ve BESS içeren sistem için sistem için bulunan sapma grafikleri

Sisteme ait sayısal performans sonuçları Çizelge 5.29'da verilmiştir:

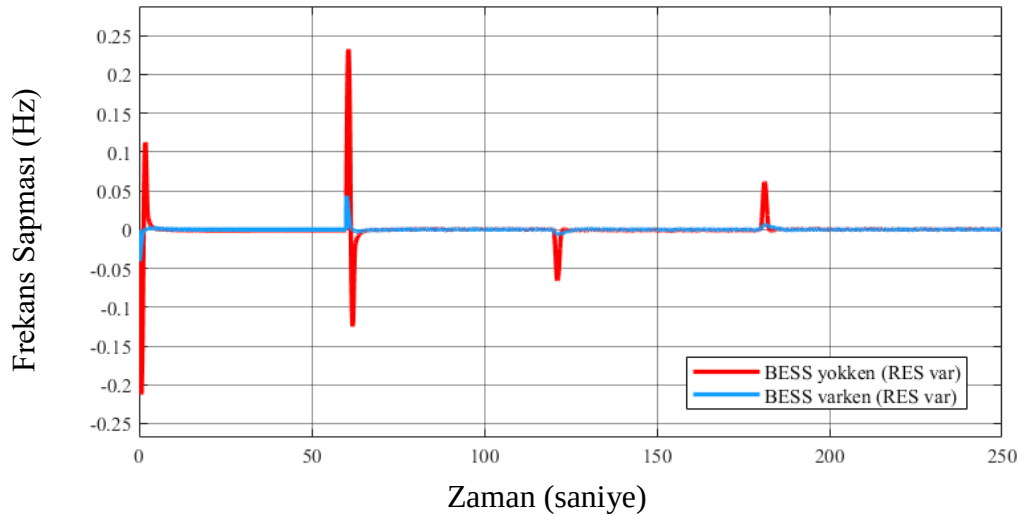
Çizelge 5.29. RES ve BESS içeren sistem için performans sonuçları

	t=0-60 saniye	Maksimum aşım	Minimum aşım	Oturma zamanı
$\Delta PL1$	Bölge-1	1,719e-3	-4,082e-2	1,052
	Bölge-2	4,792e-4	-6,043e-3	2,367
	Ara Bağlantı Hattı	8,620e-4	-1,040e-2	3,100

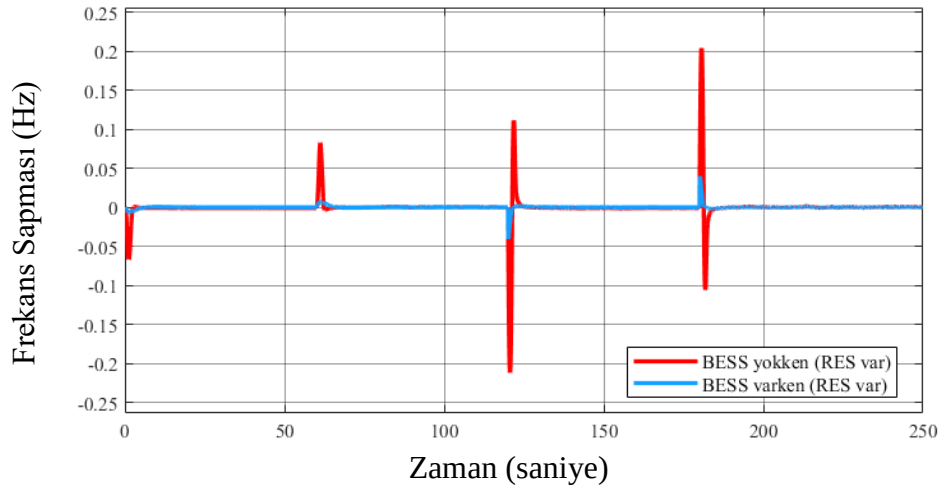
Çizelge 5.29. (devam) RES ve BESS içeren sistem için performans sonuçları

	t=60-120 saniye	Maksimum aşım	Minimum aşım	Oturma zamanı
$\Delta PL1 + \Delta P_{solar}$	Bölge-1	4,370e-2	-2,484e-3	1,077
	Bölge-2	6,640e-3	-5,861e-4	2,574
	Ara Bağlantı Hattı	1,155e-2	-9,364e-4	3,158
	t=120-180 saniye	Maksimum aşım	Minimum aşım	Oturma zamanı
$\Delta PL1 + \Delta P_{solar} + \Delta PL2$	Bölge-1	8,430e-4	-6,065e-3	2,553
	Bölge-2	1,634e-3	-4,085e-2	1,052
	Ara Bağlantı Hattı	1,041e-2	-9,070e-4	3,046
	t=180-250 saniye	Maksimum aşım	Minimum aşım	Oturma zamanı
$\Delta PL1 + \Delta P_{solar} + \Delta PL2 + \Delta P_{rüzgar}$	Bölge-1	5,887e-3	-6,110e-4	2,172
	Bölge-2	3,986e-2	-1,968e-3	1,051
	Ara Bağlantı Hattı	1,062e-3	-1,000e-2	3,121

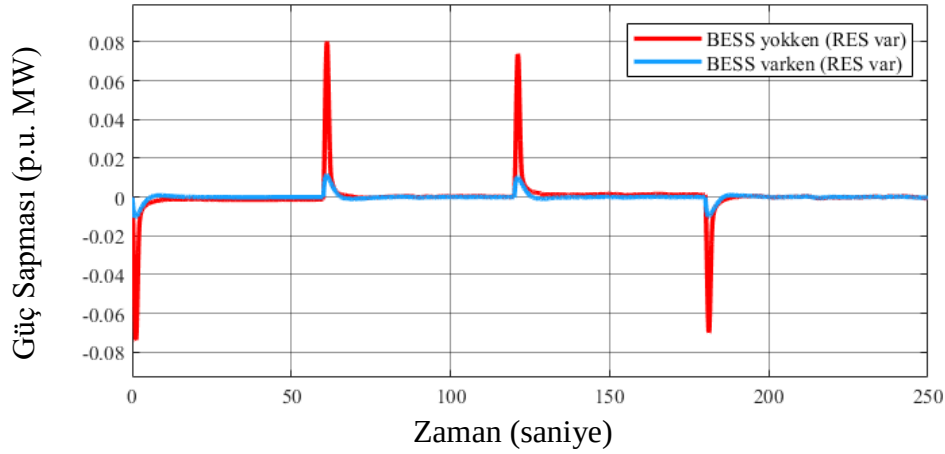
Şekil 5.56, Şekil 5.57 ve Şekil 5.58’de, yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip yük frekans kontrol sistemlerine batarya enerji depolama sistemleri eklendiğinde, BESS’in sistem performanslarına olan önemli katkısı gösterilmiştir:



Şekil 5.56. RES ve BESS içeren sistem için Bölge-1 karşılaştırmalı frekans sapması grafiği



Şekil 5.57. RES ve BESS içeren sistem için Bölge-2 karşılaştırmalı frekans sapması grafiği



Şekil 5.58. RES ve BESS içeren sistem için Ara bağlantı hattı karşılaştırmalı güç sapması grafiği

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, geliştirilen kontrolör ve hibrit sezgisel optimizasyon tekniği aracılığıyla, yenilenebilir enerji kaynaklarını içeren yük frekans kontrol sistemlerine batarya enerji depolama sistemleri eklendiğinde, sistemin frekans ve ara bağlantı hattı güç sapmalarını önemli derecede iyileştirdiği sonucuna ulaşılmıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında tek bölgeli, çok bölgeli (iki) ve mikrogrid yük frekans kontrol sistemlerinin analizleri farklı kontrolör yapıları ve farklı sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak haberleşme zaman gecikmesi içeren ve içermeyen tek bölgeli yük frekans kontrol sistemleri, SCA algoritması ve FOPID kontrolör kullanılarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatür sonuçları ile karşılaştırılarak, uygulanan yaklaşımlar ile sistem performanslarının güçlendirildiği gözlenmiştir.

İkinci olarak, haberleşme zaman gecikmesi içeren ve içermeyen çok bölgeli yük frekans kontrol sistemleri SMA algoritması ve 2DOF-FOPID kontrolör ile analiz edilmiştir. İki serbestlik derecesine sahip olan bu kontrolör yapısıyla sistem performanslarında önemli iyileştirmeler yapıldığı literatür sonuçları ile karşılaştırılarak gösterilmiştir.

Üçüncü olarak, çok bölgeli yük frekans kontrol sistemindeki haberleşme zaman gecikmelerinin etkisini ortadan kaldırmak için ve sistem performanslarını iyileştirmek için NN-FOPID geliştirilmiştir. Bu aşamada ilk olarak haberleşme zaman gecikmelerinin kontrolör ve dolayısıyla sistem performanslarına olan olumsuz etkileri gösterilmiştir. İlave olarak, geliştirilen NN-FOPID kontrolörün haberleşme zaman gecikmelerinin negatif etkisini azalttığı ve sistem performanslarını iyileştirdiği gösterilmiştir. Son olarak, geliştirilen NN-FOPID kontrolör sistemdeki farklı zaman gecikmeleri için uygulanmış ve farklı zaman gecikmelerinde bile nominal sistem performanslarına yakın sonuçlar bulunarak, geliştirilen NN-FOPID kontrolörün etkinliği gösterilmiştir.

Dördüncü olarak, haberleşme zaman gecikmesi içeren ve içermeyen yakıt hücresi tabanlı ve enerji depolama sistemlerine sahip mikrogrid sistemler analiz edilmiştir. İlk mikrogrid sisteminde dizel jeneratör, mikro türbin, yakıt hücresi, BESS ve FESS kaynakları kullanılmıştır. Sistem performansları kaskat PD-PI kontrolör için VSA ve GWO teknikleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak bu sistem için GWO'nun VSA'dan daha etkin olduğu gözlemlenmiştir. İkinci mikrogrid sistemine haberleşme zaman gecikmesi dahil edilmekle birlikte yakıt hücresi, RES, BESS ve FESS kaynakları kullanılmıştır. Bu sistemin analizleri FOPID kontrolör ve EO ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar

ilk olarak literatür ile karşılaştırılmış ve sistem performanslarını iyileştirildiği gözlemlenmiştir. Daha sonra hem haberleşme zaman gecikmelerinin hem de sistem sabitlerinin farklı oranlardaki değişimleri incelenmiş ve bulunan sonuçlardan, sistem parametrelerindeki değişimlerin, önerilen yaklaşımla tolere edildiği gösterilmiştir.

Son olarak, geliştirilen 2DOF-(RA+FOPD)-(FOPID) kontrolör ve HTVS'nin yük frekans kontrol sistemlerinde etkinliği, kullanılabilirliği ve başarılı performansı, çok bölgeli tek kaynaklı ve çok bölgeli çok kaynaklı olmak üzere iki farklı yük frekans kontrol sistemi üzerinde ispatlanmıştır. Daha sonra önerilen teknik ve kontrolör, ilk olarak rüzgar ve solar yenilenebilir enerji kaynakları ile GRC ve GDB lineersizliklerine sahip çok bölgeli bir güç sistemine uygulanmıştır. Böylece, geliştirilen yaklaşımların kompleks ve zor sistemlerde olan başarısı kanıtlanmıştır. Ardından da bu sisteme BESS ilave edilerek, enerji depolama sistemlerinin yük frekans kontrol sistemlerinin performanslarına olan olumlu katkıları gösterilmiştir.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen analizlerin ve elde edilen sonuçların, gelecek zamanlarda LFC ile ilgili yapılacak çalışmalara ışık tutacağı ve referans olacağı düşünülmektedir. İleriki çalışmalarda ise elektrikli arabaların (Electrical Vehicles-EV) daha da yaygınlaşacağı öngörüldüğünden, EV'lerin yük frekans kontrol sistemlerine dahil edilerek, şebeke ve sistem performanslarına olan etkilerinin incelenmesi ve analizleri planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Yalçın E., Çam E., Vardar T., Lüy M. (2013). PID kontrolör ile iki bölge güç sistemlerinde yük frekans kontrolünün incelenmesi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 5, 1-5.
2. Kundur P. (1994). *Power system stability and control*. New York: McGraw Hill.
3. Cao Y., Li C., He T., Chen Y., Li S. (2021). Novel rekasius substitution based exact method for delay margin analysis of multi-area load frequency control systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36, 5222-5234.
4. Jin L., Zhang C. K., He Y., Jiang L., Wu M. (2019). Delay-dependent stability analysis of multi-area load frequency control with enhanced accuracy and computation efficiency. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34, 3687-3696.
5. Zhang Y., Yang T. (2020). Decentralized switching control strategy for load frequency control in multi-area power systems with time delay and packet losses. *IEEE Access*, 8, 15838-15850.
6. Sonmez S., Ayasun S. (2018). Computation of PI controllers ensuring desired gain and phase margins for two-area load frequency control system with communication time delays. *Electric Power Components and Systems*, 46, 938-947.
7. Saka M., Gozde H., Eke I., Taplamacioglu M. C. (2022). Neural network based heuristic fractional order adaptive PID-controller for eliminating communication time delay in multi-area LFC. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, e3021, 1-15.
8. Saka M., Çoban M., Eke İ., Tezcan S. S., Taplamacioğlu M. C. (2021). A novel hybrid global optimization algorithm having training strategy: hybrid Taguchi-vortex search algorithm. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 29, 1908-1928.
9. Gozde H., Taplamacioglu 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.
10. Mi Y., Fu Y., Wang C., Wang P. (2013). Decentralized sliding mode load frequency control for multi-area power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28, 4301-4309.
11. Shabani H., Vahidi B., Ebrahimpour M. (2013). A robust PID controller based on imperialist competitive algorithm for load-frequency control of power systems. *ISA Transactions*, 52, 88-95.
12. 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.

13. Naidu K., Mokhlis H., Bakar A. H. A. (2014). Multiobjective optimization using weighted sum artificial bee colony algorithm for load frequency control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 55, 657-667.
14. Barisal A. K. (2015). Comparative performance analysis of teaching learning based optimization for automatic load frequency control of multi-source power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 66, 67-77.
15. Sahu R. K., Panda S., Padhan S. (2015). A novel hybrid gravitational search and pattern search algorithm for load frequency control of nonlinear power system. *Applied Soft Computing*, 29, 310-327.
16. Anwar M. N., Pan S. (2015). A new PID load frequency controller design method in frequency domain through direct synthesis approach. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 67, 560-569.
17. Guha D., Roy P. K., Banerjee S. (2016). Load frequency control of interconnected power system using grey wolf optimization. *Swarm and Evolutionary Computation*, 27, 97-115.
18. Sonmez S., Ayasun S. (2016). Stability region in the parameter space of PI controller for a single-area load frequency control system with time delay. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31, 829-830.
19. Sonmez S., Ayasun S., Nwankpa C. O. (2016). An exact method for computing delay margin for stability of load frequency control systems with constant communication delays. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31, 370-377.
20. Guha D., Roy P., Banerjee S. (2017). Quasi-oppositional symbiotic organism search algorithm applied to load frequency control. *Swarm and Evolutionary Computation*, 33, 46-67.
21. Guha D., Roy P. K., Banerjee S. (2017). Symbiotic organism search algorithm applied to load frequency control of multi-area power system. *Energy Systems*, 9, 439-468.
22. 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.
23. Saxena S. (2019). Load frequency control strategy via fractional-order controller and reduced-order modeling. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 104, 603-614.
24. Sönmez Ş., Ayasun S. (2019). Gain and phase margins-based delay margin computation of load frequency control systems using Rekasius substitution. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 41, 3385-3395.
25. Sharma J., Hote Y. V., Prasad R. (2019). PID controller design for interval load frequency control system with communication time delay. *Control Engineering Practice*, 89, 154-168.

26. Hasanien H. M., El-Fergany A. A. (2019). Salp swarm algorithm-based optimal load frequency control of hybrid renewable power systems with communication delay and excitation cross-coupling effect. *Electric Power Systems Research*, 176, 1-10.
27. Prasad S., Purwar S., Kishor N. (2019). Load frequency regulation using observer based non-linear sliding mode control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 104, 178-193.
28. 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.
29. 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.
30. Arya Y., Dahiya P., Çelik E., Sharma G., Gözde H, Nasiruddin I. AGC performance amelioration in multi-area interconnected thermal and thermal-hydro-gas power systems using a novel controller. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24, 384-396.
31. Abou El-Ela A. A., El-Sehiemy R. A., Shaheen A. M., Diab El-Gelil A. (2022). Design of cascaded controller based on coyote optimizer for load frequency control in multi-area power systems with renewable sources. *Control Engineering Practice*, 121, 1-17.
32. Irudayaraj A. X. R., Wahab N. I. A., Premkumar M., Radzi M. A. M., Sulaiman N. B., Veerasamy V., Farade R. A., Islam M. Z. (2022). Renewable sources-based automatic load frequency control of interconnected systems using chaotic atom search optimization. *Applied Soft Computing*, 119, 1-17.
33. Saadat H. (1999). *Power System Analysis*. New York: McGraw-Hill.
34. Committee PSDP. (2013). Dynamic Models for Turbine-Governors in Power System Studies. *IEEE Power & Energy Society, Technical Reports, report PES-TR1*, 1-117.
35. Gozde H. (2010). *Güç sistemlerinde yapay arı kolonisi algoritması yöntemi ile yük-frekans kontrolü optimizasyonu*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
36. Elgerd O. (1982). *Electric Energy Systems Theory*. New York:Mc Graw-Hill.
37. Zhu F., Zhou X., Zhang Y., Xu D., Fu J. (2021) A load frequency control strategy based on disturbance reconstruction for multi-area interconnected power system with hybrid energy storage system. *Energy Reports*, 7, 8849-8857.
38. Alhelou H. H., Golshan M. E. H, Hatziargyriou N. D. A. (2019). Decentralized functional observer based optimal LFC Considering unknown inputs, uncertainties, and cyber-attacks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(6), 4408-4417.

39. Yu D., Zhu H., Han W., Holburn D. (2019). Dynamic multi agent-based management and load frequency control of PV/Fuel cell/wind turbine/CHP in autonomous microgrid system. *Energy*, 173, 554-568.
40. Gholami K., Parvaneh M. H. (2019). A mutated salp swarm algorithm for optimum allocation of active and reactive power sources in radial distribution systems. *Applied Soft Computing Journal*, 85, 1-14.
41. Saka M., Eke I., Gozde H., Taplamacioglu M. C. (2020). *Tuning of fractional order PID parameters for load frequency control systems with time delayed via SCA*. 16th International Conference on "Technical and Physical Problems of Engineering", Istanbul, Turkey, 23-26.
42. Saka M., Demirci M., Eke I., Gozde H., Dursun M., Taplamacioglu M. C. (2022). *Analysis of fuel cell based time delayed load frequency control having energy storage systems*. International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Antalya, Turkey, 270-274.
43. Saka M., Eke İ., Taplamacıoğlu M. C. (2020). Analysis of communication time delayed automatic generation control via SMA with 2 DOF $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller for interconnected power system. *European Journal of Science and Technology*, special issue, 172-180.
44. Saka M., Gozde H., Eke I., Yusifbayli N., Taplamacioglu M. C. (2021). Comparative performance analysis of VSA and GWO techniques for load frequency control of single area fuel cell microgrid. *Electroenergetics, Electrotechnics, Electromechanics + Control*, 11(1), 1-9.
45. Podlubny I. (1999). Fractional-order systems and $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controllers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 44, 208-214.
46. Shah P., Agashe S. (2016). Review of fractional PID controller. *Mechatronics*, 38, 29-41.
47. Mohapatra T. K., Dey A. K., Sahu B. K. (2019). Implementation of SSA based two-degree-of freedom fractional order PID controller for AGC with diverse source of generations. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 7(6S2), 346-356.
48. Panda S., Patidar N. P., Kolhe M. (2016). *Cascaded PD-PI controller for active power frequency control of two-area multi-units power system*. International Conference on Power and Renewable Energy, Shanghai, China, 251-254.
49. Khokhar B., Dahiya S., Parmar K. P. S. (2020). A robust cascade controller for load frequency control of a standalone microgrid incorporating electric vehicles. *Electric Power Components and Systems*, 48, 711-726.
50. Basu M. (2013). Combined heat and power economic emission dispatch using nondominated sorting genetic algorithm-II. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 53, 135-141.

51. Park J. B., Jeong Y. W., Shin J. R., Lee K. Y. (2010). An improved particle swarm optimization for nonconvex economic dispatch problems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(1), 156-166.
52. Kennedy J., Eberhart R. (1995). *Particle swarm optimization*. IEEE International Conference on Neural Network, Perth, WA, Australia, 1942-1948.
53. Rashedi E., Nezamabadi-pour H., Saryazdi S. (2009). GSA: A gravitational search algorithm. *Information Sciences*, 179, 2232-2248.
54. Holland J. H. (1992). Genetic algorithms. *Scientific American*, 267, 66-72.
55. Mirjalili S. (2016). SCA: A sine cosine algorithm for solving optimization problems. *Knowledge-Based Systems*, 96, 120-133.
56. Li .S, Chen H., Wang M., Heidari A. A., Mirjalili S. (2020). Slime mould algorithm: A new method for stochastic optimization. *Future Generation Computer Systems*, 111, 300-323.
57. Doğan B., Ölmez T. (2015). A new metaheuristic for numerical function optimization: Vortex search algorithm. *Information Sciences*, 293, 125-145.
58. Mirjalili S., Mirjalili S. M., Lewis A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46-61.
59. Faramarzi A., Heidarinejad M., Stephens B., Mirjalili S. (2020). Equilibrium optimizer: A novel optimization algorithm. *Knowledge-Based Systems*, 191, 1-21.
60. Weng W. C., Yang F., Elsherbeni A. Z. (2007). Linear antenna array synthesis using Taguchi's method: A novel optimization technique in electromagnetics. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 55(3), 723-730.
61. Sambariya D. K., Fagna R. (2017). A robust PID controller for load frequency control of single area re-heat thermal power plant using elephant herding optimization techniques. *International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control*, Indore-India, 1-5.
62. Tan W. (2010). Unified tuning of PID load frequency controller for power systems via IMC. *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(1), 341-350.
63. Padhan D. G., Majhi S. (2013). A new control scheme for PID load frequency controller of single-area and multi-area power systems. *ISA Transactions*, 52, 242-251.
64. Saxena S., Hote Y. V. (2018). PI controller based load frequency control approach for single-area power system having communication delay. *International Federation of Automatic Control Papers Online*, 51, 622-626.
65. Abdel-Magid Y. L., Abido M. A. (2003). *AGC tuning of interconnected reheat thermal systems with particle swarm optimization*. 10th IEEE International Conference On Electronics, Circuits And Systems, Sharjah, United Arab Emirates, 376-379.

66. Sönmez Ş. (2019). Computation of stability regions for load frequency control systems including incommensurate time delays. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 27, 4596-4607.
67. Coffey J. (2017). Latency in optical fiber systems. *Commscope White Paper*, 1-7.
68. Özdemir M. T. (2020). The effects of the FOPI controller and time delay on stability region of the fuel cell microgrid. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 35064-35072.
69. 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, 1-20.
70. 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.
71. 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.
72. Sahu R. K., Panda S., Rout U. K., Sahoo D. K. (2016). Teaching learning based optimization algorithm for automatic generation control of power system using 2-DOF PID controller. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 77, 287-301.
73. Çelik E. (2020). Design of new fractional order PI–fractional order PD cascade controller through dragonfly search algorithm for advanced load frequency control of power systems. *Soft Computing*, 25, 1193-1217.
74. Padhy S., Panda S., Mahapatra S. (2017) A modified GWO technique based cascade PI-PD controller for AGC of power systems in presence of plug in electric vehicles. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20(2), 427-442.
75. Aditya S. K., Das D. (1999). Application of battery energy storage system to load frequency control of an isolated power system. *International Journal of Energy Research*, 23, 247-258.
76. Aditya S. K., Das D. (2001). Battery energy storage for load frequency control of an interconnected power system. *Electric Power Systems Research*, 58, 179-185.
77. Asyadili A. J. (2019). *Tunning of PID controller and battery energy storage system (BESS) for load frequency control (LFC) using bat algorithm (BA)*. Sepuluh Nopember Institute of Technology, Faculty of Electrical Technology, Electrical Engineering Department, Surabaya, Indonesia.
78. Kimbark E. W. (1971). *Direct Current Transmission*: New York: Wiley.
79. Salameh Z. M., Casacca M. A., Lynch W. A. (1992). A mathematical model for lead-acid batteries,. *IEEE Transaction on Energy Conversions*, 7(1):93-97.

80. Sen U., Kumar N. (2014). *Load frequency control with battery energy storage system*. International Conference on Power, Control and Embedded Systems (ICPCES), Allahabad, India, 1-6.
81. Aditya S. K., Das D. (2000). Load-frequency control of an interconnected hydro-thermal power system with new area control error considering battery energy storage facility. *International Journal Of Energy Research*, 24, 525-538.

EKLER

EK-1. NN-FOPID kontrolör için elde edilen veri seti

% NOT: T_h , governor zaman sabitini; T_t , türbin zaman sabitini; T_r , ara ısıtıcı zaman sabitini ve T_g , atalet yük zaman sabitini temsil etmektedir. K_p , K_i ve K_D ise kontrolör kazanç katsayılarını temsil etmektedir.

%%%%%%%% BÖLGE-1 İÇİN VERİ SETİ %%%%%%%%%

T_h	T_t	T_r	T_g	K_p	K_i	K_D
T_h Değişimi						
0,04	0,3	10	20	19,95409176	16,87448876	10,52222345
0,044	0,3	10	20	12,32029863	18,84743442	8,354493973
0,048	0,3	10	20	19,71995555	18,09801292	11,50415395
0,052	0,3	10	20	15,83391854	16,10527124	7,810008329
0,056	0,3	10	20	18,42199792	15,07837222	5,693872658
0,06	0,3	10	20	15,30600852	16,48441345	3,835286203
0,064	0,3	10	20	11,69594473	19,89501184	8,702635457
0,068	0,3	10	20	15,69817261	17,23868431	5,64717808
0,072	0,3	10	20	17,52967911	18,16497637	5,704069687
0,076	0,3	10	20	15,10334281	18,23602263	6,955077439
0,08	0,3	10	20	17,91272625	20,00000000	6,473109093
0,084	0,3	10	20	14,56614962	16,58410173	7,680016432
0,088	0,3	10	20	19,03419249	15,2551689	4,858682815
0,092	0,3	10	20	14,77369774	13,68641688	2,794117901
0,096	0,3	10	20	14,0944401	14,62276003	5,232077902
0,1	0,3	10	20	18,18270705	20,00000000	10,4846589
0,104	0,3	10	20	19,6834807	18,96185227	12,62479001
0,108	0,3	10	20	17,04520908	19,79888371	7,648109176
0,112	0,3	10	20	17,11167365	18,23858710	7,026606034
0,116	0,3	10	20	20,00000000	20,00000000	10,09816623
0,12	0,3	10	20	17,78808808	18,59948481	5,069529374
T_t Değişimi						
0,08	0,15	10	20	15,77982417	15,80014811	7,790746609

EK-1. (devam) NN-FOPID kontrolör için elde edilen veri seti

0,08	0,165	10	20	16,16842943	16,00854065	8,835505819
0,08	0,18	10	20	15,99721016	11,91675	4,239659821
0,08	0,195	10	20	15,49485776	16,17099529	6,359372623
0,08	0,21	10	20	20,00000000	19,38491163	7,368078371
0,08	0,225	10	20	18,61766868	16,4719963	2,098052794
0,08	0,24	10	20	13,79296851	19,71181585	4,938307764
0,08	0,255	10	20	18,88777501	17,38848329	7,61930538
0,08	0,27	10	20	14,3601239	13,53787632	4,298183923
0,08	0,285	10	20	13,04210991	12,57823269	3,193123565
0,08	0,3	10	20	17,69489991	18,10475665	9,154491263
0,08	0,315	10	20	15,10291074	16,95852299	3,21753138
0,08	0,33	10	20	17,38259831	17,29017199	6,803463184
0,08	0,345	10	20	14,05147161	16,38823194	9,151061338
0,08	0,36	10	20	18,54207261	13,60963537	4,29186762
0,08	0,375	10	20	16,92435634	19,25583324	6,021978975
0,08	0,39	10	20	16,25216704	10,30507888	4,764300309
0,08	0,405	10	20	18,12984334	20,00000000	7,66623791
0,08	0,42	10	20	19,12383797	19,69096746	9,578931545
0,08	0,435	10	20	19,73671954	20,0000000	6,777283755
0,08	0,45	10	20	19,85684233	20,0000000	5,385533964

T_r Değişimi

0,08	0,3	5	20	14,06084751	14,19124522	3,065606982
0,08	0,3	5,5	20	16,40860412	17,23741455	4,883499346
0,08	0,3	6	20	14,518779	16,7151995	9,767973391
0,08	0,3	6,5	20	16,19677749	19,40645957	4,741434795
0,08	0,3	7	20	19,31900781	18,48217329	8,325055649
0,08	0,3	7,5	20	20,000000	20,0000000	10,3981003
0,08	0,3	8	20	19,56910486	18,35019953	5,657809267
0,08	0,3	8,5	20	18,08626804	17,96117946	8,695736701
0,08	0,3	9	20	15,61734621	16,0793732	4,372802713

EK-1. (devam) NN-FOPID kontrolör için elde edilen veri seti

0,08	0,3	9,5	20	19,4328077	16,9080449	4,699553384
0,08	0,3	10	20	14,9379619	16,10094302	7,879871803
0,08	0,3	10,5	20	19,14975631	18,02469667	10,43853846
0,08	0,3	11	20	12,6240515	16,31694067	7,568411945
0,08	0,3	11,5	20	16,94521066	16,46139689	7,761078469
0,08	0,3	12	20	18,2559522	18,55089061	5,754303623
0,08	0,3	12,5	20	18,03818956	13,41176248	5,830980581
0,08	0,3	13	20	17,17522948	17,93234562	5,990091566
0,08	0,3	13,5	20	15,98308147	15,64876547	3,840333201
0,08	0,3	14	20	20,0000000	19,96617595	11,62295773
0,08	0,3	14,5	20	16,04774869	13,66659451	2,309873054
0,08	0,3	15	20	15,65584285	13,95335008	8,594187763

T_g Değişimi

0,08	0,3	10	10	18,79478586	20	11,16267652
0,08	0,3	10	11	16,6919205	18,10857524	11,77550891
0,08	0,3	10	12	17,97737003	15,75495731	8,430872923
0,08	0,3	10	13	18,61861956	18,88494281	7,948108745
0,08	0,3	10	14	19,44936407	17,21351352	8,087497906
0,08	0,3	10	15	16,14117905	8,712363264	6,554244737
0,08	0,3	10	16	18,80149874	18,86654224	8,478240581
0,08	0,3	10	17	15,78214405	15,87903703	8,435048792
0,08	0,3	10	18	15,79085744	15,67544895	3,674147984
0,08	0,3	10	19	14,20423926	15,10775271	3,886797305
0,08	0,3	10	20	19,08874722	16,88699126	4,072070224
0,08	0,3	10	21	18,36351034	17,78489447	2,785527176
0,08	0,3	10	22	11,79996746	19,10584384	6,988280027
0,08	0,3	10	23	16,38255991	16,47431361	5,730152822
0,08	0,3	10	24	19,93282448	15,68586735	7,23042521
0,08	0,3	10	25	18,81246686	17,84303844	8,95163158
0,08	0,3	10	26	19,14943232	14,86296806	7,139422678

EK-1. (devam) NN-FOPID kontrolör için elde edilen veri seti

0,08	0,3	10	27	18,06489576	18,16648906	9,590042236
0,08	0,3	10	28	18,14439208	19,2308489	5,862384315
0,08	0,3	10	29	12,43272882	17,72885568	6,54834126
0,08	0,3	10	30	18,70729984	16,53385384	6,130673796

 T_h-T_t Değişimi

0,04	0,15	10	20	19,75083056	19,91370501	2,927704907
0,044	0,165	10	20	19,92596117	10,49122865	4,528286107
0,048	0,18	10	20	15,57739738	18,26684841	4,944079149
0,052	0,195	10	20	14,54172543	13,16777629	6,322856112
0,056	0,21	10	20	17,12881791	19,11295913	3,636240555
0,06	0,225	10	20	17,33743741	17,54335092	5,246897308
0,064	0,24	10	20	18,94737778	19,58781406	6,141489269
0,068	0,255	10	20	19,15519722	20,000000	8,886064967
0,072	0,27	10	20	15,80401493	18,96519864	4,724813774
0,076	0,285	10	20	19,5997557	19,59940196	5,61136139
0,08	0,3	10	20	19,4234117	13,85279179	7,89266013
0,084	0,315	10	20	18,7247423	16,70003855	4,605234943
0,088	0,33	10	20	15,64010091	15,35162268	5,963294758
0,092	0,345	10	20	18,7832332	19,30885043	12,58618066
0,096	0,36	10	20	19,24141193	18,88753593	8,558949143
0,1	0,375	10	20	20,000000	20,000000	12,15335003
0,104	0,39	10	20	17,49441737	20,000000	11,3237863
0,108	0,405	10	20	16,80016128	17,10026931	6,731238297
0,112	0,42	10	20	18,84387131	18,50495942	7,784660471
0,116	0,435	10	20	17,7499615	15,76319068	5,832554644
0,12	0,45	10	20	19,86646844	19,91377145	12,72472937

 T_h-T_r Değişimi

0,04	0,3	5	20	14,59307198	13,43267501	7,050486561
0,044	0,3	5,5	20	17,93992028	18,61053859	10,70424023

EK-1. (devam) NN-FOPID kontrolör için elde edilen veri seti

0,048	0,3	6	20	16,62113806	16,73050889	6,557095895
0,052	0,3	6,5	20	16,93609412	16,79504097	7,62481192
0,056	0,3	7	20	19,71109225	18,28609692	5,517826811
0,06	0,3	7,5	20	15,96127611	14,67752339	4,859612088
0,064	0,3	8	20	14,30100595	16,76567415	3,796191184
0,068	0,3	8,5	20	15,27477708	15,10919431	3,275568908
0,072	0,3	9	20	15,51565026	16,89194168	3,610321067
0,076	0,3	9,5	20	16,59962223	16,77468452	3,869744894
0,08	0,3	10	20	14,57265805	18,15741964	6,624963814
0,084	0,3	10,5	20	13,54186739	15,42638237	3,967441572
0,088	0,3	11	20	14,71853443	16,99888899	6,354375452
0,092	0,3	11,5	20	14,30958031	15,16474933	4,989859346
0,096	0,3	12	20	15,60064014	15,51807802	3,803964469
0,1	0,3	12,5	20	15,23562357	16,03045446	4,945840571
0,104	0,3	13	20	17,66429572	17,2500418	8,775705436
0,108	0,3	13,5	20	19,10723112	19,4159875	5,354227121
0,112	0,3	14	20	19,61175368	20,00000	6,929661925
0,116	0,3	14,5	20	16,92510621	19,94452463	3,591862915
0,12	0,3	15	20	19,43991192	19,58361286	6,841558199

T_h-T_g Değişimi

0,04	0,3	10	10	13,37791225	10,54680189	5,999789935
0,044	0,3	10	11	13,77682719	18,47591232	5,871286137
0,048	0,3	10	12	19,97794648	16,73822342	11,29583411
0,052	0,3	10	13	15,31358517	17,56387712	6,414060244
0,056	0,3	10	14	17,34178911	20,000000	9,77425786
0,06	0,3	10	15	19,31420517	19,91128405	13,13583392
0,064	0,3	10	16	19,3099867	14,82353184	9,555602942
0,068	0,3	10	17	18,66564868	15,46866421	4,224796607
0,072	0,3	10	18	11,00372803	12,65276964	4,001287252
0,076	0,3	10	19	16,5057276	17,15739184	8,949966193

EK-1. (devam) NN-FOPID kontrolör için elde edilen veri seti

0,08	0,3	10	20	19,65101803	17,17164469	11,5962073
0,084	0,3	10	21	19,34633838	10,85585938	3,974569824
0,088	0,3	10	22	17,2337888	16,21389477	6,708637097
0,092	0,3	10	23	17,46524081	13,40050472	3,542647059
0,096	0,3	10	24	19,50991064	20,00000	9,497275536
0,1	0,3	10	25	15,12793165	16,44250974	3,642136314
0,104	0,3	10	26	15,02339321	18,74541021	3,853359814
0,108	0,3	10	27	17,8275954	14,73797757	5,372501311
0,112	0,3	10	28	19,42177418	17,47408886	6,174875861
0,116	0,3	10	29	14,36630301	12,18040909	7,47689717
0,12	0,3	10	30	18,7681106	19,79771952	11,02379571

T_r-T_r Değişimi

0,08	0,15	5	20	17,02671494	16,310295	3,733519579
0,08	0,165	5,5	20	16,4924515	16,18354467	7,458429398
0,08	0,18	6	20	18,50568239	17,15387538	4,931177251
0,08	0,195	6,5	20	18,40969442	17,4337204	8,889644578
0,08	0,21	7	20	15,09660837	17,37906841	4,307171549
0,08	0,225	7,5	20	14,86977651	14,66880164	7,042974382
0,08	0,24	8	20	14,2843157	18,91972393	9,391626414
0,08	0,255	8,5	20	17,35502939	15,48950514	2,902616369
0,08	0,27	9	20	20,00000	20,000000	3,49672495
0,08	0,285	9,5	20	10,17134615	17,33453042	5,031234899
0,08	0,3	10	20	17,73347515	18,08168169	8,551450985
0,08	0,315	10,5	20	13,54650972	12,89328219	4,533235198
0,08	0,33	11	20	14,02681793	19,98188998	6,845916761
0,08	0,345	11,5	20	19,05649298	18,95677612	7,592314283
0,08	0,36	12	20	16,72408331	13,8952076	3,621119343
0,08	0,375	12,5	20	18,57575718	13,06334358	8,175420291
0,08	0,39	13	20	15,86320715	15,20368476	7,70754446
0,08	0,405	13,5	20	18,49652565	16,32011889	5,901778845

EK-1. (devam) NN-FOPID kontrolör için elde edilen veri seti

0,08	0,42	14	20	16,62045523	12,15839945	4,307019875
0,08	0,435	14,5	20	16,74130892	17,0327539	8,888227401
0,08	0,45	15	20	18,08552854	14,78758485	4,510737554

T_r-T_g Değişimi

0,08	0,04	10	10	14,93990771	17,87680241	6,685054817
0,08	0,044	10	11	11,98530659	19,50134227	7,246786446
0,08	0,048	10	12	17,22073013	14,24649723	4,275898542
0,08	0,052	10	13	13,29158214	12,70584248	6,889563967
0,08	0,056	10	14	15,83144451	18,37237208	5,788436672
0,08	0,06	10	15	18,26963663	18,61898862	8,332805723
0,08	0,064	10	16	14,78065117	16,22968578	3,69318371
0,08	0,068	10	17	14,10008824	17,79603387	8,664723491
0,08	0,072	10	18	16,35722075	15,4085898	3,706500699
0,08	0,076	10	19	15,21769831	13,64541755	4,539585392
0,08	0,08	10	20	19,49963214	19,55235994	6,574591052
0,08	0,084	10	21	16,1828028	16,47886672	6,478306048
0,08	0,088	10	22	19,33167682	15,6773699	6,289589876
0,08	0,092	10	23	20,000000	20,000000	10,16877945
0,08	0,096	10	24	12,67150619	18,92634399	6,22015776
0,08	0,1	10	25	18,91858265	20,0000000	8,28346619
0,08	0,104	10	26	18,11820842	14,6529894	5,894533336
0,08	0,108	10	27	19,22336859	17,63856764	4,001943026
0,08	0,112	10	28	14,46095502	10,97296872	6,872430963
0,08	0,116	10	29	14,72032209	12,86505871	5,820727724
0,08	0,12	10	30	18,64979452	18,14017637	9,787437728

T_r-T_g Değişimi

0,08	0,3	5	10	18,64953978	19,98191691	3,229268462
0,08	0,3	5,5	11	13,12952809	13,06171011	3,825073633
0,08	0,3	6	12	18,5192004	13,21786745	5,851495852

EK-1. (devam) NN-FOPID kontrolör için elde edilen veri seti

0,08	0,3	6,5	13	17,55103917	15,69775303	4,184609758
0,08	0,3	7	14	18,16997771	18,62648759	9,966832865
0,08	0,3	7,5	15	13,13592642	17,56831649	6,727175937
0,08	0,3	8	16	18,96461895	17,46637087	9,222999292
0,08	0,3	8,5	17	18,22925759	17,92860635	3,001051207
0,08	0,3	9	18	18,21607659	13,25736313	4,687656921
0,08	0,3	9,5	19	17,21145119	12,7706561	3,99963373
0,08	0,3	10	20	14,82634796	17,1225123	6,390577882
0,08	0,3	10,5	21	16,65093488	18,54678901	4,502994577
0,08	0,3	11	22	16,83734764	13,47977915	4,642283826
0,08	0,3	11,5	23	14,75172064	18,36098165	3,081375291
0,08	0,3	12	24	15,59016317	15,36127675	6,599341167
0,08	0,3	12,5	25	17,74250275	12,6605344	7,847853383
0,08	0,3	13	26	16,3892804	15,43030693	6,259331022
0,08	0,3	13,5	27	18,68142633	17,50581256	5,360165132
0,08	0,3	14	28	18,77912428	20,00000000	8,869773324
0,08	0,3	14,5	29	18,05248813	20,00000000	11,47833104
0,08	0,3	15	30	19,29452872	15,8946262	6,302131083

T_h-T_i-T_r Değişimi

0,04	0,15	5	20	18,0065606	9,37224225	8,27401791
0,044	0,165	5,5	20	8,419498446	13,18769408	3,170219003
0,048	0,18	6	20	17,70266835	16,93555473	9,292917546
0,052	0,195	6,5	20	17,0127607	16,08411558	13,69794751
0,056	0,21	7	20	18,15602992	16,18174066	7,685987036
0,06	0,225	7,5	20	16,71415481	16,27692463	6,604444822
0,064	0,24	8	20	16,99212339	15,93548163	6,878837171
0,068	0,255	8,5	20	14,64908146	18,45391091	8,550985114
0,072	0,27	9	20	15,92068225	19,34675273	8,325655068
0,076	0,285	9,5	20	16,51576957	18,17905853	9,790466603
0,08	0,3	10	20	19,34423167	17,77651304	7,321594589

EK-1. (devam) NN-FOPID kontrolör için elde edilen veri seti

0,084	0,315	10,5	20	18,59359449	12,97509493	8,820519149
0,088	0,33	11	20	18,19442829	17,70225716	4,652771348
0,092	0,345	11,5	20	17,63791331	18,19084445	7,203929511
0,096	0,36	12	20	10,14526261	15,93051233	4,70741679
0,1	0,375	12,5	20	18,52983185	18,88189933	9,541526409
0,104	0,39	13	20	16,96145725	18,35268885	7,217311224
0,108	0,405	13,5	20	17,49659707	18,67294943	11,04599847
0,112	0,42	14	20	18,02713533	18,09317659	7,714658337
0,116	0,435	14,5	20	15,98245241	15,82596205	6,676445263
0,12	0,45	15	20	17,2385976	16,92376544	8,173531207

T_i-T_r-T_g Değişimi

0,08	0,15	5	10	15,01628554	18,83764684	8,943612142
0,08	0,165	5,5	11	16,94084043	12,62257699	6,656087853
0,08	0,18	6	12	18,71689241	19,78870786	7,73673559
0,08	0,195	6,5	13	15,40178454	18,58458985	3,32799453
0,08	0,21	7	14	19,18959838	11,51036455	6,743606991
0,08	0,225	7,5	15	13,35132053	19,18015759	5,596427676
0,08	0,24	8	16	15,59517114	12,29714765	6,768550345
0,08	0,255	8,5	17	16,84774637	13,6982425	3,285493375
0,08	0,27	9	18	18,55871322	15,1580583	4,071257547
0,08	0,285	9,5	19	12,64671423	12,53754518	4,711376159
0,08	0,3	10	20	19,37904353	17,64297258	8,723784889
0,08	0,315	10,5	21	18,11322052	19,33935806	6,06692233
0,08	0,33	11	22	18,21053623	18,33284744	7,70174796
0,08	0,345	11,5	23	17,43233961	17,44492909	4,809875467
0,08	0,36	12	24	17,95356045	17,06225499	5,922056436
0,08	0,375	12,5	25	19,97476681	14,45976996	5,263311335
0,08	0,39	13	26	19,40681294	18,1670153	5,763562192
0,08	0,405	13,5	27	14,44987114	17,18221416	9,220432949
0,08	0,42	14	28	17,66301324	19,16367811	6,482384541

EK-1. (devam) NN-FOPID kontrolör için elde edilen veri seti

0,08	0,435	14,5	29	18,32071069	18,34566209	9,168172281
0,08	0,45	15	30	14,47815248	16,33033457	6,45318926

T_r-T_g-T_h Değişimi

0,04	0,3	5	10	12,71121875	11,15189922	3,266646651
0,044	0,3	5,5	11	18,55239735	17,54608573	3,837016781
0,048	0,3	6	12	14,80851929	15,65378354	6,996620966
0,052	0,3	6,5	13	18,16007535	16,16608642	4,994514663
0,056	0,3	7	14	20,000000	20,000000	6,027397142
0,06	0,3	7,5	15	17,50934295	17,3006783	6,062541322
0,064	0,3	8	16	14,6912777	14,43550763	6,317053537
0,068	0,3	8,5	17	16,67772841	19,59709575	4,72688233
0,072	0,3	9	18	19,20394079	14,02900824	4,700319245
0,076	0,3	9,5	19	15,0681488	14,25273085	5,660993073
0,08	0,3	10	20	19,90508529	10,52149824	7,910269284
0,084	0,3	10,5	21	19,06484194	11,1188023	7,570080833
0,088	0,3	11	22	13,11885678	14,58489963	4,389686034
0,092	0,3	11,5	23	19,81521054	12,61402921	4,100453543
0,096	0,3	12	24	19,7440218	10,89166531	3,507516885
0,1	0,3	12,5	25	17,10245907	13,45028768	6,436252536
0,104	0,3	13	26	17,61924704	19,00932913	10,25913152
0,108	0,3	13,5	27	18,25310203	17,94045362	8,626588044
0,112	0,3	14	28	16,6131973	16,37251783	9,859527438
0,116	0,3	14,5	29	17,85436858	16,22950272	6,442119218
0,12	0,3	15	30	18,75063822	19,8866898	11,0630941

T_g-T_h-T_i Değişimi

0,04	0,15	10	10	16,29447373	18,11583874	2,539736326
0,044	0,165	10	11	8,790256739	12,23547501	2,8734513
0,048	0,18	10	12	16,10978849	11,53443031	3,658449388
0,052	0,195	10	13	18,13067558	14,53327789	7,525444206

EK-1. (devam) NN-FOPID kontrolör için elde edilen veri seti

0,056	0,21	10	14	12,75162725	16,96044542	5,29558053
0,06	0,225	10	15	14,58027809	16,77823232	3,010447507
0,064	0,24	10	16	14,14506971	15,62754104	5,759539512
0,068	0,255	10	17	15,6931149	15,21671234	7,71979022
0,072	0,27	10	18	18,94022652	17,28792535	7,796568773
0,076	0,285	10	19	15,44663996	12,41908441	3,294530367
0,08	0,3	10	20	18,4548914	16,00744185	5,718937128
0,084	0,315	10	21	15,25171079	17,64972615	5,69900436
0,088	0,33	10	22	16,20518915	14,73245273	5,956156414
0,092	0,345	10	23	17,49406847	19,25192195	9,471531175
0,096	0,36	10	24	18,33675638	18,77118918	10,1082006
0,1	0,375	10	25	16,27953854	17,96888274	8,584770862
0,104	0,39	10	26	16,93694914	16,79804458	9,947274104
0,108	0,405	10	27	20,00000	20,000000	12,87396099
0,112	0,42	10	28	19,38581993	16,85975531	8,385131959
0,116	0,435	10	29	18,03876241	15,20525428	8,136602693
0,12	0,45	10	30	16,72112794	14,90474108	8,632260537

T_h-T_r-T_r-T_g Değişimi

0,04	0,15	5	10	17,18960214	6,809566215	2,762408061
0,044	0,165	5,5	11	15,50478885	15,8422526	5,181620914
0,048	0,18	6	12	11,38222051	17,50065453	6,971499542
0,052	0,195	6,5	13	18,10661214	12,80388497	3,258791429
0,056	0,21	7	14	19,99630188	12,5850145	5,656801832
0,06	0,225	7,5	15	19,35405766	17,91939661	3,800509536
0,064	0,24	8	16	14,642077	14,99696041	8,146392062
0,068	0,255	8,5	17	14,98502519	16,83703469	3,33779414
0,072	0,27	9	18	16,36529806	13,6529991	5,373466088
0,076	0,285	9,5	19	14,98657411	17,51038477	6,984245027
0,08	0,3	10	20	19,65881023	14,19277405	3,50872291
0,084	0,315	10,5	21	19,02605379	19,53192138	5,561145039

EK-1. (devam) NN-FOPID kontrolör için elde edilen veri seti

0,088	0,33	11	22	18,66458224	19,43183766	7,218560401
0,092	0,345	11,5	23	18,30997738	16,22513459	7,460286497
0,096	0,36	12	24	19,67833953	19,59579744	5,003060272
0,1	0,375	12,5	25	18,13941379	18,35911706	11,32913218
0,104	0,39	13	26	16,39415521	16,67957347	6,056682845
0,108	0,405	13,5	27	18,44861066	18,34101853	12,91866569
0,112	0,42	14	28	18,18099684	17,8912089	7,97034322
0,116	0,435	14,5	29	19,09337503	17,87483806	10,58705745
0,12	0,45	15	30	16,33390546	16,60108425	9,780786649

%%%%%%%%%%%% BÖLGE-2 İÇİN VERİ SETİ %%%%%%%%%%

T _h	T _t	T _r	T _g	K _p	K _i	K _D
T _h Değişimi						
0,04	0,3	10	20	15,97473437	11,73889894	6,035055522
0,044	0,3	10	20	17,91207869	18,03873761	9,808472724
0,048	0,3	10	20	17,44231497	19,26729224	5,935205855
0,052	0,3	10	20	13,06523485	15,98421913	4,677881565
0,056	0,3	10	20	20,00000	14,76153661	13,0699264
0,06	0,3	10	20	18,51841106	19,74823229	4,95454507
0,064	0,3	10	20	16,63247014	18,00531517	10,14106375
0,068	0,3	10	20	20,0000000	20,0000000	8,552543086
0,072	0,3	10	20	12,61914138	12,70241448	3,779347576
0,076	0,3	10	20	12,04951636	11,11395427	3,330679908
0,08	0,3	10	20	18,7865711	14,0553997	3,722440408
0,084	0,3	10	20	16,07321486	15,09940342	4,152097312
0,088	0,3	10	20	18,24439954	13,67931804	6,06061581
0,092	0,3	10	20	17,53110873	19,00424656	9,656016724
0,096	0,3	10	20	17,06517788	13,2574626	2,085261223
0,1	0,3	10	20	18,70833398	19,79173893	9,314317485
0,104	0,3	10	20	19,65191575	19,43768519	8,577850951
0,108	0,3	10	20	17,86595411	18,0627483	6,734167876

EK-1. (devam) NN-FOPID kontrolör için elde edilen veri seti

0,112	0,3	10	20	18,49857554	18,20012391	7,642958244
0,116	0,3	10	20	15,93565451	15,88550266	4,141989311
0,12	0,3	10	20	14,90230809	16,91615819	3,168768036

T_t Değişimi

0,08	0,15	10	20	16,37816756	15,67747345	3,874154658
0,08	0,165	10	20	16,18997939	15,68439847	8,175906649
0,08	0,18	10	20	16,00303196	14,78529255	9,070733774
0,08	0,195	10	20	14,18719421	14,88892762	4,758931933
0,08	0,21	10	20	17,12878471	14,21755828	5,266672315
0,08	0,225	10	20	18,59689885	18,71675435	5,307158698
0,08	0,24	10	20	18,75212957	18,78456231	11,92612973
0,08	0,255	10	20	18,36476453	12,15982774	4,365999495
0,08	0,27	10	20	15,76526985	20,00000	7,682945528
0,08	0,285	10	20	18,64370964	11,75416568	5,212060234
0,08	0,3	10	20	16,97703971	13,99889557	7,018514074
0,08	0,315	10	20	15,13873869	19,68463505	4,39680047
0,08	0,33	10	20	19,61736155	19,24698015	8,041353389
0,08	0,345	10	20	19,8420369	19,71958559	10,72359114
0,08	0,36	10	20	16,09036914	16,38388277	3,932513043
0,08	0,375	10	20	16,35452337	16,6082277	8,709011327
0,08	0,39	10	20	19,29926544	19,11872296	11,09392007
0,08	0,405	10	20	15,0041934	19,70146774	8,942334829
0,08	0,42	10	20	17,91990581	19,12841415	2,626034363
0,08	0,435	10	20	17,11609066	13,1936283	7,373599039
0,08	0,45	10	20	19,47884977	19,54915272	9,11287472

T_r Değişimi

0,08	0,3	5	20	16,05109252	17,53886291	7,635322617
0,08	0,3	5,5	20	15,45341692	15,10594641	7,905516235
0,08	0,3	6	20	17,4485408	16,54984311	6,760974666

EK-1. (devam) NN-FOPID kontrolör için elde edilen veri seti

0,08	0,3	6,5	20	19,10990381	13,88808663	5,859851031
0,08	0,3	7	20	16,09953168	18,94133491	8,850549851
0,08	0,3	7,5	20	16,45760212	16,50059473	5,402485944
0,08	0,3	8	20	16,19350647	18,96078647	4,051851012
0,08	0,3	8,5	20	18,32680358	17,1062094	7,333679281
0,08	0,3	9	20	14,60703267	16,16670173	3,473868934
0,08	0,3	9,5	20	18,53039394	11,80513777	7,532304898
0,08	0,3	10	20	15,16084219	13,17652909	6,23316182
0,08	0,3	10,5	20	16,35881279	18,92956355	4,341143015
0,08	0,3	11	20	15,36960138	15,90466066	3,079488349
0,08	0,3	11,5	20	18,62907894	18,27377084	9,034232285
0,08	0,3	12	20	17,11825932	15,36808411	4,680030227
0,08	0,3	12,5	20	14,36510038	16,37757419	5,150880742
0,08	0,3	13	20	13,43656613	18,63934416	5,684991934
0,08	0,3	13,5	20	17,77251965	13,68199712	6,563955777
0,08	0,3	14	20	18,78059907	13,79708388	6,093699999
0,08	0,3	14,5	20	18,79579189	14,45520482	5,489446238
0,08	0,3	15	20	17,05173259	17,09716123	3,781435832

T_g Değişimi

0,08	0,3	10	10	16,13025015	13,42438391	4,722342166
0,08	0,3	10	11	16,72226587	13,61725317	5,616082207
0,08	0,3	10	12	15,02172898	15,52841728	5,111054698
0,08	0,3	10	13	17,07208332	19,97265013	6,842948468
0,08	0,3	10	14	19,09440408	16,94721592	6,950863278
0,08	0,3	10	15	14,84999208	18,13214656	4,189147327
0,08	0,3	10	16	17,58699216	17,6527155	3,647583516
0,08	0,3	10	17	17,02916624	15,14505355	7,640569996
0,08	0,3	10	18	17,34478369	18,47263867	6,092122584
0,08	0,3	10	19	16,50368406	15,80770071	8,348851948
0,08	0,3	10	20	19,30979039	10,8088083	5,702395532

EK-1. (devam) NN-FOPID kontrolör için elde edilen veri seti

0,08	0,3	10	21	19,45949454	19,51424426	13,51553717
0,08	0,3	10	22	16,95700014	15,0176175	5,4005538
0,08	0,3	10	23	19,62468964	19,54721143	5,622345402
0,08	0,3	10	24	11,71164973	18,31327791	6,22492348
0,08	0,3	10	25	14,60718127	18,70577755	7,190738178
0,08	0,3	10	26	18,01294799	16,01301273	6,876605448
0,08	0,3	10	27	13,92847243	19,36900064	3,218399954
0,08	0,3	10	28	19,54972229	20,00000	12,74772062
0,08	0,3	10	29	13,9350741	15,42064097	4,000811888
0,08	0,3	10	30	13,47366352	18,29425666	7,0243547

T_h-T_t Değişimi

0,04	0,15	10	20	15,44280227	16,7763149	5,372269515
0,044	0,165	10	20	15,63724069	16,47595436	4,418630915
0,048	0,18	10	20	20,00000	20,00000	11,37107769
0,052	0,195	10	20	17,50405164	17,45780175	7,765637159
0,056	0,21	10	20	15,39444523	15,32521151	6,037948338
0,06	0,225	10	20	16,13478037	17,20106257	3,010447507
0,064	0,24	10	20	14,14506971	15,62754104	5,759539512
0,068	0,255	10	20	15,6931149	15,21671234	7,71979022
0,072	0,27	10	20	17,76886677	17,59806973	5,900060484
0,076	0,285	10	20	15,44663996	12,41908441	3,294530367
0,08	0,3	10	20	18,4548914	16,00744185	5,718937128
0,084	0,315	10	20	17,18640823	19,48443262	11,41676855
0,088	0,33	10	20	16,20518915	14,73245273	5,956156414
0,092	0,345	10	20	18,51248204	19,43973702	10,48994475
0,096	0,36	10	20	18,33675638	18,77118918	10,1082006
0,1	0,375	10	20	16,27953854	17,96888274	8,584770862
0,104	0,39	10	20	15,10440803	19,60909699	4,695652813
0,108	0,405	10	20	20,000000	20,0000000	12,87396099
0,112	0,42	10	20	13,93686026	17,37364255	5,105004989

EK-1. (devam) NN-FOPID kontrolör için elde edilen veri seti

0,116	0,435	10	20	18,03876241	15,20525428	8,136602693
0,12	0,45	10	20	16,72112794	14,90474108	8,632260537

T_h-T_r Değişimi

0,04	0,3	5	20	13,55035787	19,31942338	9,644608109
0,044	0,3	5,5	20	18,19027777	18,29648757	10,47895299
0,048	0,3	6	20	11,38222051	17,50065453	6,971499542
0,052	0,3	6,5	20	17,58301993	17,93528949	3,906963683
0,056	0,3	7	20	19,99630188	12,5850145	5,656801832
0,06	0,3	7,5	20	19,35405766	17,91939661	3,800509536
0,064	0,3	8	20	14,61043041	14,92794787	8,146392062
0,068	0,3	8,5	20	14,98502519	16,83703469	3,33779414
0,072	0,3	9	20	13,74065379	12,95820115	5,286303115
0,076	0,3	9,5	20	14,98657411	17,51038477	6,984245027
0,08	0,3	10	20	19,65881023	14,19277405	3,50872291
0,084	0,3	10,5	20	13,60314953	15,85112677	2,552066741
0,088	0,3	11	20	18,66458224	19,43183766	7,218560401
0,092	0,3	11,5	20	18,30997738	16,22513459	7,460286497
0,096	0,3	12	20	19,67833953	19,59579744	5,003060272
0,1	0,3	12,5	20	14,54584161	14,49871533	6,418957223
0,104	0,3	13	20	13,61637845	18,46395046	3,056682845
0,108	0,3	13,5	20	19,48762646	14,52851958	2,959296608
0,112	0,3	14	20	18,18099684	17,8912089	7,97034322
0,116	0,3	14,5	20	19,00736803	13,88572495	4,13613054
0,12	0,3	15	20	15,46553902	17,32395776	6,525046631

T_h-T_g Değişimi

0,04	0,3	10	10	17,96849389	17,01412921	5,135838341
0,044	0,3	10	11	16,40751758	17,59750212	2,397269823
0,048	0,3	10	12	16,9582432	18,9011215	7,539996746
0,052	0,3	10	13	19,35070606	19,39795209	9,059687824

EK-1. (devam) NN-FOPID kontrolör için elde edilen veri seti

0,056	0,3	10	14	14,140565	16,27221967	6,3161668
0,06	0,3	10	15	16,64175923	19,43185508	4,365425449
0,064	0,3	10	16	18,88722524	7,006957237	3,859958898
0,068	0,3	10	17	18,63299329	17,75014423	3,681704436
0,072	0,3	10	18	19,23567322	16,05348599	5,947559788
0,076	0,3	10	19	17,40382376	17,44043322	6,266043897
0,08	0,3	10	20	17,84934179	17,08157595	6,210799731
0,084	0,3	10	21	18,1447019	15,04438845	5,723504634
0,088	0,3	10	22	18,99975417	12,49364347	4,138958829
0,092	0,3	10	23	18,70024492	19,4682617	7,450527801
0,096	0,3	10	24	18,78462742	18,7908103	5,539172732
0,1	0,3	10	25	20,0000000	20,000000	12,48052362
0,104	0,3	10	26	16,75531475	14,34606383	4,701343409
0,108	0,3	10	27	19,44122275	19,88147772	6,935725265
0,112	0,3	10	28	14,59788408	18,98103708	4,548742378
0,116	0,3	10	29	18,61074238	10,28388652	6,126067748
0,12	0,3	10	30	20,0000000	18,73034837	10,77386223

T_r-T_r Değişimi

0,08	0,15	5	20	18,17088807	14,10593488	4,866606269
0,08	0,165	5,5	20	19,80264666	19,14290917	6,736365319
0,08	0,18	6	20	16,17163349	16,40687731	6,398705915
0,08	0,195	6,5	20	11,62754948	17,43363953	4,138141542
0,08	0,21	7	20	19,94200161	20,00000	12,12390377
0,08	0,225	7,5	20	19,86521504	15,15072684	5,501192131
0,08	0,24	8	20	15,40174904	18,82247935	2,629295756
0,08	0,255	8,5	20	16,72104853	14,23611016	4,297990303
0,08	0,27	9	20	14,4994788	13,80640774	2,559878935
0,08	0,285	9,5	20	12,51200113	18,7765309	5,7380804
0,08	0,3	10	20	19,5996862	19,53468356	9,88076144
0,08	0,315	10,5	20	16,14272176	15,71774427	2,64934802

EK-1. (devam) NN-FOPID kontrolör için elde edilen veri seti

0,08	0,33	11	20	17,87962648	19,01433398	9,247107905
0,08	0,345	11,5	20	18,78103172	18,3868665	9,993050972
0,08	0,36	12	20	15,08757759	15,86991906	5,827385128
0,08	0,375	12,5	20	14,79079154	15,15132635	4,936220292
0,08	0,39	13	20	16,0847256	11,91587161	6,499739669
0,08	0,405	13,5	20	17,04533385	17,88922334	8,998944488
0,08	0,42	14	20	16,85835768	18,48021466	2,944100954
0,08	0,435	14,5	20	15,38926392	15,88578538	7,570938607
0,08	0,45	15	20	16,27894485	17,28513245	9,280867379

T_i-T_g Değişimi

0,08	0,04	10	10	15,60209437	16,73021543	6,421865289
0,08	0,044	10	11	15,73642657	8,525447081	4,603723741
0,08	0,048	10	12	18,58744252	17,80487203	7,87472605
0,08	0,052	10	13	14,01100538	18,01522229	2,858215619
0,08	0,056	10	14	17,65263538	19,39158287	8,404533294
0,08	0,06	10	15	18,25319822	19,78696	9,686479089
0,08	0,064	10	16	16,32534607	16,83962428	7,344007127
0,08	0,068	10	17	19,24172153	18,94372843	5,832836718
0,08	0,072	10	18	17,13523582	16,92372164	5,934012397
0,08	0,076	10	19	12,47646332	14,27303045	8,911182661
0,08	0,08	10	20	16,60882278	13,47241741	2,789181958
0,08	0,084	10	21	18,62921149	19,52704552	6,624088552
0,08	0,088	10	22	15,9427925	14,30914489	5,369129243
0,08	0,092	10	23	17,5093591	13,62389482	2,275796149
0,08	0,096	10	24	20,00000	19,86502625	3,776112368
0,08	0,1	10	25	19,06207077	16,29865022	6,991976092
0,08	0,104	10	26	20,000000	20,000000	10,79765743
0,08	0,108	10	27	16,999446	14,50078887	8,682025623
0,08	0,112	10	28	15,77116875	11,17932601	5,888196336
0,08	0,116	10	29	15,32911113	13,79150098	7,544773614

EK-1. (devam) NN-FOPID kontrolör için elde edilen veri seti

0,08	0,12	10	30	15,19996391	18,68658487	6,618864714
------	------	----	----	-------------	-------------	-------------

T_r-T_g Değişimi

0,08	0,3	5	10	18,7385327	11,97839395	6,106375699
0,08	0,3	5,5	11	18,99876868	13,17965851	8,648898944
0,08	0,3	6	12	18,78909558	13,82824077	5,435961544
0,08	0,3	6,5	13	19,66394252	14,46347152	3,751168683
0,08	0,3	7	14	19,16418627	16,35292153	8,477909414
0,08	0,3	7,5	15	17,14665326	12,14311631	3,942366656
0,08	0,3	8	16	18,68649559	15,90359916	9,085227808
0,08	0,3	8,5	17	16,68235715	18,12914787	8,103150404
0,08	0,3	9	18	18,04102685	13,38623165	3,427512631
0,08	0,3	9,5	19	20,000000	18,63791318	7,276315904
0,08	0,3	10	20	15,62847871	16,36104729	4,461647625
0,08	0,3	10,5	21	17,82327624	19,06668263	3,617524128
0,08	0,3	11	22	14,68727103	14,91005383	2,539567088
0,08	0,3	11,5	23	16,84464955	19,42932442	2,857189829
0,08	0,3	12	24	17,01398609	14,48328659	4,649939583
0,08	0,3	12,5	25	18,648132	13,28587445	8,510674824
0,08	0,3	13	26	15,89084939	18,48866192	9,326154303
0,08	0,3	13,5	27	14,16472911	20,000000	9,205135294
0,08	0,3	14	28	20,000000	19,24054711	4,873457799
0,08	0,3	14,5	29	17,84611754	17,65338732	8,55228572
0,08	0,3	15	30	17,26824088	17,15574694	8,948052368

T_h-T_i-T_r Değişimi

0,04	0,15	5	20	16,63682457	14,26390206	5,999481782
0,044	0,165	5,5	20	20,00000000	20,00000000	8,387046357
0,048	0,18	6	20	19,65214603	19,67940442	9,51959967
0,052	0,195	6,5	20	19,84706589	14,35701649	7,21991099
0,056	0,21	7	20	17,05934671	20,000000	5,149319767

EK-1. (devam) NN-FOPID kontrolör için elde edilen veri seti

0,06	0,225	7,5	20	18,48293743	19,91609143	3,001797454
0,064	0,24	8	20	18,74598833	18,57301293	7,553634697
0,068	0,255	8,5	20	17,23552405	17,27100784	5,74887631
0,072	0,27	9	20	18,21272453	19,01239514	10,3263059
0,076	0,285	9,5	20	17,78758826	15,93799163	4,048052042
0,08	0,3	10	20	15,35670456	19,08824948	2,353747425
0,084	0,315	10,5	20	19,86620671	18,95821279	5,133650521
0,088	0,33	11	20	17,50469858	17,86361435	7,111347704
0,092	0,345	11,5	20	15,26009184	19,59530667	4,056626776
0,096	0,36	12	20	16,86699242	13,22480806	4,021730651
0,1	0,375	12,5	20	14,59255893	20,0000000	9,987880634
0,104	0,39	13	20	15,01076202	16,34719112	8,433844903
0,108	0,405	13,5	20	17,63372663	17,93766964	5,072743968
0,112	0,42	14	20	16,52657624	16,93525294	9,715007975
0,116	0,435	14,5	20	19,49438328	18,44202401	9,026053802
0,12	0,45	15	20	18,45455936	17,9787452	7,543948837

T_r-T_r-T_g Değişimi

0,08	0,15	5	10	16,17093145	19,54929252	3,461978549
0,08	0,165	5,5	11	12,76749864	12,76552442	5,690602299
0,08	0,18	6	12	15,96168797	18,12115064	6,621640398
0,08	0,195	6,5	13	15,9372201	14,95445581	3,137421266
0,08	0,21	7	14	19,09527575	16,92078183	9,41419482
0,08	0,225	7,5	15	18,66408994	19,4649373	5,687232548
0,08	0,24	8	16	17,84939371	14,97993093	5,512606573
0,08	0,255	8,5	17	16,35580857	17,21021575	7,42410207
0,08	0,27	9	18	12,92743154	17,37995154	5,613990664
0,08	0,285	9,5	19	18,6207866	15,18518406	2,367111937
0,08	0,3	10	20	12,87193876	18,02983536	7,705338992
0,08	0,315	10,5	21	19,01072726	19,1882308	4,53507681
0,08	0,33	11	22	16,96356247	17,90559718	9,180261052

EK-1. (devam) NN-FOPID kontrolör için elde edilen veri seti

0,08	0,345	11,5	23	15,62780662	18,46699747	7,880798919
0,08	0,36	12	24	16,7489952	15,12667524	9,073283647
0,08	0,375	12,5	25	16,10969714	17,50159278	7,335747262
0,08	0,39	13	26	18,97266872	17,8572088	4,246500625
0,08	0,405	13,5	27	18,79231607	17,61868914	6,493451385
0,08	0,42	14	28	17,75464023	17,75511201	8,127726486
0,08	0,435	14,5	29	18,36724195	20,00000	13,14973695
0,08	0,45	15	30	15,95984415	14,25090972	3,543794266

T_r-T_g-T_h Değişimi

0,04	0,3	5	10	17,12326599	17,71101681	6,340958767
0,044	0,3	5,5	11	20,00000	17,97532597	8,832122945
0,048	0,3	6	12	18,4328756	15,40803885	4,301884858
0,052	0,3	6,5	13	18,3694339	15,83934696	12,09638025
0,056	0,3	7	14	20,00000	16,82902805	4,5828372
0,06	0,3	7,5	15	16,36533409	16,73992401	4,669086405
0,064	0,3	8	16	17,79925152	19,64351012	13,62545797
0,068	0,3	8,5	17	20,00000	20,00000	10,20284065
0,072	0,3	9	18	17,76627349	19,84233457	7,676359654
0,076	0,3	9,5	19	18,00007436	17,49346403	4,504236385
0,08	0,3	10	20	14,01348452	14,05383175	2,930926125
0,084	0,3	10,5	21	16,89554329	18,17901323	2,883098606
0,088	0,3	11	22	17,20788529	18,80045384	6,327151461
0,092	0,3	11,5	23	19,8486732	8,09051188	4,762420304
0,096	0,3	12	24	17,12327145	17,22074073	4,361369268
0,1	0,3	12,5	25	19,78983432	13,45256413	7,573381774
0,104	0,3	13	26	18,26614202	15,70042481	4,096341966
0,108	0,3	13,5	27	16,94347475	15,47653263	7,729813978
0,112	0,3	14	28	15,34668071	15,32704345	7,184257506
0,116	0,3	14,5	29	17,64800845	18,20929636	8,613387839
0,12	0,3	15	30	17,09651832	20,00000	11,42956189

EK-1. (devam) NN-FOPID kontrolör için elde edilen veri seti

				T _g -T _h -T _t Değişimi		
0,04	0,15	10	10	16,88118286	15,43792981	5,782148754
0,044	0,165	10	11	19,2865131	17,46444975	8,702701497
0,048	0,18	10	12	19,20256887	16,41416344	6,0829299
0,052	0,195	10	13	18,83548608	13,72711172	6,623150016
0,056	0,21	10	14	16,38857829	15,79065357	10,39807696
0,06	0,225	10	15	16,0749689	14,20146488	4,115410722
0,064	0,24	10	16	15,55932443	17,15111762	4,590349869
0,068	0,255	10	17	13,37874889	17,55982295	9,450615096
0,072	0,27	10	18	20,00000	18,24844905	6,598287128
0,076	0,285	10	19	17,58057521	17,37524235	4,249878922
0,08	0,3	10	20	20,00000	20,00000	10,45506834
0,084	0,315	10	21	18,02025134	17,29692438	8,963251273
0,088	0,33	10	22	18,61894327	17,04801662	7,13599401
0,092	0,345	10	23	19,45264535	19,96261574	12,98352458
0,096	0,36	10	24	19,59312918	20,000000	8,26114639
0,1	0,375	10	25	16,58905269	16,8096218	8,600582293
0,104	0,39	10	26	17,2063013	16,78158867	6,840382853
0,108	0,405	10	27	20,00000	19,00070224	10,99340675
0,112	0,42	10	28	20,00000	20,00000	10,26643373
0,116	0,435	10	29	15,73682344	16,47855178	7,656921284
0,12	0,45	10	30	19,62606281	18,25520189	10,00735445

				T _h -T _t -T _r -T _g Değişimi		
0,04	0,15	5	10	19,42836265	11,50586385	4,747492698
0,044	0,165	5,5	11	16,09408524	14,14332353	7,649300942
0,048	0,18	6	12	16,0323426	13,61734583	5,539744207
0,052	0,195	6,5	13	15,27696289	17,66521867	6,523441396
0,056	0,21	7	14	16,66480925	12,32058791	6,476921251
0,06	0,225	7,5	15	19,6201589	18,89974109	3,050388813
0,064	0,24	8	16	17,07311926	17,92566336	7,622579945

EK-1. (devam) NN-FOPID kontrolör için elde edilen veri seti

0,068	0,255	8,5	17	13,75331916	15,20562181	4,542685244
0,072	0,27	9	18	18,78456116	18,83024082	8,729547698
0,076	0,285	9,5	19	12,9991729	16,97796435	2,026594607
0,08	0,3	10	20	19,66139361	18,29660634	5,317342479
0,084	0,315	10,5	21	17,14906949	17,43513411	5,280027434
0,088	0,33	11	22	17,00005401	19,56738997	6,498308066
0,092	0,345	11,5	23	17,31645723	18,19556767	12,05633593
0,096	0,36	12	24	19,95148315	19,87245985	10,14559583
0,1	0,375	12,5	25	15,63296316	18,02409532	10,18325606
0,104	0,39	13	26	17,43721911	18,11979868	6,337924542
0,108	0,405	13,5	27	13,23792852	18,12910611	7,513196838
0,112	0,42	14	28	17,84141646	19,94823845	11,22096087
0,116	0,435	14,5	29	19,2510663	19,96794818	10,27054849
0,12	0,45	15	30	20,00000	18,12191213	10,74123694



GAZİ GELECEKTİR..