

**GÜÇ SİSTEMLERİNDE YAPAY ARI KOLONİSİ ALGORİTMASI
YÖNTEMİ İLE YÜK-FREKANS KONTROLÜ OPTİMİZASYONU**

Haluk GÖZDE

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KASIM 2010
ANKARA**

Haluk GÖZDE tarafından hazırlanan “GÜÇ SİSTEMLERİNDE YAPAY ARI KOLONİSİ ALGORİTMASI YÖNTEMİ İLE YÜK-FREKANS KONTROLÜ OPTİMİZASYONU” adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof.Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

Tez Danışmanı, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Sezai DİNÇER

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Prof.Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Prof.Dr. İlhan KOCAARSLAN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul Üniversitesi

Yrd.Doç.Dr. Hasan Şakir BİLGE

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Yrd.Doç.Dr. Fırat HARDALAÇ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Tarih: 24/11/2010

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Haluk GÖZDE

GÜÇ SİSTEMLERİNDE YAPAY ARI KOLONİSİ ALGORİTMASI YÖNTEMİ İLE YÜK-FREKANS KONTROLÜ OPTİMİZASYONU

(Doktora Tezi)

Haluk GÖZDE

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Kasım 2010

ÖZET

Bir elektrik güç sisteminde gerilim ve frekans, sistemin kabul edilebilir seviyede çalıştığına önemli göstergeleridir. Elektrik güç sisteminin doğru çalışması ile kastedilen, üretilen ve tüketilen güçlerin dengede olduğu ve böylece tüketiciye anma frekansında ve anma geriliminde enerji sağlanabildiğidir. Bununla beraber, elektrik enerjisinin yüksek miktarlarda depolanamaması ve yük talebinin zamana bağlı olarak sürekli değişmesi nedeniyle, bu dengelerin korunması özellikle enterkonnekte sistemlerde karmaşık kontrol yöntemlerinin uygulanmasını gerektirir. Genel olarak, sistemde aktif güç dengesini sağlayan ve sistem frekansını kontrol eden bu yöntemlere yük-frekans kontrolü adı verilir. Yük-frekans kontrolü, Avrupa enterkonnekte sistemine bağlanma çalışmaları halen devam eden ülkemiz için, uyum çalışmaları kapsamında üzerinde çalışılan önemli kontrol problemlerinden birisidir. Bu çalışmada; yük-frekans kontrolü ile sistemden optimum frekans sapması ve optimum ara-bağlantı hattı güç değişimi cevabı elde edilebilmesi amacıyla, yapay zeka tabanlı bazı gelişmiş optimizasyon algoritmaları kullanılmış ve kontrolör parametrelerinde optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kontrolör olarak, kazanç güncellemeli oran-integral (PI) ve kazanç güncellemeli oran-integral-türev (PID) kontrolörler ayrı ayrı kullanılmış, kazanç güncelleme işlemleri Yapay Arı Kolonisi ve Parçacık Sürüsü optimizasyon algoritmaları ile ayrı ayrı karşılaştırmalı olarak gerçekleştirilmiştir. Yapay Arı Kolonisi

algoritması bir enterkonnekte güç sisteminin yük-frekans kontrolüne ilk kez uygulanmış ve ilerideki çalışmalara referans olması sağlanmıştır. Ayrıca, Yapay Arı Kolonisi algoritması kullanılarak optimize edilen PI-kontrol sonuçlarının Parçacık Sürüsü algoritması ile elde edilen literatür verileri ile karşılaştırılması sağlanmıştır. Genel değerlendirme olarak; Yapay Arı Kolonisi algoritması kullanılarak tasarlanan sistemde, Parçacık Sürüsü algoritması ile tasarlanan sisteme göre, frekans sapması aşımının ve ara-bağlantı hattı güç değişimi aşımının oranları incelenmiştir. Son olarak, sistem cevabındaki sönümlü osilasyonların azaltılması ve kontrol dayanıklılığının belirlenmesi amacıyla Yapay Arı Kolonisi algoritması ile optimize edilen bir PID-kontrolör tasarlanıp, yükün ve güç sistem parametrelerinin $\pm\%25$ ve $\pm\%50$ değişim değerlerinde analizi yapılmıştır.

Bilim Kodu : 905.1.033
Anahtar Kelimeler : Yük-frekans kontrolü, Akıllı arı kolonisi algoritması, Parçacık sürüsü algoritması.
Sayfa Adedi : 106
Tez Yöneticisi : Prof.Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

**AN OPTIMIZATION OF LOAD-FREQUENCY CONTROL
BY ARTIFICIAL BEE COLONY ALGORITHM METHOD
IN A POWER SYSTEM
(Ph.D. Thesis)**

Haluk GÖZDE

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
November 2010**

ABSTRACT

In an electrical system, voltage and frequency are the important parameters of the power system. The proper operated power system means that the generated and consumed real powers are on equilibrium and the power that is distributed to consumers should be on nominal frequency and nominal terminal voltage. However, since the amount of demanded load frequently changes and the electrical energy cannot be stored in large amounts, an advanced control methods are needed to protect this equilibrium for an interconnected system. These control methods provide the equilibrium of the real powers and control the system frequency are called load-frequency control in general. In Turkey, this subject is particularly studied for the connecting Turkish interconnected system to the European interconnected system. The load-frequency control is one of the most important control problems which are worked on the coverage of this adaptation process. In this study, in order to obtain the optimum response of frequency deviation and tie-line power change, artificial intelligence based optimization algorithms are used and the optimization studies have been realized for the controller parameters. As a controller, a gain scheduling proportional plus integral (PI) and proportional plus integral plus derivative (PID) controllers are used and these gain scheduling processes are provided comparatively by using Artificial Bee Colony (ABC) algorithm and Particle

Swarm Optimization (PSO) algorithm separately. The ABC algorithm is applied to the load-frequency control of an interconnected power system for the first time and is provided to be reference for the future studies. In addition to this, the results obtained by using the PI-controller which is optimized by ABC algorithm are compared with the results proposed in the literature in which used PSO algorithm. As a general evaluation, the rates of the frequency deviations and the tie-line power changes are investigated on the system designed by using ABC algorithm according to the system designed by PSO algorithm. Finally, in order to reduce the damped oscillations on the response of the system and to determine the robustness of the control, a PID-controller optimized by ABC algorithm is designed and analyzed both in the values of $\pm 25\%$ and $\pm 50\%$ of the base load and the power system parameters.

Science Code : 905.1.033

**Key Words : Load-frequency control, Artificial bee colony algorithm,
Particle swarm optimization.**

Page Number: 106

Adviser : Prof.Dr.M.Cengiz TAPLAMACIOGLU

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Prof.Dr. M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU'na, kıymetli bilgilerinden ve tecrübelerinden faydalandığım hocam Prof.Dr. İlhan KOCAARSLAN'a, desteklerinden dolayı tüm komutanlarıma ve mesai arkadaşlarıma, ayrıca hocam Yrd.Doç.Dr. Fırat HARDALAÇ'a, Arş.Gör. İbrahim EKE'ye ve adlarını sayamadığım Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde görevli diğer arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

En yoğun çalışmalarımda bile moral kaynağım olan eşim Sevda'ma, kızlarım Merve'me ve Bilge'me, ayrıca bugünlere ulaşmamı sağlayan ve manevi desteklerini her zaman arkamda hissettiğim babama ve anneme sonsuz teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvii
1. GİRİŞ	1
2. ENTERKONNEKTE ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMİ	8
2.1. Enterkonnekte Elektrik Güç Sistemi	8
2.2. Türkiye Enterkonnekte Elektrik Güç Sistemi	11
3. ENTERKONNEKTE SİSTEMDE YÜK-FREKANS KONTROLÜ	15
3.1. Yük-Frekans Kontrolünün Önemi	16
3.2. Birincil Kontrol	18
3.3. İkincil Kontrol	21
3.4. Ara-Bağlantı Hattı Kontrolü	24
3.5. Üçüncül Kontrol	25
4. ENTERKONNEKTE SİSTEM MODELİNİN OLUŞTURULMASI	26
4.1. Hız Governoru Modeli	26
4.2. Hidrolik Yükselteç Modeli	27
4.3. Türbin Modeli	28
4.4. Kontrol Alanı Modeli	29

Sayfa

4.5. Tek Kontrol Alanına Sahip Güç Sistemi Modelinin Oluşturulması	32
4.6. Ara-Bağlantı Hattı Modeli	34
4.7. Enterkonnekte Güç Sistemi Modelinin Oluşturulması	36
5. KONTROL YÖNTEMLERİ VE OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI	39
5.1. Kontrol Yöntemleri	39
5.1.1. Oran-integral (PI) kontrol	39
5.1.2. Oran-integral-türev (PID) kontrol	40
5.1.3. Kazanç güncellemeli kontrol.....	41
5.2. Yapay Zekâ Tabanlı Optimizasyon Algoritmaları.....	42
5.2.1. Akıllı arı kolonisi (ABC) algoritması	42
5.2.2. Parçacık sürüsü (PSO) algoritması.....	46
5.3. Analiz Yöntemi	52
5.3.1. Geçiş cevabı analizi	52
6. ARAŞTIRMA BULGULARI	54
6.1. Enterkonnekte Güç Sistemi Modeli	54
6.2. Yapay Arı Kolonisi Algoritmasının PI-Kontrol Tabanlı Güç Sistemi Üzerindeki Ayar Performansının Parçacık Sürüsü Algoritması ile Karşılaştırılması	55
6.3. Yapay Arı Kolonisi Algoritmasının Kontrol Dayanıklılığına Etkisinin PID-Kontrol Tabanlı Güç Sistemi Üzerinde İncelenmesi	58
6.3.1. Anma parametreleri kullanılarak elde edilen sistem cevabının incelenmesi.....	59
6.3.2. Sistem yükünün $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen sistem cevabının incelenmesi	61
6.3.3. Güç sistem parametrelerinin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen sistem cevabının incelenmesi	64

Sayfa

6.3.4. Farklı maliyet fonksiyonları kullanılarak elde edilen sistem cevabının incelenmesi	76
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	80
KAYNAKLAR	82
EKLER.....	86
EK-1 Elektrik Güç Sisteminin MATLAB/Simulink Modeli	87
EK-2 Akıllı Arı Kolonisi Algoritmasının MATLAB Kodu.....	88
EK-3 Akıllı Arı Kolonisi Algoritması “Greedy Selection” fonksiyonunun MATLAB Kodu	96
EK-4 Parçacık Sürüsü Algoritmasının MATLAB Kodu	98
ÖZGEÇMİŞ	103

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Türkiye enterkonnekte güç sisteminde toplam kurulu gücün enerji kaynaklarına göre dağılımı	13
Çizelge 3.1. Mekanik hızın değişimine göre momentler arasındaki farkın ve sistem frekansının değişimi.....	17
Çizelge 3.2. İki kontrol alanı içeren enterkonnekte güç sistemi için ara-bağlantı hattı kontrol durumları	25
Çizelge 6.1. Modelde kullanılan güç sistem parametreleri.....	55
Çizelge 6.2. PI-kontrol uygulamasında elde edilen optimum kontrolör kazançları ve maksimum aşım değerleri	56
Çizelge 6.3. Sistemin anma parametreleri kullanılarak elde edilen optimum PID-kontrolör kazançları ile frekans sapması ve ara-bağlantı hattı güç değişimine ait maksimum aşım ve oturma zamanı değerleri.	58
Çizelge 6.4. Sistem yükünün $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen optimum PID-kontrolör kazançları.....	61
Çizelge 6.5. Sistem yükünün $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen optimum frekans sapmasına ait maksimum aşım ve oturma zamanı değerleri	62
Çizelge 6.6. Sistem yükünün $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen optimum ara-bağlantı hattı güç değişimine ait maksimum aşım ve oturma zamanı değerleri.	62
Çizelge 6.7. Güç sistem parametrelerinin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen optimum PID-kontrolör kazançları.	65
Çizelge 6.8. Güç sistem parametrelerinin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen optimum frekans sapmasına ait maksimum aşım ve oturma zamanı değerleri.....	74
Çizelge 6.9. Güç sistem parametrelerinin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen optimum ara-bağlantı hattı güç değişimine ait maksimum aşım ve oturma zamanı değerleri.	74
Çizelge 6.10. Farklı maliyet fonksiyonları kullanılarak elde edilen optimum PID-kontrolör kazançları.....	75

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.11. Farklı maliyet fonksiyonları kullanılarak elde edilen optimum frekans sapmasına ait maksimum aşım ve oturma zamanı değerleri.	77
Çizelge 6.12. Farklı maliyet fonksiyonları kullanılarak elde edilen optimum ara-bağlantı hattı güç değişimine ait maksimum aşım ve oturma zamanı değerleri	79
Çizelge 6.13. Farklı maliyet fonksiyonları kullanılarak elde edilen optimum ara-bağlantı hattı güç değişimine ait maksimum aşım ve oturma zamanı değerleri	79

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Enterkonnekte güç sistemi	9
Şekil 3.1. Güç sisteminde yük-frekans kontrolü çevrimleri.....	15
Şekil 3.2. Elektrik üretim ünitesinin blok gösterimi	17
Şekil 3.3. Birincil kontrol rezerv kapasitesinin sisteme aktarılması	20
Şekil 3.4. Governor düşüm karakteristiği	20
Şekil 3.5. Birincil kontrol sonucunda sistem frekansında meydana gelen sürekli durum hatası	21
Şekil 3.6. Üretim ünitesinin güç çıkışının yeniden ayarlanması.....	22
Şekil 3.7. Kontrol sinyallerinin SCADA ile üretim ünitelerine gönderilmesi	23
Şekil 4.1. Hız governorunun doğrusal modeli	27
Şekil 4.2. Ölü bölge governor düşüm karakteristiği	28
Şekil 4.3. Hidrolik yükseltecin doğrusal modeli.....	28
Şekil 4.4. Buhar türbinlerine ait doğrusal modeller	29
Şekil 4.5. Ara-ısıtıcılı türbinin şematik gösterimi.....	29
Şekil 4.6. Kontrol alanının, frekans sapmasını çıkış kabul eden doğrusal modeli.....	31
Şekil 4.7. Tek kontrol alanına sahip güç sisteminin doğrusal modeli.....	32
Şekil 4.8. Ara-bağlantı hattıyla bağlanmış iki kontrol alanının tek hat şeması.....	34
Şekil 4.9. İki kontrol alanına sahip bir enterkonnekte sisteme ait eşdeğer devre.....	34
Şekil 4.10. Ara-bağlantı hattının doğrusal modeli	35
Şekil 4.11. İki kontrol alanı içeren bir enterkonnekte güç sisteminin doğrusal modeli.....	36

Şekil	Sayfa
Şekil 4.12. Kontrol alanları güç çıkışlarının düşüm karakteristiklerine göre ayarlanması	37
Şekil 5.1. Kazanç güncellemeli kontrol sisteminin blok diyagramı.....	41
Şekil 5.2. Birim adım cevabı geçiş analizi parametreleri.....	53
Şekil 6.1. Çalışmada kullanılan enterkonnekte sistem modeli.....	54
Şekil 6.2. PI-kontrol ile elde edilen frekans sapması eğrilerinin karşılaştırılması	57
Şekil 6.3. PI-kontrolör ile elde edilen ara-bağlantı hattı güç değişimi eğrilerinin karşılaştırılması.....	57
Şekil 6.4. Sistemin anma parametrelerinde PID-kontrolör ile elde edilen birinci ve ikinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri.....	60
Şekil 6.5. Sistemin anma parametrelerinde PID-kontrolör ile elde edilen ara-bağlantı hattı güç değişimi eğrisi	60
Şekil 6.6. Sistem yükünün $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen birinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri	63
Şekil 6.7. Sistem yükünün $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen ikinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri.....	63
Şekil 6.8. Sistem yükünün $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen ara-bağlantı hattı güç değişimi eğrileri.....	64
Şekil 6.9. Hidrolik zaman sabiti T_h 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen birinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri.....	66
Şekil 6.10. Türbin zaman sabiti T_t 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen birinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri.....	67
Şekil 6.11. Türbin ara-ısıtma zaman sabiti T_r 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen birinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri	67
Şekil 6.12. Türbin ara-ısıtma kazancı K_r 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen birinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri	68
Şekil 6.13. Frekans kutuplama sabiti B 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen birinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri.....	68

Şekil	Sayfa
Şekil 6.14. Hidrolik zaman sabiti T_h 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen ikinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri	69
Şekil 6.15. Türbin zaman sabiti T_t 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen ikinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri	69
Şekil 6.16. Türbin ara-ısıtma zaman sabiti T_r 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen ikinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri.....	70
Şekil 6.17. Türbin ara-ısıtma kazancı K_r 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen ikinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri	70
Şekil 6.18. Frekans kutuplama sabiti B 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen ikinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri	71
Şekil 6.19. Hidrolik zaman sabiti T_h 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen ara-bağlantı hattı güç değişimi eğrileri	71
Şekil 6.20. Türbin zaman sabiti T_t 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen ara-bağlantı hattı güç değişimi eğrileri	72
Şekil 6.21. Türbin ara-ısıtma zaman sabiti T_r 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen ara-bağlantı hattı güç değişimi eğrileri.....	72
Şekil 6.22. Türbin ara-ısıtma kazancı K_r 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen ara-bağlantı hattı güç değişimi eğrileri.....	73
Şekil 6.23. Frekans kutuplama sabiti B 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen ara-bağlantı hattı güç değişimi eğrileri.....	73
Şekil 6.24. Farklı maliyet fonksiyonları için elde edilen birinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri.....	77
Şekil 6.25. Farklı maliyet fonksiyonları için elde edilen ikinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri.....	78
Şekil 6.26. Farklı maliyet fonksiyonları için elde edilen ara-bağlantı hattı güç değişimi eğrileri	78

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
δ	Faz açısı
ϕ	Adım katsayısı
π	Pi sayısı
$\Delta\delta$	Faz açısı değişimi
Δf	Frekans değişimi
ΔP_{ara}	Ara-bağlantı hattı güç değişimi
ΔP_L	Yük değişimi
ΔP_g	Governor çıkış gücü değişimi
ΔP_{ref}	Referans güç değişimi
ΔP_T	Hidrolik yükselteç çıkış gücü değişimi
ΔP_v	Türbin çıkış gücü değişimi
Δw	Türbin rotor mili mekanik hız değişimi
c	İvmelenme sabiti
D	Yük sönüm sabiti
dk	Dakika
e	Hata sinyali
E	Terminal gerilimi
f	Frekans
f_x	Konum uygunluk değeri
f_p	Yerel en iyi konum uygunluk değeri
f_g	Global en iyi konum uygunluk değeri
F	Uygunluk değeri matrisi
g	Global en iyi konum
H	Jeneratör eylemsizlik sabiti

Simgeler	Açıklama
I_T	İterasyon sayısı
J	Eylemsizlik momenti
K_P	Kontrol alanı kazancı
K_r	Türbin ara-ısıtma kazancı
m	Besin kaynağı indisi
M	Parçacık sayısı
p	Yerel en iyi konum
P	Yerel en iyi konum matrisi
P_m	Mekanik güç
P_e	Elektriksel güç
P_r	Anma gücü
r	Referans giriş sinyali
R	Regülasyon sabiti
RP	Birincil kontrol rezerv güç miktarı
S	Besin kaynağı sayısı
T	Senkronizasyon katsayısı
T_e	Elektriksel moment
T_h	Hidrolik zaman sabiti
T_m	Mekanik moment
T_P	Kontrol alanı zaman sabiti
T_r	Türbin ara-ısıtma zaman sabiti
T_T	Türbin zaman sabiti
u	Kontrolör çıkış sinyali
v	Parçacık hızı
V	Parçacık hız matrisi
w	Mekanik hız
W_{kin}	Kinetik enerji
x	Parçacık konumu
X	Parçacık konum matrisi
X_{12}	Reaktans

Simgeler**Açıklama****X_T**

Toplam reaktans

y

Sistem çıkış sinyali

Kısaltmalar**Açıklama****ABC**

Artificial Bee Colony

AC

Alternative Current

ACE

Area Control Error

AGC

Automatic Generation Control

AKH

Alan Kontrol Hatası

GW

Giga Watt

HKİ

Hatanın Kareleri İntegrali

HZMİ

Hatanın Zamanla Çarpılmış Mutlak

Değerlerinin İntegrali

ISE

Integral of Square Error

ITAE

Integral of Time Multiplied Absolute of Error

kV

Kilo Volt

kW

Kilo Watt

MW

Mega Watt

OECDOrganisation for Economic Co-operation and
Development**PI**

Proportional-Integral

PID

Proportional-Integral-Derivative

PSO

Particle Swarm Optimization

p.u.

Per Unit

SCADA

Supervisory Control And Data Acquisition

TEİAŞ

Türkiye Elektrik İşletmeleri Anonim Şirketi

TW

Tera Watt

UCTEUnion For Coordination Of Transmission Of
Electricity

1. GİRİŞ

Günümüzde, kalkınmışlığın ölçülerinden biri yıllık kişi başı elektrik enerjisi tüketimidir. Ülkemizde bu tüketim yıllık ortalama 3000 kWh ile her ne kadar dünya ortalamasının biraz üzerinde olsa da gelişmiş ülkelerin birçoğuna göre düşük seviyelerdedir¹. Enerji üretim ve kullanımının yükseltilmesi ekonomik refahın artırılmasını sağlayacak, büyük çaplı enerji üretim projelerinin gerçekleştirilmesine olanak sağlayacaktır. Mevcut çalışmalardan önemli olan birisi, Türkiye enterkonnekte güç sisteminin Avrupa enterkonnekte güç sistemine bağlanması projesidir. UCTE (Union for Coordination of Transmission of Electricity) ile 2005 yılında başlatılan bağlantı çalışmaları, ülkemizin enterkonnekte sistemi için bazı uyum kriterlerini de beraberinde getirmiştir. Ülkemizdeki elektrik enerjisi kalitesinin yükseltilmesi ve buna bağlı olarak frekans ve gerilim kontrolü ile frekanstaki salınımların azaltılması, çözülmesi gereken problemlerin başında gelmektedir. Genel olarak, gerilim kontrolü ile frekans salınımlarının azaltılması, üretim ünitelerinde gerçekleştirilen yerel kontrollerdir. Ancak frekans kontrolü, enterkonnekte sistemin ortak bir problemidir ve daha geniş kapsamlı kontroller içerir.

Elektrik enerjisi; üretim santrallerinde, kömür ya da doğalgaz gibi yakıtların yanması ile elde edilen buharın veya yüksekten bırakılan suyun mekanik enerjisinin, türbin-jeneratör çiftlerinde gerçekleştirilen enerji dönüşümü ile elde edilir. Temel olarak, mekanik güç ile çevrilen türbin mili bir elektrik jeneratörünün rotorunu çevirir. Bunun sonucunda ise jeneratörün statorunda elektriksel gerilim indüklenir. Türbin milinin dönüş hızı sistemde üretilen elektrik enerjisinin frekansını belirler. Milin gelişi güzel hızlarda dönmesi sistem frekansının da sürekli değişmesine neden olur. Bu nedenle, türbine giren buharın ya da suyun miktarı ayarlanarak milin dönüş hızı yani sistem frekansı sürekli belli bir değerde tutulmaya çalışılır. Bununla beraber, güç sisteminde frekans için asıl bozucu etki sistemdeki yük değişimleridir. Sistem yükündeki artış frekansın azalmasına, azalma ise frekansın artmasına neden olur. Bu değişiminin sürekli olması, AC motorlar, test ve ölçüm cihazları, elektrikli sayaçlar,

¹ TEİAŞ 2008 yılı verilerine göre kişi başı elektrik tüketimi dünyada ortalama 2500 kWh, gelişmiş ülkelerde (OECD ülkeleri) ortalama 8900 kWh'tır.

bilgisayar ve bilgisayarlı cihazlar gibi frekansa bağımlı yüklerin hatalı çalışması ya da arızalanması ile sonuçlanır. İlave olarak, frekansın aşırı düşmesi ya da yükselmesi tüm güç sisteminin çökmesine de sebep olabilir.

Yukarıda belirtilen sebepten dolayı elektrik güç sisteminde frekansın kontrol altında tutulması, sistemde üretilen ve tüketilen aktif güçlerin dengede tutulmasına bağlıdır [1]. Ancak, elektrik enerjisinin yüksek miktarlarda depolanamaması ve yük talebinin sürekli değişmesi nedeniyle bu dengenin korunması bazı kontrol zorlukları içerir. Temel olarak, elektrik güç sistemlerinde frekans kontrolü, ardışık iki otomatik kontrol çevrimi içeren ve yük-frekans kontrolü adı verilen bir kontrol mekanizmasıyla gerçekleştirilir [2-4]. Sistemde, yük talebinin artması ile birlikte frekans düşmeye başlar. Üretim üniteleri, buna ilk tepki olarak kendileri üzerinde depo edilmiş kinetik enerjilerini kullanarak düşüşü yavaşlatmaya çalışırlar. Birkaç milisaniye sonra frekanstaki değişim algılanabilir seviyeye geldiğinde ise yük-frekans kontrolü çevrimleri devreye girmeye başlar. Öncelikle birincil kontrol adı verilen kontrol çevrimi ile üretim tüketim dengesi yeniden sağlanarak frekansın düşüşü durdurulur ve belli bir değerde sabitlenir. Ardından, ikincil kontrol çevrimi ile frekans, SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) sistemi kontrolü ve gerekli manevraları ile merkezi olarak yeniden anma değerine getirilir. Buna ek olarak yük-frekans kontrolü, enterkonnekte sistemde kontrol alanları arasındaki ara-bağlantı hatlarında gerçekleşen güç aktarımının da kontrol edilerek anlaşmalarla belirlenmiş değerlerde tutulmasını sağlar [3].

Birincil kontrol çevrimi, temel olarak üretim ünitelerinde governorlar ile yerel olarak gerçekleştirilen bir türbin kontrolüdür. İkincil kontrol ise yük-frekans kontrolü mekanizmasının asıl kontrol problemini oluşturur ve temel olarak, frekansta birincil kontrol sonunda oluşan hatayı algılayıp, bir kontrolör vasıtasıyla hatayı gideren merkezi kontrolleri içerir [2-4]. Bu tez çalışmasında da, yük-frekans kontrolünün ikincil kontrol çevrimi üzerinde durulmuştur. İkincil kontrol mekanizması, sistemden optimum frekans sapması ve optimum ara-bağlantı hattı güç değişimi cevabı elde edilebilmesi amacıyla, yapay zeka tabanlı optimizasyon algoritmaları kullanılarak yeniden tasarlanmış ve kontrol performansı analiz edilmiştir. Bu çalışmada

kullanılan yapay zeka tabanlı optimizasyon algoritmaları canlıların besin arama davranışlarının optimizasyon yöntemi olarak ele alınıp, modellenmesiyle oluşturulan iteratif optimizasyon algoritmalarıdır. Türev elemanı içermemeleri, kısa ve nispeten basit program kodlarıyla yazılabilmeleri ve sonuca yakınsama performanslarındaki üstünlükleri nedeniyle uygulama alanları her geçen gün artmaktadır. Sistemi kontrol etmek amacıyla kazanç güncellemeli oran-integral (PI) ve oran-integral-türev (PID) kontrolörler tasarlanmış [5], kazanç güncelleme işlemi Yapay Arı Kolonisi [6] ve Parçacık Sürüsü [8] algoritmaları ile yapılmıştır. Literatür incelenmiş olup, Yapay Arı Kolonisi algoritması enterkonnekte güç sistemlerinin yük frekans kontrolüne bu çalışma ile ilk kez uygulanmıştır. PI-kontrolör ile elde edilen sonuçlar, literatürde mevcut sonuçlar [9] ile karşılaştırılmıştır. PID kontrol ile elde edilen sonuçlar ise yük ve parametre değişimlerine karşı kontrol dayanıklılığının belirlenmesi amacıyla, yükün ve güç sistem parametrelerinin $\pm\%50$ değişim aralığında ve optimizasyon algoritmasında farklı maliyet fonksiyonları kullanılarak analiz edilmiş; frekans sapsması ve ara-bağlantı hattı güç değişimi eğrileri ile maksimum aşım ve oturma zamanı değerleri incelenerek literatüre sunulmuştur.

Ülkemizde, birincil kontrol hemen hemen tüm santrallerimizde gerçekleştirilmekte iken, ikincil kontrol sadece birkaç büyük hidroelektrik santralimizde uygulanmaktadır. Ancak, Avrupa enterkonnekte sistemine bağlantı için, yukarıda belirtilen ikincil kontrol işlemlerinin UCTE tarafından belirlenmiş tepki ve işlem süreleri içinde yerine getirilmesi gerekmektedir. Bu durum göz önüne alındığında, bu alanda yapılmakta olan akademik çalışmalar önemli çıktılar sağlayabilecektir.

Literatür incelendiğinde başlangıç uygulamaların, birincil kontrolün temelini oluşturan ve 1769 yılında buhar motorunun hız kontrolü amacıyla James Watt tarafından ilk governorun² tasarlanmasıyla başladığı kabul edilir. Bununla beraber, ikincil kontrole yönelik ilk çalışmalar, bundan çok sonraları, 1950’li yıllarda Cohn

² Bu kontrol sistemi, batıda endüstride kullanılan ilk otomatik geri beslemeli kontrol olarak kabul edilmektedir. Bununla beraber, Rus bilim adamları ilk geri beslemeli otomatik kontrol örneğinin 1765 yılında I.Polzunov tarafından tasarlanan su seviye düzenleyicisi olduğunu kabul etmektedirler. 1868 yılında J.C.Maxwell, kontrol teorisi ile ilişkili olarak geliştirdiği matematik teorisi ile J.Watt’ın tasarladığı governorun matematiksel modelini oluşturmuş ve farklı sistem parametrelerinin governor kontrolü üzerine etkilerini ilk kez teorik olarak incelemiştir.

ile başlamıştır [10].

1970 yılında Elgerd ve Fosha, enterkonnekte güç sistemlerinin Otomatik Üretim Kontrolü (Automatic Generation Control - AGC)³ için ilk modern kontrol tasarımını ortaya koymuşlar ve çalışmalarında, ikincil kontrol için klasik kontrol yöntemlerini kullanarak oransal bir kontrolör ve farklı bir geribesleme düzeni ile optimal kontrolör tasarımı yapmışlardır [1].

İlk çalışmalardan günümüze kadar; yük-frekans kontrolünde ikincil kontrole yönelik klasik, adaptif, optimal ve dayanıklı (robust) kontrol yöntemleri ya da yapay zeka tabanlı kontrol yöntemleri kullanılarak, birbirlerine göre çeşitli üstünlükleri olan birçok farklı kontrol stratejileri geliştirilmiştir. Bu yöntemler Kumar ve Kothari'nin konuyla ilgili inceleme çalışmasında belirtilmiştir [11]. Bu stratejiler arasında kazanç güncellemeli optimal kontrol yöntemleri, daha basit tasarlanabilmeleri ve sistem parametrelerinin değişimlerinden daha az etkilenmeleri gibi avantajları sayesinde yukarıda belirtilen yöntemler arasında önemli bir yer edinmiştir [5]. Özellikle, fiziksel sistemlere uygulanabilirlikleri her geçen gün daha da artan yapay zekâ tabanlı kontrol ve optimizasyon algoritmaları sayesinde, kazanç güncellemeli kontrol yöntemlerinin öneminin daha da artmaya devam edeceği değerlendirilmektedir.

Kazanç güncellemeli kontrol yönteminin yük-frekans kontrolüne ilk uygulamaları 1990'lı yıllarda görülmeye başlanmıştır. 1991 yılında Lee ve arkadaşları enterkonnekte sistemler için bir kazanç güncellemeli kontrolör önermişler, bu kontrolör ile geniş bir çalışma aralığında o zamana kadar sağlanan en iyi kontrol performansını elde etmişlerdir [12].

Rubai ve Udo, 1994 yılında yük-frekans kontrolü için çok değişkenli bir kazanç güncellemeli kontrol yöntemi önermişler, kazanç güncelleme algoritmasında farklı

³ Otomatik Üretim Kontrolü (Automatic Generation Control - AGC), 2009 yılı tarihli Elektrik Piyasası Yan Hizmetler Yönetmeliğinde ikincil frekans kontrolüne katılacak üretim tesislerinde ve Milli Yük Tevzi Merkezinde bulunan otomatik üretim kontrol programı tarafından gönderilen sinyallerle, ilgili üretim tesisinin ikincil frekans kontrolüne katılmasını sağlayan sistem olarak tanımlanmıştır. Genel olarak, yük-frekans kontrolü ve ekonomik iletim kontrolü gibi merkezi kontrolleri kapsar. Bu tez çalışmasında, Otomatik Üretim Kontrolünün bir parçası olan yük-frekans kontrol ele alınmıştır.

bir maliyet fonksiyonu kullanmışlardır [13].

Bu tarihlerde, klasik kontrol teorisinde yer alan kazanç güncelleme metotlarının doğrusal olmayan yük karakteristiği ve değişken çalışma durumları gibi doğrusalsızlıklar içeren güç sistem uygulamalarında yeterli performansı sağlayamadığının görülmesi üzerine, araştırmacılar tarafından yapay zekâ tabanlı metotlar tercih edilmeye başlanmıştır. 1995 yılında Abdel-Magid ve Dawoud, iki kontrol alanına sahip bir enterkonnekte sistem modeli üzerinde integral kontrolörün kazancını genetik algoritmalar ile güncellemişlerdir [14].

1997 yılında Chang ve Fu, aynı enterkonnekte sistem modeli üzerinde PI-kontrolör kazançlarını büyük ve küçük olmak üzere iki bulanık kural içeren bir bulanık mantık kontrolör ile güncelleyen bir yöntem önermişlerdir [15].

Bunun üzerine Talaq ve Al-Basri, 1999 yılında yeni bir adaptif bulanık kazanç güncelleme metodu önermişler ve bu metotla enterkonnekte sistem modeli üzerinde klasik bir PI-kontrolörün kazançlarını ayarlamışlardır [16].

2002 yılında Pingsong ve arkadaşları, enterkonnekte sistem modeli üzerinde PI ve PID-kontrolör ile bir kayan modlu kontrolörün kazançlarını güncellemek için gerçek sayılarla kodlanmış genetik algoritma kullanmışlardır [17].

2003 yılında Abdel-Magid ve Abido, enterkonnekte sistemin yük-frekans kontrolünde kullandıkları I-kontrolör ve PI-kontrolör kazançları ile frekans kutuplama sabitini güncellemek için Parçacık Sürüşü algoritmasını kullanmışlardır. Çalışmalarının sonuçlarını klasik PI-kontrolör ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır [9].

Yeşil ve arkadaşları 2004 yılında, aynı amaçla bir kazanç güncellemeli bulanık mantık PID-kontrolör önermişler, kazanç güncelleme metodu olarak modifiye edilmiş bir tepe değeri gözleyici kullanmışlardır [18].

Aynı yıl Juang ve Lu, enterkonnekte sistemin yük-frekans kontrolü için genetik algoritma tabanlı bulanık kazanç güncellemeli PI-kontrolör tasarımını önermişlerdir. Çalışmalarında, kazanç güncelleme için kullandıkları bulanık mantık yapısına ait bulanık kural kümesinin tasarımı için genetik algoritmaları kullanışlardır [19].

2005 yılında Çam ve Kocaarslan, Chang ve Fu'nun PI-kontrolörün kazançlarını güncellemek için önerdiği iki bulanık kurallı kazanç güncelleme tasarımını yedi adet bulanık kural kullanarak geliştirmişler ve bu sayede kontrol performansını arttırmışlardır [20].

2006 yılında Massiala ve arkadaşları, aynı amaçla iki katmanlı bir bulanık kazanç güncellemeli PI-kontrolör kullanmışlardır. Kontrolörün ilk katını bulanık mantık oran-türev (proportional plus derivative - PD) kontrolör ile ön kompanzatör olarak tasarlamışlar, ikinci katını ise asıl kontrolör olarak bulanık mantık kazanç güncellemeli PI-kontrolör şeklinde tasarlamışlardır [21].

2008 yılında Taher ve arkadaşları, iki kontrol alanına sahip bir enterkonnekte sistem modelinde PI-kontrolörün kazanç güncellemesi için Parçacık Sürüsü algoritması ve yine Parçacık Sürüsü algoritması ile oluşturdukları hibrit bir algoritma kullanmışlardır. Hibrit algoritmada, Parçacık Sürüsü algoritması içinde genetik algoritmalarda ya da evrimsel gelişim algoritmasında olduğu gibi doğal seçim ve mutasyon gibi evrimsel operatörler kullanmışlardır [22].

Aynı yıl Pothiya ve Ngamroo, süper iletkenli manyetik enerji depolama ünitesi içeren iki kontrol alanlı bir enterkonnekte sistem için optimal kazanç güncellemeli bulanık mantık PID-kontrolör önermişlerdir. Tasarımlarında bulanık mantık PID-kontrolörün kazançlarının güncellemesi için arama performansı geliştirilmiş Çoklu Tabu Arama algoritması kullanmışlardır [23].

2009 yılında, Abdel-Magid ve Abido'nun çalışmalarına benzer olarak Gözde ve arkadaşları, governor ölü bölgesi içeren iki kontrol alanlı bir enterkonnekte sistem için literatürde Çılgın Parçacık Sürüsü algoritması (Crazy Particle Swarm

Optimization - CrazyPSO) olarak tanımlanan algoritmayı kullanmışlardır [24].

Yine 2009 yılında Nanda ve arkadaşları, benzer bir enterkonnekte sistem modeli üzerinde kazançları, Bakteriyel Gelişim algoritması ile güncellenen bir PI-kontrolör kullanmışlardır. Çalışmalarında, üç kontrol alanına sahip bir enterkonnekte sistem modeli kullanmışlar, sonuçlarını farklı yük ve parametre değişimleri için genetik algoritmalar ve klasik yöntemlerle karşılaştırmışlardır [25].

2010 yılında Gözde ve arkadaşları, bir enterkonnekte sistemde yük-frekans kontrolü için tasarladıkları PI-kontrolörün kazançlarını güncellemek için kullandıkları Parçacık Sürüşü algoritmasında farklı bir maliyet fonksiyonu önererek sistem performansını arttırmışlardır [26].

Bu tez çalışması ile Yapay Arı Kolonisi optimizasyon algoritması enterkonnekte güç sisteminin yük-frekans kontrolüne ilk kez uygulanmış; algoritmanın yük-frekans kontrol performansına ve sistem dayanıklılığına etkisi literatür ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

2. ENTERKONNEKTE ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMİ

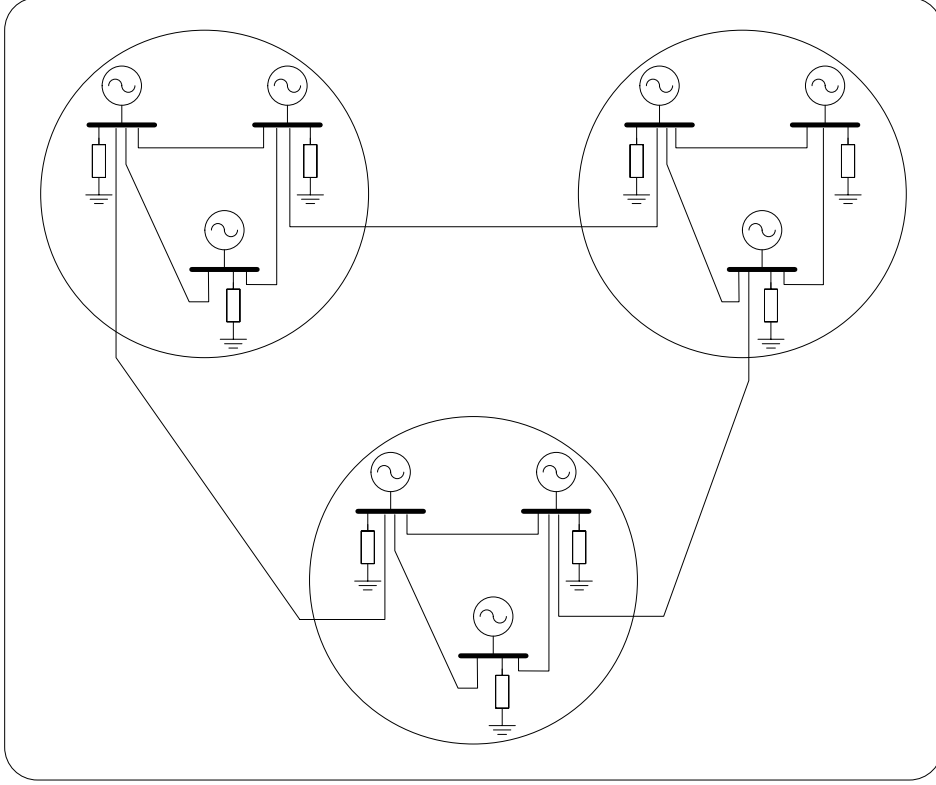
Bu bölümde; enterkonnekte elektrik güç sistemleri ile Türkiye enterkonnekte sistemi hakkında bilgi verilmiştir.

2.1. Enterkonnekte Elektrik Güç Sistemi

Elektrik enerjisi; üretim noktasından tüketiciye kadar nispeten hızlı, kolay ve ekonomik taşınabilmesi ve kolay kullanılabilir olması gibi nedenlerle, dünyanın en çok kullanılan enerji kaynaklarından birisi konumundadır. Günümüzde elektrik enerjisi, tüketiciye büyük güç sistemleri üzerinden ulaştırılır. Elektrik güç sistemlerinin görevi, anma uç gerilimine ve sistem frekansına sahip elektrik enerjisini ekonomik olarak üretmek, taşımak ve dağıtmaktır. Bu sistemler genel olarak, birbirlerine bağlı üretim üniteleri ile iletim ve dağıtım şebekelerinden oluşur. İletim şebekesi, elektrik enerjisinin üretim noktasından tüketim bölgesine kadar taşınması ile ilgili orta ve yüksek gerilim hatlarının tesisi ve işletilmesini sağlarken; dağıtım şebekesi, iletim şebekesinden son kullanıcıya kadar olan alçak gerilim hatlarının tesisi ve işletilmesini sağlar. Üretim ünitesinin görevi ise değerleri standartlarla belirlenmiş sabit ve kararlı anma frekansına ve uç gerilimine sahip elektrik enerjisini ekonomik olarak ve çevreye zarar vermeksizin üretmektir [27].

Frekansın anma değerinde sabit ve kararlı tutulması elektrik güç sistemlerinin ana problemlerinden birisidir. Frekansın değeri asıl olarak şebekede üretilen ve tüketilen aktif güçlerin dengesine bağlıdır. Tüketilen gücün üretilen güce göre artması ya da azalması, jeneratörlerin dönüş hızının, diğer deyişle sistem frekansının değişmesine neden olur. Güç sistemleri, genel olarak kendi tüketimlerini yani kendi yüklerini kendi üretim üniteleri ile karşılayabilecek şekilde tasarlanırlar. Tüketim arttığında üretim üniteleri de rezervlerini kullanarak üretimlerini arttırırlar. Bununla beraber, komşu güç sistemleri, birbirlerine bağlı çalışarak sistemde tüketilen aktif gücü paylaşabilir ve bu sayede, ünite başına fazladan üretilmesi gereken enerji miktarını düşürerek, frekansın yük değişiminden daha az etkilenmesini sağlayabilirler. Komşu güç sistemlerinin yükü paylaşıp ortak bir frekans referansı oluşturarak daha kararlı,

güvenilir ve sabit bir sistem frekansı elde edebilmek için birbirlerine bağlı çalıştığı böyle şebekelere enterkonnekte güç sistemi adı verilir (Şekil 2.1). Enterkonnekte sistemde frekansın değeri sistemin her yerinde aynıdır.



Şekil 2.1. Enterkonnekte güç sistemi.

Genel olarak, her ülkenin kendi tüketicilerini beslediği bir enterkonnekte güç sistemi vardır ve bu sistemler aynı zamanda komşu ülkelerin enterkonnekte sistemlerine de bağlanabilir. Enterkonnekte sistem içinde, birbirleriyle uyumlu ve senkron çalışan üretim ünitelerinin ve bunların beslediği tüketicilerin oluşturduğu bölgeye kontrol alanı denir. Bir kontrol alanında, tüm üretim üniteleri aynı regülasyon parametrelerine ve yaklaşık olarak aynı cevap karakteristiklerine sahiptir. Örneğin, enterkonnekte sistemde bir yük talebi olduğunda, anma frekansı bir kontrol alanının her yerinde aynı miktarda sapma gösterecek, ancak farklı iki kontrol alanında sistem parametrelerine bağlı olarak farklı miktarlarda frekans sapması gözlenecektir. Kontrol alanları, fiziksel olarak bir ülke ya da ülke içinde bir coğrafi bölge olabilir ve birbirlerine, nispeten daha küçük güç kapasitesine sahip ara-bağlantı hatları ile

Kontrol
Alanı -

bağlanırlar. Kontrol alanlarının ara-bağlantı hatları ile birbirlerine bağlanması, ülke içinde ya da ülkeler arası enterkonnekte sistemde frekans kontrolünü ortak bir problem haline getirir [2, 4].

Kontrol alanları arasında ara-bağlantı hatları ile yapılan yük paylaşımı esnasında, kontrol alanlarının kapasiteleriyle orantılı bir güç alışverişi gerçekleşir. Ara-bağlantı hatları üzerinde oluşan bu alış verişin MW sınırları, ülkeler arasında yapılan anlaşmalarla belirlenir. Enterkonnekte sistemde, bu gücün anlaşmalara bağlı değerlerinde tutulması da ayrı bir kontrol problemini oluşturur. Bu kontrolleri gerçekleştirmek amacıyla enterkonnekte sisteme, SCADA sistemi üzerinden merkezi olarak gerçekleştirilen yük-frekans kontrolü ile üretim ünitelerinde yerel olarak gerçekleştirilen otomatik gerilim kontrolü gibi bir takım kontrol mekanizmaları uygulanır [2-4].

Enterkonnekte çalışmanın avantajları aşağıda belirtildiği gibi sayılabilir;

- Kontrol alanları arasında yardımlaşmalı yük paylaşımı yapılır. Her kontrol alanı sistem yükünü, yük-frekans kontrolü sayesinde kendi üretim kapasitesiyle orantılı olarak paylaşır.
- Kontrol alanının kapasitesinin üzerinde bir yük talebi dahi, ortak yardımlaşma sayesinde enterkonnekte sistem tarafından karşılanabilir.
- Büyük üretim ünitelerinin ekonomik kullanımı ile üretim maliyeti düşürülebilir.
- Enterkonnekte sistemde tüm üretim üniteleri büyük küçük ayrımı yapılmaksızın şebekeye bağlanarak grid yapı kurulur. Böylece bir bölgeyi besleyen bir üretim ünitesi devre dışı kaldığında, tüketiciler enerjilerini komşu üretim ünitelerinden almaya devam edebilirler ya da elektrik enerjisi yalnızca o bölgede kesintiye uğrar.

- Üretim ünitelerinin kontrol rezerv güçleri düşük tutulabilir. Enterkonnekte sisteme bağlı üretim ünitelerinin sayısı ve kapasiteleri arttıkça, ani yük talebi karşısında sistem frekansının kontrol edilebilmesi için üretim üniteleri tarafından şebekeye aktarılmak üzere tutulması gereken rezerv güç miktarı da azalır.

Yukarıda da belirtildiği gibi enterkonnekte çalışmanın temel amacı, sistemdeki güç dengesinin sağlanması için kontrol alanları arasındaki yardımlaşmayı gerçekleştirmektir. Bu sayede, enterkonnekte güç sistemlerinde, anma frekansının yük değişiminden daha az etkilenmesi sağlanarak tüketiciye kesintisiz ve daha kaliteli elektrik enerjisi sunulabilmektedir.

2.2. Türkiye Enterkonnekte Elektrik Güç Sistemi

Ülkemizde enterkonnekte sistemin temel taşı, 1902 yılında Tarsus'ta ilk elektrik üretim tesisinin kuruluşu ile başlamıştır. Tarsus Bentbaşı mevkiinde kurulu bir su değirmenine bağlı 2 kW gücünde bir dinamo ile elektrik enerjisi üretilerek 1800 m mesafedeki şehir merkezine sokak aydınlatması sağlanabilmiştir. İlk elektrik santrali ise 1914 yılında İstanbul'da kurulan ve toplam gücü 13400 kW olan Silahtar santralidir. Bununla birlikte, Türkiye'de bir elektrik şebekesinin tesisi ile ilgili asıl çalışmalar cumhuriyet dönemiyle başlamıştır. 1924 yılında Ankara'da Bentderesi mevkiinde ve 1928 yılında İzmir'de Darağacı mevkiinde ilk büyük santraller kurulmuştur.

1952 yılında, 60 MW kurulu güce sahip Çatalağzı santrali kurulmuş ve aynı dönemde Silahtar santralinin kurulu gücü 70 MW'a yükseltilmiştir. Bu iki santral 66 ve 154 kV ara-bağlantı hatları ile paralel bağlanmış ancak yük tevziinin temel işlevleri olan santraller arası yük paylaşımı ile gerilim ve frekans ayarlanması gibi teknik sebepler nedeniyle 1953 yılında tekrar ayrılmıştır. 1956 yılında işletmeye geçirilen Tunçbilek santrali ile Çatalağzı ve Silahtar santralleri paralel bağlanmış, yük tevzi işletmeciliğini ise Ümraniye trafo merkezi üstlenmiştir. Ardından aynı yıl Adapazarı'nda Kuzey Batı Anadolu Yük Tevzi Merkezi tesis edilmiştir. 1957 yılında

Soma santralinin devreye girmesiyle Soma ve Darağacı santralleri paralel bağlanmış ve Batı Anadolu'daki ilk yük tevzi merkezi Bornova trafo merkezinde kurulmuştur. 1958 yılında Kemer ve 1960 yılında Demirköprü santrallerinin devreye girmesinden sonra, paralel çalışan 4 santral ve 7 adet 154 kV'lık trafo merkezi ile Batı Anadolu şebekesi meydana getirilmiştir. 1960 yılında ise Bornova'da bulunan Batı Anadolu Yük Tevzi Merkezi Soma'ya taşınmıştır. Kuzey Batı Anadolu ve Batı Anadolu Yük Tevzi Merkezleri 1963 yılına kadar birbirinden bağımsız çalışmış, 1963 yılında kurulan 154 kV'luk Göbel – Bursa ara-bağlantı hattı ile Kuzey Batı Anadolu ve Batı Anadolu şebekeleri birleştirilmiştir. Her iki şebekenin yük tevzi görevi Kuzey Batı Anadolu Yük Tevzi Merkezine devredilmiştir. Kuzey Batı Anadolu Yük Tevzi Merkezi bugünkü anlamda ilk Milli Yük Tevzi Merkezi olmuştur. Batı Anadolu Yük Tevzi Merkezi 1976 yılında İzmir Işıkkent'e taşınmıştır.

1959 yılında Hirfanlı'da Orta Anadolu Yük Tevzi Merkezi kurulmuştur. Bu merkez 1988 yılında Gölbaşı'na taşınmıştır. 1971 yılında Adana Seyhan'da Çukurova Elektrik A.Ş. Yük Tevzi Merkezi kurulmuş, ardından 1972 yılında Samsun'da Kuzey Doğu Anadolu Yük Tevzi Merkezi kurulmuştur. Bu merkez de 1985 yılında Çarşamba'ya, 2005 yılında ise tekrar Samsun'a nakledilmiştir. 1974 yılında Keban'da Güney Doğu Anadolu Yük Tevzi Merkezi kurulmuştur. 1984 yılında ise Gölbaşı'nda Ulusal Yük Tevzi Merkezi kurulmuş ve o güne kadar Kuzey Batı Anadolu Yük Tevzi Merkezi tarafından yürütülen ulusal yük tevzi merkezi işlevini devralmıştır. Bundan sonra ise 2002 yılında İstanbul İkitelli'de Trakya Yük Tevzi Merkezi, 2004 yılında Erzurum'da Doğu Anadolu Yük Tevzi Merkezi ve 2004 yılında Antalya'da Kepez Yük Tevzi Merkezleri kurulmuştur [28].

Ülkemizde halen toplam kurulu gücü 41041 MW, yıllık toplam üretim kapasitesi⁴ 228 milyar kWh ve 2008 yılı verilerine göre toplam puant yükü 29297,6 MW olan 400 kadar santral vardır ve bu santraller Türkiye enterkonnekte güç sistemini oluşturmak üzere birbirlerine paralel bağlanmıştır. Oluşturulan enterkonnekte sistem, bir adet Milli Yük Tevzi Merkezi (Gölbaşı) ve dokuz adet Bölgesel Yük Tevzi

⁴ TEİAŞ-2008 verilerine göre yıllık 7000 saatlik çalışma süresi için hesaplanmıştır.

Merkezi (Adapazarı, Çarşamba, Keban, İzmir, Gölbaşı, İkitelli, Erzurum, Çukurova ve Kepez) ile izlenip yönetilmektedir. Sistemin işletilmesi, 380 kV trafo merkezlerini ve 50 MW'ın üzerindeki tüm santralleri kapsayan bir SCADA ve Enerji İşletim Sistemi Programı ile yapılmaktadır. Bu sayede sistem işleticisi, gerekli olan her türlü sistem çalışmasını, günlük işletme programlarını ve yük frekans kontrolünü otomatik olarak gerçekleştirebilmektedir. Toplam kurulu gücün enerji kaynaklarına göre ayrımı Çizelge 2.1'de gösterilmiştir [28].

Çizelge 2.1. Türkiye enterkonnekte güç sisteminde toplam kurulu gücün enerji kaynaklarına göre dağılımı⁵.

<i>Enerji Kaynağı</i>	<i>Kurulu güç</i>
Termik	27357 MW
Hidrolik	13444 MW
Rüzgar	239 MW
<i>Toplam</i>	41041 MW

Ülkemizin enterkonnekte sistemi halen tüm komşu ülkelerin sistemleri ile bağlantı kurmuş durumdadır. Bulgaristan, Yunanistan, Suriye, Irak ve İran ile 380 kV, Gürcistan ve Ermenistan ile 220 kV ve Azerbaycan ile 154 kV ara-bağlantı hatları mevcuttur. Bununla birlikte, Türkiye'nin Avrupa enterkonnekte sistemine bağlanması için de çalışmalar, Avrupa enterkonnekte sisteminin genişletilmesinden sorumlu kuruluş olan Avrupa Elektrik İletimi Koordinasyon Birliği (UCTE) ile 28 Eylül 2005 tarihinde başlatılmıştır. Amacı 22 Avrupa ülkesi arasında kurulu olan Avrupa enterkonnekte sisteminin, güvenilir bir şekilde planlanması, işletilmesi ve tüketicilere kaliteli, yeterli ve ucuz elektrik enerjisi sağlanması olan; bu amaçla da farklı güç sistemlerinin senkronize bir şekilde işletilmesini sağlayan UCTE, Avrupa enterkonnekte sistemi üzerinden 500 milyondan fazla insana elektrik enerjisi sağlamaktadır. UCTE sisteminin, 2008 yılı verilerine göre toplam kurulu gücü 640 GW, elektrik enerjisi üretimi 2600 TWh ve tüketimi 2586,6 TWh'tir. Yaklaşık puant yükü 400 GW'tır. Bu sisteme bağlanmasıyla birlikte; Türkiye elektrik üretiminin, Avrupa enterkonnekte sistemi ile yük paylaşımı yaparak gelecekteki puant yük

⁵ TEİAŞ – 2008 verilerine göre düzenlenmiştir.

talebini daha rahat karşılamasının yanında, enerji tedarikçisi olarak Avrupa pazarına açılması ile önemli ticari kazanımlar da sağlanmış olacaktır [29].

Bununla birlikte Türkiye enterkonnekte sisteminin, Avrupa enterkonnekte sistemine bağlanması için UCTE tarafından belirlenmiş bazı kriterlerin karşılanması gerekmektedir. Bu kriterler, 22 Ocak 2003 tarihinde yeniden düzenlenerek uygulanmaya başlanan Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği ile üretim üniteleri için yasal yükümlülük haline getirilmiştir. Bu kriterlerin en önemlilerinden birisi güç sisteminin anma frekansının kontrolüdür ve ülkemizde buna yönelik olarak ikincil kontrol içeren yük-frekans kontrolü yalnızca Atatürk, Keban ve Karakaya gibi büyük hidroelektrik santrallerinde uygulanmaktadır. Bununla beraber, Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği ile [30];

“Sistemin anma frekansı, TEİAŞ tarafından 50 Hz etrafında ve 49,8 - 50,2 Hz aralığında kontrol edilir.”

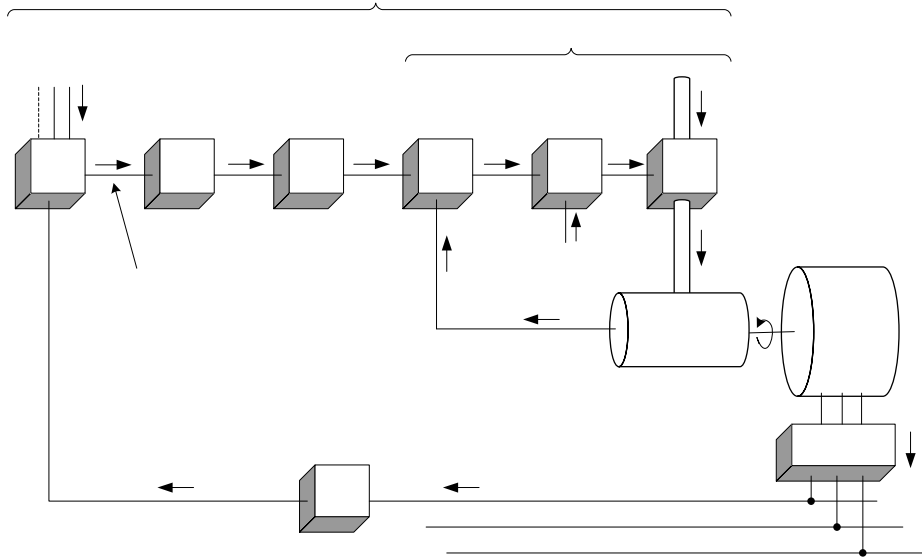
denilmektedir ve bu amaçla,

“50 MW ve üzerinde ünite gücüne veya toplam 100 MW ve üzerinde kurulu güce sahip üretim tesisleri zorunlu yan hizmetler anlaşması kapsamında birincil frekans kontrolüne katılmakla yükümlüdürler. Bu tesisler ile ayrıca, ticari yan hizmetler anlaşması kapsamında da ikincil frekans kontrolü yapılır.”

yükümlülüğü getirilmiştir. Ülkemizde, uygun olan tüm santraller için bu hüküm yerine getirildiğinde, enterkonnekte sisteme bağlı daha fazla üretim ünitesi yük-frekans kontrolüne katılacak ve enterkonnekte çalışmanın sunduğu yardımlaşma sayesinde ani yük değişimlerinde oluşan frekans sapmaları UCTE tarafından belirlenen değerlerde tutularak tüketiciye daha kaliteli elektrik enerjisi sunulabilecektir. Bu nedenle yük-frekans kontrolü üzerine yapılan akademik çalışmalar, ülkemiz için Avrupa enterkonnekte sistemine bağlanma çalışmaları kapsamında büyük önem arz etmektedir.

3. ENTERKONNEKTE SİSTEMDE YÜK-FREKANS KONTROLÜ

Elektrik güç sisteminde toplam yükün büyük bir çoğunluğunu AC motorlar, elektrikli saatler ve sayaçlar, test ve ölçüm cihazları gibi sistem frekansına bağımlı yükler oluşturur. Bu yüklerin hatasız çalışabilmesi için sistem frekansının anma değerinde sabit tutulması gerekir. Güç sisteminde frekansın değeri, sistemde üretilen ve tüketilen aktif güçlerin dengesine bağlıdır. Tüketilen aktif güç arttığında ya da azaldığında, üretim miktarının sistemdeki güç dengesini yeniden sağlayacak şekilde ayarlanması gerekir.



Şekil 3.1. Güç sisteminde yük-frekans kontrolü çevrimleri [4].

Bununla beraber, sistemin aktif güç dengesinin yeniden kurulması, anma değerinden sapan frekansın asıl değerine geri gelmesi için yeterli olmaz ve bu durumun da ayrıca ele alınması gerekir. Güç sistemlerinde, yük değişimi sonucunda bozulan aktif güç dengesini yeniden kurmak ve anma değerinden sapan sistem frekansının hatasını minimize etmek amacıyla elektrik güç sistemlerine uygulanan otomatik kontrol yöntemine yük-frekans kontrolü adı verilir [4].

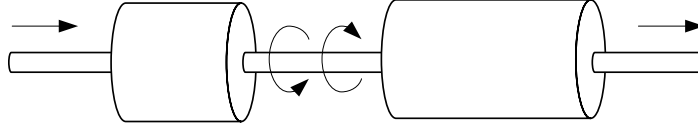
Yük-frekans kontrolü, yukarıda belirtilen kontrol işlemlerini gerçekleştirebilmek amacıyla üç farklı kontrol çevrimi içerir. Bunlar birincil, ikincil ve üçüncül kontrol çevrimleridir. Birincil kontrol çevrimi, yük değişimi sonucunda bozulan aktif güç dengesini ilk anda yeniden sağlamak ve sistem frekansının değişimini durdurmak için üretim miktarını ayarlar ve frekansı belli bir değerde sabit tutar. Ancak frekansta meydana gelen sürekli durum hatasını yok edemez. İkincil kontrolün görevi ise genel olarak, frekans üzerindeki bu hatayı yok edecek otomatik kontrol işlemini yerine getirmektir. Ayrıca ikincil kontrol ile kontrol alanları arasındaki ara-bağlantı hatları üzerinde yapılan güç alış veriş de kontrol edilir. Birincil ve ikincil kontrol çevrimleri Şekil 3.1’de gösterildiği gibi üretim ünitelerinde otomatik olarak gerçekleştirilir [2, 4]. Üçüncül kontrol ise ikincil kontrolün yetersiz kalması durumunda sözlü talimat ile gerçekleştirilen, kontrollü yük atma gibi önlemleri içerir. Aşağıdaki bölümlerde, yük-frekans kontrolünün gerekliliği ve kontrol çevrimleri detaylı olarak açıklanmıştır.

3.1. Yük-Frekans Kontrolünün Önemi

Elektrik enerjisi, santrallerde senkron jeneratörler ile üretilir ve tüketim bölgesine iletim hatları ile ışık hızında iletilir. Üretildiği haliyle sistemin herhangi bir yerinde depolanamaz. Bu nedenle güç sisteminde, üretilen enerji miktarı her zaman tüketilen enerji miktarına eşit olmalıdır. Bu denge değiştiğinde, ortaya çıkan enerji farkı sistemdeki senkron jeneratörlerin hava aralıklarında depolanan kinetik enerjiye eklenir ya da çıkarılır.

Bununla beraber, bir jeneratörün kinetik enerjisi, rotor milinin dönüş hızı ile ilişkili olduğundan, jeneratörün kinetik enerjisinin değişimi rotor milinin dönüş hızında yani sistem frekansında da değişime neden olur. Jeneratörün rotor milinin dönüşünü, bağlı olduğu türbin sağlar. Türbin, gerekli olan mekanik enerjiyi su, buhar ya da doğalgaz gibi enerji kaynaklarından sağlayabilir. Türbinin, jeneratörün rotor miline uyguladığı T_m mekanik momenti, jeneratörde rotor ve stator manyetik alanlarının etkileşimi ile yükü karşılayan T_e elektriksel momentine çevrilir (Şekil 3.2) [4]. Rotor mili üzerinde oluşan toplam moment Eş. 3.1’de gösterilmiştir.

$$T_m - T_e = J \frac{dw}{dt} \quad (3.1)$$



Şekil 3.2 Elektrik üretim ünitesinin blok gösterimi.

Eşitlikte J jeneratörün eylemsizlik momentini, w ise rotor milinin mekanik hızını ifade etmektedir. Sürekli durumda sabit dönüş hızında, mekanik hızın değişim hızı sıfır olacağından eşitliğin sağ tarafı yani mekanik ve elektriksel momentlerin farkı da sıfır olur. Diğer deyişle türbinin jeneratöre uyguladığı mekanik moment ile jeneratör tarafından oluşturulan elektriksel moment birbirine eşit olur. Kinetik enerjinin değişiminden dolayı rotor milinin hızı değiştiğinde, momentler arasında bir fark meydana gelir [31]. Bu durum ve frekansta oluşturduğu etki Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Mekanik hızın değişimine göre momentler arasındaki farkın ve sistem frekansının değişimi.

<i>Mekanik Hızın Değişimi</i>	<i>Mekanik ve Elektriksel Momentler Arasındaki Fark</i>	<i>Sistem Frekansının Değişimi</i>
-	$T_m = T_e$	Sabit
Pozitif	$T_m > T_e$	Artar
Negatif	$T_m < T_e$	Azalır

Eğer rotor milinin mekanik hızının değişimi pozitif ise yani mekanik hız artıyor ise mekanik moment elektriksel momentten büyük demektir. Bu durumda sistem frekansı artar. Eğer rotor milinin mekanik hızının değişimi negatif ise yani mekanik hız azalıyor ise elektriksel moment mekanik momentten büyük demektir. Bu durumda da sistem frekansı azalır. Çizelge 3.1’den de görüldüğü gibi sistem frekansının değişmemesi için mekanik ve elektriksel momentler arasındaki farkın

Türbin

Mekanik
enerji

sıfır olması yani momentlerin birbirine eşit olması gerekmektedir. Her iki momentin mekanik hız ile çarpımı türbin tarafından jeneratöre girilen P_m gücünü ve jeneratör tarafından yüke aktarılan P_e gücünü verir. Bu durum Eş. 3.2’de ve Eş. 3.3’de gösterilmiştir.

$$T_m \cdot \omega = T_e \cdot \omega \quad (3.2)$$

$$P_m = P_e \quad (3.3)$$

Sonuç olarak, frekansın değişmemesi için P_m ve P_e aktif güçlerinin yani üretilen ve tüketilen aktif güçlerin birbirine eşit olması gerekir. Sistemin, eşitlik durumunda ürettiği frekans anma frekansıdır. Bu nedenle frekans, normal işletme koşullarında⁶ çalışan bir güç sisteminin ilk göstergesi olarak değerlendirilir. Aktif güçlerde yük değişiminden dolayı oluşan fark sistem frekansı izlenerek algılanır ve aktif güçlerin yeniden dengeye getirilmesi için gerekli olan yük-frekans kontrolü çevrimleri işletilir. Gerçekte, yük artışı nedeniyle şebeke frekansının düşmesine sebep olan enerji farkı, yukarıda da belirtildiği gibi ilk birkaç milisaniye içinde güç sisteminde depo edilen kinetik enerjiden sağlanır. Frekansta meydana gelen sapmanın algılanabilir seviyeye gelmesinin ardından ise yük-frekans kontrolü çevrimleri devreye girer.

3.2. Birincil Kontrol

Birincil kontrol, sistemdeki aktif güç dengesi bozulduğunda saptmaya uğrayan sistem frekansının değişimini mümkün olan en kısa zamanda durdurarak belli bir değerde sabit tutmak için üretim ünitesinin rezerv kapasitesini, hız governorunun düşüm karakteristiği oranında sisteme aktaran kontrol mekanizmasıdır⁷. Amacı, temel olarak

⁶ Normal işletme koşulu, 2009 yılı tarihli Elektrik Piyasası Yan Hizmetler Yönetmeliğinde gerilim, frekans ve hat akışlarının belirlenen sınırlar içinde olduğu, yük taleplerinin karşılandığı, yan hizmetlerin sağlandığı ve sistemin kararlı bir şekilde çalıştığı işletme koşulu olarak tanımlanmıştır.

⁷ Birincil kontrol, 2009 yılı tarihli Elektrik Piyasası Yan Hizmetler Yönetmeliğinde, sistem frekansının düşmesine veya yükselmesine tepki olarak ünite aktif güç çıkışının hız regülatörü ile

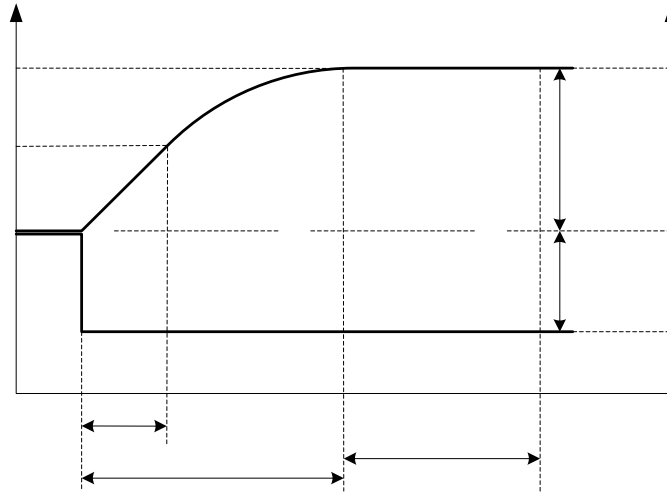
enterkonnekte güç sisteminde üretilen aktif güç ile tüketilen aktif güç arasındaki dengeyi korumaktır. Birincil kontrol, sisteme bağlı üretim ünitelerinde yerel olarak gerçekleştirilir.

Birincil kontrolde, frekansın değişimi hız governoru ile algılanır (Bkz. Şekil 3.1). Hız governoru ile türbin milinin mekanik hızı sürekli takip edilerek, sapma durumunda hidrolik yükselteci harekete geçiren ΔP_g komutu üretilir. Hidrolik yükselteç, türbin vanasının konumunu değiştirmek için gerekli mekanik gücü elde eder. Bu sayede, türbine giren ve milin dönmesini sağlayan buhar ya da su miktarı kontrol edilir [2, 4].

Birincil kontrole katılan üretim üniteleri, türbin vanasının konumuna bağlı olarak kapasiteleriyle orantılı bir miktar gücü rezerv güç olarak tutarlar. Bu güce, birincil kontrol rezerv kapasitesi adı verilir. TEİAŞ'ın 2006 yılında yaptığı düzenlemeye göre birincil kontrole katılması gereken hidroelektrik santraller kapasitelerinin %10'unu, termik santraller ise kapasitelerinin %5'ini birincil kontrol rezerv kapasitesi olarak ayırmakla yükümlüdür. Yük talebi durumunda, bu rezerv kapasite birincil kontrol mekanizması ile mümkün olan en kısa sürede sisteme aktarılır. UCTE kriterlerine göre birincil kontrole katılan ünitelerin tepki süresi, hidroelektrik santraller için 4 s'yi ve diğer santraller için 2 s'yi aşmamalıdır.

Birincil kontrol yapan üniteler sistem frekansındaki sapmayı izleyerek, frekansın $\pm 0,02$ Hz düşmesi durumunda, en fazla 15 sn. içinde üretim ünitesine ait birincil kontrol rezerv kapasitesinin %50'sini, 30 sn. içerisinde de tamamını sisteme aktarabilmeli ve bu işlemi en az 15 dakika süre ile devam ettirebilmelidir (Şekil 3.3). Frekansın aynı miktarda yükselmesi durumunda ise ünitenin çıkış gücü aynı sürede ve miktarda düşürülebilmelidir [30]. Şekil 3.3'te Δf frekans sapmasını, RP_{maks} birincil kontrol rezerv güç miktarını ve P_{set} ünitenin ayarlanmış çıkış gücünü göstermektedir. Birincil kontrolde, frekansın sapmasına göre rezerv gücün ne kadarlık bir kısmının sisteme aktarılacağı, governorun Şekil 3.3'te belirtilen düşüm karakteristiği ile belirlenir.

otomatik artırılması veya düşürülmesi yoluyla sistem frekansının yeni bir denge noktasına getirilmesi olarak tanımlanır.

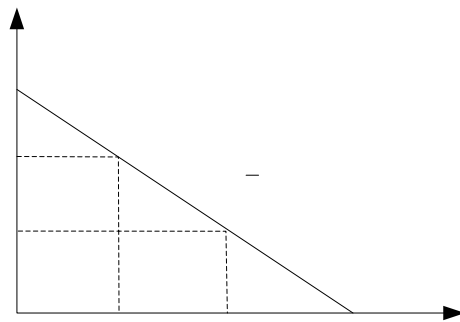


Şekil 3.3. Birincil kontrol rezerv kapasitesinin sisteme aktarılması.

$P \text{ (MW)}$

Düşüm karakteristiğinin eğimi R regülasyon sabitini tanımlar. Regülasyon sabiti, sistem frekansının değişimi için türbin vanasının konumunun ya da türbin çıkış gücünün ne kadar değişeceğini belirleyen bir yüzde değerdir (Eş. 3.4). Örneğin %4'lük regülasyonun anlamı, sistem frekansının %4'lük değişiminde vananın konumunun ya da türbin güç çıkışının %100 değişeceğidir.

$$P_{\text{set}} + RP_{\text{maks}}$$



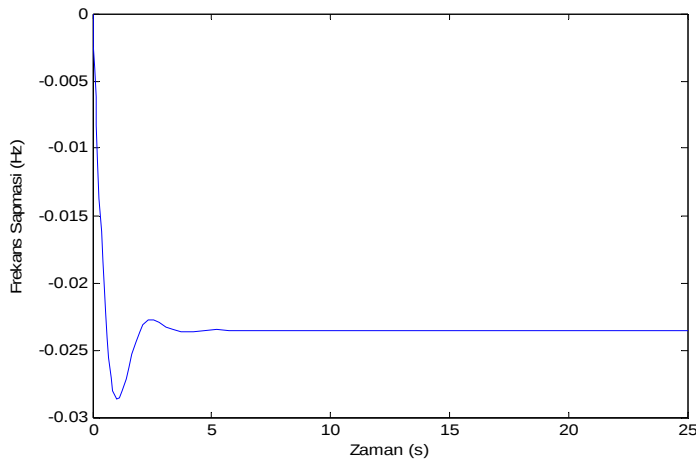
$$P_{\text{set}} + \%50.RP_{\text{maks}}$$

$$P_{\text{set}}$$

Şekil 3.4. Governor düşüm karakteristiği.

$$\% \text{Regülasyon} = \frac{\text{Frekans}_{\text{değişiminin}}_{\text{yüzde_değeri}}}{\text{Güç}_{\text{çıkışı}_{\text{değişiminin}}_{\text{yüzde_değeri}}} \cdot 100 \quad (3.4)$$

Birincil kontrolün sonunda, sistemdeki aktif güç dengesi yeniden sağlanır, ancak frekans yeniden anma değerine getirilemez. Örneğin Şekil 3.4’de, üretim ünitesinin P_0 p.u.MW çıkış gücü için sistem frekansı f_0 p.u.Hz anma değerindedir. Çıkış gücü P_1 p.u.MW’a çıktığında, frekans regülasyon sabitine bağlı olarak f_1 p.u.Hz’e düşmektedir.



Şekil 3.5. Birincil kontrol sonucunda sistem frekansında meydana gelen sürekli durum hatası.

Sonuçta, sistem frekansında Şekil 3.5’de da gösterilen $f_0 - f_1$ p.u.Hz’lik bir sürekli durum hatası oluşmaktadır. Bu nedenle birincil kontrol sonunda, frekansı yeniden anma değerine getirecek bir ikincil kontrol mekanizmasına ihtiyaç duyulur.

3.3. İkincil Kontrol

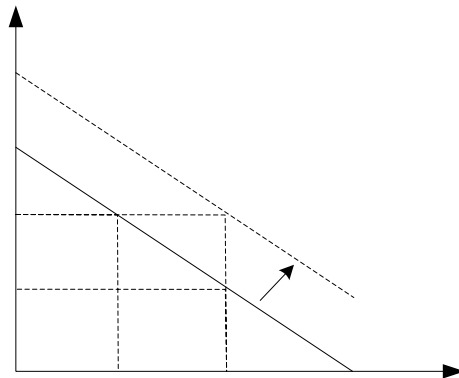
İkincil kontrol, birincil kontrol sonunda frekansta oluşan sürekli durum hatasını minimize eden kontrol çevrimidir⁸. Enterkonnekte sistemde, SCADA sistemi üzerinden merkezi olarak işletilir. UCTE kriterlerine göre ikincil kontrol çevrimi, frekans sapmasına en fazla 30 s. içinde tepki vermeli ve sapmayı en fazla 15 dk.

⁸ İkincil kontrol, 2009 yılı tarihli Elektrik Piyasası Yan Hizmetler Yönetmeliğinde, bu kontrole katılan üretim tesislerinin aktif güç çıkışının, MYTM’den otomatik olarak gönderilen sinyaller ile artırılarak veya düşürülerek sistem frekansının anma değerine ve komşu elektrik şebekeleriyle olan toplam elektrik enerjisi alış verişinin programlanan değerine getirilmesi olarak tanımlanır.

içinde sıfıra indirgeyebilmelidir. İkincil kontrol, aşağıda belirtilen üç görevi yerine getirir [2, 4];

- Kontrol alanları arasında, ara-bağlantı hatları üzerinden yapılan güç alış verişini anlaşmalara bağlı değerinde tutar.
- Sistem frekansında sapma olması durumunda, frekansı anma değerine geri getirir.
- Birincil kontrol rezerv kapasitesinin yeniden kullanıma hazır duruma getirilmesini sağlar.

İkincil kontrol, temel olarak bir integral kontrol elemanı olarak çalışır. Kontrolöre gelen hata sinyalinin integrali alınarak, sistem çıkışındaki sürekli durum hatası, diğer deyişle sistem frekansının anma değerinden sapması minimize edilir [4]. Kontrolör, governorun girişinde bulunan ve ΔP_{ref} referans gücünün ayarlanmasını sağlayan hız değiştirici motorunu kontrol eder (Bkz. Şekil 3.1). Hız değiştiricinin kontrol edilmesi ile governor üzerinden, frekans anma değerinde iken ünitenin üretmesi gereken aktif güç miktarı yeniden ayarlanır.

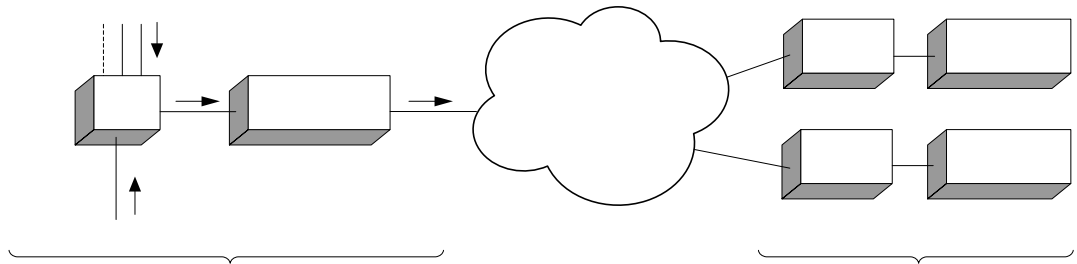


Şekil 3.6. Üretim ünitesinin güç çıkışının yeniden ayarlanması.

Şekil 3.6'da de görüldüğü gibi, sisteme yük talebi geldiğinde; öncelikle birincil kontrol, bu talebi karşılamak için ünite çıkış gücünü arttırarak P_1 p.u.MW yapmış, buna karşılık frekansta $f_1 - f_0$ p.u.Hz kadar bir hata meydana gelmiştir. Ardından ikincil kontrol devreye girmiş ve hız değiştirici ile düşüm karakteristiğinin konumunu kaydırarak ünitenin anma frekansındaki çıkış gücünü P_1 p.u.MW'ta çıkarmıştır. İkincil kontrolün sisteme aktarılabilecek güç miktarını belirlemek için hız değiştirici ile pozitif ve negatif yönde yapabildiği ayar aralığına ikincil kontrol rezerv kapasitesi adı verilmektedir. UCTE kriterlerine göre ikincil kontrole dâhil olan üretim üniteleri, kapasitelerinin %10'u kadar bir ayar aralığını ikincil kontrol rezerv kapasitesi olarak ayırmak zorundadır. İkincil kontrol çevriminde, kontrolör girişinde hata sinyali olarak, Otomatik Üretim Kontrolü tarafından Eş. 3.5'de belirtilen şekilde hesaplanan Alan Kontrol Hatası (AKH) (Area Control Error - ACE) kullanılır [4].

$$AKH = B.\Delta f + \Delta P_{ara} \quad (3.5)$$

Eşitlikte ΔP_{ara} ara-bağlantı hatlarından gelen güçlerin toplamını, B ise ikincil kontrol için frekans kutuplama (Frequency Bias) sabitini ifade etmektedir. Birimi MW/Hz'dir. Sistemde, yük-frekans kontrolü tarafından AKH'nın her kontrol alanı için sürekli kontrol edilerek sıfırda tutulması sağlanır. Bu işlem enterkonnekte sistemde SCADA sistemi üzerinden gerçekleştirilir.



Şekil 3.7. Kontrol sinyallerinin SCADA ile üretim ünitelerine gönderilmesi.

İkincil kontrolörde, kontrol merkezi (Milli Yük Tevzi Merkezi) tarafından hesaplanan AKH kullanılarak, üretim ünitelerinin hız değiştirici motorları için kontrol sinyalleri üretilir. Bu kontrol sinyalleri SCADA sistemi üzerinden üretim ünitelerine gönderilir (Şekil 3.7).

3.4. Ara-Bağlantı Hattı Kontrolü

İkincil kontrolün diğer bir görevi de, kontrol alanları arasında ara-bağlantı hatları üzerinde gerçekleşen güç değişimini anlaşmalarla belirlenmiş değerlerinde tutmaktır. Bu amaçla, kontrol alanına bağlı ara-bağlantı hatları üzerindeki güç değişimi kontrolöre geri beslenerek sürekli kontrol edilir. Böylece ikincil kontrol tarafından, ara-bağlantı hatları üzerindeki istenmeyen güç değişimleri engellenmiş olur [4]. Bu durumu açıklamak amacıyla, parametreleri birbirine eşit iki kontrol alanına sahip bir enterkonnekte sistem olduğu ve bu sistemde, anlaşmalara göre ara-bağlantı hattı üzerinden birinci kontrol alanından ikinciye doğru 100 MW'lık bir gücün aktarıldığı kabul edilsin. İkinci kontrol alanında ani olarak 30 MW'lık bir yük artışı olduğunda, her iki kontrol alanı eşit kapasitelere sahip olduklarından bu yükü eşit olarak paylaşacak ve üretim kapasitelerini 15'er MW arttıracaklardır. Yani birinci kontrol alanından ikinciye fazladan 15 MW güç akışı olacak ve anlaşmalarla belirlenen güç akış sınırı istenmeyen şekilde aşılabacaktır. İşte bu gibi durumlarda, ikincil kontrol ile ara-bağlantı hattından akan gücün belirlenen sınırı aşması engellenir ve her kontrol alanının kendi yük talebini kendisinin karşılaması sağlanmış olur [32].

İkincil kontrol çevrimi, ara-bağlantı hattı kontrolü için kontrol alanının frekans sapması ve ara-bağlantı hattı güç değişimi bilgilerine ihtiyaç duyar. Sistemde bir yük talebi olduğunda, ikincil kontrol bu bilgileri değerlendirerek kontrol alanlarının üretim miktarını uygun şekilde yeniden düzenler. Örnek olarak, iki kontrol alanlı bir enterkonnekte güç sistemi için Çizelge 3.2'de belirtilen dört durum ortaya çıkar. Buna göre; birinci kontrol alanında ΔP_{L1} kadar bir yük talebi olduğunda ikincil kontrol, frekans sapmasının ve ara-bağlantı hattı güç değişiminin durumuna göre sisteme uygulayacağı kontrol davranışına karar verir. Örneğin, sistemde frekansın azaldığı, yani Δf sapmasının negatif olduğu ve ara-bağlantı hattından akan güçte de

ikinci kontrol alanından birinciye doğru bir artış olduğu, yani ΔP_{ara} değişiminin de negatif olduğu varsayılın. Bu durumda kontrolör, kendi yük talebini kendisinin karşılaması için birinci kontrol alanının üretimini arttıracak ve ara-bağlantı hattı güç değişimini sıfırlayacaktır [2, 32].

Çizelge 3.2. İki kontrol alanı içeren enterkonnekte güç sistemi için ara-bağlantı hattı kontrol durumları (ΔP_{ara} , birinci kontrol alanından ikinci doğru akıyor ise pozitif kabul edilmektedir).

Δf	ΔP_{ara}	ΔP_{L1}	ΔP_{L2}	Kontrol Sonucu
-	-	+	0	Birinci kontrol alanının üretimi arttırılır.
+	+	-	0	Birinci kontrol alanının üretimi azaltılır.
-	+	0	+	İkinci kontrol alanının üretimi arttırılır.
+	-	0	-	İkinci kontrol alanının üretimi azaltılır.

3.5. Üçüncül Kontrol

Üçüncül kontrol, ikincil kontrolün ardından veya yetersiz kalması durumunda ikincil kontrolü tamamlamak için sözlü talimat ile gerçekleştirilen önlemleri içerir⁹. Üretim sürecinin ekonomiklik ya da sistem emniyeti yönünden yeniden programlanması ve yeterli ikincil kontrol rezerv gücünün sağlanması amacıyla gerçekleştirilir. Kontrol süresi yeniden programlamanın süresine bağlıdır. Genel olarak enterkonnekte sistem üzerinde ikincil kontrol ile aynı etkiyi gösterir [2].

⁹ Üçüncül kontrol, 2009 yılı tarihli Elektrik Piyasası Yan Hizmetler Yönetmeliğinde, dengeleme birimlerinin 15 dakika içerisinde gerçekleştirebilecekleri çıkış gücü değişimini belirten yük alma, yük atma talimatları ile işletme güvenliği ve sistem bütünlüğü sağlanacak şekilde arz ve talebin gerçek zamanlı olarak dengelenmesi kapsamında dengeleme birimlerinin aktif güç çıkışlarını arttırmaları ya da azaltmaları olarak tanımlanır.

4. ENTERKONNEKTE SİSTEM MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Yük-frekans kontrolü, elektrik güç sistemlerinin normal çalışma durumunda işletilen kontrollerden birisidir. Normal çalışma durumunda sistem parametreleri ve sistem yükü, anma değerlerinin yüzde birkaçı kadar olan nispeten küçük ve yavaş değişimler içerir. Bu durumda, dinamik sistemi tanımlayan diferansiyel denklemler çoğunlukla doğrusal denklemlere dönüşür. Bu nedenle, yük-frekans kontrolü çalışmalarında elektrik güç sistemi elemanlarının doğrusal modelleri kullanılabilir [4]. Aşağıda öncelikle bir elektrik güç sisteminin temel elemanlarına ait doğrusal modeller oluşturulmuş, ardından bu modeller ile tek kontrol alanına sahip güç sistemi modeli ile iki kontrol alanına sahip bir enterkonnekte güç sistemi modeli kurulmuştur. Simülasyon çalışmalarında, enterkonnekte güç sisteminin özelliklerini yansıtan en basit model olması nedeniyle iki kontrol alanına sahip elektrik güç sistemi modeli kullanılmıştır.

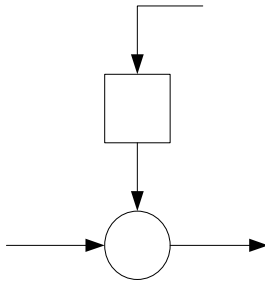
4.1. Hız Governoru Modeli

Hız governoru birincil kontrolün ana elemanıdır. Governor modelini oluşturmak için girişi ve çıkışı arasındaki ilişkiden yararlanılmıştır. Hız governoru, çıkışında türbinin dönüş hızını düzenlemek için ΔP_g komutunu üretir (Bkz. Şekil 3.1). Temel olarak; türbin milinin dönüş hızını yani sistem frekansını algılayan governor ve referans güç girişinin ayarladığı hız değiştirici motor olmak üzere iki temel elemandan oluşur. Buna göre hız governorunun, referans güç değişimi ΔP_{ref} ve türbin milinin dönüş hızının değişimi Δf olmak üzere iki girişi olduğu söylenebilir. Governor çıkışının artışı, referans güç girişinin artışına ve türbinin hızının yani sistem frekansının azalmasına bağlıdır. Bu durum Eş. 4.1 ile gösterilmiştir.

$$\Delta P_g(s) = \Delta P_{ref}(s) - \frac{1}{R} \Delta f(s) \quad (4.1)$$

Hız governorunun Eş. 4.1'e göre elde edilen doğrusal modeli Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

Genel olarak governorun cevap hızının yüksek olması, ölü bandının küçük olması ve türbin milinin hızını tam doğrulukla ölçmesi istenir. UCTE kriterlerine göre hız governorunda, regülasyon sabiti ve ölü bant ayarlanabilir olmalıdır. Governor ölü bandı, governorun frekans değişimine müdahalede bulunmadığı kararlı durum frekans aralığı olarak tanımlanır.

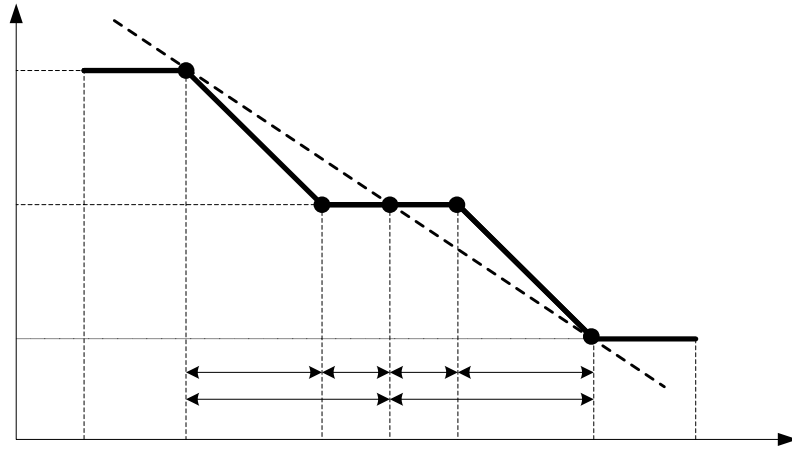


Şekil 4.1. Hız governorunun doğrusal modeli.

Şekil 4.2’de f_0 birincil kontrolün tepki vermediği frekans sapması aralığını, Δf_g ünitenin ölü bölgeden sonra algıladığı frekans sapmasını, Δf toplam frekans sapmasını, RP birincil kontrol rezerv güç miktarını, P_{set} ünitenin ayarlanmış çıkış gücünü ve P_r ünitenin anma çıkış gücünü göstermektedir. Görüldüğü gibi birincil kontrol, ölü bölge içindeki frekans değişimlerine tepki vermemektedir. Ölü bölge düşüm karakteristiklerinde eğim yani regülasyon sabiti hesaplanırken (Bkz. Şekil 3.3) sistem frekansındaki toplam değişim Δf yerine ölü bölgeden sonra algılanan değişim Δf_g alınır. Bu nedenle, enterkonnekte sisteme katılacak ünitelerin birincil kontrol tepki süresinin kısa olması için governor ölü bandının sıfır olması istenir [30]. Günümüzde, merkezkaç etkisi ile çalışan mekanik governorların yerini manyetik problemlerle ölçüm yapan elektro-hidrolik governorlar almıştır [3].

4.2. Hidrolik Yükselteç Modeli

Hız governorunun çıkışı, hidrolik yükselteç elemanının girişini besler. Hidrolik yükselteç, türbin vanasını harekete geçirmek için gerekli olan mekanik kuvveti sağlar.

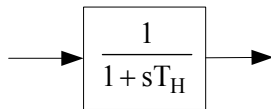


Şekil 4.2. Ölü bölgesi governor düşüm karakteristiği.

Hidrolik yükseltecin doğrusal modeli (Şekil 4.3) Eş. 4.2 ile belirtilen transfer fonksiyonundan elde edilebilir.

$$G_H(s) = \frac{\Delta P_v(s)}{\Delta P_g(s)} = \frac{1}{1 + sT_H} \quad (4.2)$$

Burada ΔP_v hidrolik yükseltecin çıkışındaki değişimi, T_H ise hidrolik silindirlerinin geometrisi ve akış basıncı gibi mekanik parametrelere bağlı ve tipik değeri 0,1 s. olan hidrolik zaman sabitini belirtmektedir [4].

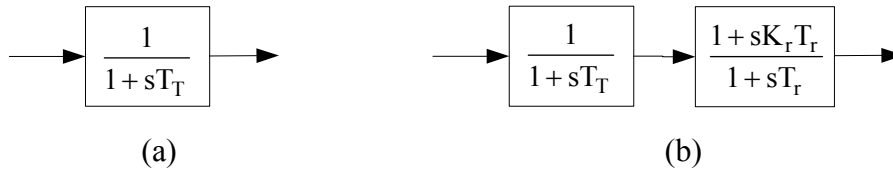


Şekil 4.3. Hidrolik yükseltecin doğrusal modeli.

4.3. Türbin Modeli

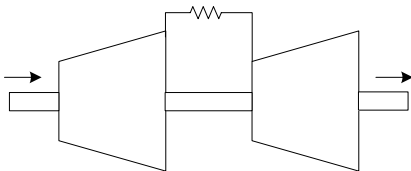
Türbin, elektrik güç sisteminde asıl enerji kaynağını mekanik enerjiye dönüştürerek jeneratör milinin dönmesini sağlayan elemandır. Genel olarak türbinin çıkışında

meydana gelen ΔP_T güç değişimi, vana tertibatı yoluyla türbine aktarılan ΔP_v giriş gücünün değişimine ve türbinin cevap karakteristiğine bağlıdır. Literatürde buhar, su doğal gaz gibi farklı enerji kaynakları için farklı türbin modelleri mevcuttur. Şekil 4.4.a'da en basit türbin modeli olarak ara-ısıtmasız buhar türbinine ait ve Şekil 4.4.b'de ise tez çalışmasında kullanılan ara-ısıtmalı buhar türbinine ait doğrusal modeller gösterilmiştir [33].



Şekil 4.4. Buhar türbinlerine ait doğrusal modeller, (a) Ara-ısıtmasız buhar türbinine ait doğrusal model, (b) Ara-ısıtmalı buhar türbinine ait doğrusal model.

Şekil 4.4.a'da ve b'de belirtilen modellerde T_T parametresi, tipik değeri birkaç saniye olan türbin zaman sabitidir ve buharın türbin vanasından geçiş zamanını tanımlar. Şekil 4.4.b'de belirtilen T_r ve K_r parametreleri ise ara-ısıtma zaman sabiti ile ara-ısıtma kazançlarıdır ve tipik değerleri sırasıyla 10 s. ve 0,3'tür. Ara-ısıtmalı türbin, türbinin verimini arttırmak üzere iki veya daha fazla türbin katları arasında ara-ısıtıcılar içerir (Şekil 4.5). Buhar, türbin katlarından geçerken bu ısıtıcılarda ısıtılarak yeniden enerjilendirilir. Bu nedenle ara-ısıtıcılı buhar türbinleri genel olarak yüksek verim gerektiren büyük santrallerde kullanılmaktadır.



Şekil 4.5. Ara-ısıtıcılı türbinin şematik gösterimi.

4.4. Kontrol Alanı Modeli

Enterkonnekte sistemde kontrol alanının modellenmesi için de girişi ve çıkışı

$$\Delta P_v$$

arasındaki ilişkiden yararlanılmıştır. Buna göre; enterkonnekte güç sistemine bağlı bir kontrol alanına ait üretim üniteleri, talep edilen yükü genel olarak üç kaynaktan karşılar. Bunlar;

a. Üretim ünitelerinin içerdiği jeneratörlerin döner alanlarında depolanmış kinetik enerjidir. Eş. 4.3’de jeneratörün depoladığı W_{kin} kinetik enerjisindeki değişimin, frekans değişimine bağlı ifadesi gösterilmiştir. Eşitlikte “ 0 ” parametrenin nominal değerini göstermektedir.

$$\frac{d}{dt} W_{kin} = 2 \frac{W_{kin}^0}{f^0} \cdot \frac{d}{dt} (\Delta f) \quad (4.3)$$

b. Yük artışıdır. Güç sisteminden talep edilen elektrik gücünün artması sistem frekansının düşmesine neden olur. Frekansın düşmesi ise sistem yükünün çoğunu oluşturan endüktif yüklerin talep ettiği toplam gücün düşmesini sağlar. Bu durum sistemde, Eş. 4.4 ile gösterilen yük sönüm sabiti D ile ifade edilir. Yük sönüm sabiti, matematiksel olarak sistemde oluşan yüzde yük değişimi için frekansta oluşan yüzde değişimdir. Örneğin, %2’lik bir yük değişimde frekans %1 değişiyorsa sönüm sabitinin değeri iki olur. Tipik değeri %1-2 civarındadır [2, 4].

$$D = \frac{\partial P_L}{\partial f} \quad \text{MW/Hz} \quad (4.4)$$

c. Diğer kontrol alanlarından alınan ΔP_{ara} ara-bağlantı gücüdür.

Buna göre kontrol alanı için giriş ve çıkış güç dengesi Eş. 4.5’de belirtildiği gibi yazılır. Eşitlikte ΔP_L sistemde birim adım fonksiyonuyla tanımlanan yük değişimidir.

$$\Delta P_T - \Delta P_L = 2 \frac{W_{kin}^0}{f^0} \cdot \frac{d}{dt} (\Delta f) + D \cdot \Delta f + \Delta P_{ara} \quad (4.5)$$

Eşitlikte tüm terimler MW boyutundandır. Tüm eşitlik kontrol alanının P_T anma gücü

ile p.u. değerine çevrilirse eşitlik Eş. 4.6'deki gibi olur.

$$\Delta P_T - \Delta P_L = 2 \frac{H}{f^0} \cdot \frac{d}{dt}(\Delta f) + D \cdot \Delta f + \Delta P_{ara} \quad (4.6)$$

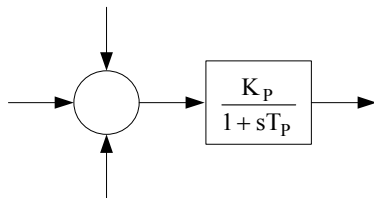
Burada H, Eş. 4.7'de belirtilen ve yaklaşık değeri 2-8 saniye olan jeneratör eylemsizlik sabitidir.

$$H = \frac{W_{kin}^0}{P_r} \quad (4.7)$$

Eş. 4.6'ya Laplace dönüşümü uygulanırsa Eş. 4.8 elde edilir ve bu eşitlikten, kontrol alanının Şekil 4.6'da belirtilen ve frekans sapmasını çıkış olarak kabul eden doğrusal modeli kurulabilir.

$$[\Delta P_T(s) - \Delta P_L(s) - \Delta P_{ara}(s)] \frac{K_p}{1 + sT_p} = \Delta f \quad (4.8)$$

Bu eşitlikte T_p Eş. 4.9'da tanımlanan ve birimi saniye olan kontrol alanı zaman sabitini, K_p ise Eş. 4.10'da tanımlanan ve birimi Hz/p.u.MW olan alan kazancını belirtmektedir.



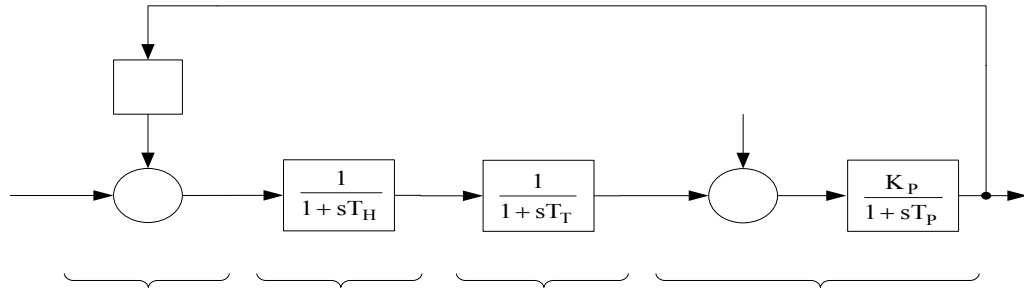
Şekil 4.6. Kontrol alanının, frekans sapmasını çıkış kabul eden doğrusal modeli.

$$T_p = \frac{2H}{f^0 D} \quad (4.9)$$

$$K_p = \frac{1}{D} \quad (4.10)$$

4.5. Tek Kontrol Alanına Sahip Güç Sistemi Modelinin Oluşturulması

Kontrol alanı, türbin, hidrolik yükselteç ve governor'a ait yukarıda tanımlanan doğrusal modelleri kullanılarak izole çalışan tek kontrol alanına sahip bir güç sisteminin Şekil 4.7'de belirtilen doğrusal modeli oluşturulabilir. İzole çalışan bir güç sisteminin frekansı ve uç gerilimi, yük paylaşımı olmadığından büyük ölçüde kendi yük değişimine bağlıdır ve yük değişimine karşı daha hassastır [2, 4]. Şekilde kontrol alanında, üretim üniteleri ara-ısıtmasız buhar türbini ile sürülmüştür. Kontrol alanının yük değişimi, ΔP_L ile gösterilmiş ve Eş. 4.11'de olduğu gibi birim adım yük değişimi olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 4.7. Tek kontrol alanına sahip güç sisteminin doğrusal modeli.

$$\Delta P_L(s) = \frac{\Delta P_L}{s} \quad (4.11)$$

Kontrol alanının cevap fonksiyonu olarak jeneratörün rotor milinin $\Delta \omega$ mekanik sapması alınmış, frekans sapması governor'a R regülasyon sabiti ile geri beslenmiştir. Governorun çıkışı, türbin hızını ayarlamak üzere hidrolik yükselteç üzerinden türbin vanasına uygulanmıştır. Sistemde yalnızca governor kontrol ile kontrol yapıldığı

varsayılırsa P_{ref} referans gücü sabit kabul edilip, ΔP_{ref} güç değişimi sıfır alınabilir. Bu durumda sistemin transfer fonksiyonu Eş. 4.12’de ki gibi çıkarılabilir.

$$\Delta w(s) = \Delta P_L(s) \left[\frac{-\frac{K_p}{1+sT_p}}{1 + \frac{1}{R} \left(\frac{1}{1+sT_H} \right) \left(\frac{1}{1+sT_T} \right) \left(\frac{K_p}{1+sT_p} \right)} \right] \quad (4.12)$$

Sürekli durum tepkisini bulmak için Eş. 4.12’deki transfer fonksiyonunda Eş. 4.9 ve Eş. 4.10’da belirtilen formüller kullanılır ve Eş. 4.13 ile belirtilen sonsuz değer teoremi uygulanırsa Eş. 4.14 elde edilir.

$$\Delta w = \lim_{s \rightarrow 0} [s \Delta w(s)] \quad (4.13)$$

$$\Delta w(s) = \frac{-\Delta P_L \left(\frac{1}{D} \right)}{1 + \frac{1}{R} + \frac{1}{D}} = \frac{-\Delta P_L}{\frac{1}{R} + D} \quad (4.14)$$

Bu eşitlikte yük sönüm sabiti D sıfır alınırsa, mekanik hız değişimi Eş. 4.15’de olduğu gibi bulunur.

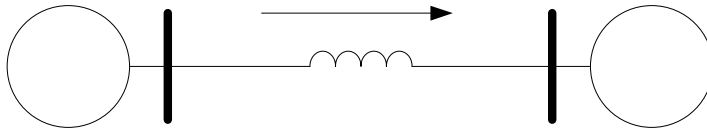
$$\Delta w = -R \Delta P_L \quad (4.15)$$

Eğer güç sisteminde n adet jeneratör var ise bu durumda Eş. 4.15, Eş. 4.16’daki gibi yazılabilir [2, 4].

$$\Delta w = -\frac{\Delta P_L}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} + D} \quad (4.16)$$

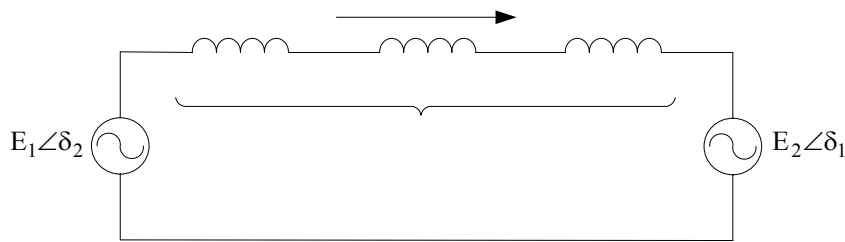
4.6. Ara-Bağlantı Hattı Modeli

Enterkonnekte sistemde kontrol alanları arasındaki ara-bağlantı hatlarını modellemek için tek hat şeması incelenebilir. Şekil 4.8’de ara-bağlantı hattıyla bağlanmış iki kontrol alanı içeren bir enterkonnekte sistemin tek hat şeması gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Ara-bağlantı hattıyla bağlanmış iki kontrol alanının tek hat şeması.

Şekilde X_{12} ara-bağlantı hattı reaktansını, P_{12} kontrol alanları arasındaki net güç akışını belirtmektedir. Ara-bağlantı hattı modeli, Şekil 4.9’da belirtilen eşdeğer devre ile elde edilen ve Eş. 4.17’de belirtilen net güç değişimi eşitliğinden elde edilebilir. Şekil 4.9’da her kontrol alanı E uç gerilimine, δ faz açısına ve X eşdeğer reaktansına sahip birer AC güç kaynağı ile gösterilmiştir. X_T eşdeğer devrenin toplam reaktansını, P_{12} ise alanlar arasındaki net güç değişimini göstermektedir.



Şekil 4.9. İki kontrol alanına sahip bir enterkonnekte sisteme ait eşdeğer devre.

$$P_{12} = \frac{E_1 \cdot E_2}{X_T} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (4.17)$$

Devrede, δ faz açıları frekansla Eş. 4.18 ile ilişkilidir. Bu nedenle kontrol alanlarının

faz açılarının değişimi ara-bağlantı hattı üzerinde bir güç akışına neden olur. Eşdeğer devrede güç akışının birinci kontrol alanından ikinci kontrol alanına doğru olduğu göz önüne alınmıştır. Eş. 4.19'da kontrol alanlarına ait δ_1 ve δ_2 faz açılarının değişimine göre ΔP_{12} güç değişimi ifadesi gösterilmiştir. Burada T , faz açılara göre kontrol alanları arasındaki güç akışı ile orantılı senkronizasyon katsayısı olarak tanımlanır.

$$\Delta\delta = 2\pi \int \Delta f . dt \quad (4.18)$$

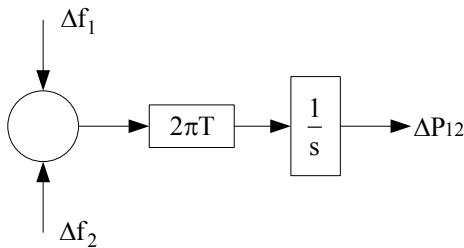
$$\Delta P_{12} = \frac{E_1 . E_2}{X_T} \cos(\delta_1 - \delta_2) (\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2) = T . (\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2) \quad (4.19)$$

Faz açısı değişimi ve frekans değişimi arasındaki Eş. 4.18'de belirtilen ilişki nedeniyle Eş. 4.19 düzenlenerek zaman düzleminde Eş. 4.20'de olduğu gibi, frekans düzleminde ise Eş. 4.21'de olduğu gibi yazılabilir.

$$\Delta P_{12} = 2\pi T . \left[\int \Delta f_1 dt - \int \Delta f_2 dt \right] \quad (4.20)$$

$$\Delta P_{12}(s) = \frac{2\pi T}{s} . [\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)] \quad (4.21)$$

Eş. 4.21'ya göre ara-bağlantı hattının doğrusal modeli Şekil 4.10'da belirtildiği gibi oluşturulabilir [2, 4].

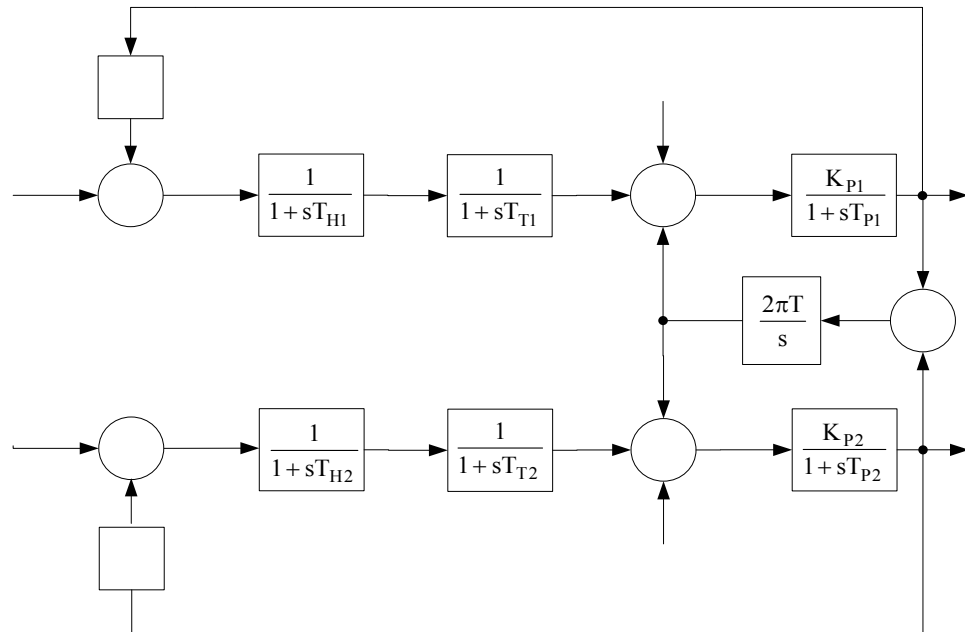


Şekil 4.10. Ara-bağlantı hattının doğrusal modeli.

4.7. Enterkonnekte Güç Sistemi Modelinin Oluşturulması

Enterkonnekte sistem modeli, Şekil 4.7’de gösterilen tek kontrol alanına sahip güç sisteminin birkaç tanesinin Şekil 4.10’da gösterilen ara-bağlantı hattı modeli kullanılarak birleştirilmesi ile oluşturulabilir. Buna göre, birbirine eşit parametrelere sahip iki kontrol alanı ile oluşturulan model Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Modelde, ara-bağlantı hattındaki güç akışının birinci kontrol alanına negatif, ikinci kontrol alanına pozitif eklendiği görülmektedir. Bunun anlamı ara-bağlantı hattındaki güç akışının birinci kontrol alanından ikinciye doğru olduğudur. Eğer sistemdeki mekanik güçler sabit kabul edilirse dönen kütleler ve ara-bağlantı hattı sönümlü osilasyon karakteristiğine sahip olur. Sistemde, birinci bölgede bir yük değişimi olduğu kabul edilsin. Sürekli durumda, tüm sönümlü osilasyonlardan sonra frekans sabit olacak ve Eş 4.22’de belirtildiği şekilde her iki kontrol alanında da aynı değere sahip olacaktır [32].

$$\Delta w_1 = \Delta w_2 = \Delta w \quad \text{ve} \quad \frac{\partial(\Delta w_1)}{\partial t} = \frac{\partial(\Delta w_2)}{\partial t} = 0 \quad (4.22)$$



Şekil 4.11. İki kontrol alanı içeren bir enterkonnekte güç sisteminin doğrusal modeli.

Modelden Eş. 4.23 ve Eş. 4.24’da yazılabilir.

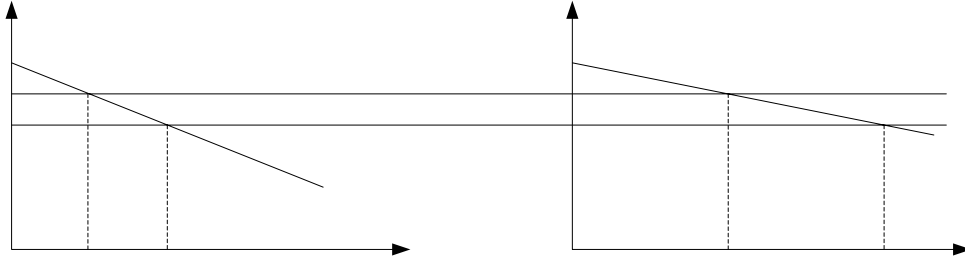
$$\Delta P_T - \Delta P_{ara} - \Delta P_{L1} = \Delta w \cdot D_1 \quad (4.23)$$

$$\Delta P_T + \Delta P_{ara} = \Delta w \cdot D_2 \quad (4.24)$$

Ayrıca, her kontrol alanı yük talebini kendi düşüm karakteristiğine göre kendi kapasitesini kullanarak karşılar. Bu durum Şekil 4.12 ile açıklanmıştır. Bununla beraber Şekil 4.11’de belirtilen modelde kontrol alanları aynı parametrelere sahip olduklarından, üretim miktarları için Eş. 4.25 ve Eş. 4.26 yazılabilir [2, 4].

$$\Delta P_T = -\frac{\Delta w}{R_1} \quad (4.25)$$

$$\Delta P_T = -\frac{\Delta w}{R_2} \quad (4.26)$$



Şekil 4.12. Kontrol alanları güç çıkışlarının düşüm karakteristiklerine göre ayarlanması.

Buna göre;

$$-\Delta P_{ara} - \Delta P_{L1} = \Delta w \left(\frac{1}{R_1} + D_1 \right) \quad (4.27)$$

$$+ \Delta P_{\text{ara}} = \Delta w \left(\frac{1}{R_2} + D_2 \right) \quad (4.28)$$

yazılır. Sonuç olarak sürekli durumda frekans değişimi ve ara-bağlantı hattı değişimleri Eş. 4.29 ve Eş. 4.30'da gösterildiği gibi bulunabilir [2, 4].

$$\Delta w = \frac{-\Delta P_L}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \quad (4.29)$$

$$\Delta P_{\text{ara}} = \frac{-\Delta P_L \left(\frac{1}{R_2} + D_2 \right)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \quad (4.30)$$

Aşağıda, enterkonnekte güç sisteminin ikincil kontrolünü sağlamak amacıyla, tez çalışmasında kullanılan kontrol yöntemleri açıklanmıştır.

5. KONTROL YÖNTEMLERİ VE OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI

5.1. Kontrol Yöntemleri

Yük-frekans kontrolünün ikincil kontrol çevriminde, sistem frekansında oluşan sürekli durum hatasının yok edilmesi için integral tipi kontrolör kullanılması gerekmektedir. Birinci bölümde de açıklandığı gibi, bu amaçla gerek doğrudan integral kontrolör, gerekse integral kontrol davranışı gösteren farklı kontrol yapıları araştırmacılar tarafından literatüre sunulmuştur. Bu tez çalışmasında da, kontrolör parametreleri sürü zekası tabanlı bir optimizasyon algoritması ile güncellenen bir oran-integral (PI) ile bir oran-integral-türev (PID) kontrolör kullanılmıştır.

5.1.1. Oran-integral (PI) kontrol

PI-kontrol, gerek tasarımının gerekse de gerçekleştirilmesinin kolaylığı nedeniyle günümüzde en çok kullanılan kontrol yöntemlerinden birisi olmuştur. Temel olarak, sistemin çıkışı ile referans giriş arasındaki fark kullanılarak bir kontrol sinyali üretilir. Bu farka hata sinyali adı verilir. Kontrolörün oran kısmı, sistem çıkışını hata sinyali ile orantılı olarak değiştirirken; integral kısmı, önceki hataların toplamını elde edebilmek amacıyla hata sinyalinin integralini alır (Eş. 5.1). Diğer deyişle, kontrolör çıkışında hatanın integraliyle orantılı bir kontrol sinyali üretilir. Bu kontrol sinyali ile sistemin transfer fonksiyonuna bir kutup ilave edilerek sistem tipi bir arttırılmış olur ve eğer belirli bir giriş için sürekli durum hatası sabit ise sistemin çıkışında bu hata sıfırlanır. Buna karşılık, PI-kontrol temelde bir alçak geçiren filtre olduğundan yükselme ve oturma zamanları nispeten uzundur [5, 34].

$$u = K_p e + \frac{K_p}{T_i} \int e \cdot dt \quad (5.1)$$

Eşitlikte; e hata sinyalini, u kontrolör tarafından üretilen kontrol sinyalini, K_p orantısal kazancı, T_i ise integral zaman sabitini ifade etmektedir. Enterkonnekte sistem kontrolünde hata sinyali olarak Eş. 3.5’de gösterilen AKH kullanılmıştır.

Buna göre enterkonnekte sistemde elde edilecek u kontrol sinyali Eş. 5.2'deki gibi hesaplanır.

$$u = K_p \cdot (B \cdot \Delta f + \Delta P_{ara}) + \frac{K_p}{T_i} \int (B \cdot \Delta f + \Delta P_{ara}) \cdot dt \quad (5.2)$$

PI-kontrol uygulanan bir sistemde sistem tipinin bir arttırılması, kararlı sistemin daha az kararlı ya da kararsız duruma geçmesine neden olabilir. Bu nedenle K_p ve T_i parametrelerinin, sistem kararlılığının sağlandığı değerlere ayarlanması gerekmektedir [5, 34].

5.1.2. Oran-integral-türev (PID) kontrol

PID-kontrol ile integral kontrolün yukarıda belirtilen özelliklerinin yanında türev kontrolün özellikleri de kullanılmıştır. Doğrusal sistemlerde, birim adım girişi için sistem çıkışının eğimi büyük ise genellikle aşım da büyük olmaktadır. Türev kontrol, hatanın ansal eğimini hesaplamakta ve büyük aşımı önceden öngörerek gerekli düzeltme komutunu üretebilmektedir. Sonuç olarak PID-kontrolde, oransal kontrol ile yükselme zamanı, türev kontrol ile aşım azaltılır ve PI-kontrol ile sıfırlanan sürekli durum hatasının yanında, sistemin geçici durum cevabı da iyileştirilir. PID-kontrolörün transfer fonksiyonu Eş. 5.3'de gösterilmiştir. Eşitlikte T_p türev zaman sabitini ifade etmektedir [5, 34].

$$u = K_p e + \frac{K_p}{T_i} \int e \cdot dt + K_p T_p \frac{de}{dt} \quad (5.3)$$

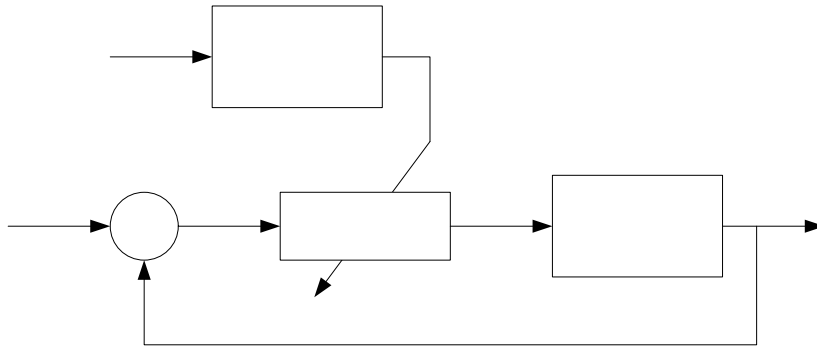
Enterkonnekte sistem kontrolünde hata sinyali olarak Eş. 3.5'de gösterilen AKH'nın kullanıldığı göz önüne alındığında, sistemde elde edilecek u kontrol sinyali Eş. 5.4'deki gibi hesaplanacaktır.

$$u = K_p (B \cdot \Delta f + \Delta P_{ara}) + \frac{K_p}{T_i} \int (B \cdot \Delta f + \Delta P_{ara}) \cdot dt + K_p T_p \frac{d(B \cdot \Delta f + \Delta P_{ara})}{dt} \quad (5.4)$$

Açıklamalardan da anlaşıldığı gibi PI-kontrol birinci dereceden doğrusal ve zaman gecikmesi olmayan sistemler için uygun kontrol sağlarken, PID-kontrol ikinci dereceden doğrusal ve zaman gecikmesi olmayan sistemler için uygun kontrol sağlamaktadır. Fakat gerçekte sistemler her zaman doğrusal değildir ve zaman karakteristikleri de değişiklik gösterebilmektedir. Bu nedenle başlangıçta tasarlanan bir kontrolör, sistemin farklı çalışma noktalarında uygun kontrol sağlayamayacaktır. Modern kontrol teorisinde bu gibi durumların farklı çözümleri bulunmakla beraber, en kullanışlı çözümlerden biri kontrolörün adaptif olarak ayarlanabilir yapıda tasarlanmasıdır [35]. Bu tez çalışmasında da, kontrolör parametrelerinin sistemin değişen çalışma noktalarına göre ayarlanabilmesi için kontrolörün, kazanç güncellemeli olarak tasarlanması öngörülmüştür.

5.1.3. Kazanç güncellemeli kontrol

Kazanç güncellemeli kontrol; zaman içinde, kontrol edilen sistemin farklı sebeplerle değişen parametreleri karşısında, istenen sistem çıkışının elde edilebilmesi için kontrolör parametrelerinin bazılarının ya da tamamının yeniden ayarlandığı adaptif kontrol yöntemidir. Genel olarak, doğrusal olmayan sistemlerin ya da çalışma koşulları zaman içinde değişen sistemlerin kontrolü için kullanılır. Nispeten basit tasarımı ve kolay uygulanabilir olması önemli avantajlarıdır. Bir kazanç güncellemeli kontrol sisteminin blok diyagramı Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Kazanç güncellemeli kontrol sisteminin blok diyagramı.

Şekilde; güncelleme bilgisi sistemden ölçülen bir sinyal, kontrol sinyali ya da harici bir sinyal olabilmektedir. Tez çalışmasında güncelleme bilgisi olarak, enterkonnekte sistemde kontrol alanlarından elde edilen AKH sinyalleri kullanılmıştır. Kontrolör parametreleri, bu bilgiye göre kazanç güncelleme algoritması tarafından yeniden ayarlanmıştır. Kazanç güncelleme algoritması olarak ise, literatürde farklı yöntemler belirtilmiş olmasıyla birlikte, aşağıdaki bölümlerde açıklanan sürü zekâsına dayalı optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. [5].

5.2. Yapay Zekâ Tabanlı Optimizasyon Algoritmaları

Doğrusal olmayan fonksiyonların optimizasyonunda kullanılan klasik matematiksel yöntemler, gerçekleşmesinde yazılımsal ve donanımsal bazı zorlukları da beraberinde taşıyan türev ifadeleri içerir. Optimizasyon hesapları içinde türev ifadelerinden kaçınmak ve nispeten daha basit ve kısa yazılımla, daha kısa sürede sonuca yakınsamak için ekosistemdeki canlıların doğal seçim davranışlarından esinlenen iterasyona dayalı optimizasyon yöntemleri geliştirilmiştir. Önceleri daha çok mutasyon, çaprazlama ve yeniden üreme gibi evrimsel bir takım operatörler içeren bu yöntemler daha sonra yerini, canlıların besin bulma davranışlarından yola çıkan popülasyon tabanlı, sürü zekâsına dayalı optimizasyon algoritmalarına bırakmaya başlamıştır. Aşağıda, son yıllarda ortaya çıkan popülasyon tabanlı Yapay Arı Kolonisi ve Parçacık Sürüsü optimizasyon algoritmaları açıklanmıştır.

5.2.1. Yapay arı kolonisi algoritması

Yapay arı kolonisi algoritması 2005 yılında Karaboğa tarafından, bal arısı kolonilerinin besin bulma davranışlarından esinlenerek geliştirilmiş sürü zekâsına dayalı bir optimizasyon algoritmasıdır [6]. Algoritmada arılar, arama uzayındaki konumları ile ifade edilir. Arama uzayının boyutunu, çözüm içinde optimize edilecek parametrelerin sayısı belirler. Her bir arı, arama uzayında bir besin kaynağına bağlı olarak çalışır. Arıların bulundukları konumlar, yani besin kaynakları aynı zamanda problemin olası çözümleridir. En iyi besin kaynağı, o besin kaynağının nektar miktarının ölçülmesi ile yani bir maliyet fonksiyonu kullanılarak uygunluk değerinin

hesaplanması ile belirlenir. Arılar yeni konumlarını, bir önceki konumlarını ve önceki diğer en iyi besin kaynaklarının konumlarını dikkate alarak değiştirirler. Arama uzayında, arılar tarafından bulunan en uygun besin kaynağının konumu problemin çözümü olarak atanır.

Yapay arı kolonisini üç grup arı oluşturur. Bunlar; besin kaynaklarını tutan işçi arılar, besin kaynaklarını seçmek üzere işçi arıların dansını izleyen gözcü arılar ve rasgele arama yapan kâşif arılardır. Popülasyonun yarısını işçi arılar, diğer yarısını da gözcü arılar oluşturur. Algoritmanın başlangıcında, işçi arılar yeni besin kaynakları bulurlar ve buldukları besin kaynaklarının uygunluklarını belirlemek üzere maliyet fonksiyonu ile nektar miktarlarını ölçerler. Ardından, bulundukları besin kaynağının komşuluklarında daha uygun yeni bir besin kaynağı aramaya başlarlar. Bir işçi arı, daha uygun yeni bir besin kaynağı bulduğu takdirde önceki kaynağı gözcü arılara devreder ve kendisi bu yeni besin kaynağını tutmaya başlar. Belli bir iterasyon sayısı kadar daha uygun yeni bir besin kaynağı bulamayan işçi arı bulunduğu besin kaynağını da bırakarak kâşif arıya dönüşür ve arama uzayında rasgele arama yapmaya başlar.

Gözcü arıların işçi arılardan besin kaynaklarını devralması, genel olarak olasılığa dayalı bir seçim işlemi ile gerçekleştirilir. Algoritmada, işçi arılar ve gözcü arılar yerel arama yaparken, kâşif arılar global arama yapar. Bu sayede, Yapay Arı Kolonisi algoritmasında yerel ve global arama yetenekleri birleştirilerek optimum sonuca yakınsama hızı artırılır. Yapay Arı Kolonisi algoritmasının algoritma adımları aşağıda belirtilmiştir.

Başlangıç parametrelerinin belirlenmesi

Repeat

İşçi arıları besin kaynaklarına gönder ve nektar miktarlarını hesapla

Gözcü arıları besin kaynaklarına gönder ve nektar miktarlarını hesapla

Rasgele yeni besin kaynakları bulmaları için kâşif arıları gönder

O ana kadarki en iyi besin kaynağını hafızada tut

Until (Durdurma kriteri sağlanana kadar)

Yapay Arı Kolonisi algoritmasında öncelikle başlangıç parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Algoritmanın avantajlarından birisi de parametre sayısının az olmasıdır. Başlangıçta belirlenmesi gereken üç adet parametre vardır. Bunlar;

- Besin kaynağı sayısı (İşçi arı sayısı): Her bir besin kaynağında yalnızca bir adet işçi arı bulunmaktadır. Dolayısı ile bu parametre toplam arı sayısının yarısını oluşturmaktadır.
- Limit: İşçi arıların kaşif arı olması için gerekli, gelişme olmayan iterasyon sayısıdır.
- İterasyon sayısı: Algoritmanın en fazla kaç adım koşturulacağını belirleyen parametredir.

Yapay Arı Kolonisi algoritması genel olarak dört işlem safhasından oluşur. Bunlar; başlangıç safhası, işçi arı safhası, gözcü arı safhası ve kâşif arı safhasıdır [6, 7]. Bu safhalar aşağıda açıklanmıştır.

Başlangıç Safhası

Başlangıç safhasında işçi arılar rasgele olarak besin kaynaklarına gönderilir. Bu işlem, S adet besin kaynağı içeren x_{mi} matrisinin elemanlarının Eş. 5.5 ile rasgele atanmasıyla temsil edilir.

$$x_{mi} = l_i + \text{rand}(0,1).(u_i - l_i) \quad m = 1, 2, \dots, S \quad \text{ve} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.5)$$

Yukarıdaki eşitlikte m besin kaynağı indisini, i besin kaynağını yani çözümü oluşturan parametre indisini, u parametrelerin üst sınırını ve l ise parametrelerin alt sınırını göstermektedir [6, 7].

İşçi Arı Safhası

Arılar, işçi arı safhasının başında x_{mi} matrisi ile belirtilen besin kaynaklarında

bulunurlar. Bu safhada işçi arılar bulundukları besin kaynaklarının komşuluğunda yeni besin kaynakları aramak ve bu kaynakların nektar miktarlarını ölçmekle yani uygunluk değerlerini hesaplamakla görevlendirilmişlerdir. Algoritmada, yeni besin kaynakları Eş. 5.6 ile tanımlanan v_{mi} matrisi ile belirtilmiştir. Eşitlikte x_k rasgele seçilen bir besin kaynağını, i rasgele seçilen parametre indisini ve ϕ_{mi} $[-a, a]$ aralığında rasgele seçilen adım katsayısını belirtmektedir.

$$v_{mi} = x_{mi} + \phi_{mi} \cdot (x_{mi} - x_{ki}) \quad (5.6)$$

v_{mi} matrisinin oluşturulmasının ardından, probleme göre tanımlanmış bir maliyet fonksiyonu ile bu yeni besin kaynaklarına ait uyum değerleri hesaplanır. Uyum değerleri, maliyet fonksiyonu ile belirlenen $f_m(x_m)$ maliyet değeri kullanılarak Eş. 5.7 ile hesaplanır. İşçi arı safhasının sonunda, uyum değerleri hesaplanan besin kaynakları “greedy selection” adı verilen olasılıksal bir seçim işlemi ile gözcü arılara devredilir [6, 7].

$$Uym_m(x_m) = \begin{cases} \frac{1}{1 + f_m(x_m)} & \text{eğer } f_m(x_m) \geq 0 \\ 1 + |(f_m(x_m))| & \text{eğer } f_m(x_m) < 0 \end{cases} \quad (5.7)$$

Gözcü Arı Safhası

İşçi arıların dışında kalan iki grup arı vardır. Bu arılar gözcü arılar ve kaşif arılardır. İşçi arılar, besin kaynaklarının nektar miktarlarını yani uyum değerlerini belirledikten sonra bu kaynakların konum ve nektar miktarı bilgilerini kovanda bekleyen gözcü arılarla paylaşırlar. Bu işlemin ardından gözcü arılar, işçi arıların paylaştığı konum ve nektar bilgilerine dayanarak, olasılıksal bir hesaplama ile kendilerine bir besin kaynağı seçerler. Bu seçme işlemi, işçi arılar tarafından sağlanan uyum değerlerini kullanarak hesaplanan olasılık değerlerine bağlı olarak yapılır. Bu amaçla algoritmada rulet tekerleği seçim yöntemi kullanılmıştır (Eş. 5.8).

$$h_i = \frac{Uym_i}{\sum_n^s Uym_n} \quad (5.8)$$

Eşitlik 5.8’de h_i gözcü arı tarafından besin kaynağının seçilme olasılığıdır. Uygunluk değerinin toplam uygunluk değerine oranı ile i ’inci besin kaynağının seçilme olasılığı belirlenmiş olur. Bir besin kaynağı gözcü arı tarafından seçilirken, 0 ile 1 arasında algoritma tarafından rasgele bir sayı üretilir. Besin kaynağının olasılığı bu değerden büyükse o besin kaynağı gözcü arı tarafından seçilir. Küçükse sıradaki besin kaynağına bakılır. Bu şekilde gözcü arıların tamamı bir besin kaynağı seçene kadar işlemlere devam edilir [6, 7].

Kâşif Arı Safhası

Algoritma boyunca bazı besin kaynaklarının konumları o besin kaynağını bağlı olan işçi arılar tarafından geliştirilemez. Eğer bir besin kaynağı limit parametresi kadar iterasyonda geliştirilememiş ise bu besin kaynağındaki işçi arı kâşif arıya dönüşür ve arama uzayında rasgele bir başlangıç konumuna geri döner. Arama işlemine bu konumdan işçi arı olarak yeniden başlarlar [6, 7].

5.2.2. Parçacık sürüsü algoritması

Parçacık Sürüsü algoritması 1995 yılında Eberhart ve Kennedy tarafından, kuş ve balık sürülerinin besin bulma davranışlarından esinlenerek geliştirilmiş sürü zekasına dayalı bir optimizasyon algoritmasıdır [8]. Parçacık Sürüsü algoritması, geliştirilmesinden bu yana elektrik güç sistemleri uygulamalarında sıklıkla kullanılmıştır [36]. Algoritmada, her bir parçacık sürünün bir bireyini ifade eder. Bireylerin D-boyutlu arama uzayında bulundukları konumlar, aynı zamanda problemin olası çözümleridir. Arama uzayının boyutu, çözüm içinde optimize edilecek parametrelerin sayısı ile belirlenir. Bireyler yeni konumlarını yani problemin alternatif yeni bir çözümünü, kuş ya da balık sürülerinde olduğu gibi kendisinin ve tüm sürünün hareket doğrultusuna göre hesaplayarak bulur. Diğer bir

ifadeyle her bir birey yeni konumunu belirlerken, sürü içinde kendisinin ve tüm sürünün geçmiş deneyimlerini göz önüne alır. Bu sayede her bir çözüm bir önceki çözümden daha iyi olma eğilimi taşır.

Algoritmada, M adet parçacığın her biri D-boyutlu arama uzayında D-boyutlu x_i dizisiyle (Eş 5.9) gösterilir.

$$x_i = (x_{i1} \quad x_{i2} \quad x_{i3} \quad \dots \quad x_{iD}) \quad i = 1, 2, 3, \dots, M \quad (5.9)$$

Parçacıkların eski ve yeni konumları arasındaki adım aralıkları ise parçacığın hızı olarak tanımlanır ve yine D-boyutlu arama uzayında D-boyutlu v_i dizisiyle (Eş 5.10) gösterilir.

$$v_i = (v_{i1} \quad v_{i2} \quad v_{i3} \quad \dots \quad v_{iD}) \quad i = 1, 2, 3, \dots, M \quad (5.10)$$

Buna göre, D-boyutlu arama uzayında dolaşan M adet parçacığın konumları ve hızları ise sırasıyla X (Eş 5.11) ve V (Eş 5.12) matrisleri ile tanımlanır.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1D} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2D} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{M1} & x_{M2} & x_{M3} & \dots & x_{MD} \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} & \dots & v_{1D} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} & \dots & v_{2D} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{M1} & v_{M2} & v_{M3} & \dots & v_{MD} \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Her bir parçacık, arama uzayında o ana kadar elde ettiği en uygun konuma doğru giden bir koordinat izleme eğilimindedir. Parçacığın bu en iyi konumu, o parçacığın yerel en iyi konumudur ve p_i dizisi (Eş 5.13) ile gösterilir. Yerel en iyi konum,

gerçekte o parçacığın önceki deneyimini ifade eder. Tüm parçacıkların yerel en iyi konumları ise $M \times D$ boyutlu P matrisi (Eş 5.14) ile gösterilir.

$$p_i = (p_{i1} \quad p_{i2} \quad p_{i3} \quad \dots \quad p_{iD}) \quad i=1, 2, 3, \dots, M \quad (5.13)$$

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & \dots & p_{1D} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & \dots & p_{2D} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{M1} & p_{M2} & p_{M3} & \dots & p_{MD} \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

Aslında, sürünün tüm elemanlarına ait en iyi konum bilgilerini içeren P matrisindeki en iyi konum bilgisi ise tüm sürünün global en iyi konumu olarak tanımlanır. Bu konum gerçekte tüm sürünün önceki deneyimini ifade eder. Global en iyi konum D -boyutlu g_i dizisiyle (Eş 5.15) gösterilir.

$$g_i = (g_1 \quad g_2 \quad g_3 \quad \dots \quad g_D) \quad i=1, 2, 3, \dots, M \quad (5.15)$$

Parçacık Sürüsü algoritması, parçacıkların konumunun her bir nesilde kendi yerel en iyi konumlarına ve sürünün global en iyi konumuna doğru yönlendirilmesine dayanır. Her bir parçacığın hızı, bu değişim sırasında en iyi konuma ulaşabilmek için farklı rasgele terimler ile ağırlıklandırılır. Optimizasyon sürecinde her bir parçacığın hızı ve konumu, Eberhart ve Kennedy'nin Reynolds [37] ile Hepper ve Grenander'in [38] kuş sürüsü benzetimleriyle ilgili çalışmaları ışığında geliştirdikleri Eş. 5.16 ve Eş. 5.17 ile güncellenir [8].

$$v_{iD}^{t+1} = v_{iD}^t + c_1 r_1 (p_{iD}^t - x_{iD}^t) + c_2 r_2 (g_i^t - x_{iD}^t) \quad (5.16)$$

$$x_{iD}^{t+1} = x_{iD}^t + v_{iD}^{t+1} \quad (5.17)$$

Eş. 5.18 ile her bir parçacığın yeni hızı hesaplanır. Yeni hız hesaplanırken parçacığın önceki hızı, mevcut konumu, yerel en iyi konumu ve global en iyi konumu dikkate

alınır. Parçacığın yeni konumu, hesaplanan yeni hızın Eş. 5.17’de kullanılması ile belirlenir. Eş. 5.18’de ilk terim parçacığın kendi güncel hızını, ikinci terim kendi deneyimini belirtirken, son terim sosyal terimdir ve tüm sürünün deneyimini içerir. c_1 ve c_2 sabitleri pozitif değerli ivmelenme sabitleridir ve parçacığın, yerel en iyi konumuna ve global en iyi konuma doğru olan adım boyunu belirler. Literatürde en uygun değerlerinin 0,2 ile 2 arasında alınabileceği belirtilmektedir. r_1 ve r_2 katsayıları ise 0 ile 1 arasında normal dağılımlı rasgele sayılardır ve değerleri her iterasyonda yeniden belirlenir [39].

Shi ve Eberhart, Eş. 5.16 ile parçacığın hızının her zaman önceki hızı ile güncellendiğini görmüşler ve hızın hedefe yaklaştıkça azalmasını sağlamak, yani global ve yerel arama hızlarını dengelemek amacıyla, belirli bir aralıkta doğrusal olarak azalan w atalet ağırlığı terimini kullanmışlardır. Buna göre hız güncelleme formülü Eş. 2.18’de belirtildiği şekilde yeniden düzenlenmiştir. Literatürde uygun değerinin 0,9 ile 1,2 arasında alınabileceği belirtilmektedir [39].

$$v_{id}^{t+1} = w.v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (g_i^t - x_{id}^t) \quad (5.18)$$

Atalet ağırlığının değerinin büyümesi global arama yeteneğinin, küçülmesi ise yerel arama yeteneğinin artmasını sağlamaktadır. Yakınsama hızının artması için iterasyonun başlangıcında global arama yeteneğinin, sonlarına doğru ise yerel arama yeteneğinin daha yüksek olması gerekmektedir. Buna göre Eş. 5.19 kullanılarak, w değerinin her iterasyonda doğrusal olarak azaltılması sağlanmaktadır. Eşitlikte I_T , iterasyon sayısını ifade etmektedir.

$$w = w_{maks.} - I_T \cdot \frac{w_{maks.} - w_{min.}}{I_{T maks.}} \quad (5.19)$$

Clerc, optimizasyonun yakınsama performansını arttırmak amacıyla w atalet ağırlığı yerine Eş. 5.20 ile tanımlanan ve c sabitlerinin bir fonksiyonu olan K faktörünü kullanmayı ve Eş. 5.18’i Eş. 5.21’de belirtilen şekilde değiştirmeyi önermiştir. Clerc,

K değerinin hesabında c sabitlerinin değerini 2,05 almıştır [40].

$$K = \frac{2}{\left| 2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi} \right|}, \quad \varphi = c_1 + c_2 > 4 \quad (5.20)$$

$$v_{id}^{t+1} = K \left[v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (g_i^t - x_{id}^t) \right] \quad (5.21)$$

Parçacıkların arama uzayından çıkmasını önlemek için konumlarının ve hızlarının sınırlandırılması gerekmektedir. Hız değeri, parçacığın konumunun $[x_{min.}, x_{maks.}]$ aralığında belirlenen değerine göre $[v_{min.}, v_{maks.}]$ aralığında Eş. 5.22 ve Eş. 5.23 kullanılarak sınırlandırılmalıdır [39].

$$v^{maks.} = (x^{maks.} - x^{min.}) (\%10 \sim \%20) \quad (5.22)$$

$$v^{min.} = -v^{maks.} \quad (5.23)$$

Bununla beraber, Chen ve arkadaşları parçacıkların sınırlarının belirlenmesi amacıyla Eş. 5.24'da belirtilen yöntemi önermişlerdir [41].

$$v^{maks.} = k \cdot x^{maks.}, \quad 0.1 \leq k \leq 0.5 \quad (5.24)$$

Parçacıkların hesaplanan konum ve hız değerleri yukarıda belirtilen sınır değerlerin dışında ise son değerleri Eş 5.25 eşitlikleri ile belirlenir.

$$\begin{aligned} \text{Eğer } (v^{k+1} > v^{maks.}) \quad & \text{ise } (v^{k+1} = v^{maks.}) \\ \text{Eğer } (v^{k+1} < v^{min.}) \quad & \text{ise } (v^{k+1} = v^{min.}) \\ \text{Eğer } (x^{k+1} > x^{maks.}) \quad & \text{ise } (x^{k+1} = x^{maks.}) \end{aligned} \quad (5.25)$$

Eğer $(x^{k+1} < x^{\min.})$ ise $(x^{k+1} = x^{\min.})$

Parçacık Sürüsü algoritmasının program adımları aşağıda belirtilmiştir.

Adım-1: Parçacıkların her bir elemanı için hız ve konum sınırları ile güncelleme eşitliklerinde kullanılacak parametreler belirlenir.

Adım-2: D-boyutlu arama uzayında, parçacıkların başlangıç konumlarını ve hızlarını tanımlayan X ve V matrisleri, belirlenen sınırlar içerisinde rasgele atanır.

Adım-3: X ve P matrislerinin, seçilen uygunluk fonksiyonuna göre uygunluk değerleri belirlenir. P matrisinin en iyi uygunluk değerine sahip parçacığı, global en iyi konum ve en iyi uygunluk değeri olarak atanır. X ve P matrislerinin uygunluk değerleri aşağıdaki M boyutlu F_x (Eş 5.26) ve F_p (Eş 5.27) vektörleri ile gösterilir.

$$F_x = [f_{x1} \quad f_{x2} \quad f_{x3} \quad \dots \quad f_{xM}]^T \quad (5.26)$$

$$F_p = [f_{p1} \quad f_{p2} \quad f_{p3} \quad \dots \quad f_{pM}]^T \quad (5.27)$$

Adım-4: Her parçacığın F_x uygunluk değeri, kendi yerel en iyi konumunun F_p uygunluk değeri ile karşılaştırılır. Eğer parçacığın o anki konumunun uygunluk değeri, yerel en iyi konumunun uygunluk değerinden daha iyi ise parçacığın konumu ve uygunluk değeri, yerel en iyi konumuna ve uygunluk değerine aktarılır (Eş 5.28).

$$\text{Eğer } (F_{pi}^t < F_{xi}^{t+1}) \text{ ise } (p_i^{t+1} = x_i^{t+1} \text{ ve } F_{pi}^{t+1} = F_{xi}^{t+1}) \quad (5.28)$$

$$\text{Eğer } (F_{pi}^t > F_{xi}^{t+1}) \text{ ise } (p_i^{t+1} = p_i^t \text{ ve } F_{pi}^{t+1} = F_{pi}^t)$$

Adım-5: Yerel en iyi konum vektörünün en iyi uygunluk değeri, global en iyi konumun uygunluk değeri ile karşılaştırılır. Eğer yerel en iyi konum vektörünün en iyi uygunluk değeri, global en iyi konumun uygunluk değerinden daha iyi ise o

parçacığın konumu ve uygunluk değeri, global en iyi konum g_i 'ye ve onun uygunluk değeri F_{g_i} 'ye aktarılır (Eş 5.29).

$$\text{Eğer } (F_{p_i}^{t+1}(eni yi) < F_{g_i}^t) \text{ ise } (g_i^{t+1} = g_i^t \text{ ve } F_{g_i}^{t+1} = F_{g_i}^t) \quad (5.29)$$

$$\text{Eğer } (F_{p_i}^{t+1}(eni yi) > F_{g_i}^t) \text{ ise } (g_i^{t+1} = p_i^{t+1}(eni yi) \text{ ve } F_{g_i}^{t+1} = F_{p_i}^{t+1}(eni yi))$$

Adım-6: Parçacıkların hızları ve konumları, genel olarak Eş. 5.18 ve Eş. 5.19 ile yenilenir.

Adım-7: Optimizasyon süreci, iterasyon sayısı tamamlanıncaya ya da belirlenen en iyi uygunluk değeri elde edilinceye kadar üçüncü adımdan itibaren tekrarlanır. Optimizasyon sonunda elde edilen global en iyi konum, problemin çözümü olarak alınır.

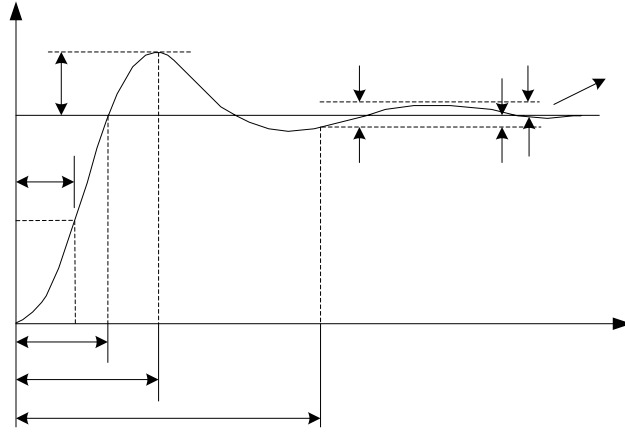
Parçacık Sürüsü algoritmasında, problemin çözümünü de tanımlayan parçacıkların ne şekilde kodlanacağı ve maliyet fonksiyonunun belirlenmesidir. Parçacık Sürüsü algoritmasında, algoritmanın yapısı gereği parçacıklar gerçek sayılarla tanımlanır. Bu nedenle, genetik algoritma gibi evrimsel optimizasyon yöntemlerine göre programlanması nispeten daha kolaydır. Hedef fonksiyonunun probleme uygun seçilmesi ise optimizasyonun doğru sonuca yakınsamasında önem taşımaktadır. Maliyet fonksiyonu olarak standart fonksiyonlar kullanılabileceği gibi problemin durumuna göre düzenlenmiş maliyet fonksiyonları da kullanılabilmektedir.

5.3. Analiz Yöntemi

5.3.1. Geçiş cevabı analizi

Kontrol sistemlerinin analizinde ve tasarımında, kontrol başarısının belirlenebilmesi için sistem performansının ölçülmesi gerekir. Bu amaçla kontrol sistemine, zamana göre basit değişen temel bazı fonksiyonlar uygulanır. Bu fonksiyonlar birim adım fonksiyonu, rampa fonksiyonu, ivme fonksiyonu ya da birim darbe fonksiyonu

olabilir. Sistemin bu fonksiyonlara karşı cevabı, zaman ekseninde o sisteme ait geçiş ve sürekli durum davranışları hakkında bilgiler içerir.



Şekil 5.2. Birim adım cevabı geçiş analizi parametreleri.

Sistemin geçiş davranışı, birim adım fonksiyonu kullanılarak elde edilir (Şekil 5.2) ve sistemin, sürekli duruma geçmeden önceki ve sürekli duruma geçişi esnasındaki dinamik performansını ortaya koyar. Bu analizde, geçiş cevabı karakteristikleri olarak gecikme süresi, yükselme (t_r) ve düşme zamanları, tepe noktaya ulaşma zamanı (t_p), maksimum aşım (M_p) ve oturma zamanı (t_s) ölçülür ya da hesaplanır.

Osilasyonların yok edilemediği belirli uygulamalar hariçinde, kontrol sisteminin geçiş cevabının yeterince hızlı ve yeterli miktarda sönümlü olması istenir [34]. Bu tez çalışmasında, sistem frekansının ve ara-bağlantı hattı güç değişiminin en az sapma ile anma değerine ulaşması istenen sistem çıkışı olarak kabul edildiğinden maksimum aşım değeri ölçüm kriteri olarak alınmıştır.

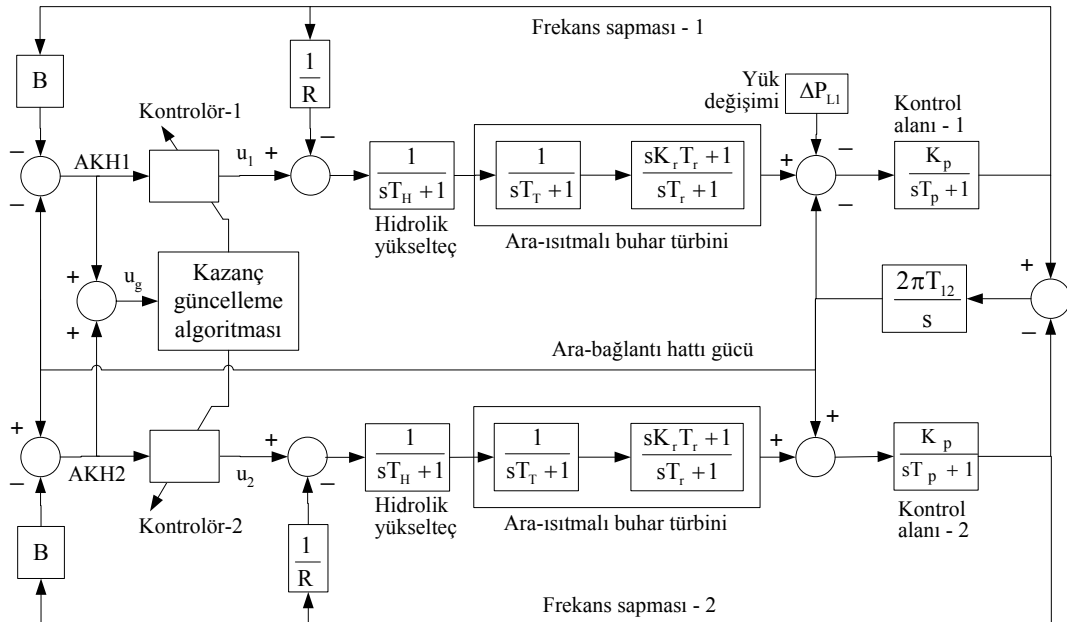
1

M_p

6. ARAŞTIRMA BULGULARI

6.1. Enterkonnekte Güç Sistemi Modeli

Bu bölümde; bir enterkonnekte güç sisteminin yük-frekans kontrolünde, sürü zekasına dayalı optimizasyon algoritmalarının kontrol performansı üzerine etkisi MATLAB simülasyonları kullanılarak incelenmiştir. Simülasyonlarda kullanılan enterkonnekte sistem modeli için ikinci bölümde anlatılan doğrusal sistem modellemesi temel alınmış ve bu amaçla, ara-ısıtmalı buhar türbini içeren iki kontrol alanına sahip bir enterkonnekte sistemin doğrusal modeli oluşturulmuştur. Modelde, literatür ile karşılaştırılabilmesi amacıyla her iki kontrol alanının da birbirine eşit ve Çizelge 6.1’de belirtilen parametrelere sahip olduğu kabul edilmiştir [4]. Sistemin tüm güç parametreleri p.u. değerinde alınmıştır. Enterkonnekte sistem modelinin blok şeması Şekil 6.1’de, MATLAB/Simulink [42] modeli EK-1’de ve optimizasyon algoritmalarına ait yazılım kodları EK-2, EK-3 ve EK-4’te gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Çalışmada kullanılan enterkonnekte sistem modeli.

Sistemde kontrolör olarak kazanç güncellemeli PI ve PID-kontrolörler tasarlanmıştır;

kazanç güncelleme işlemi için Yapay Arı Kolonisi ve Parçacık Sürüşü optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. Çalışma iki safhaya ayrılmıştır. Öncelikle, Yapay Arı Kolonisi algoritmasının enterkonnekte güç sisteminin yük-frekans kontrolü üzerindeki performansını literatürle karşılaştırarak belirleyebilmek amacıyla PI-kontrolör ele alınmış; ardından, sistemin geçiş cevabının iyileştirilmesi ve kontrol dayanıklılığının belirlenebilmesi amacıyla PID-kontrolör tasarımı yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki bölümlerde incelenmiştir.

Çizelge 6.1. Modelde kullanılan güç sistem parametreleri [4].

<i>Parametre Simgesi</i>	<i>Parametrenin Adı</i>	<i>Parametrenin Değeri</i>
T_H	Hidrolik zaman sabiti	0,08 s
T_T	Türbin zaman sabiti	0,3 s
T_r	Ara-ısıtma zaman sabiti	10 s
T_{12}	Senkronizasyon sabiti	0,086
K_r	Ara-ısıtma kazancı	0,5
T_p	Kontrol alanı zaman sabiti	20 s
K_p	Kontrol alanı kazancı	120
R	Regülasyon sabiti	2,4 Hz/MW
B	Frekans kutuplama sabiti	0,425 MW/Hz

6.2. Yapay Arı Kolonisi Algoritmasının PI-Kontrol Tabanlı Güç Sistemi Üzerindeki Ayar Performansının Parçacık Sürüşü Algoritması ile Karşılaştırılması

Çalışmanın ilk safhasında; Yapay Arı Kolonisi algoritması ile PI-kontrolör tasarımı yapılmış ve algoritmanın güç sistemi üzerindeki ayar performansı, Abdel-Magic ve Abido'nun literatürde mevcut çalışmaları [9] elde ettikleri sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Tasarımda, kontrolör girişine beslenecek hata sinyalinin ve kazanç güncelleme algoritmasına beslenecek güncelleme bilgisinin Eş. 3.5'te gösterilen AKH olduğu, kontrolör çıkışında ise Eş. 5.2'de belirtilen kontrol sinyalinin üretileceği öngörülmüştür.

Yukarıda belirtilen kaynakta, araştırmacılar Çizelge 3.1'de belirtilen parametreler ile Şekil 3.1'de gösterilen enterkonnekte sistem modelini kullanmışlardır. Sisteme, kontrol amacıyla bir PI-kontrolör uygulamışlar, kontrolörün kazançlarını Parçacık

Sürüsü algoritması ile ayarlamışlardır. Optimizasyonda maliyet fonksiyonu olarak Hatanın Karelerinin İntegrali (HKİ) (Integral of Square of Error - ISE) (Eş. 6.1) ve Hatanın Zamanla çarpılmış Mutlak değerlerinin İntegrali (HZMİ) (Integral of Time multiplied Absolute of Error - ITAE) (Eş. 6.2) fonksiyonlarını kullanmışlardır [5]. Bu çalışmada, yukarıda sözü edilen kaynaktan daha iyi sonuç verdiği belirtilen HZMİ fonksiyonu ile elde edilen sonuçlar kullanılmıştır.

$$HKİ = \int_0^{\infty} e^2 .dt \quad (6.1)$$

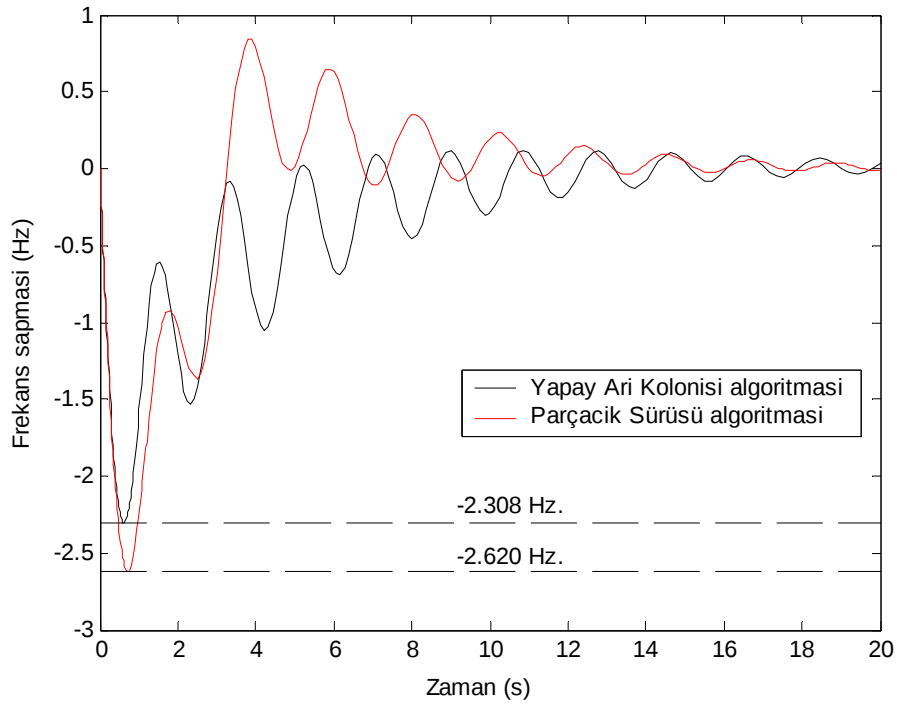
$$HZMİ = \int_0^{\infty} t.|e|.dt \quad (6.2)$$

Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar ile literatürde elde edilen sonuçların karşılaştırılması Şekil 6.2’de ve Şekil 6.3’de gösterilmiştir. Ayrıca elde edilen optimum kontrolör parametreleri Çizelge 6.2’de gösterilmiştir. Metotların karşılaştırılmasında, Bölüm 5.3.1’de de açıklandığı üzere maksimum aşım değeri, performans kriteri olarak kabul edilmiştir.

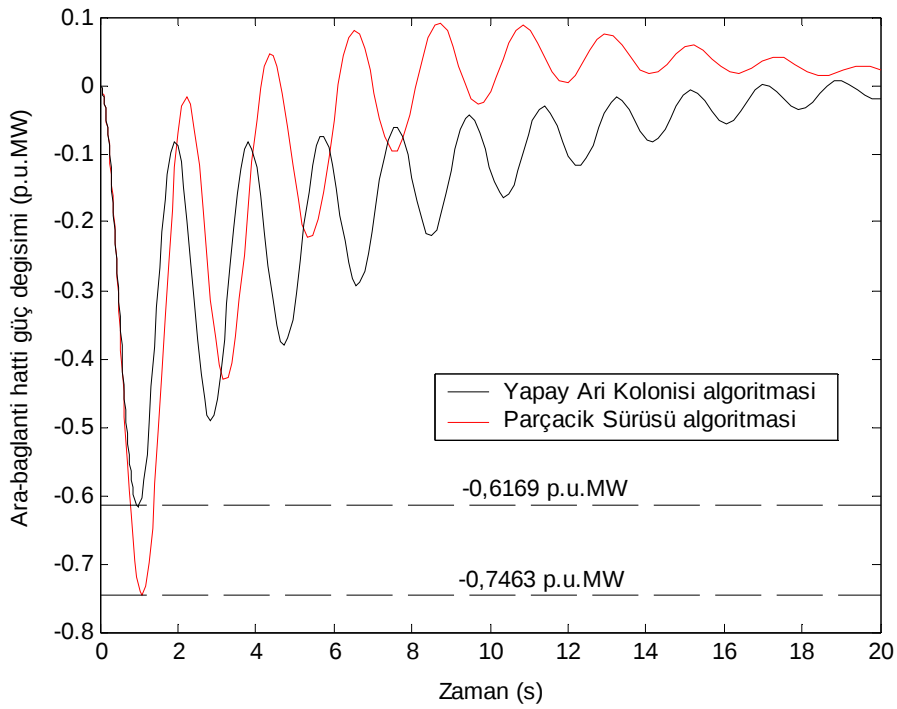
Çizelge 6.2. PI-kontrol uygulamasında elde edilen optimum kontrolör kazançları ve maksimum aşım değerleri.

<i>Kazanç Güncelleme Algoritması</i>	<i>PI-Kontrolör Kazançları</i>		<i>Maksimum Aşım</i>	
	<i>K_p</i>	<i>K_i</i>	<i>ΔP_{ara} (p.u.MW)</i>	<i>Δf₁ (Hz)</i>
Yapay Arı Kolonisi	0,6011	0,2017	-0,6169	-2,308
Parçacık Sürüsü [Abdel-Magid ve Abido, 2003]	-0,0360	0,4900	-0,7463	-2,620

Çizelge 6.2, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3’den de görüldüğü gibi aynı yük altında (1 p.u.MW), Yapay Arı Kolonisi algoritması ile optimize edilen PI-kontrolün geçiş cevabı analizinden elde edilen sonuçlar literatür ile karşılaştırıldığı zaman frekans sapması aşımı için %11,90, ara-bağlantı hattı güç değişimi aşımı için %17,34 oranında azalma sağlandığı görülmüştür.



Şekil 6.2. PI-kontrol ile elde edilen frekans sapması eğrilerinin karşılaştırılması.



Şekil 6.3. PI-kontrolör ile elde edilen ara-bağlantı hattı güç değişimi eğrilerinin karşılaştırılması.

Buna göre, Yapay Arı Kolonisi algoritması anma frekansının ve ara-bağlantı hattı gücünün daha az sapmasını sağlamıştır. Bu sonucun; Yapay Arı Kolonisi algoritmasının arama performansının, Parçacık Sürüsü algoritmasına göre üstünlüğünden kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Zira Parçacık Sürüsü algoritmasında arama işlemi, bir iterasyon süresinde tek bir sürü ile bir kez gerçekleştirilirken; Yapay Arı Kolonisi algoritmasında arama işlemi, bir iterasyon süresi içinde işçi arı sürüsü, gözcü arı sürüsü ve kâşif arı sürüsü ile ardışık olarak üç kez yapılmaktadır. Ayrıca, Parçacık Sürüsü algoritmasında yerel ve global arama işlemleri tek bir güncelleme formülü içerisinde birleşik yapılırken; Yapay Arı Kolonisi algoritması ile bir iterasyon süresinde işçi ve gözcü arılar ile yerel, kâşif arılar ile global aramalar ayrı işlemler olarak gerçekleştirilmektedir.

Bununla beraber; eğrilerde oluşan sönümlü osilasyonların, model sistemde olduğu gibi çok mertebeli proseslerin kontrolünde PI-kontrolün sınırlı geçiş cevabı performansı nedeniyle meydana geldiği değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak; Yapay Arı Kolonisi algoritması enterkonnekte güç sistemlerinin yük-frekans kontrolüne, MATLAB simülasyonları kullanılarak başarıyla uygulanmıştır. Algoritmanın, kontrol parametrelerini arama performansının, aynı tür bir optimizasyon algoritması olan Parçacık Sürüsü algoritması ile karşılaştırıldığında daha başarılı olduğu gözlenmiştir.

6.3. Yapay Arı Kolonisi Algoritmasının Kontrol Dayanıklılığına Etkisinin PID-Kontrol Tabanlı Güç Sistemi Üzerinde İncelenmesi

Çalışmanın ikinci safhasında; PI-kontrol ile elde edilen geçiş cevaplarında meydana gelen sönümlü osilasyonların, Bölüm 5.1.2’de açıklandığı gibi kontrole bir türev elemanı eklenerek giderilebileceği değerlendirilmiş ve bu amaçla, yine Yapay Arı Kolonisi algoritması kullanılarak bir PID-kontrolör tasarımı yapılmıştır. Kontrolör girişine beslenecek olan hata sinyalinin ve kazanç güncelleme algoritmasına beslenecek olan güncelleme bilgisinin Eş. 3.5’te gösterilen AKH olduğu, kontrol çıkışında ise Eş. 5.4’da belirtilen kontrol sinyalinin üretileceği öngörülmüştür.

PID kontrol ile elde edilen sonuçlar, kontrol dayanıklılığının belirlenmesi amacıyla, 0,01 p.u.MW yük uygulanarak, yükün ve güç sistem parametrelerinin $\pm\%50$ değişim aralığında ve optimizasyon algoritmasında farklı maliyet fonksiyonları kullanılarak analiz edilmiş; frekans sapması ve ara-bağlantı hattı güç değişimi eğrileri ile maksimum aşım ve oturma zamanı değerleri incelenmiştir.

6.3.1. Anma Parametreleri Kullanılarak Elde Edilen Sistem Cevabının İncelenmesi

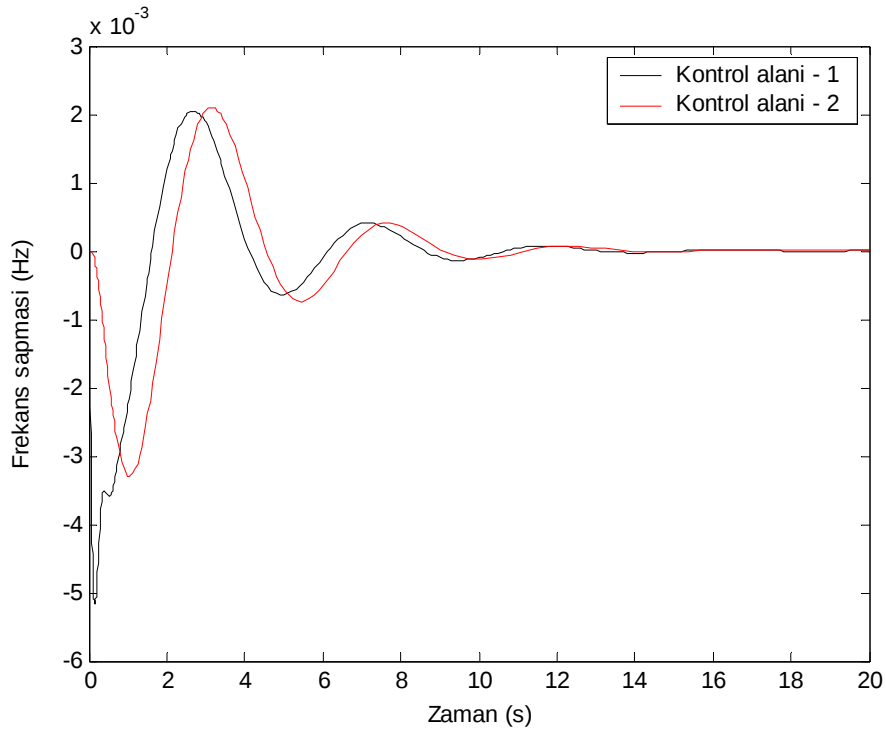
Sistemin anma parametrelerinde yani normal çalışma koşullarında, PID-kontrolör kullanılarak elde edilen birinci ve ikinci kontrol alanlarına ait frekans sapması ve ara-bağlantı hattı güç değişimi sonuçları Çizelge 6.3 ile Şekil 6.4 ve Şekil 6.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.3. Sistemin anma parametreleri ile elde edilen optimum PID-kontrolör kazançları, frekans sapması ve ara-bağlantı hattı güç değişimine ait maksimum aşım ve oturma zamanı (%0,005 bant) değerleri.

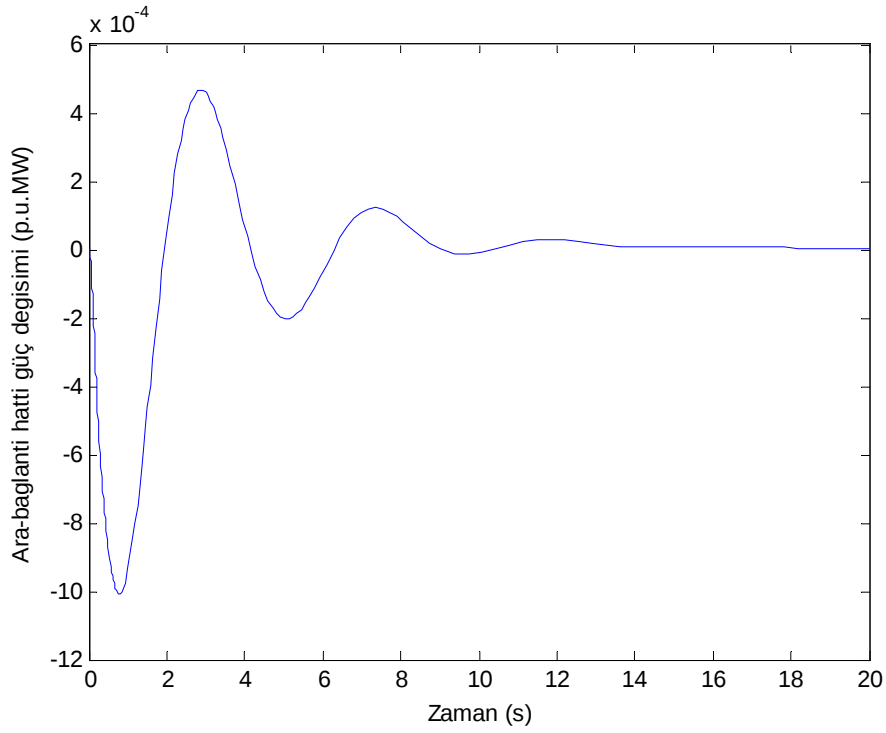
	<i>Oturma zamanı</i>	<i>Maks. aşım</i>	<i>PID-kontrolör kazançları</i>					
			K_{p1}	T_{i1}	T_{d1}	K_{p2}	T_{i2}	T_{d2}
Δf_1	12,36	-0,005179	1,966	0,205	2,000	0,710	1,040	1,045
Δf_2	12,80	-0,003295						
ΔP_{ara}	8,42	-0,001008						

Eğrilerden de görüldüğü gibi sistemin geçiş cevabı PID-kontrolör kullanılarak Bölüm 5.1.2’de açıklanan sebepler nedeniyle iyileştirilmiş, PI-kontrolörün yüksek mertebeli sistemlerin kontrolündeki sınırlı performansı nedeniyle ortaya çıkan sönümlü osilasyonlar ve aşım azaltılmıştır. Buna bağlı olarak, sistemin daha kısa sürede sürekli duruma geçebildiği gözlenmiştir.

Ayrıca, ara-bağlantı hattından akan ve istenmeyen güç değişiminin de aşım miktarı azalmış, bu sayede ani yük değişimlerinde ara-bağlantı hattından daha az miktarda güç aktarımı yapılabileceği değerlendirilmiştir.



Şekil 6.4. Sistemin anma parametrelerinde PID-kontrolör ile elde edilen birinci ve ikinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri.



Şekil 6.5. Sistemin anma parametrelerinde PID-kontrolör ile elde edilen ara-bağlantı hattı güç değişimi eğrisi.

Bununla beraber, birinci kontrol alanında frekans sapması aşımının ikinci kontrol alanına göre daha fazla olmasının sebebinin, yük talebinin birinci kontrol alanına uygulanmış olması nedeniyle, Bölüm 3.1’de açıklandığı gibi birinci kontrol alanının ilk anda sistemi dengeye getirmek için daha fazla kinetik enerji harcamasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

6.3.2. Sistem Yükünün $\pm\%50$ Değişim Aralığında Elde Edilen Sistem Cevabının İncelenmesi

Bu bölümde; Yapay Arı Kolonisi algoritmasının PID-kontrol parametrelerini ayar yeteneği, sistemdeki yük değişimleri için incelenmiştir. Yük talebi birim adım fonksiyonu ile modellenmiş ve birinci kontrol alanına uygulanmıştır. Normal şartlarda sistemden çekilen yükün 0,01 p.u.MW olduğu kabul edilmiştir. Sistem dayanıklılığının belirlenmesi için yük $\pm\%50$ aralığında değiştirilerek sisteme ayrı ayrı uygulanmıştır. Elde edilen optimum PID-kontrol parametreleri Çizelge 6.4’de, birinci ve ikinci kontrol alanları için frekans sapması eğrileri Şekil 6.6 ile Şekil 6.7’de ve ara-bağlantı hattı güç değişimi eğrileri Şekil 6.8’de gösterilmiştir. Ayrıca, eğriler için elde edilen maksimum aşım ve oturma zamanları Çizelge 6.5 ve Çizelge 6.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 6.4. Sistem yükünün $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen optimum PID-kontrolör kazançları.

			<i>PID-kontrolör kazançları</i>					
			K_{p1}	T_{i1}	T_{d1}	K_{p2}	T_{i2}	T_{d2}
ΔP_L 0,01 p.u.	$+\%50$	0,015 p.u.	1,674	0,590	1,865	1,917	1,095	0,863
	$+\%25$	0,0125 p.u.	1,548	0,100	1,660	0,323	1,968	2,000
	$-\%25$	0,0075 p.u.	2,000	0,456	1,192	0,592	0,759	1,305
	$-\%50$	0,005 p.u.	2,000	0,196	2,000	0,986	2,000	2,000

Sonuçlardan da görüldüğü gibi sistemin geçiş cevabında, ΔP_L yükünün artışı ile frekans sapması ve ara-bağlantı hattı güç değişimi eğrilerinin maksimum aşımları artma eğilimine girmiştir. Bu sonuç, genel olarak Eş. 4.15’de tanımlanan yük değişimi ile frekans sapması arasındaki bağlantıyı doğrulamaktadır. Bununla birlikte,

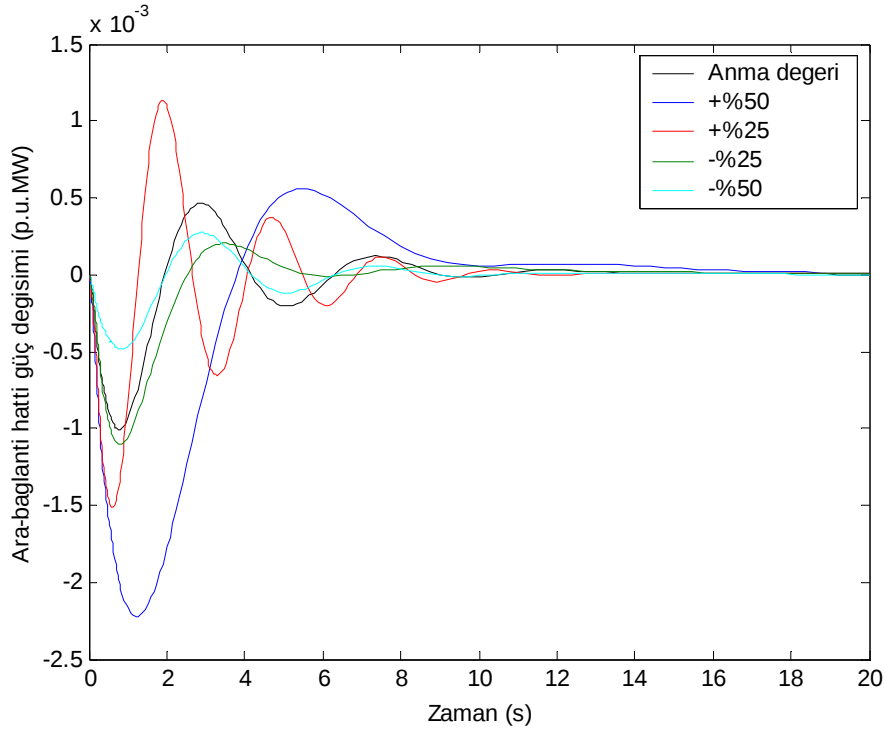
yükün uygulanmasıyla birlikte gerek frekans sapması gerekse de ara-bağlantı hattından akan istenmeyen güç değişimi, PID-kontrolör tarafından yükün miktarına bağlı kalmaksızın, yaklaşık 10 s gibi bir sürede sıfırlanmıştır. Sonuç olarak; güç sistemi, Çizelge 6.6'da da belirtildiği gibi yükün $\pm\%50$ değişiminde birinci kontrol alanı frekansı için -0,008996 Hz ile -0,002563 Hz sapma aralığında, ikinci kontrol alanı frekansı için -0,006581 Hz ile -0,001390 Hz sapma aralığında ve ara-bağlantı hattı güç değişimi için -0,002223 p.u.MW ile -0,004863 p.u.MW aralığında kontrol edilebilmiştir. Bununla birlikte, yükün %25 ile %50 artışı arasında aşımın artış hızında da artma gözlenmiştir. Bu durum, tasarlanan sistemin kontrol sınırı olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 6.5. Sistem yükünün $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen optimum frekans sapmasına ait maksimum aşım ve oturma zamanı değerleri.

			<i>Oturma zamanı (s)</i> <i>(%0,005 bant için)</i>	<i>Maksimum aşım (Hz)</i>
Birinci kontrol alanı frekans sapması için				
ΔP_L 0,01 p.u.	+%50	0,015 p.u.	15,27	-0,008996
	+%25	0,0125 p.u.	10,59	-0,008375
	-%25	0,0075 p.u.	10,30	-0,005260
	-%50	0,005 p.u.	9,35	-0,002563
İkinci kontrol alanı frekans sapması için				
ΔP_L 0,01 p.u.	+%50	0,015 p.u.	16,38	-0,006581
	+%25	0,0125 p.u.	11,27	-0,004573
	-%25	0,0075 p.u.	11,00	-0,003619
	-%50	0,005 p.u.	8,65	-0,001390

Çizelge 6.6. Sistem yükünün $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen optimum ara-bağlantı hattı güç değişimine ait maksimum aşım ve oturma zamanı değerleri.

			<i>Oturma zamanı (s)</i> <i>(%0,005 bant için)</i>	<i>Maksimum aşım</i> <i>(p.u.MW)</i>
ΔP_L 0,01 p.u.	+%50	0,015 p.u.	14,72	-0,002223
	+%25	0,0125 p.u.	8,05	-0,001510
	-%25	0,0075 p.u.	10,05	-0,001102
	-%50	0,005 p.u.	7,65	-0,004863



Şekil 6.8. Sistem yükünün $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen ara-bağlantı hattı güç değişimi eğrileri.

6.3.3. Güç Sistem Parametrelerinin $\pm\%50$ Değişim Aralığında Elde Edilen Sistem Cevabının İncelenmesi

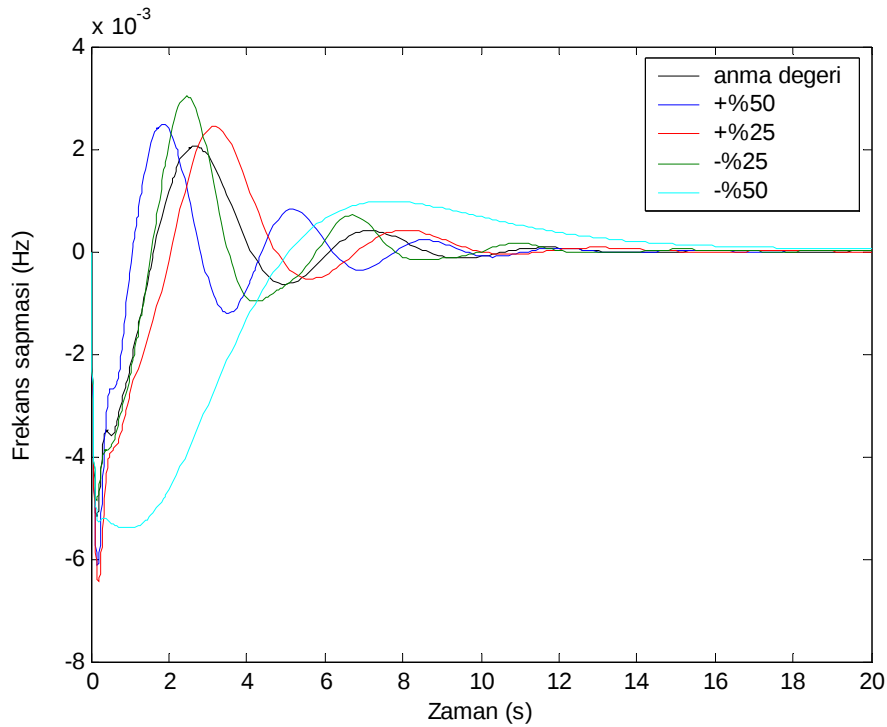
Bu bölümde; Yapay Arı Kolonisi algoritmasının PID-kontrol parametrelerini ayar yeteneği, güç sistem parametrelerinin $\pm\%50$ değişimi için incelenmiştir. Sistemde, herhangi bir sebeple değişmesi muhtemel güç sistem parametreleri olarak T_h hidrolik zaman sabiti, T_t türbin zaman sabiti, T_r türbin ara-ısıtma zaman sabiti, K_r türbin ara-ısıtma kazancı ve B frekans kutuplama sabiti belirlenmiş ve sisteme ayrı ayrı uygulanmışlardır. Elde edilen optimum PID-kontrol parametreleri Çizelge 6.7’de, birinci ve ikinci kontrol alanları için frekans sapması eğrileri Şekil 6.9, Şekil 6.10, Şekil 6.11, Şekil 6.12, Şekil 6.13, Şekil 6.14, Şekil 6.15, Şekil 6.16, Şekil 6.17 ve Şekil 6.18’de, ara-bağlantı hattı güç değişimi eğrileri Şekil 6.19, Şekil 6.20, Şekil 6.21, Şekil 6.22 ve Şekil 6.23’de gösterilmiştir. Ayrıca, eğriler için elde edilen maksimum aşım ve oturma zamanları Çizelge 6.8, Çizelge 6.9 ve Çizelge 6.10’da gösterilmiştir.

Çizelge 6.7. Güç sistem parametrelerinin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen optimum PID-kontrolör kazançları.

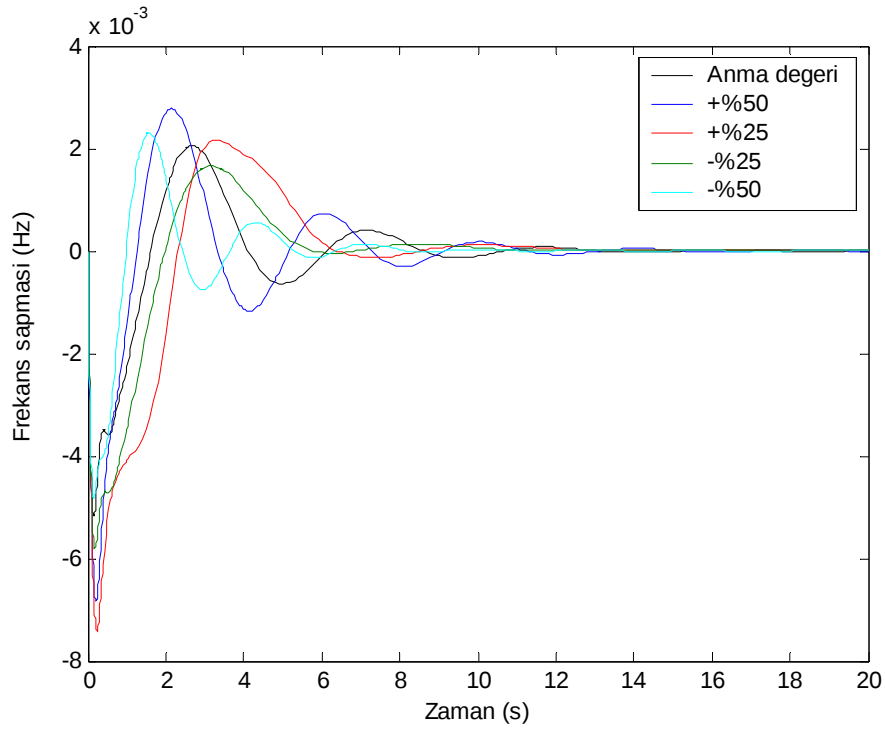
			<i>PID-kontrolör kazançları</i>					
			K_{p1}	T_{i1}	T_{d1}	K_{p2}	T_{i2}	T_{d2}
T_h 0,08 s	+%50	0,12 s	1,954	0,127	1,956	1,511	1,282	1,744
	+%25	0,10 s	1,841	0,275	1,697	0,100	0,869	0,100
	-%25	0,06 s	1,856	0,196	2,000	1,125	0,107	0,798
	-%50	0,04 s	1,921	1,742	1,484	1,267	1,366	0,980
T_t 0,3 s	+%50	0,45 s	1,793	1,162	2,000	1,627	1,603	1,242
	+%25	0,375 s	2,000	0,561	1,327	0,909	1,233	0,124
	-%25	0,225 s	2,000	0,391	1,270	0,814	1,275	1,127
	-%50	0,15 s	1,573	0,100	1,581	0,433	0,842	0,293
T_r 10 s	+%50	15 s	2,000	0,245	1,520	0,688	0,486	1,769
	+%25	12,5 s	1,766	0,177	1,961	0,775	1,543	1,692
	-%25	7,5 s	1,886	0,324	1,530	0,190	1,092	1,474
	-%50	5 s	1,657	0,192	1,661	1,010	1,550	1,993
K_r 0,5	+%50	0,75	2,000	0,253	1,469	0,661	1,758	1,826
	+%25	0,625	1,582	0,100	1,739	0,531	1,657	0,777
	-%25	0,375	2,000	1,307	1,639	1,253	0,444	0,563
	-%50	0,25	1,961	0,100	1,746	1,264	1,850	1,254
B 0,425	+%50	0,6375	2,000	0,100	1,655	1,039	1,580	1,044
	+%25	0,53125	1,971	0,100	1,159	0,995	1,861	0,100
	-%25	0,31875	1,392	0,676	2,000	1,473	1,101	0,965
	-%50	0,2125	2,000	0,517	1,679	1,122	1,606	0,827

Birinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri için sonuçlar incelendiğinde; türbin arasııtma kazancının ve frekans kutuplama sabitinin değerleri yükselirken, aşımın azalma eğiliminde olduğu gözlenmiştir. Frekans kutuplama sabiti için bu durum Eş. 3.5'i doğrulamaktadır. Frekans kutuplama sabiti, temel olarak frekans sapmasını, kontrol alanının AKH'nı hesaplamak amacıyla p.u.MW cinsine çeviren bir sabittir. Bu çalışmada olduğu gibi çeşitli sebeplerle değeri değiştiğinde, Bölüm 3.3'te de açıklandığı gibi, AKH'nın yük-frekans kontrolü tarafından her zaman sıfırda tutulmaya çalışılması nedeniyle frekans sapması da ters yönde değişme eğilimde olacaktır. Eş 3.5'te de görüldüğü gibi AKH'nın sabit değeri için frekans kutuplama sabiti B ve frekans sapması Δf birbirleriyle ters orantılı olacaktır.

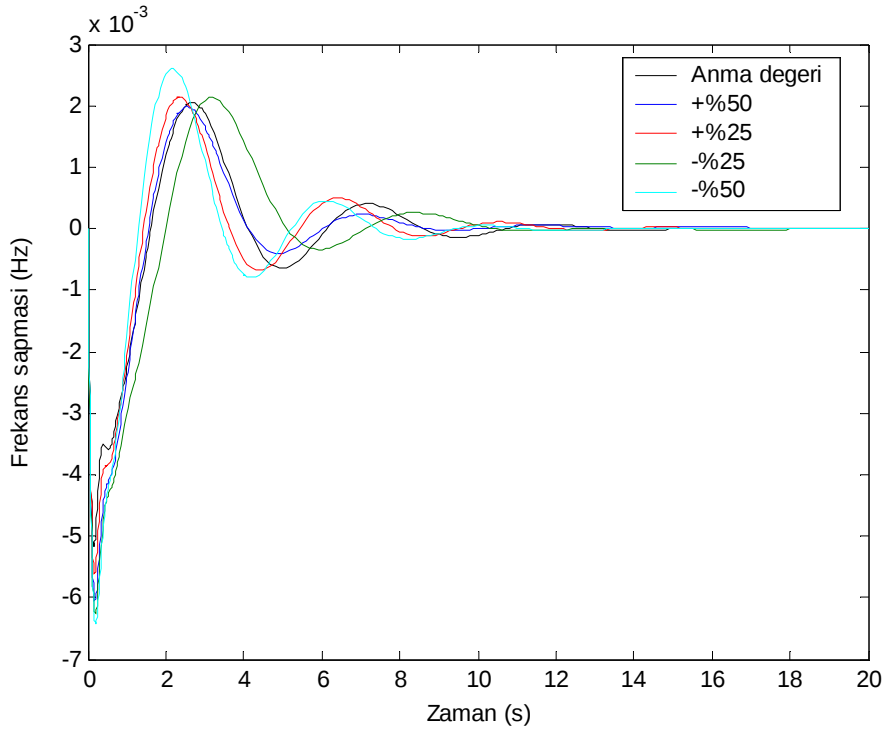
Hidrolik ve türbin zaman sabitlerinin genel olarak, değerleri yükselirken frekans sapması eğrisinde meydana gelen aşımın da artma eğiliminde olduğu gözlenmiştir. Bu durumun, Eş. 4.12'deki kontrol alanı transfer fonksiyonunda frekans sapması ve sistem zaman sabitleri arasında gözlenen doğru orantılı ilişkisi ile örtüştüğü değerlendirilmiştir. Bu zaman sabitleri için ikinci kontrol alanı frekans sapması ve ara-bağlantı hattı güç değişimi eğrilerinde de genel olarak benzer sonuçlar tespit edilmiştir. Türbin ara-ısıtma zaman sabitinin ise transfer fonksiyonunun (Bkz. Şekil 4.2) daha doğrusal olmayan özellik göstermesi nedeniyle, değerinin yükselmesi ya da azalması durumunda, her üç grup eğri için de aşımın artma eğiliminde olduğu gözlenmiştir. Ancak, oturma zamanı için sistem cevabını fazla etkilemediği görülmüştür. Ayrıca; her üç grup sistem cevabı için de eğriler incelendiğinde, +%50 ya da -%50 değişimde, yük değişimine bağlı eğrilerde de görüldüğü gibi, aşımın artma hızında artmalar görülmüştür. Bu nedenle; sistem parametrelerinin değişimi için de $\pm\%50$ değişim aralığı, Yapay Arı Kolonisi algoritmasının model sistem üzerinde PID-kontrolör için optimum ayar aralığı olarak değerlendirilmiştir.



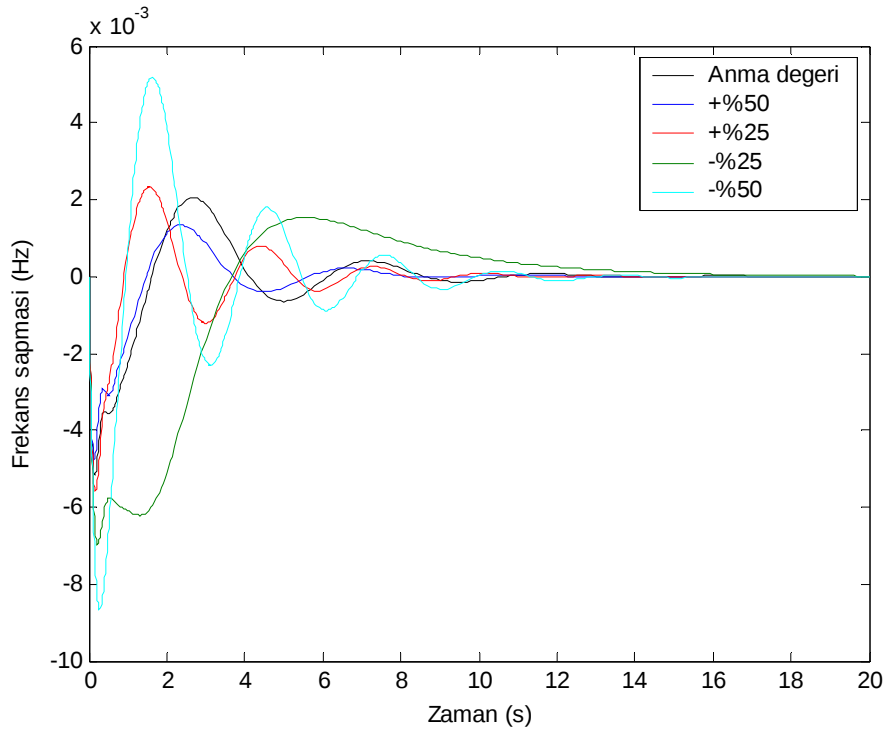
Şekil 6.9. Hidrolik zaman sabiti T_h 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen birinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri.



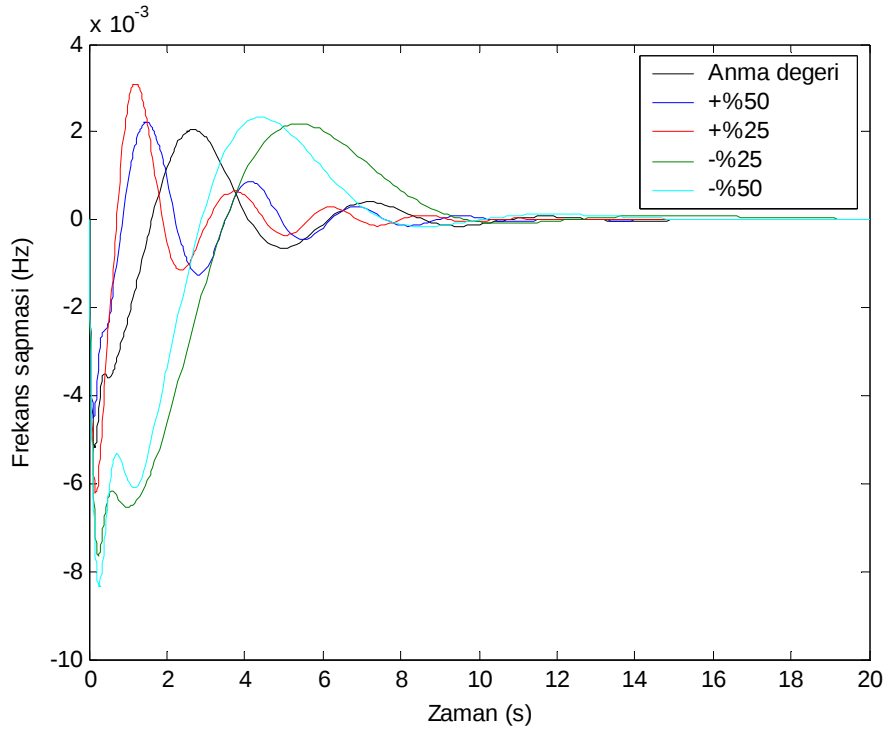
Şekil 6.10. Türbin zaman sabiti T_t 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen birinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri.



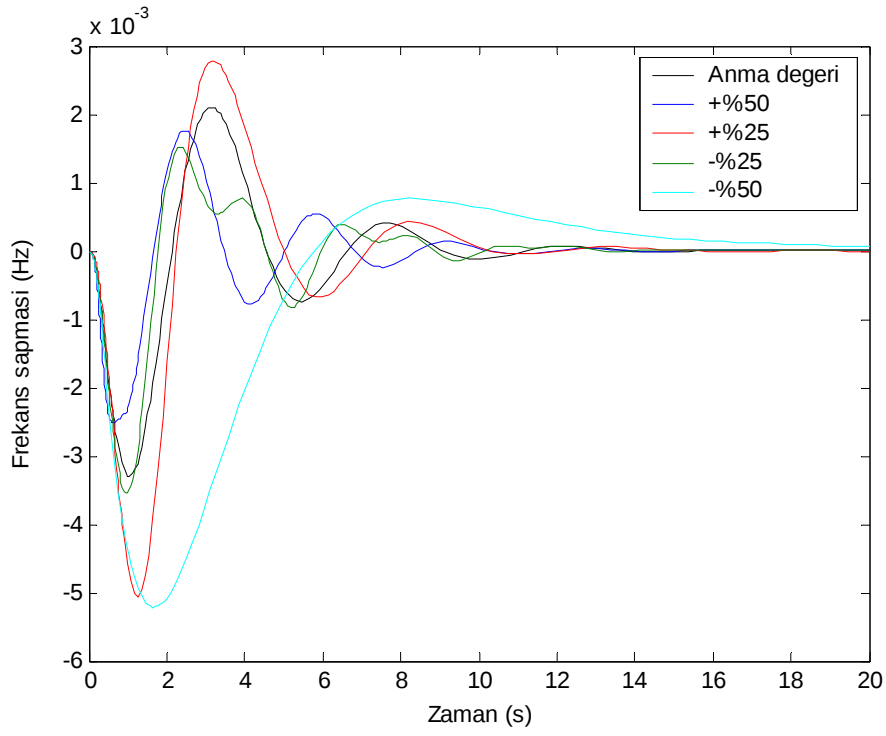
Şekil 6.11. Türbin ara-ısıtma zaman sabiti T_r 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen birinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri.



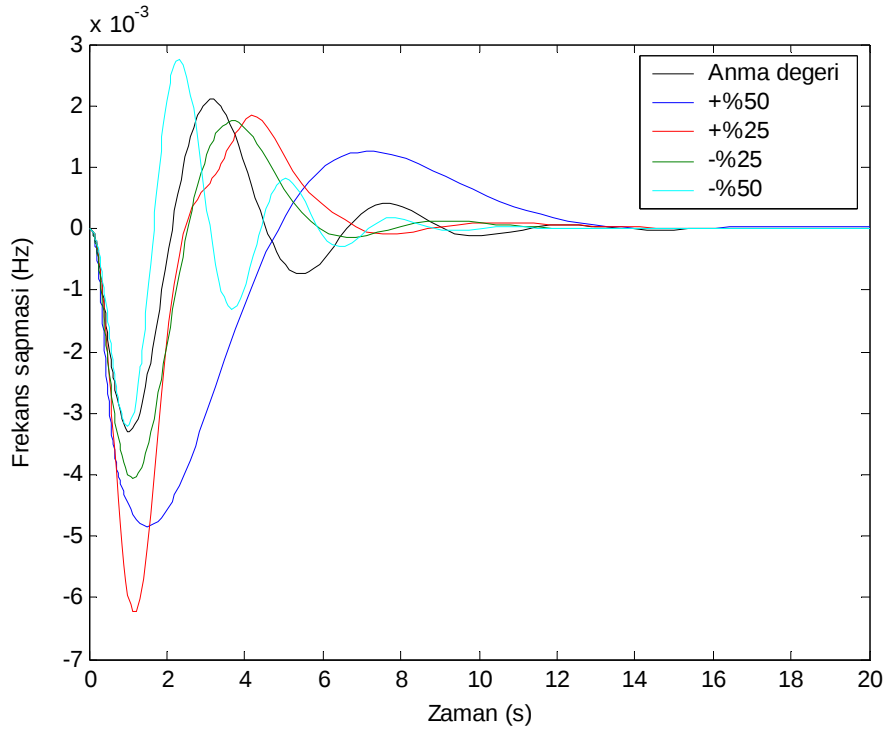
Şekil 6.12. Türbin ara-ısıtma kazancı K_r 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen birinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri.



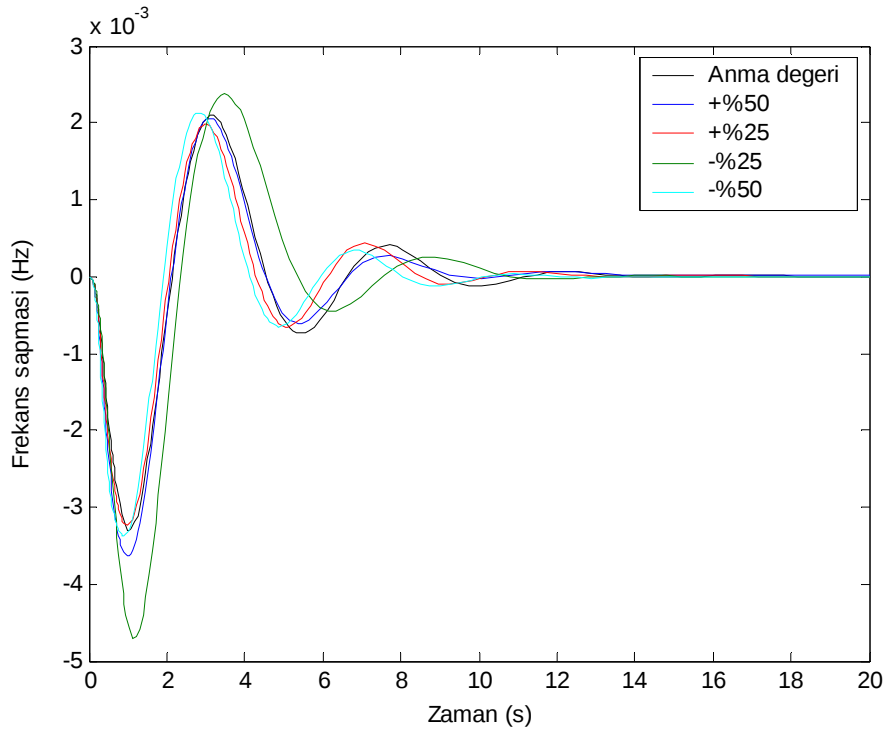
Şekil 6.13. Frekans kutuplama sabiti B 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen birinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri.



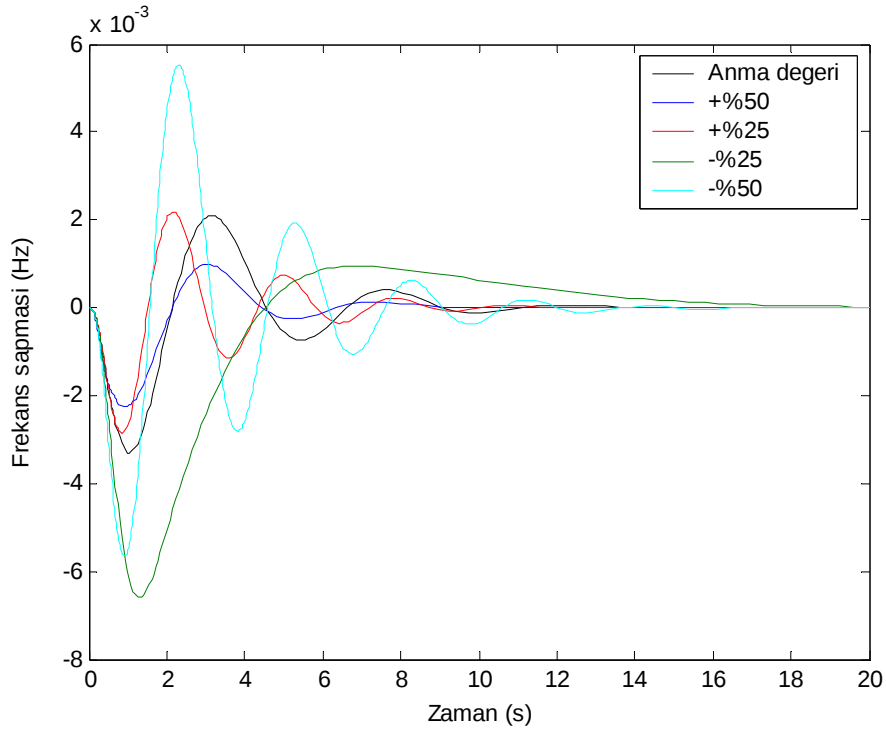
Şekil 6.14. Hidrolik zaman sabiti T_h 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen ikinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri.



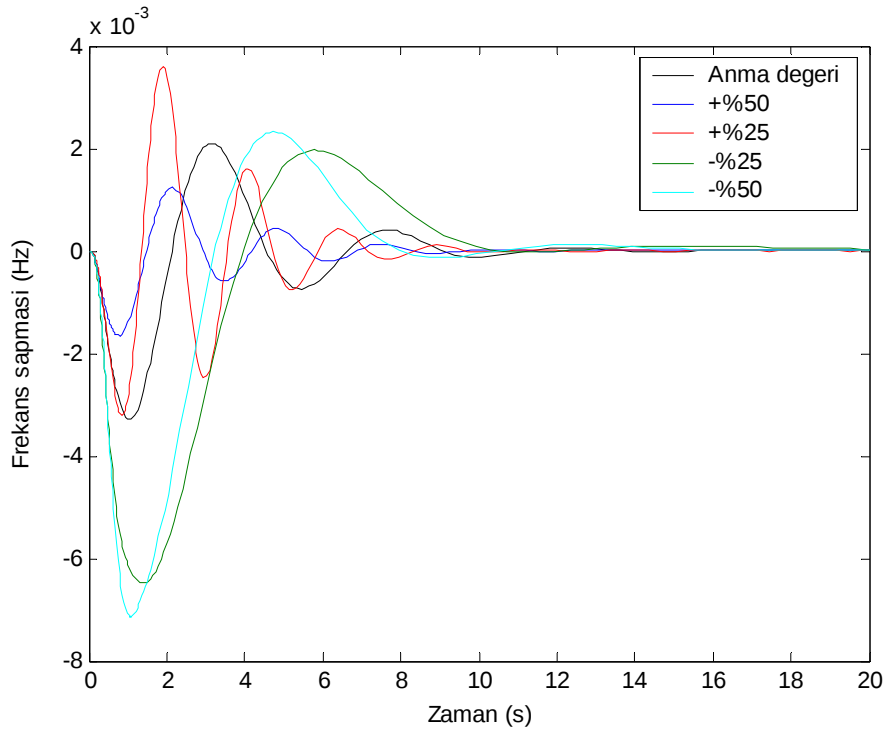
Şekil 6.15. Türbin zaman sabiti T_t 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen ikinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri.



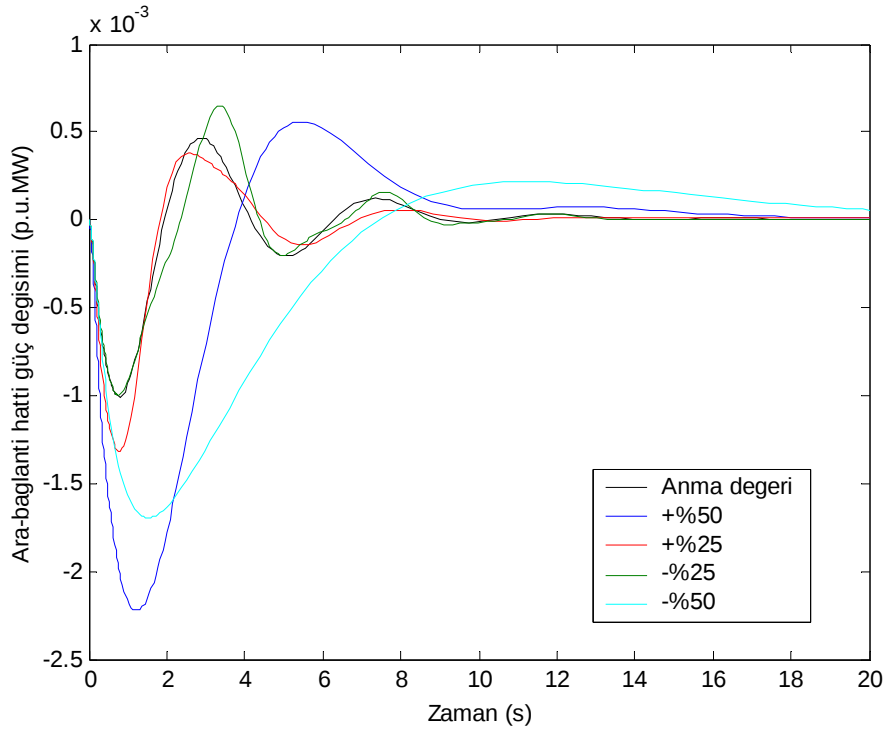
Şekil 6.16. Türbin ara-ısıtma zaman sabiti T_r 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen ikinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri.



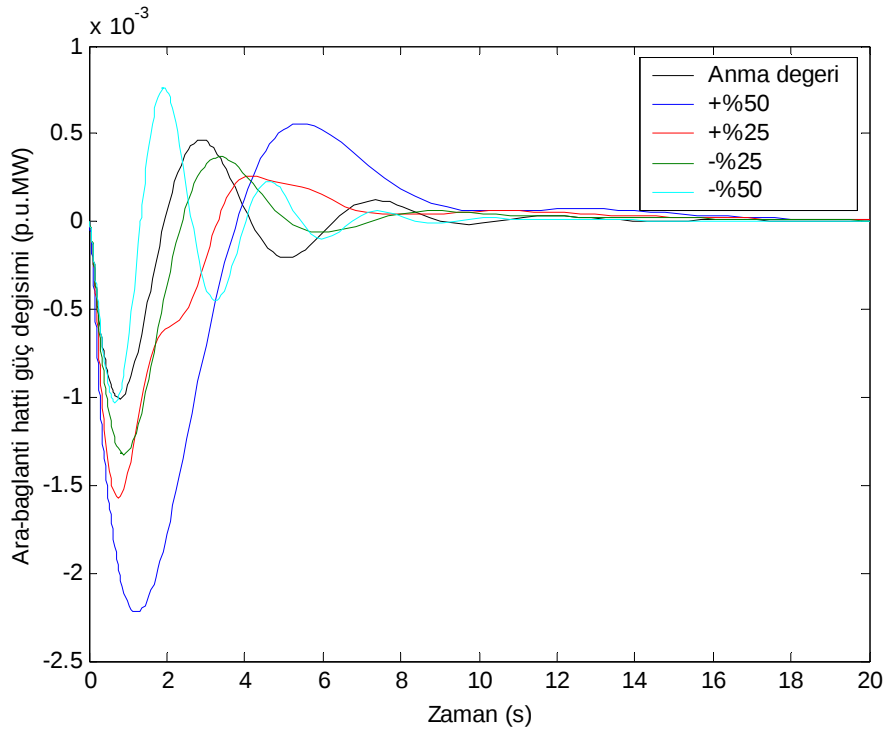
Şekil 6.17. Türbin ara-ısıtma kazancı K_r 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen ikinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri.



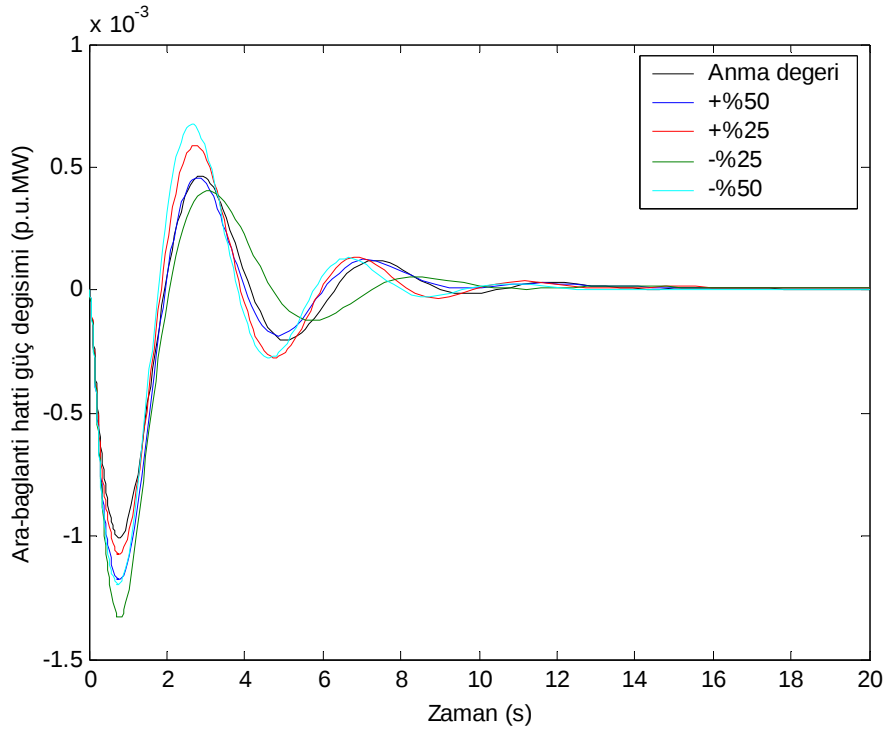
Şekil 6.18. Frekans kutuplama sabiti B 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen ikinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri.



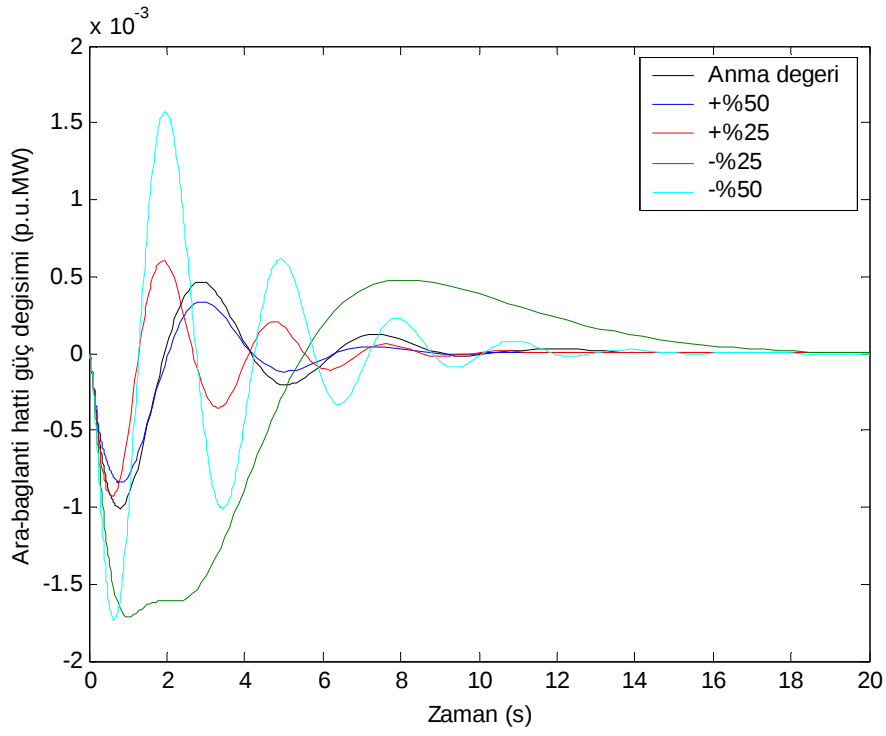
Şekil 6.19. Hidrolik zaman sabiti T_h 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen ara-bağlantı hattı güç değişimi eğrileri.



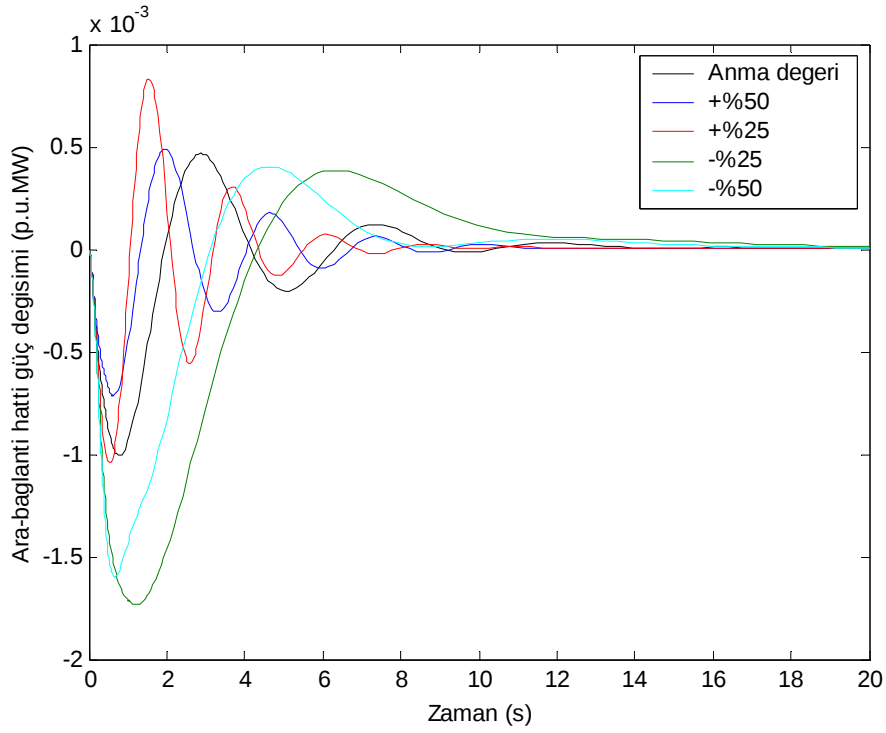
Şekil 6.20. Tübin zaman sabiti T_t 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen ara-bağlantı hattı güç değişimi eğrileri.



Şekil 6.21. Tübin ara-ısıtma zaman sabiti T_r 'nin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen ara-bağlantı hattı güç değişimi eğrileri.



Şekil 6.22. Türlbin ara-ısıtma kazancı K_r 'nin $\pm\%50$ değışim aralığında elde edilen ara-bağlantı hattı güç değışimi eğrileri.



Şekil 6.23. Frekans kutuplama sabiti B 'nin $\pm\%50$ değışim aralığında elde edilen ara-bağlantı hattı güç değışimi eğrileri.

Çizelge 6.8. Güç sistem parametrelerinin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen birinci kontrol alanı frekans sapması maksimum aşım ve oturma zamanı değerleri.

			<i>Oturma zamanı (s)</i> <i>(%0,005 bant için)</i>	<i>Maksimum aşım</i> <i>(Hz)</i>
T_h 0,08 s	+%50	0,12 s	12,38	-0,006118
	+%25	0,10 s	13,82	-0,006440
	-%25	0,06 s	11,76	-0,004865
	-%50	0,04 s	19,10	-0,005403
T_t 0,3 s	+%50	0,45 s	12,57	-0,006822
	+%25	0,375 s	11,85	-0,007404
	-%25	0,225 s	10,20	-0,005821
	-%50	0,15 s	7,88	-0,004809
T_r 10 s	+%50	15 s	12,00	-0,006058
	+%25	12,5 s	11,44	-0,005601
	-%25	7,5 s	10,00	-0,006250
	-%50	5 s	10,42	-0,006420
K_r 0,5	+%50	0,75	7,83	-0,004793
	+%25	0,625	10,63	-0,005587
	-%25	0,375	16,40	-0,006982
	-%50	0,25	13,85	-0,008676
B 0.425	+%50	0,6375	10,05	-0,004505
	+%25	0,53125	9,00	-0,006232
	-%25	0,31875	17,65	-0,007635
	-%50	0,2125	14,10	-0,008361

Çizelge 6.9. Güç sistem parametrelerinin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen ikinci kontrol alanı frekans sapması maksimum aşım ve oturma zamanı değerleri.

			<i>Oturma zamanı (s)</i> <i>(%0,005 bant için)</i>	<i>Maksimum aşım</i> <i>(Hz)</i>
T_h 0,08 s	+%50	0,12 s	9,97	-0,002526
	+%25	0,10 s	13,80	-0,005067
	-%25	0,06 s	12,47	-0,003533
	-%50	0,04 s	22,02	-0,005212
T_t	+%50	0,45 s	13,16	-0,004840

Çizelge 6.9. (Devam) Güç sistem parametrelerinin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen ikinci kontrol alanı frekans sapması maksimum aşım ve oturma zamanı değerleri.

0,3 s	+%25	0,375 s	12,52	-0,006222
	-%25	0,225 s	10,82	-0,004059
	-%50	0,15 s	8,56	-0,003214
T_r 10 s	+%50	15 s	12,64	-0,003629
	+%25	12,5 s	15,94	-0,003234
	-%25	7,5 s	10,40	-0,004704
	-%50	5 s	7,89	-0,003369
K_r 0,5	+%50	0,75	8,52	-0,002260
	+%25	0,625	10,85	-0,002853
	-%25	0,375	17,65	-0,006586
	-%50	0,25	13,35	-0,005654
B 0.425	+%50	0,6375	8,98	-0,001651
	+%25	0,53125	9,38	-0,003196
	-%25	0,31875	18,55	-0,006489
	-%50	0,2125	14,85	-0,007133

Çizelge 6.10. Güç sistem parametrelerinin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen optimum ara-bağlantı hattı güç değişimine ait maksimum aşım ve oturma zamanı değerleri.

			<i>Oturma zamanı (s)</i> <i>(%0,005 bant için)</i>	<i>Maksimum aşım</i> <i>(p.u.MW)</i>
T_h 0,08 s	+%50	0,12 s	9,52	-0,008844
	+%25	0,10 s	8,45	-0,001317
	-%25	0,06 s	8,36	-0,009975
	-%50	0,04 s	20,80	-0,001694
T_t 0,3 s	+%50	0,45 s	16,35	-0,001588
	+%25	0,375 s	12,00	-0,001572
	-%25	0,225 s	9,95	-0,001324
	-%50	0,15 s	7,70	-0,001027
T_r 10 s	+%50	15 s	8,40	-0,001178
	+%25	12,5 s	7,77	-0,001075
	-%25	7,5 s	8,88	-0,001332
	-%50	5 s	12,37	-0,001195

Çizelge 6.10. (Devam) Güç sistem parametrelerinin $\pm\%50$ değişim aralığında elde edilen optimum ara-bağlantı hattı güç değişimine ait maksimum aşım ve oturma zamanı değerleri.

K_r 0,5	+%50	0,75	16,25	-0,008394
	+%25	0,625	14,15	-0,009329
	-%25	0,375	15,95	-0,001714
	-%50	0,25	11,44	-0,001734
B 0.425	+%50	0,6375	7,70	-0,007157
	+%25	0,53125	6,45	-0,001041
	-%25	0,31875	13,35	-0,001733
	-%50	0,2125	7,63	-0,001599

6.3.4. Farklı Maliyet Fonksiyonları Kullanılarak Elde Edilen Sistem Cevabının İncelenmesi

Bu bölümde; Yapay Arı Kolonisi algoritmasının model sistem üzerinde PID-kontrol parametrelerini ayar yeteneği, optimizasyon algoritmasında kullanılan farklı maliyet fonksiyonları için incelenmiştir. Bu amaçla, algorithmada asıl maliyet fonksiyonu olarak kullanılan HZMİ (Eş. 6.2) fonksiyonunun yerine literatürde mevcut üç adet standart maliyet fonksiyonu olan HKİ (Eş. 6.1), Hatanın Mutlak Değerlerinin İntegrali (HMI) (Integral of Absolute of Error - IAE) (Eş. 6.3) ve Hatanın Zamanla Çarpılmış Karesinin İntegrali (HZKİ) (Integral of Time multiplied Square of Error - ITSE) (Eş. 6.4) fonksiyonları kullanılmıştır[5].

$$HMI = \int_0^{\infty} |e|.dt \quad (6.3)$$

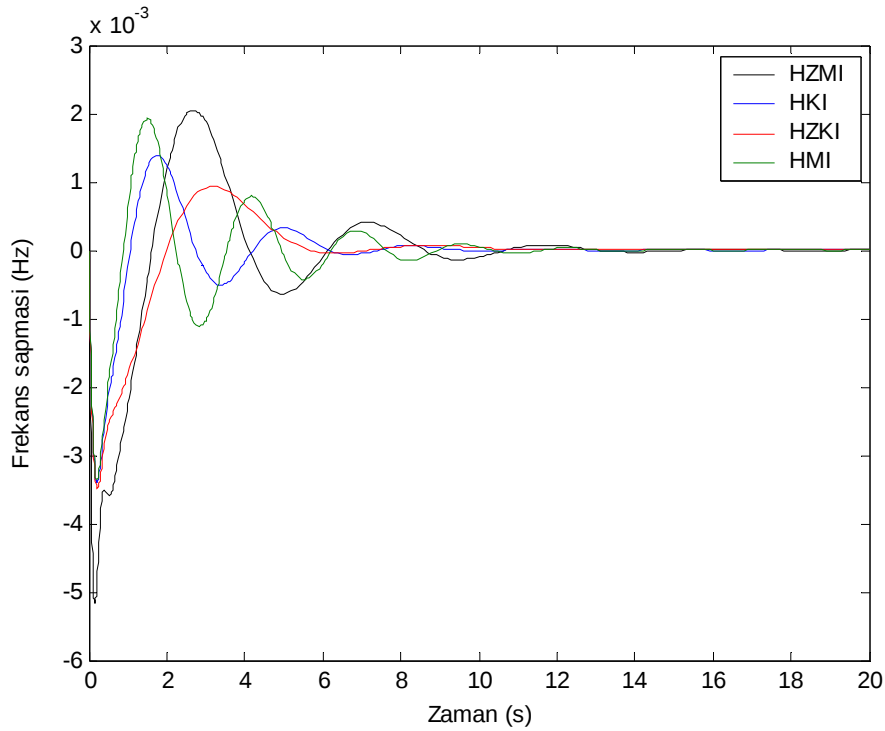
$$HZKI = \int_0^{\infty} t.e^2 .dt \quad (6.4)$$

Belirlenen maliyet fonksiyonları sisteme ayrı ayrı uygulanmıştır. Elde edilen optimum PID-kontrol parametreleri Çizelge 6.11’de, birinci ve ikinci kontrol alanları için frekans sapması eğrileri Şekil 6.24 ve Şekil 6.25’de, ara-bağlantı hattı güç değişimi eğrileri Şekil 6.26’da gösterilmiştir. Ayrıca, eğriler için elde edilen

maksimum aşım ve oturma zamanları Çizelge 6.12 ve Çizelge 6.13’de gösterilmiştir.

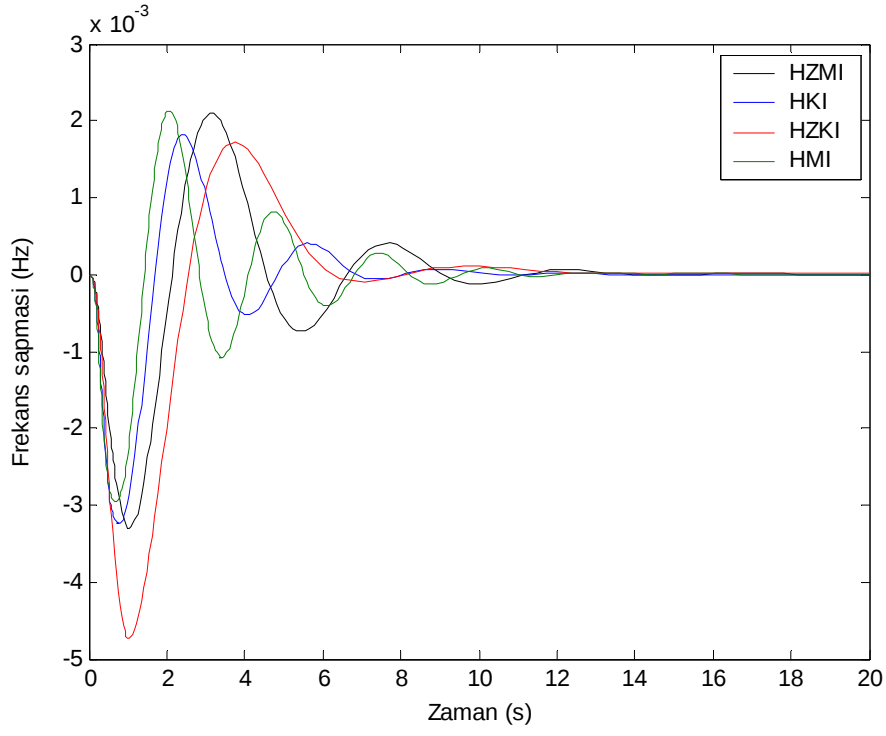
Çizelge 6.11. Farklı maliyet fonksiyonları kullanılarak elde edilen optimum PID-kontrolör kazançları.

	<i>PID-kontrolör kazançları</i>					
	K_{p1}	T_{i1}	T_{d1}	K_{p2}	T_{i2}	T_{d2}
HKİ	1,956	0,173	1,274	1,249	1,754	2,000
HZKİ	2,000	0,436	1,194	1,149	1,430	0,727
HMI	1,609	0,100	1,585	1,755	1,003	1,859

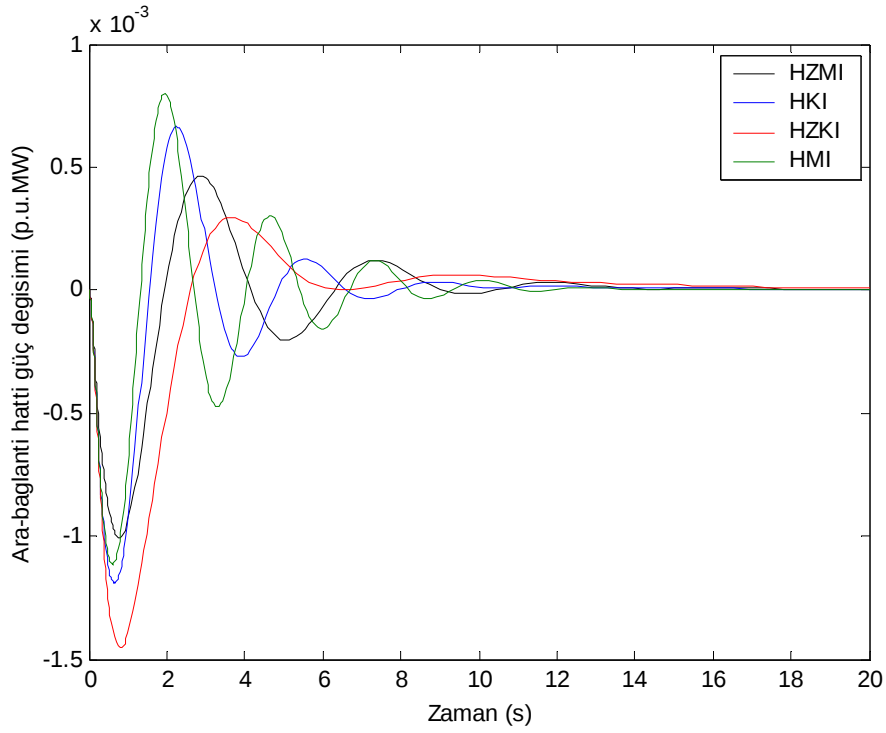


Şekil 6.24. Farklı maliyet fonksiyonları için elde edilen birinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri.

Frekans sapması eğrileri ve ara-bağlantı hattı güç değişimi eğrileri incelendiğinde, genel olarak Yapay Arı Kolonisi algoritmasının PID-kontrolör parametrelerini ayar performansının maliyet fonksiyonuna bağlı olarak değiştiği; ancak, buna rağmen kontrol dayanıklılığının, sistemin normal şartlarda çalışmaya devam etmesi nedeniyle maliyet fonksiyonundan etkilenmediği gözlenmiştir.



Şekil 6.25. Farklı maliyet fonksiyonları için elde edilen ikinci kontrol alanı frekans sapması eğrileri.



Şekil 6.26. Farklı maliyet fonksiyonları için elde edilen ara-bağlantı hattı güç değişimi eğrileri.

Çizelge 6.12. Farklı maliyet fonksiyonları kullanılarak elde edilen optimum frekans sapmasına ait maksimum aşım ve oturma zamanı değerleri.

	<i>Oturma zamanı (s)</i> <i>(%0,005 bant için)</i>	<i>Maksimum aşım</i> <i>(Hz)</i>
Birinci kontrol alanı frekans sapması için		
HKİ	8,72	-0,003396
HZKİ	9,60	-0,003499
HMİ	10,05	-0,003359
İkinci kontrol alanı frekans sapması için		
HKİ	9,54	-0,003241
HZKİ	11,55	-0,004734
HMİ	10,62	-0,002955

Çizelge 6.13. Farklı maliyet fonksiyonları kullanılarak elde edilen optimum ara-bağlantı hattı güç değişimine ait maksimum aşım ve oturma zamanı değerleri.

	<i>Oturma zamanı (s)</i> <i>(%0,005 bant için)</i>	<i>Maksimum aşım</i> <i>(Hz)</i>
HKİ	6,25	-0,001188
HZKİ	10,85	-0,001453
HMİ	7,95	-0,001113

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Frekans kontrolünde karşılaşılan aksaklıklar ve istenmeyen durumlar, Avrupa enterkonnekte sistemine bağlanma çalışmaları 2005 yılından beri devam eden ülkemiz için bu kapsamda, aşılması gereken önemli problemlerin başında gelmektedir. Bu problem, UCTE kriterlerine göre Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği tarafından yükümlülük altına alınmış santrallerimizin katılımıyla oluşan ve tüm yük tevzi alanlarımızı kapsayan güçlü bir yük-frekans kontrolü mekanizmasının kurulması ile aşılabacaktır. Bu konuda, ülkemizde gerek ilgili kurumlarca sahada ve gerekse akademik alanda önemli çalışmalar gerçekleştirilmiş olmakla birlikte, ilgili sistem entegrasyonu sorumlular tarafından yeterli bulunmamaktadır. Bu çalışmada, akademik alanda yapılan önceki çalışmalara katkı sağlayabilmek amacıyla, enterkonnekte sistemlerde yük-frekans kontrolünün sürü zekasına dayalı algoritmalar ile optimizasyonu üzerinde modeller geliştirilmiştir. Bu amaçla; ikincil kontrol mekanizması, sistemden optimum frekans sapması ve optimum ara-bağlantı hattı güç değişimi cevabı elde edilebilmesi için Yapay Arı Kolonisi algoritması kullanılarak MATLAB simülasyon ortamında yeniden tasarlanmış ve algoritmanın, kontrolör parametrelerini ayar performansları incelenmiştir.

Çalışma iki safhada gerçekleştirilmiştir; ilk safhasında, Yapay Arı Kolonisi algoritması ile optimize edilen bir kazanç güncellemeli PI-kontrolör tasarımı yapılarak elde edilen sonuçlar literatürdeki Abdel-Magid ve Abido'nun Parçacık Sürüsü algoritması kullanılarak tasarladığı PI-kontrol sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların karşılaştırılmasında, sistem frekansının ve ara-bağlantı hattı güç değişiminin en az sapma ile anma değerine ulaşması istenen sistem cevabı olarak kabul edilmiş ve maksimum aşım değeri kriter olarak alınmıştır. Karşılaştırma sonucunda; Yapay Arı Kolonisi algoritması kullanılarak tasarlanan sistemde, Parçacık Sürüsü algoritması ile tasarlanan sisteme göre, frekans sapması aşımının %11,90, ara-bağlantı hattı güç değişimi aşımının ise %17,34 oranında azaldığı görülmüştür. Sonuç olarak, Yapay Arı Kolonisi algoritmasının enterkonnekte güç sistemlerinin yük-frekans kontrolüne başarıyla uygulanabildiği ve aynı tür bir

optimizasyon algoritması olan Parçacık Sürüşü algoritması ile karşılaştırıldığında daha optimal sonuç verdiği gözlenmiştir.

İkinci safhada ise yük ve parametre değişimlerine karşı kontrol dayanıklılığının belirlenmesi ve PI-kontrol sonucunda enterkonnekte sistem frekansı ve kontrol alanları arasındaki ara-bağlantı hattı güç değişimi cevaplarında oluşan sönümlü osilasyonların azaltılması amacıyla, Yapay Arı Kolonisi algoritması ile optimize edilen bir kazanç güncellemeli PID-kontrolör tasarlanmış; sistem yükü ve güç sistem parametreleri $\pm\%50$ değişim aralığında, $\%25$ 'lik adımlarla değiştirilerek sisteme uygulanmıştır. Analiz sonucunda; Yapay Arı Kolonisi algoritmasının, PID-kontrolör parametrelerini, $\pm\%50$ aralığında yükün ve sistem parametrelerinin değişiminden etkilenmeden ayarlayabildiği ve bu sayede, tasarlanan kazanç güncellemeli PID-kontrolörün, yükün ve güç sistem parametrelerinin değişimlerinden etkilenmeksizin dayanıklı kontrol sağlayabildiği gözlenmiştir.

Bu tez çalışması ile Yapay Arı Kolonisi algoritmasının, literatürde enterkonnekte sistemlerin yük-frekans kontrolüne ilk kez uygulanması sağlanmıştır. İleride araştırmacılar tarafından bu çalışmanın devamı olarak; Yapay Arı Kolonisi algoritmasının optimal sonuca yakınsama performansının artırılmasına yönelik yeni yöntemler geliştirilebileceği, farklı optimizasyon algoritmalarının üstün yönleri kullanılarak Yapay Arı Kolonisi algoritması ile hibrit algoritmalar tasarlanabileceği ve bu sayede, yük-frekans kontrolünün geçiş cevabının daha da iyileştirilebileceği beklenebilir. Ayrıca, literatüre yeni katılabilecek ve üstün performanslara sahip yeni optimizasyon algoritmalarının ve kontrol yöntemlerinin de mevcut sisteme uygulanması mümkündür. Bu tez çalışmasında tasarlanan adaptif yapılu PI ve PID-kontrolörler farklı proseslere de uygulanabilir.

Yük-frekans kontrolüne yönelik benzer çalışmaların sahada kullanılabilmesi için yapılacak laboratuvar ortamları da, ülkemiz için önemli bir ihtiyacı karşılayacaktır. Bu sebeple, yük-frekans kontrolü konusunda uygulamalı çalışmaların yapılabileceği laboratuvar düzeneklerinin kurulması ülkemizde bu konuda gerçekleştirilen çalışmalara akademik ve pratik ivme kazandıracaktır.

KAYNAKLAR

1. Elgerd, O.I., Fosha, C.E., "Optimum megawatt-frequency control of multi-area electric energy systems", **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 89(4):556-563 (1970).
2. Kundur, P., "Power System Stability And Control", **Mc Graw-Hill Press.**, New York, 581-626 (1993).
3. Weedy, B.M., "Electric Power Systems 3th ed.", **John Wiley&Sons**, USA, 148-172 (1987).
4. Elgerd, O.I., "Electric Energy Systems Theory", **Mc Graw-Hill Press.**, New York, 299-342 (1982).
5. Aström, K.J., Hagglund, T., "PID Controllers", **Instrument Society of America**, New York, 64-70, 232-235 (1995).
6. Karaboğa, D., "An idea based on honey bee swarm for numerical optimization", **Technical Report TR06, Erciyes University**, Turkey, 1-6 (2005).
7. Karaboga, D., Basturk, B., "A powerful and efficient algorithm for numeric optimization: artificial bee colony (abc) algorithm", **Journal Of Global Optimization**, 39(3): 459-471 (2007).
8. Kennedy, J., Eberhart, R.C., "Particles swarm optimization", **IEEE International Conference on Neural Networks**, New York, 1942-1948 (1995).
9. Abdel-Magid, Y.L., Abido, M.A., "AGC tuning of interconnected reheat thermal systems with particle swarm optimization", **10th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems**, United Arab Emirates, 376-379 (2003).
10. Cohn, N., "Some aspects of tie-line bias control on interconnected power systems", **American Institute of Electrical Engineering Transactions**, 75: 1415-1436 (1957).
11. Kumar, I.P., Kothari, D.P., "Recent philosophies of automatic generation control strategies in power systems", **IEEE Transactions on Power Systems**, 20(1): 346-357 (2005).
12. Lee, K.A., Yee, H., Teo, C.Y., "Self-tuning algorithm for automatic generation control in an interconnected power system", **Electric Power Systems Research**, 20(2): 157-165 (1991).
13. Rubaai, A., Udo, V., "Self tuning LFC: Multilevel adaptive approach", **Proceeding of Institution of Electrical Engineering Generation, Transmission, Distribution**, USA, 141(4): 285-290 (1994).

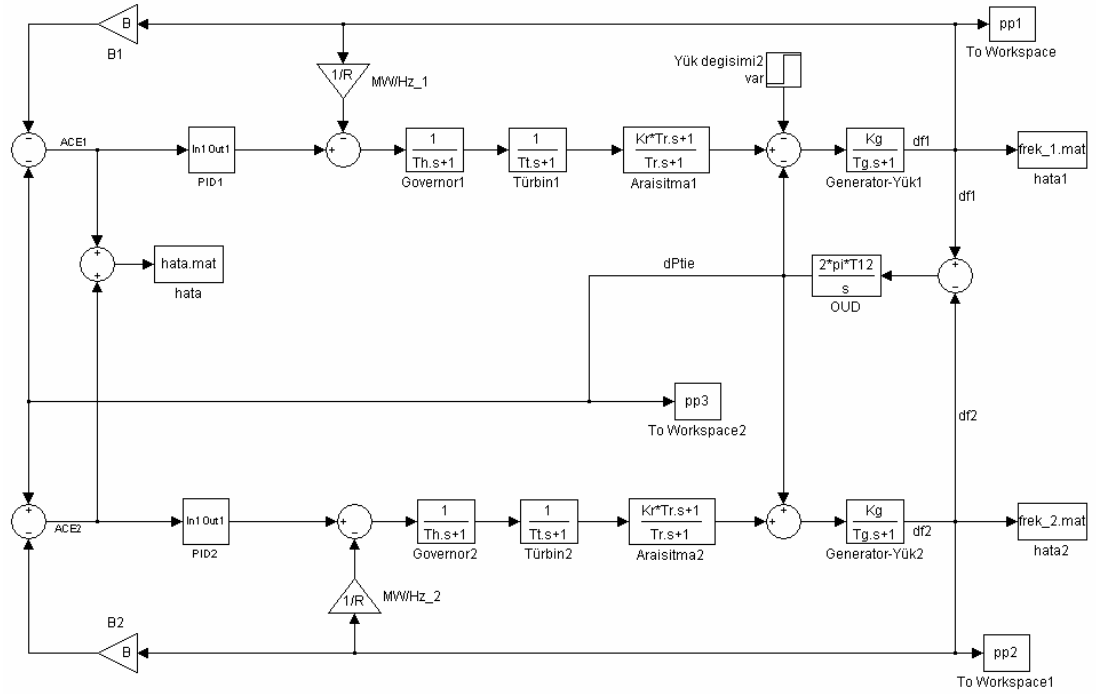
14. Abdel-Magid, Y.L., Dawoud, M.M., “Genetic algorithms applications in load frequency control”, ***Genetic Algorithms In Engineering Systems: Innovation and Applications***, IEEE, 414 (1995).
15. Chang, C.S., Fu, W., “Area load frequency control using fuzzy gain scheduling of PI controllers”, ***Electric Power Systems Research***, 42: 145-152 (1997).
16. Talaq, J., Al-Basri, F., “Adaptive fuzzy gain scheduling for load frequency control”, ***IEEE Transactions On Power Systems***, 14(1): 145-150 (1999).
17. Pinkang, L., Hengjun, Z., Yuyun, L., “Genetic algorithm optimization for AGC of multi-area power systems”, ***IEEE Region 10 Technical Conference On Computers, Communications, Control And Power Engineering***, China, 1818-1821 (2002).
18. Yeşil, E., Güzelkaya, M., Ekşin, I., “Self-tuning fuzzy PID type load and frequency controller”, ***Energy Conversion and Management***, 45(3): 377-390 (2004).
19. Juang, C-F., Lu, C-F., “Power system load frequency control by evolutionary fuzzy PI controller”, ***IEEE International Conference on Fuzzy Systems***, Hungary, 715-719 (2004).
20. Cam, E., Kocaarslan, İ., “A fuzzy gain scheduling PI controller application for an interconnected electrical power system”, ***Electric Power Systems Research***, 73(3): 267-274 (2005).
21. Massiala, M., Ghribi, M., Kaddouri, A., “A two-layered self-tuning fuzzy controller for interconnected power systems”, ***Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering***, Ottawa, 1086-1089 (2006).
22. Taher, S.A., Hemati, R., Abdolalipour, A., Tabie, S.H., “Optimal decentralized load frequency control using HPSO algorithms in deregulated power systems”, ***American Journal of Applied Sciences***, 5(9): 1167-1174 (2008).
23. Pothiya, S., Ngamroo, I., “Optimal fuzzy logic-based PID controller for load frequency control including superconducting magnetic energy storage units”, ***Energy Conversion and Management***, 49: 2833-2838 (2008).
24. Gözde, H., Taplamacioglu, M.C., Kocaarslan, İ., “A swarm optimization based load frequency control application in a two area thermal power system”, ***IEEE International Conference on Electrical and Electronics Engineering***, Bursa, 124-128 (2009).
25. Nanda, J., Mishra, S., Saikia, L.C., “Maiden application of bacterial foraging based optimization technique in multiarea automatic generation control”, ***IEEE Transactions on Power Systems***, 24(2): 602-609 (2009).

26. Gözde, H., Taplamacıoğlu, M.C., Kocaarslan, İ., Şenol, M.A., “Particle swarm optimization based PI-controller design to load-frequency control of a two area reheat thermal power system”, *Journal of Thermal Science and Technology*, 30(1): 13-21 (2010).
27. Bergen, R., Vittal, V., “Power System Analysis 2th ed.”, **Prantice Hall**, USA, 375-400 (2000).
28. İnternet: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi “Kapasite Projeksiyonu 2009” <http://www.teias.gov.tr/> (2009).
29. Yalçın, E., Çam, E., Vardar, T., Lüy, M., “PID kontrolör ile iki bölge güç sistemlerinde yük frekans kontrolünün incelenmesi”, *International Journal of Engineering Research&Development*, 2(4): 67-71 (2010).
30. İnternet: Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu “Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği, 2009” <http://www.epdk.gov.tr/mevzuat/yonetmelik/elektriksebeke.htm> (2009).
31. Gross, A.C., “Power System Analysis”, **John Wiley&Sons**, USA, 491-492 (1986).
32. Çam, E., “Güç sistemlerinde yeni kontrol yöntemlerinin uygulanması”, Doktora Tezi, **Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kırıkkale, 29-30 (2004).
33. IEEE Committee Report, “Dynamic Models for Steam and Hydro Turbines in Power System Studies”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 92(6), 1904-1915 (1973).
34. Ogata, K. “Modern Control Engineering 4th ed.”, **Prentice-Hall Inc.**, USA, 724-725, (2002).
35. Ceylan, A.M., “Çok değişkenli sistemlerde ileri kontrol algoritmalarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 33-35 (2001).
36. Yang, B., Chen, Y., Zhao, Z., “Survey on applications of particle swarm optimization in electric power systems”, *IEEE International Conference on Control and Automation*, China, 481-486 (2007).
37. Reynolds, C.W., “Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model”, *14th Annual Conference On Computer Graphics And Interactive Techniques*, New York, 25-34 (1987).
38. Heppner, F., Grenander, U., “A stochastic nonlinear model for coordinated bird flocks”, *The Ubiquity of Chaos*, Washington, D.C. (1990).

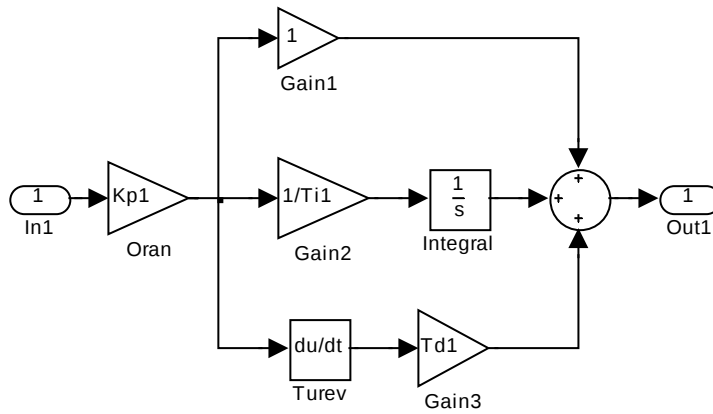
39. Eberhart, R.C., Shi, Y., “A modified particle swarm optimizer”, ***International Conference On Evolutionary Computation***, USA, 69-73 (1998).
40. Clerc, M., “The swarm and the queen: Towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization”, ***Congress on Evolutionary Computation***, USA, 1951-1957 (1999).
41. Chen, J., Ren, Z., Fan, X., “Particle swarm optimization with adaptive mutation and its application research in tuning of PID parameters”, ***1st International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics***, China, 994 (2006).
42. İnternet: MathWorks Inc. “MATLAB&MATLAB/Simulink 6.5” <http://www.MATLAB.com.tr> (2004).

EKLER

EK-1. Elektrik Güç Sisteminin MATLAB/Simulink Modeli



Şekil 1.1. Enterkonnekte güç sistemi MATLAB/Simulink modeli.



Şekil 1.2. PID-kontrolör MATLAB/Simulink modeli.

EK-2. Yapay Arı Kolonisi Algoritması MATLAB Kodu

```
%*****

% Yapay Arı Kolonisi algoritması ile PID-kontrolör parametrelerinin optimizasyonu
% Gazi Ünv.Elk.&Elkt.Müh.Böl.

%*****

clear all

%*****

% Sistem parametreleri
%*****

Th = 80e-3;
Tt = 0.3;
R = 2.4;
T12 = 0.086;
B = 0.425;
Tr = 10;
Kr = 0.5;
Kg = 120;
Tg = 20;

%*****

% Başlangıç parametreleri
%*****

ABCOpts = struct( 'ColonySize',    100, ...
    'MaxCycles',    1000, ...
    'ErrGoal',    1e-20, ...
    'Dim',    6 , ...
    'Limit',    100, ...
    'lb',    0.1, ...
    'ub',    2, ...
    'ObjFun' , 'rosenbrock', ...
    'RunTime', 3);

GlobalMins = zeros(ABCOpts.RunTime, ABCOpts.MaxCycles);
```

EK-2. (Devam) Yapay Arı Kolonisi Algoritması MATLAB Kodu

```

for r = 1:ABCOpts.RunTime,
    r=r
    %*****
    % Başlangıç papulasyonu
    %*****

    Range = repmat((ABCOpts.ub - ABCOpts.lb),[ABCOpts.ColonySize
ABCOpts.Dim]);
    Lower = repmat(ABCOpts.lb, [ABCOpts.ColonySize ABCOpts.Dim]);
    Colony = rand(ABCOpts.ColonySize, ABCOpts.Dim) .* Range + Lower;
    Employed = Colony(1:(ABCOpts.ColonySize/2), :);
    %*****
    % Gelişim ve uyum değerlerinin hesaplanması
    %*****

    for sz = 1:ABCOpts.ColonySize/2,
        Kp1 = Employed(sz,1);
        Ti1 = Employed(sz,2);
        Td1 = Employed(sz,3);
        Kp2 = Employed(sz,4);
        Ti2 = Employed(sz,5);
        Td2 = Employed(sz,6);
        sim('PSO_2B1_0205');
        load('hata.mat');
        ee = fark(2,:);
        time = fark(1,:);
        SSE = 0;
        for kz = 1:length(ee),
            SSE = SSE+(abs(ee(kz)));
        end
        objemp(sz) = SSE;
    ObjEmp = [objemp]';

```

EK-2. (Devam) Yapay Arı Kolonisi Algoritması MATLAB Kodu

```

end
FitEmp = calculateFitness(ObjEmp);
%*****
Bas = zeros(1, (ABCOpts.ColonySize/2));
GlobalMin    = ObjEmp(find(ObjEmp == min(ObjEmp)));
GlobalParams  = Employed(find(ObjEmp == min(ObjEmp)), :);
Cycle = 1;
while ((Cycle <= ABCOpts.MaxCycles)),
%*****
% İşçi arı safhası
%*****
    Employed2 = Employed;
    for i=1:ABCOpts.ColonySize/2
        Param2Change = fix(rand*ABCOpts.Dim) + 1;
        neighbour = fix(rand*(ABCOpts.ColonySize/2)) + 1;
        while(neighbour == i)
            neighbour = fix(rand*(ABCOpts.ColonySize/2)) + 1;
        end;
        Employed2(i, Param2Change) = Employed(i, Param2Change) +
        (Employed(i, Param2Change) - Employed(neighbour, Param2Change))*(rand-
        0.5)*2;
        if (Employed2(i,Param2Change) < ABCOpts.lb)
            Employed2(i,Param2Change) = ABCOpts.lb;
        end;
        if (Employed2(i,Param2Change) > ABCOpts.ub)
            Employed2(i,Param2Change) = ABCOpts.ub;
        end;
    end;
    for sz = 1:ABCOpts.ColonySize/2,
        Kp1 = Employed2(sz,1);

```

EK-2. (Devam) Yapay Arı Kolonisi Algoritması MATLAB Kodu

```

    Ti1 = Employed2(sz,2);
    Td1 = Employed2(sz,3);
    Kp2 = Employed2(sz,4);
    Ti2 = Employed2(sz,5);
    Td2 = Employed2(sz,6);
    sim('PSO_2B1_0205');
    load('hata.mat');
    ee2 = fark(2,:);
    time2 = fark(1,:);
    HKT = 0;
    SSE2 = 0;
    for kz = 1:length(ee2),
        SSE2 = SSE2+(abs(ee2(kz)));
    end
    objemp2(sz) = SSE2;
    ObjEmp2 = [objemp2]';
end
FitEmp2 = calculateFitness(ObjEmp2);
[Employed ObjEmp FitEmp Bas] = GreedySelection(Employed, Employed2,
ObjEmp, ObjEmp2, FitEmp, FitEmp2, Bas, ABCOpts);
%*****

    NormFit = FitEmp/sum(FitEmp);
%*****

% Gözcü arı safhası
%*****

    Employed2 = Employed;
    i = 1;
    t = 0;
    while(t < ABCOpts.ColonySize/2)
        if(rand < NormFit(i))

```

EK-2. (Devam) Yapay Arı Kolonisi Algoritması MATLAB Kodu

```

t=t+1;
Param2Change = fix(rand*ABCOpts.Dim)+1;
neighbour = fix(rand*(ABCOpts.ColonySize/2))+1;
while(neighbour == i)
    neighbour = fix(rand*(ABCOpts.ColonySize/2))+1;
end;
Employed2(i,:) = Employed(i,:);
Employed2(i,Param2Change) =
Employed(i,Param2Change)+(Employed(i,Param2Change)-
Employed(neighbour,Param2Change))*(rand-0.5)*2;
if (Employed2(i,Param2Change) < ABCOpts.lb)
    Employed2(i,Param2Change) = ABCOpts.lb;
end;
if (Employed2(i,Param2Change) > ABCOpts.ub)
    Employed2(i,Param2Change) = ABCOpts.ub;
end;
for sz = 1:ABCOpts.ColonySize/2,
    Kp1 = Employed2(sz,1);
    Ti1 = Employed2(sz,2);
    Td1 = Employed2(sz,3);
    Kp2 = Employed2(sz,4);
    Ti2 = Employed2(sz,5);
    Td2 = Employed2(sz,6);
    sim('PSO_2B1_0205');
    load('hata.mat');
    ee2 = fark(2,:);
    time2 = fark(1,:);
    SSE2 = 0;
    for kz = 1:length(ee2),
        SSE2 = SSE2+(abs(ee2(kz)));
    end;
end;

```

EK-2. (Devam) Yapay Arı Kolonisi Algoritması MATLAB Kodu

```

        end
        objemp2(sz) = SSE2;
        ObjEmp2 = [objemp2]';
    end
    FitEmp2 = calculateFitness(ObjEmp2);
    [Employed ObjEmp FitEmp Bas] =
GreedySelection(Employed,Employed2,ObjEmp,ObjEmp2,FitEmp,FitEmp2,Bas,AB
COpts,i);
    end;
    i=i+1;
    if (i == (ABCOpts.ColonySize/2)+1)
        i = 1;
    end;
end;
end;
%*****
CycleBestIndex = find(FitEmp==max(FitEmp));
CycleBestIndex = CycleBestIndex(end);
CycleBestParams = Employed(CycleBestIndex,:);
CycleMin = ObjEmp(CycleBestIndex);
if CycleMin < GlobalMin
    GlobalMin = CycleMin;
    GlobalParams = CycleBestParams;
end
GlobalMins(r,Cycle) = GlobalMin;
%*****
% Kaşif arı safhası
%*****
ind = find(Bas == max(Bas));
ind = ind(end);
if (Bas(ind) > ABCOpts.Limit)

```

EK-2. (Devam) Yapay Arı Kolonisi Algoritması MATLAB Kodu

```

        Bas(ind) = 0;
        Employed(ind,:) = (ABCOpts.ub-ABCOpts.lb)*(0.5-
rand(1,ABCOpts.Dim))*2+ABCOpts.lb;
    end;
    for sz = 1:ABCOpts.ColonySize/2,
        Kp1 = Employed(sz,1);
        Ti1 = Employed(sz,2);
        Td1 = Employed(sz,3);
        Kp2 = Employed(sz,4);
        Ti2 = Employed(sz,5);
        Td2 = Employed(sz,6);
        sim('PSO_2B1_0205');
        load('hata.mat');
        ee = fark(2,:);
        time = fark(1,:);
        SSE = 0;
        for kz = 1:length(ee),
            SSE = SSE+(abs(ee(kz)));
        end
        objemp(sz) = SSE;
        ObjEmp = [objemp]';
    end
    FitEmp = calculateFitness(ObjEmp);
    Cycle=Cycle+1;
end
end;
Kp1 = GlobalParams(1,1)
Ti1 = GlobalParams(1,2)
Td1 = GlobalParams(1,3)
Kp2 = GlobalParams(1,4)

```

EK-2. (Devam) Yapay Arı Kolonisi Algoritması MATLAB Kodu

```

Ti2 = GlobalParams(1,5)
Td2 = GlobalParams(1,6)
sim('PSO_2B1_0205');
    load('frek_1.mat');
    ht1 = frek_1(2,:);
    htfrk1 = 0;
    for kt1 = 1:length(ht1),
        htfrk1 = htfrk1+(ht1(kt1)^2);
    end
    load('frek_2.mat');
    ht2 = frek_2(2,:);
    htfrk2 = 0;
    for kt2 = 1:length(ht2),
        htfrk2 = htfrk2+(ht2(kt2)^2);
    end
    load('frek_3.mat');
    ht3 = frek_3(2,:);
    htfrk3 = 0;
    for kt3 = 1:length(ht3),
        htfrk3 = htfrk3+(ht3(kt3)^2);
    end
hatafrek_1 = htfrk1
hatafrek_2 = htfrk2
hatafrek_3 = htfrk3
qq=ht3'
plot(tout,pp1)

```

EK-3. Akıllı Arı Kolonisi Algoritması “Greedy Selection” fonksiyonu MATLAB Kodu

```
%*****
% Greedy Selection fonksiyonu
%*****
function [Colony,Obj,Fit,oBas] =
GreedySelection(Colony1,Colony2,ObjEmp,ObjEmp2,FitEmp,FitEmp2,fbas,ABCO
pts,i)
oBas=fbas;
Obj=ObjEmp;
Fit=FitEmp;
Colony=Colony1;
if (nargin==8)
for ind=1:size(Colony1,1)
    if (FitEmp2(ind)>FitEmp(ind))
        oBas(ind)=0;
        Fit(ind)=FitEmp2(ind);
        Obj(ind)=ObjEmp2(ind);
        Colony(ind,:)=Colony2(ind,:);
    else
        oBas(ind)=fbas(ind)+1;
        Fit(ind)=FitEmp(ind);
        Obj(ind)=ObjEmp(ind);
        Colony(ind,:)=Colony1(ind,:);
    end;
end; %for
end; %if
if(nargin==9)
    ind=i;
    if (FitEmp2(ind)>FitEmp(ind))
        oBas(ind)=0;
```

EK-3. (Devam)Yapay Arı Kolonisi Algoritması “Greedy Selection” fonksiyonu
MATLAB Kodu

```
Fit(ind)=FitEmp2(ind);  
Obj(ind)=ObjEmp2(ind);  
Colony(ind,:)=Colony2(ind,:);  
else  
oBas(ind)=fbas(ind)+1;  
Fit(ind)=FitEmp(ind);  
Obj(ind)=ObjEmp(ind);  
Colony(ind,:)=Colony1(ind,:);  
end;  
end;
```

EK-4. Parçacık Sürüsü Algoritması MATLAB Kodu

```
%*****
% Parçacık Sürüsü algoritması ile PID-kontrolör parametrelerinin optimizasyonu
% Gazi Ünv.Elk.&Elkt.Müh.Böl.
%*****

clear all

%*****
% Sistem parametreleri
%*****

Th = 80e-3;
Tt = 0.3;
R = 2.4;
T12 = 0.086;
B = 0.425;
Tr = 10;
Kr = 0.5;
Kp = 120;
Tp = 20;

%*****
% Başlangıç değerleri
%*****

N = 6;
M = 20;
T = 40;
x_min = [0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1];
x_max = [2 2 2 2 2 2];
for dd=1:N,
    v_max(1,dd) = (x_max(1,dd)-x_min(1,dd))*0.15;
    v_min(1,dd) = -v_max(1,dd);
end
c1 = 2.05;
```

EK-4. (Devam) Parçacık Sürüsü Algoritması MATLAB Kodu

```

c2 = 2.05;
F = 4.1;
K = 2/abs(2-F-sqrt(F^2-4*F));
%*****f
or m = 1:M,
    for n = 1:N,
        x(m,n) = x_min(1,n)+(x_max(1,n)-x_min(1,n))*rand(1,1);
        v(m,n) = 0;
    end
    fx = zeros(M,1);
    fp = zeros(M,1);
    p = x;
    fg = 0;
end
%*****
% Algoritma döngüsü
%*****
t = 1;
while t <= T,
    t=t
    r1 = rand(1,1);
    r2 = rand(1,1);
%*****
    for i = 1:M,
        Kp1 = x(i,1);
        Ti1 = x(i,2);
        Td1 = x(i,3);
        Kp2 = x(i,4);
        Ti2 = x(i,5);
        Td2 = x(i,6);

```

EK-4. (Devam) Parçacık Sürüsü Algoritması MATLAB Kodu

```

sim('PSO_2B1_0205');
load('hata.mat');
e = fark(2,:);
time = fark(1,:);
SSE = 0;
for k = 1:length(e),
    SSE = SSE+(time(k)*abs(e(k)));
end
fx(i) = 1/SSE;
%*****

if fp(i) < fx(i),
    fp(i) = fx(i);
    for q = 1:N,
        p(i,q) = x(i,q);
    end
end

%*****

if fg < fp(i),
    fg = fp(i);
    for r = 1:N,
        g(1,r) = p(i,r);
    end
end

end

%*****

for y = 1:M,
    for z = 1:N,
        v_yn(y,z) = K*(v(y,z)+c1*r1*(p(y,z)-x(y,z))+c2*r2*(g(1,N)-x(y,z)));
        if v_yn(y,z) > v_max(1,z),
            v_yn(y,z) = v_max(1,z);

```

EK-4. (Devam) Parçacık Sürüsü Algoritması MATLAB Kodu

```

        end
        if v_yn(y,z) < v_min(1,z),
            v_yn(y,z) = v_min(1,z);
        end
        x_yn(y,z) = x(y,z)+v_yn(y,z);
        if x_yn(y,z) > x_max(1,z),
            x_yn(y,z) = x_max(1,z);
        end
        if x_yn(y,z) < x_min(1,z),
            x_yn(y,z) = x_min(1,z);
        end
        x(y,z) = x_yn(y,z);
        v(y,z) = v_yn(y,z);
    end
end

%*****

    t=t+1;
end
sonuc = g
    Kp1 = g(1)
    Ti1 = g(2)
    Td1 = g(3)
    Kp2 = g(4)
    Ti2 = g(5)
    Td2 = g(6)
sim('PSO_2B1_0205');
load('frek_1.mat');
ht1 = frek_1(2,:);
htfrk1 = 0;
for kt1 = 1:length(ht1),

```

EK-4. (Devam) Parçacık Sürüsü Algoritması MATLAB Kodu

```

    htfrk1 = htfrk1+(ht1(kt1)^2);
end
    load('frek_2.mat');
    ht2 = frek_2(2,:);
    htfrk2 = 0;
    for kt2 = 1:length(ht2),
        htfrk2 = htfrk2+(ht2(kt2)^2);
    end
    load('frek_3.mat');
    ht3 = frek_3(2,:);
    htfrk3 = 0;
    for kt3 = 1:length(ht3),
        htfrk3 = htfrk3+(ht3(kt3)^2);
    end
    hatafrek_1 = htfrk1
    hatafrek_2 = htfrk2
    hatafrek_3 = htfrk3
    qq=ht3'
    subplot(3,1,1);
    plot(tout,pp1);grid off;
    xlabel('zaman (sn.);ylabel('df1');
    subplot(3,1,2);plot(tout,pp2);grid on;
    xlabel('zaman (sn.);ylabel('df2');
    subplot(3,1,3);
    plot(tout,pp3);grid on;
    xlabel('zaman (sn.);ylabel('Ptie');

```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : GÖZDE, Haluk
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 03.03.1975 Mersin
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 350 20 04
 e-mail : halukgozde@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Müh. Böl.	2003
Lisans	Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Müh. Böl.	1997
Lise	Tevfik Sırrı Gür Lisesi	1993

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1998-2005	4'üncü Ana Bkm.Mrk.K.lığı	Ar-Ge Mühendisi
2005-2010	MEBS Okl.ve Eğt.Mrk.K.lığı	Öğretmen

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

SCI Dergide Yayınlanan Makaleler

1. **Haluk GÖZDE**, M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU, İlhan KOCAARSLAN, M.Akif ŞENOL, “İki Bölge Ara-Isıtmalı Termal Güç Sisteminin Yük-Frekans Kontrolü İçin Parçacık Sürüş Optimizasyonu Tabanlı PI-Kontrolör”, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 30(1), 13-21, 2010.

2. **Haluk GÖZDE**, M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU, “Automatic Generation Control Application with Craziness Based Particle Swarm Optimization In A Thermal Power System”, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 33(1), 8-16, 2011.

Uluslararası Hakemli Dergide Yayımlanan Makaleler

1. **Haluk GÖZDE**, M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU, İlhan KOCAARSLAN, Ertuğrul ÇAM, “Particle Swarm Optimization Based Load Frequency Control In A Single Area Power System”, University of Pitesti – Electronics and Computers Science, Scientific Bulletin, no.8, vol. 2, pp.106-110, 2008.
2. **Haluk GÖZDE**, M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU, İlhan KOCAARSLAN, “Application of Artificial Bees Colony Algorithm In An Automatic Voltage Regulator (AVR) System”, International Journal on Technical and Physical Problems of Power Engineering, issue.4, no.3, vol.1, pp.88-92, 2010.

Uluslararası Sempozyumda Yayımlanan Bildiriler

1. **Haluk GÖZDE**, M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU, İlhan KOCAARSLAN, Ertuğrul ÇAM, “Particle Swarm Optimization Based Load Frequency Control In A Single Area Power System”, TPE-2008 Forth International Conference on Technical and Physical Problems of Power Engineering, Pitesti Romania, pp.III-65-III-68, September 4-6, 2008.
2. **Haluk GÖZDE**, M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU, “A Swarm Optimization Based Automatic Generation Control In A Hydrothermal Power System Including SMES Units”, ECAI2009 International Conference on Electronic, Computers and Artificial Intelligence, Pitesti Romania, pp.67-72, July 2-5, 2009.
3. **Haluk GÖZDE**, M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU, İlhan KOCAARSLAN, “A Swarm Optimization Based Load Frequency Control Application in A Two Area Thermal Power System”, ELECO2009 International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Bursa, Turkey, pp.124-128, November 5-8, 2009.
4. **Haluk GÖZDE**, M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU, “Crazy-PSO Based Quadratic Optimal Regulator Design To Load Frequency Control In An Isolated Small Hydro Power Plant”, INISTA2009 International Symposium on Innovations in

Intelligent Systems and Applications, Trabzon, Turkey, pp.295-299, June 29 – July 1, 2009.

5. **Haluk GÖZDE**, M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU, İlhan KOCAARSLAN, Fırat HARDALAÇ, “A Small Hydro Power Plant LFC With Quadratic Optimal Regulator Supported By Optimization Algorithms”, TPE-2009 Fifth International Conference on Technical and Physical Problems of Power Engineering, Bilbao, Spain, pp.263-267, September 3-5, 2009.
6. **Haluk GÖZDE**, M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU, İlhan KOCAARSLAN, “Application of Artificial Bees Colony Algorithm In An Automatic Voltage Regulator (AVR) System”, ICTPE-2010 Sixth International Conference on Technical and Physical Problems of Power Engineering, Tabriz, Iran, pp.218-222, September 14-16, 2010.

Ulusal Sempozyumda Yayınlanan Bildiriler

1. **Haluk GÖZDE**, Veysel SİLİNDİR, “Mikroişlemci Tabanlı İki Boyutta Parabolik Anten Kontrolörü Tasarımı”, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10’uncu Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, cilt.1, s.236-239, 18-21 Eylül 2003.
2. **Haluk GÖZDE**, M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU, “Bir Fotovoltaik Pilin Optimum Verimde Çalışma Noktalarının Yapay Sinir Ağları Tabanlı Bir Model İle Tespiti”, EVK2005 1.Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu Bildiriler Kitabı, s.263, 17-18 Mayıs 2005.
3. Fazıl KAYTEZ, **Haluk GÖZDE**, M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU, “Klasik PID ve Bulanık Mantık Kontrolör İle Senkron Makine Kontrolü“, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 11’inci Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, 22-25 Eylül 2005.
4. **Haluk GÖZDE**, İlhan KOCAARSLAN, M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU, Ertuğrul ÇAM, “İki Bölgeli Güç Sisteminde Parçacık Sürüsü Algoritması İle Yük-Frekans Kontrolü Optimizasyonu”, ELECO–2008 Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu Bildiriler Kitabı, cilt. Elektrik-Kontrol, s.39-45, 26-30 Kasım 2008.
5. **Haluk GÖZDE**, M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU, “Nehir Tipi Bir Hidroelektrik

Santralde Klasik Integral ve Bulanık Mantık Tabanlı Yük-Frekans Kontrolü Karşılaştırması”, EVK2009 3’üncü Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu Bildiriler Kitabı, s.188, 21-22 Mayıs 2009.

Hobiler

Bağlama, Elektrogitar, Resim, Karikatür.