



**T.C.  
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI İÇEREN GÜÇ  
SİSTEMLERİ İÇİN SEZGİSEL ALGORİTMA TABANLI YÜK  
FREKANS DENETLEYİCİ TASARIMI**

**ÖZAY CAN**

**DOKTORA TEZİ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
PROF. DR. ALİ ÖZTÜRK**

**DÜZCE, 2022**

**T.C.**  
**DÜZCE ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI İÇEREN GÜÇ SİSTEMLERİ İÇİN**  
**SEZGİSEL ALGORİTMA TABANLI YÜK FREKANS DENETLEYİCİ**  
**TASARIMI**

Özay CAN tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

Düzce Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Salih TOSUN

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Nihat PAMUK

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Doç. Dr. M. Kenan DÖŞOĞLU

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hasan EROĞLU

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 30/05/2022

## BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

30 Mayıs 2022

Özay CAN

## TEŞEKKÜR

Tüm övgüler, bilginin gerçek **Sahibine (c.c)** aittir.

Tez konusunun belirlenmesindeki yol göstericiliği ve tezin hazırlanması sırasında göstermiŐ olduğu yardımlarından dolayı danışman hocam Prof. Dr. Ali Öztürk'e ve tezdeki eksiklikleri gidererek tezin daha iyi olmasını sağlayan değerli jüri üyesi hocalarım Doç. Dr. Salih Tosun, Doç. Dr. Nihat Pamuk, Doç. Dr. M. Kenan Döşoğlu ve Dr. Öğr. Üyesi Hasan Eroğlu'na saygılarımı sunarım.

*Gönül kapılarımın anahtarı*, eŐim Nimet'e yol arkadaşlığından dolayı teşekkür ederim.

Anneme ve bu tezi görmek nasip olmayan babama Őükranlarımı sunar, yükümü hafiflettikleri için AİLEmin tüm üyelerine sonsuz teşekkürler ederim.

**30 Mayıs 2022**

**Özay CAN**

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ .....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ .....	ix
KISALTMALAR.....	x
SİMGELER .....	xi
ÖZET .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
EXTENDED ABSTRACT .....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	4
1.2. ÇALIŞMANIN AMACI .....	5
2. YÜK FREKANS KONTROLÜ .....	8
2.1. BİRİNCİL (PRİMER) FREKANS KONTROLÜ .....	9
2.2. İKİNCİL (SEKONDER) FREKANS KONTROLÜ .....	10
2.3. ÜÇÜNCÜL (TERSİYER) FREKANS KONTROLÜ .....	12
2.4. KONTROL SİSTEMLERİ .....	12
3. YÜK FREKANS KONTROLÜ MODELİ .....	19
3.1. GENERATÖR MODELİ .....	19
3.2. YÜK MODELİ .....	23
3.3. TÜRBİN (TAHRİK ÜNİTESİ) MODELİ .....	23
3.4. HIZ DÜZENLEYİCİ (GOVERNER) MODELİ .....	24
3.5. BAĞLANTI HATTI MODELİ .....	28
4. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI İÇEREN GÜÇ SİSTEMİ MODELLERİ .....	33
4.1. TEST MODELİ-1: İKİ ALANLI ARA-ISITMASIZ TERMAL SİSTEM ....	33
4.2. TEST MODELİ-2: FV-TERMAL SİSTEM .....	36
5. YÜK FREKANS KONTROLÜ PROBLEMİNİN SEZGİSEL ALGORİTMA TABANLI ÇÖZÜMÜ.....	40
5.1. BAL PORSUĞU ALGORİTMASI.....	40
5.1.1. BPA Matematiksel Modeli .....	41
5.2. GORİL BİRLİKLERİ OPTİMİZASYONU .....	44
5.2.1. GBO Matematiksel Modeli.....	44
5.3. GRİ KURT OPTİMİZASYONU .....	47
5.3.1. GKO Matematiksel Modeli .....	47
5.4. SEZGİSEL ALGORİTMA TABANLI YÜK FREKANS KONTROLÜ .....	49
6. BENZETİM ÇALIŞMALARI VE SONUÇLAR .....	58

<b>6.1. TEST MODELİ-1 İÇİN BENZETİM SONUÇLARI .....</b>	<b>58</b>
6.1.1. Senaryo I: Alan-1’de Rastgele Yük Değişimi .....	59
6.1.2. Senaryo II: Alan-2’de Rastgele Yük Değişimi Durumu .....	62
6.1.3. Senaryo III: Alan-1 ve Alan-2’de YEK Durumu .....	66
6.1.4. Senaryo IV: Sistem Parametre Değişimi.....	70
<b>6.2. TEST MODELİ-2 İÇİN BENZETİM SONUÇLARI .....</b>	<b>71</b>
6.2.1. Senaryo I: Alan-2’de Rastgele Yük Değişimi Durumu.....	71
6.2.2. Senaryo II: Alan-1’de YEK – Alan-2’de Yük Değişimi Durumu .....	74
<b>6.3. KARŞILAŞTIRMA SONUÇLARI .....</b>	<b>77</b>
6.3.1. Test Modeli-1 İçin Karşılaştırma Sonuçları .....	77
6.3.2. Test Modeli-2 İçin Karşılaştırma Sonuçları .....	78
<b>7. TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....</b>	<b>80</b>
<b>8. KAYNAKLAR .....</b>	<b>82</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>90</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Yük-frekans ilişkisi.....	1
Şekil 1.2. YFK şematik diyagramı.....	3
Şekil 2.1. YFK aşamaları.....	9
Şekil 2.2. Birincil frekans kontrol sonrası.....	10
Şekil 2.3. İkincil frekans kontrol sonrası.....	11
Şekil 2.4. Birincil ve ikinci kontrol çevrimi içeren YFK blok diyagramı.....	12
Şekil 2.5. Kontrol sistemi.....	13
Şekil 2.6. Blok diyagramı.....	13
Şekil 2.7. Birim geri beslemeli kapalı çevrim sistem blok diyagramı.....	14
Şekil 2.8. Kazanç geri beslemeli kapalı çevrim sistem blok diyagramı.....	14
Şekil 2.9. Birinci derece sistem blok diyagramı.....	16
Şekil 2.10. İkinci derece sistem blok diyagramı.....	17
Şekil 3.1. Türbin-generatör modeli.....	19
Şekil 3.2. Hız-güç ilişkisi.....	22
Şekil 3.3. Generatör-yük modeli.....	23
Şekil 3.4. Türbin (tahrik ünitesi) modeli.....	24
Şekil 3.5. Hız düzenleyici sistemi.....	25
Şekil 3.6. Hız düzenleyici sistemi indirgenmiş blok diyagramı.....	25
Şekil 3.7. Paralel birimler arasında yük paylaşımı.....	26
Şekil 3.8. Tek alanlı güç sistemi modeli.....	27
Şekil 3.9. İki alanlı güç sistemi.....	28
Şekil 3.10. Güç sistemi elektriksel eşdeğeri.....	28
Şekil 3.11. Güç sistemi YFK modeli.....	30
Şekil 3.12. İkincil kontrol içeren güç sistemi YFK modeli.....	31
Şekil 4.1. Test Modeli-1 için güç sistemi transfer fonksiyonu modeli.....	35
Şekil 4.2. Tek diyotlu FV eşdeğer devresi.....	36
Şekil 4.3. Test Modeli-2 için güç sistemi transfer fonksiyonu modeli.....	39
Şekil 5.1. BPA sözde kodu.....	43
Şekil 5.2. GBO sözde kodu.....	46
Şekil 5.3. GKO sözde kodu.....	49
Şekil 5.4. PI-(1+DD) kontrolör blok diyagramı.....	50
Şekil 5.5. Sezgisel algoritma tabanlı YFK sistemi blok diyagramı.....	51
Şekil 5.6. Güç sistemi modeli.....	52
Şekil 5.7. Algoritmaların <i>m.file</i> dosyasında oluşturulması.....	52
Şekil 5.8. Optimizasyon parametrelerinin belirlenmesi.....	53
Şekil 5.9. Değişkenlerin belirlenmesi.....	53
Şekil 5.10. Başlangıç popülasyonu.....	54
Şekil 5.11. ISE amaç fonksiyonu blok diyagramı.....	54
Şekil 5.12. Optimize edilmiş kontrolör kazançları.....	54
Şekil 5.13. BPA algoritmasının YFK sistemine uygulanışı.....	55
Şekil 5.14. GBO algoritmasının YFK sistemine uygulanışı.....	56
Şekil 5.15. GKO algoritmasının YFK sistemine uygulanışı.....	57
Şekil 6.1. Senaryo I için SIMULINK modeli.....	59
Şekil 6.2. Alan-1'deki yük değişimi.....	59
Şekil 6.3. Alan-1'deki frekans değişimi.....	60
Şekil 6.4. Alan-2'deki frekans değişimi.....	60

Şekil 6.5. Bağlantı hattı güç değişimi. ....	61
Şekil 6.6. Senaryo II için SIMULINK modeli. ....	63
Şekil 6.7. Alan-2'deki yük değişimi. ....	63
Şekil 6.8. Alan-1'deki frekans değişimi. ....	64
Şekil 6.9. Alan-2'deki frekans değişimi. ....	64
Şekil 6.10. Bağlantı hattı güç değişimi. ....	64
Şekil 6.11. Senaryo III için SIMULINK modeli. ....	66
Şekil 6.12. Yük/FV güç/Rüzgâr gücü değişimi. ....	67
Şekil 6.13. Alan-1'deki frekans değişimi. ....	67
Şekil 6.14. Alan-2'deki frekans değişimi. ....	68
Şekil 6.15. Bağlantı hattı güç değişimi. ....	68
Şekil 6.16. Güç sistemi SIMULINK modeli. ....	71
Şekil 6.17. Alan-2'deki yük değişimi. ....	72
Şekil 6.18. Alan-1'deki frekans değişimi. ....	72
Şekil 6.19. Alan-2'deki frekans değişimi. ....	73
Şekil 6.20. Bağlantı hattı güç değişimi. ....	73
Şekil 6.21. Alan-1'deki frekans değişimi. ....	75
Şekil 6.22. Alan-2'deki frekans değişimi. ....	75
Şekil 6.23. Bağlantı hattı güç değişimi. ....	76

## ÇİZELGE LİSTESİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Çizelge 1.1. Türkiye’deki bazı lisansüstü tezler. ....	5
Çizelge 4.1. Test Modeli-1 için güç sistemi parametreleri. ....	35
Çizelge 4.2. Test Modeli-2 için güç sistemi parametreleri. ....	38
Çizelge 6.1. Senaryo I için sistem performans değerleri. ....	61
Çizelge 6.2. Senaryo I için kontrolör kazançları. ....	62
Çizelge 6.3. Senaryo II için sistem performans değerleri. ....	65
Çizelge 6.4. Senaryo II için kontrolör kazançları. ....	65
Çizelge 6.5. Senaryo III için sistem performans değerleri. ....	69
Çizelge 6.6. Senaryo III için kontrolör kazançları. ....	69
Çizelge 6.7. Senaryo IV için sistem performans değerleri. ....	70
Çizelge 6.8. Senaryo I için sistem performans değerleri. ....	74
Çizelge 6.9. Senaryo I için kontrolör kazançları. ....	74
Çizelge 6.10. Senaryo II için sistem performans değerleri. ....	76
Çizelge 6.11. Senaryo II için kontrolör kazançları. ....	77
Çizelge 6.12. Test Modeli-1 / Senaryo I için karşılaştırma sonuçları. ....	78
Çizelge 6.13. Test Modeli-2 / Senaryo II için karşılaştırma sonuçları. ....	79

## KISALTMALAR

AKH	Alan kontrol hatası
BPA	Bal porsuğu algoritması
D	Türev
FV	Fotovoltaik
GBO	Goril birlikleri optimizasyonu
GES	Güneş enerjisi sistemi
GKO	Gri kurt optimizasyonu
Hz	Hertz
I	İntegral
OÜK	Otomatik üretim kontrolü
P	Oransal
pu	Birim Değer / Per-Unit
RES	Rüzgâr enerjisi sistemi
YEK	Yenilenebilir enerji kaynakları
YFK	Yük frekans kontrolü

## SİMGELER

$B$	Frekans bias faktörü
$K_D$	Türev kazanç
$K_G$	Generatör kazancı
$K_I$	İntegral kazanç
$K_P$	Oransal kazanç
$K_{PS}$	Güç sistemi kazancı
$K_{PV}$	FV sistem kazancı
$K_T$	Türbin kazancı
$K_{WT}$	Rüzgâr sistemi kazancı
$M^+$	Maksimum aşma
$M^-$	Minimum aşma
$R$	Düzenleyici sabiti
$T_{12}$	Senkronizasyon katsayısı
$T_G$	Generatör zaman sabiti
$T_{PS}$	Güç sistemi zaman sabiti
$T_{PV}$	FV sistem zaman sabiti
$t_s$	Oturma süresi
$T_T$	Türbin zaman sabiti
$T_{WT}$	Rüzgâr sistemi zaman sabiti
$\Delta f_1$	Alan-1'deki frekans değişimi
$\Delta f_2$	Alan-2'deki frekans değişimi
$\Delta P_{tie}$	Bağlantı hattı güç değişimi

## ÖZET

### YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI İÇEREN GÜÇ SİSTEMLERİ İÇİN SEZGİSEL ALGORİTMA TABANLI YÜK FREKANS DENETLEYİCİ TASARIMI

Özay CAN

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

Mayıs 2022, 89 sayfa

Enterkonnekte güç sistemlerinde senkronizasyon koşullarının sağlanması için üretim ve tüketim arasındaki dengenin korunması gerekmektedir. Güç sisteminin dinamik yapısı nedeniyle söz konusu denge değişkenlik gösterdiği için sistem frekansı sürekli kontrol altında tutulmalıdır. Sistem frekansı ve bağlantı hattı güç değişimlerinde meydana gelen dalgalanmaları mümkün olan en kısa sürede sönmölemek ve istenen referans değerinde tutabilmek amacıyla yük frekans kontrolü (YFK) adı verilen bir kontrolör süreci gerekmektedir. Rüzgâr Enerjisi Sistemi (RES) ve Güneş Enerjisi Sistemi (GES) gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) kullanımının artması ve bu kaynakların değişken çıkış gücü nedeniyle güç sistemlerinde YFK konusu daha karmaşık hale gelmiştir. Bu tez çalışmasında, RES ve GES gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşan iki alanlı termal güç sisteminde YFK için PI-(1+DD) isimli kaskad bir kontrolör tasarlanmıştır. Kontrolör parametrelerinin belirlenmesi amacıyla Bal Porsuğu Algoritması (BPA), Goril Birlikleri Optimizasyonu (GBO) ve Gri Kurt Optimizasyonu (GKO) gibi sezgisel algoritmalar kullanılmıştır. Değişken yük talebi, RES/GES üretimi ve sistem parametre değişimi gibi farklı çalışma koşulları altında kontrolörün ve algoritmaların performansları test edilmiştir. Sonuçlar, literatürde bulunan yöntemlerin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan, tasarlanan PI-(1+DD) kontrolörün sistem frekansının ve bağlantı hattı güç değişimlerinin aşma değeri ve oturma süresi bakımından diğer yöntemlere göre önemli iyileştirmeler sağladığı görülmüştür. Bu tez çalışması ile YFK probleminin çözümü için BPA, GBO ve GKO algoritmaları alternatif çözüm yöntemleri olarak önerilmiştir.

**Anahtar sözcükler:** Bal porsuğu algoritması (BPA), Goril birlikleri optimizasyonu (GBO), Gri kurt optimizasyonu (GKO), PI-(1+DD) kontrolör, Yük frekans kontrolü (YFK).

## ABSTRACT

### THE DESIGN OF LOAD FREQUENCY CONTROLLER BASED ON HEURISTIC ALGORITHMS FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES INTEGRATED POWER SYSTEMS

Özay CAN

Duzce University

The Institute of Graduate Studies, Department of Electrical-Electronics Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

May 2022, 89 pages

It is necessary to maintain the balance between production and consumption in interconnected power systems in order to provide synchronization conditions. Since the balance in question changes due to the dynamic nature of the power system, the frequency of the system should be kept under constant control. A controller process called load frequency control (LFC) is required in order to damp the fluctuations that occur in system frequency and tie-line power changes as soon as possible and to keep them at the specified reference value. Due to the increase in the use of renewable energy sources (RES) such as Wind Energy System (WES) and Solar Energy System (SES) and the variable output power of these sources, the LFC process in power systems is becoming more complex. In this thesis, a cascade controller named PI-(1+DD) has been proposed for LFC in two-area thermal power system consisting of renewable energy sources such as WES and SES. Heuristic algorithms such as Honey Badger Algorithm (HBA), Gorilla Troops Optimization (GTO) and Grey Wolf Optimization (GWO) have been used to determine the controller parameters. The performances of the controller and algorithms have been tested under different operating conditions such as variable load demand, WES/SES generation and system parameter variation. The results were compared with the results of the other methods in the literature. From the results obtained, it has been seen that the designed PI-(1+DD) controller provides significant improvements compared to other methods in terms of overshoot value and settling time of system frequency and tie-line power changes. In this thesis, HBA, GTO and GWO algorithms have been proposed as alternative solution methods for the solution of the LFC problem.

**Keywords:** Gorilla troops optimization (GTO), Grey wolf optimization (GWO), Honey badger algorithm (HBA), Load frequency control (LFC), PI-(1+DD) controller.

## **EXTENDED ABSTRACT**

### **THE DESIGN OF LOAD FREQUENCY CONTROLLER BASED ON HEURISTIC ALGORITHMS FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES INTEGRATED POWER SYSTEMS**

Özay CAN

Duzce University

The Institute of Graduate Studies, Department of Electrical-Electronics Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

May 2022, 89 pages

#### **1. INTRODUCTION**

Load frequency control (LFC), also known as automatic generation control (AGC), is a control process carried out to damp the fluctuations due to consumer demands and/or other disruptive factors in the system frequency and tie-line power change as soon as possible or to keep it within the determined values. LFC has a fundamental role in keeping the stability and reliability of a power system at a certain level. Due to the complexity caused by the large size of the interconnected power systems, the importance of the subject of LFC in the control of power systems is increasing day by day.

The efficient operation of a power system depends on the active power balance, in other words, the total power produced meets the sum of the demanded power and system losses. In case of an imbalance between the power produced and the power demanded by the consumer, a change in the system frequency occurs. If the power produced is greater than the power consumed, the frequency will increase and vice versa.

These changes in frequency cause unwanted fluctuations in the system and thus should be eliminated as soon as possible or kept within the determined values. Otherwise, the operation of the power system may be adversely affected, causing frequency instability and loss of synchronization or even crashes in the system. For this reason, it is necessary to perform a control process in order to damp the oscillations occurring in the frequency of each area in the power system and the tie-line power change as soon as possible or to keep them between the desired reference values. This process is carried out by measuring the error signal called the area control error (ACE), which expresses the balance between the generated power and the load.

## 2. MATERIAL AND METHODS

The main purpose of the controller design for LFC is to reduce the value to zero or minimize the deviation in the system frequency and tie-line power change quickly in case of sudden load demand or renewable energy sources (RES) fluctuations. For this reason, determining the controller to be used and the optimal adjustment of these controller parameters are of great importance in achieving successful results. Also, the optimization techniques to optimally adjust the parameters of these controllers play a major role in the success of the LFC process in power systems. Fluctuations in system frequency and tie-line power changes should be quickly kept within the determined values in LFC. Therefore, different optimization techniques should improve the time spent for setting the controller parameters.

In this thesis, a cascade PI-(1+DD) controller has been proposed for LFC in two different two-area power systems containing renewable energy sources (RES) such as wind energy system (WES) and solar energy system (SES). A cascade controller design can efficiently operate in multiple disturbances and improve system performance since the number of parameters is higher than a single loop feedback control design. A two-stage controller is used in the proposed controller, with the PI controller as primary and the (1+DD) controller as secondary.

Newly developed swarm-based meta-heuristic optimization techniques such as Honey Badger Algorithm (HBA), Gorilla Troops Optimization (GTO) and Grey Wolf Optimization (GWO) have been used in order to optimally determine the parameters of the designed controller. The objective function has been determined as Integral Squared Error (ISE).

In this context, the studied two-area thermal power systems have been modelled in the MATLAB/SIMULINK environment. Three algorithms, namely HBA, GTO, and GWO, are created in the *m.file* file. The behavior of the power system examined under various scenarios such as random load variation, RES generation, and system parameters variation has been tested. In each case study, the parameters of the proposed controller are determined using meta-heuristic algorithms such as HBA, GTO, and GWO, then the results are compared.

### **3. RESULTS AND DISCUSSIONS**

Power systems have become more complex with the integration of RESs into distributed power generation systems. In order to provide users with a more stable and quality energy, new controllers are constantly being designed to produce new and high-quality solutions. In this study, it is aimed to damp frequency and tie-line power change fluctuations caused by consumer demands, RES generation or other disturbance factors in power systems. A novel cascade controller named PI-(1+DD) is proposed for LFC in a two-area thermal power system containing RESs such as WES and SES. New developed optimization techniques such as HBA, GTO, and GWO, have been proposed to determine the parameters of the controller for a successful LFC. The system frequency and tie-line power variation for  $M^+$  and  $M^-$  values are small and within acceptable limits for all three algorithms. Also, the  $t_s$  values are close to each other for each algorithm, and the fluctuations are damped in a short time.

### **4. CONCLUSION AND OUTLOOK**

Considering the findings, the proposed controller can be used as a successful, effective, and higher-quality solution for LFC in multi-area power systems with RES. By using the powerful features of different optimization techniques, hybrid new optimization tools and more stable new controller designs can be considered as future studies.

# 1. GİRİŞ

Yük Frekans Kontrolü (YFK) veya diğer adıyla Otomatik Üretim Kontrolü (OÜK), güç sistemlerindeki tüketici talepleri ve/veya başka bozucu etkenler nedeniyle sistem frekansında ve bağlantı hattı güç değişiminde meydana gelen dalgalanmaları mümkün olan en kısa sürede sönmölemek veya belirlenen değerler arasında tutmak için gerçekleştirilen bir kontrol sürecidir [1], [2]. YFK, bir güç sisteminin kararlılığını ve güvenilirliğini belirli bir seviyede tutma noktasında temel bir role sahiptir. Enterkonnekte güç sistemlerinin büyük boyutlardaki yapısının sebep olduğu karmaşıklık nedeniyle YFK konusunun güç sistemlerinin kontrolündeki önemi günden güne artmaktadır.

Bir enterkonnekte güç sistemi genel olarak, çeşitli üretim kaynaklarının ve tüketicilerin bulunduğu birden fazla kontrol alanının bağlantı hatlarıyla birbirine bağlanmasıyla meydana gelmektedir. Enterkonnekte güç sistemi, kontrol alanları arasında yardımlaşma imkânı sunması nedeniyle sistem performansının iyileşmesine yardımcı olur ve olası bir durumda tüm sistemin çökmesini engeller. Üretim sistemleri, dağıtım sistemleri ve iletim sistemleri güç şebekesinin temel yapılarıdır. Bu bileşenlerin gerçek zamanlı çalışması aktif güç taleplerinde farklılıklara neden olmaktadır.



Şekil 1.1. Yük-frekans ilişkisi.

Bir güç sisteminin verimli olarak çalışması, aktif güç dengesine diğer bir ifadeyle üretilen toplam gücün talep edilen güç ve sistem kayıplarının toplamını karşılamasına bağlıdır. Sistemin frekansı ise bu aktif güç dengesine bağlıdır. Yük ile frekans arasındaki ilişki Şekil 1.1’de verilmiştir. Eğer, üretilen güç ile tüketici tarafından talep

edilen güç arasında bir dengesizlik durumu olursa sistem frekansında bir değişim meydana gelir. Üretilen güç, tüketilen güç değerinden büyükse frekans artar. Üretilen gücün talep edilen güçten küçük olması durumunda ise frekans düşer.

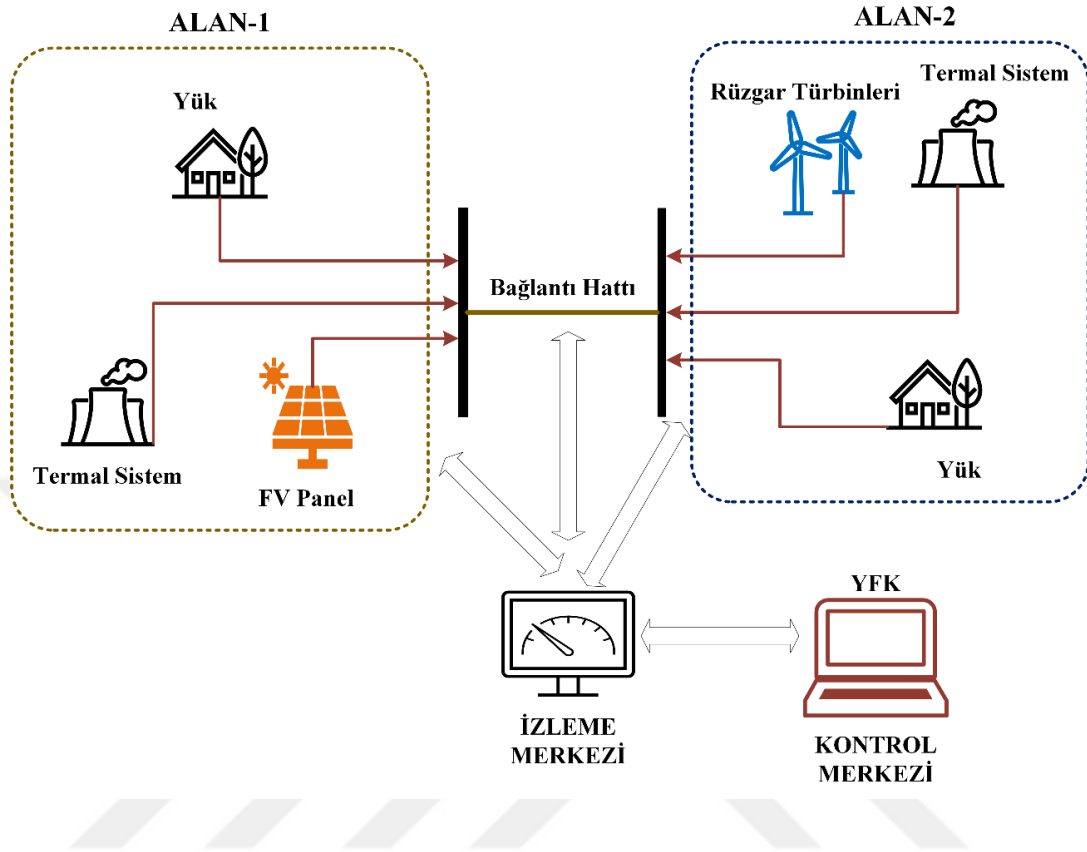
Frekansta meydana gelen bu değişimler sistemde istenmeyen dalgalanmalara sebep olur. Bu dalgalanmaların mümkün olan en kısa sürede ortadan kaldırılması veya belirlenen değerler arasında tutulması gerekmektedir. Aksi takdirde, güç sisteminin çalışması olumsuz etkilenebilir ve sistemde frekans kararsızlığına ve senkronizasyon kaybına hatta çökmelere neden olabilir. Bu nedenle, güç sisteminde bulunan her bir alanın frekansında ve bağlantı hattı güç değişiminde meydana gelen salınımların en kısa sürede sönümlenmesi veya istenen referans değerler arasında tutulması amacıyla bir kontrol sürecinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu işlem, üretilen güç ile yük arasındaki dengeyi ifade eden alan kontrol hatası (AKH) olarak adlandırılan hata sinyalinin ölçülmesiyle gerçekleştirilmektedir [3], [4].

Yük talebinde meydana gelen değişim veya başka bir bozucu etken nedeniyle sistem performansında meydana gelen dalgalanmalar, sistemdeki Alternatif Akım (AA) iletim hattına paralel bir Yüksek Gerilim Doğru Akım (YGDA-HVDC) hattı bağlanarak sönümlenebilir [5]–[8]. Ayrıca, redoks akış pili [9], [10] ultra-kapasitör [11] ve enerji depolama sistemleri [6], [12], [13] gibi bileşenler kullanılarak sistem performansı iyileştirilebilir.

YFK sürecinde, kullanılan kontrolör büyük önem arz etmektedir. Oransal (P), İntegral (I), Türev (D) ve bunların kombinasyonlarından meydana gelen PI, PID [14]–[17] gibi klasik kontrolörler doğrusal olmayan ve sınırlar içeren sistemlerde YFK süreci için istenen performansı sağlayamayabilir. Bu nedenle, AKH sinyalini en aza indirmek amacıyla, kesir dereceli PI [5], [18], PIDN [5], PDN-PI [19], kesir dereceli PID [9], [20], [21], kaskad PI-PD [12], kaskad (1+PD)-PID [22], TID [13], I-DT [23], kesir dereceli PDPI [24], kesir dereceli ID [10], bulanık PI/PID [25]–[27] gibi yenilikçi kontrolör çeşitleri kullanılmıştır.

Artan nüfus ve sanayileşme, elektrik enerjisinin öneminin artmasına neden olmaktadır. Elektrik enerjisi, uygun teknikler yardımıyla kimyasal, termal, jeotermal gibi temel enerji kaynaklarından elde edilmektedir. Ancak, yakıt rezervlerinin azalması ve yakıt fiyatlarının artması geleneksel enerji kaynaklarının istenen yük dengesini sağlama noktasında yetersiz olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle, artan yük talebini

karşılmak amacıyla yenilenebilir enerji kaynakları (YEK) ile geleneksel enerji kaynaklarının entegre edilmesi gerekmektedir.



Rüzgâr Enerjisi Sistemi (RES) ve Güneş Enerjisi Sistemi (GES) günümüz güç sisteminde yaygın olarak kullanılan enerji kaynaklarıdır. Ancak, değişken güneş ışınımı ve rüzgâr hızı gibi YEK yapısı kaynaklı belirsizlikler nedeniyle oluşan üretim ve tüketim arasındaki dengesizlik frekans sapmalarına neden olmaktadır. Bu durumda, frekans sapmalarını istenen değerler arasında tutmak için Şekil 1.2’de gösterildiği gibi bir YFK sürecinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

YFK sürecinin üç temel amacı bulunmaktadır:

- Sistem frekansını belirlenen değerinde (Türkiye için 50 Hz) veya bu değere çok yakın bir değerde ( $\pm 200$  mHz) tutmak.
- Güç sisteminde bulunan alanlar arasında gerçekleşen bağlantı hattı güç değişimini belirlenen değerler arasında tutmak.
- Üretim birimlerinin en uygun maliyetle üretim yapmalarını sağlamak.

## 1.1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

YFK, günümüz güç sistemlerinde kararlılığın sağlanması açısından büyük öneme sahip olduğu için son yıllarda birçok araştırmacı tarafından çalışılmış bir konudur. Etkili ve başarılı bir YFK sürecinin gerçekleştirilmesi, kullanılacak olan kontrolöre ve bu kontrolörün parametrelerinin belirlenmesi için kullanılan optimizasyon yöntemine bağlıdır. Bu kapsamda araştırmacılar, kontrolör parametrelerinin belirlenmesi amacıyla Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) [7], [15], [17], [28]–[30], Genetik Algoritma (GA) [31], [32], Bakteri Arama Algoritması (BAA) [9], [31], [33], Jaya Algoritması (JA) [11], [34], Salp Sürü Algoritması (SSA) [12], [35], [36], Manta Işını Arama Algoritması (MAA) [37], Sinüs-Kosinüs Algoritması (SKA) [25], [38], Mayın Patlaması Algoritması (MPA) [39], Denge Algoritması (DA) [40], Ateşböceği Algoritması (AA) [32], Karınca Aslan Algoritması (KAA) [41], Balina Algoritması (BA) [10], [42], Balçık Kalıbı Algoritması (BKA) [16], Yusufçuk Algoritması (YA) [22], Aritmetik Optimizasyon Algoritması (AOA) [26], [43], Goril Birlikleri Optimizasyonu (GBO) [44], Deniz Avcısı Algoritması (DAA) [45], Çakal Algoritması (ÇA) [19], Futbol Ligi Müsabakası Algoritması (FLMA) [46], Şempanze Optimizasyon Algoritması (ŞOA) [47], Optikten Esinlenen Optimizasyon (OEO) [48], Yapay Elektrik Alan Algoritması (YEAA) [49] ve Simbiyotik Organizmalar Arama Algoritması (SOAA) [50] gibi zeka tabanlı sezgisel algoritma yöntemleri kullanmışlardır.

Gerek dünyada gerekse ülkemizde YFK konusu büyük önem arz etmektedir. Bu kapsamda, dünyada [51]–[56] ve ülkemizde son yirmi beş yılda konu ile ilgili birçok lisansüstü tez hazırlanmıştır [57]–[83]. Ülkemizde hazırlanmış lisansüstü tezlerden bazıları ile ilgili bilgiler Çizelge 1.1’de verilmiştir.

Çizelgede verilen lisansüstü tezler detaylı olarak incelendiğinde, YFK işleminde ağırlıklı olarak klasik P, I, D ve bunların kombinasyonundan meydana gelen PI, PID kontrolörlerin kullanıldığı görülmektedir. Ek olarak, kontrolör parametrelerinin optimal olarak belirlenmesi amacıyla Genetik Algoritma (GA), Yerçekimi Arama Algoritması (YAA), Yapay Arı Kolonisi Algoritması (YAK), Balina Algoritması (BA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) gibi görece olarak eski ve YFK işleminde sıklıkla kullanılmış optimizasyon yöntemlerinin yanısıra Fil Sürüsü Algoritması (FSA), Simbiyotik Organizmalar Arama Algoritması (SOAA) gibi son yıllarda geliştirilmiş tekniklerin kullanıldığı görülmektedir. Ancak, söz konusu çalışmalarda yenilenebilir

enerji kaynaklarının (YEK) güç sistemine dahil edilmesi durumunda YFK işleminin sonuçlarının birkaç çalışma dışında incelenmediği görülmektedir.

Çizelge 1.1. Türkiye’deki bazı lisansüstü tezler.

Tez	Kontrolör	Optimizasyon Yöntemi	YEK
YL [66]	I	x	x
D [77]	PI	Bulanık Mantık	x
YL [81]	PI	Yapay Sinir Ağları	x
YL [62]	PID	Bulanık Mantık	x
YL [63]	PI/PID	GA	x
YL [71]	PID	FSA	x
D [70]	PID	GA	✓
YL [59]	PID	YAA	x
D [82]	PID	BA tabanlı Bulanık Mantık	x
D [78]	PID	YAK	x
YL [73]	PID	SOAA	x
YL [68]	Bulanık Mantık	PSO	x
YL [65]	PI	x	✓

## 1.2. ÇALIŞMANIN AMACI

Klasik PI, PID ve bulanık mantık kontrolörlerin karmaşıklık, fazla sayıdaki kontrolör parametreleri için daha uzun çalışma süresi gerektirme ve parametre ayarlaması için ön bilgi gerektirme gibi dezavantajlarını ortadan kaldırma amacıyla yeni kontrolör çeşitlerinin kullanılması gerekmektedir. Ayrıca, önceki çalışmalarda YEK etkisinin incelenmemiş olması nedeniyle GES ve RES içeren güç sistemlerinin performansının değerlendirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır.

Bu tez çalışmasında, RES ve GES gibi YEK içeren iki alanlı iki farklı güç sisteminde YFK için kaskad PI-(1+DD) kontrolör önerilmiştir. Tasarlanan kontrolörün parametrelerinin optimal olarak belirlenmesi amacıyla yeni geliştirilmiş olan Bal Porsuğu Algoritması (BPA), Goril Birlikleri Optimizasyonu (GBO) ve Gri Kurt Optimizasyonu (GKO) teknikleri kullanılmıştır. Amaç fonksiyonu olarak ise “Hata Karelerinin Toplamı” (Integral Squared Error-ISE) kullanılmıştır. Bu kapsamda, ilk

olarak, RES ve GES içeren iki alanlı ara-ısıtmalı/ara-ısıtmasız termik güç sistemi ele alınmıştır. Amaçlanan kontrolörün ve kullanılan algoritmaların performansını incelemek amacıyla, değişken yük talebi ve sistem parametrelerinin değişimi gibi durumlar uygulanmıştır. Ayrıca, RES ve GES üretimi olması durumunda sistem davranışı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürde bulunan PSO, AA ve GA algoritmalarının performanslarıyla karşılaştırılmıştır.

Gerçekleştirilen tez çalışmasının temel katkıları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Sistem frekansını ve bağlantı hattı güç değişimini belirlenen değerler arasında tutmak amacıyla, RES ve GES gibi yenilenebilir enerji kaynakları içeren iki alanlı iki farklı termal güç sistemi bilgisayar ortamında modellenmiştir.
- Söz konusu güç sistemlerinde YFK için PI-(1+DD) isimli kaskad bir kontrolör tasarlanmış ve bilgisayar ortamında modellenmiştir.
- Amaçlanan kontrolörün parametrelerinin optimal olarak ayarlanması için BPA, GBO ve GKO gibi yenilikçi etkili optimizasyon teknikleri kullanılmıştır ve sonuçlar PSO, AA ve GA gibi yöntemlerin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.
- Rastgele yük değişimi, YEK dalgalanmaları ve sistem parametrelerinin değişimi gibi çeşitli durumlar altında, amaçlanan kontrolörün performansı incelenmiştir.
- Amaçlanan kontrolörün, söz konusu algoritmalar kullanılarak YFK işleminde her iki test sistemi ve tüm senaryolar için dikkate değer sonuçlar verdiği görülmüştür.

Tez çalışmasının Giriş bölümünden sonraki kısımları şu şekilde organize edilmiştir:

Bölüm 2’de güç sistemlerinde YFK hakkında bilgilere ek olarak kontrol sistemleri, birinci derece sistemler, ikinci derece sistemler ve bu sistemlerin zaman analizleri hakkında genel bilgi verilmiştir.

Bölüm 3’te güç sistemlerinde YFK gerçekleştirmek amacıyla kullanılacak olan güç sistemi için hız düzenleyici, türbin, yük vb. bileşenlerin matematiksel modelleri oluşturulmuştur.

Bölüm 4’te kullanılan kontrolör ve optimizasyon tekniklerinin performanslarının test edilmesi amacıyla bilgisayar ortamında matematiksel modelleri oluşturulan iki farklı test sistemi tanıtılmıştır.

Bölüm 5’te test sistemlerinde YFK gerçekleştirmek amacıyla tasarlanan PI-(1+DD) kontrolör ve bu kontrolörün parametrelerinin optimal olarak belirlenmesi amacıyla

kullanılacak olan Bal Porsuğu Algoritması (BPA), Goril Birlikleri Optimizasyonu (GBO) ve Gri Kurt Optimizasyonu (GKO) hakkında bilgi verilmiştir. Problemin çözüm aşamaları örnek test sistemleri üzerinde açıklanmıştır. Sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Gerçekleştirilen benzetim çalışmalarının sonuçları Bölüm 6'da verilmiştir. Ayrıca, literatürdeki diğer çözümlerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır ve tez çalışmasının literatüre katkıları ortaya konulmuştur.

Bölüm 7'de, çalışmadan elde edilen bulgular ve gelecek çalışmalar için öneriler verildikten sonra çalışma sonuçlandırılmıştır.



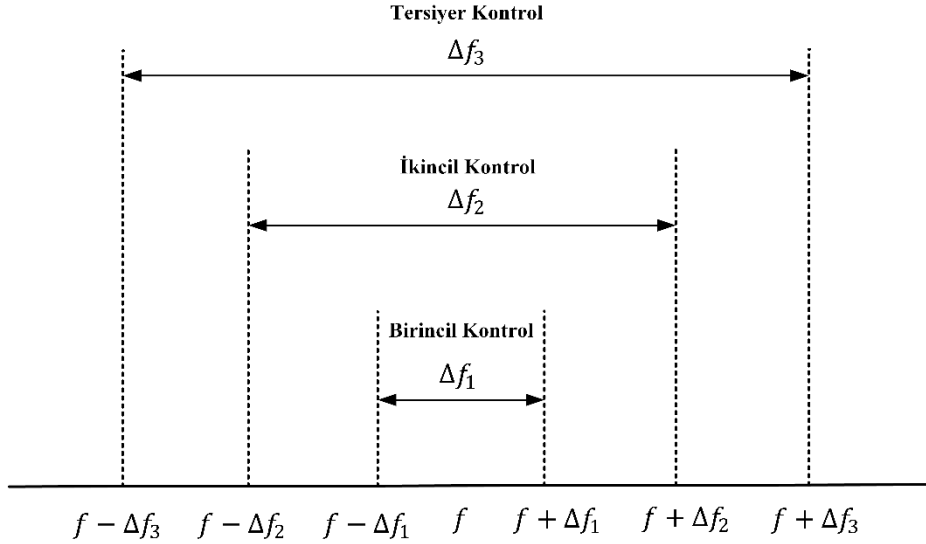
## 2. YÜK FREKANS KONTROLÜ

Bir güç sistemi, elektrik enerjisinin üretilmesi, iletilmesi ve tüketiciye ulaştırılması amacıyla bir araya getirilmiş bileşenler bütünüdür. Güç sistemlerinin en önemli amaçlarından biri; tüketicilere kabul edilebilir bir kalitede ve kesintisiz elektrik enerjisi sağlamanın yanı sıra elektrik enerjisinin ekonomik olarak üretilmesi, iletilmesi, dağıtılması ve kontrol edilmesidir. Bir güç sisteminin frekansı, aktif güç dengesine bağlıdır ve sistemin kararlılığını belirlemedeki en önemli parametrelerden birisidir. Uzun süreli meydana gelen frekans değişimi, sistemde bulunan ekipmanlara zarar vereceği ve iletim hatlarının aşırı yüklenmesine sebep olacağı için güç sisteminin çalışmasını, güvenilirliğini, verimliliğini direkt olarak etkilemektedir.

Güç sisteminin herhangi bir noktasında meydana gelen aktif güç değişimi bütün sistemin frekansında bir değişime neden olmaktadır. Güç sistemi frekans kontrolü veya düzenlemesi olarak tanımlanan yük frekans kontrolü (YFK), kaliteli güç temin etmek amacıyla güç sisteminin başarılı çalışmasını sağlayan önemli bir konudur. Geçici bozucu etkenler, büyük ölçekli enterkonnekte güç sistemlerinde kararsızlıklara neden olmaktadır. Bu kararsızlıklar, yük ve üretim arasında uyumsuzluklar meydana getirmekte ve güç sisteminin normal çalışmasını olumsuz etkilemektedir. Tüketiciler tarafından talep edilen güç ile üretilen güç arasında tutarsızlık olması durumunda sistem frekansı belirlenen değerinden sapma gösterecektir ve yüksek frekans değişimi sistem çökmelerine neden olacaktır.

YFK işleminin temel amacı; üretim ve tüketim arasındaki dengeyi sağlayarak sistem frekansı ve enterkonnekte sistemler arasındaki bağlantı hattı güç değişiminde meydana gelen salınımları mümkün olan en kısa sürede sönmek veya referans değerinde tutmaktır.

Frekansta meydana gelen değişim değerlerine bağlı olarak YFK, Şekil 2.1'de gösterildiği gibi, birincil (primer) frekans kontrol, ikincil (sekonder) frekans kontrol ve üçüncül (tersiyer) frekans kontrol olmak üzere üç farklı aşamadan meydana gelmektedir [3].



Şekil 2.1. YFK aşamaları.

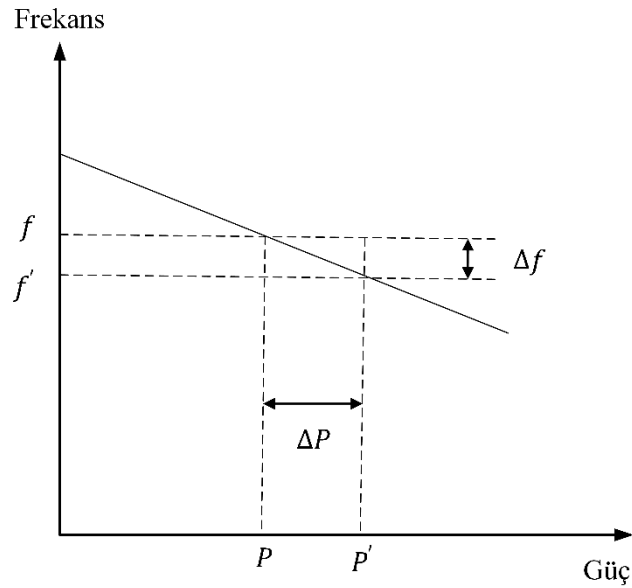
## 2.1. BİRİNCİL (PRİMER) FREKANS KONTROLÜ

Bir elektrik şebekesinde üretilen enerjinin frekansı, generatörün dönüş hızıyla ilişkili olduğu için frekans kontrolü türbin-generator ünitesinin hız kontrolü olarak değerlendirilebilir. Talep edilen yük arttığında generatörün hızı azalacak ve sistem frekansında bir azalma meydana gelecektir. Bu durumda hız düzenleyici, frekansı nominal değerine getirmeye çalışacaktır. Bu kontrol süreci, birincil frekans kontrolü olarak adlandırılır.

Birincil frekans kontrolünün amacı, sisteme hız düzenleyici mekanizması eklenerek üretim ve tüketim arasındaki dengeyi sağlamaktır. Hız düzenleyici, makinenin hızını algılar ve hızdaki değişime göre mekaniksel gücü ayarlamak amacıyla türbin girişini kontrol ederek (*hidroelektrik santrallerde ayar kanatçıkları ile su miktarını, doğalgaz santrallerinde ise valf ile buhar miktarını ayarlayarak*) frekansı nominal değerine getirir. Frekansta meydana gelen değişim, Elektrik İletimi Koordinasyonu Birliği (Union for the Coordination of Transmission of Electricity-UCTE) tarafından belirlenen  $\pm 20$  mHz değerini geçerse birincil frekans kontrolü saniyeler içinde aktif hale gelir.

Şekil 2.2’de, birincil frekans kontrolü sürecinde sisteme ait frekans-güç grafiği verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, sistemin çıkış gücü  $P$  olduğu anda frekans  $f$  değerindedir. Sistemde meydana gelen yük değişimi sonucunda, hız düzenleyiciler kullanılarak sistemin çıkış gücü  $P'$  değerine getirilir ve bu sayede çıkış gücünde  $\Delta P$  değerinde bir artış meydana gelir. Mevcut durumda, üretim ile tüketim arasındaki denge

sağlanmış olur ve sistemin frekansı  $f'$  değerindedir. Ancak, birincil frekans kontrolü sonrası sistem frekansında  $\Delta f$  değerinde bir kalıcı durum hatası bulunmaktadır.



Şekil 2.2. Birincil frekans kontrol sonrası.

Sistem frekansında meydana gelen değişimin yük değişimine oranı hız düzenleyici sabiti olarak adlandırılır. Bu sabit, generatöre göre farklılık göstermektedir ve Denklem (2.1) ile hesaplanır.

$$R = \frac{f' - f}{P' - P} = \frac{\Delta f}{\Delta P} \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'de verilen hız düzenleyici sabitinin yüzde olarak ifadesi Denklem (2.2)'de gösterilmiştir.

$$\%R = \frac{f_{\text{yüksüz}} - f_{\text{tamyük}}}{f} \cdot 100 \quad (2.2)$$

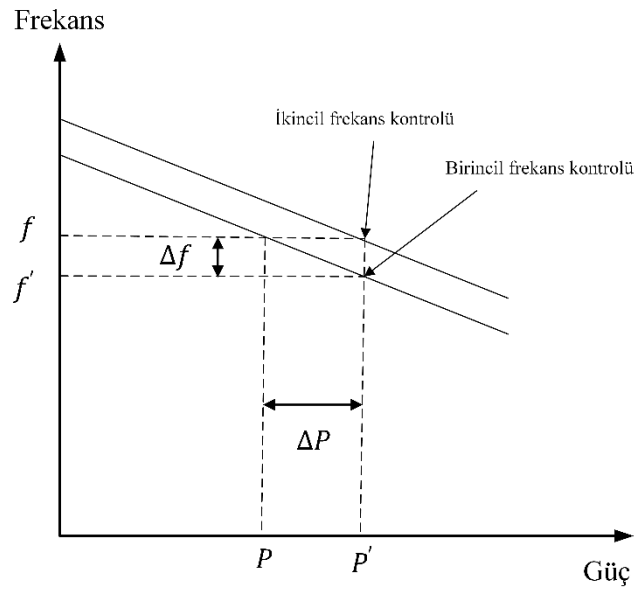
Denklemden,  $f_{\text{yüksüz}}$  yüksüz durumdaki frekansı,  $f_{\text{tamyük}}$  tam yük durumdaki frekansı,  $f$  nominal sistem frekansını ifade etmektedir.

## 2.2. İKİNCİL (SEKONDER) FREKANS KONTROLÜ

Bir güç sisteminde meydana gelen yük değişimi, frekansta bir değişime neden olmaktadır. Birincil frekans kontrol sürecinde, generatör çıkış güçleri değiştirilerek

frekansın nominal değerinden sapması durdurulmaktadır. Ancak, destekleyici bir kontrol süreci olmaksızın frekansta meydana gelen kalıcı durum hatasını ortadan kaldırmak mümkün değildir. Bu nedenle, birincil frekans kontrolün yetersiz olduğu durumlarda destekleyici kontrol olarak ikincil frekans kontrolüne ihtiyaç duyulmaktadır. İkincil frekans kontrol sürecinde, bir merkez yönetiminde enterkonnekte güç sistemlerinde bulunan alanlar arasında güç alışverişi yapılarak sistem frekansındaki dalgalanmaların ortadan kaldırılması sağlanır. UCTE tarafından belirlenen kriterlere göre, ikincil frekans kontrolü 30 s içinde aktif hale gelmeli ve 15 dk içinde frekans istenen değerler arasında tutmalıdır.

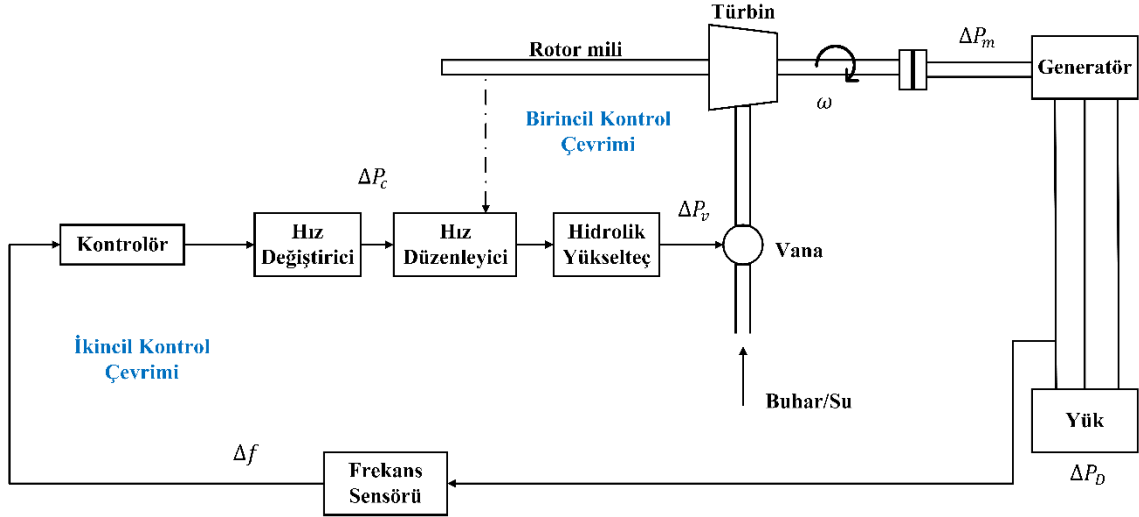
Şekil 2.3'te, ikincil frekans kontrolü sürecinde sisteme ait frekans-güç grafiği verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, birincil frekans kontrolü sonrası sistem frekansındaki kalıcı durum hatası ikincil frekans kontrolü sonrası ortadan kaldırılmıştır ve frekans nominal değerine getirilmiştir.



Şekil 2.3. İkincil frekans kontrolü sonrası.

İkincil frekans kontrolü, genellikle integratör içeren bir kontrolör yardımıyla gerçekleştirilir. Bir generatör için birincil frekans kontrolü ve ikincil frekans kontrolü aşamalarını içeren blok diyagramı Şekil 2.4'te gösterilmiştir [3]. Şekildeki hız düzenleyici, birincil ve ikincil kontrol çevrimlerini kullanarak hızda (frekansta) meydana gelen değişimleri algılayacaktır. Yüksek buhar veya su basıncına karşı vananın pozisyonunun ayarlanması için büyük değerlerde mekaniksel kuvvetlere ihtiyaç duyulmaktadır ve bu kuvvetler hidrolik yükselteçler yardımıyla sağlanır. Her bir üretim

birimindeki hız düzenleyici, birincil frekans kontrolü gerçekleştirecek ve tüm birimler yük değişiminin hangi alanda olduğuna bakılmaksızın denge sağlanmasına katkıda bulunacaktır.



Şekil 2.4. Birincil ve ikinci kontrol çevrimi içeren YFK blok diyagramı.

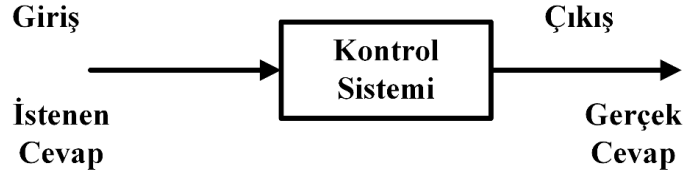
### 2.3. ÜÇÜNCÜL (TERSİYER) FREKANS KONTROLÜ

Üçüncül frekans kontrolü, ihtiyaç durumunda ikinci frekans kontrolü rezervini sağlamak ve söz konusu rezervi sistemdeki generatörlere en uygun maliyetle dağıtmak amacıyla gerçekleştirilen otomatik veya manuel bir kontrol sürecidir. Üçüncül frekans kontrolü, birincil frekans kontrolü ve ikinci frekans kontrolü süreçlerine kıyasla daha yavaş gerçekleşmektedir. Bu kontrol süreci, sistem operatörü tarafından üretim birimlerinin çıkış güçlerinin değiştirilmesiyle gerçekleşir.

### 2.4. KONTROL SİSTEMLERİ

Bir kontrol sistemi, kendisini veya başka bir sistemi düzenlemek, yönlendirmek veya yönetmek amacıyla birbirleriyle bağlantılı veya ilişkili fiziksel sistemlerin bir araya getirilmesiyle oluşmaktadır [84]–[86]. Kontrol sisteminin ifade edilmesi için “giriş” ve “çıkış” olmak üzere iki terim kullanılmaktadır. Giriş, sisteme uygulanan uyarıcı, tahrik edici veya komut verici bir bileşendir. Çıkış ise kontrol sisteminden kaynaklanan gerçek sistem cevabıdır. Çıkış, giriş tarafında belirlenen cevaba eşit veya bu cevaptan farklı olabilir. Girişler, kontrol sisteminin çıkışı için referans değer, ayarlanan değer veya istenen değerler gibi soyut veya fiziksel değişkenler olabilir. Kontrol sistemleri, birden

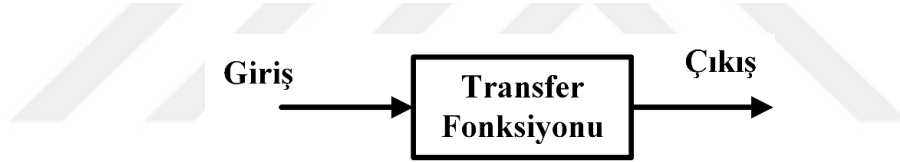
fazla giriş veya çıkışa sahip olabilmektedir. Giriş ve çıkış, istenen sistem cevabı ile gerçek sistem cevabını temsil etmektedir. Bir kontrol sisteminin genel gösterimi Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5. Kontrol sistemi.

Kontrol sistemi, birden çok bileşenden meydana gelmektedir. Sistemin çalışması hakkında inceleme yapmak amacıyla bu bileşenlerin bilinmesi gerekmektedir.

Blok, tüm özellikleri tek bir giriş/çıkış ilişkisi ile açıklanan bir araya getirilmiş bileşenler bütünüdür. Blok diyagramı, fiziksel bir sistemin girişleri ve çıkışları arasındaki sebep-sonuç ilişkisini temsil eden basitleştirilmiş bir resimsel gösterim şeklidir. Şekil 2.6'da bir blok diyagramı gösterilmiştir.



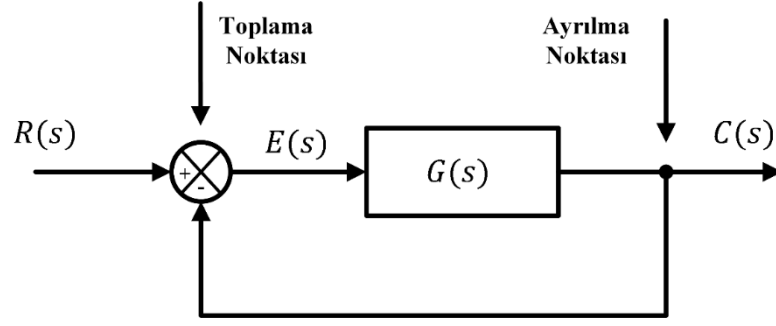
Şekil 2.6. Blok diyagramı.

Transfer fonksiyonu (TF), bir sistem veya bloğun çıkışının girişine oranı olarak tanımlanmaktadır ve Denklem (2.3) ile ifade edilir.

$$TF = \frac{\text{Sistem Çıkışı}}{\text{Sistem Girişi}} \quad (2.3)$$

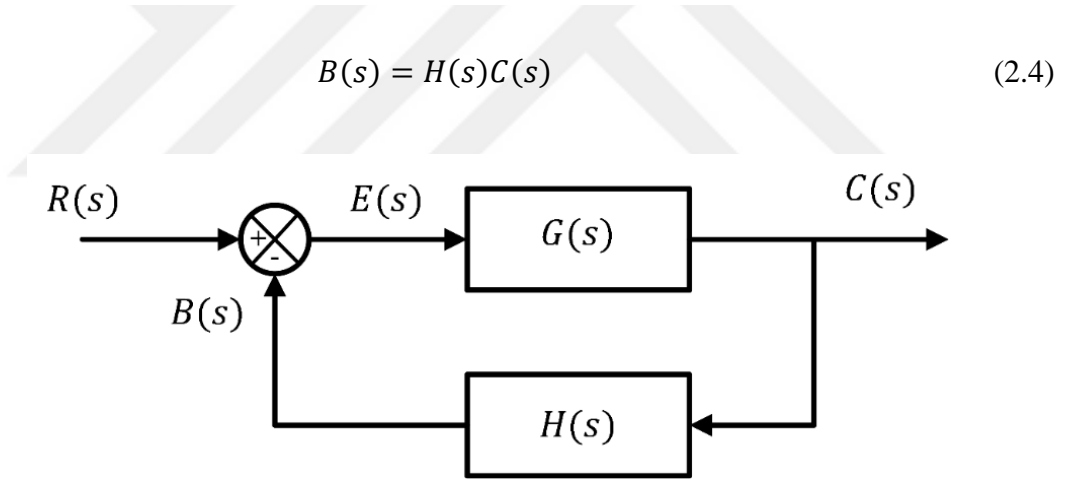
Açık çevrim kontrol sistemi ve kapalı çevrim kontrol sistemi olmak üzere iki farklı kontrol sistemi yapısı bulunmaktadır. Kapalı çevrim sistemin blok diyagramı Şekil 2.7'de gösterilmiştir [84]–[86].

Blok diyagramındaki  $C(s)$  çıkışı toplama noktasına geri beslenmektedir ve  $R(s)$  referans girişi ile karşılaştırma işlemi yapılmaktadır. Bu durumda çıkış bloğu olan  $C(s)$ ,  $G(s)$  transfer fonksiyonu ile  $E(s)$  bloğunun çarpılmasıyla elde edilmektedir.



Şekil 2.7. Birim geri beslemeli kapalı çevrim sistem blok diyagramı.

Çıkış, giriş ile karşılaştırılmak amacıyla toplama noktasına geri beslendiğinde çıkış sinyalinin biçiminin giriş sinyalinin biçimine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu dönüştürme işlemi, Şekil 2.8’de gösterildiği gibi, transfer fonksiyonu  $H(s)$  olan bir geri besleme bileşeni tarafından gerçekleştirilir. Birçok sistemde, geri besleme bileşeni sistem çıkışını ölçmek için kullanılan bir sensördür. Şekil 2.8’deki sistemde, giriş sinyali ile karşılaştırılmak için toplama noktasına geri beslenen geri besleme sinyali Denklem (2.4) ile gösterilir [84]–[86].



Şekil 2.8. Kazanç geri beslemeli kapalı çevrim sistem blok diyagramı.

Şekil 2.8’de verilen kapalı çevrim kontrol sisteminde  $C(s)$  çıkışı ile  $R(s)$  girişi arasındaki ilişki Denklem (2.5)’teki gibidir [84]–[86].

$$C(s) = G(s)E(s)$$

$$E(s) = R(s) - B(s) \quad (2.5)$$

$$E(s) = R(s) - H(s)C(s)$$

Denklem (2.5)'teki  $E(s)$  yok edilirse Denklem (2.6) elde edilir.

$$C(s) = G(s)[R(s) - H(s)C(s)]$$

veya

(2.6)

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

Kapalı çevrim transfer fonksiyonu,  $C(s)$  çıkışı ile  $R(s)$  girişi arasındaki ilişkiyi ifade ettiği için kapalı çevrim bir kontrol sisteminin transfer fonksiyonunun son hali Denklem (2.7)'deki gibi olur.

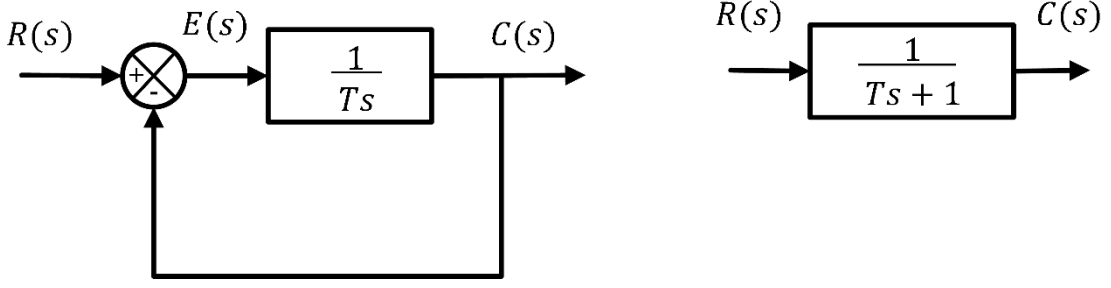
$$C(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} R(s) \quad (2.7)$$

Dinamik bir sistemin, zamanın bir fonksiyonu olarak ifade edilen bir giriş sinyaline vermiş olduğu yanıt zaman cevabı olarak adlandırılmaktadır. Bu cevabın teorik değerlendirmesi zaman bölgesinde gerçekleştirilir ve bu değerlendirme işlemi zaman bölgesi analizi olarak ifade edilmektedir. Eğer aşağıdaki bilgiler biliniyorsa sistemin zaman cevabını elde etmek mümkündür [84]–[86].

- Zamanın fonksiyonu olarak ifade edilen giriş sinyalinin özellikleri.
- Sistemin matematiksel modeli.

Bir sistemin zaman cevabı geçici cevap ve kalıcı durum cevabı olmak üzere iki bileşene sahiptir. Geçici cevap, kararlı bir sistemde zaman geçtikçe üstel olarak azalacak ve sıfır olacaktır. Bu bileşen, sistem dinamikleri ile ilgilidir ve giriş büyüklüklerinden bağımsızdır. Öte yandan, kalıcı durum cevabı geçici cevabın sıfır olduğunda başlayan ve hem sistem dinamikleri ile hem de giriş büyüklükleri ile ilişkili zaman cevabı bileşenidir. Basamak, rampa, impuls gibi fonksiyonlar zaman bölgesi analizinde yaygın olarak kullanılan test giriş sinyalleridir. Zamana bağlı basit fonksiyonlar olmaları nedeniyle, bu tür sinyaller kontrol sistemlerin matematiksel ve deneysel analizinin kolayca gerçekleştirilmesinde kullanılmaktadır.

Birinci derece sistemler, fiziksel olarak bir RC devresini veya termal sistemi temsil etmektedir. Şekil 2.9'da birinci dereceden bir sistemin blok diyagramı gösterilmiştir [84]–[86].



Şekil 2.9. Birinci derece sistem blok diyagramı.

Birinci derece sistemin transfer fonksiyonu Denklem (2.8)'deki gibidir.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (2.8)$$

Bu sisteme birim basamak uygulanır ve birim basamak fonksiyonunun Laplas dönüşümü olan  $1/s$  değeri Denklem (2.8)'de  $R(s)$  yerine yazılırsa Denklem (2.9) elde edilir.

$$C(s) = \frac{1}{Ts + 1} \cdot \frac{1}{s} \quad (2.9)$$

$C(s)$  ifadesi kısmi bileşenlerine ayrılırsa Denklem (2.9), Denklem (2.10) haline gelir.

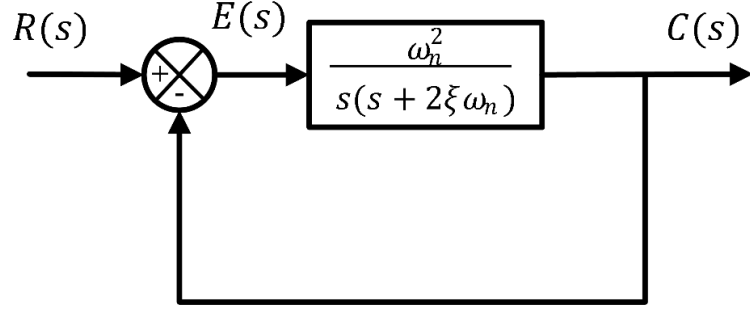
$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{T}{Ts + 1} = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + (1/T)} \quad (2.10)$$

Denklem (2.10) için Laplas dönüşümü alınırsa, birinci dereceden bir sistemin birim basamak zaman cevabı Denklem (2.11)'deki gibi elde edilir.

$$c(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T}}, \quad t \geq 0 \quad (2.11)$$

Kapalı çevrim transfer fonksiyonu iki kutba sahip olan sistemler ikinci derece sistemler olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.10'da blok diyagramı gösterilen ikinci derece sistemin transfer fonksiyonu Denklem (2.12) ile ifade edilir [84]–[86].

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.12)$$



Şekil 2.10. İkinci derece sistem blok diyagramı.

Denklem (2.12)'den, ikinci derece bir sistemin dinamik davranışının  $\omega_n$  ve  $\xi$  olmak üzere iki parametreye bağlı olduğu görülmektedir. Denklemde;  $\omega_n$  doğal frekansı,  $\xi$  ise sönüm oranını temsil etmektedir. Denklem (2.12) kullanılarak, ikinci derece bir sistemin kutupları Denklem (2.13) ile hesaplanır.

$$s_{1,2} = -\xi\omega_n \mp \omega_n\sqrt{\xi^2 - 1} \quad (2.13)$$

Denklem (2.13),  $\xi$  değerine göre farklı sonuçlar vermektedir.

$\xi = 0$  olması durumunda sistem kutupları aşağıdaki gibi olur. Bu durumda, sistem kutupları sanal eksen üzerindedir ve birbirinin eşleniğidir. Sistem sönümsüz haldedir.

$$s_{1,2} = \mp j\omega_n$$

$\xi = 1$  olması durumunda sistem kutupları aşağıdaki gibi olur. Bu durumda, sistem kutupları gerçektir ve birbirine eşittir. Sistem kritik sönümlü haldedir.

$$s_{1,2} = -\omega_n$$

$\xi > 1$  olması durumunda sistem kutupları aşağıdaki gibi olur. Bu durumda, sistem kutupları gerçektir ve farklıdır. Sistem aşırı sönümlü haldedir.

$$s_{1,2} = -\xi\omega_n \mp \omega_n\sqrt{\xi^2 - 1}$$

$0 < \xi < 1$  olması durumunda sistem kutupları aşağıdaki gibi olur. Bu durumda, sistem kutupları kompleks değerdedir ve birbirinin eşleniğidir. Sistem az sönümlü haldedir.

$$s_{1,2} = -\xi\omega_n \mp j\omega_n\sqrt{1 - \xi^2}$$

İkinci derece sistemlerde, çıkış sinyalinde meydana gelen dalgalanmaların maksimum değeri ve bu dalgalanmaların ne kadar sürede sönümlendiği önem arz etmektedir. Dalgalanmaların sönümlenmesi için geçen süre olan oturma süresi ( $t_s$ ) Denklem (2.14)

ile hesaplanır. Dalgalanmaların maksimum değeri aşma olarak isimlendirilir ve Denklem (2.15) ile hesaplanır.

$$t_s = \frac{4}{\xi \omega_n} \quad (2.14)$$

$$\%M = \left( e^{\frac{-\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \right) \cdot 100 \quad (2.15)$$

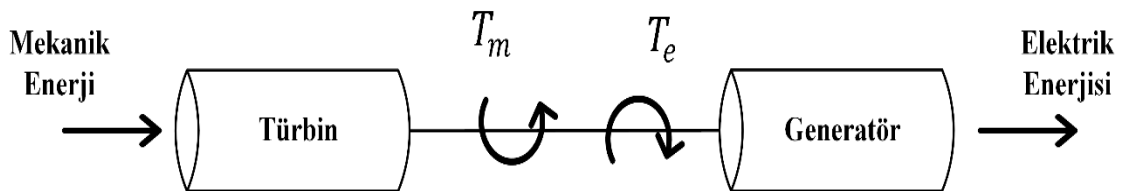


### 3. YÜK FREKANS KONTROLÜ MODELİ

Yük değişimleri ve/veya diğer bozucu etkenlerin olması durumunda frekans analizinin gerçekleştirilmesi amacıyla yük frekans kontrolü (YFK) sürecinin tasarlanması gerekmektedir. Güç sistemleri, yüksek dereceli doğrusal olmayan ve zamana göre değişken yapıya sahip sistemlerdir. Bu nedenle, bilgisayar ortamında yapılacak olan benzetim çalışmaları için güç sistemlerinin tüm bileşenlerinin düşük dereceli doğrusallaştırılmış basit matematiksel modelleri oluşturulmalıdır. Tez çalışmasının bu bölümünde, güç sisteminde YFK gerçekleştirmek amacıyla sistem bileşenlerinin modelleri hakkında bilgi verilmiştir.

#### 3.1. GENERATÖR MODELİ

Bir türbin tarafından harekete geçirilen generatör, birbirleriyle bağlantılı iki zıt momentli büyük bir dönen kütle olarak ifade edilebilir. Şekil 3.1’de verilen türbin-generatör modelinde, mekaniksel moment ( $T_m$ ) dönüş hızının artmasını sağlarken elektriksel moment ( $T_e$ ) hızın azalmasına neden olmaktadır.  $T_m$  ve  $T_e$  değerleri eşit olduğunda, dönüş hızı ( $\omega = \omega_0$ ) olacaktır. Elektriksel moment ( $T_e$ ), mekaniksel momentten büyük olacak şekilde artarsa tüm döner sistem yavaşlayacaktır. Yavaşlamanın fazla olması sisteme zarar vereceğinden dolayı mekaniksel moment artırılarak sistemin dengeye getirilmesi amacıyla bir kontrol sürecinin tasarlanması gerekmektedir [1]–[4].



Şekil 3.1. Türbin-generatör modeli.

Güç sisteminin kontrolü için modelleme yapılırken kullanılan formüllerdeki kısaltmalar aşağıda verilmiştir.

- $\omega$  = açısal hız
- $\alpha$  = açısal ivme
- $\delta$  = generatör faz açısı
- $T_a = T_m - T_e$  = ivme momenti
- $T_m$  = mekaniksel moment
- $T_e$  = elektriksel moment
- $P_a = P_m - P_e$  = ivme gücü
- $P_m$  = mekaniksel güç
- $P_e$  = elektriksel güç
- $I$  = makinenin atalet momenti
- $M$  = makinenin açısal momenti

Modelleme sürecinde, faz açısı hariç tüm büyüklükler birim değer (per unit - pu) olarak ifade edilecektir. Ayrıca, tüm kalıcı durumlar veya nominal değerler için “0” alt indisi ( $\omega_0$ ), nominal değerlerden sapmaları ifade etmek için “ $\Delta$ ” sembolü ( $\Delta\omega$ ) kullanılacaktır. Temel eşitliklerden bazıları Denklem (3.1)-(3.3) arasında verilmiştir [1]–[4].

$$I\alpha = T_a \quad (3.1)$$

$$M = \omega I \quad (3.2)$$

$$P_a = \omega T_a = \omega(I\alpha) = M\alpha \quad (3.3)$$

Başlangıç olarak, tek bir döner makine olduğunu ve bu makinenin kalıcı durum hızının  $\omega_0$  ve faz açısının  $\delta_0$  olduğu varsayılacaktır. Çeşitli elektriksel veya mekaniksel bozulmalar nedeniyle makine yavaşlamasına veya hızlanmasına neden olacak moment farklılıklarına maruz kalacaktır. Bu noktada, hızda meydana gelen  $\Delta\omega$  sapması ile faz açısında meydana gelen  $\Delta\delta$  sapması incelenecektir. Faz açısı sapması ( $\Delta\delta$ ),  $\omega_0$  hızında dönen referans ekseninin faz açısı ile  $\alpha$  ivmesine maruz kalan makinenin faz açısı arasındaki farka eşittir. Hızlanma durumunda makinenin hızı Denklem (3.4) ve (3.5) ile ifade edilir [1], [2], [4].

$$\omega = \omega_0 + \alpha t \quad (3.4)$$

$$\Delta\delta = \int (\omega_0 + \alpha t) dt - \int \omega_0 dt = (\omega_0 t) + \left(\frac{1}{2}\alpha t^2\right) - (\omega_0 t) = \frac{1}{2}\alpha t^2 \quad (3.5)$$

Nominal hızdan sapma ( $\Delta\omega$ ), Denklem (3.6) ile ifade edilir.

$$\Delta\omega = \alpha t = \frac{d}{dt}(\Delta\delta) \quad (3.6)$$

Faz açısı sapması, hız sapması ve açısal moment arasındaki ilişki ise aşağıdaki Denklem (3.7) ile ifade edilir.

$$T_a = I\alpha = I \frac{d}{dt}(\Delta\omega) = I \frac{d^2}{dt^2}(\Delta\delta) \quad (3.7)$$

Mekaniksel ve elektriksel güçte meydana gelen değişimler ile dönüş hızı ve mekaniksel moment ilişkilendirildiğinde, ivme gücü, mekaniksel güç ve elektriksel güç arasındaki bağıntı Denklem (3.8)'deki gibidir.

$$P_a = P_m - P_e \quad (3.8)$$

İvme gücü, kalıcı durum değeri ve sapma terimlerinin toplamı cinsinden ifade edilirse Denklem (3.9) elde edilir.

$$P_a = P_{a0} + \Delta P_a \quad (3.9)$$

$P_{a0} = P_{m0} - P_{e0}$  ve  $\Delta P_a = \Delta P_m - \Delta P_e$  eşitlikleri Denklem (3.9)'da yerine yazılırsa güç ifadesi Denklem (3.10) ile ifade edilir.

$$P_a = (P_{m0} - P_{e0}) + (\Delta P_m - \Delta P_e) \quad (3.10)$$

Benzer olarak, moment Denklem (3.11) ile ifade edilir.

$$T_a = (T_{m0} - T_{e0}) + (\Delta T_m - \Delta T_e) \quad (3.11)$$

Denklem (3.3) kullanılarak Denklem (3.12) elde edilir. Denklem (3.10) ve (3.11) yerine koyulursa Denklem (3.13) elde edilir.

$$P_a = P_{a0} + \Delta P_a = (\omega_0 + \Delta\omega)(T_{a0} + \Delta T_a) \quad (3.12)$$

$$(P_{m0} - P_{e0}) + (\Delta P_m - \Delta P_e) = (\omega_0 + \Delta\omega)[(T_{m0} - T_{e0}) + (\Delta T_m - \Delta T_e)] \quad (3.13)$$

Senkron çalışmada,  $P_{m0} = P_{e0}$  ve  $T_{m0} = T_{e0}$  olur. Aynı zamanda,  $\Delta T_m$ ,  $\Delta T_e$  ve  $\Delta\omega$  terimlerinin çarpımı ihmal edilirse Denklem (3.14) elde edilir.

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \omega_0(\Delta T_m - \Delta T_e) \quad (3.14)$$

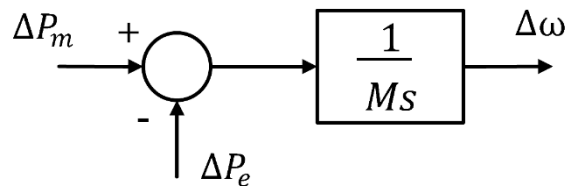
Moment ile hız değişimi arasındaki ilişki Denklem (3.15) ile ifade edilir.

$$(T_{m0} - T_{e0}) + (\Delta T_m - \Delta T_e) = I \frac{d}{dt}(\Delta\omega) \quad (3.15)$$

$T_{m0} = T_{e0}$  olduğu için Denklem (3.14) ile (3.15) birleştirilirse Denklem (3.16) elde edilir.

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \omega_0 I \frac{d}{dt}(\Delta\omega) = M \frac{d}{dt}(\Delta\omega) \quad (3.16)$$

Denklem (3.16)'nın Laplas dönüşümü alınırsa Denklem (3.17) elde edilir. Mekaniksel ve elektriksel güç ile hız değişimi arasındaki ilişkinin transfer fonksiyonu ise Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Hız-güç ilişkisi.

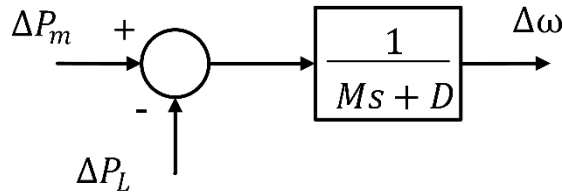
$$\Delta P_m - \Delta P_e = Ms(\Delta\omega) \quad (3.17)$$

### 3.2. YÜK MODELİ

Bir güç sistemindeki yükler çeşitli elektriksel cihazlardan meydana gelmektedir. Aydınlatma ve ısıtma gibi omik yüklerde elektriksel güç frekanstan bağımsızken fan ve motor gibi indüktif yükler frekansa bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Elektriksel yüklerin büyük çoğunluğu motor yüklerden meydana geldiği için, sistem tarafından talep edilen yükün frekans üzerindeki etkisini incelemek amacıyla bir modele ihtiyaç duyulmaktadır. Yük ile frekans arasındaki ilişki aşağıdaki Denklem (3.18) ile ifade edilir.

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D\Delta\omega \quad (3.18)$$

Burada;  $\Delta P_L$  frekanstan bağımsız yük değişimini,  $D\Delta\omega$  ifadesi frekansa bağlı yük değişimini,  $D$  ise yük sönüm sabitini ifade etmektedir. Yük sönüm sabiti, yükte meydana gelen yüzdellik değişimin frekansta meydana getireceği yüzdellik değişim olarak tanımlanır ve değeri genel olarak %1 ile %2 arasındadır. Örneğin;  $D = 2$  olduğu varsayılırsa, yükte meydana gelen %2'lik bir değişimde frekansta %1'lik bir değişim meydana gelecektir. Yük sönüm sabiti etkisini içeren generatör-yük modeli Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Generatör-yük modeli.

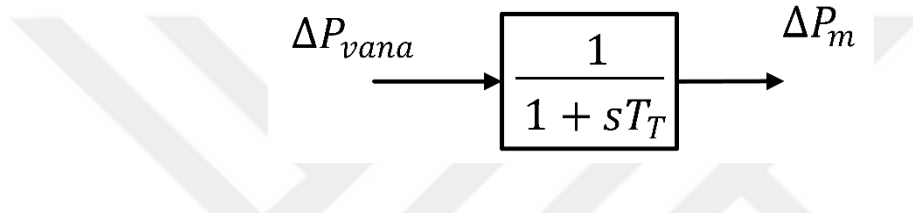
### 3.3. TÜRBİN (TAHRİK ÜNİTESİ) MODELİ

Güç sistemlerinde generatörü hareket ettiren tahrik ünitesi bir buhar türbini veya hidro türbin olabilir. Tahrik ünitesi için model oluşturulurken, buhar türbini için buhar kaynağı ve ısıtıcı sisteminin karakteristikleri, hidro türbin için ise cebri boru

karakteristikleri dikkate alınmalıdır. Türbin modeli, vananın pozisyonundaki değişim ile mekaniksel çıkış gücünde meydana gelen değişim arasındaki ilişki ile ifade edilir. Arasııtmasız türbin için transfer fonksiyonu Denklem (3.19) ile, türbin modeli Şekil 3.4'te verilmiştir.

$$G_T(s) = \frac{\Delta P_m(s)}{\Delta P_{vana}(s)} = \frac{1}{1 + sT_T} \quad (3.19)$$

Denklem (3.19)'da;  $T_T$  zaman sabitini ifade etmekte olup 0,2 ile 2 değerleri arasında değişiklik göstermektedir.

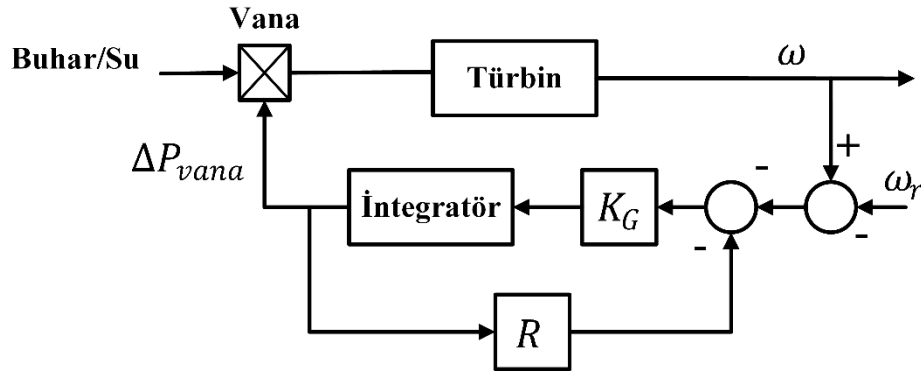


Şekil 3.4. Türbin (tahrik ünitesi) modeli.

### 3.4. HIZ DÜZENLEYİCİ (GOVERNER) MODELİ

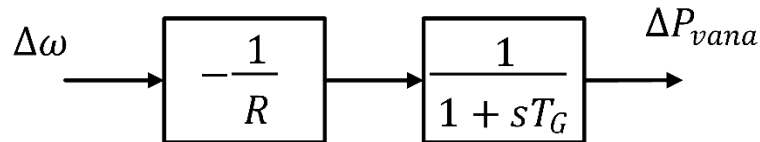
Generatörün elektrik yükü aniden arttığında, elektrik gücü mekanik güçten daha büyük değere gelir. Meydana gelen bu güç farkı, döner sistemde depolanan kinetik enerji tarafından karşılanır. Kinetik enerjinin azalması, türbin hızının düşmesine dolayısıyla sistem frekansının kabul edilebilir sınırların dışına çıkmasına neden olmaktadır. Hızdaki değişim hız düzenleyici tarafından algılanır. Hız düzenleyici, yük değişimlerine göre mekaniksel güç çıkışını ayarlamak amacıyla türbin girişini kontrol eder ve böylelikle sistem frekansını nominal değerine ulaştırır. İki veya daha fazla üretim biriminin aynı sisteme bağlanması durumunda her bir generatör sistem hızını kendi hızına göre ayarlamaya çalışacağı için senkron hız düzenleyici sistemi kullanılamaz. Bu nedenle, iki veya daha fazla üretim birimi arasında kararlı bir yük paylaşımı yapmak amacıyla farklı değerlerdeki generatör çıkışları için hız hatasını sıfır yapacak bir geri beslemeli düzenleyici sistem kullanılmalıdır. Hız düzenleyici sisteminin blok diyagramı Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Ölçülen rotor hızı ( $\omega$ ), referans hız ( $\omega_r$ ) ile karşılaştırılır. İki hız arasındaki hata sinyali ( $\Delta\omega$ ) negatifleştirilir ve bir  $K_G$  kazancı ile kuvvetlendirilir. Daha sonra, integral operatörü ile işleme tabi tutularak  $\Delta P_{vana}$  kontrol işareti elde edilir. Eğer,

makine referans hızda çalışırken elektrik yükü artarsa rotor hızı referans hızın altına düşecek ve hata sinyali negatif olacaktır. Bu durumda, integratör ve kazanç blokları vanayı açarak türbinin mekaniksel çıkışını ve dolayısıyla generatörün elektriksel çıkışını arttıracaktır.



Şekil 3.5. Hız düzenleyici sistemi.

Hız düzenleyicinin indirgenmiş blok diyagramı Şekil 3.6'da verilmiştir. Bu hız düzenleyiciler,  $1/R$  kazancına ve  $T_G$  zaman sabitine sahip oransal kontrolör olarak temsil edilmektedir.

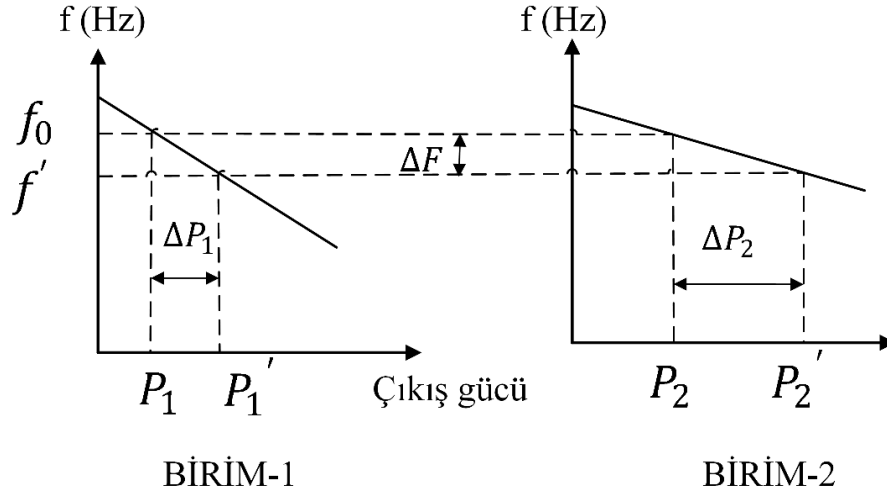


Şekil 3.6. Hız düzenleyici sistemi indirgenmiş blok diyagramı.

$R$  değeri düzenleyici sabiti olarak bilinir ve üretim biriminin yük karakteristiği ile kalıcı durum hızı arasındaki ilişkiyi belirler. Hız değişiminde ( $\Delta\omega$ ) veya frekansta ( $\Delta f$ ) meydana gelen değişimin vana çıkışı ( $\Delta P_{vana}$ ) veya çıkış gücüne ( $\Delta P$ ) oranı  $R$  değerine eşittir. Örneğin;  $R$  değerinin %5 olması durumunda frekansta meydana gelen %5'lik bir değişim vana pozisyonunda veya çıkış gücünde %100'lük bir değişime neden olacaktır. Eğim olarak da adlandırılan düzenleyici sabitinin yüzde olarak ifadesi Denklem (3.20)'de verilmiştir.

$$\%R = \frac{\text{Hız veya frekanstaki değişim (\%)}}{\text{Çıkış gücü değişimi (\%)}} \cdot 100 \quad (3.20)$$

Hız düzenleyiciye sahip iki veya daha fazla generatör, bir güç sistemine bağlandığında sistemde meydana gelen yük değişimlerini paylaşacakları ortak bir frekans olacaktır. Şekil 3.7’de gösterildiği gibi, iki üretim biriminin olduğu ve başlangıçta  $f_0$  frekansında çıkış güçlerinin  $P_1$  ve  $P_2$  olduğu varsayalım.



Şekil 3.7. Paralel birimler arasında yük paylaşımı.

$\Delta P_L$  değerindeki yük değişimi birimlerin yavaşlamasına ve yeni bir ortak çalışma frekansına ( $f'$ ) ulaşana kadar hız düzenleyici çıkışının artmasına neden olacaktır. Yükün değeri, her bir üretim biriminin eğim karakteristiğine göre Denklem (3.21) ve Denklem (3.22) ile belirlenir.

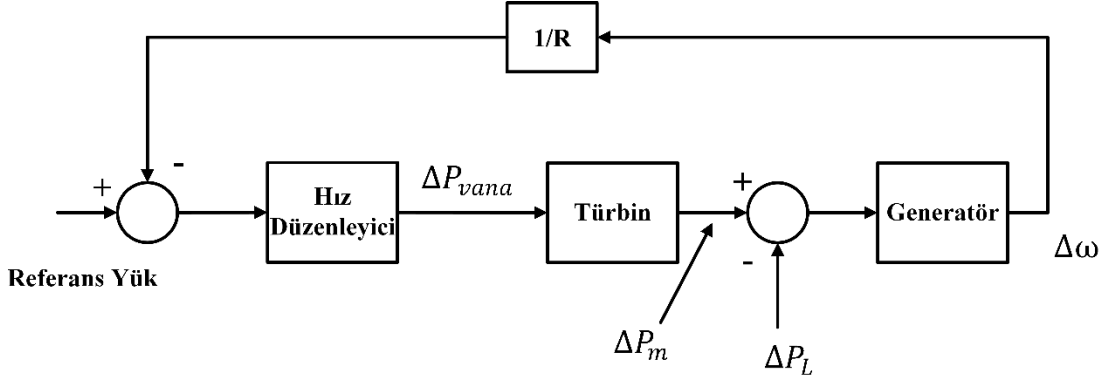
$$\Delta P_1 = P_1' - P_1 = \frac{\Delta f}{R_1} \quad (3.21)$$

$$\Delta P_2 = P_2' - P_2 = \frac{\Delta f}{R_2} \quad (3.22)$$

Denklem (3.21) ve Denklem (3.22) kullanılarak Denklem (3.23) bulunur.

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (3.23)$$

Hız düzenleyici, türbin ve generatöre ait transfer fonksiyonu modelleri kullanılarak oluşturulan tek alanlı bir güç sisteminin blok diyagramı Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Tek alanlı güç sistemi modeli.

Generatörde birim basamak değerinde bir yük artışı olduğu varsayalım.

$$\Delta P_L(s) = \frac{\Delta P_L}{s}$$

Bu durumda, yük değişimi ile hız değişimi diğer bir ifadeyle frekans değişimi arasındaki transfer fonksiyonu Denklem (3.24)'teki gibi olur.

$$\Delta \omega(s) = \Delta P_L(s) \left[ \frac{\frac{-1}{Ms + D}}{1 + \frac{1}{R} \left( \frac{1}{1 + sT_G} \right) \left( \frac{1}{1 + sT_T} \right) \left( \frac{1}{Ms + D} \right)} \right] \quad (3.24)$$

$\Delta \omega(s)$  ifadesinin kalıcı durum değeri aşağıdaki gibi bulunur.

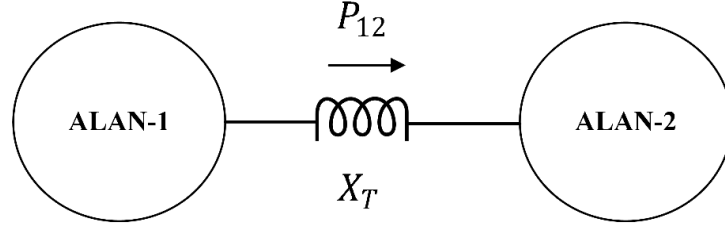
$$\Delta \omega_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} [s \Delta \omega(s)] = \Delta \omega_{ss} = \frac{-\Delta P_L \left( \frac{1}{D} \right)}{1 + \left( \frac{1}{R} \right) \left( \frac{1}{D} \right)} = \frac{-\Delta P_L}{\frac{1}{R} + D} \quad (3.25)$$

Burada yük sönüm sabiti  $D = 0$  olursa, hızdaki değişimin ifadesi aşağıdaki gibi olur.

$$\Delta \omega = -R \Delta P_L \quad (3.26)$$

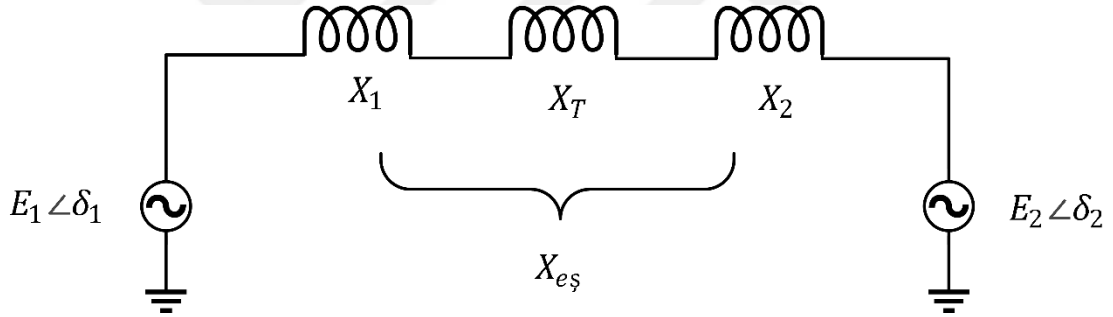
### 3.5. BAĞLANTI HATTI MODELİ

Şekil 3.9’da gösterildiği gibi,  $X_T$  reaktansına sahip bir bağlantı hattı ile birbirine bağlı olan iki alanlı enterkonnekte güç sistemi ele alınsın.



Şekil 3.9. İki alanlı güç sistemi.

Yük frekans kontrolünde, sistemde bulunan her bir alan eşdeğer bir üretim birimi olarak temsil edilebilir. Her bir alanın bir gerilim kaynağı ve eşdeğer bir reaktans ile temsil edilmesiyle oluşan güç sistemi elektriksel eşdeğeri Şekil 3.10’da verilmiştir.



Şekil 3.10. Güç sistemi elektriksel eşdeğeri.

Bu sistemde, alan-1’den alan-2’ye bağlantı hattı üzerinden güç akışı Denklem (3.27) ile hesaplanır.

$$P_{12} = \frac{E_1 E_2}{X_T} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (3.27)$$

Bir başlangıç çalışma noktasında,  $\delta_1 = \delta_{10}$  ve  $\delta_2 = \delta_{20}$  eşitlikleri kullanılarak doğrusallaştırma yapılırsa Denklem (3.28) elde edilir.

$$\Delta P_{12} = \frac{E_1 E_2}{X_T} \cos(\delta_{10} - \delta_{20}) (\Delta \delta_1 - \Delta \delta_2) \quad (3.28)$$

$T$  senkronizasyon katsayısıdır ve Denklem (3.29) ile hesaplanır.

$$T = \frac{E_1 E_2}{X_T} \cos(\delta_{10} - \delta_{20}) \quad (3.29)$$

Bu durumda bağlantı hattı güç değişimi Denklem (3.30)'daki gibi olur.

$$\Delta P_{12} = T(\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2) \quad (3.30)$$

Güç açısı ile frekans arasındaki ilişki kullanılarak, Denklem (3.30) aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

$$\Delta P_{12} = 2\pi T \left( \int \Delta f_1 - \int \Delta f_2 \right) \quad (3.31)$$

Laplas dönüşümü gerçekleştirilirse, bağlantı hattı güç değişimi Denklem (3.32) ile elde edilir.

$$\Delta P_{12}(s) = \frac{2\pi}{s} T(\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)) \quad (3.32)$$

Her biri hız düzenleyici, türbin ve generatör içeren iki alanlı güç sistemi blok diyagramı Şekil 3.11'de verilmiştir. Sistemde meydana gelen pozitif değerde bir bağlantı hattı güç değişimi alan-1'den alan-2'ye güç akışının artmasını ifade etmektedir. Diğer bir ifadeyle, alan-1'deki yük değerinin arttığını, alan-2'deki yükün azaldığını göstermektedir.

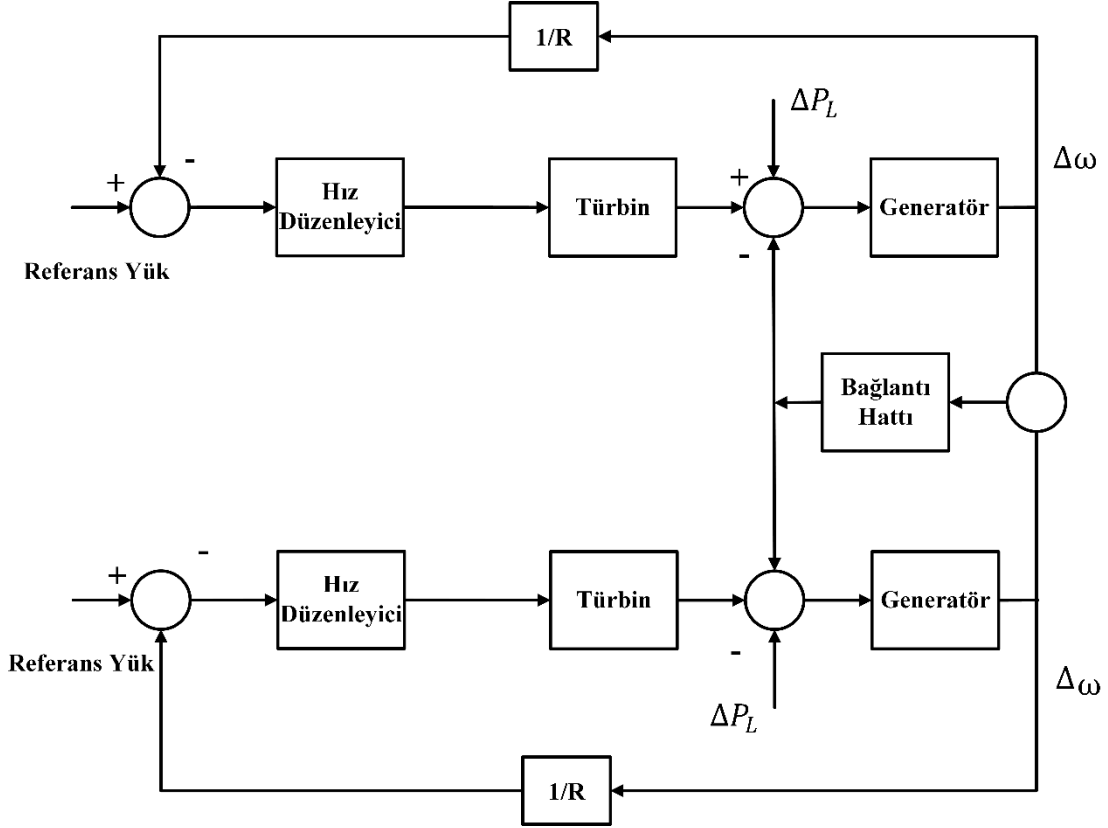
Kalıcı durumda, sistemdeki tüm dalgalanmalar sönümlendikten sonra frekans sabit değerde ve her iki alan için eşit olacaktır. Sistemde meydana gelen bir yük değişimi için, frekanstaki değişim Denklem (3.33) ile hesaplanır.

$$\Delta f = \Delta\omega_1 = \Delta\omega_2 = \frac{-\Delta P_L}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \quad (3.33)$$

Alan-1'de meydana gelen yük değişimi için bağlantı hattı güç değişimi Denklem (3.34)

ile bulunur.

$$\Delta P_{12} = \frac{-\Delta P_{L1} \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \quad (3.34)$$

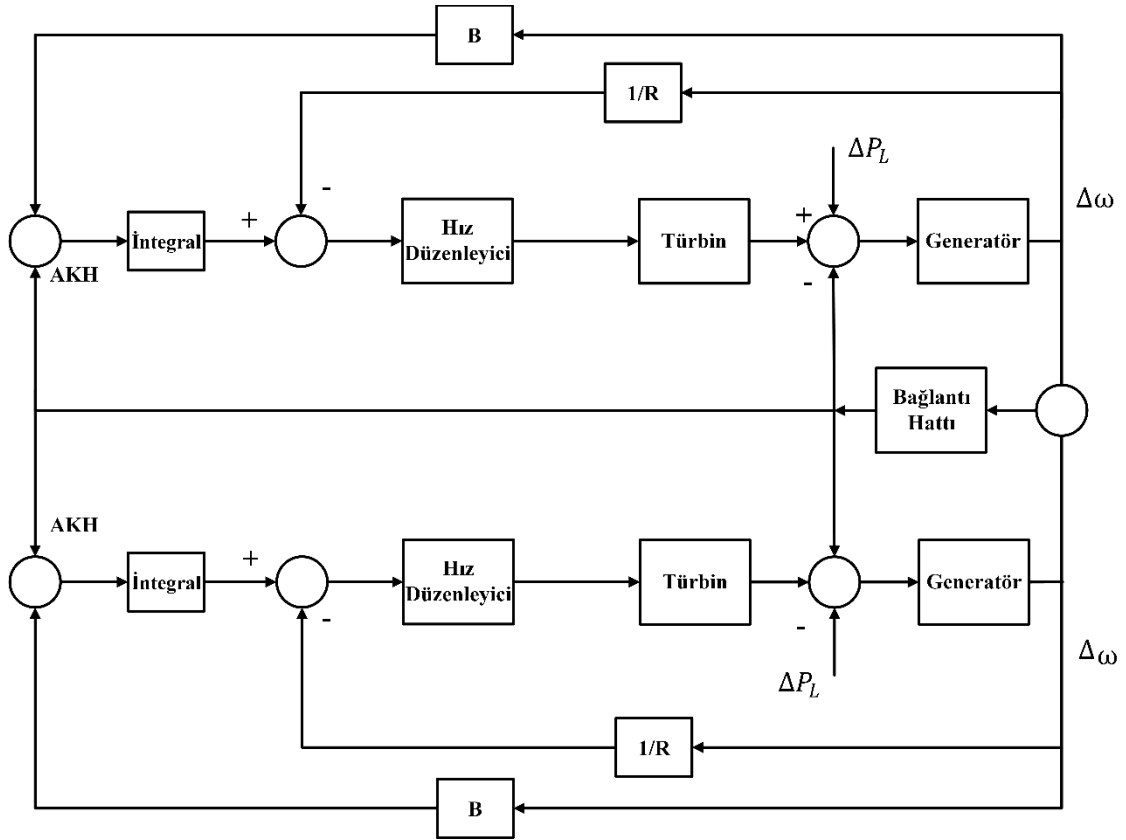


Şekil 3.11. Güç sistemi YFK modeli.

Birincil kontrolde, frekans sabit bir değerde tutulmuş olmasına rağmen bir hata değeri mevcuttur. Bu nedenle, destekleyici bir kontrol süreci gerekmektedir. İkincil kontrol olarak adlandırılan bu süreçte, frekansı nominal değerine getirmek amacıyla bir reset (integral) kontrol uygulanır.

İki farklı üretim biriminin birbiriyle bağlantılı olarak çalışmasının temel sebebi, olası bir değişim durumunda birimler arasında güç alışverişi yapmak ve frekansı nominal değerine getirmektir. Eşit üretim ve yük karakteristiğine ( $R_1 = R_2$ ,  $D_1 = D_2$ ) sahip iki farklı üretim birimi olduğu varsayalım. Her iki üretim birimi arasında yapılan anlaşma gereği, alan-1'den alan-2'ye aktarılacak güç değerinin 100 MW olduğu kabul edilsin. Alan-2'de 30 MW değerinde bir yük artışı olduğunda, eşit üretim karakteristiğine sahip oldukları için bu artış iki birim arasında paylaştırılarak karşılanır. Bu nedenle, her iki

alandanda 15 MW'lık bir artış olacaktır. Bu durumda, bağlantı hattı üzerinden gerçekleşen güç akışı 100 MW değerinden 115 MW değerine çıkmış olacaktır. Alan-2'deki yük ihtiyacının karşılanması noktasında bu işlem faydalı olmasına rağmen iki üretim birimi arasında yapılan anlaşmalar gereği problemlere sebep olabilmektedir.



Şekil 3.12. İkincil kontrol içeren güç sistemi YFK modeli.

Bu problemleri çözmek amacıyla, sistem frekansı ve bağlantı hattı güç değişimi bilgilerini kullanarak ikincil kontrol işlemi gerçekleştirilir. Bu aşamaya kadar oluşturulan modeller kullanılarak, iki alanlı güç sistemlerinde YFK sürecinin blok diyagramı Şekil 3.12'deki gibi elde edilir.

İkincil kontrol işleminde, bağlantı hattı güç değişimine frekans bias faktörü ile frekans değişiminin çarpımının eklenmesiyle oluşan ve alan kontrol hatası (AKH) ismi verilen bir kontrol sinyali kullanılmaktadır. AKH, Denklem (3.35) ile hesaplanır.

$$\begin{aligned}
 AKH_1 &= B_1 \cdot \Delta f_1 + \Delta P_{tie} \\
 AKH_2 &= B_2 \cdot \Delta f_2 + \Delta P_{tie}
 \end{aligned}
 \tag{3.35}$$

Denklem (3.35)'te,  $B_1$  ve  $B_2$  her iki alan için frekans bias faktörü olup Denklem

(3.36)'daki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} B_1 &= \left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right) \\ B_2 &= \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right) \end{aligned} \tag{3.36}$$

## 4. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI İÇEREN GÜÇ SİSTEMİ MODELLERİ

Tüketici talepleri nedeniyle meydana gelen ani yük değişimleri ve/veya güneş ışınımı ve rüzgâr hızı değişimi gibi YEK doğası kaynaklı sebepler sistem kararsızlığına neden olmaktadır. Bu nedenle, her bir alandaki frekans değişimini (alan-1 için  $\Delta f_1$ , alan-2 için  $\Delta f_2$ ) ve bağlantı hattı güç değişimini ( $\Delta P_{tie}$ ) minimize etmek amacıyla PI-(1+DD) isimli kaskad bir kontrolör ile kontrol işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Kontrol işleminde kullanılan kontrolörlerin parametrelerinin belirlenmesi, değişken durumlar altında sistem performansını iyileştirmek amacıyla önem arz etmektedir. Bu nedenle, tasarlanan kontrolör ve kullanılan optimizasyon tekniklerinin performansları iki farklı test modeli üzerinde test edilmiştir.

### 4.1. TEST MODELİ-1: İKİ ALANLI ARA-ISITMASIZ TERMAL SİSTEM

Bu test modeli, YEK içeren iki alanlı ara-ısıtmasız termal sistemden meydana gelmektedir. Alan-1, ara-ısıtmasız termal güç sistemi, FV güç sistemi ve yüklerden oluşurken, alan-2 ise ara-ısıtmasız termal güç sistemi, rüzgâr güç sistemi ve yüklerden oluşmaktadır. Sistem performansının değerlendirilmesi için oluşturulacak modelde kolaylık sağlaması açısından, çalışmadaki güç sisteminde bulunan her bir bileşen doğrusal olarak kabul edilmiştir ve bilgisayar programı benzetim modeli üzerinde birinci derece transfer fonksiyonu kullanılarak modellenmiştir.

Ara-ısıtmasız termal güç sistemini oluşturan türbin ve hız düzenleyicinin transfer fonksiyonları sırasıyla Denklem (4.1) ve Denklem (4.2) ile verilmiştir.

$$G_T = \frac{K_T}{1 + sT_T} \quad (4.1)$$

$$G_G = \frac{K_G}{1 + sT_G} \quad (4.2)$$

$K_T$  ve  $K_G$  türbin ve hız düzenleyicinin kazanç katsayılarını,  $T_T$  ve  $T_G$  ise türbin ve hız düzenleyicinin zaman sabitlerini ifade etmektedir.

Rüzgâr güç sistemlerinin basitleştirilmiş transfer fonksiyonu modeli Denklem (4.3) ile gösterilmiştir. Benzer olarak, FV üretim sisteminin birinci derece transfer fonksiyonu Denklem (4.4) ile ifade edilmektedir.

$$G_{WT} = \frac{K_{WT}}{1 + sT_{WT}} \quad (4.3)$$

$$G_{PV} = \frac{K_{PV}}{1 + sT_{PV}} \quad (4.4)$$

$K_{WT}$  ve  $K_{PV}$  rüzgâr üretim sistemi ve FV üretim sisteminin kazanç katsayılarını,  $T_{WT}$  ve  $T_{PV}$  ise rüzgâr üretim sistemi ve FV üretim sisteminin zaman sabitlerini ifade etmektedir.

Alan-1'den alan-2'ye bağlantı hattı üzerinden güç formülü Denklem (4.5) ile verilmiştir.

$$\Delta P_{tie} = \frac{2\pi T_{12}}{s} (\Delta f_1 - \Delta f_2) \quad (4.5)$$

Güç sisteminin transfer fonksiyonu Denklem (4.6)'da verilmiştir.

$$G_{PS}(s) = \frac{K_{PS}}{1 + sT_{PS}} \quad (4.6)$$

$K_{PS}$  güç sisteminin kazanç katsayısını,  $T_{PS}$  ise güç sisteminin zaman sabitini ifade etmektedir.

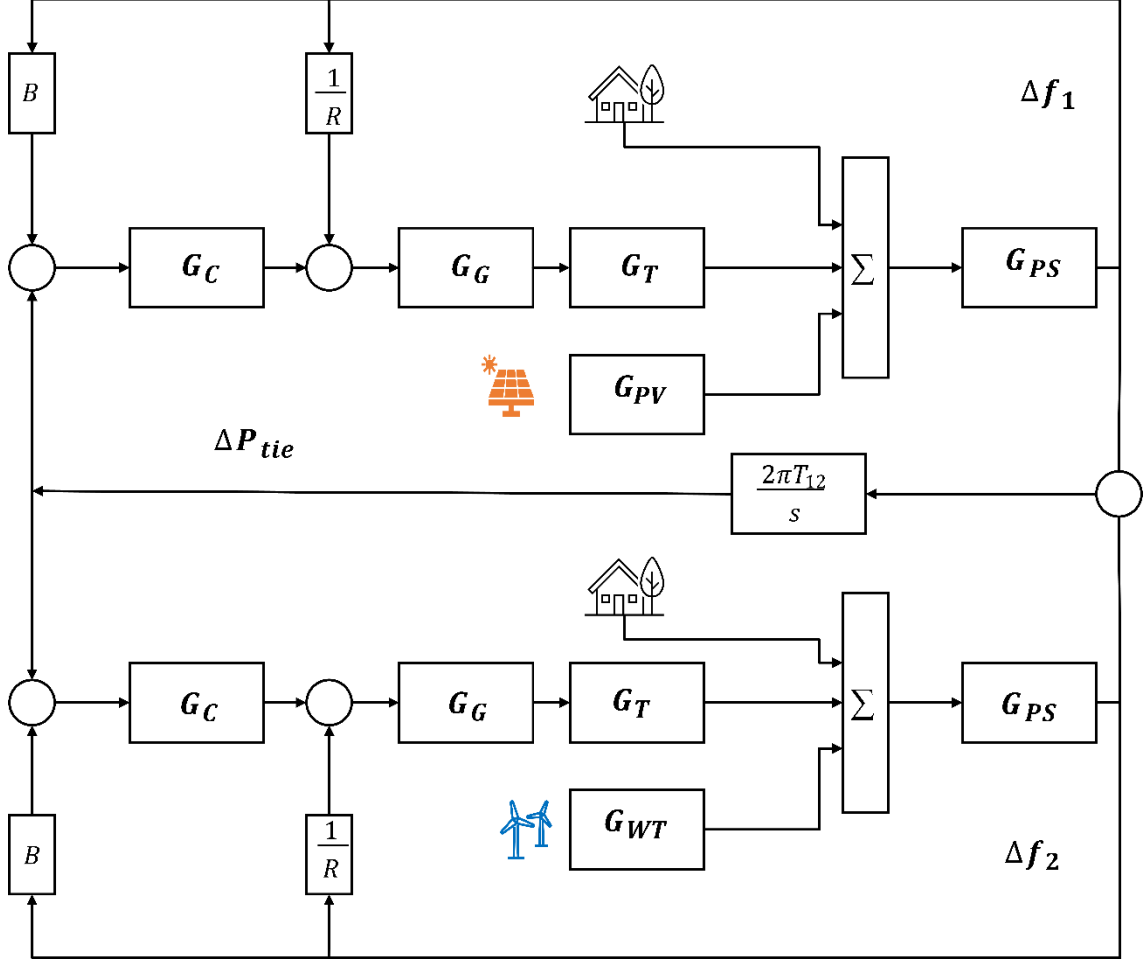
Güç sistemindeki her bir alanın kontrolör giriş sinyali olan alan kontrol hatası ( $AKH$ ), üretim ile yük talepleri arasındaki dengesizlik durumunu tanımlar.  $AKH$ , alan-1 ve alan-2 için sırasıyla Denklem (4.7) ve Denklem (4.8) ile hesaplanır.

$$AKH_1 = B_1 \cdot \Delta f_1 + \Delta P_{tie} \quad (4.7)$$

$$AKH_2 = B_2 \cdot \Delta f_2 + \Delta P_{tie} \quad (4.8)$$

Denklem (4.1)-(4.8)'de;  $R_1$  ve  $R_2$  alan-1 ve alan-2 için termal sistemin düzenleme sabitlerini;  $AKH_1$  ve  $AKH_2$  alan-1 ve alan-2 için alan kontrol hatasını;  $B_1$  ve  $B_2$  alan-1 ve alan-2 için frekans bias faktörlerini;  $K_T, K_G, K_{PS}, K_{PV}, K_{WT}$  sırasıyla türbinin, hız düzenleyicinin, güç sisteminin, FV sistemin, rüzgâr enerji sisteminin kazançlarını;

$T_T, T_G, T_{PS}, T_{PV}, T_{WT}$  sırasıyla türbinin, hız düzenleyicinin, güç sisteminin, FV sistemin, rüzgâr enerji sisteminin zaman sabitlerini;  $\Delta f_1$  ve  $\Delta f_2$  alan-1 ve alan-2 için frekans sapmasını;  $\Delta P_{tie}$  bağlantı hattı güç değişimini ifade etmektedir.



Şekil 4.1. Test Modeli-1 için güç sistemi transfer fonksiyonu modeli.

Çizelge 4.1. Test Modeli-1 için güç sistemi parametreleri.

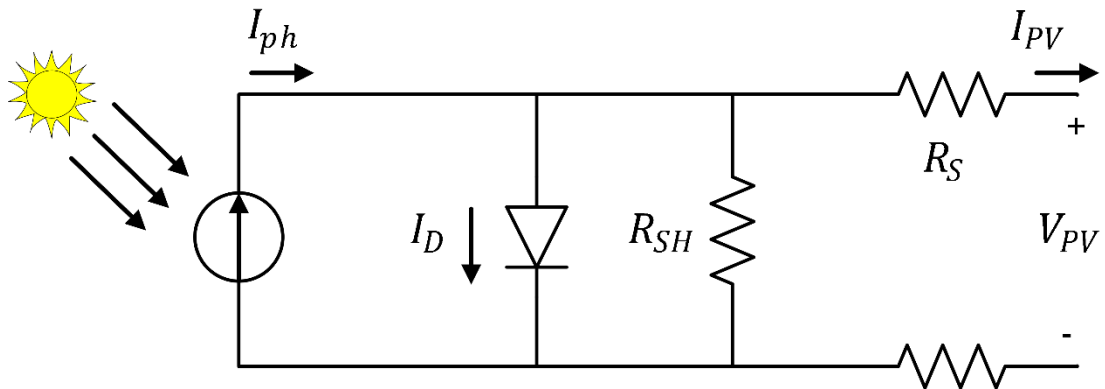
Parametre	Değer	Parametre	Değer
$K_{WT}$	1	$T_{WT}$	1,5 s
$K_{PV}$	1	$T_{PV}$	1,3 s
$K_T$	1	$T_T$	0,3 s
$K_G$	1	$T_G$	0,08 s
$K_{PS}$	120 Hz/pu.MW	$T_{PS}$	20 s
$B$	0,425	$R$	2,4 Hz/pu.MW
$a_{12}$	-1	$T_{12}$	0,545

Elde edilen transfer fonksiyonları sonucunda meydana gelen iki alanlı güç sistemi YFK modeli Şekil 4.1’de verilmiştir. İki alanlı güç sistemine ait bileşenlerin parametre değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir [37], [40], [45]. Çizelge 4.1’de,  $a_{12}$  bölge kapasite oranını;  $T_{12}$  senkronizasyon katsayısını ifade etmektedir.

#### 4.2. TEST MODELİ-2: FV-TERMAL SİSTEM

Kullanılan optimizasyon tekniklerinin ve tasarlanan kontrolörün etkinliğinin incelenmesi amacıyla ikinci bir test modeli kullanılmıştır. Bu test modeli, YEK içeren iki alanlı ara-ısıtmalı termal sistemden meydana gelmektedir. Alan-1, FV sistem ve yüklerden oluşurken, alan-2 ise ara-ısıtmalı termal güç sistemi ve yüklerden meydana gelmektedir.

Fotovoltaik (FV) paneller güneşten aldıkları ışık enerjisini elektriksel enerjiye dönüştüren sistemlerdir. Panellerden elde edilecek enerjinin değeri, güneş ışınımı ve sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle, en yüksek değerde güç üretimi yapılacak noktayı kontrol etmek amacıyla maksimum güç noktası takibi (MGNT) işlemi önem arz etmektedir. Ayrıca, panel yardımıyla üretilen DC enerjiyi AC enerjiye dönüştürmek için eviriciler kullanılmaktadır. Şekil 4.2’de verilen tek diyotlu eşdeğer devre kullanılarak FV panel modeli oluşturulur [19].



Şekil 4.2. Tek diyotlu FV eşdeğer devresi.

Şekildeki eşdeğer devre kullanılarak aşağıdaki matematiksel modeller elde edilir.

$$I_{PV} = I_{ph} - \frac{I_D(V_{PV} - I_{PV}R_S)}{R_{SH}} \quad (4.9)$$

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{q(V_{PV} - I_{PV}R_S)}{AkT}} - 1 \right) \quad (4.10)$$

$$I_{ph} = \frac{\psi_{ph}}{1000} (I_{SC} + k_1(T - 25)) \quad (4.11)$$

$V_{PV}$  FV çıkış gerilimini,  $I_{PV}$  FV çıkış akımını,  $I_{ph}$  foton akımını,  $I_0$  ters kırılma akımını,  $I_D$  diyot akımını,  $I_{SC}$  kısa devre akımını,  $R_{SH}$  paralel direnci,  $R_S$  seri direnci,  $q$  elektron yükünü,  $k$  Boltzmann sabitini,  $A$  diyot faktörünü,  $T$  Kelvin cinsinden sıcaklığı,  $k_1$  kısa devre sıcaklık katsayısını,  $\psi_{ph}$  güneş ışınımını ifade etmektedir.

Alan-1'deki FV sistem, panel, MGNT, evirici ve filtre gibi bileşenlerden meydana gelmektedir. Alan-2'de bulunan ara-ısıtmalı termal sistem ise hız düzenleyici, türbin, ara-ısıtıcı ve güç sistemi olmak üzere dört farklı bileşen içermektedir [11].

FV sistemin panel, MGNT, evirici ve filtre gibi bileşenleri içeren transfer fonksiyonu Denklem (4.12)'de verilmiştir [28], [32].

$$G_{PV}(s) = \frac{a + bs}{s^2 + cs + d} \quad (4.12)$$

FV paneller kullanılarak elde edilebilecek güç değeri çevresel etkenler nedeniyle değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle, FV panellerin tek başına enerji kaynağı olarak kullanılması yük talebinin karşılanamaması ve dolayısıyla frekans değerinde salınımlar meydana gelmesi gibi problemlere neden olmaktadır. Bu problemler, üretilen enerjinin bataryalar yardımıyla depolanması veya başka bir üretim kaynağı ile bağlantılı çalışmasıyla ortadan kaldırılabilir. Mevcut çalışmada batarya kullanmak yerine FV sistem ile ara-ısıtmalı termal sistem bağlantılı hale getirilerek olası yük ihtiyaçlarının birbirleri arasında karşılanması sağlanmıştır.

Alan-2'de bulunan ara-ısıtmalı termal sistemin transfer fonksiyonu modeli oluşturulurken, kolaylık olması açısından tüm sistem bileşenleri doğrusal bir sistem olarak ele alınır ve birinci dereceden transfer fonksiyonları ile ifade edilmektedir.

Hız düzenleyiciye ait transfer fonksiyonu Denklem (4.13) ile verilmiştir.

$$G_G(s) = \frac{K_G}{1 + sT_G} \quad (4.13)$$

$K_G$  hız düzenleyici kazancını;  $T_G$  ise hız düzenleyicinin zaman sabitini ifade etmektedir.

Türbin ve ara-ısıtıcıya ait transfer fonksiyonları sırasıyla Denklem (4.14) ve Denklem (4.15)'teki gibidir.

$$G_T(s) = \frac{K_T}{1 + sT_T} \quad (4.14)$$

$$G_R(s) = \frac{1 + sK_RT_R}{1 + sT_R} \quad (4.15)$$

$K_T$  ve  $K_R$  sırasıyla türbinin ve ara-ısıtıcının kazancını;  $T_T$  ve  $T_R$  ise sırasıyla türbinin ve ara-ısıtıcının zaman sabitini ifade etmektedir.

Güç sistemine ait transfer fonksiyonu Denklem (4.16)'da verilmiştir.

$$G_{PS}(s) = \frac{K_{PS}}{1 + sT_{PS}} \quad (4.16)$$

$K_{PS}$  güç sisteminin kazancını;  $T_{PS}$  ise güç sisteminin zaman sabitini ifade etmektedir.

Alan-1 için ve alan-2 için  $AKH$  değerleri sırasıyla Denklem (4.17) ve Denklem (4.18) ile hesaplanır.

$$AKH_1 = B_1 \cdot \Delta f_1 + \Delta P_{tie} \quad (4.17)$$

$$AKH_2 = B_2 \cdot \Delta f_2 + \Delta P_{tie} \quad (4.18)$$

Denklem (4.17) ve Denklem (4.18)'de;  $B_1$  ve  $B_2$  alan-1 ve alan-2 için frekans bias faktörlerini;  $AKH_1$  ve  $AKH_2$  alan-1 ve alan-2 için alan kontrol hatasını;  $\Delta f_1$  ve  $\Delta f_2$  alan-1 ve alan-2 için frekans sapmasını ifade etmektedir.

Çizelge 4.2. Test Modeli-2 için güç sistemi parametreleri.

Parametre	Değer	Parametre	Değer
$K_{PS}$	120 Hz / pu.MW	$T_T$	0,3 s
$K_R$	0,33 Hz / pu.MW	$T_{12}$	0,54 pu.MW / Hz
$T_{PS}$	20 s	$B$	0,8 pu.MW / Hz
$T_R$	10 s	$R$	2,5 Hz / pu.MW
$T_G$	0,08 s	a / b / c / d	-18 / 900 / 100 / 50



## 5. YÜK FREKANS KONTROLÜ PROBLEMİNİN SEZGİSEL ALGORİTMA TABANLI ÇÖZÜMÜ

Yük frekans kontrolü (YFK) sürecinde temel amaç, ani yük değişimleri ve/veya YEK dalgalanmaları durumunda sistemde bulunan her bir alandaki frekans (alan-1 için  $\Delta f_1$  ve alan-2 için  $\Delta f_2$ ) ve bağlantı hattı güç değişiminde ( $\Delta P_{tie}$ ) meydana gelen salınımları mümkün olan en kısa sürede sıfır yapmak veya minimuma indirmektir. Bu amaca ulaşmak için, maksimum aşma ( $M^+$ ), minimum aşma ( $M^-$ ) ve oturma zamanı ( $t_s$ ) gibi değerlerin iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, kullanılacak olan kontrolörün belirlenmesi ve bu kontrolör parametrelerinin optimal olarak ayarlanması başarılı sonuç elde etme noktasında büyük önem arz etmektedir.

Ek olarak, güç sistemlerinde başarılı bir YFK süreci için kullanılacak olan kontrolör çeşidi, seçilen amaç fonksiyonu ve kontrolör parametrelerinin alt/üst sınırlarının belirlenmesi kadar kontrolör parametrelerinin optimal olarak belirlenmesi amacıyla kullanılacak olan optimizasyon yöntemleri de büyük önem arz etmektedir. Optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılması amacıyla son yıllarda Karınca Aslan Algoritması (KAA), Yusufçuk Algoritması (YA), Balina Algoritması (BA), Güve Ateşi Algoritması (GAA), Afrika Akbabası Algoritması (AAA) gibi çok sayıda optimizasyon yöntemleri geliştirilmiştir [87]–[105]. Gerçekleştirilen tez çalışmasında, iki alanlı güç sisteminde YFK için amaçlanan PI-(1+DD) kontrolörün parametreleri, Bal Porsuğu Algoritması (BPA), Goril Birlikleri Optimizasyonu (GBO) ve Gri Kurt Optimizasyonu (GKO) isimli yeni geliştirilmiş sürü tabanlı sezgisel optimizasyon yöntemleri yardımıyla belirlenmiştir.

### 5.1. BAL PORSUĞU ALGORİTMASI

Bal porsuğu, Afrika, Güneybatı Asya ve Hindistan alt kıtası gibi bölgelerdeki yağmur ormanları ve yarıçöllerde bulunan siyah ve beyaz tüylü kürklü bir memelidir. Köpek boyutundaki bu korkusuz avcı, tehlikeli yılanların da içinde olduğu altmış farklı türü avlayabilmektedir. Alet kullanma yeteneğine sahip olan bal porsuğu zeki bir hayvandır

ve balı sevmektedir. Ayrıca, kazdığı deliklerde yalnız kalmayı tercih eder ve çiftleşmek amacıyla diğer porsuklarla tanışırlar.

Bir bal porsuğu, koku alma yeteneklerini kullanarak yavaşça yürüyerek avını bulur. Bal porsuğu, kazarak avının yaklaşık konumunu belirleme özelliğine sahiptir. Bal porsukları balı severler ancak bal kovanlarının bulunması konusunda yetenekli değildirler. Öte yandan, bal-rehberi isimli bir kuş kovanların yerini tespit etmesine rağmen, balı elde etme noktasında başarısızdır. Bu iki durum, ikili arasında bir işbirliğine neden olur. Bal-rehberi kuşu, porsuğa kovanların bulunması noktasında yardımcı olur ve porsuk pençeleri yardımıyla kovanların açılmasını sağlar.

### 5.1.1. BPA Matematiksel Modeli

Bal Porsuğu Algoritması (BPA), bal porsuğunun yiyecek arama davranışını taklit ederek geliştirilmiş sezgisel bir optimizasyon tekniğidir [101]. Bal porsuğu, yiyeceğe ulaşmak için koklayarak kazma işlemi gerçekleştirir veya bal-rehberi isimli kuşu takip eder. İlk durum “kazma modu”, ikinci durum “bal modu” olarak adlandırılır. İlk modda, bal porsuğu avın konumunu bulmak için koku yeteneğini kullanır. Ava ulaştığında kazmak için uygun yeri seçmek ve avı yakalamak amacıyla avın etrafında hareket eder. Diğer modda ise porsuk kovanlara ulaşmak için kuşun talimatlarını takip eder.

Algoritmanın matematiksel modeli oluşturulurken, yukarıda bahsedilen “kazma modu” ve “bal modu” olmak üzere iki aşama ele alınmaktadır. İlk olarak, aday çözümlerden oluşan başlangıç popülasyonu aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\text{Aday çözüm popülasyonu} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1D} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2D} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & x_{n3} & \dots & x_{nD} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$i. \text{ bal porsuğunun konumu: } x_i = [x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^D] \quad (5.2)$$

**Adım 1: Başlangıç:** N boyutlu bal porsuğu popülasyonu oluşturulur ve aşağıdaki eşitlik kullanılarak her bir bal porsuğunun pozisyonu belirlenir.

$$x_i = lb_i + r_1(ub_i - lb_i) \quad (5.3)$$

Burada;  $x_i$  i. bal porsuğunun pozisyonunu,  $lb_i$  ve  $ub_i$  arama uzayının alt ve üst sınırlarını temsil ederken,  $r_1$  0 ile 1 arasında rastgele bir sayıdır.

**Adım 2: Yoğunluğun Belirlenmesi:** Yoğunluk, av ve i. bal porsuğu arasındaki mesafeyi ifade etmektedir.  $I_i$  ise avın koku yoğunluğudur. Eğer koku yoğunluğu yüksekse, bal porsuğu daha hızlı hareket edecek, daha düşük koku yoğunluğunda ise hızı yavaşlayacaktır. Bu durum aşağıdaki eşitliklerle ifade edilmektedir.

$$I_i = r_2 \cdot \frac{S}{4\pi d_i^2}$$
$$S = (x_i - x_{i+1})^2$$
$$d_i = x_{prey} - x_i$$
(5.4)

Burada;  $S$  avın konumunu (yoğunluk durumu),  $d_i$  av ile i. bal porsuğu arasındaki mesafeyi temsil etmektedir. Ayrıca,  $r_2$  0 ile 1 arasında rastgele bir sayıdır.

**Adım 3: Yoğunluk Faktörünün Güncellenmesi:** Yoğunluk faktörü ( $\alpha$ ), keşiften işlemeye sorunsuz geçiş sağlamak için zamanla değişen rastgeleleştirmeyi kontrol etmektedir. Bu durum aşağıdaki eşitlik ile gerçekleştirilir.

$$\alpha = C \cdot \exp\left(\frac{-t}{t_{max}}\right)$$
(5.5)

Burada;  $C$  1'e eşit veya 1'den büyük bir sabiti,  $t_{max}$  maksimum iterasyon sayısını ifade etmektedir.

**Adım 4: Yerel Optimumdan Kaçınma:** Bu adım ve bundan sonraki iki adım, yerel optimum bölgelerinden kaçınmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu kapsamda algoritma, ajanların arama alanını titizlikle tarayarak daha iyi çözümler elde etmesi amacıyla arama yönünü değiştiren bir  $F$  bayrağı kullanır.

**Adım 5: Ajan Pozisyonlarının Güncellenmesi:** Bu adımda, “kazma modu” ve “bal modu” kullanılarak pozisyonlar güncellenir.

**Adım 5-1: Kazma Modu:** Kazma modunda bir bal porsuğu kardiyoite benzer bir şekil çizerek performans göstermektedir. Kardiyoit hareket aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$x_{new} = x_{prey} + F \times \beta \times I \times x_{prey} + F \times r_3 \times \alpha \times d_i \times [\cos(2\pi r_4) \times [1 - \cos(2\pi r_5)]] \quad (5.6)$$

Burada;  $x_{prey}$  ava ait mevcut iterasyona kadar bulunmuş olan en iyi pozisyonu,  $d_i$  av ile i. bal porsuğu arasındaki mesafeyi temsil etmektedir. Ayrıca,  $r_3, r_4, r_5$  0 ile 1 arasında rastgele üç farklı sayı,  $\beta$  1'e eşit veya 1'den büyük olmak üzere bal porsuğunun yiyecek arama yeteneği olarak ifade edilir.  $F$ , arama yüzeyini yönlendiren bir bayrak olarak çalışmaktadır ve aşağıdaki gibi gösterilmektedir. Burada;  $r_6$  0 ile 1 arasında rastgele bir sayıdır.

$$F = \begin{cases} 1 & \text{if } r_6 \leq 0.5 \\ -1 & \text{else} \end{cases} \quad (5.7)$$

Bal Porsuğu Algoritması (BPA) sözde kodu Şekil 5.1'de verilmiştir ve algoritmanın matematiksel model vb. gibi daha detaylı bilgilere [101] çalışmasından ulaşılabilir.

---

Popülasyon büyüklüğü (N), maksimum iterasyon sayısı,  $\beta$  ve C değerlerini belirle.  
Başlangıç popülasyonunu rastgele oluştur.  
Her bir bal porsuğunun uygunluk değerlerini hesapla.  
En iyi üyeyi ( $x_{prey}$ ) ve uygunluğunu ( $f_{prey}$ ) kaydet.  
**while** (Durdurma kriteri) **do**  
Azalma faktörünü güncelle.  
**for** i=1 to N **do**  
Yoğunluğu hesapla.  
**if**  $r < 0.5$  **then**  
Pozisyonu güncelle. ( $x_{new}$ )  
**else**  
Pozisyonu güncelle. ( $x_{new}$ )  
**end if**  
Yeni pozisyonu belirle ve  $f_{new}$  değerine ata.  
**if**  $f_{new} \leq f_i$  **then**  
 $x_i = x_{new}$  ve  $f_i = f_{new}$  olarak ayarla.  
**end if**  
**if**  $f_{new} \leq f_{prey}$  **then**  
 $x_{prey} = x_{new}$  ve  $f_{prey} = f_{new}$  olarak ayarla.  
**end if**  
**end for**  
**end while** Durdurma kriteri  
**Return**  $x_{prey}$

---

Şekil 5.1. BPA sözde kodu.

**Adım 5-2: Bal Modu:** Bir bal porsuğunun, bal-rehberi isimli kuşu takip ederek kovana ulaşması aşağıdaki gibi formulize edilir.

$$x_{new} = x_{prey} + F \times r_7 \times \alpha \times d_i \quad (5.8)$$

Burada;  $x_{new}$  bal porsuğunun yeni pozisyonunu,  $x_{prey}$  avın konumunu ifade etmektedir. Ayrıca,  $r_7$  0 ile 1 arasında rastgele bir sayıdır.

## 5.2. GORİL BİRLİKLERİ OPTİMİZASYONU

Goriller, diğer maymunlara benzer olarak, geçmiş ve gelecek hakkında düşünme, güçlü aile bağları kurma, alet yapma/kullanma ve hislere sahip olma gibi özelliklere sahiptirler. Hatta, bazı araştırmacılar içsel hisler veya dini inançlarının olduğunu iddia etmektedir. Goriller, günlerini dinlenme, seyahat ve yiyecek yeme gibi aktivitelerle geçirmektedirler. Aynı zamanda, bir yetişkin erkek veya gümüşsırt goril ile çeşitli yetişkin dişi goril ve onların yavrularından oluşan “birlik” adı verilen gruplar halinde yaşamaktadırlar.

### 5.2.1. GBO Matematiksel Modeli

Goril Birlikleri Optimizasyonu (GBO), gorillerin grup davranışları temel alınarak geliştirilmiş sürü tabanlı yenilikçi bir sezgisel optimizasyon tekniğidir [87]. Goriller, gruplar halinde avlanırlar ve grubun odak noktası olan gümüşsırtı liderliğinde yaşamlarına devam ederler. Adını ergenlik döneminde sırtında çıkan gümüş renkli tüylerden alan gümüşsırtı, tüm kararları verir, kavgaları yönlendirir, grup hareketlerini belirler, gorilleri yiyecek kaynaklarına yönlendirir ve grubun refahı için sorumluluk alır.

GBO matematiksel modeli oluşturulurken “keşif” ve “işleme” olmak üzere iki farklı aşama ele alınmaktadır. “Keşif” aşamasında, “bilinmeyen bir yere göç”, “diğer gorillere hareket” ve “bilinen bir yere göç” olmak üzere üç farklı mekanizma, “işleme” aşamasında ise “gümüşsırtı takip et” ve “yetişkin dişiler için rekabet” olmak üzere iki farklı mekanizma bulunmaktadır.

“Keşif” aşamasındaki üç farklı mekanizmayı temsil etmek amacıyla aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır.

$$GX(t+1) = \begin{cases} (UB - LB) \times r_1 + LB & rand < p \\ (r_2 - C) \times X_r(t) + L \times H & rand \geq 0.5 \\ X(i) - L \times (L \times (X(t) - GX_r(t)) + r_3 \times (X(t) - GX_r(t))) & rand < 0.5 \end{cases} \quad (5.9)$$

Burada;  $GX(t+1)$  t. iterasyondaki aday gorilin pozisyon vektörünü,  $X(t)$  mevcut goril pozisyon vektörünü temsil etmektedir. Ayrıca,  $r_1, r_2, r_3, rand$  0 ile 1 arasında değişen ve her iterasyonda güncellenen rastgele sayılardır. “Bilinmeyen bir yere göç” mekanizmasının seçim olasılığını belirleyen  $p$  parametresi optimizasyon öncesinde belirlenmesi gereken ve 0 ile 1 arasında değişen bir değerdir.  $UB$  ve  $LB$  ise değişkenlerin üst ve alt sınırlarını ifade etmektedir.  $X_r$  popülasyondan rastgele seçilen gorili,  $GX_r$  ise bu gorilin pozisyon vektörünü temsil etmektedir.

“İşleme” aşamasındaki iki farklı mekanizma arasında seçim yapmak için  $C$  ve  $W$  değerleri kullanılmaktadır.

$C$  değeri aşağıdaki eşitlikle hesaplanırken  $W$  değeri optimizasyon öncesi belirlenmesi gereken bir değerdir.

$$C = F \times \left(1 - \frac{Ite}{MaxIte}\right) \quad (5.10)$$

$$F = \cos(2 \times r_4) + 1 \quad (5.11)$$

$$L = C \times l \quad (5.12)$$

Burada;  $MaxIte$  maksimum iterasyon sayısını,  $Ite$  mevcut iterasyonu ifade etmektedir. Ayrıca,  $r_4$  0 ile 1 arasında rastgele bir sayıdır.

$C$  değerinin  $W$  değerinden büyük eşit olması durumunda “gümüşsırtı takip et” mekanizması takip edilecek, aksi durumda “yetişkin dişiler için rekabet” mekanizması takip edilecektir.

“Gümüşsırtı takip et” mekanizması aşağıdaki denklemlerle ifade edilir.

$$GX(t+1) = L \times M \times (X(t) - X_{silverback}) + X(t) \quad (5.13)$$

$$M = \left( \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N GX_i(t) \right|^g \right)^{\frac{1}{g}} \quad (5.14)$$

$$g = 2^L \quad (5.15)$$

Burada;  $X(t)$  goril pozisyon vektörünü,  $X_{silverback}$  en iyi çözüm olan gümüşsırtı gorilin konum vektörünü temsil etmektedir.

Goril Birlikleri Optimizasyonu (GBO) sözde kodu Şekil 5.2’de verilmiştir ve algoritmanın matematiksel model vb. gibi daha detaylı bilgilere [87] çalışmasından ulaşılabilir.

---

```

Girdiler: Popülasyon büyüklüğü ( $N$ ), maksimum iterasyon sayısı ( $T$ ),  $\beta$  ve  $p$  parametreleri
Çıktılar: Gorilin konumu ve uygunluk değeri
Rastgele başlangıç popülasyonunu oluştur.
Uygunluk değerlerini hesapla.
while (Durdurma kriteri) do
    C değerine güncelle.
    L değerini güncelle.
    % Keşif
    for (her bir Goril) do
        Gorilin konumunu güncelle.
    end for
    % Grup oluştur
    Goril uygunluk değerini hesapla.
    Yeni uygunluk değeri daha iyiye eskisiyle değiştir.
    Gümüşsırtın pozisyonunu  $X_{silverback}$  olarak ayarla.
    % İşleme
    for (her bir Goril) do
        if ( $|C| \geq 1$ ) then
            Gorilin konumunu güncelle.
        Else
            Gorilin konumunu güncelle.
        End if
    end for
    % Grup oluştur
    Goril uygunluk değerini hesapla.
    Yeni uygunluk değeri daha iyiye eskisiyle değiştir.
    Gümüşsırtın pozisyonunu  $X_{silverback}$  olarak ayarla.
end while
Return  $X_{BestGorilla}$ 

```

---

Şekil 5.2. GBO sözde kodu.

“Yetişkin dişiler için rekabet” mekanizması için aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$GX(i) = X_{silverback} - (X_{silverback} \times Q - X(t) \times Q) \times A \quad (5.16)$$

$$Q = 2 \times r_5 - 1 \quad (5.17)$$

$$A = \beta \times E \quad (5.18)$$

$$E = \begin{cases} N_1 & rand \geq 0.5 \\ N_2 & rand < 0.5 \end{cases} \quad (5.19)$$

### 5.3. GRİ KURT OPTİMİZASYONU

Gri kurtlar, genellikle büyüklüğü ortalama 5 ila 12 arasında değişen gruplar halinde yaşamayı tercih ederler. Gri kurtlardaki en ilgi çekici durum, yaşadıkları grupta baskın bir hiyerarşiye sahip olmalarıdır. Gruptaki hiyerarşide alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ), delta ( $\delta$ ) ve omega ( $\omega$ ) olmak üzere dört farklı grup vardır. Grubun liderleri, bir dişi ve bir erkektir. Bu liderler alfalar olarak adlandırılır. Grupta, grubun uyuma yeri, uyanma saati, avlanma vb. konulardaki kararlardan çoğunlukla alfalar sorumludur. Grup hiyerarşisinde ikinci sırada beta yer alır. Betalar, grup işlerinde alfalara yardımcı olarak görev yapan kurtlardır. Omega kurtlar, grupta en son seviyedeki gri kurttur. Alfa ve beta sınıfına dahil olmayıp beta kurtlar ile omega kurtlar arasında yer alan gri kurt ise deltadır. Bu kurtlar, alfa ve betanın emirlerine uymak zorundadır.

#### 5.3.1. GKO Matematiksel Modeli

Gri Kurt Optimizasyonu (GKO), gri kurtların doğadaki yaşam ve avlanma süreçlerini temel alan popülasyon tabanlı sezgisel bir algoritmadır [102]. Algoritmadaki en iyi çözüm alfa kurt olup ikinci en iyi ve üçüncü en iyi çözümler ise sırasıyla beta ve delta kurtlardır. Omega kurtlar aday çözümleri ifade etmektedirler. Avlanma süreci (optimizasyon), alfa, beta ve delta tarafından yönetilir. Süreç boyunca, gri kurtlar pozisyonlarını alfa, beta ya da deltanın pozisyonlarına göre güncellerler. Son olarak, av bulunduğu (optimal çözüme ulaşıldığında) avlanmayı bitirmek amacıyla ava saldırma gerçekleşir.

**Avı Çevreleme:** Daha önce belirtildiği üzere, gri kurtlar avlanma süreci boyunca avlarını çevrelerler. Avı çevreleme davranışının matematiksel modeli için Denklem (5.20) ve Denklem (5.21) kullanılır.

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (5.20)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (5.21)$$

Burada;  $t$  mevcut iterasyonu,  $\vec{A}$  ve  $\vec{C}$  katsayı vektörlerini,  $\vec{X}_p$  avın pozisyon vektörünü ve  $\vec{X}$  gri kurdun pozisyon vektörünü temsil etmektedir.  $\vec{A}$  ve  $\vec{C}$  katsayı vektörleri ise Denklem (5.22) ve Denklem (5.23) ile hesaplanır. Burada;  $\vec{a}$ 'nın bileşenleri iterasyon ilerledikçe 2'den 0'a doğru lineer olarak azaltılır,  $\vec{r}_1$  ve  $\vec{r}_2$  0 ile 1 arasında rastgele bir vektördür.

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (5.22)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (5.23)$$

**Avlama:** Gri kurtlar, avlarının konumunun farkına varma ve onları çevreleme yeteneğine sahiptirler. Avlanma süreci genellikle alfa tarafından yönetilir. Ancak gerektiğinde beta ve delta kurtlar da sürece katılabilir. Başlangıçta arama uzayındaki en iyi konum hakkında bir bilgi yoktur. GKO sürecinde, arama işlemi rastgele olarak başlar. Daha sonra amaç fonksiyonuna göre her bir kurdun uygunluk değeri hesaplanır. En iyi uygunluk değerini veren ilk üç konum, sırasıyla, alfa, beta ve delta kurtlar olarak belirlenir. Alfa, beta ve delta kurtların pozisyonları, Denklem (5.24)-(5.30) kullanılarak güncellenmektedir.

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}| \quad (5.24)$$

$$\vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}| \quad (5.25)$$

$$\vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \quad (5.26)$$

Burada;  $\vec{X}_\alpha$ ,  $\vec{X}_\beta$ ,  $\vec{X}_\delta$  sırasıyla alfa, beta ve delta kurtların pozisyonlarını temsil etmektedir. Her iterasyonda en iyi üç kurt sürekli güncellenmektedir.

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha) \quad (5.27)$$

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta) \quad (5.28)$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta) \quad (5.29)$$

$$\vec{X}(t + 1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (5.30)$$

**Ava Saldırma:** Bu aşamada,  $\vec{a}$  değeri azaltılır ve bu nedenle  $\vec{A}$ 'nın değişim aralığı azaltılır.  $\vec{A}$ , [-1,1] aralığında rastgele değerlere sahip olduğunda, arama ajanının sonraki konumu, mevcut konumu ile avın konumu arasındaki herhangi bir yerde olacaktır. Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda GKO akış diyagramı Şekil 5.3'te verilmiştir.

---

```

Başlangıç gri kurt popülasyonunu rastgele oluştur.
a, A ve C değerlerini belirle.
Her bir gri kurdun uygunluk değerlerini hesapla.
 $X_\alpha$ =En iyi aday çözüm
 $X_\beta$ =En iyi ikinci aday çözüm
 $X_\delta$ =En iyi üçüncü aday çözüm
while (Maksimum iterasyon=? )
    for her bir arama ajanı için
        Mevcut arama ajanının pozisyonunu güncelle.
    end for
    a, A ve değerlerini güncelle.
    Tüm arama ajanlarının uygunluğunu hesapla.
     $X_\alpha, X_\beta, X_\delta$  değerlerini güncelle.
    t=t+1
end while
return  $X_\alpha$ 

```

---

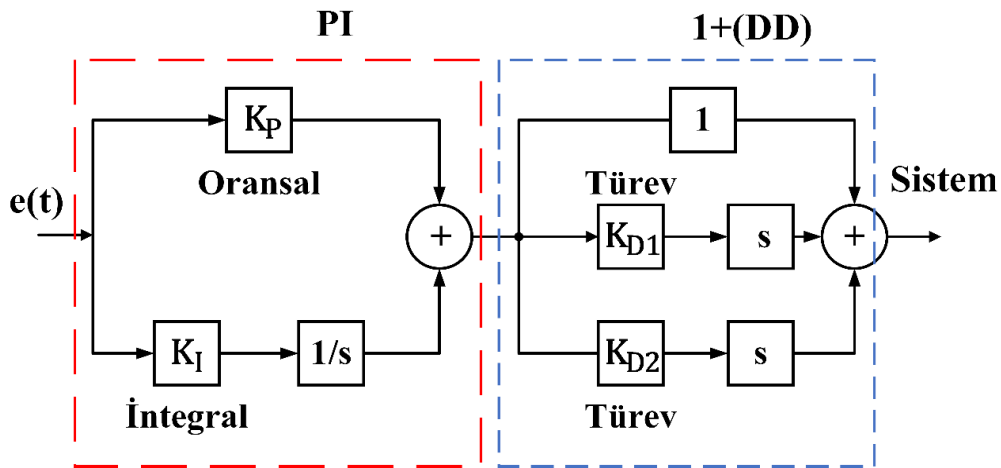
Şekil 5.3. GKO sözde kodu.

#### 5.4. SEZGİSEL ALGORİTMA TABANLI YÜK FREKANS KONTROLÜ

YFK sürecinde başarılı sonuçlar elde edilmesi için, güç sisteminde bulunan her bir alanın frekansında ve bu alanlar arasındaki bağlantı hattı güç değişiminde meydana gelen salınımların bir kontrolör yardımıyla kontrol edilmesi gerekmektedir. PID kontrolör, oransal (P), integral (I), türev (D) terimlerinin bir araya gelmesiyle oluşan ve sıcaklık, hız, basınç gibi değişkenlerin kontrol edilmesi amacıyla endüstrinin birçok alanında kullanılan bir kontrolör çeşididir. Sistem performansının iyileştirilmesi noktasında PID kontrolör kullanılarak başarılı sonuçlar elde edilmesine rağmen, daha karmaşık sistemlerde istenen performans sağlanamayabilir. Bu nedenle, P, I, D terimlerinin birbirleriyle kaskad olarak bağlanarak oluşturulan yeni bir kontrolör tasarlanması gerekmektedir.

Kaskad bir kontrolör tasarımı, tek çevrim geri beslemeli kontrol tasarımı ile karşılaştırıldığında, parametre sayısı daha fazla olduğu için çoklu bozucu etkenler karşısında verimli bir şekilde çalışabilir ve sistem performansını iyileştirebilir. Bu nedenle, bu çalışmada gerçekleştirilen güç sistemlerinde YFK süreci için PI-(1+DD) isimli kaskad bir kontrolör kullanılmıştır. Dört tane ayarlanabilir ( $K_P, K_I, K_{D1}, K_{D2}$ ) ve bir tane sabit “1” kazancı olmak üzere beş adet parametreye sahip olması nedeniyle daha fazla esneklik sağlama, dalgalanmaları azaltma ve daha kısa sürede sönümlenme gibi özellikleri bakımından PI-(1+DD) kontrolör tercih edilmiştir [39]. Tasarlanan kontrolörde, Şekil 5.4’te gösterildiği gibi, PI kontrolör birincil, (1+DD) kontrolör ikincil olmak üzere iki kademeli kontrolör kullanılmaktadır. Kaskad kontrolörün transfer fonksiyonu Denklem (5.31) ile ifade edilmektedir. Denklemde,  $K_P$  ve  $K_I$  sırasıyla birincil kontrolörün oransal ve integral kazançlarını;  $K_{D1}$  ve  $K_{D2}$  sırasıyla ikincil kontrolörün türev kazançlarını ifade etmektedir.

$$G_C(s) = \left( K_P + \frac{K_I}{s} \right) \cdot (1 + K_{D1}s + K_{D2}s^2) \quad (5.31)$$



Şekil 5.4. PI-(1+DD) kontrolör blok diyagramı.

Bir optimizasyon probleminin çözümü için öncelikli olarak performans endeksine göre amaç fonksiyonu belirlenmelidir. Kontrol parametrelerini optimize etmek amacıyla kullanılan yöntemlerin etkin performans göstermesi için, bir amaç fonksiyonu belirlenmesi önem arz etmektedir. Literatürde, “Mutlak Hatanın Toplamı” (Integral Absolute Error-IAE), “Hata Karelerinin Toplamı” (Integral Squared Error-ISE), “Zaman Ağırlıklı Mutlak Hatanın Toplamı” (Integral Time-weighted Absolute Error-ITAE), “Zaman Ağırlıklı Hata Karelerinin Toplamı” (Integral Time-weighted Squared

Error-ITSE) gibi farklı amaç fonksiyonları vardır. Yapılan çalışmalar, YFK çalışmalarında daha iyi sonuçlar elde etmek için en çok kullanılan amaç fonksiyonunun ISE ve ITAE olduğunu göstermektedir [8]. ISE amaç fonksiyonu, daha düşük aşma sağlarken oturma süresinin artmasına neden olmaktadır. Bunun yanısıra, ITAE amaç fonksiyonu ISE ile kıyaslandığında daha hızlı oturma süresi sağlamaktadır. Bu çalışmada, optimizasyon problemine uygulanan amaç fonksiyonu olarak ISE kullanılmıştır ve söz konusu amaç fonksiyonları Denklem (5.32) ile gösterilmektedir.

$$ISE = \int_0^{\infty} \{(\Delta f_1)^2 + (\Delta f_2)^2 + (\Delta P_{tie})^2\} \cdot dt$$

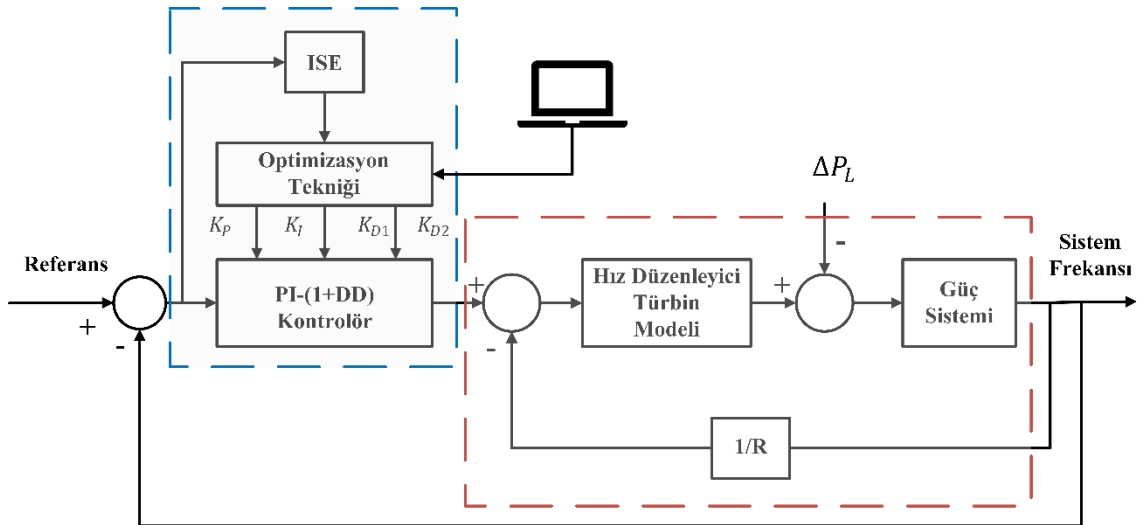
$$ITSE = \int_0^{\infty} \{(\Delta f_1)^2 + (\Delta f_2)^2 + (\Delta P_{tie})^2\} \cdot t \cdot dt$$

(5.32)

$$IAE = \int_0^{\infty} \{|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + |\Delta P_{tie}|\} \cdot dt$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} \{|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + |\Delta P_{tie}|\} \cdot t \cdot dt$$

Tasarlanan PI-(1+DD) kontrolörün YFK süreci için parametrelerinin BPA, GBO ve GKO algoritmalarıyla belirlenmesinin blok diyagramı Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.5. Sezgisel algoritma tabanlı YFK sistemi blok diyagramı.

Kontrolör parametrelerinin optimize edilmesi sürecinde alt sınırlar -0,5 ve üst sınırlar 0,5 olmak üzere aşağıdaki kısıtlar dikkate alınmalıdır.

$$K_{Pmin} \leq K_P \leq K_{Pmax}$$

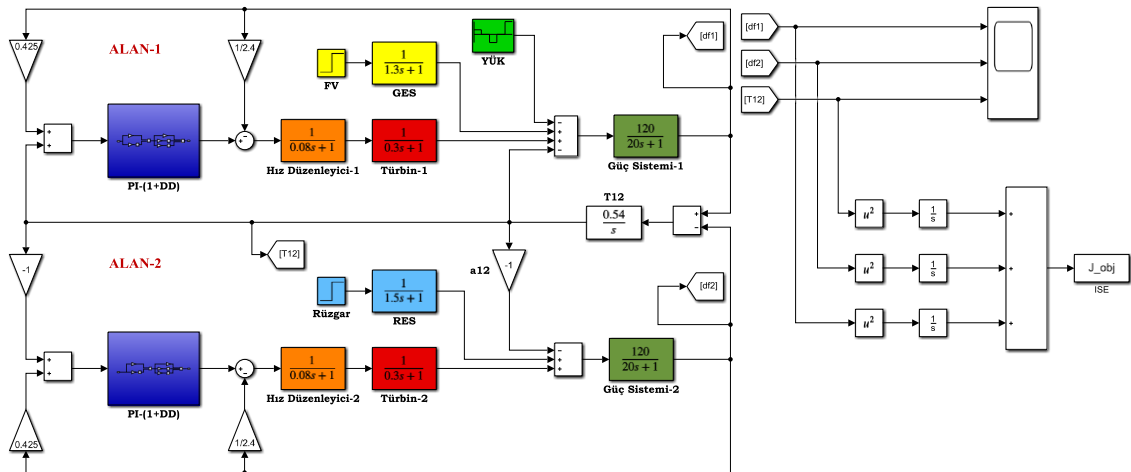
$$K_{Imin} \leq K_I \leq K_{Imax}$$

$$K_{D1min} \leq K_{D1} \leq K_{D1max}$$

$$K_{D2min} \leq K_{D2} \leq K_{D2max}$$

Sezgisel algoritma tabanlı YFK sürecinin adımları aşağıdaki gibi gerçekleştirilir:

**Adım 1:** YFK sürecinin gerçekleştirileceği iki alanlı güç sisteminin modeli Şekil 5.6'da gösterildiği gibi MATLAB/SIMULINK ortamında, kullanılan optimizasyon algoritmaları Şekil 5.7'de gösterildiği gibi MATLAB *m.file* dosyasında oluşturulur. Model ve algoritma birbiriyle bağlantılı şekilde çalıştırılarak optimizasyon süreci başlatılır.



Şekil 5.6. Güç sistemi modeli.

```

Editor - C:\Users\ozayci\Desktop\Hud.88\optimization\1.Grey Wolf\main.m
GWO.m x main.m x obj_function1.m x +
19
20 % You can simply define your cost in a separate file and load its handle to fobj
21 % The initial parameters that you need are:
22 %
23 % fobj = @YourCostFunction
24 % dim = number of your variables
25 % Max_iteration = maximum number of generations
26 % SearchAgents_no = number of search agents
27 % lb=[lb1,lb2,...,lbn] where lbn is the lower bound of variable n
28 % ub=[ub1,ub2,...,ubn] where ubn is the upper bound of variable n
29 % If all the variables have equal lower bound you can just
30 % define lb and ub as two single number numbers
31
32 % To run GWO: [Best_score,Best_pos,GWO_cg_curve]=GWO(SearchAgents_no,Max_iteration,lb,ub,dim,fob
33 %

```

Şekil 5.7. Algoritmaların *m.file* dosyasında oluşturulması.

**Adım 2:** Popülasyon büyüklüğü, iterasyon sayısı, değişken sayısı, kontrolör kazançlarının alt ve üst sınırları gibi optimizasyon parametreleri Şekil 5.8’de gösterildiği gibi belirlenir. Çalışmadaki YFK problemi için değişken sayısı, kontrolörün optimize edilmesi gereken parametre sayısını ifade etmektedir. Çalışmada, Şekil 5.9’da gösterildiği gibi her bir alan için 4’er tane ( $K_P, K_I, K_{D1}, K_{D2}$ ) olmak üzere 8 adet değişken bulunmaktadır. Optimizasyon probleminde popülasyon ise olası optimal kontrolör kazançlarından meydana gelmektedir. Popülasyon büyüklüğü 50 olarak belirlenmiştir ve bu değer 8 adet kontrolör parametrelerini içeren (alan-1 için  $K_P, K_I, K_{D1}, K_{D2}$  ve alan-2 için  $K_P, K_I, K_{D1}, K_{D2}$ ) 50 tane farklı çözümü ifade etmektedir. Kontrolör kazançlarının alt ve üst sınırları  $[-0,5 - 0,5]$  olarak seçilmiştir.

```

Editor - C:\Users\ozayc\Desktop\Hud.88\optimization\1.Grey Wolf\main.m
GWO.m  main.m  obj_function1.m  +
36 - clear
37 - clc
38
39 - SearchAgents_no=50; % Number of search agents
40
41 - dim =8;           %Dimension of the problem
42
43 - Max_iteration=100; % Maximum number of iterations
44
45 - lb = -0.5*ones(1,8); %Lower bound
46
47 - ub = 0.5*ones(1,8); % Upper bound
48
49 - fobj = @(x)(obj_function1(x)); %Objective function
50
51 - [Best_score,Best_pos,GWO_cg_curve]=GWO(SearchAgents_no,Max_iteration,lb,ub,dim,fobj);
52
53
54

```

Şekil 5.8. Optimizasyon parametrelerinin belirlenmesi.

```

Editor - C:\Users\ozayc\Desktop\Hud.88\optimization\1.Grey Wolf\obj_fun
GWO.m  main.m  obj_function1.m  +
1  function J=obj_function1(x)
2  -   Kp1 = x(1);
3  -   Ki1 = x(2);
4  -   Kd11 = x(3);
5  -   Kd12 = x(4);
6  -   Kp2 = x(5);
7  -   Ki2 = x(6);
8  -   Kd21 = x(7);
9  -   Kd22 = x(8);
10
11

```

Şekil 5.9. Değişkenlerin belirlenmesi.

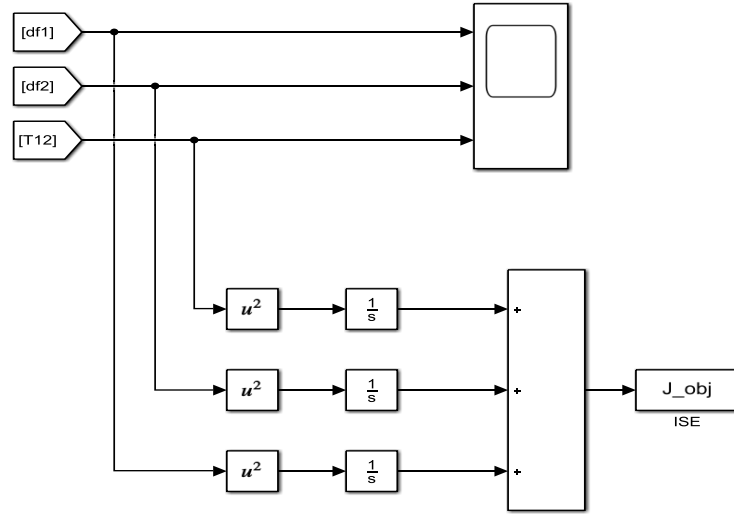
**Adım 3:** Optimizasyon sürecinin başında, en iyi sonucu veren kontrolör kazançlarıyla ilgili bir bilgi olmadığı için başlangıç popülasyonu rastgele oluşturulur. Böylece, belirlenen popülasyon büyüklüğü sayısı kadar kontrolör kazancından oluşan bir çözüm kümesi elde edilmiş olunur. Şekil 5.10’da, başlangıç popülasyonunda bulunan bir

çözüm yer almaktadır.

```
GWO is : -0.23099    0.17922    0.448    0.27221    -0.11985    -0.027679    0.3463    0.4912
objective funciton found by GWO is : 6410632465.8222
```

Şekil 5.10. Başlangıç popülasyonu.

**Adım 4:** Şekil 5.11'den görüldüğü üzere alan-1'deki ve alan-2'deki frekans ile bağlantı hattı güç değişimlerinde meydana gelen salınımların toplamının sıfır yapılması amaçlanmaktadır. Amaç fonksiyonu ISE, bu doğrultuda ayarlanmıştır. Popülasyonda yer alan tüm olası çözümlerin uygunluk değerleri, Denklem (5.32)'de verilen ISE amaç fonksiyonuna göre hesaplanır. Elde edilen uygunluk değerlerine göre olası çözümler sıralanır. En iyi sonucu veren başka bir ifadeyle sistem frekansında ve bağlantı hattı güç değişiminde meydana gelen salınımları en aza indirgeyen kontrolör belirlenir.



Şekil 5.11. ISE amaç fonksiyonu blok diyagramı.

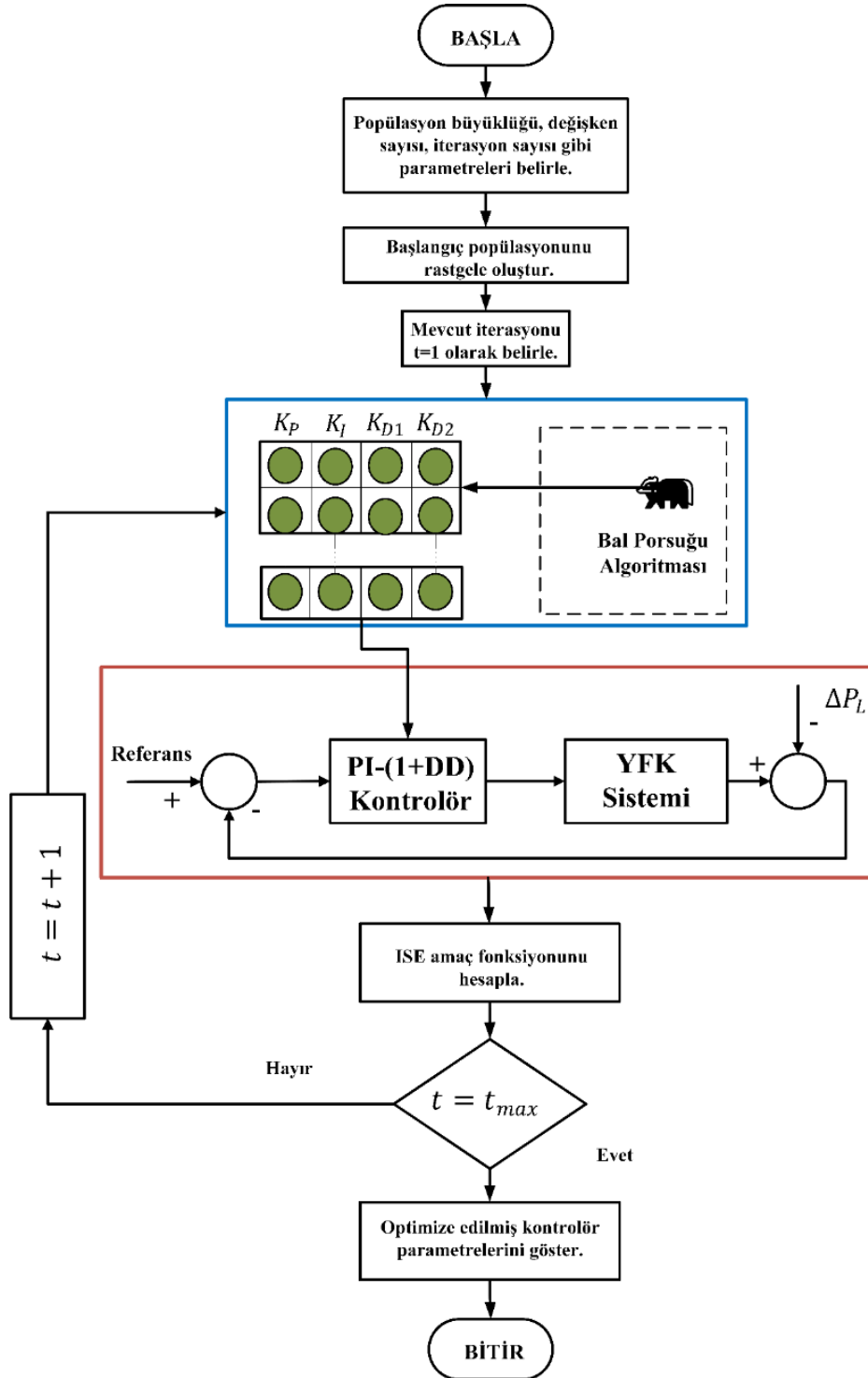
**Adım 5:** Optimizasyon tekniklerinin (BPA, GBO, GKO) her birine ait adımlar yardımıyla her iterasyonda en iyi sonucu veren kontrolör kazançları belirlenir ve uygunluk değerleri önceki değerlerle karşılaştırılır. En iyi çözüm (sistem frekansında ve bağlantı hattı güç değişiminde meydana gelen salınımları en aza indirgeyen) belirlenir. Şekil 5.12'de gösterilen kazanç değerlerine göre elde edilen uygunluk değerinin (0.19972) başlangıç değerine göre (yaklaşık 64100000000) daha iyi olduğu görülmektedir.

```
GWO is : -0.024971    0.045736    -0.10989    0.0098966    0.11841    -0.1127    0.39603    -0.22023
objective funciton found by GWO is : 0.19972
```

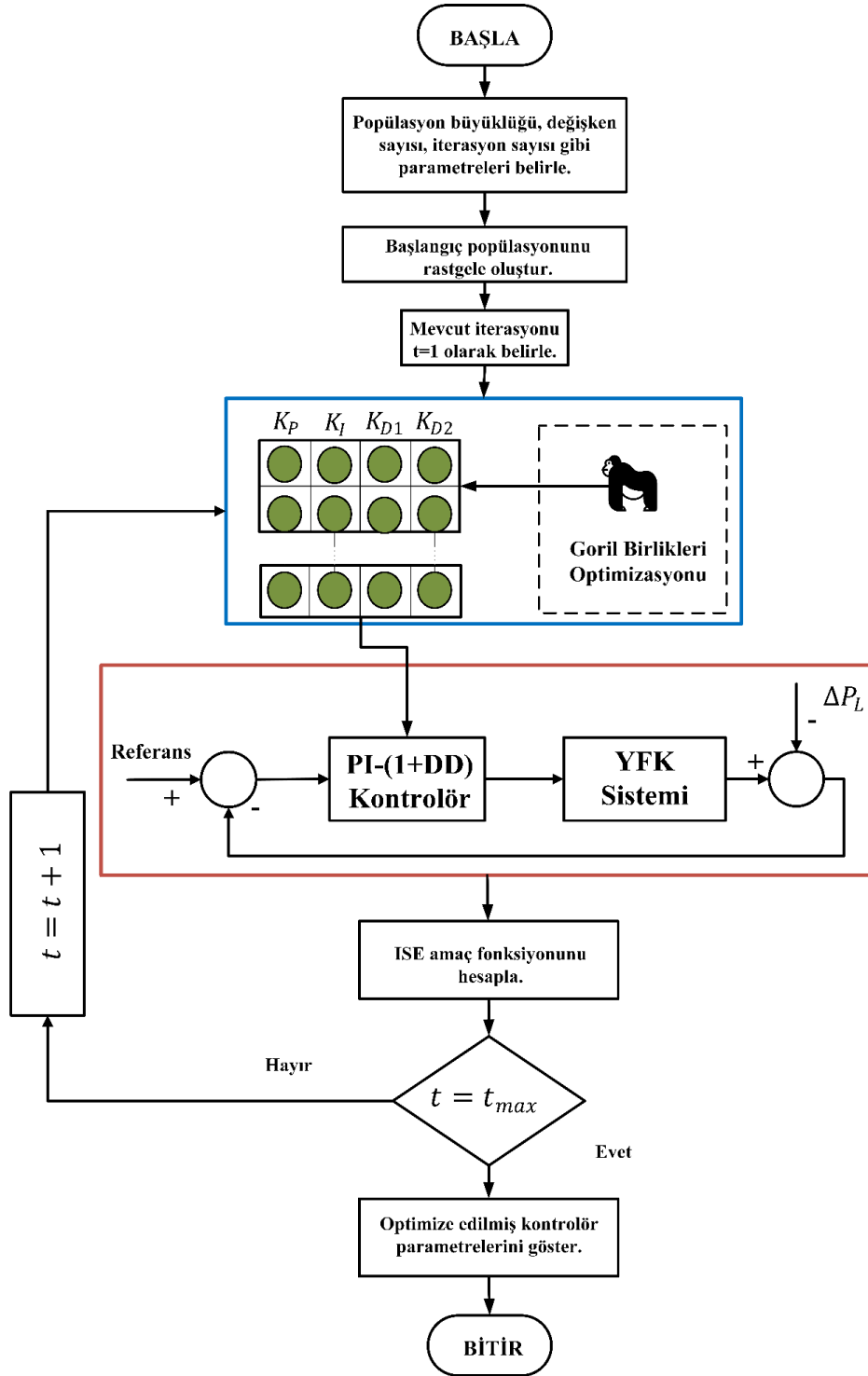
Şekil 5.12. Optimize edilmiş kontrolör kazançları.

**Adım 6:** Belirlenen iterasyon sayısına ulaşıldığında ve/veya durdurma kriteri sağlandığında, elde edilmiş olan kontrolör kazançları optimize edilmiş kazançlar olarak belirlenir ve optimizasyon sonuçlandırılır.

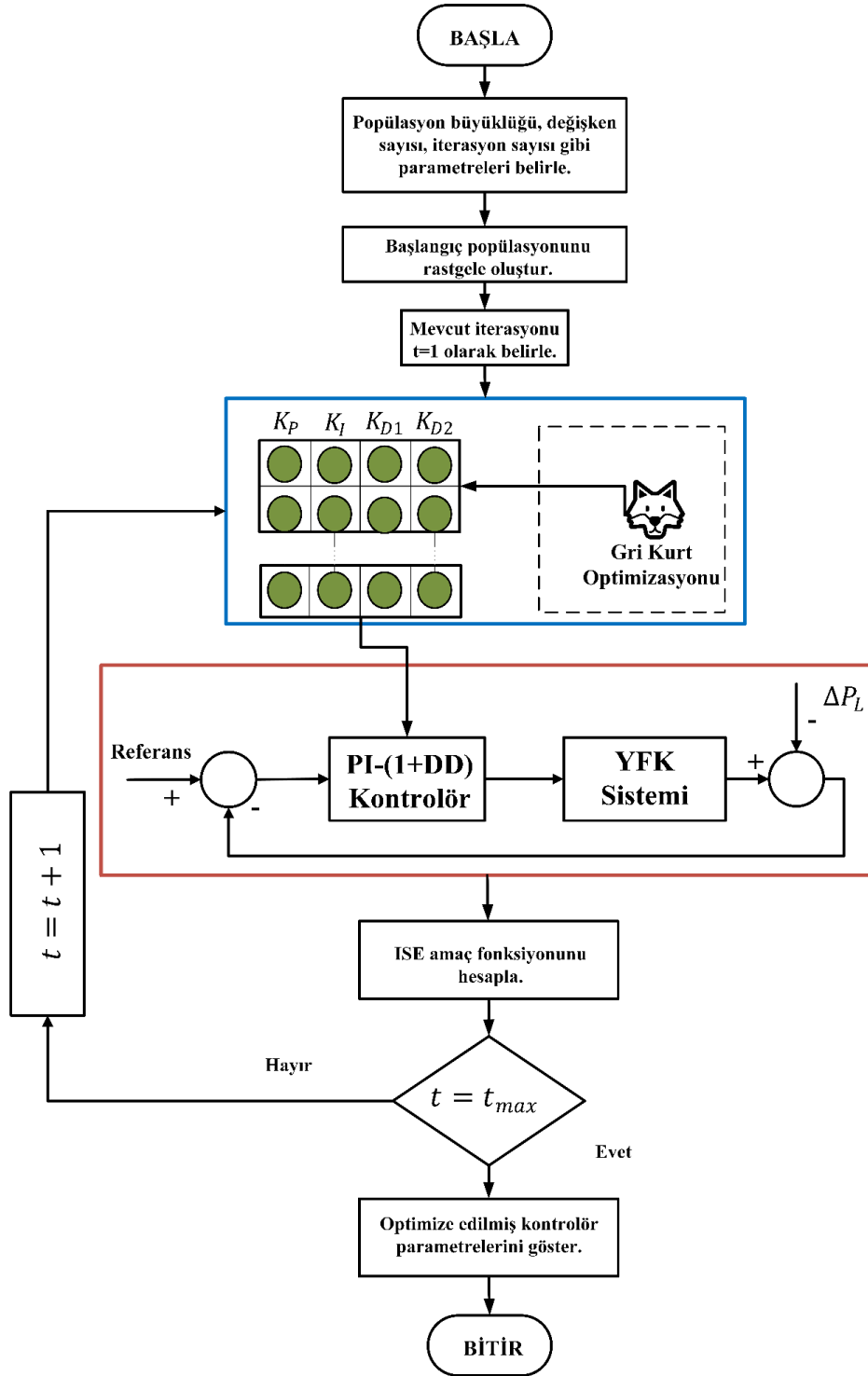
Kullanılan algoritmaların YFK sürecinde uygulanışının akış diyagramları, BPA için Şekil 5.13'te, GBO için Şekil 5.14'te, GKO için Şekil 5.15'te gösterilmiştir.



Şekil 5.13. BPA algoritmasının YFK sistemine uygulanışı.



Şekil 5.14. GBO algoritmasının YFK sistemine uygulanışı.



Şekil 5.15. GKO algoritmasının YFK sistemine uygulanışı.

## 6. BENZETİM ÇALIŞMALARI VE SONUÇLAR

Tez çalışmasının bu bölümünde, tasarlanan kontrolörün ve bu kontrolörün parametrelerinin optimal olarak belirlenmesi amacıyla kullanılan Bal Porsuğu Algoritması (BPA), Goril Birlikleri Optimizasyonu (GBO) ve Gri Kurt Optimizasyonu (GKO) isimli sezgisel optimizasyon tekniklerinin performansları benzetim sonuçları yardımıyla değerlendirilecektir. Bu kapsamda, rüzgâr türbinleri (RT) ve fotovoltaik paneller (FV) gibi yenilenebilir enerji kaynakları (YEK) içeren iki farklı termal güç sistemi ve tasarlanan PI-(1+DD) kontrolör bilgisayar ortamında modellenmiştir. Ayrıca, kullanılan BPA, GBO ve GKO optimizasyon yöntemleri MATLAB programında *m.file* dosyasında oluşturulmuştur.

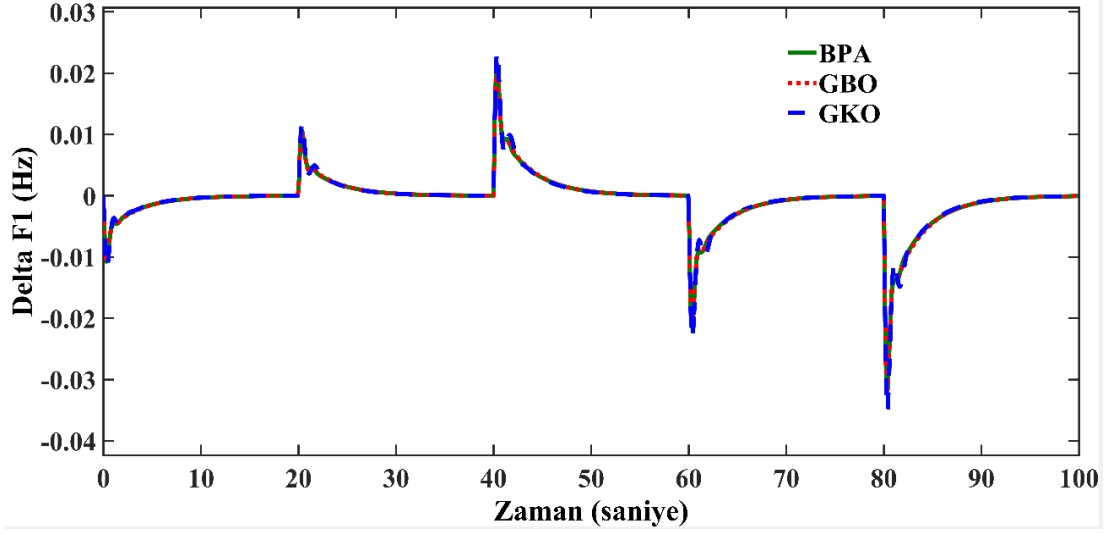
Güç sistemlerinde, tüketiciler tarafından talep edilen yük değeri farklı büyüklüklerde olabilmektedir. Bu nedenle, YFK işleminde kullanılmak üzere tasarlanan kontrolörün ve optimizasyon tekniklerinin farklı yük değişimlerine karşı sistem frekansını belirlenen değerler arasında tutması istenmektedir. Aynı zamanda, rüzgâr hızı ve güneş ışınımı gibi YEK doğası kaynaklı değişkenlerin sistem frekansı üzerindeki etkisinin incelenmesi gerekmektedir. Tüm bunlar göz önünde bulundurularak, kontrolörün ve optimizasyon tekniklerinin performansı değişken yük talebi, YEK üretimi ve sistem parametrelerinin değişimi gibi farklı senaryolar altında incelenmiştir.

### 6.1. TEST MODELİ-1 İÇİN BENZETİM SONUÇLARI

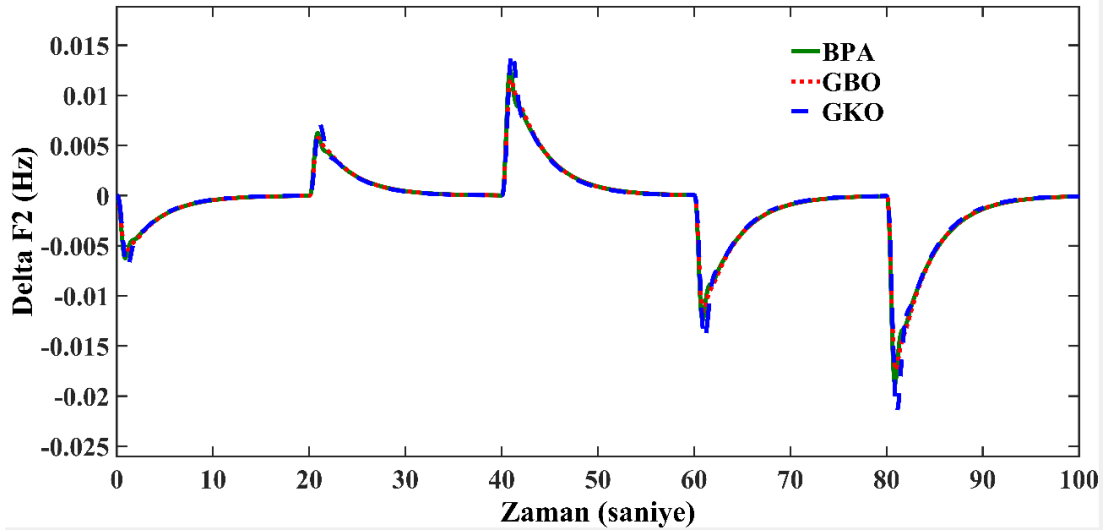
Test Modeli-1, YEK içeren iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sisteminden meydana gelmektedir. Kontrolör ve optimizasyon tekniklerinin performansları dört farklı senaryo altında değerlendirilmiştir. Bu amaçla, kontrolör ve YEK içeren iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sistemi MATLAB/SIMULINK programında modellenmiştir. Birinci senaryoda, alan-1'de 100 s boyunca değişken yük talebi olduğu varsayılmıştır. İkinci senaryoda ise 100 s boyunca alan-2'de değişken yük talebi uygulanmıştır. Üçüncü senaryoda, YEK dalgalanmalarının etkileri incelenirken son olarak parametre değişimi durumunda sistem davranışı incelenmiştir.



Mevcut senaryo için üç algoritma kullanılarak elde edilen sistem davranışları alan-1'deki frekans değişimi ( $\Delta f_1$ ), alan-2'deki frekans değişimi ( $\Delta f_2$ ) ve bağlantı hattı güç değişimi ( $\Delta P_{tie}$ ) için sırasıyla Şekil 6.3, Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'te gösterilmiştir.

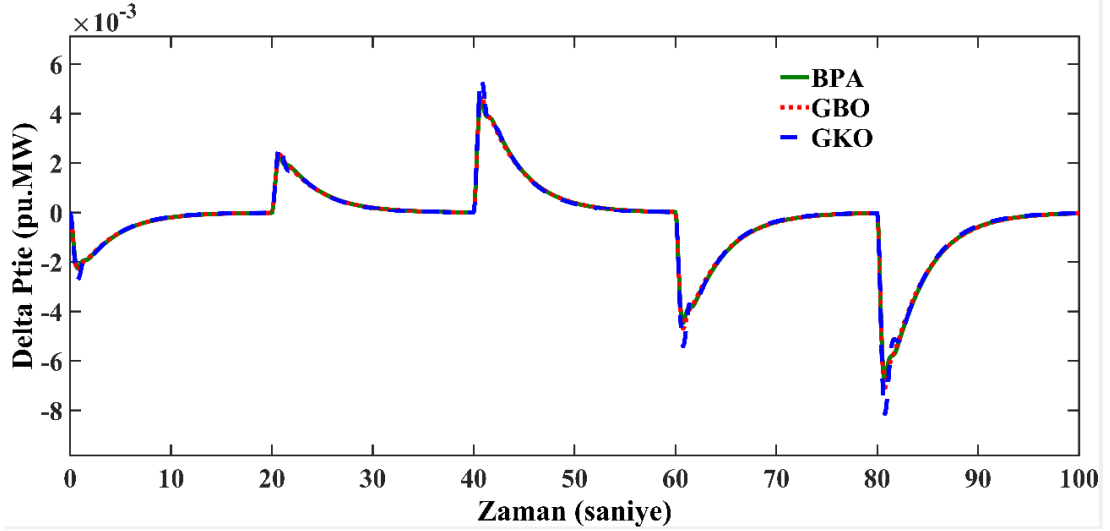


Şekil 6.3. Alan-1'deki frekans değişimi.



Şekil 6.4. Alan-2'deki frekans değişimi.

Şekillerden, parametreleri söz konusu algoritmalar ile optimal olarak ayarlanan amaçlanan kontrolörün değişken yük talebi için hızlı oturma süresi ( $t_s$ ) (*tüm oturma süreleri  $\pm\%5$  bandında hesaplanmıştır*) ve kabul edilebilir değerler arasında maksimum ve minimum aşma ( $M^+$ ,  $M^-$ ) sağladığı görülmektedir.



Şekil 6.5. Bağlantı hattı güç değişimi.

Çizelge 6.1. Senaryo I için sistem performans değerleri.

Yöntem	$\Delta f_1$ (Hz)			$\Delta f_2$ (Hz)			$\Delta P_{tie}$ (pu. MW)		
	$M^+$	$M^-$	$t_s$ (s)	$M^+$	$M^-$	$t_s$ (s)	$M^+$	$M^-$	$t_s$ (s)
<b>BPA</b>	0,021	-0,0322	9,15	0,0124	-0,0188	10,48	0,0045	-0,0067	10,96
<b>GBO</b>	0,0214	-0,0321	9,08	0,0137	-0,0207	10,88	0,00466	-0,007	10,89
<b>GKO</b>	0,0233	-0,0349	9,22	0,0143	-0,0215	10,27	0,0054	-0,0081	11,55

Bu değişimlerin sayısal verileri sözkonusu şekiller yardımıyla belirlenmiştir ve bu değerler Çizelge 6.1’de verilmiştir. Çizelge 6.1’den görüldüğü üzere, alan-1’deki frekans değişiminin maksimum aşma değeri ( $M^+$ ) üç algoritma için ortalama 0,021 Hz olarak, minimum aşma değeri ( $M^-$ ) ise ortalama -0,032 Hz olarak bulunmuştur. Bu aşma değerlerinin sönümlenmesi için geçen oturma süresi ( $t_s$ ) ise ortalama 9,1 s olarak hesaplanmıştır.

Alan-2 için sistem performans değerleri incelendiğinde, maksimum aşma değeri ortalama 0,013 Hz olarak, minimum aşma değeri ortalama -0,019 Hz olarak bulunurken, bu değişimlerin sönümlenmesi için geçen süre ortalama 10 s olarak belirlenmiştir.

Bağlantı hattı güç değişiminde meydana gelen dalgalanmaların maksimum ve minimum aşma değerleri sırasıyla ortalama 0,0048 pu.MW ve -0,007 pu.MW bulunurken bu aşma değerleri ortalama 11 s sürede sönümlenmiştir.

Tüm bu veriler göz önünde bulundurulduğunda, tasarlanan kontrolörün her üç algoritma için de sistem frekansında ve bağlantı hattı güç değişiminde meydana gelen dalgalanmaların aşma değerlerini istenen değerler arasında tuttuğu ve bu aşma değerlerini kısa sürede sönümlediği görülmektedir. Ayrıca, her bir algoritma yardımıyla optimize edilen kontrolör kazançları Çizelge 6.2’de verilmiştir.

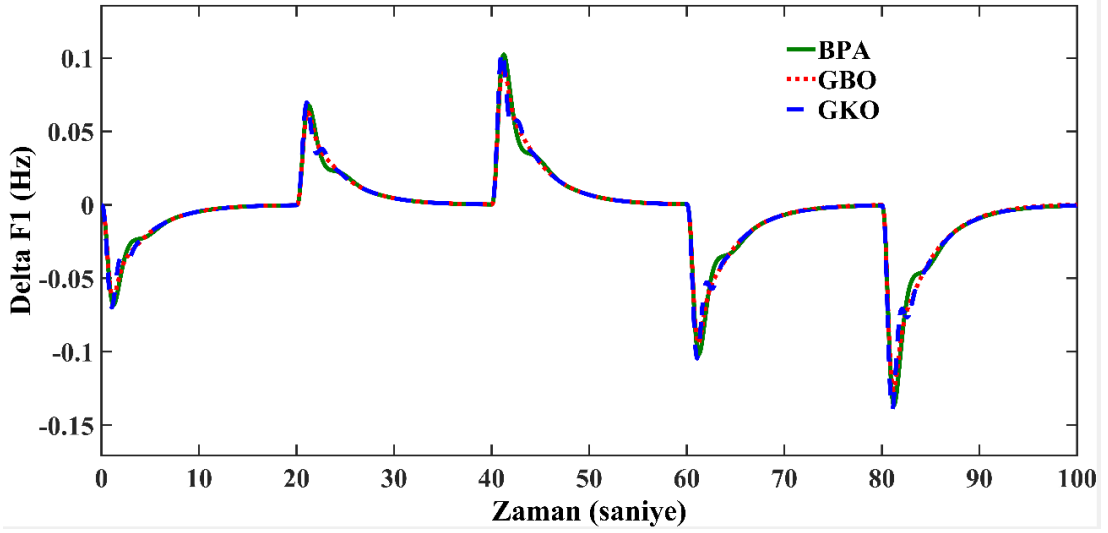
Çizelge 6.2. Senaryo I için kontrolör kazançları.

Optimizasyon Tekniği		BPA	GBO	GKO
Kazanç				
ALAN-1	$K_P$	-0,5	-0,5	-0,5
	$K_I$	-0,5	-0,5	-0,5
	$K_{D1}$	0,5	0,5	0,5
	$K_{D2}$	0,5	0,5	0,3132
ALAN-2	$K_P$	-0,5	0,4405	0,12981
	$K_I$	-0,5	-0,0807	-0,13619
	$K_{D1}$	0,5	-0,5	-0,29744
	$K_{D2}$	0,5	-0,5	-0,299943

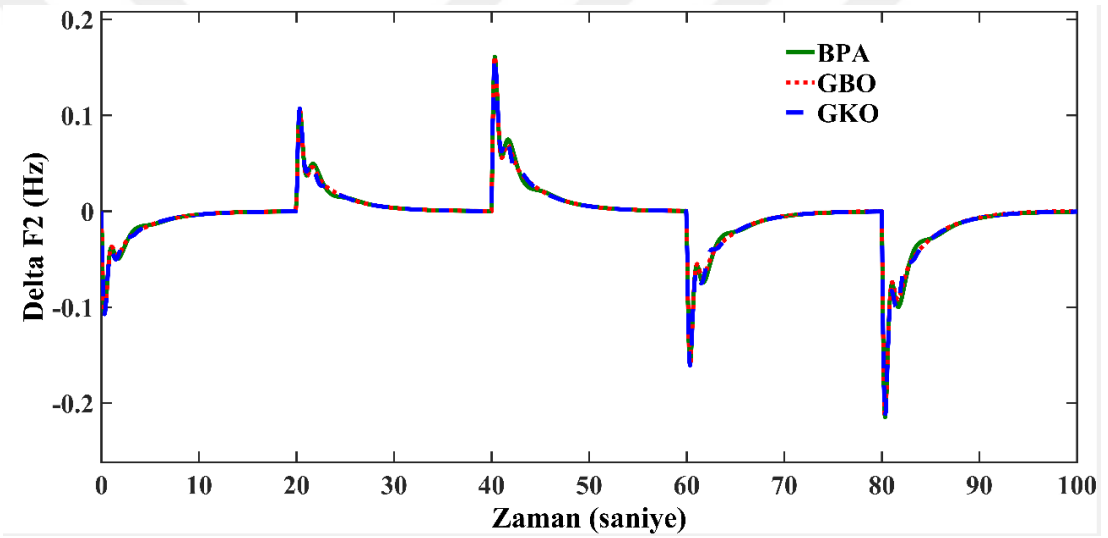
### 6.1.2. Senaryo II: Alan-2’de Rastgele Yük Değişimi Durumu

Bir önceki senaryoda, alan-1’de meydana gelen rastgele yük değişimleri için kontrolör ve optimizasyon tekniklerinin performansları incelenmiştir. Söz konusu senaryoda, yük değişimi -0,02 pu ile 0.03 pu arasında değişmektedir. Ancak güç sistemlerinde çok farklı değerlerde yük talebi meydana geldiği için değişik büyüklüklerdeki yük değişimlerinin de etkisinin incelenmesi gerekmektedir. Senaryo II için oluşturulan güç sisteminin MATLAB/SIMULINK modeli Şekil 6.6’da verilmiştir. Bu senaryoda, amaçlanan kontrolör ve optimizasyon tekniklerinin etkinliğini incelemek amacıyla Şekil 6.7’de gösterildiği gibi, alan-2’de 100 s boyunca -0,15 ile 0,2 pu arasında değişen yük talebi için sistem performansı test edilmiştir. YEK dalgalanmaları bu senaryoda da değerlendirilmemiştir. Ayrıca, sistem frekansını ve bağlantı hattı güç değişimini kontrol etmek amacıyla önerilen kontrolörün parametreleri BPA, GBO ve GKO algoritmalarıyla optimal olarak ayarlanmıştır.

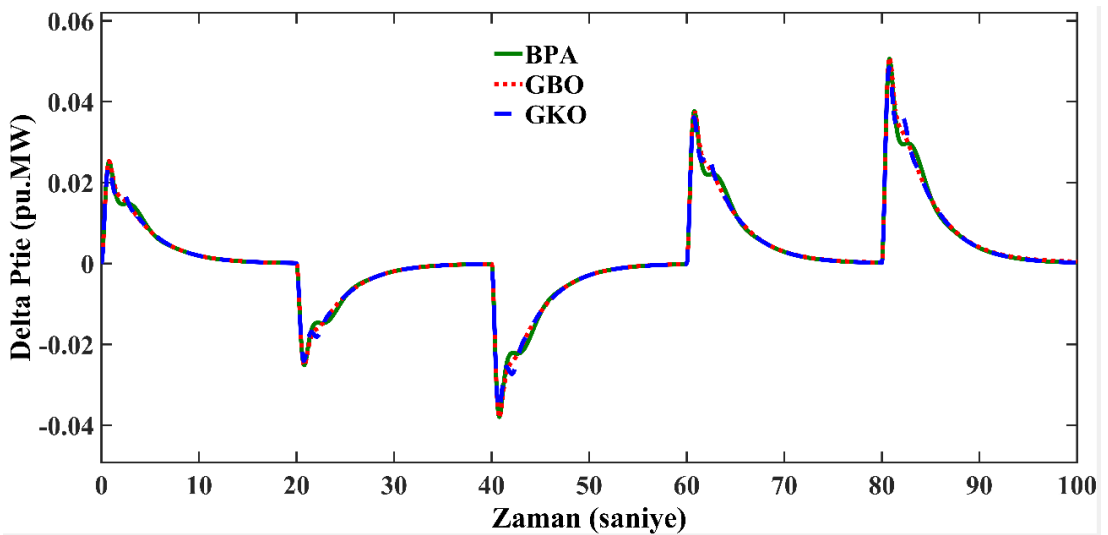




Şekil 6.8. Alan-1'deki frekans değişimi.



Şekil 6.9. Alan-2'deki frekans değişimi.



Şekil 6.10. Bağlantı hattı güç değişimi.

Bu değişimlerin sayısal verileri sözkonusu şekiller yardımıyla belirlenmiştir ve bu değerler Çizelge 6.3'te verilmiştir. Çizelge 6.3'ten görüldüğü üzere, alan-1'deki frekans değişiminin maksimum aşma değeri ( $M^+$ ) üç algoritma için ortalama 0,1 Hz olarak, minimum aşma değeri ( $M^-$ ) ise ortalama -0,13 Hz olarak bulunmuştur. Bu aşma değerlerinin sönmülenmesi için geçen oturma süresi ( $t_s$ ) ise ortalama 11,5 s olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.3. Senaryo II için sistem performans değerleri.

Yöntem	$\Delta f_1$ (Hz)			$\Delta f_2$ (Hz)			$\Delta P_{tie}$ (pu.MW)		
	$M^+$	$M^-$	$t_s$ (s)	$M^+$	$M^-$	$t_s$ (s)	$M^+$	$M^-$	$t_s$ (s)
<b>BPA</b>	0,102	-0,136	11,57	0,161	-0,214	10,69	0,05	-0,0378	13,11
<b>GBO</b>	0,094	-0,125	12,24	0,161	-0,214	10,22	0,051	-0,038	13,5
<b>GKO</b>	0,105	-0,139	11,43	0,161	-0,214	11,43	0,0483	-0,0363	12,77

Alan-2 için sistem performans değerleri incelendiğinde, maksimum aşma değeri ortalama 0,161 Hz olarak, minimum aşma değeri ortalama -0,214 Hz olarak bulunurken, bu değişimlerin sönmülenmesi için geçen süre ortalama 10,5 s olarak belirlenmiştir.

Bağlantı hattı güç değişiminde meydana gelen dalgalanmaların maksimum ve minimum aşma değerleri sırasıyla ortalama 0,05 pu.MW ve -0,037 pu.MW bulunurken bu aşma değerleri ortalama 13 s sürede sönmülenmiştir.

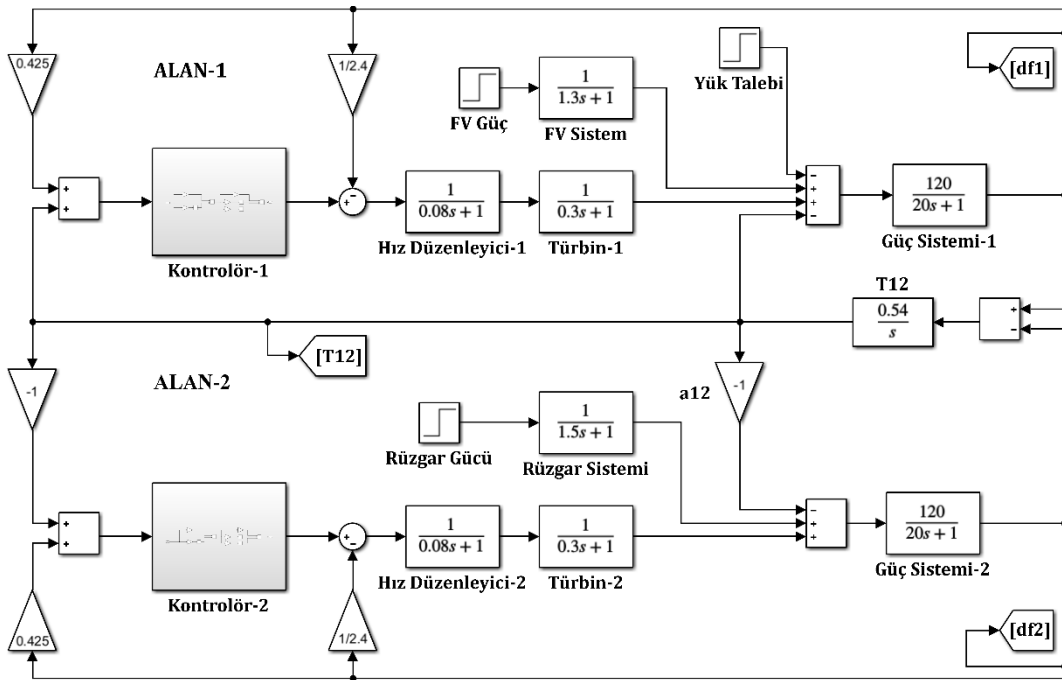
Çizelge 6.4. Senaryo II için kontrolör kazançları.

Optimizasyon Tekniği		BPA	GBO	GKO
Kazanç				
ALAN-1	$K_P$	0,5	0,5	-0,166
	$K_I$	-0,5	0,0247	-0,17859
	$K_{D1}$	0,5	-0,5	0,5
	$K_{D2}$	-0,5	0,5	-0,18521
ALAN-2	$K_P$	-0,5	-0,5	-0,5
	$K_I$	-0,5	-0,5	-0,5
	$K_{D1}$	0,5	0,5	0,5
	$K_{D2}$	0,5	0,5	0,5

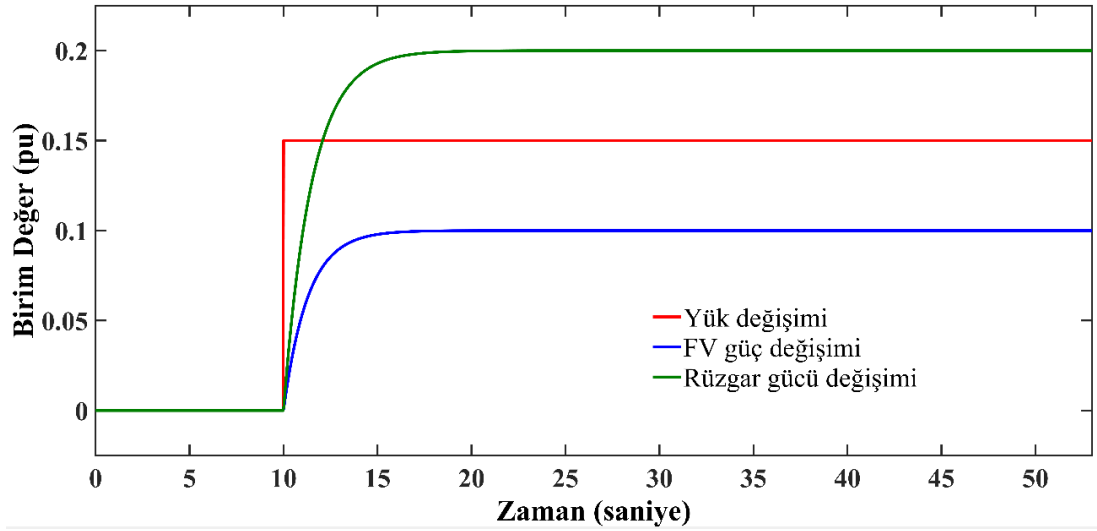
Tüm bu veriler göz önünde bulundurulduğunda, önceki senaryoda olduğu gibi, tasarlanan kontrolörün her üç algoritma için de sistem frekansında ve bağlantı hattı güç değişiminde meydana gelen dalgalanmaların aşma değerlerini istenen değerler arasında tuttuğu ve bu aşma değerlerini kısa sürede sönümlendiği görülmektedir. Ayrıca, her bir algoritma yardımıyla optimize edilen kontrolör kazançları Çizelge 6.4’te verilmiştir.

### 6.1.3. Senaryo III: Alan-1 ve Alan-2’de YEK Durumu

Yük değişimlerinin yanı sıra, güneş ışınımı ve rüzgâr hızı gibi YEK yapısı kaynaklı durumlar da sistem frekansı ve bağlantı hattı güç değişiminde dalgalanmalara sebep olmaktadır. Bu nedenle, YEK etkisinin incelenmesi gerekmektedir. Senaryo III için, YEK içeren güç sisteminin MATLAB/SIMULINK modeli Şekil 6.11’de verilmiştir. Bu senaryoda, amaçlanan kontrolörün ve optimizasyon tekniklerinin etkinliğinin incelenmesi amacıyla, Şekil 6.12’de gösterildiği gibi,  $t=10$  s anında alan-1’de 0,15 pu değerinde yük talebi, alan-2’de 0,2 pu değerinde rüzgâr gücü değişimi ve alan-1’de 0,1 pu değerinde FV güç üretimi olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, sistem frekansını ve bağlantı hattı güç değişimini kontrol etmek amacıyla önerilen kontrolörün parametreleri BPA, GBO ve GKO algoritmalarıyla optimal olarak ayarlanmıştır.

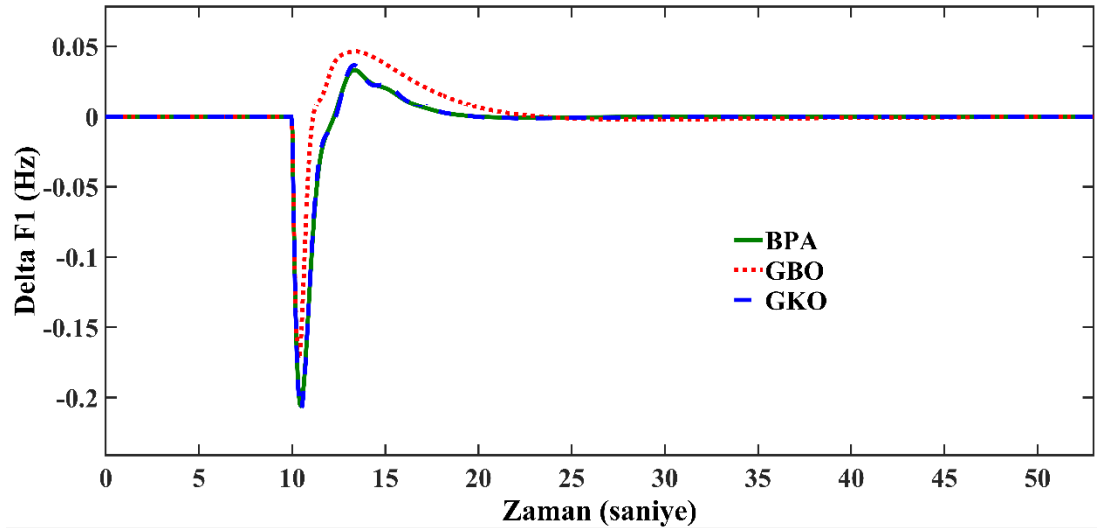


Şekil 6.11. Senaryo III için SIMULINK modeli.

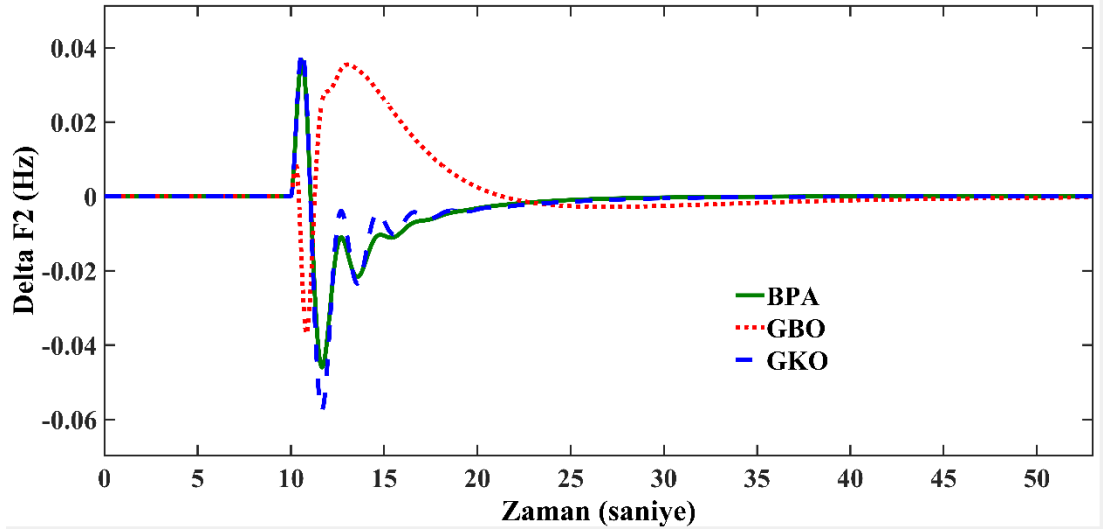


Şekil 6.12. Yük/FV güc/Rüzgâr gücü değişimi.

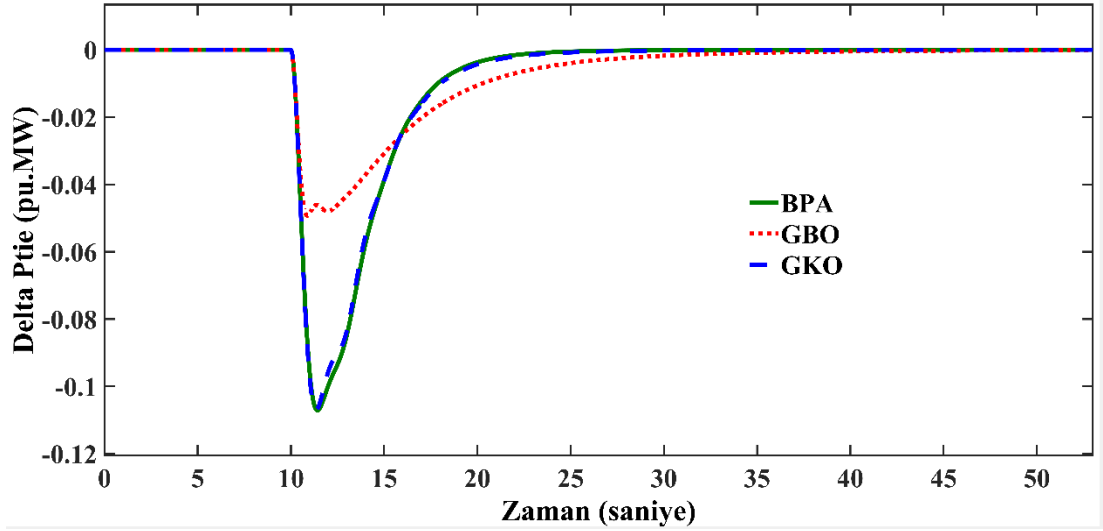
YEK üretimi olması durumunda, amaçlanan kontrolörün üç farklı algoritma kullanılarak elde edilen sistem performansları  $\Delta f_1$ ,  $\Delta f_2$  ve  $\Delta P_{tie}$  açısından sırasıyla Şekil 6.13, Şekil 6.14 ve Şekil 6.15'te verilmiştir. Şekillerden, parametreleri söz konusu algoritmalar ile optimal olarak ayarlanan amaçlanan kontrolörün değişken yük talebi için hızlı  $t_s$  ve kabul edilebilir değerler arasında  $M^+$ ,  $M^-$  sağladığı görülmektedir.



Şekil 6.13. Alan-1'deki frekans değişimi.



Şekil 6.14. Alan-2'deki frekans değişimi.



Şekil 6.15. Bağlantı hattı güç değişimi.

Bu değişimlerin sayısal verileri sözkonusu şekiller yardımıyla belirlenmiştir ve bu değerler Çizelge 6.5'te verilmiştir. Çizelge 6.5'ten görüldüğü üzere, alan-1'deki frekans değişiminin maksimum aşma değeri ( $M^+$ ) üç algoritma için ortalama 0,035 Hz olarak, minimum aşma değeri ( $M^-$ ) ise ortalama -0,18 Hz olarak bulunmuştur. Bu aşma değerlerinin sönümlenmesi için geçen oturma süresi ( $t_s$ ) ise ortalama 12 s olarak hesaplanmıştır.

Alan-2 için sistem performans değerleri incelendiğinde, maksimum aşma değeri ortalama 0,036 Hz olarak, minimum aşma değeri ortalama -0,04 Hz olarak bulunurken, bu değişimlerin sönümlenmesi için geçen süre ortalama 14 s olarak belirlenmiştir.

Çizelge 6.5. Senaryo III için sistem performans değerleri.

Yöntem	$\Delta f_1$ (Hz)			$\Delta f_2$ (Hz)			$\Delta P_{tie}$ (pu. MW)		
	$M^+$	$M^-$	$t_s$ (s)	$M^+$	$M^-$	$t_s$ (s)	$M^+$	$M^-$	$t_s$ (s)
<b>BPA</b>	0,0327	-0,204	10,075	0,0365	-0,046	14,9	0	-0,107	12,49
<b>GBO</b>	0,0463	-0,172	14,76	0,0354	-0,0368	15,11	0	-0,049	18,2
<b>GKO</b>	0,0363	-0,207	11,1	0,0389	-0,0574	14,19	0	-0,106	13,66

Bağlantı hattı güç değişiminde meydana gelen dalgalanmaların maksimum aşma değeri tüm algoritmalar için 0 bulunurken minimum aşma değeri ortalama -0,08 pu.MW bulunurken bu aşma değerleri ortalama 15 s sürede sönümlenmiştir.

Tüm bu veriler göz önünde bulundurulduğunda, tasarlanan kontrolörün her üç algoritma için de sistem frekansında ve bağlantı hattı güç değişiminde meydana gelen dalgalanmaların aşma değerlerini istenen değerler arasında tuttuğu ve bu aşma değerlerini kısa sürede sönümlediği görülmektedir. Ayrıca, her bir algoritma yardımıyla optimize edilen kontrolör kazançları Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6.6. Senaryo III için kontrolör kazançları.

Optimizasyon Tekniği		BPA	GBO	GKO
Kazanç				
ALAN-1	$K_P$	0,29817	-0,4835	0,28204
	$K_I$	-0,1021	-0,1622	-0,10234
	$K_{D1}$	-0,5	0,2651	-0,5
	$K_{D2}$	-0,5	0,4132	-0,5
ALAN-2	$K_P$	0,015096	-0,5	-0,1392
	$K_I$	-0,5	-0,5	-0,5
	$K_{D1}$	0,5	0,5	-0,10878
	$K_{D2}$	-0,5	0,5	-0,10776

#### 6.1.4. Senaryo IV: Sistem Parametre Değişimi

Yük durumlarının ve sistem parametrelerinin belirli değerler arasında değiştirilmesi, kontrol sisteminin performansının değerlendirilmesinde kullanılan bir yöntemdir. Tasarlanan kontrolörün, yük talebi ve sistem belirsizlikleri gibi durumlarda sistem frekansını ve bağlantı hattı güç değişiminde meydana gelen dalgalanmaları istenen seviyede tutması gerekmektedir.

Çizelge 6.7. Senaryo IV için sistem performans değerleri.

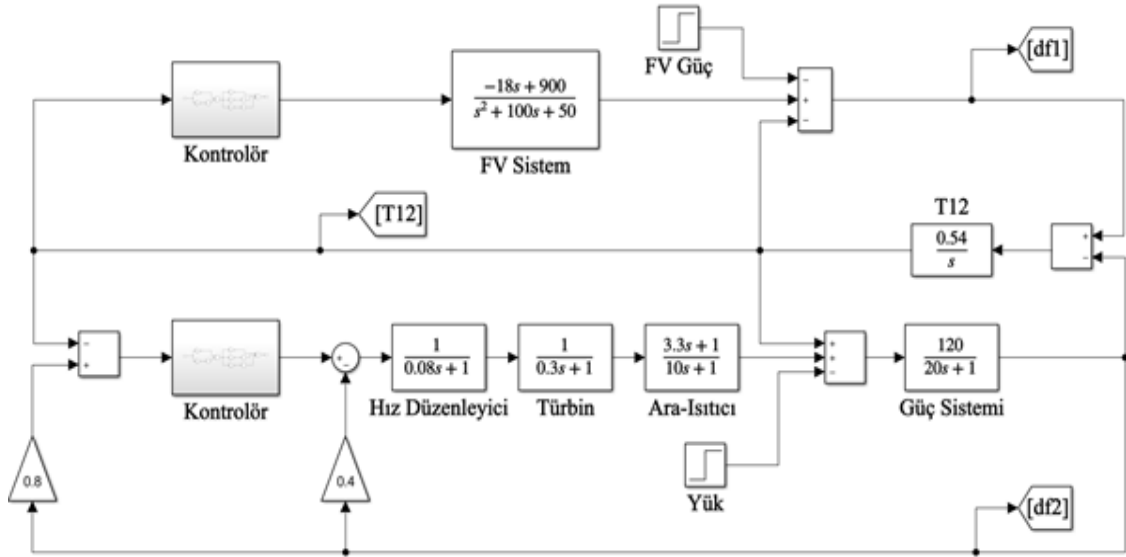
Optimizasyon Tekniği	Değişim (%)	$\Delta f_1$ (Hz)		$\Delta f_2$ (Hz)		$\Delta P_{tie}$ (pu. MW)	
		$M^+$	$M^-$	$M^+$	$M^-$	$M^+$	$M^-$
<b>BPA</b>	$B_1 +\%25$	0,037	-0,196	0,0385	-0,0532	0	-0,109
	$B_2 -\%25$	0,031	-0,206	0,0366	-0,0443	0	0,107
	$R_1 +\%25$	0,0414	-0,213	0,0356	-0,0671	0	-0,114
	$R_2 -\%25$	0,0339	-0,206	0,0343	-0,0398	0	-0,105
<b>GBO</b>	$B_1 +\%25$	0,069	-0,099	0,0616	0	0	-0,035
	$B_2 -\%25$	0,078	-0,0107	0,0712	0	0	-0,0362
	$R_1 +\%25$	0,0781	-0,109	0,0691	0	0	-0,0359
	$R_2 -\%25$	0,0692	-0,107	0,0611	0	0	-0,034
<b>GKO</b>	$B_1 +\%25$	0,105	-0,12	0,0748	0	0	-0,081
	$B_2 -\%25$	0,104	-0,0127	0,0728	0	0	-0,0797
	$R_1 +\%25$	0,118	-0,132	0,0773	0	0	-0,0832
	$R_2 -\%25$	0,097	-0,127	0,0647	0	0	-0,0758

Bu senaryoda, kaskad PI-(1+DD) kontrolörün sağlamlığını test etmek amacıyla,  $R$  ve  $B$  gibi sistem parametre değerlerinde değişiklik yapılmıştır. Sistem parametrelerinde yapılan  $\pm\%25$  değerindeki değişime göre frekansın ve bağlantı hattı güç değişiminin aşma değeri bakımından sistem davranışı incelenmiştir. Çizelge 6.7'deki verilerden, sistem frekansının ve bağlantı hattı güç değişiminin aşma değerlerinin küçük ve kabul

edilebilir değerler arasında olduğu görülmektedir. Bu nedenle, söz konusu algoritmalar kullanılarak parametreleri belirlenen amaçlanan kontrolörün sağlamlığının ispatlandığı söylenebilir.

## 6.2. TEST MODELİ-2 İÇİN BENZETİM SONUÇLARI

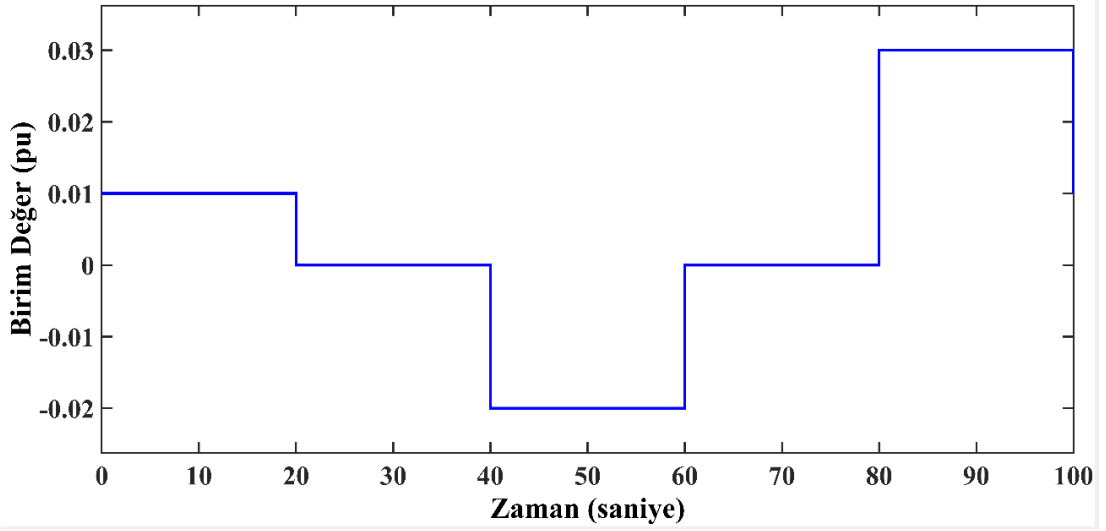
Tasarlanan kontrolör ve kullanılan algoritmaların performansları farklı bir test modeli için iki farklı senaryo ele alınarak gerçekleştirilen benzetim sonuçları kullanılarak değerlendirilecektir. Bu amaçla, kontrolör ve iki alanlı güç sistemi, Şekil 6.16'da gösterildiği gibi, MATLAB/SIMULINK programında modellenmiştir. Birinci senaryoda, termal sistemde 100 s boyunca değişken yük talebi olduğu varsayılmıştır. Daha doğru bir analiz yapmak amacıyla FV sistemde meydana gelen değişimin incelenmesi gerekmektedir. Bu nedenle ikinci senaryoda, termal sistemdeki yük değişiminin yanı sıra FV sistemde de bir değişim olduğu varsayılmıştır.



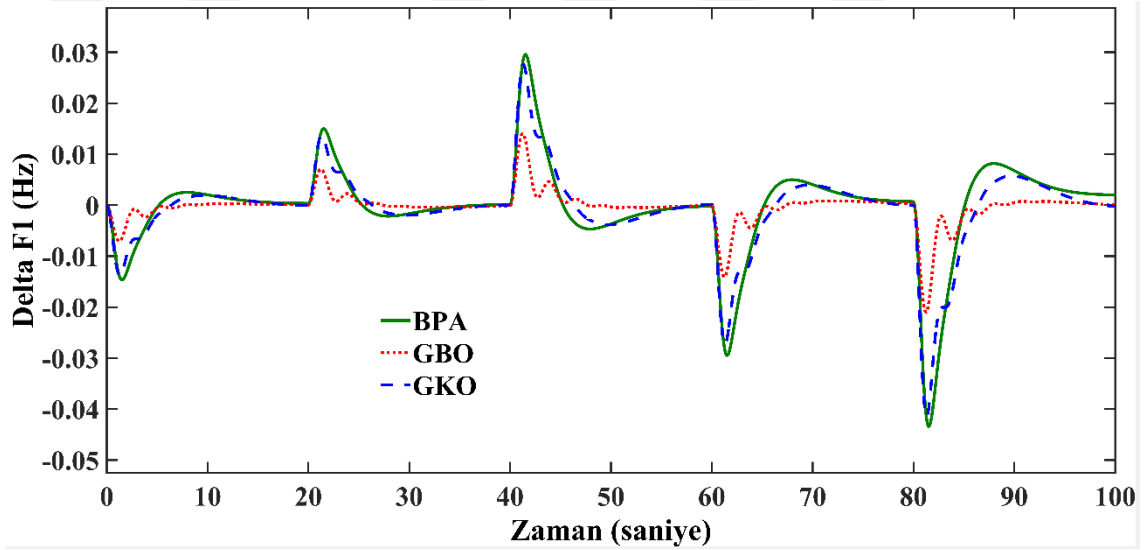
Şekil 6.16. Güç sistemi SIMULINK modeli.

### 6.2.1. Senaryo I: Alan-2'de Rastgele Yük Değişimi Durumu

Bu senaryoda, iki alanlı güç sisteminde bulunan alan-2'deki termal sistemde, Şekil 6.17'de gösterildiği gibi, 100 s boyunca -0,02 pu ile 0,03 pu arasında değişen yük talebi olduğu varsayılmıştır. YEK dalgalanmaları bu senaryoda değerlendirilmemiştir. Ayrıca, sistem frekansını ve bağlantı hattı güç değişimini kontrol etmek amacıyla önerilen kontrolörün parametreleri BPA, GBO ve GKO algoritmalarıyla optimal olarak ayarlanmıştır.



Şekil 6.17. Alan-2'deki yük değişimi.



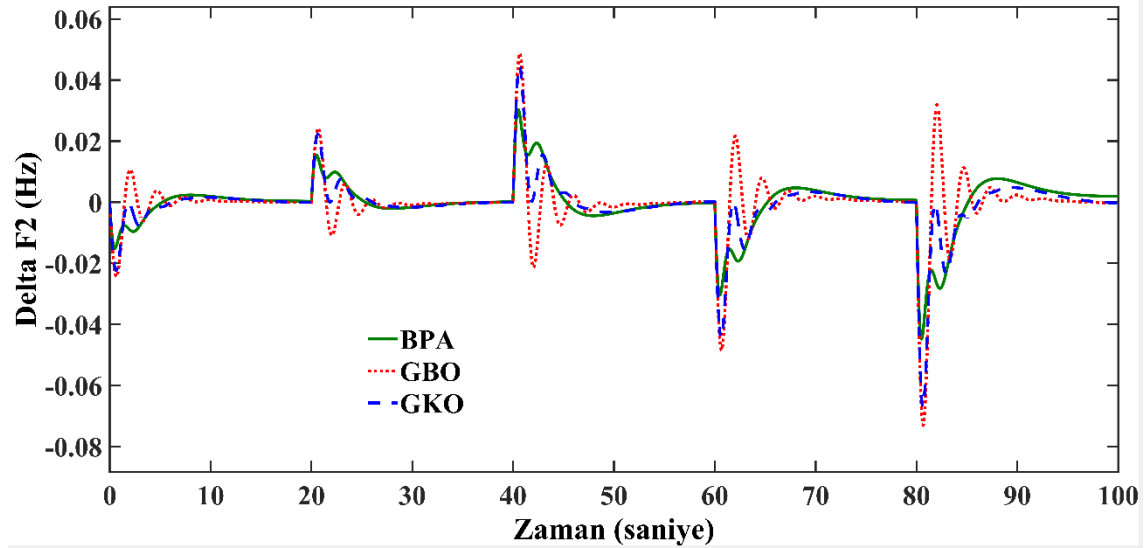
Şekil 6.18. Alan-1'deki frekans değişimi.

Mevcut senaryo için, amaçlanan kontrolörün üç farklı algoritma kullanılarak elde edilen sistem performansları  $\Delta f_1$ ,  $\Delta f_2$  ve  $\Delta P_{tie}$  açısından sırasıyla Şekil 6.18, Şekil 6.19 ve Şekil 6.20'de verilmiştir. Şekillerden, parametreleri söz konusu algoritmalar ile optimal olarak ayarlanan amaçlanan kontrolörün değişken yük talebi için hızlı  $t_s$  ve kabul edilebilir değerler arasında  $M^+$ ,  $M^-$  sağladığı görülmektedir.

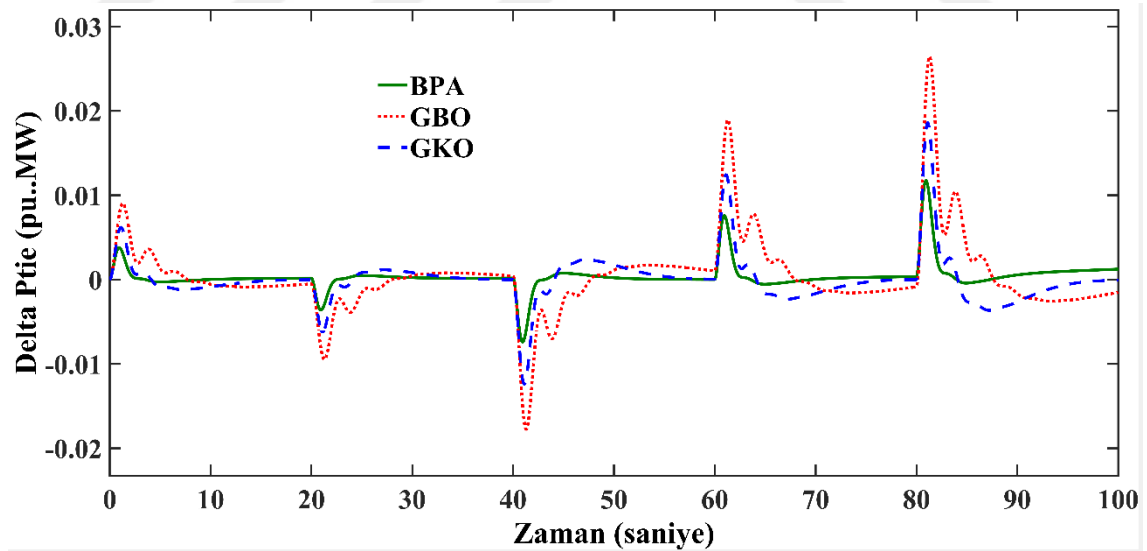
Bu değişimlerin sayısal verileri sözkonusu şekiller yardımıyla belirlenmiştir ve bu değerler Çizelge 6.8'de verilmiştir. Çizelge 6.8'den görüldüğü üzere, alan-1'deki frekans değişiminin maksimum aşma değeri ( $M^+$ ) üç algoritma için ortalama 0,025 Hz olarak, minimum aşma değeri ( $M^-$ ) ise ortalama -0,03 Hz olarak bulunmuştur. Bu aşma

değerlerinin sönümlenmesi için geçen oturma süresi ( $t_s$ ) ise ortalama 13 s olarak hesaplanmıştır.

Alan-2 için sistem performans değerleri incelendiğinde, maksimum aşma değeri ortalama 0,04 Hz olarak, minimum aşma değeri ortalama -0,06 Hz olarak bulunurken, bu değişimlerin sönümlenmesi için geçen süre ortalama 11,5 s olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.19. Alan-2'deki frekans değişimi.



Şekil 6.20. Bağlantı hattı güç değişimi.

Bağlantı hattı güç değişiminde meydana gelen dalgalanmaların maksimum aşma değeri tüm algoritmalar için 0,016 pu.MW bulunurken minimum aşma değeri ortalama -0,01 pu.MW bulunurken bu aşma değerleri ortalama 9 s sürede sönümlenmiştir.

Çizelge 6.8. Senaryo I için sistem performans değerleri.

Yöntem	$\Delta f_1$ (Hz)			$\Delta f_2$ (Hz)			$\Delta P_{tie}$ (pu. MW)		
	$M^+$	$M^-$	$t_s$ (s)	$M^+$	$M^-$	$t_s$ (s)	$M^+$	$M^-$	$t_s$ (s)
<b>BPA</b>	0,0295	-0,0434	15,32	0,0302	-0,044	12,5	0,0117	-0,0073	5,56
<b>GBO</b>	0,014	-0,021	10,29	0,0479	-0,0719	11,63	0,026	-0,0177	11,01
<b>GKO</b>	0,027	-0,041	15,39	0,0433	-0,0672	11,23	0,0186	-0,012	12,83

Tüm bu veriler göz önünde bulundurulduğunda, tasarlanan kontrolörün her üç algoritma için de sistem frekansında ve bağlantı hattı güç değişiminde meydana gelen dalgalanmaların aşma değerlerini istenen değerler arasında tuttuğu ve bu aşma değerlerini kısa sürede söndürdüğü görülmektedir. Ayrıca, her bir algoritma yardımıyla optimize edilen kontrolör kazançları Çizelge 6.9’da verilmiştir.

Çizelge 6.9. Senaryo I için kontrolör kazançları.

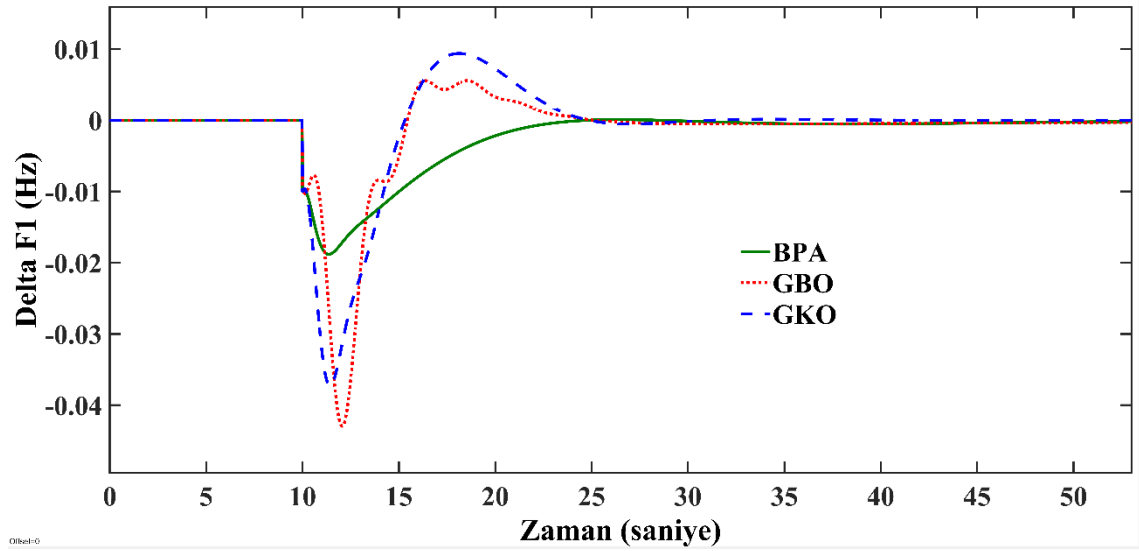
Optimizasyon Tekniği		BPA	GBO	GKO
Kazanç				
<b>ALAN-1</b>	$K_p$	-0,5	0,0237	-0,1479
	$K_I$	0,022352	-0,00089	-0,014379
	$K_{D1}$	0,5	0,4142	0,0069188
	$K_{D2}$	-0,5	0,2885	0,43425
<b>ALAN-2</b>	$K_p$	-0,5	-0,0679	-0,10822
	$K_I$	-0,5	-0,4463	-0,5
	$K_{D1}$	0,5	0,5	0,43393
	$K_{D2}$	0,5	0,0986	0,46212

### 6.2.2. Senaryo II: Alan-1’de YEK – Alan-2’de Yük Değişimi Durumu

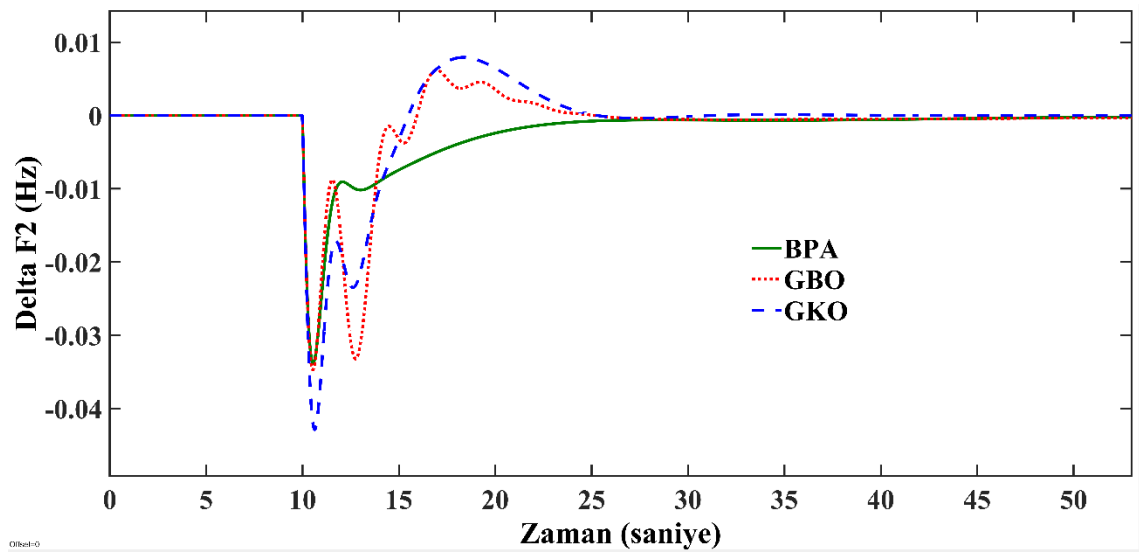
Güneş ışınımının gün içerisinde sürekli olarak değişkenlik göstermesi sistem frekansı ve bağlantı hattı güç değişiminde dalgalanmalara sebep olmaktadır. Bu nedenle, FV sistemde meydana gelen değişimin etkisinin incelenmesi gerekmektedir. Bu senaryoda, amaçlanan kontrolörün ve optimizasyon tekniklerinin etkinliğinin incelenmesi amacıyla,  $t=10$  s anında FV sistemde (alan-1) 0,02 pu değerinde, alan-2’de 0,01 pu değerinde bir değişim olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, sistem frekansını ve bağlantı hattı güç değişimini

kontrol etmek amacıyla önerilen kontrolörün parametreleri BPA, GBO ve GKO algoritmalarıyla optimal olarak ayarlanmıştır.

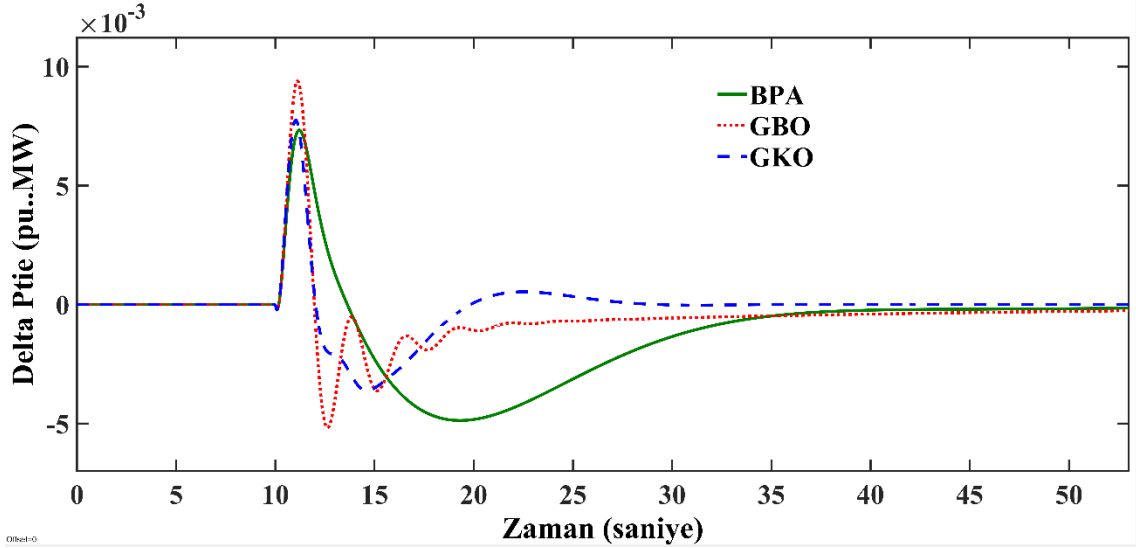
Mevcut senaryo için, amaçlanan kontrolörün üç farklı algoritma kullanılarak elde edilen sistem performansları  $\Delta f_1$ ,  $\Delta f_2$  ve  $\Delta P_{tie}$  açısından sırasıyla Şekil 6.21, Şekil 6.22 ve Şekil 6.23'te verilmiştir. Şekillerden, parametreleri söz konusu algoritmalar ile optimal olarak ayarlanan amaçlanan kontrolörün değişken yük talebi için hızlı  $t_s$  ve kabul edilebilir değerler arasında  $M^+$ ,  $M^-$  sağladığı görülmektedir.



Şekil 6.21. Alan-1'deki frekans değişimi.



Şekil 6.22. Alan-2'deki frekans değişimi.



Şekil 6.23. Bağlantı hattı güç değişimi.

Bu değişimlerin sayısal verileri sözkonusu şekiller yardımıyla belirlenmiştir ve bu değerler Çizelge 6.10'da verilmiştir. Çizelge 6.10'dan görüldüğü üzere, alan-1'deki frekans değişiminin maksimum aşma değeri ( $M^+$ ) üç algoritma için ortalama 0,005 Hz olarak, minimum aşma değeri ( $M^-$ ) ise ortalama -0,03 Hz olarak bulunmuştur. Bu aşma değerlerinin sönümlenmesi için geçen oturma süresi ( $t_s$ ) ise ortalama 15 s olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.10. Senaryo II için sistem performans değerleri.

Yöntem	$\Delta f_1$ (Hz)			$\Delta f_2$ (Hz)			$\Delta P_{tie}$ (pu. MW)		
	$M^+$	$M^-$	$t_s$ (s)	$M^+$	$M^-$	$t_s$ (s)	$M^+$	$M^-$	$t_s$ (s)
<b>BPA</b>	0	-0,018	13,16	0	-0,0338	12,84	0,0073	-0,0048	20,9
<b>GBO</b>	0,0055	-0,043	16,28	0,0062	-0,0347	16,04	0,0093	-0,0051	16,91
<b>GKO</b>	0,0093	-0,0373	17,28	0,0079	-0,0428	16,28	0,0077	-0,0036	17,57

Alan-2 için sistem performans değerleri incelendiğinde, maksimum aşma değeri ortalama 0,005 Hz olarak, minimum aşma değeri ortalama -0,035 Hz olarak bulunurken, bu değişimlerin sönümlenmesi için geçen süre ortalama 14 s olarak belirlenmiştir.

Bağlantı hattı güç değişiminde meydana gelen dalgalanmaların maksimum aşma değeri tüm algoritmalar için 0,008 pu.MW bulunurken minimum aşma değeri ortalama -0,004 pu.MW bulunurken bu aşma değerleri ortalama 18 s sürede sönümlenmiştir.

Tüm bu veriler göz önünde bulundurulduğunda, tasarlanan kontrolörün her üç algoritma için de sistem frekansında ve bağlantı hattı güç değişiminde meydana gelen dalgalanmaların aşma değerlerini istenen değerler arasında tuttuğu ve bu aşma değerlerini kısa sürede sönmülediği görülmektedir. Ayrıca, her bir algoritma yardımıyla optimize edilen kontrolör kazançları Çizelge 6.11’de verilmiştir.

Çizelge 6.11. Senaryo II için kontrolör kazançları.

Optimizasyon Tekniği		BPA	GBO	GKO
Kazanç				
ALAN-1	$K_P$	-0,036099	-0,4257	-0,34308
	$K_I$	-0,010802	-0,0181	-0,11039
	$K_{D1}$	0,5	-0,3542	0,26817
	$K_{D2}$	-0,5	-0,2614	-0,062862
ALAN-2	$K_P$	-0,5	-0,5	-0,5
	$K_I$	-0,5	-0,5	-0,48733
	$K_{D1}$	0,5	0,4074	0,29177
	$K_{D2}$	0,5	0,5	0,17287

### 6.3. KARŞILAŞTIRMA SONUÇLARI

Tasarlanan kontrolörün ve kullanılan optimizasyon tekniklerinin performansları, iki farklı test sistemi için farklı senaryolar kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen benzetim sonuçları, kontrolörün ve optimizasyon tekniklerinin güç sistemlerinde YFK problemi için başarılı bir performans sağladığını göstermiştir. Buna ek olarak, söz konusu kontrolörün performansı literatürde bulunan Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Ateşböceği Algoritması (AA) ve Genetik Algoritma (GA) gibi optimizasyon tekniklerinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

#### 6.3.1. Test Modeli-1 İçin Karşılaştırma Sonuçları

Tez çalışmasında kullanılan Test Modeli-1 güç sisteminin birebir aynısı bir güç sisteminde YFK ile ilgili literatürde bir çalışma yapılmamıştır. Bu nedenle, tez çalışmasında önerilen PI-(1+DD) kontrolörün parametrelerinin BPA, GBO, GKO algoritmaları kullanılarak ayarlanması durumundaki performansı PSO algoritmasının sonuçları ile karşılaştırılmıştır ve sayısal veriler Çizelge 6.12’de verilmiştir. Çizelgeden

görüldüğü üzere,  $\Delta f_1$ ,  $\Delta f_2$  ve  $\Delta P_{tie}$  için sistem frekansı ve bağlantı hattı güç değişiminde meydana gelen dalgalanmaların minimum/maksimum aşma değerleri ve bu aşma değerlerinin sönümlenme süresi bakımından parametreleri BPA, GBO ve GKO ile ayarlanan PI-(1+DD) kontrolör PSO algoritmasına göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

Çizelge 6.12. Test Modeli-1 / Senaryo I için karşılaştırma sonuçları.

Yöntem	$\Delta f_1$ (Hz)			$\Delta f_2$ (Hz)			$\Delta P_{tie}$ (pu. MW)		
	$M^+$	$M^-$	$t_s$ (s)	$M^+$	$M^-$	$t_s$ (s)	$M^+$	$M^-$	$t_s$ (s)
<b>BPA</b>	0,021	-0,0322	9,15	0,0124	-0,0188	10,48	0,0045	-0,0067	10,96
<b>GBO</b>	0,0214	-0,0321	9,08	0,0137	-0,0207	10,88	0,00466	-0,007	10,89
<b>GKO</b>	0,0233	-0,0349	9,22	0,0143	-0,0215	10,27	0,0054	-0,0081	11,55
<b>PSO</b>	0,0255	-0,038	11,39	0,0162	-0,0243	12,38	0,00571	-0,0086	12,18

PSO algoritması kullanılarak PI-(1+DD) kontrolör için optimize edilmiş kontrolör kazançları, alan-1 için  $K_{P1} = -0,5$   $K_{I1} = -0,5$   $K_{D11} = 0,1855$   $K_{D12} = 0,5$  ve alan-2 için  $K_{P2} = -0,3741$   $K_{I2} = -0,1285$   $K_{D21} = 0,5$   $K_{D22} = 0,2877$  olarak bulunmuştur.

### 6.3.2. Test Modeli-2 İçin Karşılaştırma Sonuçları

Test Modeli-2 güç sistemi, YFK gerçekleştirilmek üzere son yıllarda yeni çalışılmış bir güç sistemidir. BPA, GBO ve GKO kullanılarak parametreleri belirlenen PI-(1+DD) kontrolörün performansı, parametreleri AA ve GA gibi optimizasyon teknikleriyle belirlenen PI kontrolörün sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır ve sayısal veriler Çizelge 6.13'te verilmiştir.

Çizelgeden görüldüğü üzere, parametreleri BPA, GBO ve GKO algoritmaları ile optimal olarak belirlenen PI-(1+DD) kontrolör, AA tabanlı ve GA tabanlı PI kontrolöre göre daha az aşma ve daha hızlı oturma süresi sağlamıştır.

Çizelge 6.13. Test Modeli-2 / Senaryo II için karşılaştırma sonuçları.

Yöntem	$\Delta f_1$ (Hz)			$\Delta f_2$ (Hz)			$\Delta P_{tie}$ (pu. MW)		
	$M^+$	$M^-$	$t_s$ (s)	$M^+$	$M^-$	$t_s$ (s)	$M^+$	$M^-$	$t_s$ (s)
<b>BPA</b>	0	-0,018	13,16	0	-0,0338	12,84	0,0073	-0,0048	20,9
<b>GBO</b>	0,0055	-0,043	16,28	0,0062	-0,0347	16,04	0,0093	-0,0051	16,91
<b>GKO</b>	0,0093	-0,0373	17,28	0,0079	-0,0428	16,28	0,0077	-0,0036	17,57
<b>AA [32]</b>	0,155	-0,3	23,8	0,138	-0,276	23,99	0,036	-0,05	23,83
<b>GA [32]</b>	0,176	-0,3	23,95	0,149	-0,294	25,93	0,045	0,0544	24,67

## 7. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artması sonucu bu kaynakların güç üretim sistemlerine entegre edilmeleri nedeniyle güç sistemleri daha karmaşık hale gelmektedir. Bu karmaşıklık, YFK sürecinin daha hassas gerçekleştirilmesi zorunluluğunu ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle, tüketicilere kararlı ve kaliteli bir enerji sağlanması amacıyla yeni kontrolör çeşitleri ve bu kontrolörlerin parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yeni ve etkili optimizasyon tekniklerinin kullanılması önem arz etmektedir. Bu tez çalışmasında, YEK içeren iki alanlı ara-ısıtmasız/ara-ısıtmalı termal güç sistemleri için sistem frekansı ve bağlantı hattı güç değişiminde meydana gelen dalgalanmaların mümkün olan en kısa sürede sönümlenmesi veya belirlenen değerler arasında tutulması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, kontrolör olarak PI-(1+DD) isimli yeni bir kontrolör tasarlanmıştır ve amaç fonksiyonu olarak hata karelerinin toplamı (ISE) kullanılmıştır. Tasarlanan kontrolörün parametrelerinin belirlenmesi için Bal Porsuğu Algoritması (BPA), Goril Birlikleri Optimizasyonu (GBO) ve Gri Kurt Optimizasyonu (GKO) gibi yeni geliştirilmiş optimizasyon teknikleri kullanılmıştır. YEK içeren iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sistemi (Test Modeli-1) ve FV/ara-ısıtmalı termal sistem (Test Modeli-2) olmak üzere iki farklı test modeli için değişken yük talebi, YEK üretimi ve sistem parametre değişimi gibi senaryolar altında kontrolörün ve optimizasyon tekniklerinin performansları benzetim çalışmaları yardımıyla değerlendirilmiştir. Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar, tasarlanan kontrolörün her iki sistem ve tüm senaryolar için sistem frekansı ve bağlantı hattı güç değişimlerinde meydana gelen dalgalanmaların minimum/maksimum aşma değerleri ve bu aşma değerlerinin sönümlenmesi için geçen süre olarak tanımlanan oturma süresi bakımından etkili bir performans sağladığını göstermiştir.

Gerçekleştirilen tez çalışmasının bulguları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- YEK içeren iki alanlı güç sistemlerinde YFK gerçekleştirmek amacıyla PI-(1+DD) isimli bir kaskad kontrolör tasarlanmış ve kontrolör parametreleri BPA, GBO ve GKO gibi optimizasyon teknikleri kullanılarak belirlenmiştir.

- Kontrolör ve optimizasyon tekniklerinin performansları, YEK içeren iki alanlı ara-ısıtmasız termal güç sistemi (Test Modeli-1) için değişken yük talebi, YEK üretimi ve sistem parametrelerinin değişimi, FV/ara-ısıtmalı termal sistem (Test Modeli-2) için değişken yük talebi ve FV sistemdeki değişim gibi senaryolar altında değerlendirilmiştir.
- Her iki test modeli ve bu test modelleri için gerçekleştirilen senaryolarda, sistem frekansı ve bağlantı hattı güç değişiminde meydana gelen dalgalanmaların minimum/maksimum aşma değerleri  $\Delta f_1$ ,  $\Delta f_2$  ve  $\Delta P_{tie}$  açısından küçük değerlerde ve istenen değerler arasında tutulmuştur.
- Benzer olarak, sistem frekansı ve bağlantı hattı güç değişiminde meydana gelen dalgalanmaların sönümlenme süresinin  $\Delta f_1$ ,  $\Delta f_2$  ve  $\Delta P_{tie}$  açısından 30 s'den daha kısa olduğu bulunmuştur.
- Tasarlanan kontrolör, daha az aşma sağladığı ve bu aşmayı daha kısa sürede sönümlendiği için sistem kısa sürede kararlı hale gelmektedir ve daha güvenli olmaktadır.

Çalışmanın sonuçları göz önünde bulundurulduğunda, parametreleri BPA, GBO ve GKO kullanılarak belirlenen kaskad PI-(1+DD) kontrolör, daha az minimum/maksimum aşma ve daha hızlı oturma süresi sağlaması nedeniyle güneş ve rüzgâr gibi YEK içeren güç sistemlerinde YFK için başarılı, etkili bir alternatif çözüm olarak değerlendirilebilir.

YEK kullanımının her geçen gün artması güç sistemlerinde kararlılık ve güç kalitesi ile ilgili yeni problemlere yol açmaktadır. Bu nedenle, YFK sürecinin daha etkili olması amacıyla kaskad, kesir dereceli, kaskad kesir dereceli gibi yeni kontrolör çeşitleri kullanılmalıdır. Var olan optimizasyon tekniklerinin güçlü özellikleri bir araya getirilerek hibrit optimizasyon tekniklerinin geliştirilmesinin yanı sıra yeni optimizasyon teknikleri de geliştirilmelidir. Ayrıca, kullanımının her geçen gün artacağı öngörülen elektrikli araçların güç sistemlerindeki etkisinin incelenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, YEK ile elektrikli araçların mevcut olduğu güç sistemlerinde YFK için yeni ve/veya hibrit optimizasyon teknikleri kullanarak çalışmalar gerçekleştirilmelidir.

## 8. KAYNAKLAR

- [1] H. Saadat, *Power System Analysis*, 1. baskı, New York: McGraw-Hill, 1999.
- [2] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, 1. baskı, New York: McGraw-Hill, 1994.
- [3] H. Bevrani, *Robust Power System Frequency Control*, 2. baskı, New York: Springer, 2014.
- [4] A. Wood ve B. Wollenberg, *Power Generation Operation and Control*, 2. baskı, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [5] P. Aryan ve G. L. Raja, “Design and Analysis of Novel QOEO Optimized Parallel Fuzzy FOPI-PIDN Controller for Restructured AGC with HVDC and PEV,” *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Electrical Engineering*, 2022.
- [6] A. K. Mahapatra, P. Samal, S. Mohapatra, P. C. Sahu, ve S. Panda, “Analysis of Gaussian fuzzy logic-sliding model control and flexible AC transmission systems controllers for automatic generation control of hybrid power system under chaotic-water cycle algorithm approach,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, c. 31, sayı 12, 2021.
- [7] E. Sahin, “Design of an Optimized Fractional High Order Differential Feedback Controller for Load Frequency Control of a Multi-Area Multi-Source Power System with Nonlinearity,” *IEEE Access*, c. 8, ss. 12327–12342, 2020.
- [8] M. Khamies, G. Magdy, A. Selim, ve S. Kamel, “An improved Rao algorithm for frequency stability enhancement of nonlinear power system interconnected by AC/DC links with high renewables penetration,” *Neural Computing and Applications*, c. 34, sayı 4, ss. 2883–2911, 2022.
- [9] Y. Arya, “AGC of restructured multi-area multi-source hydrothermal power systems incorporating energy storage units via optimal fractional-order fuzzy PID controller,” *Neural Computing and Applications*, c. 31, sayı 3, ss. 851–872, 2019.
- [10] A. Saha ve L. C. Saikia, “Combined application of redox flow battery and DC link in restructured AGC system in the presence of WTS and DSTS in distributed generation unit,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, c. 12, sayı 9, ss. 2072–2085, 2018.
- [11] G. Sharma, N. Krishnan, Y. Arya, ve A. Panwar, “Impact of ultracapacitor and redox flow battery with JAYA optimization for frequency stabilization in linked photovoltaic-thermal system,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, c. 31, sayı 5, 2021.
- [12] B. Khokhar, S. Dahiya, ve K. P. Singh Parmar, “A Robust Cascade Controller for Load Frequency Control of a Standalone Microgrid Incorporating Electric Vehicles,” *Electric Power Components and Systems*, c. 48, sayı 6–7, ss. 711–726, 2020.

- [13] A. Elmelegi, E. A. Mohamed, M. Aly, E. M. Ahmed, A. A. A. Mohamed, ve O. Elbaksawi, "Optimized Tilt Fractional Order Cooperative Controllers for Preserving Frequency Stability in Renewable Energy-Based Power Systems," *IEEE Access*, c. 9, ss. 8261–8277, 2021.
- [14] A. Saxena, C. K. Shiva, R. Shankar, ve B. Vedik, "Impacts of wind farms with multi-terminal HVDC system in frequency regulation using quasi-opposition pathfinder algorithm," *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*, c. 12, sayı 6, ss. 1434–1446, 2021.
- [15] A. Khanjanzadeh, S. Soleymani, B. Mozafari, ve M. Fotuhi, "Integrated multi-area power system with HVDC tie-line to enhance load frequency control and automatic generation control," *Electrical Engineering*, c. 102, sayı 3, ss. 1223–1239, 2020.
- [16] M. Khamies, G. Magdy, S. Kamel, ve S. K. Elsayed, "Slime mould algorithm for frequency controller design of a two-area thermal-PV power system," 2021.
- [17] Y. Arya ve N. Kumar, "AGC of a multi-area multi-source hydrothermal power system interconnected via AC/DC parallel links under deregulated environment," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, c. 75, ss. 127–138, 2016.
- [18] S. Ayasun ve Ş. Sönmez, "Kesir dereceli PI denetleyici içeren zaman gecikmeli bir bölgeyi yük frekans kontrol sisteminin kazanç ve faz payı tabanlı kararlılık analizi," *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 2018, sayı 18–2, 2018.
- [19] A. A. Abou El-Ela, R. A. El-Sehiemy, A. M. Shaheen, ve A. E. G. Diab, "Design of cascaded controller based on coyote optimizer for load frequency control in multi-area power systems with renewable sources," *Control Engineering Practice*, c. 121, 2022.
- [20] A. Fathy, D. Yousri, H. Rezk, S. B. Thanikanti, ve H. M. Hasanien, "A Robust Fractional-Order PID Controller Based Load Frequency Control Using Modified Hunger Games Search Optimizer," *Energies*, c. 15, sayı 361, 2022.
- [21] A. X. R. Irudayaraj *et al.*, "Renewable sources-based automatic load frequency control of interconnected systems using chaotic atom search optimization[Formula presented]," *Applied Soft Computing*, c. 119, 2022.
- [22] E. Çelik, N. Öztürk, Y. Arya, ve C. Ocak, "(1 + PD)-PID cascade controller design for performance betterment of load frequency control in diverse electric power systems," *Neural Computing and Applications*, c. 33, sayı 22, ss. 15433–15456, 2021.
- [23] M. Ahmed, G. Magdy, M. Khamies, ve S. Kamel, "Modified TID controller for load frequency control of a two-area interconnected diverse-unit power system," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, c. 135, 2022.
- [24] P. K. Sahoo, S. Mohapatra, D. K. Gupta, ve S. Panda, "Multi Verse Optimized Fractional Order PDPI Controller for Load Frequency Control," *IETE Journal of Research*, 2020.
- [25] N. C. Patel ve B. K. Sahu, "Design and Implementation of FIPID Controller for LFC of Multi-unit Multi-source Linear/Non-linear Power System," *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, c. 6, sayı 1, 2021.

- [26] A. H. A. Elkasem, M. Khamies, G. Magdy, I. B. M. Taha, ve S. Kamel, “Frequency stability of ac/dc interconnected power systems with wind energy using arithmetic optimization algorithm-based fuzzy-pid controller,” *Sustainability (Switzerland)*, c. 13, sayı 21, 2021.
- [27] P. C. Pradhan, R. K. Sahu, ve S. Panda, “Analysis of Hybrid Fuzzy Logic Control Based PID Through the Filter for Frequency Regulation of Electrical Power System with Real-Time Simulation,” *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, c. 32, sayı 2, ss. 439–457, 2021.
- [28] S. Davtalab, B. Tousi, ve D. Nazarpour, “Optimized Intelligent Coordinator for Load Frequency Control in a Two-Area System with PV Plant and Thermal Generator,” *IETE Journal of Research*, 2020.
- [29] M. S. Alam, F. S. Al-Ismail, ve M. A. Abido, “Pv/wind-integrated low-inertia system frequency control: Pso-optimized fractional-order pi-based smes approach,” *Sustainability (Switzerland)*, c. 13, sayı 14, 2021.
- [30] H. Gözde, M. C. Taplamacıoğlu, İ. Kocaarslan ve M. A. Şenol, “İki Bölge Ara-Isıtılmalı Termal Güç Sisteminin Yük-Frekans Kontrolü İçin Parçacık Sürü Optimizasyonu Tabanlı PI-Kontrolör,” *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, c. 30, sayı 1, ss. 13–21, 2010.
- [31] Y. Arya, “Automatic generation control of two-area electrical power systems via optimal fuzzy classical controller,” *J Franklin Institute*, c. 355, sayı 5, ss. 2662–2688, 2018.
- [32] S. M. Abd-Elazim ve E. S. Ali, “Load frequency controller design of a two-area system composing of PV grid and thermal generator via firefly algorithm,” *Neural Computing and Applications*, c. 30, sayı 2, ss. 607–616, 2018.
- [33] Z. Civelek, G. Gorel, M. Luy, N. Barisci, ve E. Cam, “Effects on load-frequency control of a solar power system with a two-area interconnected thermal power plant and its control with a new BFA algorithm,” *Elektronika ir Elektrotehnika*, c. 24, sayı 6, ss. 3–10, 2018.
- [34] H. Abubakr, M. Hussein, T. H. Mohamed, ve M. M. Hussein, “Frequency Stabilization of Two Area Power System Interconnected by AC/DC Links using Jaya Algorithm,” *International Journal of Advanced Science and Technology*, c. 29, sayı 1, ss. 548–559, 2020.
- [35] D. Mohanty ve S. Panda, “Modified Salp Swarm Algorithm-Optimized Fractional-Order Adaptive Fuzzy PID Controller for Frequency Regulation of Hybrid Power System with Electric Vehicle,” *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, c. 32, sayı 2, ss. 416–438, 2021.
- [36] M. Sharma, S. Prakash, S. Saxena, ve S. Dhundhara, “Optimal Fractional-Order Tilted-Integral-Derivative Controller for Frequency Stabilization in Hybrid Power System Using Salp Swarm Algorithm,” *Electric Power Components and Systems*, c. 48, sayı 18, ss. 1912–1931, 2021.
- [37] E. A. Mohamed, E. M. Ahmed, A. Elmelegi, M. Aly, O. Elbaksawi, ve A. A. A. Mohamed, “An Optimized Hybrid Fractional Order Controller for Frequency Regulation in Multi-Area Power Systems,” *IEEE Access*, c. 8, ss. 213899–213915, 2020.
- [38] A. Latif, S. M. Suhail Hussain, D. C. Das, ve T. S. Ustun, “Optimization of

- two-stage ipd-(1+i) controllers for frequency regulation of sustainable energy based hybrid microgrid network,” *Electronics (Switzerland)*, c. 10, sayı 8, 2021.
- [39] A. Latif, S. M. S. Hussain, D. C. Das, ve T. S. Ustun, “Design and implementation of maiden dual-level controller for ameliorating frequency control in a hybrid microgrid,” *Energies (Basel)*, c. 14, sayı 9, 2021.
- [40] A. M. Agwa, “Equilibrium optimization algorithm for automatic generation control of interconnected power systems,” *Przegląd Elektrotechniczny*, c. 96, sayı 9, ss. 143–148, 2020.
- [41] M. Raju, L. C. Saikia, ve N. Sinha, “Load frequency control of a multi-area system incorporating distributed generation resources, gate controlled series capacitor along with high-voltage direct current link using hybrid ALO-pattern search optimised fractional order controller,” *IET Renewable Power Generation*, c. 13, sayı 2, ss. 330–341, 2019.
- [42] R. K. Khadanga, A. Kumar, ve S. Panda, “A novel modified whale optimization algorithm for load frequency controller design of a two-area power system composing of PV grid and thermal generator,” *Neural Computing and Applications*, c. 32, sayı 12, ss. 8205–8216, 2020.
- [43] Ahmed. H. A. Elkasem, S. Kamel, M. H. Hassan, M. Khamies, ve E. M. Ahmed, “An Eagle Strategy Arithmetic Optimization Algorithm for Frequency Stability Enhancement Considering High Renewable Power Penetration and Time-Varying Load,” *Mathematics*, c. 10, sayı 6, ss. 854, 2022.
- [44] M. Ali, H. Kotb, K. M. Aboras, ve N. H. Abbasy, “Design of cascaded pi-fractional order PID controller for improving the frequency response of hybrid microgrid system using gorilla troops optimizer,” *IEEE Access*, c. 9, ss. 150715–150732, 2021.
- [45] E. M. Ahmed, A. Elmelegi, A. Shawky, M. Aly, W. Alhosaini, ve E. A. Mohamed, “Frequency Regulation of Electric Vehicle-Penetrated Power System Using MPA-Tuned New Combined Fractional Order Controllers,” *IEEE Access*, c. 9, ss. 107548–107565, 2021.
- [46] A. Doğan, “Analysis of Soccer League Competition Algorithm for Load Frequency Control in Nonlinear Interconnected Power System,” *Journal of Engineering Sciences and Design*, c. 9, sayı 3, ss. 866–879, 2021.
- [47] K. Ranjitha, P. Sivakumar, ve M. Monica, “Load frequency control based on an improved Chimp optimization algorithm using adaptive weight strategy,” *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 2022.
- [48] B. Yıldırım, “Bir Mikro Şebekenin Yük Frekans Kontrolü için Tamsayı Derece Yaklaşımlı Kesir Dereceli PID Kontrolörün Optimizasyonu,” *DÜMF Mühendislik Dergisi*, c. 12, sayı 1, ss. 79–87, 2021.
- [49] P. Sharma, A. Mishra, A. Saxena, ve R. Shankar, “A Novel Hybridized Fuzzy PI-LADRC Based Improved Frequency Regulation for Restructured Power System Integrating Renewable Energy and Electric Vehicles,” *IEEE Access*, c. 9, ss. 7597–7617, 2021.
- [50] Z. Y. Yılmaz, G. Bal, E. Çelik, N. Öztürk, U. Güvenç, ve Y. Arya, “A new objective function design for optimization of secondary controllers in load

frequency control,” *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, c. 36, sayı 4, ss. 2053–2067, 2021.

- [51] K. P. S. Parmar, “State Space Based Load Frequency Control of Multi-Area Power Systems,” Phd Thesis, Department of Electronics and Electrical Engineering, Indian Institute of Technology Guwahati, Guwahati, India, 2013.
- [52] S. O. O. A. Rahim, “Load Frequency Control for a Two Area Power System,” B.Sc. Thesis, Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Khartoum, 2017.
- [53] P. Takhur, “An Analysis of Robust Fuzzy - PID Control for AGC Systems Focusing On PID Tuning and Design,” PhD Thesis, School of Electrical and Electronic Engineering, University of Johannesburg, 2015.
- [54] Z. A. O. Al-Obaidi, “Control of Frequency in Future Power Systems,” PhD Thesis, School of Engineering, Cardiff Univesity, 2018.
- [55] S. Ekka, “Automatic Load Frequency Control of Multi Area Power Systems,” M.Sc. Thesis, Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Odisha, India, 2014.
- [56] M. G. O. Abdelfadeel, “Modeling of Automatic Generation Control and Automatic Voltage Regulator of Interconnected Thermal Power System,” M.Sc. Thesis, Department of Electrical Engineering, Sudan University of Science and Technology College of Graduate Studies, Sudan, 2017.
- [57] S. Akçay, “Hidroelektrik Santrallerde Güç-Frekans Denetimi,” Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, Türkiye, 2007.
- [58] O. K. Sezer, “Primer-Sekonder Frekans Kontrolü ve Afşin-Elbistan B-Termik Santrali Uygulaması,” Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, 2008.
- [59] S. J. Safi, “Güç Sistemin Frekans Kontrolü ve Modellenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2014.
- [60] A. Geren, “Optimal Determination and Allocation of Secondary Frequency Control Reserve in a Market Environment Considering ACE Criteria,” M.Sc. Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2014.
- [61] H. Saraçoğlu, “Enterkonnekte Şebekede Bulanık Mantık Algoritma ile Çok Alanlı Otomatik Üretim Kontrolü,” Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2007.
- [62] H. Çelik, “Güç Sistemlerinde Frekans Kontrolü,” Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Eğitimi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye, 2010.
- [63] B. Tabakoğlu, “Üç Alanlı Güç Sisteminde Genetik Algoritma ile Otomatik Üretim Kontrolü,” Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2009.
- [64] A. Karyeyen, “Çok Bölgeli Elektrik Güç Sistemlerinde Optimum Yük Frekans Kontrolü,” Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2009.

- [65] H. Sezer, "Yenilenebilir Enerji Kaynakları İçeren Zaman Gecikmeli Yük Frekans Kontrol Sisteminin Kararlılık Analizi," Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye, Türkiye, 2016.
- [66] C. Zobi, "Yük-Frekans Kontrolünün İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 1996.
- [67] S. O. Berikol, "Response Tests of Load Frequency Control in Thermal Power Plants Regarding Union for The Co-Ordination of Transmission of Electricity (UCTE) Policies," M.Sc. Thesis, Institute of Natural and Applied Science, Universtiy of Çukurova, Adana, Turkey, 2009.
- [68] O. Alıç, "Güç Sistemlerinde Optimizasyon Tabanlı Bulanık Mantık Denetleyici ile Yük Frekans Kontrolü," Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2014.
- [69] A. Kaysal, "Adıgüzel Hidroelektrik Santrali'nin Modellenmesi, Kısa Devre Analizi ve Bulanık Mantık Kontrolör ile Yük-Frekans Kontrolü," Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Eğitimi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye, 2013.
- [70] G. Görel, "Güneş Enerji Sistemli İki Bölge Enterkonnekte Şebekede Modern Kontrol Teknikleri ile Yük-Frekans Kontrolü," Doktora Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, Türkiye, 2017.
- [71] F. A. Y. Alhayani, "Tuning of PID Load Frequency Control Using Elephant Herding Optimization Method for Four Area Power System," M.Sc. Thesis, Electrical and Computer Engineering, Altınbas University, Istanbul, Turkey, 2019.
- [72] K. K. Gümüş, "Güç Santrallerinde Primer Frekans ve Yük Kontrolü," Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2012.
- [73] Z. Y. Yılmaz, "Güç Sistemlerinde Yük-Frekans Kontrolünde PID Denetleyici ve Parametrelerinin Simbiyotik Organizmalar Arama Algoritması ile Ayarı," Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2020.
- [74] M. M. Yıldırım, "Elektrik Güç Sistemlerinde Yapay Zekâ ile Yük Frekans Kontrolü," Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay, Türkiye, 2017.
- [75] S. Yıldız, "Çok Bölge Güç Sistemlerinde Yüksek Gerilim Doğru Akım Bağlantı Hattının Yük-Frekans Kontrolüne Etkisinin İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Fırat Üniversitesi, Elâzığ, Türkiye, 2019.
- [76] E. Özbay, "Küçük Hidroelektrik Santrallerin Modellenmesi ve Benzetimi," Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Fırat Üniversitesi, Elâzığ, Türkiye, 2009.
- [77] E. Çam, "Güç Sistemlerinde Yeni Kontrol Yöntemlerinin Uygulanması," Doktora Tezi, Makina Anabilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, Türkiye, 2004.
- [78] H. Gözde, "Güç Sistemlerinde Yapay Arı Kolonisi Algoritması Yöntemi ile Yük-Frekans Kontrolü Optimizasyonu," Doktora Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2010.

- [79] S. Duman, “Güç Sistemlerinde Kararlılık Analizi İçin PID Kontrolör Parametrelerinin Genetik Algoritma Kullanarak Belirlenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Eğitimi, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2010.
- [80] A. Naveed, “Delay-Dependent Stability Analysis of Load Frequency Control Systems with Electric Vehicles and Robust Controller Design,” PhD Thesis, Electrical and Electronic Engineering, Niğde Ömer Halisdemir University, Niğde, Turkey, 2021.
- [81] O. O. Darçın, “Güç Sistemlerinde Yük-Frekans Kontrolü ve Sınır Ağı Kontrol Uygulaması,” Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, Türkiye, 2004.
- [82] Z. Hamodat, “Automated Generation Control of Multiple Area Electrical System with an Availability-Based Tariff Pricing Scheme Regulated by Whale Optimized Fuzzy PID Controller,” PhD Thesis, Electrical and Computer Engineering, Altınbas University, Istanbul, Turkey, 2021.
- [83] S. Horzum, “Kesirli Dereceli Kontrolör İçeren Zaman Gecikmeli Yük Frekans Kontrol Sistemlerinin Kararlılık Analizi,” Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde, Türkiye, 2018.
- [84] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5. baskı, New Jersey: Prentice Hall, 2010.
- [85] R. Dukkupati, *Analysis and Design of Control Systems using MATLAB*, New Delhi: New Age International (P) Ltd., Publishers, 2006.
- [86] R. S. Burns, *Advanced Control Engineering*, 1. baskı, New Delhi: Butterworth Heinemann, 2001.
- [87] B. Abdollahzadeh, F. Soleimani Gharehchopogh, ve S. Mirjalili, “Artificial gorilla troops optimizer: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems,” *International Journal of Intelligent Systems*, c. 36, sayı 10, ss. 5887–5958, 2021.
- [88] Y. Meraihi, A. B. Gabis, S. Mirjalili, ve A. Ramdane-Cherif, “Grasshopper optimization algorithm: Theory, variants, and applications,” *IEEE Access*, c. 9, ss. 50001–50024, 2021.
- [89] B. Abdollahzadeh, F. S. Gharehchopogh, ve S. Mirjalili, “African vultures optimization algorithm: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems,” *Computers and Industrial Engineering*, c. 158, 2021.
- [90] H. Karami, M. V. Anaraki, S. Farzin, ve S. Mirjalili, “Flow Direction Algorithm (FDA): A Novel Optimization Approach for Solving Optimization Problems,” *Computers and Industrial Engineering*, c. 156, 2021.
- [91] A. Faramarzi, M. Heidarinejad, S. Mirjalili, ve A. H. Gandomi, “Marine Predators Algorithm: A nature-inspired metaheuristic,” *Expert Systems with Applications*, c. 152, 2020.
- [92] L. Abualigah, A. Diabat, S. Mirjalili, M. Abd Elaziz, ve A. H. Gandomi, “The Arithmetic Optimization Algorithm,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, c. 376, 2021.
- [93] W. Zhao, L. Wang, ve S. Mirjalili, “Artificial hummingbird algorithm: A new

- bio-inspired optimizer with its engineering applications,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, c. 388, 2022.
- [94] S. Mirjalili, “SCA: A Sine Cosine Algorithm for solving optimization problems,” *Knowledge-Based Systems*, c. 96, ss. 120–133, 2016.
- [95] S. Mirjalili ve A. Lewis, “The Whale Optimization Algorithm,” *Advances in Engineering Software*, c. 95, ss. 51–67, 2016.
- [96] Y. Zhang, Z. Jin, ve S. Mirjalili, “Generalized normal distribution optimization and its applications in parameter extraction of photovoltaic models,” *Energy Conversion and Management*, c. 224, 2020.
- [97] S. Mirjalili, A. H. Gandomi, S. Z. Mirjalili, S. Saremi, H. Faris, ve S. M. Mirjalili, “Salp Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems,” *Advances in Engineering Software*, c. 114, ss. 163–191, 2017.
- [98] S. Mirjalili, “The ant lion optimizer,” *Advances in Engineering Software*, c. 83, ss. 80–98, 2015.
- [99] S. Mirjalili, “Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm,” *Knowledge-Based Systems*, c. 89, ss. 228–249, 2015.
- [100] F. A. Hashim, E. H. Houssein, M. S. Mabrouk, W. Al-Atabany, ve S. Mirjalili, “Henry gas solubility optimization: A novel physics-based algorithm,” *Future Generation Computer Systems*, c. 101, ss. 646–667, 2019.
- [101] F. A. Hashim, E. H. Houssein, K. Hussain, M. S. Mabrouk, ve W. Al-Atabany, “Honey Badger Algorithm: New metaheuristic algorithm for solving optimization problems,” *Mathematics and Computers in Simulation*, c. 192, ss. 84–110, 2022.
- [102] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, ve A. Lewis, “Grey Wolf Optimizer,” *Advances in Engineering Software*, c. 69, ss. 46–61, 2014.
- [103] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, ve A. Hatamlou, “Multi-Verse Optimizer: a nature-inspired algorithm for global optimization,” *Neural Computing and Applications*, c. 27, sayı 2, ss. 495–513, 2016.
- [104] S. Mirjalili, “Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems,” *Neural Computing and Applications*, c. 27, sayı 4, ss. 1053–1073, 2016.
- [105] A. Faramarzi, M. Heidarinejad, B. Stephens, ve S. Mirjalili, “Equilibrium optimizer: A novel optimization algorithm,” c. 191, ss. 105190, 2020.

# ÖZGEÇMİŞ

## KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Özey CAN

Yabancı Dili : İngilizce

## ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Elektrik-Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2022
Lisans	Elektrik-Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2018
Y. Lisans	Elektrik-Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2016
Lisans	Elektrik Öğretmenliği	Fırat Üniversitesi	2011
Lise	Elektrik	Şişli Teknik Lisesi	2007

## YAYINLAR

### Kitap Bölümü:

- Ö. Can, H. Eroğlu, A. Öztürk, “*Meta-Heuristics Based Automatic Generation Controller in Interconnected Power Systems with Renewable Energy Sources*”, Editor: S. Mirjalili, Chapter 15, **ELSEVIER**. [In Press]

### SCI-Expanded Kapsamındaki Makaleler:

- Ö. Can, A. Öztürk, H. Eroğlu, H. Kotb, “*A Novel Grey Wolf Optimizer Based Load Frequency Controller for Renewable Energy Sources Integrated Thermal Power Systems*”, **Electric Power Components and Systems**, vol. 49, no. 15, pp: 1248-1259, 2022, <https://doi.org/10.1080/15325008.2022.2050450>.
- Ö. Can, A. Öztürk, H. Eroğlu, “*FV-termal güç sistemlerinde balina optimizasyon algoritması tabanlı otomatik üretim kontrolörü*”, **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**. [Kabul Edildi]

3. Ö. Can, A. Öztürk, H. Kotb, “*Ant-Lion Optimizer-Based Load Frequency Controller for a Hybrid Power System with PV and Thermal Power Plants*”, **Electrical Engineering**. [Under Review]

**Uluslararası Bildiri:**

1. Ö. Can, A. Öztürk, , “*Design of Automatic Generation Controller Using Grey Wolf Optimization in Non-Reheat Power System*”, **International Marmara Sciences Congress (Imascon Autumn 2021)**, 10-11 December 2021.

