

**ÇOK BÖLGELİ GÜÇ SİSTEMİNDE SEZGİSEL ALGORİTMALAR
İLE SEKONDER FREKANS KONTROLÜ**

SERCAN ÖZÜMCAN

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

**DANIŞMAN
PROF. DR. ALİ ÖZTÜRK**

DÜZCE, 2024

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ÇOK BÖLGELİ GÜÇ SİSTEMİNDE SEZGİSEL YÖNTEMLER İLE
SEKONDER FREKANS KONTROLÜ

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

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Metin VARAN

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Prof. Dr. Salih TOSUN

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Murat FİDAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Enes KAYMAZ

Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 07/11/2024

BEYAN

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

07 Kasım 2024

Sercan ÖZÜMCAN

TEŞEKKÜR

Öncelikle danışmanlığımı üstlenen, çalışmalarımda bana her zaman yol gösteren, destek ve emeklerini esirgemeyen, beni yüreklendiren, öğrencisi olmaktan her zaman gurur duyacağım saygıdeğer hocam Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme süreçlerinde yardımlarını esirgemeyen ve dikkat etmem gereken noktalarla ilgili bilgilerinden faydalandığım sayın hocalarım Prof. Dr. Salih TOSUN ve Prof. Dr. Metin VARAN'a, tezimin son halini almasındaki yön verici yorumları ve değerli katkılarından dolayı jüri üyesi hocalarım sayın Dr. Öğr. Üyesi Murat FİDAN ve Dr. Öğr. Üyesi Enes KAYMAZ'a, akademik çalışmalarımızdaki süreçleri omuz omuza vererek yürüttüğümüz sayın Dr. Cenk ANDİÇ'e teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak aldığım kararları her zaman destekleyen, bu hayattaki en büyük şansım olan sevgili eşim Sinem ÖZÜMCAN ve oğlum Alaz ÖZÜMCAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

07 Kasım 2024

Sercan ÖZÜMCAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
KISALTMALAR.....	xii
SİMGELER	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
EXTENDED ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. ÖRNEK ELEKTRİK ŞEBEKESİ ÇÖKÜŞÜ VAKALARININ İNCELENMESİ	5
1.2. FREKANS KARARLILIĞINI ARTTIRMAYA YÖNELİK MODERN YAKLAŞIMLAR	10
1.3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	13
1.4. ÇALIŞMANIN AMACI.....	16
2. FREKANS KONTROLÜ	18
2.1. FREKANS DEĞİŞİMİ	18
2.2. FREKANS DEĞİŞİMİNİN ETKİLERİ	25
2.2.1. Buhar Türbini Kanatları Üzerindeki Etkileri.....	25
2.2.2. Hidro ve Yanma Türbinleri Üzerindeki Etkiler	26
2.2.3. Diğer Güç Sistemi Ekipmanları Üzerindeki Etkiler	26
2.3. PRİMER FREKANS KONTROLÜ (GOVERNOR SİSTEMİ)	27
2.3.1. Modern Elektronik Governorler	28
2.3.2. Governor Droop Eğrileri	29
2.3.3. Enterkonnekte Sistemlerde Governor Kontrolü	32
2.3.4. Primer Frekans Kontrolünde Frekans Sapması Analizi	36
2.3.5. Governor Yanıtı Limitleri.....	38
2.4. SEKONDER FREKANS KONTROLÜ (YÜK FREKANS KONTROLÜ)....	40
2.4.1. Yük Frekans Kontrolü Sisteminin İşlevi	41
2.4.2. YFK Sisteminin Bileşenleri	42
2.4.3. YFK Sisteminin Çalışma Modları	44
2.5. ÜÇÜNCÜL (TERSİYER) FREKANS KONTROLÜ	48
2.6. GENERATÖR KAYBINA AŞAMALI YANIT	48
2.6.1. Elektromanyetik Enerji Aşaması.....	48
2.6.2. Eylemsizlik Aşaması.....	49
2.6.3. Governor Tepki Aşaması	49
2.6.4. Yük Frekans Kontrolü Aşaması	49
3. YÜK FREKANS KONTROLÜ MODELİ.....	50
3.1. GENERATÖR MODELİ	50
3.2. YÜK MODELİ.....	53

3.3. TÜRBİN MODELİ	53
3.4. HIZ DÜZENLEYİCİ (GOVERNOR) MODELİ	54
3.5. BAĞLANTI HATTI MODELİ	57
3.6. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARINI İÇEREN YÜK FREKANS KONTROLÜ MODELİ	61
3.7. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİ İÇEREN YÜK FREKANS KONTROLÜ MODELİ	62
4. KONTROLÖR YAPILARI.....	63
4.1. PID KONTROLÖR	63
4.1.1. Oransal (Proportional) Terim.....	64
4.1.2. İntegral Terimi	64
4.1.3. Türev (Derivative) Terim	65
5. YÜK FREKANS KONTROLÜNDE KULLANILAN AMAÇ FONKSİYONLARI.....	67
6. SEZGİSEL OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ	68
6.1. BAL PORSUĞU ALGORİTMASI	69
6.1.1. Esinlenme.....	70
6.1.2. Matematiksel Model.....	70
6.2. GRİ KURT OPTİMİZASYONU ALGORİTMASI.....	75
6.2.1. Matematiksel Model.....	75
6.3. BALİNA OPTİMİZASYON ALGORİTMASI.....	78
6.3.1. Matematiksel Model.....	78
6.4. PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU	82
6.4.1. Parçacığın Konumunun Hesaplanması	82
6.4.2. Parçacığın Hızının Hesaplanması	82
7. SİSTEMİN MODELLENMESİ VE BENZETİM SONUÇLARI	85
7.1. SİSTEM MODELLEME SÜREÇLERİ.....	85
7.2. TEST SİSTEMİ-1 İÇİN OPTİMİZASYON SONUÇLARI.....	88
7.2.1. Test Sistemi-1 Senaryo-1: Alan-1'de Yük Değişimi	89
7.2.2. Test Sistemi-1 Senaryo-2: Alan-2'de Yük Değişimi	93
7.2.3. Test Sistemi-1 Senaryo-3: Alan-1'de Rastgele Yük Değişimi	96
7.3. TEST SİSTEMİ-2 İÇİN OPTİMİZASYON SONUÇLARI.....	100
7.3.1. Test Sistemi-2 Senaryo-1: Alan-1'de Yük Değişimi	101
7.3.2. Test Sistemi-2 Senaryo-2: Alan-2'de Yük Değişimi	104
7.4. TEST SİSTEMİ-3 İÇİN OPTİMİZASYON SONUÇLARI.....	108
7.4.1. Test Sistemi-3 Senaryo-1: Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Depolama Sistemleri ve Alan-1'de Yük Değişimi	109
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	115
9. KAYNAKLAR	118
ZGEÇMİş.....	133

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. ENTSO-E standartlarına göre, kontrol yapısının frekans stabilizasyon süreci üzerindeki atalet ve hiyerarşik etkileri	2
Şekil 1.2. 2015 yılı Türkiye 400 kV iletim hattı haritası.....	6
Şekil 1.3. 2015 yılında hatanın meydana geldiği 09:36'da Atatürk Barajı, Sincan-Temelli ve Doğubayazıt'ta şebeke frekansının zamanla değişimi	7
Şekil 1.4. Sistem çöküşünün meydana geldiği 16:18'de Heywood (Viktorya eyaleti) ve Robertstown (Güney Avustralya eyaleti) şehirlerinde şebeke frekansının zamanla değişimi	8
Şekil 1.5. 15 Şubat 2021 günü Texas şebeke frekansının zamanla değişimi	9
Şekil 1.6. Çeşitli güç/frekans dengeleme yöntemleri	11
Şekil 2.1. Yaz yük eğrisi.....	18
Şekil 2.2. Basit frekans kontrol sistemi.....	19
Şekil 2.3. Kaynak/yük dengesi.....	20
Şekil 2.4. Normal frekans sapması.....	20
Şekil 2.5. Anormal frekans sapması.....	21
Şekil 2.6. Frekans sapmaları özeti.....	22
Şekil 2.7. Yük büyüklüğü ve frekansı arasındaki ilişki.....	23
Şekil 2.8. Buhar generatörü rotorunun eylemsizliği	24
Şekil 2.9. Yük frekans kontrol çevrimleri	27
Şekil 2.10. Governor kontrolünü göstermek için basit sistem	28
Şekil 2.11. Elektro-hidrolik governor blok diyagramı	29
Şekil 2.12. İzokron governor karakteristik eğrisi.....	30
Şekil 2.13. %5 droop eğiminde governor karakteristiği.....	31
Şekil 2.14. Enterkonnekte sistemde governor tepkisi	32
Şekil 2.15. Yük paylaşımı – aynı birim sınırları – aynı droop ayarı.....	34
Şekil 2.16. Yük paylaşımı – aynı birim sınırları – farklı droop ayarı	35
Şekil 2.17. Yük paylaşımı – aynı birim sınırları – bir birim izokron kontrol.....	36
Şekil 2.18. Frekans bozukluğuna governor tepkisi	36
Şekil 2.19. YFK sistemin bileşenleri.....	43
Şekil 2.20. Bağlantı hattı sapma kontrolü AKH hesaplaması	45
Şekil 2.21. Harici üretim kaybında AKH	46
Şekil 2.22. Dahili Üretim Kaybında AKH.....	47
Şekil 3.1. Türbin – generatör modeli.....	50
Şekil 3.2. Hız – güç ilişkisi	53
Şekil 3.3. Generatör – yük modeli	53
Şekil 3.4. Türbin modeli.....	54
Şekil 3.5. Hız düzenleyici sistemi	55
Şekil 3.6. Hız düzenleyici sistemi blok diyagramı.....	55
Şekil 3.7. Paralel birimler arasında yük paylaşımı.....	56
Şekil 3.8. Tek alanlı güç sistemi modeli.....	56
Şekil 3.9. İki alanlı güç sistemi	57
Şekil 3.10. Güç sistemi elektriksel eş değeri	58
Şekil 3.11. Güç sistemi YFK modeli.....	59
Şekil 3.12. İkincil kontrol içeren güç sistemi YFK modeli	60
Şekil 3.13. Yenilenebilir enerji kaynaklarını içeren güç sistemi YFK modeli.....	61
Şekil 3.14. Enerji depolama sistemlerinin dahil edildiği güç sistemi YFK modeli	62

Şekil 4.1. PID kontrolör yapısı	64
Şekil 4.2. Genliğin zamana karşı K_P grafiği (K_I ve K_D sabit)	64
Şekil 4.3. Genliğin zamana karşı K_I grafiği (K_P ve K_D sabit)	65
Şekil 4.4. Genliğin zamana karşı K_D grafiği (K_P ve K_I sabit)	66
Şekil 6.1. Sezgisel optimizasyon teknikleri temel akış diyagramı.....	69
Şekil 6.2. Ters kare kanunu	71
Şekil 6.3. Kazma modunda avına yaklaşan bal porsuğu	72
Şekil 6.4. BPA sözde kodu	73
Şekil 6.5. BPA uygulama süreci	74
Şekil 6.6. GKO sözde kodu	77
Şekil 6.7. GKO uygulama süreci	77
Şekil 6.8. Spiral hareket.....	79
Şekil 6.9. BA sözde kodu	80
Şekil 6.10. Balina optimizasyon algoritması akış diyagramı	81
Şekil 6.11. Parçacık sürü optimizasyon algoritmasında konum güncelleme işlemi	83
Şekil 6.12. Parçacık sürü optimizasyon algoritması akış diyagramı.....	84
Şekil 7.1. Güç sistemi modeli	85
Şekil 7.2. ITAE amaç fonksiyonu blok diyagramı.....	86
Şekil 7.3. Algoritmanın m.file dosyasında oluşturulması.	86
Şekil 7.4. Optimizasyon parametrelerinin belirlenmesi	87
Şekil 7.5. Değişkenlerin belirlenmesi ve MATLAB-SIMULINK bağlantısı.....	88
Şekil 7.6. Test Sistemi-1 SIMULINK modeli	89
Şekil 7.7. Test Sistemi-1 Senaryo-1 Alan-1 yük değişimi	89
Şekil 7.8. Test Sistemi-1 Senaryo-1 için BPA optimizasyon yöntemine göre amaç fonksiyon değeri.....	90
Şekil 7.9. Test Sistemi-1 Senaryo-1 Alan-1'deki frekans değişimi	91
Şekil 7.10. Test Sistemi-1 Senaryo-1 Alan-2'deki frekans değişimi	91
Şekil 7.11. Test Sistemi-1 Senaryo-1 Bağlantı hattı güç değişimi.....	92
Şekil 7.12. Test Sistemi-1 Senaryo-2 Alan-2 yük değişimi.....	93
Şekil 7.13. Test Sistemi-1 Senaryo-2 BPA optimizasyon yöntemine göre amaç fonksiyon değeri	94
Şekil 7.14. Test Sistemi-1 Senaryo-2 Alan-1'deki frekans değişimi	95
Şekil 7.15. Test Sistemi-1 Senaryo-2 Alan-2'deki frekans değişimi	95
Şekil 7.16. Test Sistemi-1 Senaryo-2 Bağlantı hattı güç değişimi.....	96
Şekil 7.17. Test Sistemi-1 Senaryo-3 Alan-1 rastgele yük değişimi.....	97
Şekil 7.18. Test Sistemi-1 Senaryo-3 BPA optimizasyon yöntemine göre amaç fonksiyon değeri	98
Şekil 7.19. Test Sistemi-1 Senaryo-3 Alan-1'deki frekans değişimi	98
Şekil 7.20. Test Sistemi-1 Senaryo-3 Alan-2'deki frekans değişimi	99
Şekil 7.21. Test Sistemi-1 Senaryo-3 Bağlantı hattı güç değişimi.....	100
Şekil 7.22. Test Sistemi-2 SIMULINK modeli	101
Şekil 7.23. Test Sistemi-2 Senaryo-1 güç değişimleri	101
Şekil 7.24. Test Sistemi-2 Senaryo-1 BPA optimizasyon yöntemine göre amaç fonksiyon değeri	102
Şekil 7.25. Test Sistemi-2 Senaryo-1 Alan-1'deki frekans değişimi	103
Şekil 7.26. Test Sistemi-2 Senaryo-1 Alan-2'deki frekans değişimi	103
Şekil 7.27. Test Sistemi-2 Senaryo-1 Bağlantı hattı güç değişimi.....	104
Şekil 7.28. Test Sistemi-2 Senaryo-2 güç değişimleri.	105
Şekil 7.29. Test Sistemi-2 Senaryo-2 BPA optimizasyon yöntemine göre amaç fonksiyon değeri	106

Şekil 7.30. Test Sistemi-2 Senaryo-2 Alan-1'deki frekans değişimi	106
Şekil 7.31. Test Sistemi-2 Senaryo-2 Alan-2'deki frekans değişimi	107
Şekil 7.32. Test Sistemi-2 Senaryo-2 Bağlantı hattı güç değişimi	108
Şekil 7.33. Test Sistemi-3 SIMULINK modeli	109
Şekil 7.34. Test Sistemi-3 Senaryo-1 güç değişimleri	110
Şekil 7.35. Test Sistemi-3 Senaryo-1 BPA optimizasyon yöntemine göre amaç fonksiyon değeri	110
Şekil 7.36. Test Sistemi-3 Senaryo-1 Alan-1'deki frekans değişimi	111
Şekil 7.37. Test Sistemi-3 Senaryo-1 Alan-2'deki frekans değişimi	112
Şekil 7.38. Test Sistemi-3 Senaryo-1 Bağlantı hattı güç değişimi.....	113



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 1.1. Türkiye’deki YFK konusunda lisansüstü tezler	15
Çizelge 7.1. Test Sistemi-1 Senaryo-1 için optimum kontrol parametre değerleri.....	90
Çizelge 7.2. Test Sistemi-1 Senaryo-1 için amaç fonksiyon değeri ve sistem oturma süreleri.....	92
Çizelge 7.3. Test Sistemi-1 Senaryo-2 için optimum kontrol parametre değerleri.....	94
Çizelge 7.4. Test Sistemi-1 Senaryo-3 için optimum kontrol parametre değerleri.....	97
Çizelge 7.5. Test Sistemi-2 Senaryo-1 için optimum kontrol parametre değerleri.....	102
Çizelge 7.6. Test Sistemi-2 Senaryo-2 için optimum kontrol parametre değerleri.....	105
Çizelge 7.7. Test Sistemi-3 Senaryo-1 için optimum kontrol parametre değerleri	110



KISALTMALAR

AKH	Alan kontrol hatası
AOA	Aritmetik optimizasyon algoritması
AA	Ateşböceği algoritması
BAA	Bakteri arama algoritması
BPA	Bal porsuğu algoritması
BA	Balina algoritması
ÇA	Çakal algoritması
DA	Denge algoritması
DAA	Deniz avcısı algoritması
DTC	Dinamik talep cevabı
EA	Elektrikli araç
EDS	Enerji depolama sistemleri
ENH	Enerji nakil hatları
EPDK	Enerji piyasası düzenleme kurulu
FSA	Fil sürüşü algoritması
FACTS	Flexible alternative current transmission systems
GA	Genetik algoritma
GBO	Goril birlikleri optimizasyonu
GKO	Gri kurt optimizasyonu
GES	Güneş enerji santralleri
IAE	Integral absolute error
ISE	Integral squared error
ITAE	Integral time-weighted absolute error
ITSE	Integral time-weighted squared error
JA	Jaya algoritması
KA	Karınca aslan algoritması
MYTM	Milli yük tevzi merkezi
OÜK	Otomatik üretim kontrolü
PSO	Parçacık sürü optimizasyon
SMG	Sabit mıknatıslı generatör
SSA	Salp sürü algoritması
SOAA	Simbiyotik organizmalar arama algoritması
SKA	Sinüs kosinüs algoritması
ŞOA	Şempanze optimizasyon algoritması
YAK	Yapay arı kolonisi
YEK	Yenilenebilir enerji kaynakları
YAA	Yerçekimi arama algoritması
YA	Yusufçuk algoritması
YFK	Yük frekans kontrolü

SİMGELER

Hz	Hertz
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-saat
kV	Kilovolt
RoCoF	Frekans değişim oranı
T _m	Mekaniksel moment
T _e	Elektriksel moment
T _a	İvme momenti
ω	Açısal hız
α	Açısal ivme
δ	Generatör faz açısı
Pa	İvme gücü
P _m	Mekaniksel güç
P _e	Elektriksel güç
p.u	Birim değer
<i>D</i>	Yük sönümleme sabiti
<i>n</i>	Popülasyon büyüklüğü
<i>max_{iter}</i>	Maksimum iterasyon sayısı

ÖZET

ÇOK BÖLGELİ GÜÇ SİSTEMİNDE SEZGİSEL ALGORİTMALAR İLE SEKONDER FREKANS KONTROLÜ

Sercan ÖZÜMCAN

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

Kasım 2024, 133 sayfa

Teknolojinin ilerlemesi ve nüfusun artması sonucunda enerjiye olan talep her geçen gün artmaktadır. Fosil yakıt bazlı güç sistemleri şu anda enerji üretim endüstrisinde en yaygın olanı olmasına rağmen, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve enerji depolama sistemlerinin gelecekteki güç sistemlerindeki payının sürekli olarak artacağı beklenmektedir. Enterkonnekte güç sistemlerinde senkronizasyon koşullarını sağlamak için üretim ve tüketim arasındaki dengeyi korumak gerekir. Güç sisteminin dinamik yapısının bir sonucu olarak değişen bu dengeyi korumak için sistemin frekansı sürekli olarak kontrol edilmelidir. Primer frekans kontrolünün amacı, ilgili üretim biriminin türbin hızını ayarlayarak şebeke frekansını otonom ve yerel olarak değiştirmek ve böylece frekanstaki dalgalanmaları telafi etmektir. Sekonder frekans kontrol sistemi, aktif güç dalgalanmalarını azaltmak ve kontrol bölgeleri içinde ve bölgeler arası bağlantı hatları boyunca dengeli bir aktif güç/frekans oranını korumak için güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Güç sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve batarya enerji depolama teknolojilerinin entegrasyonu nedeniyle daha karmaşık ve zorlu hale gelmektedir. Tez çalışması için seçilen ilk test sistemi, literatürde yaygın olarak atıfta bulunulan ve seçilen optimizasyon tekniğinin etkinliğini değerlendirmek için sağlam bir temel sağlayan iki alanlı bir termik güç sistemidir. En yeni algoritmalarından Bal Porsuğu Algoritması (BPA), Balina Algoritması (BA) ve Gri Kurt Optimizasyon Algoritması (GKO) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) olarak bilinen sezgisel optimizasyon tekniklerinin seçilen PID kontrolör için optimum parametreleri belirlemedeki etkinliği simülasyon sonuçlarına göre, sistem frekansı ve bağlantı hattı gücündeki değişikliklerinin aşma değeri ve oturma süresine göre karşılaştırmakta ve analiz edilmiştir. Diğer test sistemleri olarak daha karmaşık ve zor sistemler olan güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynakları ile enerji depolama sistemlerinin kullanıldığı güç sistemlerinde değişken yük talebi, RES/GES üretimi ve enerji depolama gibi farklı çalışma koşulları altında kontrolörün ve algoritmaların performansları test edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan Bal Porsuğu Algoritmasının (BPA) sistem frekansı ve bağlantı hattı güç değişimlerinin aşma değerini ve oturma süresini diğer tekniklere göre önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Bu tez çalışmasında, yük frekans kontrolü probleminin çözümü için sezgisel yöntemlerle kapsamlı analizler yapılarak alternatif bir çalışma gerçekleştirilmiş ve literatüre katkı sağlanmıştır.

Anahtar Sözcükler: Bal Porsuğu Algoritması, Balina Algoritması, Enerji Depolama Sistemleri, Gri Kurt Optimizasyonu, Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Yük Frekans Kontrolü

ABSTRACT

SECONDARY FREQUENCY CONTROL WITH HEURISTIC ALGORITHMS IN A MULTI AREA POWER SYSTEM

Sercan ÖZÜMCAN

Düzce University

Graduate School, Department of Electrical-Electronics Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

November 2024, 133 pages

As a result of the advancement of technology and the increase in population, the demand for energy is increasing day by day. Although fossil fuel-based power systems are currently the most common in the power generation industry, the share of renewable energy sources and energy storage systems in future power systems is predicted to increase continuously. In interconnected power systems, in order to ensure synchronisation conditions in interconnected power systems, it is necessary to maintain the balance between generation and consumption. In order to maintain this balance, which changes as a result of the dynamic nature of the power system, the frequency of the system must be continuously controlled. The objective of primary frequency control is to autonomously and locally vary the grid frequency by adjusting the turbine speed of the respective generating unit, thus compensating for fluctuations in frequency. Secondary frequency control system is widely used in power systems to reduce active power fluctuations and maintain a balanced active power/frequency ratio within the control zones and along the inter-zonal tie lines. Power systems are becoming more complex and challenging due to the integration of renewable energy sources and battery energy storage technologies. The first test system chosen for the thesis work is a two-area thermal power system, which is widely referenced in the literature and provides a solid basis for evaluating the effectiveness of the present optimisation approach. The effectiveness of heuristic optimisation techniques known as Honey Badger Algorithm (HBA), Whale Algorithm (WA) and Grey Wolf Optimisation Algorithm (GWO) and Particle Swarm Optimisation (PSO), which are the most recent algorithms, in determining the optimum parameters for the selected PID controller is compared and analysed according to simulation results, system frequency and tie line power changes with respect to overshoot value and settling time. As other test systems, the performances of the controller and algorithms are tested under different operating conditions such as variable load demand, wind/PV power plant generation and energy storage in power systems, which are more complex and difficult systems. The results show that the Honey Badger Algorithm (BPA) significantly improves the overshoot value and settling time of the system frequency and tie line power variations compared to other techniques. In this thesis, an alternative study has been carried out by performing comprehensive analysis with heuristic methods for the solution of the load frequency control problem and contributed to the literature.

Keywords: Energy Storage Systems, Gray Wolf Optimization, Honey Badger Algorithm, Load Frequency Control, Renewable Energy Sources, Whale Algorithm

EXTENDED ABSTRACT

SECONDARY FREQUENCY CONTROL WITH HEURISTIC ALGORITHMS IN A MULTI AREA POWER SYSTEM

Sercan ÖZÜMCAN

Düzce University

Graduate School, Department of Electrical-Electronics Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

November 2024, 133 pages

1. INTRODUCTION

The energy power systems are one of the most comprehensive and complex systems in human history, created, managed and controlled by humans. Power systems with imbalances between generation and demand can lead to adverse frequency fluctuations in the interconnected power system, potentially causing the system frequency to rise or fall above thresholds set by regulators. The Load Frequency Control (LFC) system is extensively used in power systems to mitigate variations in active power and to maintain a balanced active power/frequency ratio within control zones and across tie-line connection lines. While it is desired to have no discrepancy between the produced and consumed active power in the LFC system, achieving this objective is challenging owing to system dynamics. Long-term frequency deviations beyond the thresholds set by regulatory authorities can lead to significant problems that adversely affect the operation of the interconnected power system such as transmission line overloads, frequency relay failures, damage to frequency sensitive equipment, power sharing difficulties and protection device failures. It is necessary to meet the specified frequency stability standards in order to comply with the regulations specified in EPDK (2022a) for the Turkish interconnected power system and ENTSO-E (2009) for the synchronous zone of the European Continent, to which we have been connected for monitoring purposes since 2010 and permanently since 2015. Both regulations take into account two important operating conditions to ensure frequency stability in the Turkish interconnected system. These conditions are the ideal operating frequency of 50 Hertz (Hz) with a practical range of 47.5-52.5 Hz and the targeted continuous operating band of 49.8-50.2 Hz.

Due to the wide geographical distribution of the LFC system, it is difficult to achieve the required control objectives only with centralised or decentralised control structures such

as those found in microgrids. It is therefore preferable to use a multi-layered hierarchical control structure that includes primary, secondary and tertiary control systems.

Primary frequency control operates during the first 10-30 seconds of a frequency deviation event. The objective is to autonomously and locally modulate the grid frequency by adjusting the turbine speed of the corresponding generating unit and to offset any fluctuations in frequency. Governors help system inertia and load-frequency relationship, but all of these actions together cannot maintain a constant system frequency. Governors assist in managing system inertia and the load-frequency connection; nevertheless, these measures alone cannot sustain a constant system frequency. Governor control is designed as the primary means of frequency control. Therefore, governor control is the first part and is not suitable for fine tuning of the interconnected system frequency.

The secondary frequency control incorporates an internal controller tasked with restoring the frequency value established by the primary reserves to the designated frequency range for sustained operation. Secondary frequency control reserves, also known as frequency restoration reserves, are tasked with releasing main reserves and managing active power variations throughout control zones. The secondary control structure is often referred to as LFC or AGC in the literature.

2. MATERIAL AND METHODS

The load frequency control system must be designed to manage load variations and disturbances. Consequently, to conduct simulation studies in the MATLAB/SIMULINK environment, it is essential to create fundamental linearized mathematical models for all components of power systems, including generators, turbines, loads, tie lines, and governors. Establishing an objective function is crucial for the effective execution of control parameter optimization methods. The Integral Time-weighted Absolute Error (ITAE) objective function stands out with its effectiveness in reducing the waiting time and maximum frequency overshoot compared to other objective functions. In this thesis, ITAE is preferred as the objective function in order to design the controller parameters appropriately.

Heuristic optimization techniques are extensively used in several load frequency control applications and are adept at identifying optimum solutions for complicated and highly restricted problems. By using these optimization techniques, solutions may be rapidly and easily converged. Heuristic approaches need the first delineation of the algorithm's

parameters and values. Proposed solutions submitted by the user are subsequently refined to resolve the identified issue of ascertaining the optimal controller settings for load frequency control systems. The search space for candidate solutions is defined by the user and all candidate solutions must lie within this space. Among these potential solutions, the most appropriate option is selected and stored in memory. In each next cycle, potential solutions are developed by a comparable procedure. At the conclusion of each iteration, the optimal value achieved in that iteration is compared with the previously established best solution, referred to as the global best. If the optimum iteration value gives superior results compared to the global optimum, it is determined and maintained as the global optimum. However, if the optimal iteration value has a less favourable result compared to the global best, the global best value remains unchanged in the next iteration. The heuristic method persists in these iterations until the completion criteria are satisfied. This thesis employs Particle Swarm Optimization (PSO), a conventional heuristic optimization strategy, with the Whale Algorithm (WA), Honey Badger Algorithm (HBA), and Grey Wolf Optimization Algorithm (GWO), which represent contemporary heuristic optimization methods.

A two-area non-reheat thermal power system was selected as the first test system, since it is extensively cited in the literature and offers a solid foundation for assessing the efficacy of the current optimization approach. The second test system was developed using power systems, including wind and PV, in addition to the previous test system. The third test system was developed using A two-area non-reheat thermal power system, alongside power systems that include energy storage systems in addition to systems including PV and wind energy sources.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The first test system is modelled in MATLAB/SIMULINK environment by using the newly developed Honey Badger Algorithm (HBA), Whale Algorithm (WA), Grey Wolf Optimisation (GWO) and conventional Particle Swarm Optimisation (PSO) method according to the load changes in different scenarios. The findings indicate that the Honey Badger Algorithm (BPA) significantly enhances the overshoot value and settling time of system frequency and tie line power changes in comparison to existing literature and other methods used. As the second and third test systems, the performances of the controller and algorithms are tested under different operating conditions such as variable load demand, wind and solar generation and energy storage in energy storage systems, which

are more complex and difficult systems. The Honey Badger Algorithm (HBA) significantly enhances the overshoot value and settling time of system frequency and tie line power fluctuations in comparison to the Whale Algorithm (WA), Grey Wolf Optimization (GWO), and traditional Particle Swarm Optimization (PSO) techniques.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

Based on the findings of the thesis study, HBA is considered a successful and effective alternative for load frequency control, exhibiting reduced minimum/maximum overshoot and expedited settling time relative to GWO, PSO, and WA optimization methods, both in the widely referenced test system and in more complex power systems utilizing renewable energy sources such as solar and wind, along with energy storage systems. This thesis aims to elucidate and serve as a reference for future research on load frequency regulation. Future study need to concentrate on devising novel controller designs to enhance the efficacy of load frequency control procedures, in addition to formulating hybrid optimization approaches that amalgamate the advantages of current techniques and innovating new optimization techniques. Furthermore, owing to their growing ubiquity, there are plans to analyze the effects of electric vehicles on interconnected power systems and system performance by including them into load frequency control systems.

1. GİRİŞ

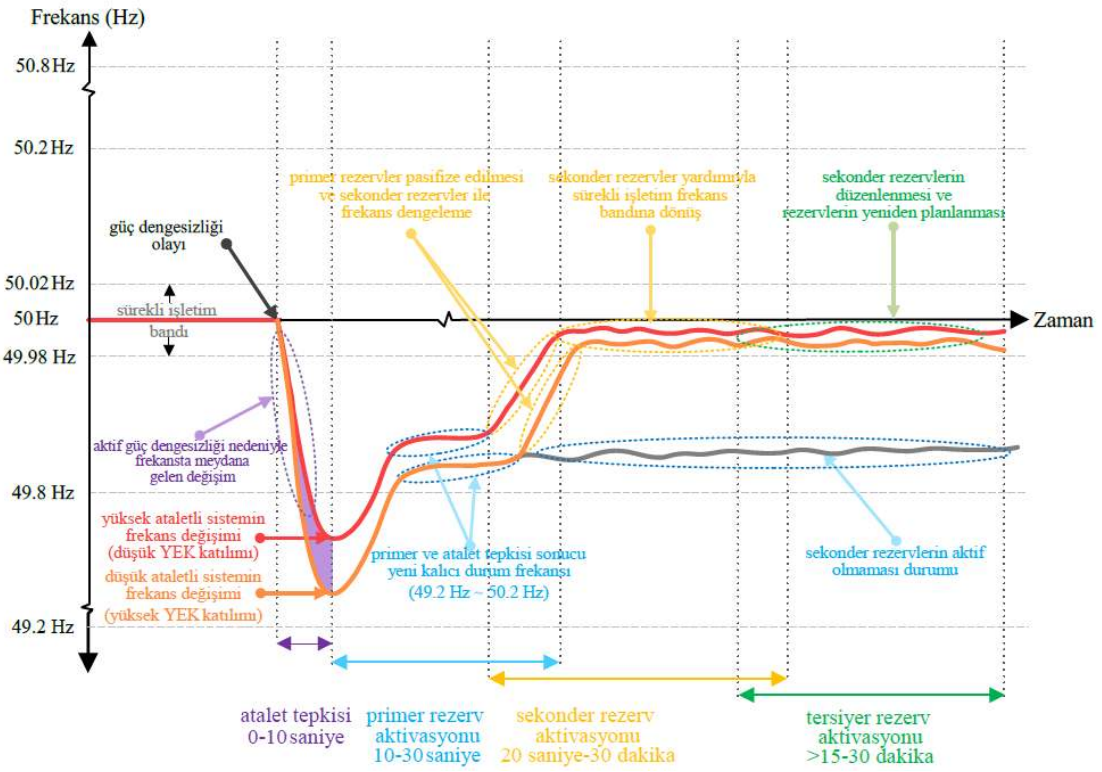
Enerji şebekesi, insanlar tarafından oluşturulan, yönetilen ve denetlenen, insanlık tarihindeki en kapsamlı ve karmaşık sistemlerden biridir. Modern toplumun devamlılığı için çok önemli bir temel olan elektriğe erişmemizi sağlayan bu muazzam güç şebekesinin müşterilere güvenli, üstün ve ekonomik olarak verimli bir elektrik enerjisi sağlaması tercih edilmektedir [1].

Üretim ve talep arasında dengesizlikler olan güç sistemleri, güç şebekesinde olumsuz frekans dalgalanmalarına yol açabilir ve potansiyel olarak sistem frekansının Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) (2022a) ve ENTSO-E (2009) gibi düzenleyici kurumlar tarafından belirlenen eşik değerlerin üzerine çıkmasına neden olabilir. Yük Frekans Kontrol (YFK) sistemi, aktif güçteki dalgalanmaları azaltmak ve kontrol bölgeleri içinde ve bölgeler arası bağlantı hatlarında dengeli bir aktif güç/frekans oranını korumak için güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [2]. İdeal YFK sisteminde üretilen ve tüketilen aktif güç arasında hiçbir fark olmaması tercih edilse de, gerçekte bu hedefe ulaşmak sistem dinamikleri nedeniyle çok zordur [3]. Bu nedenle, güvenilir ve tutarlı bir enerji tedariki sağlamak amacıyla, mevcut arz ile gerçek talep arasındaki güç eşitsizliklerini azaltmak için elektrik şebekesi içinde bir dizi stratejinin kullanılması önemlidir [4]. Düzenleyici makamlar tarafından belirlenen eşik değerlerin ötesine geçen uzun süreli frekans sapmaları, elektrik şebekesinin çalışmasını olumsuz etkileyen önemli sorunlara yol açabilmektedir. Bu sorunlar arasında iletim hattı aşırı yükleri, frekans rölesi arızaları, frekansa duyarlı ekipmanların hasar görmesi, bölgeler arası güç paylaşımı zorlukları ve koruma cihazı arızaları yer almaktadır [5].

YFK sistemi içerisinde gerçek zamanlı aktif güç/frekans dengesini sağlamak için geleneksel elektrik şebekelerinde kullanılan ana aktif güç rezervleri tipik olarak hidroelektrik santraller gibi hızlı bir şekilde devreye alınabilen veya devreden çıkarılabilen geleneksel senkron tabanlı üretim birimleridir. Bununla birlikte, modern güç sistemlerinde, akıllı şebekelerin ortaya çıkmasıyla birlikte, şebeke boyunca meydana gelen dönüşümler, farklı kaynaklardan ek aktif güç rezervlerinin dahil edilmesini gerektirmekte ve bunların sisteme entegrasyonuna olanak sağlamaktadır [6].

YFK sisteminin geniş coğrafi dağılımı nedeniyle, gerekli kontrol hedeflerine yalnızca mikro şebekelerde bulunanlar gibi merkezi veya merkezi olmayan kontrol yapıları ile ulaşmak zordur [7]. Bu nedenle, birincil, ikincil ve üçüncül kontrol sistemlerini içeren çok katmanlı hiyerarşik bir kontrol yapısının kullanılması tercih edilmektedir. Bu yapı, farklı kontrol hedeflerine ulaşmak için birden fazla zaman ölçeğinde çalışmaktadır [8].

Şekil 1.1'de varsayımsal bir güç dengesizliği senaryosunda doğal atalet tepkisi ve hiyerarşik kontrol yapısı katmanlarının görevleri ve zaman ölçekleri gösterilmektedir.



Şekil 1.1. ENTSO-E standartlarına göre, kontrol yapısının frekans stabilizasyon süreci üzerindeki atalet ve hiyerarşik etkileri [9].

Şekil 1.1, üretim birimlerinin ve frekansa duyarlı yüklerin aşırı güç talebini dengelemek için sistemle senkronize olduğu süreci göstermektedir. Bunu, atalet olarak da bilinen dönen kütlelerinde hapsolmuş kinetik enerjiyi serbest bırakarak yaparlar [10]. Bu prosedürün bir sonucu olarak, sistemdeki döner kütleli makinelerin hızında bir düşüş yaşanır ve bu da Şekil 1.1'de görüldüğü gibi sistemin frekansında bir azalmaya yol açar [11]. Bir frekans dengesizliği durumunda, üretilen fazla aktif güç dönen kütleler tarafından özümseyerek motor ve generatör millerinin hızlanmasına neden olur [12]. Aşırı talebin neden olduğu frekans düşüşünün eğimini temsil eden Frekans Değişim Oranı (RoCoF), sistemin ataleti olarak da bilinen, sistemdeki döner makinelerin kütleleri

tarafından üretilen kinetik enerji tarafından belirlenir [13]. Şekil 1.1'de görülen kırmızı eğri, düşük RoCoF ile karakterize edilen ve senkron üretim birimlerinin yaygınlığını gösteren bir güç şebekesinin frekans tepkisini göstermektedir. Yüksek RoCoF ile karakterize edilen turuncu eğri, rüzgar ve güneş sistemleri gibi Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının (YEK) önemli düzeyde dahil edildiği çağdaş bir elektrik şebekesini göstermektedir. Frekans saptasının ilk 10 saniyelik döneminde sistemdeki atalet seviyesi, frekansı düzenlemek ve kontrol etmek için çok önemli bir faktördür ve bu da şebekeye daha fazla yenilenebilir enerji kaynağının entegrasyonunu kısıtlamaktadır [14].

Birincil frekans kontrol katmanı, bir frekans saptası olayının ilk 10-30 saniyesi boyunca çalışmaktadır. Amacı, ilgili üretim biriminin türbin hızını düzenleyerek şebeke frekansını otomatik ve yerel olarak ayarlamak ve frekanstaki herhangi bir artışı veya düşüşü telafi etmektir. Birincil frekans kontrolü, bazen frekans durdurma rezervleri olarak da adlandırılan ekstra güç rezervlerinin dahil edilmesini içermektedir [15]. Şekil 1.1, Türkiye enterkonnekte şebekesindeki ana rezervlerin 200 mHz'lik bir frekans değişimi olduğunda tetiklendiğini göstermektedir. Bu rezervler hiyerarşik kontrol yapısı içinde en hızlı tepki süresine sahiptir. Ana yedeklerin oransal kazanç kullanan düşüm kontrol ile frekansı öngörülen sınırlar içinde tutma çabalarına rağmen, kullanılan oransal kontrolör kararlı durum hatalarını önlemede yetersiz kalmaktadır. Aktif sekonder rezervlerin yokluğunda, Şekil 1.1'deki gri egride görüldüğü gibi, frekans röleleri etkinleştirilene kadar kararlı durum arızası giderilemez. Primer rezervler, güç değişimi sekonder veya tersiyer rezervler tarafından tamamen dengelenene kadar çalışır durumda kalmaktadır [16]. Yedeklemenin etkinleştirilmesi, bölgeler arasında Enerji Nakil Hatları (ENH)'lerin aşırı yüklenmesini önlemek için bağlı her kontrol alanında bağımsızdır [10].

Standart sekonder kontrol katmanı, ana rezervler tarafından ayarlanan frekans değerini sürekli çalışma için istenen frekans aralığına döndürmekle görevli dahili bir kontrolöre sahiptir. Bazen frekans restorasyon rezervleri olarak da adlandırılan ikincil frekans kontrol rezervleri, primer rezervleri serbest bırakmak ve kontrol bölgeleri arasındaki aktif güç dalgalanmalarını düzenlemekle görevlidir. İkincil kontrol yapısı literatürde genellikle YFK veya Otomatik Üretim Kontrolü (OÜK) olarak anılmaktadır [17].

Bir frekans olayı sırasında iletim sistemi operatörü, her bir kontrol bölgesindeki üretim birimlerinin aktif güç çıkışlarını açarak sekonder frekans rezervlerini etkinleştirir. Bu, iletim sistemi operatörü tarafından oluşturulan bir kontrol sinyali kullanılarak merkezi olarak yapılır. Aktivasyon, frekans olayının ilk 30 saniyesi ve 30 dakikası boyunca

gerçekleşir [18]. İkincil kontrol rezervleri yalnızca yük dengesizliğinin ortaya çıktığı kontrol alanı içinde devreye girer. Amaçları, yakın bölgeler arasındaki planlanmış net güç alışverişlerinin kararlı durum seviyelerinde kalmasını sağlamaktır [11].

Bekleme rezerv hizmeti olarak da adlandırılan üçüncül kontrol katmanı, önemli bir frekans sapması durumunda ikincil rezervleri düzenlemekten, üretim birimlerinin çalışmasını ayarlamaktan ve yan hizmet rezervlerini yönetmekten sorumludur. Birincil ve ikincil rezervler yetersiz kaldığında yedek rezervleri kullanarak frekans standart değerine geri getirmeyi amaçlar. Üçüncül katman, enerji depolama ve hibrit sistemlerin mevcut limitleri gibi sistem kısıtlamalarını göz önünde bulundururken ekonomik yük dağıtımını ve güç akışını optimize etmekten sorumludur. İletim sistemi operatörü tarafından başlatılan bu katmanın zaman süresi 15 dakikadan çok daha uzun sürelerle kadar değişmektedir [16].

Türkiye'nin de bağlı olduğu enterkonnekte Avrupa şebekesinde ise her ülkenin kendi iletim sistemi operatörüne sahip olduğu ancak tüm iletim sistemi operatörlerin aynı düzenlemeleri takip ettiği YFK yapısı tercih edilmektedir [18]. Türkiye'de ikincil rezervlerin devreye alınması ve ikincil rezerve katılan üretim birimlerine gerekli üretim sinyallerinin iletilmesi Milli Yük Tevzi Merkezi (MYTM) üzerinden gerçekleştirilmektedir. YFK'nin amacı Şekil 1.1'de görüldüğü gibi belirli bir zaman dilimi içerisinde dengeli bir güç ve frekans seviyesini korumaktır. Sistem frekansını normal çalışma aralığına geri getirmek için kullanılır. Ayrıca, ikincil kontrol yapısı göz önünde bulundurulurken, oturma süresi ve aşım değeri gibi geçici geçici yanıt özelliklerinin de dikkate alınması önemlidir [19].

Türkiye enterkonnekte şebekesi için EPDK (2022a) ve 2010 yılından itibaren izleme amaçlı, 2015 yılından itibaren ise sürekli olarak bağlı olduğumuz Avrupa Kıtası senkron bölgesi için ENTSO-E (2009) yönetmeliklerinde belirtilen düzenlemelere uymak için belirtilen frekans kararlılığı standartlarını karşılamak gerekmektedir. Her iki yönetmelik de Türkiye enterkonnekte şebekesinde frekans kararlılığının sağlanması için iki önemli işletme koşulunu dikkate almaktadır. Bu koşullar, pratik aralığı 47,5-52,5 Hz olan 50 Hz ideal çalışma frekansı ve 49,8-50,2 Hz'lik hedeflenen sürekli çalışma bandıdır. EPDK (2022a) ve ENTSO-E (2009) tarafından Türkiye ve Avrupa'daki geleneksel senkron tabanlı elektrik şebekesi için belirlenen frekans sınırları aşağıdaki gibidir:

- Hedeflenen işletme koşulları: $49,8 \text{ Hz} \leq f \leq 50,2 \text{ Hz}$,

- Kabul edilebilir işletme koşulları: $49,5 \text{ Hz} \leq f < 49,8 \text{ Hz}$ ve $50,2 \text{ Hz} < f \leq 50,5 \text{ Hz}$,
- Kritik işletme koşulları: $47,5 \text{ Hz} \leq f < 49,5 \text{ Hz}$ ve $50,5 \text{ Hz} < f \leq 52,5 \text{ Hz}$,
- Kararsız işletme koşulları: $f < 47,5 \text{ Hz}$ ve $52,5 \text{ Hz} < f$.

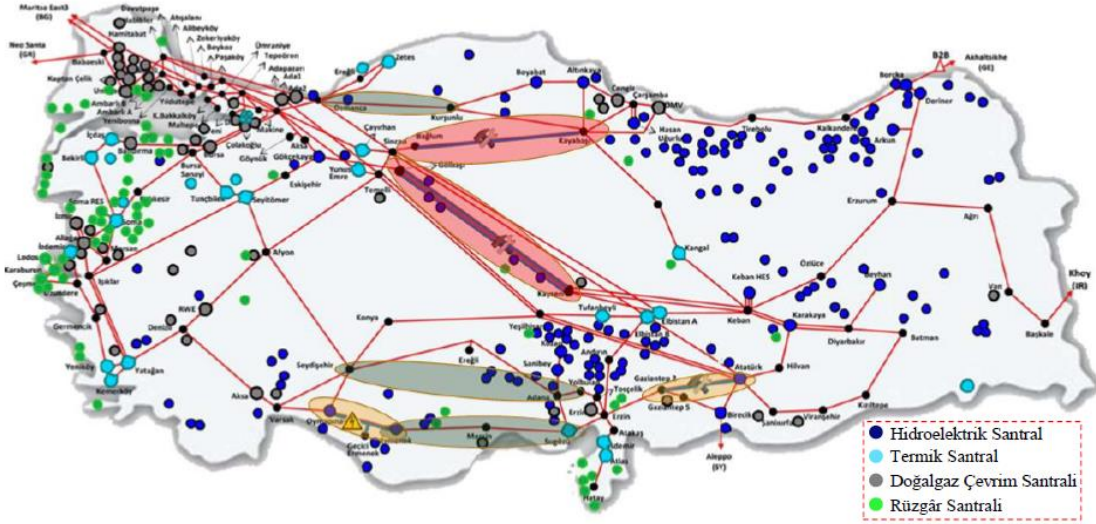
Şebekede daha fazla asenkron yenilenebilir enerji kaynağının kullanılması, olumsuz sistem davranışlarına yol açmaktadır [20]. Dolayısıyla, rüzgar ve fotovoltaik dağıtık üretim birimleri tutarsız güç üretme kapasitesine sahip olduklarından, yalnızca 49,5 Hz ila 50,5 Hz gibi dar bir frekans aralığında çalışabilirler. Frekansın bu aralığın dışına çıkması halinde, yenilenebilir enerji üretim birimlerinin elektrik şebekesiyle bağlantısının kesilmesi gerekmektedir [21]. Ayrıca, EPDK'ya (2022a) göre, şebeke frekansının 50,2 Hz'i aşması halinde rüzgar ve fotovoltaik bazlı elektrik üretimi için yeni rüzgar türbinleri veya Güneş Enerjisi Santrallerinin (GES) devreye girmesini yasaklamıştır.

1.1. ÖRNEK ELEKTRİK ŞEBEKESİ ÇÖKÜŞÜ VAKALARININ İNCELENMESİ

Rüzgar ve güneş enerjisinin elektrik şebekesine artan entegrasyonunun ve bunun sonucunda şebeke direncinin azalmasının olumsuz etkilerini daha iyi anlamak için 31 Mart 2015'te Türkiye'de, 28 Eylül 2016'da Güney Avustralya'da ve 15-19 Şubat 2021'de Teksas'ta meydana gelen olayları analiz etmek çok önemlidir. Bu vakalar, bu tür olayların nedenleri ve sonuçları hakkında değerli bilgiler sağlamaktadır. 31 Türkiye'deki Mart 2015 örneği, YEK entegrasyonunun olumsuz etkileriyle doğrudan bağlantılı olmasa da, sistemin dayanıklılığını vurgulamak ve Türkiye elektrik sisteminin dinamikleri ve kırılganlıkları hakkında fikir edinmek için analiz edilmesi gereken önemli bir örnektir. Mart 2015 tarihinde, Türkiye enerji şebekesinde hidroelektrik enerji tesisleri dışında yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretim çok azdır.

Şekil 1.2, ülkedeki birincil elektrik enerjisi kaynağının, çoğunlukla doğal kaynakların dağılımına bağlı olarak doğu bölgesinde bulunduğunu göstermektedir. Günümüzde tüketim, köklü sanayi altyapısı ve yüksek nüfus yoğunluğu nedeniyle geçmişte olduğu gibi ağırlıklı olarak ülkenin batı bölgesinde yoğunlaşmaktadır. Türkiye enterkonnekte şebekesinde, özellikle iki bölgeli bir yük frekans kontrolü sisteminde, aktif güç üretimi ve tüketimi dengesi, doğu alt sisteminden batı alt sistemine güç aktarılmasıyla sağlanmıştır. Bu aktarım, Ankara çevresinde bulunan ve 7250-9100 MW kapasiteye sahip 7 adet 400 kV ENH koridoru ile kolaylaştırılmıştır. Bu kapasite, toplam kurulu güç kapasitesinin yaklaşık yüzde 10'unu temsil etmektedir. Kırmızı ve sarı dairelerle

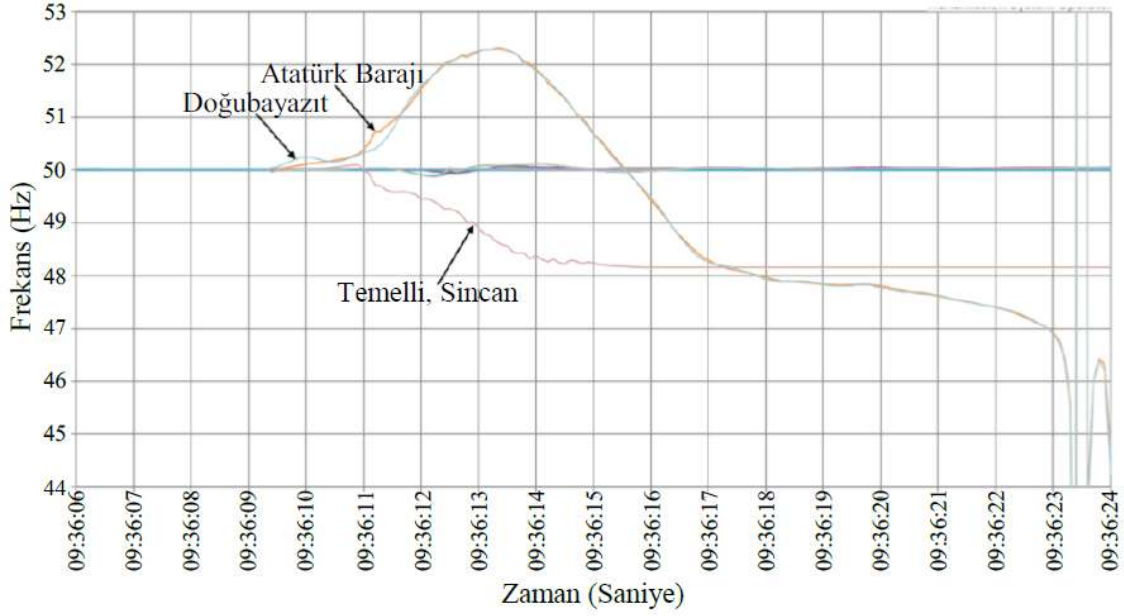
gösterildiği gibi 31 Mart 2015 tarihinde bakım koordinasyonunun olmaması, gri dairelerle gösterildiği gibi ENH'lerin aşırı yüklenme nedeniyle bağlantısının kesilmesine neden olmuştur. Sonuç olarak, gücün dengelenmesi için gerekli olan Doğu alt sisteminden Batı alt sistemine enerji akışı sağlanamamıştır.



Şekil 1.2. 2015 yılı Türkiye 400 kV iletim hattı haritası [22].

İki bölge arasındaki tüm 400 kV ENH'lerin devreden çıkması ve ENTSO-E sistemiyle bağlantının kesilmesinin ardından izole bir duruma giren Batı alt sisteminde, toplam talep üretimin %21 üzerinde gerçekleşmiştir. Aktif güç eksikliğinden kaynaklanan aktif güç dengesizliği nedeniyle, Şekil 1.1'e benzer şekilde, frekans yüksek RoCoF değeri ile ani bir düşüş yaşamıştır. Batı alt sistemindeki üretim tesislerindeki röleler devreye girdikçe, giderek artan sayıda tesis çalışamaz hale gelmiş, bu da üretimin daha da azalmasına ve Batı alt sisteminin hızla çökmesine neden olmuştur.

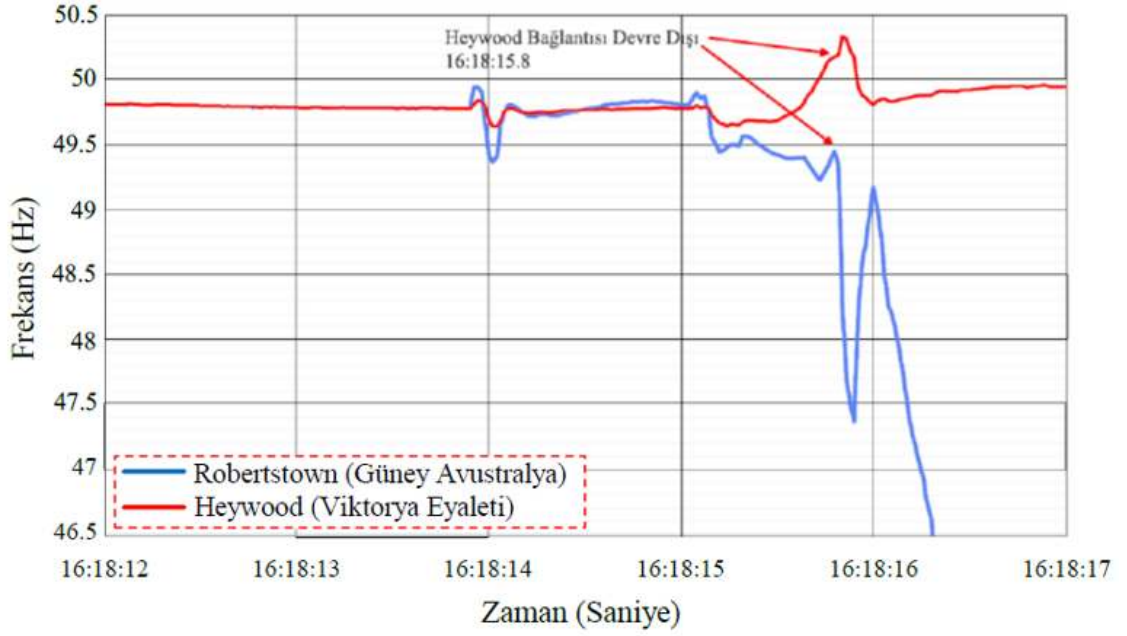
Doğu alt sisteminde bunun tersi bir olay yaşanmıştır. Üretim tüketimi %42 oranında aşmış ve Doğu bölgesinde saniyede 1 Hz'lik bir artış hızıyla 52,3 Hz'lik bir frekansa yol açmıştır. Şekil 1.3, yüksek frekans nedeniyle devreye giren rölelerin santrallerdeki fazla aktif gücü yeterince dengeleyemediğini göstermektedir. Sonuç olarak, Doğu alt sistemi birkaç saniye içinde hızlı bir çöküş yaşamıştır. Türkiye elektrik sisteminde 31 Mart 2015 tarihinde meydana gelen arızanın ardından şebekenin %95'inin onarılması ve yeniden çalışır hale gelmesi yaklaşık 9 saat sürmüştür. Elektrik kesintileri, Doğubayazıt hariç olmak üzere ülke genelinde 76 milyon kişinin hayatını olumsuz etkilemiştir [23].



Şekil 1.3. 2015 yılında hatanın meydana geldiği 09:36'da Atatürk Barajı, Sincan-Temelli ve Doğubayazıt'ta şebeke frekansının zamanla değişimi [23].

İkinci örnek, 28 Eylül 2016 tarihinde Avustralya'nın Güney Avustralya eyaletinde meydana gelen bir şebeke çöküşüdür [24]. Bu olayın rüzgar ve fotovoltaik tabanlı yenilenebilir enerji kaynaklarının neden olduğu ilk büyük güç sistemi arızası olduğuna inanılmaktadır. Çökme, elektrik şebekesindeki genel ataletin azalmasının bir sonucunda olmuştur [25]. Olaydan önce rüzgar enerjisi eyaletin toplam elektrik üretiminin %48'ini, fotovoltaik bazlı üretim ise %18'ini oluşturmaktaydı.

Elektrik kesintilerinin ardındaki temel faktör, şiddetli fırtına sonucunda birkaç ENH direğinin yıkılması ve toplam rüzgar enerjisi kapasitesinin geçici olarak %52 oranında azalmasıdır. Fazla talebin Victoria Eyaleti'nden ithal edilmesi gerekiyordu, ancak iki eyalet arasındaki ENH koridorunun kapasite limitleri aşılmıştır, bu da iki eyalet arasındaki elektrik iletiminin açısal kararlılık limitlerinin aşılmasına ve ardından 31 Mart 2015'te Türkiye'de yaşanan olaya benzer şekilde elektrik şebekesinin çökmesine neden olmuştur. Şekil 1.4, 28 Eylül 2016'da meydana gelen eyalet çapındaki çöküş sırasında şebeke frekansının zamansal gelişimini göstermektedir [26]. Eyalet genelinde 850.000 kişi elektrik kesintilerinden etkilenmiş ve toplamda 367 milyon Avustralya doları tutarında mali kayba yol açmıştır [25].

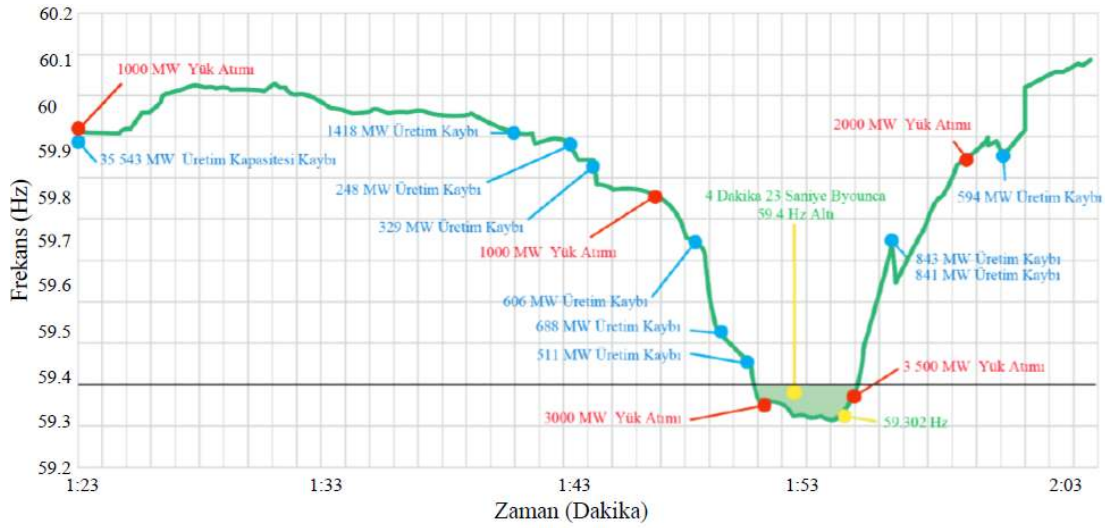


Şekil 1.4. Sistem çöküşünün meydana geldiği 16:18’de Heywood (Viktorya eyaleti) ve Robertstown (Güney Avustralya eyaleti) şehirlerinde şebeke frekansının zamanla değişimi [26].

İncelenen üçüncü vaka, 15-19 Şubat 2021 tarihleri arasında Teksas eyalet çapında meydana gelen kesintilerdir. Bu özel olay, şebeke esnekliğinin önemini vurgulamaktadır. Uzun süreli kesintiler, özellikle şiddetli dondurucu hava koşulları nedeniyle birincil elektrik üretim kaynaklarının kılığından kaynaklanmıştır. Bu elektrik kesintilerine katkıda bulunan bir diğer önemli faktör de Teksas elektrik şebekesinin ada modunda, yani Doğu ve Batı enterkonnekte şebekelerinden bağımsız olarak çalışmasıdır. Buna ek olarak, Teksas elektrik şebekesinin Doğu ve Meksika enterkonnekte şebekeleri ile sınırlı enerji transfer kapasitesi bulunmaktadır [27]. Ayrıca, Teksas şebekesinin bu süreci başlatan zayıflıkları arasında, toplam üretimin %23’ünü oluşturan, eyaletin uzak bölgelerindeki rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji üretim birimlerine olan bağımlılık da yer almaktadır. Buna ek olarak, elektrik üreticilerine yönelik bir düzenlemenin olmaması da bir başka zayıflık olmuştur.

Şubat 2021’de, üretim kesintileri ve aşırı soğukların neden olduğu yüksek talep kombinasyonu, eyaletteki spot piyasa enerji fiyatlarında önemli bir artışa yol açmıştır. Bu fiyatlar, normal fiyat olan 30 \$/MWh ile karşılaştırıldığında 9000 \$/MWh gibi çok yüksek seviyelere ulaşmıştır. Şekil 1.5, 15 Şubat 2021 akşamı yük atma ve üretim birimlerinin devre dışı kalmasının neden olduğu frekans değişikliklerini göstermektedir [28]. Yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonundan da önemli ölçüde etkilenen yük atma olayları 19 Şubat’a kadar devam etmiş ve 4 gün sürmüştür. Teksas’taki elektrik

kesintileri 150-195 milyar dolarlık bir ekonomik etkiye yol açmış ve 151 kişinin hayatını kaybetmesine neden olarak toplam 4,5 milyon kişiyi etkilemiştir [29].



Şekil 1.5. 15 Şubat 2021 günü Texas şebeke frekansının zamanla değişimi [28].

İncelenen üç vakanın sonucunda; Türkiye enterkonnekte şebekesinin ENTSO-E ve diğer komşu enterkonnekte sistemlerle kısıtlı enterkonneksiyon kapasitesi, Güney Avustralya eyaletinin Victoria eyaletiyle kısıtlı enterkonneksiyon kapasitesi ve Batı ve Doğu (son derece sınırlı) enterkonnekte şebekelerinin daha büyük şebekelerinden ayrı olarak Teksas'ın ada modu, bu kapsamlı şebeke arızalarının sonuçlarını artırmıştır. Bu nedenle, daha büyük enterkonnekte güç şebekeleri ile enerji transferi ihtiyacını ve enterkonnekte enerji nakil hattı kapasitesini dikkate almak zorunludur.

Güney Avustralya ve Teksas'taki durumlara benzer şekilde, elektrik şebekesiyle senkronize olmayan yenilenebilir enerji kaynaklarının önemli bir oranı, sistemin toplam ataletinde bir azalmaya yol açmaktadır. Sonuç olarak, bu durum RoCoF daha belirgin bir artışa neden olmaktadır. Bu nedenle, şebekedeki genel ataletin çeşitli çağdaş teknikler kullanılarak artırılması gerektiği açıktır.

Sistemin esnekliğine, istikrarına ve güvenilirliğine öncelik veren enerji politikalarına açık bir ihtiyaç vardır. Bu politikalar aynı zamanda elektrik santrallerinin elektrik tüketilen alanların yakınına yerleştirilmesini veya güçlü şebeke bağlantıları kurulmasını içeren sistem odaklı planlamayı da teşvik etmek önemlidir [6].

İlgili örnekler ve bulgular analiz edildiğinde, Türkiye'nin enterkonnekte şebekesinin kontrolünün etkinliğini artırmak için:

- MED-TSO [30] ve ENTSO-E gibi komşu ülkelerle enerji alışverişi altyapısını ve enterkonneksiyon kapasitelerini genişletecek projeleri hayata geçirerek yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme entegrasyonunun artırılması,
- 31 Mart 2015 tarihinde meydana gelen senaryo göz önünde bulundurulduğunda bakım görevlerinin organizasyonu ve zamanlamasının iyileştirilmesi,
- Türkiye’deki Doğu ve Batı alt sistemleri arasındaki 400 kV bağlantı kapasitesinin artırılması,
- Ülkenin Batı alt sistemi öncelikle doğal gaz çevrimi, rüzgar, biyokütle, jeotermal ve jeotermal enerji santrallerinin yanı sıra GES'lere de ev sahipliği yapmaktadır. Rüzgar ve fotovoltaik yenilenebilir enerji kaynakları şebeke içinde esneklik ve daha güçlü frekans düzenlemesiyle ilgili zorluklarla karşılaşabilirken, bu dağıtılmış üretim birimlerinin tüketim alanlarının yakınında daha fazla konuşlandırılması, iki konum arasındaki güç aktarımı ihtiyacını azaltılması,
- Yük frekans kontrolü sistemi içinde frekans düzenlemesini destekleyen yaklaşımlarla rüzgar türbinlerinin Türkiye şebekesine entegre edilmesi,
- Tüketicilerin katılımının kolaylaştırılması ve etkin yönetimin sağlanması,
- Farklı enerji depolama birimlerinin şebekeye dahil edilmesiyle sistem esnekliğinin artırılması,
- Elektrikli araç bataryalarının toplayıcılar aracılığıyla yük frekans kontrolü sisteminde birincil ve ikincil güç rezervleri olarak kullanılması ve sekonder frekans yönetimi için esnek kontrolör tasarımlarının seçilmesiyle sistemin beklenmedik frekans değişikliklerine tepkisinin hızlandırılması gibi öneriler dikkate alınmalıdır.

1.2. FREKANS KARARLILIĞINI ARTIRMAYA YÖNELİK MODERN YAKLAŞIMLAR

Yük frekans kontrolü sisteminde aktif güç rezervinin, ataletin ve esnekliğin olmaması frekans değişimlerine yol açabilir. Bu dalgalanmalar geçici veya kalıcı elektrik kesintilerine yol açma potansiyeline sahiptir ve aşırı durumlarda tüm güç sisteminin çökmesine neden olabilir. Yük frekans kontrolü sisteminin yanı sıra güç sisteminin güvenilirliğini ve tutarlılığını artırmak ve daha fazla esneklik için ekstra rezervler sunmak amacıyla, Şekil 1.6'da görüldüğü gibi farklı zaman dilimlerinde bir dizi geleneksel ve

çağdaş yöntem kullanılabilir [31].



Şekil 1.6. Çeşitli güç/frekans dengeleme yöntemleri [32].

Son dönemde talep ve üretim tarafında yaşanan değişiklikler, yük frekans kontrolü sisteminin frekans istikrarını etkin bir şekilde koruyabilecek ve bölgeler arası güç akışının istenen değerler içinde kalmasını sağlayabilecek başlıca yaklaşımlar:

- Enerji depolama teknolojileri [42]-[46],
- Dinamik Talep Cevabı (DTC) [32], [37]-[41],
- Sanal atalet kontrolü [14], [16], [34]-[36],
- Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (Flexible AC transmission systems - FACTS) cihazları [18], [31], [33].

Senkron generatörlere dayanan geleneksel güç sistemlerinden yenilenebilir enerji kaynaklarına ve güç elektroniği tabanlı dağıtık üretim birimlerine geçiş göz önüne alındığında, bu yöntemlerin hızlı ve dinamik tepkisi primer frekans rezervleri olarak hizmet edebilir. Bu da sarkma karakteristiklerini simüle ederek sistemdeki döner veya yedek güç ihtiyacını azaltmaktadır. Ayrıca, bu dört çözüm sekonder frekans rezervini geliştirme ve sistem esnekliği ve ek harcamaların azaltılması yoluyla ekonomik avantajlar sağlama kabiliyetine sahiptir [47].

Şebekede frekans istikrarını arttırmak ve düşük atalet sorununu ele almak için olası enerji depolama çözümleri arasında senkron kondansatörler, yakıt hücreleri, volanlar, bataryalar, ultra kapasitörler, yüksek gerilim doğru akım iletim hatları ve elektrikli araç bataryaları bulunmaktadır [9], [14], [35]. Bununla birlikte, bu enerji depolama cihazlarının fahiş maliyeti göz önüne alındığında, Elektrikli Araç (EA) batarya paketleri,

düşük ataletli mevcut güç şebekelerine gerekli ek gücü sağlamak için alternatif teknolojilere kıyasla uygun maliyetli bir çözüm haline gelmektedir [35], [44], [48]-[49].

Son dönemde literatürde dikkat çeken ve özellikle dijitalleşme ile birlikte gelecekte elektrik şebekeleri için gerekli hale gelecek bir diğer teknoloji ise DTC olarak adlandırılan sistemdir. Akıllı şebekelerin yaygın kullanımı, iki yönlü iletişim ve güç akışı kullanımı yoluyla DTC uygulamasını kolaylaştırmıştır. DTC, ayarlanabilir yüklerin etkinleştirilmesini veya devre dışı bırakılmasını sağlayarak müşterilerin frekans kontrolüne aktif olarak katılmasına olanak tanımaktadır [12], [17], [38], [41]. DTC, çift yönlü güç ve bilgi alışverişine izin verirken sistem güvenilirliğini, güç kalitesini ve şebekedeki çeşitli teknolojik ve ekonomik kısıtlamaları göz önünde bulundurmaktadır [50]. DTC çerçevesinde kullanılan yükler tipik olarak termal enerji depolama yöntemlerini ve çeşitli enerji depolama teknolojilerini kapsamaktadır. DTC tarafından düzenlenebilen başlıca termal yükler arasında elektrikli su ısıtıcıları, klimalar, dondurucular, buzdolapları ve ısı pompaları yer almaktadır [38], [41], [51]. Ayrıca DTC yapısı, su arıtma ve pompalama tesislerinin yanı sıra kolektör konseptindeki batarya kapasiteleri nedeniyle EA'ları da içerebilir [12], [17], [37], [40], [52], [53]. DTC yapısı, gelişmiş sistem esnekliği ve güvenilirliği, azaltılmış işletme giderleri ve iyileştirilmiş sistem verimliliği dahil olmak üzere çok sayıda fayda sunmaktadır [50].

Sanal atalet kontrolü, frekansları dengelemek için kullanılan bir diğer çağdaş yöntemdir. Sanal atalet, daha fazla yenilenebilir enerji kaynağını büyük güç sistemlerine dahil etmek amacıyla dönen senkron generatör rotorlarında depolanan kinetik enerjinin davranışını taklit etmek için kullanılmaktadır [21]. Hızlı enerji depolama kapasitesi olan atalet, mekanik ve elektrik gücü arasındaki eşitsizlikten kaynaklanır. Ataletten kaynaklanan frekans değişikliği, erişilebilen anlık güç rezervlerinin miktarına, dolayısıyla sistemin ataletine bağlı olmaktadır [54]. Generatörler ve motorlar gibi yüklerin dönme bileşenleri, atalet olarak da bilinen kinetik enerjiyi depolamaktadır. Bu enerji, güç sistemindeki dengeyi yeniden sağlamak için gereken ek güç rezervlerinin (birincil ve ardından ikincil) etkinleştirilmesinde bir gecikme sağlamaktadır [14]. Primer rezervlerin devreye girmesinden önce şebekede yeterli atalet yoksa, frekans sapması sistemin güvenliğine tehdit oluşturacak seviyelere yükselebilir [16]. Fotovoltaik ve yakıt hücresi tabanlı yenilenebilir enerji sistemlerine benzer şekilde, rüzgar türbinlerinin çoğu güç elektroniği arayüzleri kullanılarak asenkron bir şekilde şebekeye bağlanmaktadır. Bu, masraflardan tasarruf etmek, sistemi basitleştirmek, aerodinamiğin türbin bileşenleri üzerindeki

mekanik baskısını azaltmak ve türbinlerin ömrünü uzatmak için yapılmaktadır [11]. Senkronize olmayan rüzgar türbinleri, büyük dönme kütlelerine rağmen frekans kontrolü için güç şebekesine ekstra atalet sağlama yeteneğinden yoksundur [14]. Sabit hızlı rüzgar türbinleri ve değişken hızlı rüzgar türbinlerinin çift beslemeli asenkron generatörlerinin sadece statorları doğrudan şebekeye bağlanabilirken, senkronize olmayan değişken hızlı rüzgar türbinleri yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı çoğu uygulamada genellikle tercih edilmektedir [8]. Güç sistemleri için ek atalet kaynakları arasında senkron kondansatörler, rüzgar türbinleri, ultrakapasitörler ve bataryalar yer alabilir [9],[35]. Ayrıca, literatürde elektrikli araçların ve termal yüklerin yük tarafında sanal atalet yönetimi için ek kaynaklar olarak değerlendirilebileceği ve frekans istikrarına katkıda bulunabileceği belirtilmektedir [34].

FACTS cihazlarının yük frekans kontrolü sistemi içinde kullanılması, sistem frekans kararlılığını artırabilecek bir diğer ileri yaklaşımdır. Literatürdeki araştırmalar, FACTS cihazlarının enerji depolama teknolojileri ve DTC'ye kıyasla frekans istikrarını artırmada daha etkili olduğunu göstermektedir. Bunun başlıca nedeni, bölgeler arası ENH'lerle bağlantıları ve üstün kontrol edilebilirlikleridir [31]. Tristör kontrollü faz kaydırıcılar, statik senkron seri kompanseörler, hatlar arası güç akış kontrolörleri ve kapı kontrollü seri kapasitörler, bölge frekansının kararlılığını ve gücün farklı bölgeler arasında dağılımını artırabilen seri FACTS cihazlarına örnektir. Ayrıca, süper iletken manyetik enerji depolama, kapasitif enerji depolama ve redoks akışkan pil üniteleri gibi enerji depolama teknolojilerini kullanan FACTS cihazları, frekans ve güç paylaşımı salınımlarını etkili bir şekilde azaltabilir ve stabilize edebilmektedir. Bu cihazlar bunu, ani yük dalgalanmalarına yanıt olarak sisteme aktif güç enjekte ederek veya çekerek başarmaktadır [33].

Açıklanan dört yöntem arasında FACTS cihazları, yüksek maliyetleri nedeniyle frekans dengeleme ve sistem esnekliği elde etmek için baskın bir seçenek olarak öne çıkmamaktadır [55].

1.3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Aktif güç ve frekansın, dolayısıyla yük frekans kontrolü sisteminin kararlılığı, 70 yılı aşkın bir süredir bu alanda çalışan elektrik mühendisleri için uzun süredir devam eden bir çalışma odağı olmuştur [56]. Bozuklukların bastırılmasıyla ilgili olan yük frekans

kontrolü problemi, daha önce de belirtildiği gibi, bir bölge içindeki frekans dalgalanmalarını en aza indirmeyi ve bölgeler arasında istenmeyen güç paylaşımını önlemeyi amaçlamaktadır [57]. Aktif güç dengesini sağlamak ve daha önce bahsedilen iki ana kontrol hedefini yerine getirmek için, Türkiye'de MYTM olarak bilinen merkezi izleme/kontrol birimi, ilgili üretim birimlerine gerekli kontrol sinyalinin gönderir. Bu nedenle sekonder kontrol yapısı, gerekli kontrol sinyallerini üretmek ve primer kontroldeki kalıcı frekans hatalarını düzeltmek için bir kontrolör yapısına ihtiyaç duymaktadır [5].

Elektrik enerjisinin ışık hızında uzun mesafelere iletilmesinin yaygın olarak benimsenmesi 20. yüzyılın başlarında başladı. Ancak elektrik şebekesinin geniş alanlara yayılmasıyla ortaya çıkan bölge ve birbirine bağıllık kavramlarıyla 1950'li yıllara kadar karşılaşılmamıştır. Daha sonra, bağlantılılık kavramı, gevşek bağlı ENH'ler aracılığıyla bölgeler içinde ve bölgeler arasında üretilen elektriğin anlık tüketimini etkin bir şekilde düzenlemek için optimum kontrolör tasarımlarının geliştirilmesine yönelik araştırmaları teşvik etmiştir [58].

Bir yük frekans kontrol sisteminde sekonder frekans kontrolü için geliştirilen ilk kontrolörler, özellikle primer frekans kontrolünde kaçınılmaz olan kalıcı durum hatalarını önlemek için tasarlanmış integral kontrolörlerdi. Literatürde çok sayıda kontrolör tasarımı oluşturulmuş ve tanıtılmıştır. Bununla birlikte, literatürün kapsamlı bir şekilde analiz edilmesinden ve pratik yük frekans kontrolü uygulamalarının dikkate alınmasından sonra, I, PI ve PID tabanlı klasik kontrolörlerin alternatif kontrolör türlerine göre açık bir üstünlük sergilediği tartışılmazdır. Literatürdeki araştırmalar, yük frekans kontrolü sisteminin kontrol hedeflerini geliştirmek veya yük frekans kontrolü sisteminde diğer disiplinlerin kontrolör tasarımlarını kullanmanın potansiyel faydalarını değerlendirmek için kontrolör tasarımı çalışmalarına giderek daha fazla odaklanmaktadır [56], [59], [60]. Tarihsel olarak, literatürde görülen ilk kontrolör tasarımları çoğunlukla optimal, gürbüz veya uyarlanabilir tasarımlara odaklanmıştır. Ancak, son zamanlarda yapay zeka tabanlı tasarımların kullanımında bir artış olmuştur. Literatürde çok sayıda sınıflandırma olmasına rağmen, yük frekans kontrolü sistemi için kontrolör kavramları; klasik [4], [37], [61], [62], optimal [35], [63], uyarlamalı [64], [65], [66], gürbüz [12], [16], [67] ve zeki [57], [59], [65], [66] denetleyici tasarımları olarak 5 sınıfta incelenmektedir. Her tasarım sınıfının güç sistemleri açısından avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır [8], [47], [68], [69].

Literatürde, yük frekans kontrolü sisteminin dinamik kararlılığını artırmak ve kontrol hatalarını düzeltmek için Alan Kontrol Hatası (AKH) sinyalinin entegrasyonunu kullanan geleneksel I, PI ve PID kontrolörlerini kapsamaktadır [8]. Geleneksel PI/PID kontrolörleri ayarlama ve tasarım için transfer fonksiyonlarına dayanmaktadır, bu da performanslarını büyük ölçüde kazanç değerlerinin optimizasyonuna bağımlı hale getirmektedir [57].

Bir yük frekans kontrolü sürecinin etkinliği ve başarısı, kontrolör seçimine ve kontrolörün ayarlarını belirlemek için kullanılan optimizasyon yaklaşımına bağlıdır. Bu çerçevede araştırmacılar, optimum kontrolör parametrelerini tespit etmek amacıyla Genetik Algoritma (GA) [70], Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) [72], [73], [74], [75], [76], [77], Çakal Algoritması (ÇA) [78], Şempanze Optimizasyon Algoritması (ŞOA) [79], Goril Birlikleri Optimizasyonu (GBO) [80], Bakteri Arama Algoritması (BAA) [70], [81], [82], Denge Algoritması (DA) [83], Deniz Avcısı Algoritması (DAA) [84], Aritmetik Optimizasyon Algoritması (AOA) [85], Yusufçuk Algoritması (YA) [86], Jaya Algoritması (JA) [87], Sinüs-Kosinüs Algoritması (SKA) [88], Salp Sürü Algoritması (SSA) [89], Ateşböceği Algoritması (AA) [71], Karınca Aslan Algoritması (KAA) [90], Simbiyotik Organizmalar Arama Algoritması (SOAA) [91] gibi yapay zeka tabanlı sezgisel algoritma yöntemleri kullanmışlardır.

Yük frekans kontrolü konusu hem dünyada hem de ülkemizde büyük önem taşımaktadır ve yük frekans kontrolü hakkında birçok lisansüstü tez hazırlanmıştır [92]-[97]. Çizelge 1.1'de Türkiye'de yapılan bazı lisansüstü tezler hakkında bilgi verilmektedir.

Çizelge 1.1. Türkiye'deki YFK konusunda lisansüstü tezler.

Tez	Kontrolör	Optimizasyon Yöntemi
YL [98]	I	x
YL [99]	PI	Yapay Sinir Ağları
YL [100]	PID	Bulanık Mantık
YL [101]	PI/PID	GA
YL [102]	PID	FSA
YL [103]	PID	YAA
YL [104]	PID	SOAA
YL [105]	Bulanık Mantık	PSO
YL [106]	PI	x
D [107]	PI	Bulanık Mantık

Çizelge 1.1. (devam) Türkiye’deki YFK konusunda lisansüstü tezler.

D [108]	PID	GA
D [109]	PID	BA tabanlı Bulanık Mantık
D [110]	PID	YAK

Çizelge 1.1’de gösterilen lisansüstü tezler daha detaylı incelendiğinde, yük frekans kontrolü sürecinde ağırlıklı olarak klasik P, I, D bileşenlerinden ve bunların birçok kombinasyonundan oluşan PI ve PID kontrolörlerinin kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca, GA, Yerçekimi Arama Algoritması (YAA), Yapay Arı Kolonisi Algoritması (YAK), PSO gibi geleneksel optimizasyon tekniklerinin yanı sıra Fil Sürüsü Algoritması (FSA), Balina Algoritması (BA) ve SOAA gibi daha yeni yaklaşımlar da kontrolör parametrelerinin optimum şekilde belirlenmesini sağlamak için kullanılmıştır.

Bununla birlikte, bu çalışmalarda yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama teknolojileri güç sistemine dahil edildiğinde yük frekansı yönetimi sürecinin sonuçlarına ilişkin kapsamlı bir analiz bulunmamaktadır.

1.4. ÇALIŞMANIN AMACI

Bu tez çalışması, güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi sistemleri de dahil olmak üzere yenilenebilir enerji sistemlerini enerji depolama teknolojileriyle birlikte çok alanlı güç sistemlerine entegre eden yeni bir güç sisteminin tasarımını sunmaktadır. Bu tasarımın odak noktası, etkili yük frekansı kontrolü sağlamaktır. PID kontrolör parametreleri, yeni oluşturulan Bal Porsuğu Algoritması (BPA) [111], BA [112], Gri Kurt Optimizasyonu (GKO) [113] teknikleri ve klasik yöntem PSO [114] kullanılarak optimum sonuçlar elde etmek için belirlenmiştir. Amaç fonksiyonu olarak Zaman Ağırlıklı Mutlak Hatanın Toplamı (Integral Time-weighted Absolute Error - ITAE) kullanılmıştır.

Değerlendirme için seçilen ilk test sistemi, güncel optimizasyon tekniğinin performansını değerlendirmek için uygun bir platform sağlayan, literatürde iyi referanslanan iki alanlı bir termal güç sistemidir. Daha sonra, mevcut sisteme yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama teknolojileri dahil edilerek daha karmaşık güç sistemleri elde edilmiştir. Sistemin davranışı, farklı yük talepleri ve üretim miktarları göz önünde bulundurularak farklı algoritmalar kullanılarak analiz edilerek karşılaştırılmıştır. Söz konusu optimizasyon tekniğinin yük frekans kontrolü işleminde, kullanılan tüm sistemleri ve tüm senaryolar dikkate alındığında önemli sonuçlar verdiği görülmüştür.

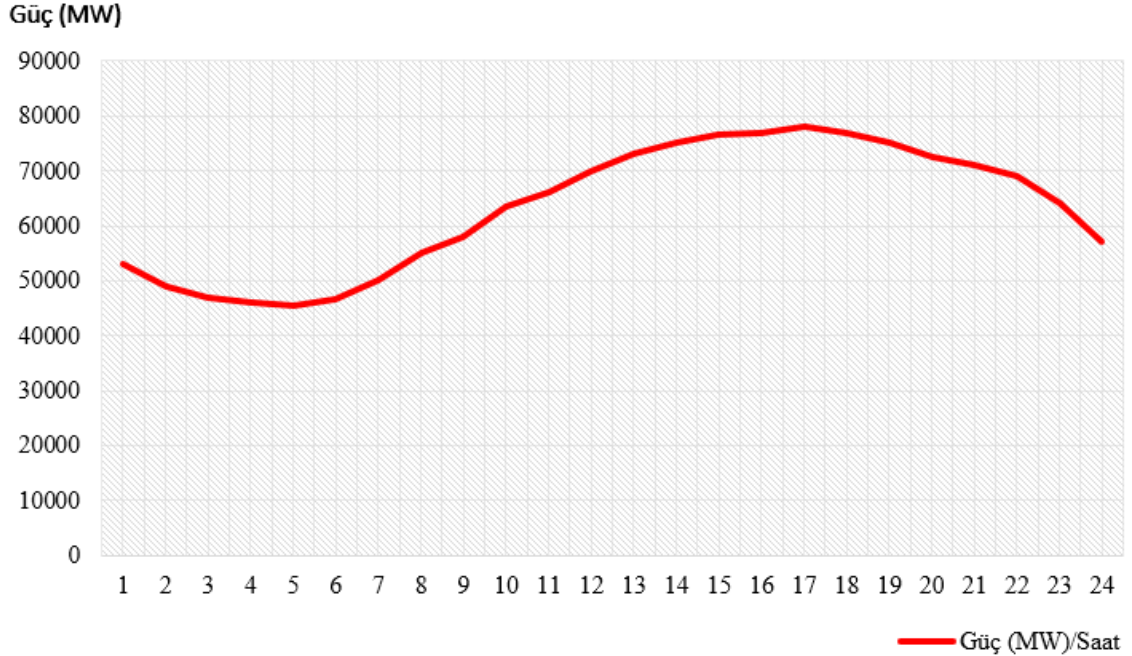
Tez çalışmasının giriş bölümünden sonraki bölümleri aşağıdaki gibi organize edilmiştir:

- Bölüm 2: Frekans kontrolü detaylı olarak tanıtılmış, frekans değişimi ve etkileri, primer, sekonder ve tersiyer frekans kontrolü, generatör kaybına aşamalı yanıt gibi kavramlar açıklanmıştır.
- Bölüm 3: Yük frekans kontrolünü gerçekleştirmek için kullanılan generatör, yük, türbin, hız düzenleyici (governor) ve bağlantı hattı modelleri tanıtılmış, ayrıca yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama sistemlerini içeren yük frekans kontrolü modelleri açıklanmıştır.
- Bölüm 4: Yük frekans kontrolünde kullanılan PID kontrolör yapıları ve bileşenleri (oransal, integral ve türev terimler) hakkında bilgiler verilmiştir.
- Bölüm 5: Farklı optimizasyon süreçleri için kullanılan amaç fonksiyonları detaylandırılmıştır.
- Bölüm 6: Sezgisel optimizasyon teknikleri (bal porsuğu, gri kurt, balina ve parçacık sürü algoritmaları) ve bu tekniklerin matematiksel modelleri açıklanmıştır.
- Bölüm 7: Sistemin modellenmesi süreci ve test sistemleri için yapılan optimizasyon sonuçları detaylandırılmış, farklı senaryolar için benzetim sonuçları sunulmuştur.
- Bölüm 8: Elde edilen sonuçların genel değerlendirmesi yapılmış ve gelecekte yapılacak çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. FREKANS KONTROLÜ

2.1. FREKANS DEĞİŞİMİ

Güç sistemindeki yükler sürekli değişmektedir. Bir konut müşterisi elektrikli çamaşır kurutucusunu her çalıştırdığında veya endüstriyel bir müşteri bir fırını her ateşlediğinde, güç sistemi yükü değişmektedir. Bu nedenle üretim ile yükü eşleştirme görevi zordur, hedef her zaman hareket halindedir. Üretim ve yük arasında tam bir eşleşme sadece kısa bir süre için sağlanmaktadır. Yükler sürekli değişmektedir ve üretim arzı ile sistem yükü arasında her zaman başka bir dengesizlik yaratmaktadır. Şekil 2.1, örnek bir dağıtım şirketi için yaz mevsimi 24 saatlik bir yük eğrisini göstermektedir. Yük değişikliklerine dikkat edildiğinde saniyeler gibi daha küçük zaman dilimleri için bile izlense, yük yine de sürekli değişecektir. Bağlı yük asla sabit değildir; yük her saat, her dakika ve günün her saniyesinde değişmektedir [1].

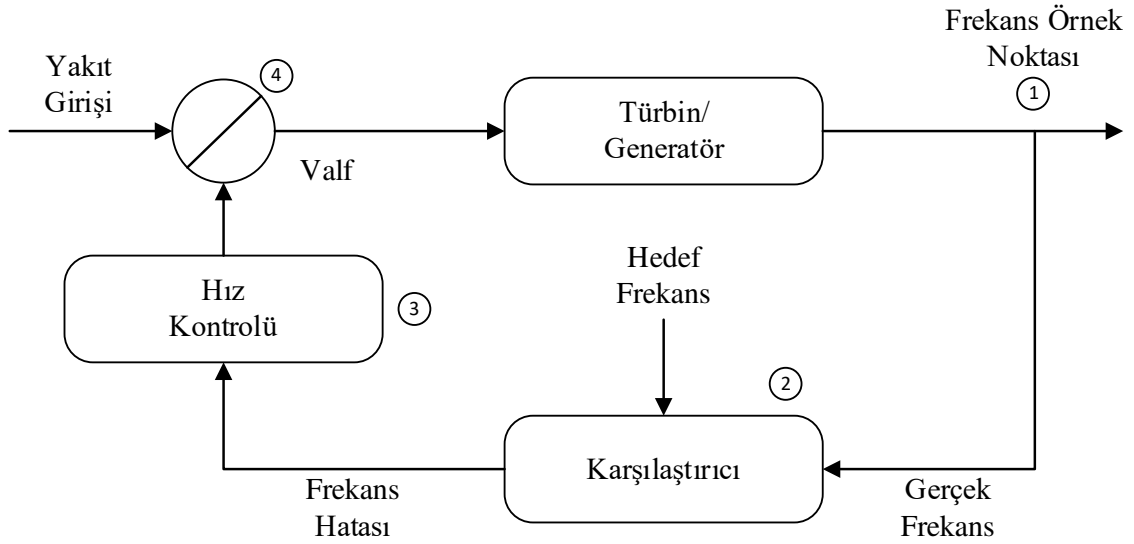


Şekil 2.1. Yaz yük eğrisi [1].

Güç sistemlerinin ilk zamanlarında üretimi yük ile eşleştirmek için çok temel kontrol sistemleri kullanılmaktaydı. Bir santral operatörü, çıkış yük ile eşleşene kadar generatör çıkışını artırmak veya azaltmak için elle ayarlanan basit bir kadran kontrolü

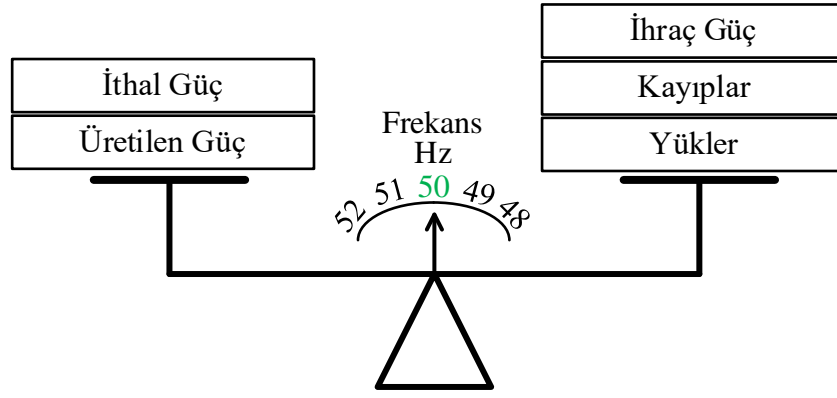
kullanılmaktaydı. Güç sistemleri büyüdükçe ve müşterilerin güç sistemi performansından beklentileri arttıkça, üretimi yük ile eşleştirmek için kullanılan ekipman da karmaşıklaştı. Üretim ve yük arasında istenen eşleşmeyi sağlamak için karmaşık kontrol sistemleri geliştirilmiştir [2].

Bir kontrol sistemi, çeşitli sistem giriş ve çıkışlarının ölçümlerine dayalı olarak bir sistemin çıkışını otomatik olarak kontrol etmek için kullanılan bir araçtır. Şekil 2.2’de bir generatörün çıkış frekansını kontrol etmek için kullanılabilecek basit bir kontrol sisteminin blok diyagramı gösterilmektedir. 1. noktada, generatörün çıkış frekansı izlenir. 2. noktada, çıkış frekansı hedef veya planlanan frekansla karşılaştırılarak ve bir frekans hatası belirlenir. 3. noktada, frekans hatasını düzeltmek ve gerçek frekansı planlanan frekansa eşit hale getirmek için gerekli ayarlamalar hesaplanır. 4. noktada hız kontrol cihazı, generatöre daha fazla veya daha az çalışma materyali (buhar, su, gaz, vb.) girmesini sağlamak için bir valf konumunu ayarlar.



Şekil 2.2. Basit frekans kontrol sistemi [1].

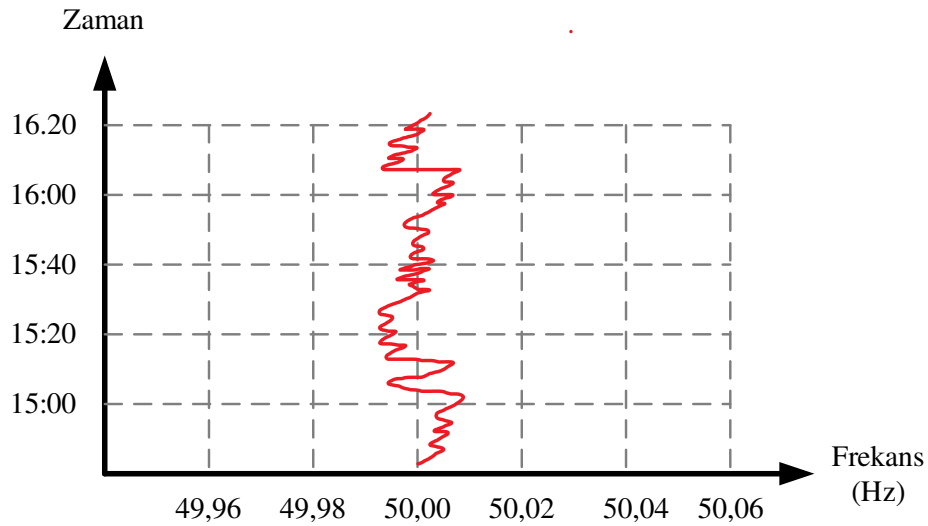
Fazla veya eksik üretimin en önemli sonucu sistem frekansı üzerindeki etkisidir. İzole bir güç sistemindeki veya bir enterkonnekte sistemdeki üretim arzı sistem yüküyle tam olarak eşleştiğinde frekans tam olarak 50 Hz olabilir. Yeterli üretim sağlanmadığında frekans 50 Hz'den daha düşük bir değere düşer. Çok fazla üretim yapıldığı zaman frekans 50 Hz'in üzerine çıkar. Şekil 2.3 tüketilen güç (yük, ihracat, kayıplar) ile tedarik edilen güç (üretim ve ithalat) arasında bir denge sağlama ihtiyacını göstermektedir. Bir Enterkoneksiyon içinde, münferit güç sistemleri 50 Hz nominal frekansı civarında dar bir bant içinde frekansı korumak için birbirlerine yardımcı olmaktadır [2].



Şekil 2.3. Kaynak/yük dengesi [1].

Hedef frekans planlanmış frekans olarak adlandırılmaktadır. Gerçek frekans planlanan frekanstan saptığında bir frekans sapması meydana gelmiştir. Örneğin, planlanan frekansın 50 Hz olduğunu varsayılırsa, gerçek frekans 49,95 Hz ise -0,05 Hz frekans sapması meydana gelmiştir.

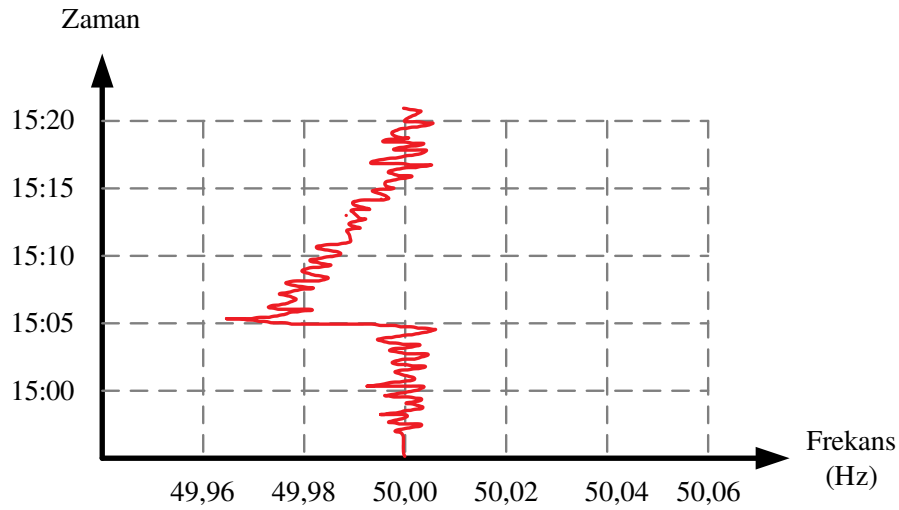
Normal koşullar altında, büyük bir enterkonnekte sisteminin güç sistemi frekansı planlanan değerden yaklaşık $\pm 0,03$ farklılık gösterebilmektedir. Planlanan frekans 50 Hz ise, normal aralık 49.97 ila 50.03'tür. Bu değişimler normaldir ve enterkonnekte sistemin yükünün değişken doğası nedeniyle sürekli olarak meydana gelir. Şekil 2.4'te büyük bir enterkonnekte sistemde meydana gelen normal frekans sapmaları gösterilmektedir. Amaç bu frekans sapmalarının küçük olmasını sağlamak ve frekansın 50 Hz 'e yakın kalmasını temin etmektir. Frekansın 50 Hz civarında sıkı bir şekilde tutulması, çeşitli kontrol sistemleri aracılığıyla üretim ünitesi çıkışlarının ayarlanmasıyla sağlanmaktadır.



Şekil 2.4. Normal frekans sapması [2].

Güç sisteminde büyük bir generatörün kaybı gibi anormal olaylar meydana geldiğinde, frekansta daha büyük sapmalar yaşanır. Şekil 2.5'te büyük bir generatörün kaybı ve nihai olarak değiştirilmesinin ardından frekanstaki değişim gösterilmektedir. Şekil 2.4'teki frekans sapmaları normaldir ve endişe yaratmaz. Ancak Şekil 2.5'teki frekans sapmaları endişe yaratacak kadar büyüktür.

Şekil 2.5'de görüldüğü gibi, bir generatörün kaybindan sonraki birkaç dakika içinde frekans 50 Hz'e geri dönmüştür. Frekans ± 1 Hz'den daha fazla saparsa, şebeke ve müşteri ekipmanlarında hasar meydana gelebilir. Bazı şebeke ve müşteri ekipmanı türleri dar bir frekans bandı içinde çalışmak üzere tasarlanmıştır.



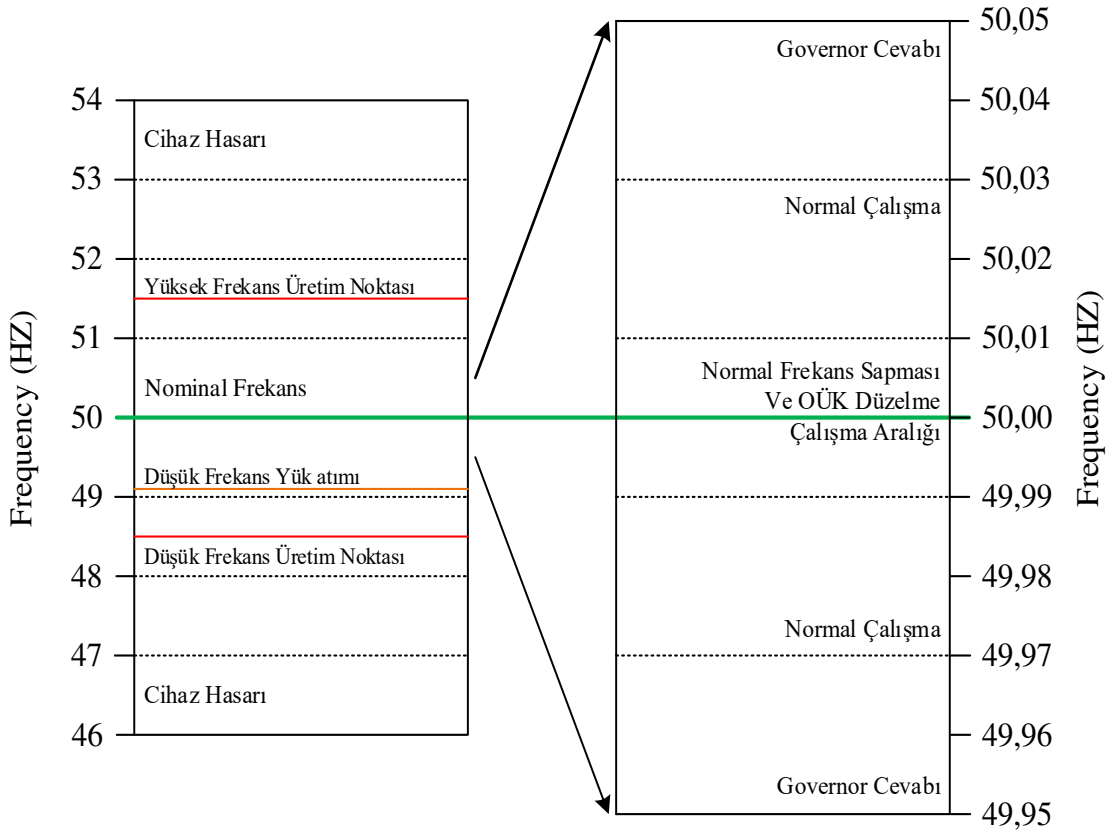
Şekil 2.5. Anormal frekans sapması [2].

Şekil 2.6 frekans sapmaları kavramını özetlemektedir. Şeklin sağ tarafında normal sistem koşulları sırasındaki tipik sapmalar gösterilmektedir. Planlanan frekansa bağlı olarak, normal sapmalar planlanan değerden yaklaşık $\pm 0,03$ 'tür. Şeklin sol tarafı daha büyük sapmaları göstermektedir. Eğer 1 Hz aralığında frekans sapmaları meydana gelirse, otomatik koruma sistemleri tipik olarak sistem ekipmanına gelebilecek hasarı en aza indirmek için çalışmaktadır.

Güç sistemine bağlı olan yük, sistemin frekansına ve gerilimine bağlı olarak farklı miktarlarda güç çekmektedir. Tüm yükler motorsuz yük (dönmeyen yük) ve motor yükü (dönen yük) olarak iki genel türe ayrılabilir [8].

Isıtıcılar, ampuller ve elektronik ekipman gibi motor dışı yüklerin büyüklüğü (MW), bağlı olduğu güç sisteminin gerilimine ve frekansına bağlı olarak değişmektedir. Motorsuz yük büyüklüğü frekansa kıyasla gerilime daha fazla bağımlıdır. Frekans değiştikçe motorsuz

yük büyüklüğünün değişmediğini söylemek oldukça doğru bir ifadedir. Buna karşılık, motorsuz yük sistemin gerilimine çok bağlıdır. Örneğin, güç sisteminin gerilimi %10 düşerse (normalin %90'ına) dirençli elektrikli ısıtıcı yükleri tarafından çekilen güç yaklaşık %19 düşer (nominalin %81'ine).



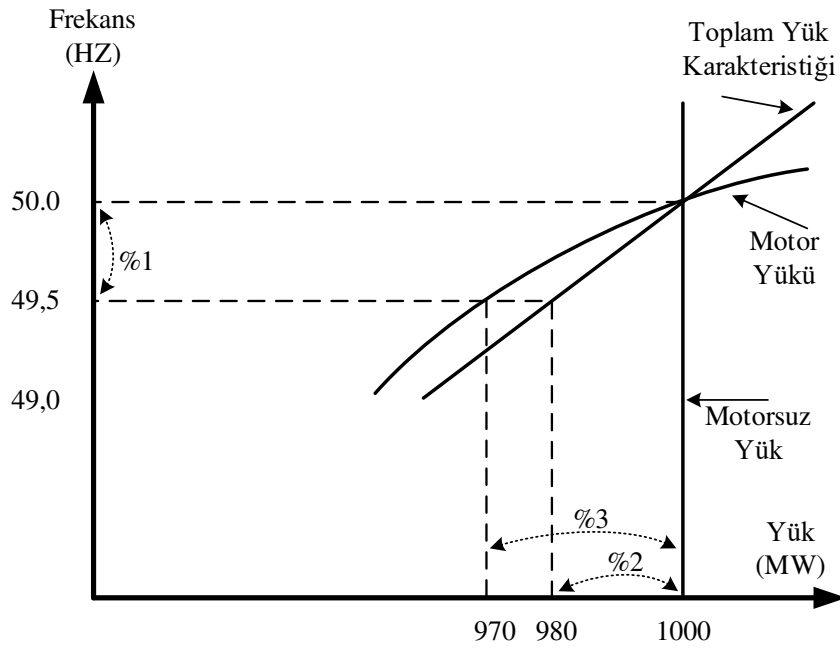
Şekil 2.6. Frekans sapmaları özeti [2].

Motor yükü, bir kamu hizmetinin toplam yükünün büyük bir kısmını oluşturmaktadır. (tipik olarak %40 ila 60). Hizmet bölgesi ne kadar kalabalıksa, motor yükleri de o kadar yaygındır. Motor yükünün çoğu endüksiyon motorlarından oluşmaktadır. Asenkron motorların tipik kullanım alanları klima kompresör motorları, elektrikli süpürge motorları vb. olup, ticari ve endüstriyel yüklerin büyük bir kısmı asenkron motor yükleridir [5].

Motor yükü aynı zamanda bağlı olduğu güç sisteminin gerilimine ve frekansına da bağlıdır. Gerilim veya frekans düşerse, bağlı motor yükü büyüklüğü de düşer. Frekans, motor yükü büyüklüğü üzerinde gerilimden daha büyük bir etkiye sahiptir. Genel bir kural olarak, frekans %1 azaldığında bağlı motor yükü gücü %3 azalmaktadır.

Şekil 2.7 iki farklı yük tipinin, motorsuz ve motorlu, frekansa göre nasıl değiştiğini göstermektedir. Şekil, frekans ne olursa olsun motorsuz yükün sabit kaldığını

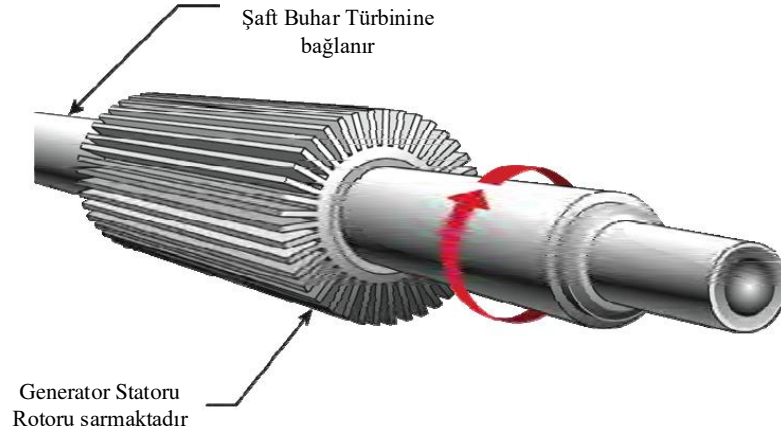
göstermektedir. Frekans düştükçe motor yükü azalır. Şekil 2.7'de gösterilen ve "toplam yük karakteristiği" olarak etiketlenen üçüncü bir eğri görülmektedir. Toplam sistem yükü hem motorsuz hem de motor yükünün bölümlerinden oluşur. Örneğin, bir fabrikada büyük miktarda endüksiyon motor yüküne ek olarak büyük miktarda elektrikli ısı olabilir. Fabrika yükü için toplam yük karakteristiği, bu yükün frekansa göre genel değişimini gösterir. Toplam yük eğrisi çizgisi, frekanstaki %1'lik bir değişikliğin (50'tan 49,5 Hz'ye) tipik olarak toplam yükte %2'lik bir değişikliğe yol açtığını göstermektedir [8].



Şekil 2.7. Yük büyüklüğü ve frekansı arasındaki ilişki [8].

Enerji, güç sisteminin dönen elemanlarında depolanmaktadır. Bu enerji eylemsizlik, depolanmış veya dönme enerjisi olarak adlandırılır. Eylemsizlik enerjisi, frekans kontrol sürecinde önemli bir role sahiptir [9].

Eylemsizlik, bir nesnenin mevcut hızında ve yönünde bir değişikliğe direnen özelliği olarak tanımlanmaktadır. Bir generatörün eylemsizliği, generatörün dönüş hızındaki değişikliklere karşı direncini ifade eder. Büyük bir türbin/generatör senkron hızda dönerken, hızını değiştirmek basit bir mesele değildir. Türbin ve generatörün dönen elemanlarında depolanan ve sabit bir dönüş hızını korumaya yardımcı olan büyük miktarda enerji vardır [14]. Bir generatörün hızını değiştirmek için ya üniteye dönme enerjisi eklemek (dönüşü hızlandırmak için) ya da üniteden dönme enerjisini çıkarmak (dönüşü yavaşlatmak için) gerekir. Şekil 2.8'de büyük bir buhar türbini/generatörünün rotorunda enerji depolama gösterilmektedir [21].



Şekil 2.8. Buhar generatörü rotorunun eylemsizliği [8].

Bir nesnede depolanan eylemsizlik enerjisi nesnenin kütesine, çapına ve dönme hızına bağlıdır. Büyük buhar türbini/jeneratörleri çok büyük bir kütleyle sahiptir (tek başına dönen elemanlar 200 tondan daha ağır olabilir) ve sonuç olarak büyük bir eylemsizlik enerjisine sahiptir. Büyük türbin/generatörlerin eylemsizliği, güç sistemi frekansının sabit bir değerde tutulmasına yardımcı olur. Eylemsizlik kuvvetleri frekanstaki değişikliklere direnç göstermektedir [14].

Güç sistemi birçok eylemsizlik kaynağına sahiptir. Sisteme bağlı olan tüm dönen ekipmanlar depolanmış dönme enerjisi veya eylemsizlik enerjisi kaynağıdır. Dolayısıyla, sistemdeki tüm generatörler ve dönen yükler eylemsizlik enerjisi kaynağıdır.

Bir generatörün hızdaki değişime karşı doğal direnci güç sistemi frekansının sabit kalmasına yardımcı olmaktadır. Genel olarak, generatör ne kadar büyükse, eylemsizlik o kadar büyük olur ve dönüş hızını değiştirmek için generatöre eklenmesi veya generatörden çıkarılması gereken dönme enerjisi o kadar fazla olur [21]. Bir generatöre enerji eklemenin veya generatörden enerji çıkarmanın birkaç yolu vardır:

- Generatöre sağlanan mekanik gücü artırılır veya azaltılır (örneğin, bir buhar türbinine giden buhar akışını veya bir hidro türbine giden su akışını artırılır).
- Generatöre bağlı yükü değiştirilir. Bir generatörden bir yük çıkarılırsa, generatör başlangıçta hızlanır ve bu da generatörün dönme enerjisini artırmaya eşdeğerdir. Bir generatöre bir yük eklenirse, başlangıçta generatörden dönme enerjisini çıkarmaya eşdeğerdir.

Sistem yükündeki küçük değişimler normalde frekansta çok az değişikliğe neden olmaktadır. Bunun nedeni, tipik bir güç sisteminin eylemsizlik kuvvetlerinin o kadar

büyük olmasıdır ki yük değişimiyle karşılaştırıldığında sistemdeki generatörler ve motorlar neredeyse aynı hızda dönmeye devam eder. Güç sistemine büyük yükler eklendiğinde, elektrik üretim şirketi kuruluşu bir generatörün dönüş hızında bir değişiklik görebilir. Örneğin, bir elektrik şirketi bir üretim istasyonunun yakınına aniden 1000 MW'lık bir yük eklerse, generatörün frekans (hız) monitörleri dönme hızında bir azalma tespit edecektir [36].

Bir elektrik üretim şirketi aniden büyük bir generatörünü kaybettiğinde, bu kayıp enerji eksik üretim durumuna neden olur ve diğer üretim kaynakları tarafından telafi edilmesi gerekir. Diğer sistem üretim ünitelerinin her biri, üretim eksikliğini gidermeye yardımcı olmak için dönme enerjilerinin bir kısmını elektrik enerjisine dönüştürerek kayıp enerjinin bir kısmını karşılar. Bu üretim üniteleri, ünitenin kaybından kaynaklanan güç eksikliğini gidermek için eylemsizlik enerjilerini kullanmaktadır. Eylemsizlik enerjilerinin bir kısmını feda etmelerinin bir sonucu olarak, üniteler dönme hızlarında bir düşüş yaşamaktadırlar [34].

2.2. FREKANS DEĞİŞİMİNİN ETKİLERİ

Uzun süre 50 Hz'nin üzerinde veya altında frekanslarda çalışma güç sistemi ekipmanına zarar verebilir. En ciddi sonuçlar buhar türbini/generatörlerinin türbin kanatları ile ilgilidir.

2.2.1. Buhar Türbini Kanatları Üzerindeki Etkiler

Mekanik cihazların doğal bir salınım frekansı vardır. Mekanik bir cihaz bu doğal salınım frekansına yakın bir frekansta salınan bir kuvvete maruz kaldığında, cihaz kuvveti yükseltebilir veya rezonans durumuna girebilir. Rezonans durumu cihazda ciddi titreşimlere yol açabilir. Bazen titreşimler o kadar büyür ki cihaz hasar görür. Buhar türbini kanatlarının doğal bir salınım frekansı vardır [32].

Çalışma sırasında (yük altındayken) 50 Hz dışındaki frekanslarda, türbin kanatlarının doğal salınım frekansı uyarılabilir ve bu da kanatların ciddi şekilde titreşmesine neden olabilir. Bu titreşim kanatların tamamen arızalanmasına yol açabilir. Düşük basınçlı buhar türbini üzerindeki uzun kanatlar, anormal frekanslı çalışmadan kaynaklanan hasara karşı en hassas olanlardır. İlk kanat arızalandığında, diğer kanatlar ve nihayetinde tüm türbin kademesi ciddi hasara uğrayabilir. Buhar türbini kanatları tüm kullanım ömürleri boyunca

sadece belirli bir miktarda frekans dışı çalışmaya (yük taşırken) maruz kalabilir. Generatör operatörü frekans dışı çalışma miktarını takip edebilir ve türbin kanatlarını zaman sınırına ulaştıklarında değiştirebilir. Bu, kanat arızasını önlemeye yardımcı olur. Bu sorunu önlemenin en iyi yolu, yük altındayken önemli ölçüde frekans dışı çalışmadan kaçınmaktır. Buhar türbinleri/generatörleri genellikle çok uzun bir süre boyunca frekans dışı çalıştırılırsa üniteyi açacak düşük ve aşırı frekans rölelerine sahiptir [34].

2.2.2. Hidro ve Yanma Türbinleri Üzerindeki Etkiler

Hidro ve yanmalı türbin/generatörler, buhar türbinlerine/generatörlerine göre frekans dışı çalışmanın etkilerine daha az duyarlıdır. Bir hidro türbin, bir buhar türbinine göre çok daha az kırılgandır. Tipik olarak, hidroelektrik türbin/generatörler 47 ila 53 Hz frekans aralığında hasar korkusu olmadan çalıştırılabilir.

Hidro üniteler, türbinden geçen su akışı seviyelerine göre "pürüzlü noktalara" sahiptir. Hidro üniteye aşırı titreşimi önlemek için belirli güç çıkış aralıklarından kaçınılması gerekebilir. Yanma türbinleri normal dışı frekans çalışması için korunabilir, ancak açma ayarları tipik olarak buhar türbinlerinden daha yumuşaktır [58].

2.2.3. Diğer Güç Sistemi Ekipmanları Üzerindeki Etkiler

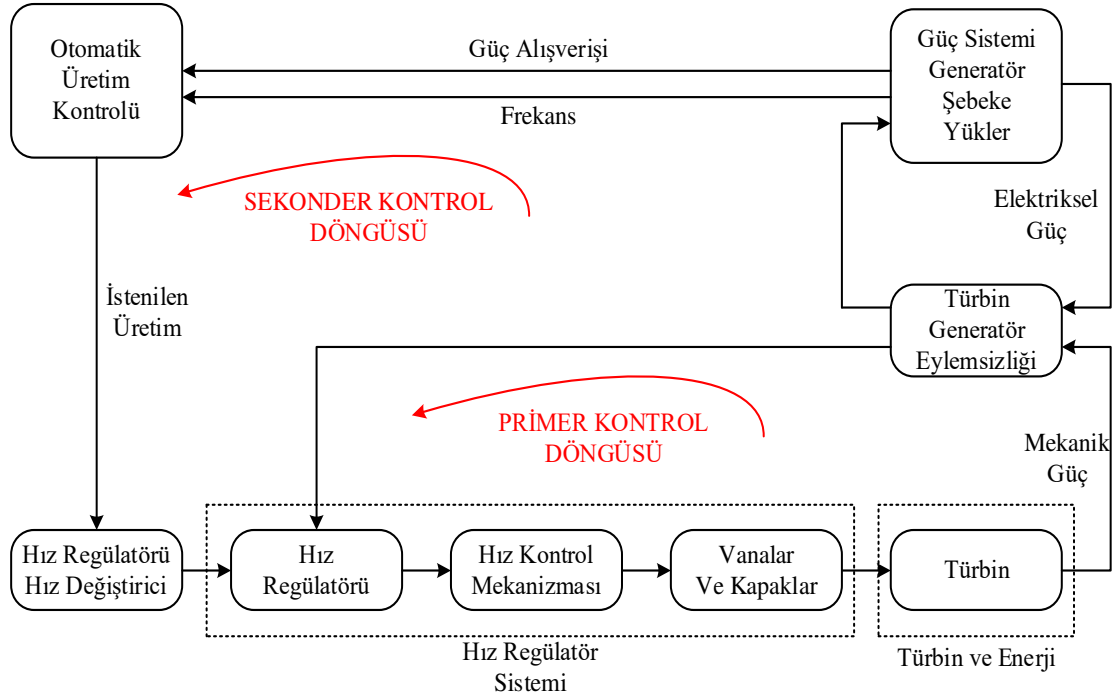
Motorlar, sistemin frekansına bağlı olan bir hızda dönmektedirler. Frekans düşükse, motor tarafından geliştirilen tork azalır. Motor, pompa veya kömür değirmeni gibi önemli ekipmanları çalıştırmak için kullanılıyorsa bunun ciddi sonuçları olabilir. Motorlar üzerindeki ek bir etki de dönmelerinin doğal soğutma etkisidir (fan gibi). Dönme frekansı azaldığında bu doğal soğutma etkisi de azalır. Bu durum motorda aşırı ısınmaya yol açabilir.

Transformatörler düşük frekanslı çalışma nedeniyle hasar görebilir. Bir transformatörün çekirdeğindeki manyetik alanın gücü hem gerilimin hem de frekansın bir fonksiyonudur. Bir transformatör uzun süreli düşük frekanslı çalışmaya maruz kalırsa, transformatör aşırı uyarılabilir. Düşük frekanslı çalışma, özellikle yüksek gerilimle birleştirildiğinde bir transformatöre zarar verebilir [58].

Elektronik ekipman zamanlama devreleri nispeten doğru bir sistem frekansına bağlı olabilir. Bu frekans anormalse, ekipman anormal şekilde çalışabilir.

2.3. PRİMER FREKANS KONTROLÜ (GOVERNOR SİSTEMİ)

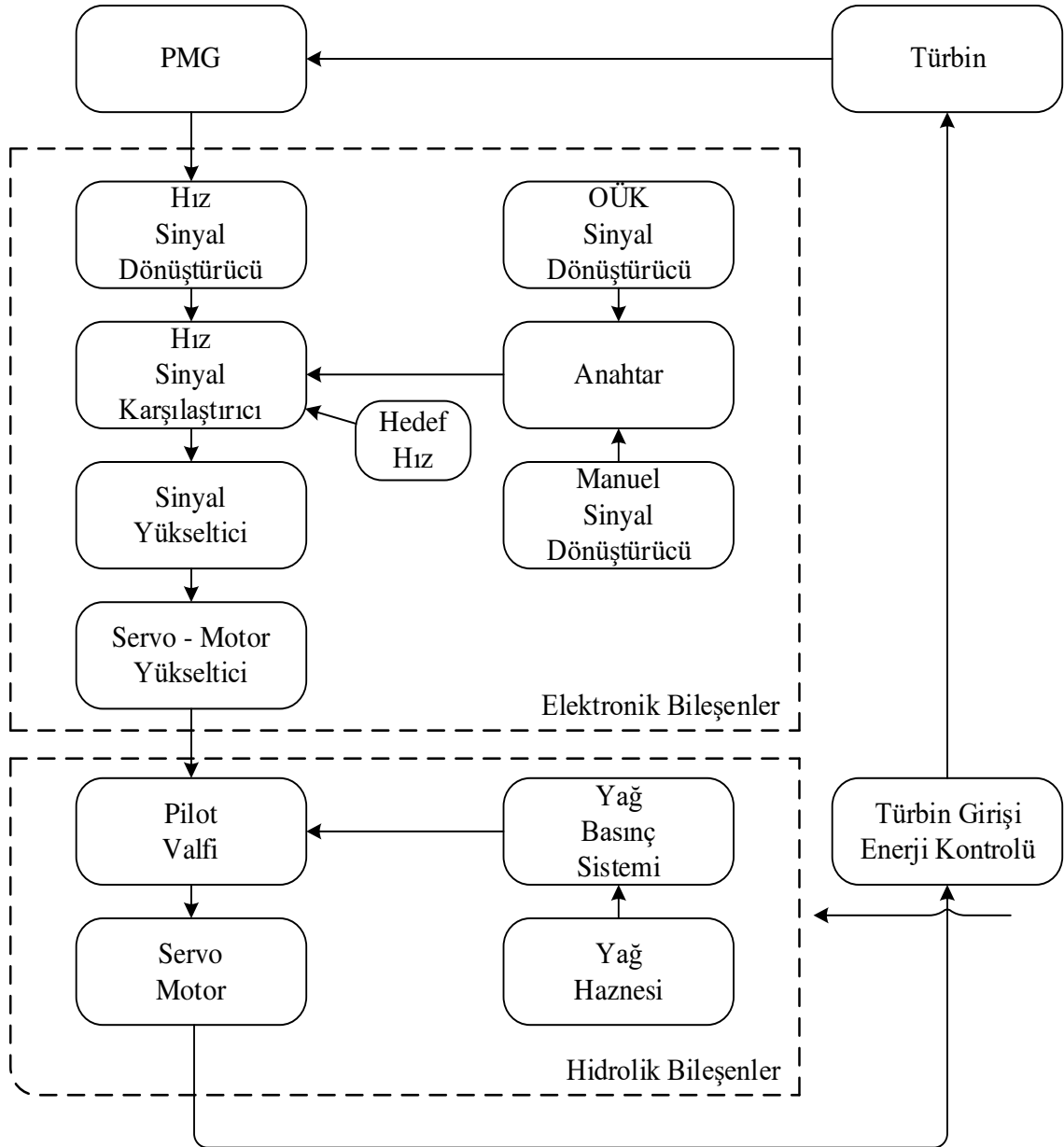
Elektrik generatörleri, şaftın dönüş hızını kontrol etmek için governor kontrol sistemlerini kullanmaktadırlar. Governor sistemi generatör şaft hızındaki sapmaları algılar ve generatörün hızını gerektiği gibi artırmak veya azaltmak için generatörün mekanik giriş gücünde ayarlamalar başlatır. Yük frekans kontrol sisteminin çalışma prensibi Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Yük frekans kontrol çevrimleri [39].

Yük frekans kontrol sisteminin çalışma prensibi Şekil 2.9'da gösterilmiştir. Governor kontrol sistemleri generatörün türbinine giden giriş vanalarının konumunu kontrol etmektedir. Generatör sisteminin büyük bir yük artışına maruz kaldığında, generatörün depolanmış enerjisinden enerji çekildiği için generatör şaft hızının düşmesine neden olan bir sistem enerji eksikliği yaratır. Governor, generatörünün şaft hızının düştüğünü algılar ve türbine giden gaz kelebeği valfini daha da açmak için harekete geçer. Gaz kelebeğinin daha fazla açılması generatör türbinine buhar girişini artırır ve şafta dönme enerjisi ekleyerek şaft hızını artırır. Şaft hızı hala istenen değerden düşükse, governor gaz kelebeği valfini daha da açar. İşlem, istenen şaft hızına ulaşılan kadar birkaç saniye boyunca devam etmektedir [39]. Generatör governor sisteminin çalışma prensibi Şekil 2.10'da gösterilmiştir.

elektriksel olarak bağlanmıştır. Bu küçük generatörün rotoru türbin şaftına dişlidir, böylece çıkış gerilimi şaft hızını temsil eder. Çıkış gerilimi bir dizi elektronik bileşen ile beslenir. Bu bileşenler şaft hızını örnekler ve bir hedef değerle karşılaştırır. Tespit edilen hata hidrolik sistemi çalıştırmak için kullanılır.



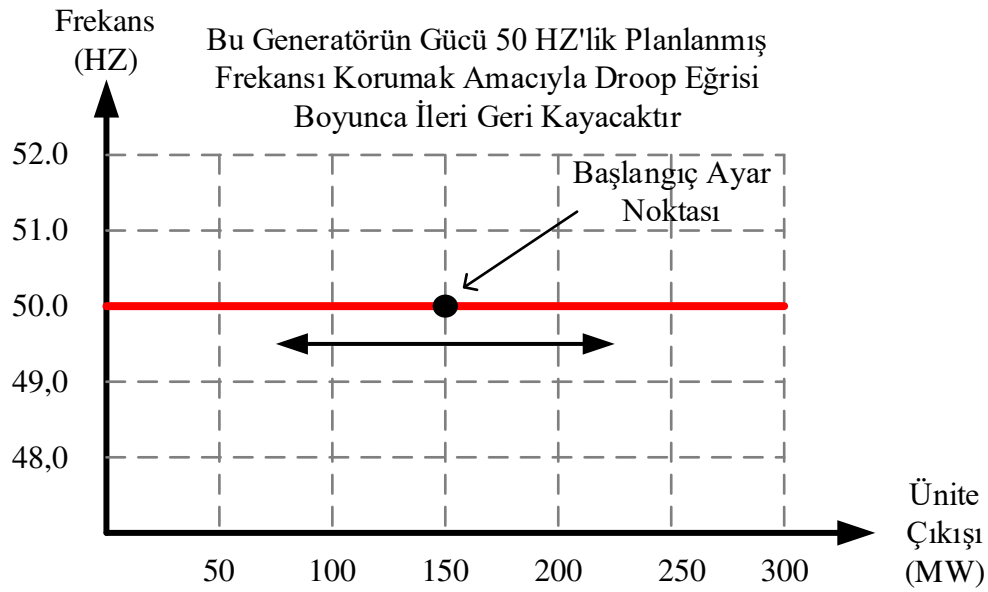
Şekil 2.11. Elektro-hidrolik governor blok diyagramı [39].

2.3.2. Governor Droop Eğrileri

Bir generatörün governorünün sistem frekansındaki değişikliklere beklenen tepkisi bir eğri oluşturacak şekilde çizilmektedir. Generatör çalışması, governor karakteristik eğrisi veya daha yaygın olarak droop eğrisi olarak adlandırılan bu grafiksel araçla gösterilebilir.

Bu eğri, generatör çıkışı gücü ile generatörün bağlı olduğu güç sisteminin frekansı arasındaki ilişkiyi göstermektedir [47].

Tüm yük seviyeleri için hedef frekansını korumaya çalışan sistem izokron governor olarak adlandırılmaktadır. Böyle bir governor için karakteristik eğri Şekil 2.12'de verilmiştir. Frekans değişirse, bu karakteristik eğri ile temsil edilen governor, frekans 50 Hz'e dönene kadar generatör çıkışını ayarlamaya çalışır. Eşzamanlı bir governor 50 Hz'i korumak için elinden gelen her şeyi yapmaktadır [1].



Şekil 2.12. İzokron governor karakteristik eğrisi.

Şekil 2.12'de gösterilen generatörün minimum çıkış değeri 0 MW ve maksimum çıkış değeri 300 MW'tır. Teorik olarak, bu generatör sistem frekans değişikliklerine yanıt olarak çıkışını 0 MW ila 300 MW aralığında değiştirmektedir. Frekans 50 Hz'nin altına düşerse, bu governor frekansı 50 Hz'ye döndürmek için generatör çıkışını 300 MW'a doğru hareket ettirir. Frekans 50 Hz'nin üzerine çıkarsa, bu governor generatör çıkışını 0 MW'a doğru hareket ettirir.

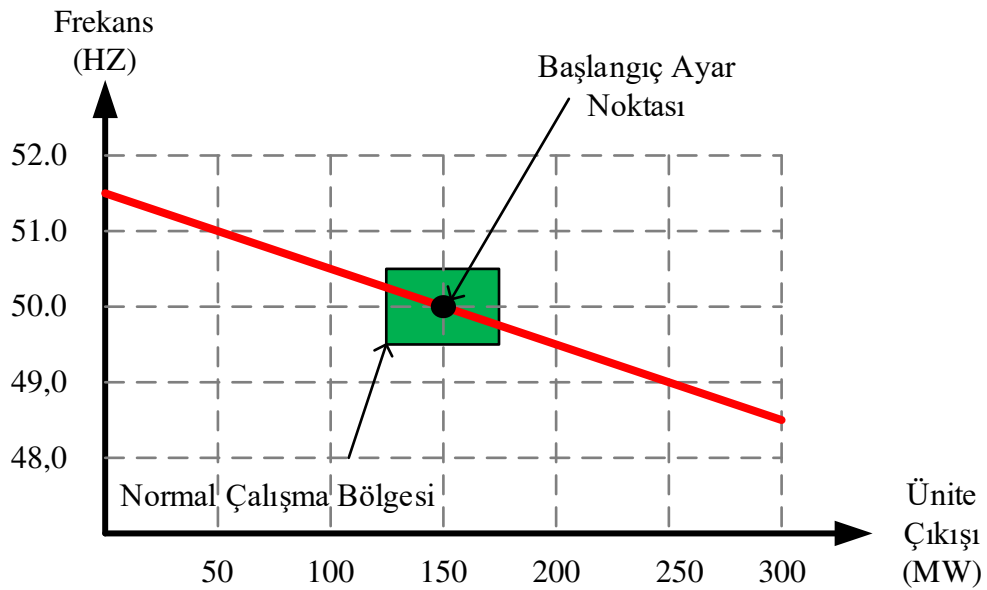
Gerçek uygulamada izokron governor karakteristiği nadiren kullanılmaktadır. İzokron governorlu büyük güç sistemi generatörleri kararsız olma eğilimindedir ve ani yük değişikliklerini takiben güç ve hız salınımlarına girerler. İzokron governorlar 50 Hz'lik hedef frekans arayışında sürekli olarak küçük düzeltmeler yapabilirler. Enterkonnekte güç sisteminde, izokron kontrollü birden fazla generatör yük değişikliklerini takip etmek için birbirleriyle rekabet eder. Sık ve çelişkili governor ayarlamaları nedeniyle genel güç

sistemi zarar görür. Bu aşırı governor eylemleri generatör bileşenlerinin arızalanmasına yol açabilmektedir.

İzokron kontrolde çalışmak üzere seçilen üniteler, frekansı kontrol etmek veya düzenlemek için yeterli yedek kapasite taşımalıdır. Frekansın düştüğünü ve governor frekansı 50 Hz'e döndürmek için ünite kapasitesini tükettiğini varsayalım. İlave güç bulunamazsa sistem frekansı düşmeye devam edebilir [2].

Bir governore droop özelliği eklendiğinde, generatörleri frekans bozulmalarına büyüklükleriyle orantılı olarak yanıt vermeye zorlar. Örneğin, 1000 MW'lık bir ünite 100 MW'lık bir ünitenin on katı tepki verecektir.

Uygulamada, governorlar bir düşüş karakteristiği ile çalışır. Şekil 2.13 bu tip bir governor karakteristik eğrisini göstermektedir. Güç sistemi frekansı arttıkça, governorun generatör çıkışını azalttığı ve başlangıçta tutulandan daha yüksek bir frekansta stabilize olduğu anlamına gelir. Güç sistemi frekansı düştüğünde, governor üretimi artırır ve generatör başlangıçta tutulduğundan daha düşük bir frekansta stabilize olur. Governorlerdeki düşüş ayarları, hepsi governor kontrolündeyken güç sisteminde birçok generatörün paralel olarak çalışmasını ve yük değişiklikleri için birbirleriyle rekabet etmemesini sağlamak için gereklidir [51].



Şekil 2.13. %5 droop eğiminde governor karakteristiği.

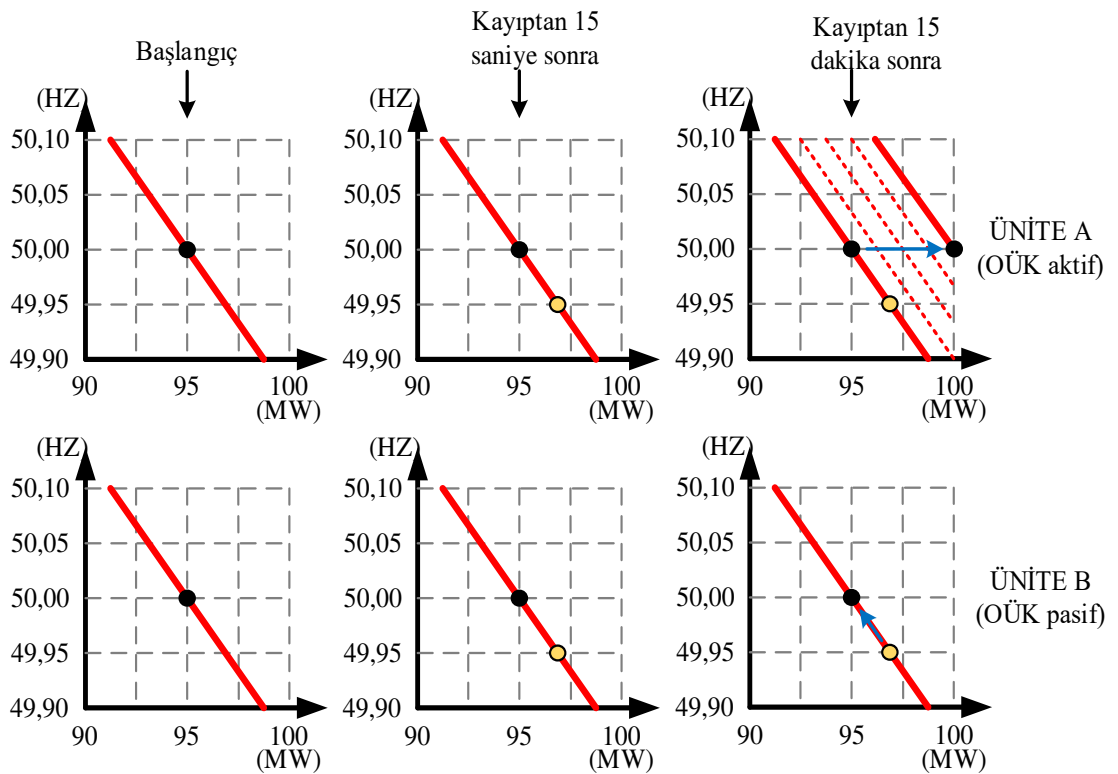
Governor eğimi, bir governorun bir üniteyi yüksüzden tam yüke veya tam yükten yüksüze hareket ettirmesi için gereken frekans değişikliğinin yüzdesi olarak ifade edilmektedir.

Örneğin, %5'lik bir düşüş ayarı, generatörü tüm aralığı boyunca yüksüzden tam yüke veya tam yükten yüksüze hareket ettirmek için frekansta 2,5 Hz'lik bir değişiklik gerektiği anlamına gelir. Şekil 2.13'teki 300 MW'lık ünite başlangıçta 0 MW'ta çalışıyorsa, frekans 2,5 Hz düştüğünde çıkışını 300 MW artıracaktır.

2.3.3. Enterkonnekte Sistemlerde Governor Kontrolü

İzole bir generatörde, governor ilk olarak frekans değişikliğine yanıt olarak ünitenin güç çıkışını değiştirmiştir. Daha sonra izole sistemin frekansını 50 Hz'ye döndürmek için governorun ayar noktası değiştirilmiştir. Enterkonnekte sistemde, herhangi bir zamanda çalışan çok sayıda generatör olduğundan dikkate alınması gereken daha fazla faktör vardır [51].

Şekil 2.14 enterkonnekte bir güç sistemindeki iki generatörü göstermektedir. "A" ve "B" üniteleri başlangıçta şeklin solunda gösterildiği gibi 95 MW gücünde çalışmaktadır. Her iki ünite de enterkonnekte sistemdeki yük artışına Şekil 2.14'ün ortasında gösterildiği gibi kendi düşüş eğrilerini aşağı kaydırarak yanıt vermektedir. Şeklin en sağında, frekansı 50 Hz'e düzeltmek için "A" Ünitesinde bir ayar noktası değişikliği yapılır. "B" Ünitesinde herhangi bir ayar noktası değişikliği yapılmamıştır.



Şekil 2.14. Enterkonnekte sistemde governor tepkisi [51].

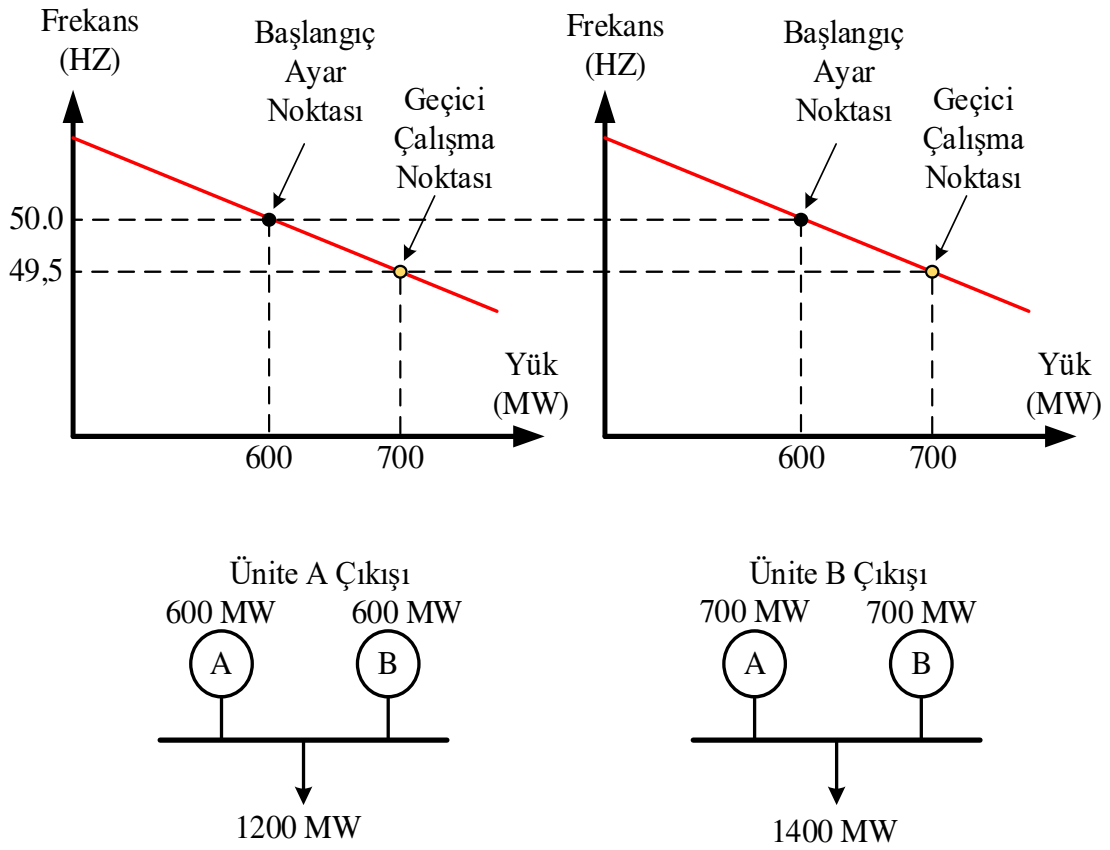
Ayar noktası değişikliği Şekil 2.14'te farklıdır çünkü her iki ünite de başlangıçta frekans düşüşüne düşüş eğrilerini aşağı hareket ettirerek yanıt vermiştir. Ancak, ünitelerden yalnızca birinin ayar noktası frekansı eski haline getirmek için değiştirilmiştir. Ayar noktası değiştirilen ünite, güç çıkışını artırarak enterkonnekte sistemdeki diğer ünitelerden gelen tüm governor tepkisinin yerini almıştır. Enterkonnekte sistemde ayar noktaları değiştirildiğinde, dönme enerjisi ve ünite güç çıkışı aynı anda değişmektedir [51].

Büyük enterkonnekte sistemlerde frekans saptmaları meydana geldiğinde, yüzlerce ünite governor yanıtı sağlamaktadır. Ancak, ünitelerden sadece birkaçının ayar noktaları ayarlanır. Bu birkaç ünite, ilk etapta frekans saptmasına neden olan üretim fazlalığı veya eksikliğini telafi eder. Governor tepkisi sağlayan diğer tüm üniteler, frekans düzeldiğinde droop eğrileri boyunca orijinal ayar noktalarına geri kaymalıdır.

Enterkonnekte güç sistemleri sürekli olarak frekans saptmaları yaşamaktadır. Frekans saptmaları önemli boyutta olmadıkça governorler yanıt vermez. Büyük bir Enterkonneksiyon için yaygın governor tepkisi ayda birkaç kez meydana gelebilir. Küçük bir Enterkonneksiyon için governor tepkisi günlük olarak meydana gelebilir [56].

Governor düşüş ayarlarının bir generatörün sistem yükü değişikliklerine tepkisini nasıl etkilediğini göstermek için, Şekil 2.15'te gösterildiği gibi basit bir güç sisteminde iki generatör bulunmaktadır. Her iki ünite de (her biri 750 MW değerinde) başlangıçta 600 MW yüklüdür ve sistem frekansı Şekilde gösterildiği gibi 50 Hz'dir. Bu küçük güç sistemine aniden 200 MW ek yük eklendiğinde, sistem frekansı 50 Hz'den düşer. Frekans düştükçe, iki generatörün governorleri tepki verir ve frekans düşüşünü durdurmak için güç çıkışını artırır. İki generatörün ayrı ayrı nasıl tepki vereceği, ilgili droop ayarlarına bağlıdır [115].

Eğer iki generatör aynı büyüklükte ve aynı %5 düşüş ayarlarına sahipse, 200 MW'lık yeni yükü Şekil 2.15'te gösterildiği gibi eşit olarak paylaşırlar. Her bir ünite Şimdi 49,5 Hz azaltılmış frekansta 700 MW yük taşımaktadır. Sistemin frekansını 50 Hz'ye geri getirmek için, her iki generatörün yük referans ayar noktaları yukarı doğru ayarlanır, böylece her bir üniteden 700 MW'lık bir çıkışta frekans 50 Hz olur.

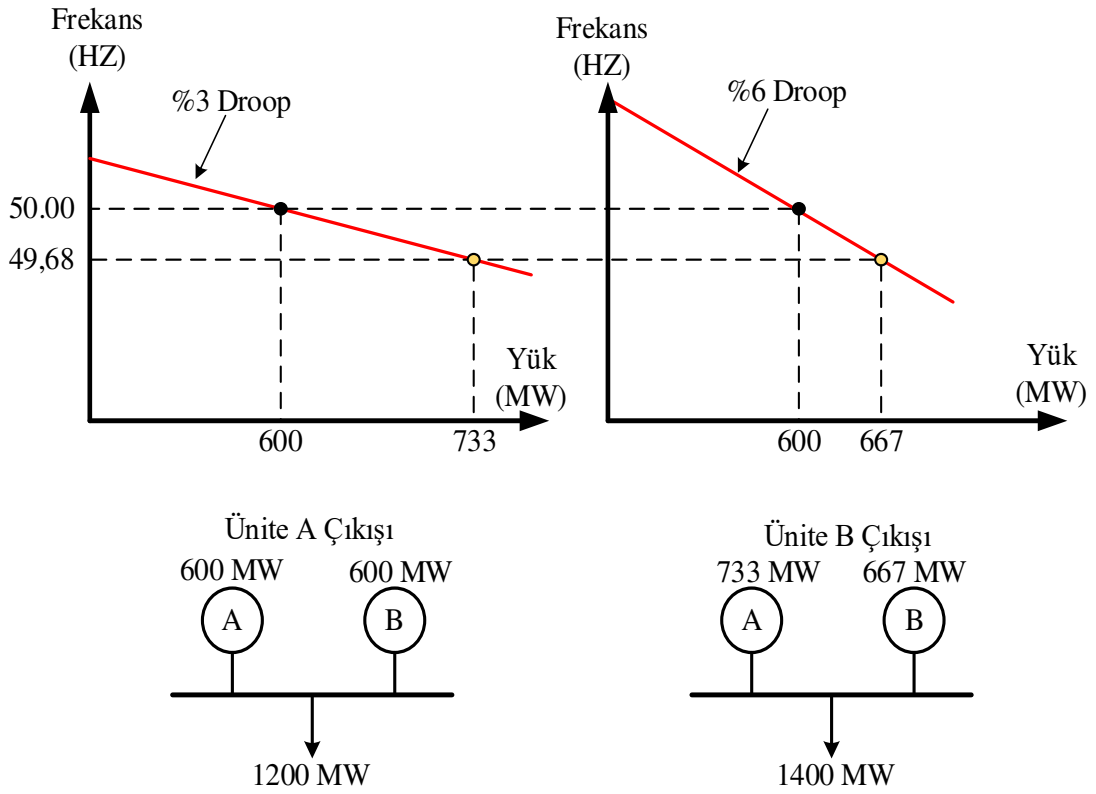


Şekil 2.15. Yük paylaşımı – aynı birim sınırları – aynı droop ayarı [56].

Diğer bir örekte iki generatörün aynı boyutta olduğunu ancak farklı droop ayarları kullanmakta ve "A" ünitesi %3'lük bir düşüşe sahipken "B" ünitesi %6'lık bir düşüşe sahiptir. Droop ayarları farklı olduğu için, iki generatör artık yükteki değişiklikleri droop ayarları aynı olduğunda olduğu gibi eşit olarak paylaşmaz. Daha küçük droop ayarına sahip generatör (Ünite "A") Şekil 2.16'te gösterildiği gibi herhangi bir yük değişiminin daha büyük bir kısmını üstlenir.

Şekil 2.16, sisteme aynı 200 MW yükün eklenmesi ve bunun sonucunda frekansın 49,68 Hz'ye düşmesi halinde, "A" Ünitesinin yeni güç yükünün 133 MW'ını, "B" Ünitesinin ise kalan 67 MW'ını üstlendiğini göstermektedir. "A" Ünitesi "B" jeneratörünün 1/2 droop ayarına sahiptir, bu nedenle yeni yükün iki katını alır.

İki generatörlerden biri %5 düşüşe sahipken (Ünite "A"), diğer generatör (Ünite "B") izokron kontrolde olduğu durum (%0 düşüş). Şekil 2.17'de gösterilmektedir.

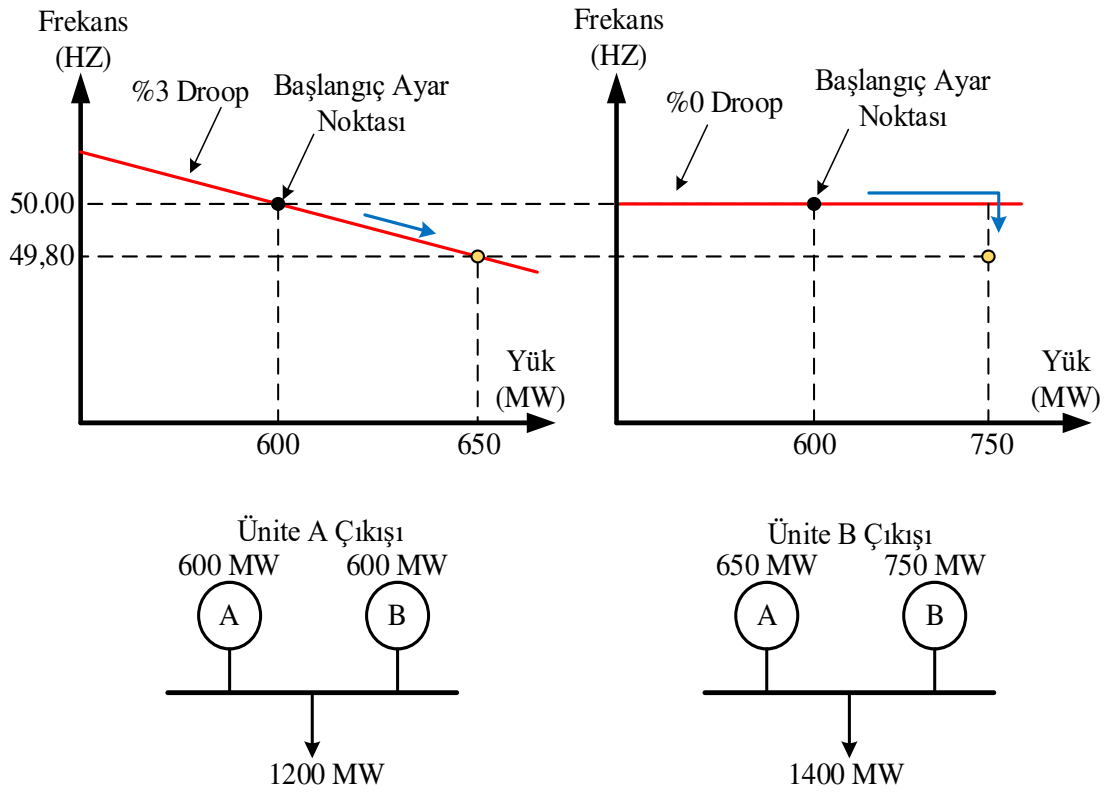


Şekil 2.16. Yük paylaşımı – aynı birim sınırları – farklı droop ayarı [56].

Başlangıçta her bir generatör 600 MW yük taşımaktadır. Aniden 100 MW'lık bir yük ilavesi gerçekleştiğinde "B" Ünitesi izokron kontrolde olduğu için 100 MW'lık yük ilavesinin tamamını alacaktır. "A" Ünitesi frekans düşmedikçe ilave yük almayacaktır. "B" Ünitesi izokron kontrolde olduğu için yedek gücü bitmedikçe frekansın düşmesine izin vermeyecektir. 100 MW'lık yük ilavesi "B" Ünitesinin kapasitesi dahilindedir, bu nedenle "A" Ünitesinin yükü sabit kalırken 100 MW'ın tamamını almaktadır.

Sistemde toplam 200 MW'lık bir yük artışı meydana geldiğinde izokron kontrolde olduğu için frekansı korumaya ve 200 MW'lık yük değişiminin tamamını almaya çalışır. Ancak "B" Ünitesinin yalnızca 150 MW yedek kapasitesi vardır. "B" Ünitesi kapasite sınırına ulaştığında frekans düşmeye başlar. Frekans düşmeye başladığında, "A" Ünitesi yük almaya başlar.

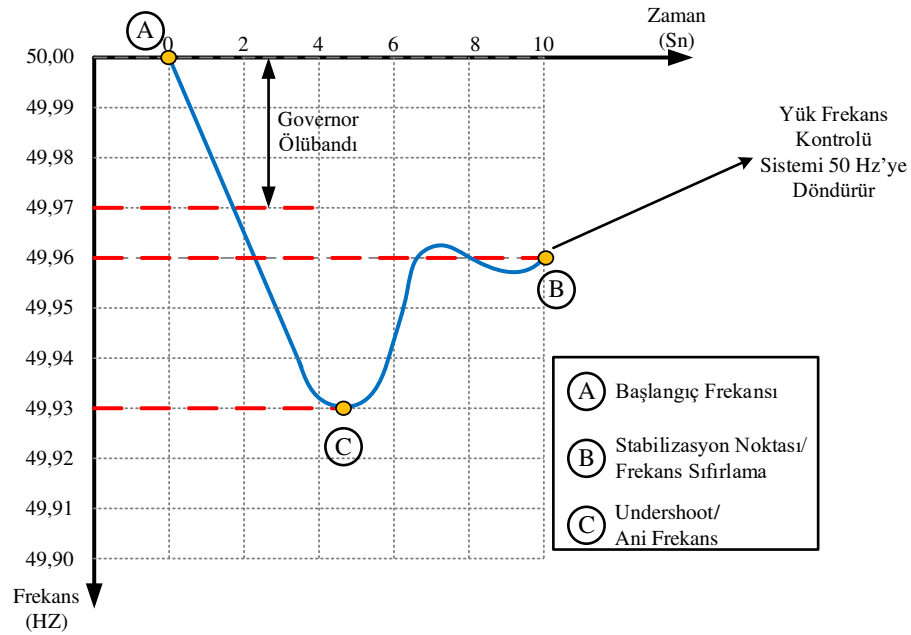
Şekil 2.17 ek yükün dağılımını göstermektedir. Sistem frekansının 49,8 Hz'ye düşmüştür.



Şekil 2.17. Yük paylaşımı – aynı birim sınırları – bir birim izokron kontrol [56].

2.3.4. Primer Frekans Kontrolünde Frekans Sapması Analizi

Şekil 2.18, saniye cinsinden ölçülen bir zaman ölçeği kullanıldığında frekans sapmasını göstermektedir.



Şekil 2.18. Frekans bozukluğuna governor tepkisi [56].

"A" noktasında (başlangıç frekansı) bir generatör kaybedilir. Sistemdeki dönen yük, kaybedilen generatörün yerini almak için hızla eylemsizlik enerjisi sağlar. Sistemdeki dönen kütle eylemsizlik enerjisi sağladıkça dönüş hızını yavaşlatır. Sistemin frekansı azaldıkça, yük/frekans ilişkisi nedeniyle yük büyüklüğü de azalır. Üretim kaybı küçükse, yük/frekans ilişkisi frekans düşüşünü durdurmak için tek başına yeterli olabilir. Şekilde üretim düşüşünün büyük olması nedeniyle yük/frekans ilişkisi bu frekans düşüşünü durdurmak için yeterli değildir, governor yanıtı gereklidir [68].

Frekans, 49,93 Hz'ye ("C" noktası) kadar düşer. Bu düşüş, frekans alt sınırı veya ani yükselmedir. Frekansın 49,93 Hz'de düşmeyi durdurmasının nedeni sistem eylemsizliği, yük/frekans ve governor tepkisinin bir kombinasyonudur. Frekansın 49,93 Hz'den 49,96 Hz'ye doğru yükselmesinin nedeni öncelikle governor tepkisidir [39].

Governor kontrol sistemlerinin mil hızını izler ve ardından milin hızını artırmak (veya azaltmak) için mekanik giriş gücünü ayarlamaktadır. Özellikle bir buhar ünitesinde mekanik güç girdisini ayarlamak zaman aldığından, governor sistemleri nispeten yavaş hareket eder. Frekansı 49,96 Hz'de ("B" noktası) stabilize etmek yaklaşık 10 saniye sürmektedir. Bu governor zaman gecikmesi sistem frekansının başlangıçta governor sistemlerinin sonunda sistem frekansını stabilize ettiği noktadan daha düşük bir seviyeye inmesine olanak tanır. Bu nedenle frekans "B" noktasındaki stabilizasyon veya sıfırlama noktasına tırmanmadan önce "C" noktasına düşer. "C" ve "B" noktaları arasındaki süre (7 saniye) yine governor sistemlerinin nispeten yavaş tepkisinden kaynaklanmaktadır.

"B" noktası tipik olarak arıza raporlarında görülen frekans sapma değeridir. "C" noktasındaki alt vuruş, kontrol merkezi frekans şeridi grafiklerinde keskin bir aşağı doğru çizgi (yanıtın kuyruğu) olarak görünür.

Governor tepkisi frekansı "B" noktasında stabilize ettikten sonra, frekansı 50 Hz'ye geri döndürmek yük frekans kontrolü sistemine düşer. Üretim kaybına uğrayan alandaki yük frekans kontrolü sistemi, üretim kaybını yerine koymak için yük frekans kontrolündeki birimlere darbe gönderir. Kayıp yerine konduğunda alan kontrol hatası sıfıra doğru hareket eder ve sistem frekansı eski haline döner [68].

2.3.5. Governor Yanıtı Limitleri

Governörler mükemmel frekans kontrolü yapmak üzere tasarlanmamıştır ve amaçlanmamıştır. Governör kontrolüne yönelik hem kasıtlı hem de kasıtsız belirli sınırlamalar vardır [115].

Dönüş Rezervi

Eğer bir governor frekans düşüşüne yanıt olarak bir üniteyi düşüş eğrisi boyunca aşağı hareket ettirecekse, bunu ancak generatörün kullanılmayan güç kapasitesi varsa yapabilir. Bu kullanılmayan güç kapasitesi genellikle dönüş rezervi kapasitesi olarak adlandırılır. Dönüş rezervi, senkronize generatörün mevcut çıkış seviyesi ile ünitenin maksimum sürdürülebilir çıkış seviyesi arasındaki farktır. Bir generatör mükemmel ayarlanmış bir governorla sahip olabilir, ancak ünite herhangi bir dönüş rezervi taşııyorsa frekans düştüğünde yanıt vermeyecektir. Genel olarak, bir işletmeye atfedilebilen duyarlı dönüş rezervi generatör governor komutlarına yanıt vermeli ve 15 saniye içinde tamamen kullanılabilir olmalıdır [117].

Hidro ünitelerde taşınan dönüş rezervinin büyük bir kısmı genellikle tepkisel dönüş rezervidir. Genel olarak, hidro üniteler büyük depolanmış enerji rezervleri sayesinde büyük güç taleplerine yanıt verebilir ve bunu sürdürebilir. Hidro ünitenin boyutuna ve türüne bağlı olarak, 100'lerce MW'lık güç talebi birkaç saniye içinde karşılanabilecektir.

Bir buhar ünitesindeki enerji dönüştürme sürecinin doğası, genellikle duyarlı dönüş rezervini mevcut dönüş rezervinin yalnızca bir kısmıyla sınırlar. Bir buhar ünitesinde kazan sıcaklıkları ve basınçları belirli sınırlar içinde tutulmalıdır. Bu sınırlamalar, üniteden izin verilen maksimum dönüş hızlarını kısıtlar. Bir buhar ünitesi tarafından verilebilecek maksimum yanıt, 15 saniye içinde ünitenin kalan kapasitesinin yaklaşık %10'udur. Örneğin, şu anda 300 MW üretmekte olan 500 MW gücündeki bir buhar ünitesi, governor komutlarına yanıt olarak 15 saniye içinde 20 MW verebilir (ve bunu sürdürebilir).

Uyumsuzluğu Boyutu

Uyumsuzluğun boyutu, frekans bozukluğuna neden olan üretim ve yük arasındaki yüzde uyumsuzluğu ifade etmektedir. Yüzde uyumsuzluk ne kadar büyükse frekans sapması da o kadar büyük olur. Governor tepkisi, yalnızca governor kontrolü altında yeterli kapasite mevcutsa frekans sapmasını durdurabilir. Çok az duyarlı dönüş rezervi kapasitesi mevcutsa veya bu kapasiteyi sağlamak için zaman gecikmesi çok uzunsa, governor

tepkisi tek başına frekans sapmasını durdurmak için yeterli olmayabilir. Düşük frekanslı yük atma gibi daha sert önlemler gerekebilir [116].

Governor Ölübandı

Bir kontrol sistemi (governor gibi) bir dizi ölçülen girdiye dayalı olarak belirlenmiş bir değişkeni hedef değere yakın tutmaktadır. Hedef değerin etrafında kontrol sisteminin çalışmadığı belirli bir "ölü" alan vardır. Yani bir hedef değer yerine, bir kontrol sistemi aslında bir hedef aralığı korur. Örneğin, kontrol edilen değişken frekans ise, tam olarak 50 Hz değerini korumak yerine, bir governor kontrol sistemi frekansı 50,03 Hz ile 49,97 Hz aralığında tutabilir. Hedef değerin etrafındaki etkin olmayan aralığa ölü bant denir. Frekansı 49,97 Hz ile 50,03 Hz aralığında tutan bir governor örneğimizde, hedef değer 50,00 Hz ve ölü bant $\pm 0,03$ Hz 'dir [118].

Governor görevi, frekansı 50 Hz'lik dar bir aralıkta kontrol etmek değil, frekans sapmalarını durdurmaktır. Frekansı 50 Hz'lik dar bir bant içinde tutmak için başka kontrol sistemleri mevcuttur. Eğer governor ölü bandı ortadan kaldırılırsa, governor generatörü sürekli olarak küçük frekans sapmalarını takip etmeye yönlendirecektir. Generatör bileşenleri sebepsiz yere aşırı aşınmaya maruz kalacaktır. Governor küçük frekans salınımlarını düzeltmek amacıyla generatöre çelişkili sinyaller gönderdiğinden güç salınımları oluşabilir. Her ikisi de 50 Hz'nin eşit olmayan versiyonlarını tutmaya çalışırken komşu generatörler arasında güç salınımları da gelişebilir [122].

Üretim Birimi Türü

Ünitenin tipi (hidro, buhar, yanma türbini) governor tepkisi üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Farklı ünitelerde kullanılan governor kontrol sistemleri aynı olsa da daha önemli olan ünitelerden gelen güç yanıtıdır [118].

Hidro üniteler, su depolama rezervuarlarında büyük miktarda enerji depolayabildikleri için genel olarak governor komutlarına çok duyarlıdır. Hidro ünitenin boyutuna ve türüne bağlı olarak, birkaç saniye içinde yüzlerce MW'lık yanıt oranları elde edilebilir. Tüm hidro üniteler iyi tepki vermez. Uzun cebri borulara sahip olanlar, gelen sudaki türbülans nedeniyle büyük frekans sapmalarına zayıf yanıt vermektedirler [115].

Yanma türbininin tasarımına bağlı olarak, ünite governor komutlarına yanıt verebilir veya vermeyebilir. Üretimlerinin büyük bir kısmı için yanma türbinlerine bağımlı olan sistemlerde, yanma türbininin ilk governor tepkisini sürdürmesiyle ilgili zorluklarla karşılaşmıştır. Bu zorluklar, düşük frekans koşulları sırasında kompresör çıkışının

azalmasına odaklanmaktadır [47].

Buhar üniteleri sistem generatörlerinin çoğunluğunu oluşturmaktadır. Buhar ünitelerinin governor tepkisi, buhar ünitesinin türüne bağlı olarak çok zayıftan çok iyiye kadar değişmektedir. Bir buhar ünitesinin ilk governor tepkisi depolanan buhardan gelir. Bu ilk tepki oldukça hızlı olabilir. Zorluk bu ilk tepkinin sürdürülmesinde olmaktadır. Bir generatörün çıkış gücünün yaklaşık %30'u tipik bir buhar ünitesinin yüksek basınç türbininde geliştirilir. Geri kalan %70'i ise daha düşük basınç kademelerinde geliştirilir. Yüksek basınç türbini governor komutlarına çok duyarlıdır çünkü governor tipik olarak yüksek basınç türbini kontrol vanasını doğrudan kontrol eder. Düşük basınç kademeleri governor tarafından dolaylı olarak kontrol edilir. Düşük basınç kademeleri kazanın yeniden ısıtma çevrimi yoluyla buharla beslenir. Yeniden ısıtma döngüsü, bir governordan gelen ilk güç çağrısından generatörün güç yanıtının çoğunu gerçekten verebilmesine kadar birkaç saniye zaman gecikmesi eklemektedir.

Kömürle çalışan buhar üniteleri güçlü governor tepkisine sahiptir. İyi ayarlanmış bir kömür yakıtlı ünite, bir frekans bozulmasını takiben 15 saniye içinde kalan kapasitesinin %10'u ile yanıt verebilir. Kömürle çalışan bir ünitenin gerçek tepkisi kazan-türbinin özelliklerine bağlıdır. Örneğin, tambur tipi kazana sahip üniteler önemli bir buhar deposuna sahiptir ve bu buhar hızlı, sürekli, governor yanıtı için kullanılabilir. Buna karşılık süperkritik (bir kez geçişli tip) kazanlarda çok az buhar deposu vardır ve genel olarak önemli bir governor tepkisini sürdüremezler [41].

Nükleer üniteler de kömürle çalışan üniteler gibi governor tepkisi verebilir. Basınçlı su reaktörleri kaynar su reaktörlerinden daha yeteneklidir. Ayrıca nükleer üniteler genellikle lisanslı tam güçte çalıştırılır. Bir frekans düşüşü yaşandığında, nükleer ünite governor kontrolü daha fazla vana açılmasını ve güç tepkisini önlemek için tüm üretim gücüyle sisteme müdahale edebilir [118].

2.4. SEKONDER FREKANS KONTROLÜ (YÜK FREKANS KONTROLÜ)

Üretim yük ile sürekli eşleştirilmek zorundadır, aksi takdirde frekans saptmaları meydana gelecektir. Generatörler üzerindeki governorler, üretim/yük uyumsuzluklarından kaynaklanan frekans saptmalarına yanıt olarak generatörün çıkışını ayarlamak için kullanılmaktadır. Governorler sistem eylemsizliği ve yük-frekans ilişkisi yardımcı olur, ancak bu eylemlerin tümü birlikte sabit bir sistem frekansını koruyamamaktadır [123].

Governor kontrolü, aşağıdakiler de dahil olmak üzere çeşitli nedenlerden dolayı yeterli frekans düzenlemesi sağlamaz:

- Governorler, enterkonnekte sistem generatör governorlerinin gerekli % düşüş özelliği nedeniyle frekansı planlanan değere döndürmez.
- Governor kontrolü enerji üretim maliyetini yeterince dikkate almaz, bu nedenle sadece governor kontrol genellikle en ekonomik alternatif değildir.
- Governor kontrolü, frekans kontrolünün birincil aracı olarak tasarlanmıştır. Bu nedenle governor kontrolü ilk bölümdür ve enterkonnekte sistem frekansının ince ayarına uygun değildir.

Bu nedenle, üretimi yük ile dengelemek ve sabit bir sistem frekansını korumak için başka bir kontrol sistemi gereklidir. Bu diğer kontrol sistemi YFK. Governorler tek tek generatörleri kontrol ederken, YFK sistemleri üretimi yüke göre dengelemek için birçok governoru aynı anda kontrol eder.

Bir YFK sistemi bir governordan çok daha yüksek bir kontrol seviyesinde çalışmaktadır. Bir governor kontrol sistemi yalnızca bir generatörü izler ve kontrol ederken, bir YFK sistemi güç sistemi alanı olarak bilinen bir bölümünü izler ve birden fazla generatörü kontrol eder. Governor kontrolü genellikle primer frekans kontrolü olarak adlandırılırken YFK sekonder frekans kontrolü olarak adlandırılmaktadır [115].

Güç sisteminin çalışması birkaç temel faaliyet ve süreç aşağıda açıklanmıştır:

2.4.1. Yük Frekans Kontrolü Sisteminin İşlevi

Bir YFK sisteminin işlevi en kolay izole bir güç sistemi ile ilişkili olarak anlaşılabilir. İzole bir güç sisteminde, tüm generatörlerin çıkışı ideal olarak 50 Hz frekansındaki toplam dahili sistem yüküne eşit olmalıdır. İzole bir sistemdeki YFK sisteminin ana işlevi, Denklem (2.1)'de gösterildiği gibi sistemin dengesini korumaktır [123]:

$$\text{Üretim} = \text{Dahili Sistem Yüğü} + \text{Dahili Kayıplar} \quad (2.1)$$

Üretim ve yük arasındaki herhangi bir fark YFK sisteminin hesaplama yapmasına ve güç çıkışlarını ayarlamak için seçilen generatörlere kontrol sinyalleri göndermesine neden olur. Bu kontrol sinyalleri generatörlerin yük referans ayar noktalarını ayarlamak için kullanılır. Eğer izole sistemdeki üretim yükten fazla ise, YFK sistemi üretimin azaltılmasını isteyecektir. Üretim yükten az olursa, YFK sistemi üretimin artırılmasını

isteyecektir.

Ancak gerçek güç sistemleri normalde izole değildir. Diğer birçok sistemle birbirine bağlıdırlar. Farklı alanlar arasındaki bağlantı hatları, her biri arasında güç akışına izin verir ve sistem katılımcılarının birbirleri arasında enerji alıp vermelerini sağlar. Birden fazla alana sahip enterkonnekte bir güç sisteminde, YFK sistemleri dahili üretim kaynaklarını dahili yük ve kayıplarla eşleştirmekten daha fazlasını yapmalıdır. YFK ayrıca, enterkonnekte bağlantı hatları üzerinden alanlar arasında ileri geri gerçekleşen güç akışlarını da hesaba katmalıdır. Bu nedenle her alandaki bir YFK sistemi Denklem (2.2)'deki 50 Hz dengesini korumalıdır:

$$\text{Üretim} = \text{Dahili Sistem Yüğü} + \text{Dahili Kayıplar} + \text{Net Programlı Değişim} \quad (2.2)$$

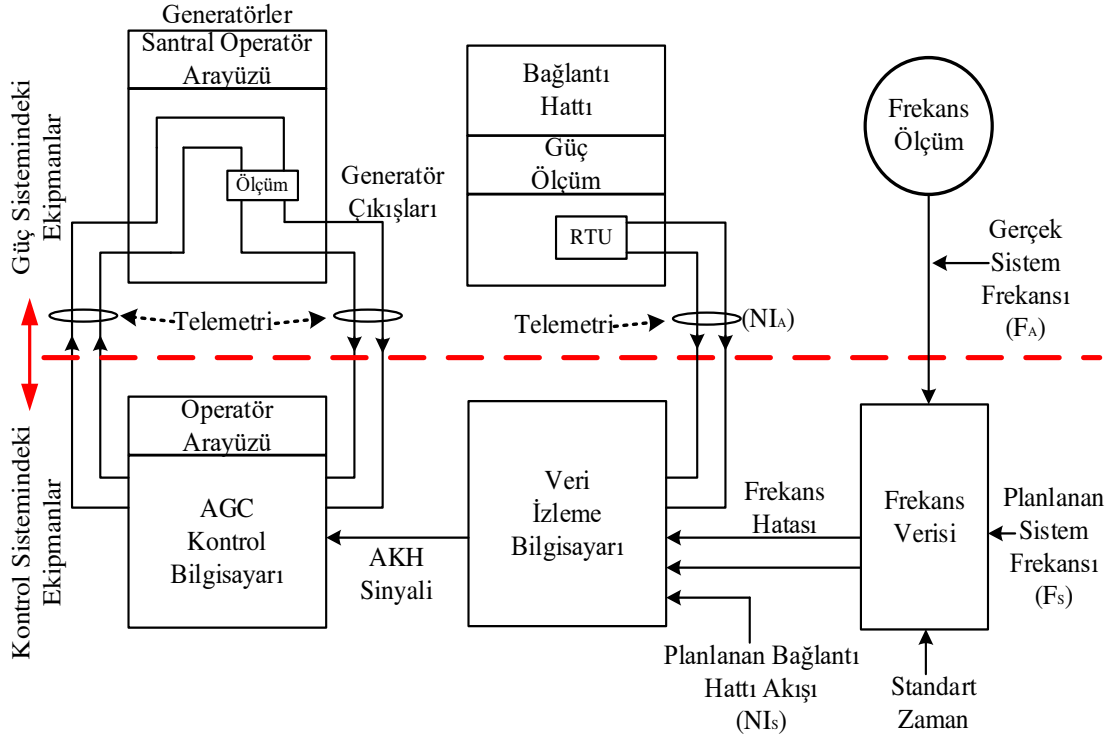
Yukarıdaki denklemde yer alan yeni terim, net programlı değişim, bu YFK sisteminin bulunduğu alanlarla diğeri alanlar arasındaki tüm bağlantı hatlarındaki programlı veya amaçlanan güç akışının toplamıdır. Net programlı değişim teriminin eklenmesi, bir YFK sisteminin işletimini ve karmaşıklığını büyük ölçüde etkiler.

Güç sistemleri birbirine bağlı olduğundan, alanlar arasındaki güç akışlarını ölçmeye ve kontrol etmeye gerek kalmadan tüm enterkonnekte sistemin frekansını istenen 50 Hz değerine kontrol etmek için tek bir YFK sistemi kullanılabilecektir [115].

2.4.2. YFK Sisteminin Bileşenleri

Şekil 2.19'da bir YFK sisteminin temel bileşenleri gösterilmektedir. Bir YFK sisteminin işlevini yerine getirebilmesi için sürekli olarak bir sistem frekans hatası ve bir net değişim hatası belirleyebilmesi gerekir. Bu hataların her ikisi de AKH değerini oluşturmak üzere toplanır. AKH değeri daha sonra YFK kontrolü altındaki çeşitli generatörlere dağıtılır [119].

Bir YFK sisteminin kontrol merkezinde ve güç sisteminde bileşenleri vardır. Kontrol merkezi bileşenleri hem AKH sinyalini hesaplayan hem de sinyali kontrollü generatörlere dağıtan bilgisayar ekipmanını içerir. Güç sistemindeki YFK ekipmanı, kontrollü generatörlerdeki YFK konsollarını, frekans sayaçlarını ve bağlantı hattı sayaçlarını içerir. Tüm YFK verileri telemetry yoluyla iletilmektedir [115].



Şekil 2.19. YFK sisteminin bileşenleri [115].

Gerçek sistem frekans verilerini (F_A) toplamak için bir frekans ölçer kullanılmaktadır. Bu veriler programlanmış bir frekans değeriyle (F_S) karşılaştırılır ve bir frekans hatası ($F_A - F_S$) belirlenerek veri izleme bilgisayarına gönderilmektedir.

Sistem operatörleri planlanmış net değişim (NI_S) verilerini veri izleme bilgisayarına girer. Gerçek değişim verileri (NI_A) tüm alanların bağlantı hattı sayaçlarından toplanır. İletim sistemindeki uzak konumlardan değişim verilerini toplamak için telemetri kanalları kullanılır. Gerçek değişim planlanan değişimle karşılaştırılır ve veri izleme bilgisayarında net değişim hatası ($NI_A - NI_S$) değeri hesaplanmaktadır [119].

Veri izleme bilgisayar bir AKH değeri hesaplamak için frekans hatasını ve net değişim hatasını kullanmaktadır.

YFK kontrol bilgisayar AKH sinyalini kontrol edilen generatörlere dağıtmaktadır. Bu karmaşık bir süreç olabilir. Sadece AKH sinyalinin uygun generatörlere dağıtılması değil, aynı zamanda generatörlerin YFK'nın gönderdiği yönde hareket ettiğinden emin olmak için geçmiş AKH sinyali dağıtımlarının sonuçlarının da kontrol edilmesi gerekir. Her birkaç (2-6) saniyede bir yeni bir AKH sinyali hesaplanarak yeni ayar noktaları kontrol edilen generatörlere dağıtılmaktadır [122].

2.4.3. YFK Sisteminin Çalışma Modları

YFK için sabit frekans kontrolü, sabit net değişim kontrolü ve bağlantı hattı sapma kontrolü olmak üzere üç tipik çalışma modu vardır [119].

Sabit Frekans Kontrolü

Sabit frekans kontrolünde YFK sistemi sadece frekans izler. Frekans 50 Hz'den saparsa, YFK sistemi frekans 50 Hz'ye döndürmek için YFK kontrolü altındaki generatörler üzerindeki governorlerin yük referans ayar noktalarını ayarlamaktadır [126].

Sabit Net Değişim Kontrolü

Sabit net değişim kontrolünde; YFK sistemi sadece alanları birbirine bağlayan bağlantı hatlarını izlemektedir. Gerçek değişim akışları planlanan değerlerden saparsa, YFK sistemi akışlar planlanan değerlere dönene kadar üretimi ayarlar [127].

Sabit net değişim kontrolü ile ilgili ciddi bir sorun, frekans kontrolünün göz ardı edilmesidir. Sabit net değişim YFK, enterkoneksiyon frekansı 50 Hz'nin altındayken bağlantı hattı akışlarını düzeltmek için üretimi geri çekebilir. Öncelikli hedef her zaman sistem frekansının korunması olmalıdır ve sabit net değişim kontrolü her zaman bu hedefi karşılamaz.

Üretim sistemleri, belirli acil durum koşullarında sabit net değişim kontrolünü kullanabilir. Örneğin, sistem YFK frekans kaynağını kaybederse, geçici olarak sabit net değişim kontrolünü kullanılabilir.

Bağlantı Hattı Sapma Kontrolü

Bağlantı hattı sapma kontrolü, çok alanlı sistemlerinde YFK sistemi işletimi için tercih edilen yöntemdir. Bağlantı hattı sapma kontrolü altında, Governor kontrolü ilk frekans sapmasını durdurduktan sonra, bozukluğun meydana geldiği alandaki YFK sistemi frekansı istenen 50 Hz'ye döndürme görevini üstlenmektedir.

Bir YFK sistemi bağlantı hattı sapma kontrolü modundayken, YFK sistemi hem frekans hem de değişim hatalarına yanıt verir. Bağlantı hattı sapma kontrolü modundaki bir YFK sistemi, gerçek ve planlanmış bağlantı hattı akışları arasında bir eşleşme sağlarken aynı zamanda frekans kontrolü ile enterkonnekte sisteme yardımcı olabilir. Bağlantı hattı sapma kontrolü aslında sabit frekans ve sabit net değişim kontrolünün bir kombinasyonudur.

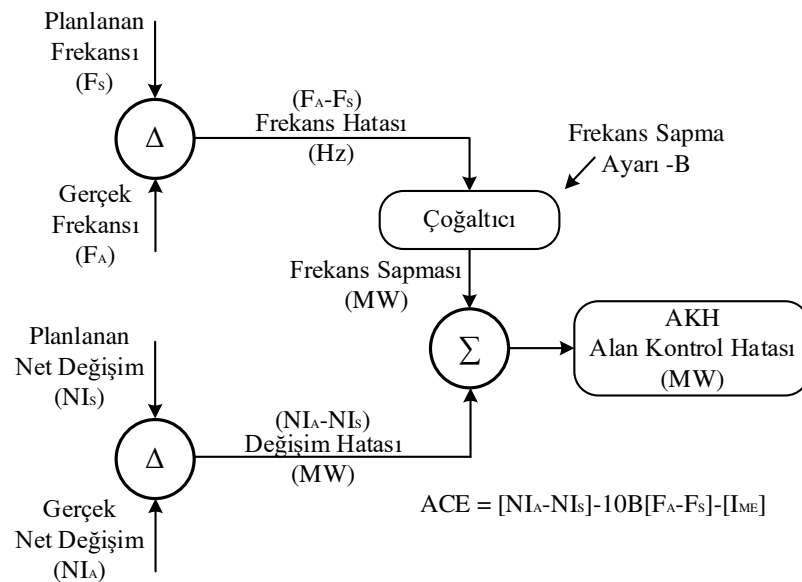
Bağlantı hattı sapma kontrolünde, planlanan ve gerçek frekans ($F_A - F_S$) ile planlanan ve gerçek bağlantı hattı akışları ($NI_A - NI_S$) arasındaki farklara dayalı olarak bir AKH sinyali hesaplanır. Bağlantı hattı sapma kontrolü için AKH Denklem (2.3)'teki şekilde hesaplanmaktadır:

$$ACE = [NI_A - NI_S] - [(10 \times B) \times (F_A - F_S)] \quad (2.3)$$

Denklemin ilk kısmı, (gerçek net değişim- planlanan net değişim), sabit net değişim kontrolü için YFK denklemidir. Denklemin ikinci kısmının bir bölümü, (gerçek frekans- planlanan frekans), sabit frekans kontrolü için YFK denklemidir. Denklemin tamamı bağlantı hattı sapma kontrolü için YFK denklemidir.

Frekans sapma sabiti, bir güç sisteminin sistem frekansındaki değişikliklere verdiği doğal tepkidir. Frekans saptması terimi, AKH denkleminde dahil edilir. Frekans sapma teriminin eklenmesi aynı zamanda frekans hata sinyalini Hz'den MW'ye dönüştürür ("B" MW/0,1 Hz birimindedir ve negatif bir sayıdır). AKH denkleminde " B " 10 ile çarpılmaktadır. Bunun nedeni frekans saptmasının (gerçek frekans - planlanan frekans) Hz cinsinden bir saptma olması, " B "nin ise Hz'nin onda biri başına MW yanıtını vermesidir. Çarpım ($10 \times B$) Hz başına MW yanıtıdır.

Yük tevzii merkezi, kendi frekans sapma değerinin ne olduğunu belirlemek için güç sistemi frekans bozukluklarını izlemelidir. Bu değer yılda en az bir kez gerçek sistem bozuklukları analiz edilerek kontrol edilmelidir. YFK bilgisayar sistemindeki sapma değeri daha sonra gerekli değişiklikleri yansıtacak şekilde güncellenmektedir [120].

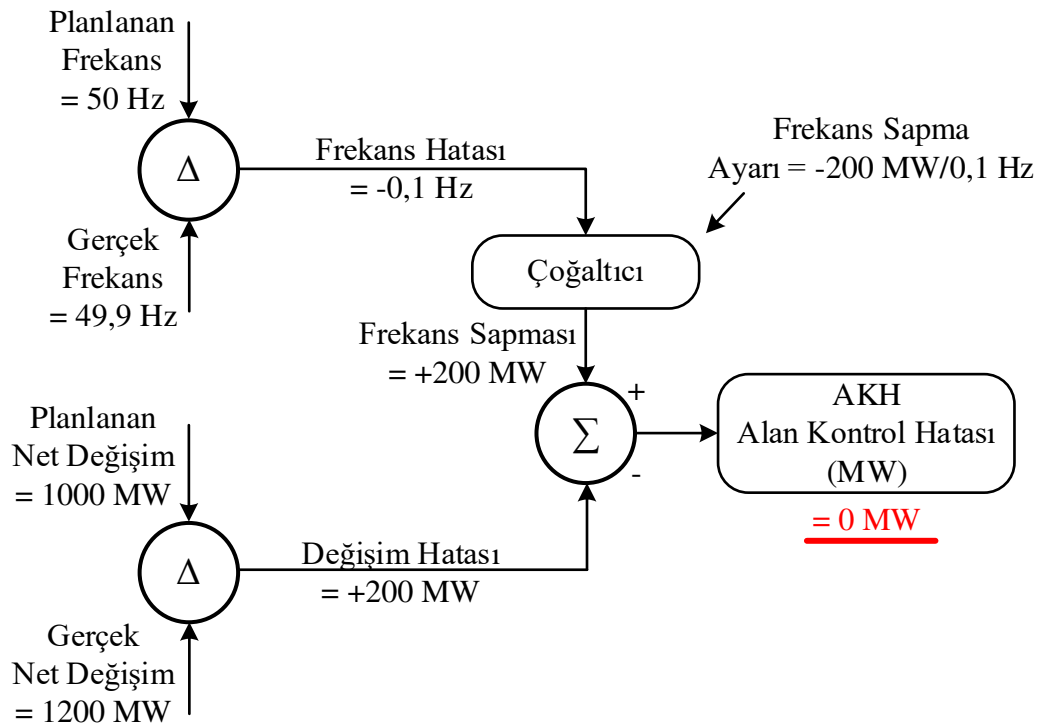


Şekil 2.20. Bağlantı hattı sapma kontrolü AKH hesaplaması.

Şekil 2.20’de; üst kısım frekans hatasını belirlemek içindir. Alt kısım net değişim hatasını belirler. Frekans hatası bias (B) değeri ile çarpılır. Elde edilen güç sayısı, bir AKH değeri belirlemek için net değişim hatasıyla karşılaştırılır.

I_{ME} değeri bilinen ölçüm hatalarını açıklar. Bağlantı hattı ölçümü yanlışsa, hatayı telafi etmek için bir I_{ME} değeri girilir.

Şekil 2.21’de diğer alanda bir generatör kaybolduğunda YFK’nın çalışmasını göstermektedir. Şeklin üst kısmında YFK’nın frekans hatasını nasıl hesapladığı ve bu hatayı frekans sapma değeriyle nasıl çarpıldığı gösterilmektedir. 0,1 Hz’lik frekans hatası - 200 MW/0,1 Hz’lik frekans sapma değeriyle çarpıldığında +200 MW’lık frekans bozulmasına beklenen güç yanıtı elde edilir. Bu +200 MW değeri, YFK sisteminin bu alandaki bozulmaya karşı beklenen yanıtı olarak hesapladığı değerdir.

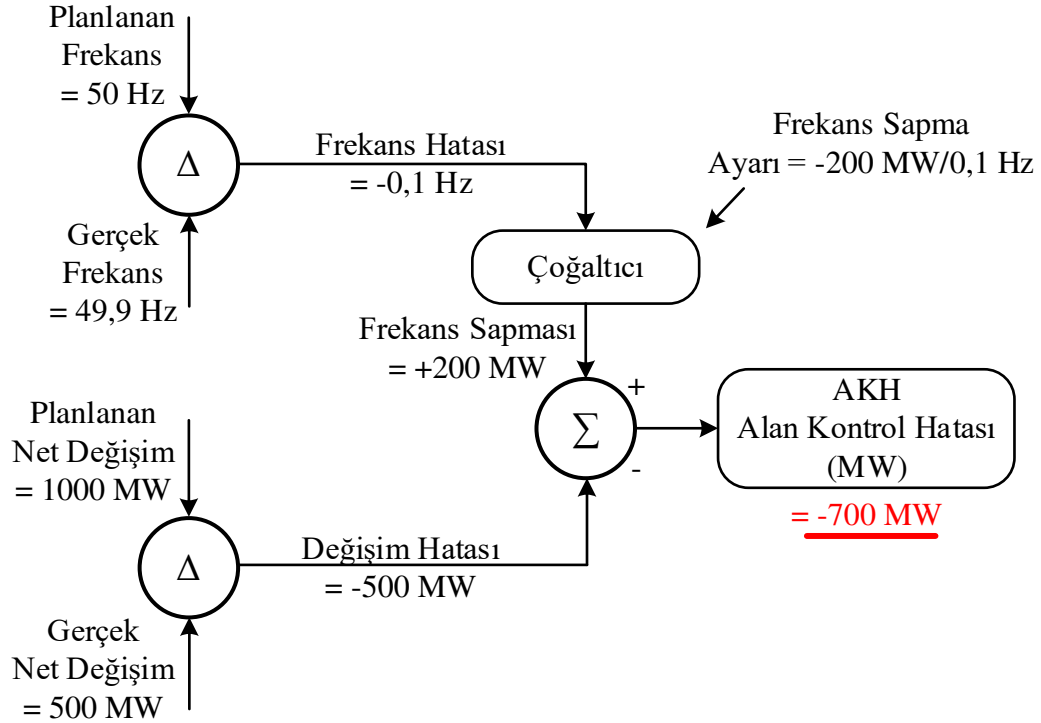


Şekil 2.21. Harici üretim kaybında AKH.

Şeklin alt kısmı YFK’nın bu alanın gerçek tepkisini nasıl hesapladığını göstermektedir. Bozukluğa verilen herhangi bir güç tepkisinin bağlantı hatları üzerinden akması gerektiğinden, gerçek tepki basitçe planlanan ve gerçek bağlantı hattı akışları arasındaki farktır. 1000 MW’lık planlanmış değişimin 1200 MW’lık fiili değişimden çıkarılmasıyla bulunur. Gerçekleşen, planlanandan 200 MW daha fazladır, dolayısıyla gerçek yanıt +200 MW’tır.

YFK sistemi şimdi beklenen yanıt ile gerçek yanıtı karşılaştırır. Gerçek yanıt +200 MW ve beklenen +200 MW'tır. Gerçekleşen beklenen ile eşit olduğundan, hata veya AKH sıfır MW'a eşittir. AKH'nın sifıra eşit olması, sistem yanıtının tam olarak amaçlandığı gibi olduğu anlamına gelir. YFK'nın üretimde herhangi bir ayarlama yapması gerekmez.

Şekil 2.22'de aynı büyüklükte bir generatörün kaybedildiği ancak bu generatörün ilgili alanda olduğu varsayılmaktadır.



Şekil 2.22. Dahili üretim kaybında AKH.

Şeklin üst kısmı frekans sapma değeri -200 MW/0,1 Hz ile çarpıldığında 0,1 Hz'lik frekans hatası, +200 MW'lık frekans bozukluğuna beklenen MW yanıtını verir. Gerçek yanıt, 500 MW'lık gerçek değişimden 1000 MW'lık planlanmış değişimin çıkarılmasıyla bulunur. Gerçek değişim, planlanan değişimden 500 MW daha azdır, bu nedenle gerçek yanıt -500 MW'tır.

YFK sistemi şimdi beklenen yanıt ile gerçek yanıtı karşılaştırır. Gerçek yanıt -500 MW ve beklenen +200 MW'tır. Gerçek tepki beklenen tepkiden 700 MW daha azdır. Bu nedenle AKH -700 MW'a eşittir. 700 MW'lık bir AKH, bu sistemin 700 MW eksik üretim yaptığını gösterir. Bu AKH'nı azaltmak için YFK kontrolü altındaki generatörlerin ayar noktalarının güç çıkışını artıracak şekilde ayarlanması gerekir. Generatör çıkışları arttıkça AKH değeri sifıra doğru azalır.

2.5. ÜÇÜNCÜL (TERSİYER) FREKANS KONTROLÜ

Üçüncül kontrol aşaması, generatör güç seviyelerinin ayarlanmasını veya frekans bozuklukları oluşması durumunda ikincil frekans kontrol rezervlerinin yeterli bir kaynağı sağlamak için kontrol edilen yük dağılımını kullanmayı içermektedir. Birincil amaç, mevcut enerji talebini verimli bir şekilde karşılamak için her birimin elektrik üretimini optimize etmektir. Üçüncü kontrol rezervinin etkinleştirilmesi herhangi bir zamanda mümkün olmalıdır. [121].

2.6. GENERATÖR KAYBINA AŞAMALI YANIT

Güç sisteminin bir üretim kaybına tepkisini tanımlamak için dört aşamalı bir süreç kullanılmaktadır. Güç sistemi bu aşamalardan geçerek ilerler [115], [124].

2.6.1. Elektromanyetik Enerji Aşaması

Bir üretim kaybının hemen ardından, kayıp noktasına elektriksel olarak en yakın olan generatörler ilk önce ve en fazla güç ile yanıt vermektedir. Güç transfer denkleminde, bir generatörden sistemdeki bir noktaya iletilen güç miktarı generatörden o noktaya kadar olan empedansa bağlıdır. Bu empedans, generatörün iç empedansı ve iletim yolunun empedansından oluşmaktadır.

Bir generatöre aniden bir yük uygulandığında, iç empedansı keskin bir şekilde düşer ve ardından birkaç saniye içinde normale döner. Elektriksel olarak üretim kaybına yakın olan generatörler için empedanstaki bu düşüş, empedanslarını önemli ölçüde düşürür ve böylece generatörün daha fazla güç tedarik etmesini sağlar. Bu aşamada enterkonneksiyondaki her bir generatör tarafından sağlanan güç miktarı, generatörün üretim kaybına olan elektriksel uzaklığı ile doğru orantılıdır.

Generatör bu gücü çok hızlı bir şekilde, neredeyse anında sağlamaktadır, ancak güç desteğini yalnızca saniyenin yaklaşık 1/3'ü kadar sürdürebilmektedir. Generatörün sağladığı güç normal güç kaynaklarından (türbin) değil, generatörün manyetik alanı içinde depolanan enerjiden gelmektedir. Generatörün kendi manyetik enerjisi generatör tepkisinin kaynağı olduğu için bu aşamaya elektromanyetik enerji aşaması denir. Elektromanyetik enerji aşaması için zaman çerçevesi kaybın hemen ardından kaybın yaklaşık 1/3 saniye sonrasına kadardır [125].

2.6.2. Eylemsizlik Aşaması

Üretim kaybının hemen ardından, kaybın yaşandığı bölgedeki frekans düşmeye başlamaktadır. Frekans düşüşü anlık olarak gerçekleşmez, sistemdeki devasa dönen kütlelerin yavaşlaması zaman alır. Üretim kaybına uğrayan bölgedeki frekansı, düşük frekanslı bir frekans cebi olarak adlandırılabilir.

Enterkonnekte sistemin geri kalanında henüz bir frekans düşüşü yaşanmamıştır. Kayba uğrayan bölgede frekans cebi geliştikçe, enterkonnekte sistemin geri kalanı düşük frekans cebine eylemsizlik enerjisi sağlamaya başlar. Sonraki birkaç saniye boyunca, enterkonneksiyon boyunca frekans ortak bir düşük değere doğru hareket eder. Bu süre zarfında cebin frekansı önemli ölçüde iyileşirken, enterkonnekte sistemin geri kalanının frekansı hafifçe düşer. Tepkinin bu ikinci aşamasına eylemsizlik aşaması adı verilir. Eylemsizlik aşaması, üretim kaybından sonraki 1/3 saniye ile kayıptan sonraki 5 saniye arasında yaklaşık bir zaman dilimine sahiptir.

Eylemsizlik aşamasında, birbirine bağlı tüm sistem generatörleri göreceli büyüklükleriyle orantılı olarak güç sağlamaktadır. Büyük (devasa) generatörler daha fazla güç ile yanıt verir [118].

2.6.3. Governor Tepki Aşaması

Enterkonnekte sistemdeki generatörler, governor ayarlarıyla orantılı olarak güç ile yanıt vermektedirler. Tüm üniteler aynı düşüşe sahipse, tüm üniteler güç büyüklükleriyle orantılı olarak yanıt verir. Governor aşaması, Enterkonneksiyon boyunca frekansı ortak bir değerde stabilize eder. Governor tepki aşaması için yaklaşık zaman çerçevesi kayıptan sonraki 2 saniye ile kayıptan sonraki 20 saniye arasındadır [39].

2.6.4. Yük Frekans Kontrolü Aşaması

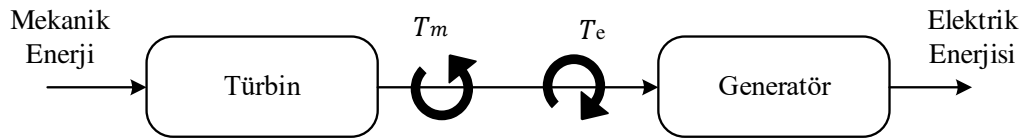
Governor aşamasından sonraki birkaç dakika boyunca, üretimi kaybeden alandaki YFK sistemi, frekansı 50 Hz'ye döndürmek için ünitelerine darbe uygulamaktadır. YFK kaybın üstesinden gelemiyorsa, komşu sistemlerden acil yardım talep etmelidir. YFK aşaması için yaklaşık zaman dilimi, kayıptan sonraki birkaç saniye ile kayıptan sonraki 15 dakika arasındadır [47].

3. YÜK FREKANS KONTROLÜ MODELİ

Frekansı analiz etmek için yük frekansı kontrol prosedürü yük değişiklikleri ve bozulmalarla başa çıkacak şekilde geliştirilmelidir. Güç sistemleri önemli ölçüde doğrusal olmama özelliği gösterir ve zamana bağlı değişikliklere uğramaktadır. Bu nedenle, bilgisayar ortamında simülasyon çalışmaları yapabilmek için güç sistemlerinin tüm unsurları için basit, temel doğrusallaştırılmış matematiksel modeller geliştirmek önemlidir [1].

3.1. GENERATÖR MODELİ

Generatör bir türbin tarafından çalıştırılır ve birbirine bağlı iki karışık kuvvete sahip büyükçe bir dönen nesne olarak tanımlanabilir. Şekil 3.1'de gösterilen türbin-generatör modelinde, mekanik moment (T_m) dönme hızında bir artışa yol açar, ancak elektrik moment (T_e) hızda bir düşüşe neden olur. T_m ve T_e aynı olduğunda, dönme hızı ($\omega = \omega_0$) olacaktır. Elektrik moment (T_e) mekanik momentini aşarsa, tüm dönen sistem yavaşlayacaktır. Aşırı yavaşlama zararlı olabileceğinden, sistem hasarını önlemek için mekanik momentini artıran ve sistemi stabilize eden bir kontrol yönteminin uygulanması önemlidir [128], [129].



Şekil 3.1. Türbin – generatör modeli.

Aşağıda güç sistemi kontrol modellemesi için formüllerde kullanılan kısaltmalar yer almaktadır.

- ω = açısal hız
- α = açısal ivme
- δ = generatör faz açısı
- $T_a = T_m - T_e$ = ivme momenti
- T_m = mekaniksel moment

- T_e = elektriksel moment
- $P_a = P_m - P_e$ = ivme gücü
- P_m = mekaniksel güç
- P_e = elektriksel güç
- I = makinenin atalet momenti
- M = makinenin açısall momenti

Faz açısı hariç, modelleme sürecindeki tüm büyüklükler birim başına (per unit - pu) cinsinden ifade edilmektedir. Ayrıca, "0" (ω_0) alt indisi kararlı durumları veya nominal değerleri temsil ederken, " Δ " ($\Delta\omega$) işareti nominal değerlerden sapmaları gösterecektir. Denklem (3.1)-(3.3) temel matematiksel ilişkileri sağlamaktadır [128], [129].

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

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

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

Başlangıçta, sabit bir durumda sabit bir ω_0 hızına ve δ_0 faz açısına sahip tek başına dönen bir makine var olduğu varsayımı yapılacaktır. Makine, elektriksel veya mekanik bozulmalar nedeniyle hızda dalgalanmalar yaşayacaktır. Bu noktada, $\Delta\omega$ hızı ve $\Delta\delta$ faz açısındaki tutarsızlık incelenecektir. Faz açısı sapması ($\Delta\delta$), ω_0 hızında dönen referans eksenin faz açısı ile α hızlanmasını yaşayan makinenin faz açısı arasındaki uyumsuzluktur. Makinenin hızlanma sırasındaki hızı Denklem (3.4) ve (3.5) ile temsil edilmektedir [2], [128], [129].

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

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

Denklem (3.6) nominal hızdan sapmayı ($\Delta\omega$) göstermektedir.

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

Denklem (3.7) hız sapması, faz açısı sapması ve açısall moment arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

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

Denklem (3.8), dönme hızı, mekanik moment, mekanik ve elektrik gücündeki değişimler

arasındaki bağlantı göz önünde bulundurulduğunda ivme gücü, mekanik güç ve elektrik gücü arasındaki bağlantıyı açıklamaktadır.

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

Kalıcı durum değeri ve sapma terimlerinin toplamı ivme gücünü vermekte olup Denklem (3.9)'da ifade edilmiştir.

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

P_{a0} ve ΔP_a ifadelerinin açılımları yerlerine yazıldığında Denklem (3.10) elde edilmiştir.

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

Moment Denklem (3.11)'de gösterilmiştir.

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

Denklem (3.12), Denklem (3.3)'ün kullanılmasıyla elde edilmektedir.

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

Denklem (3.10) ve (3.11) yerine koyulduğunda Denklem (3.13) elde edilmektedir.

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

Senkron çalışma anında $P_{m0} = P_{e0}$ ve $T_{m0} = T_{e0}$ olmaktadır ve ΔT_m , ΔT_e ve $\Delta\omega$ terimlerinin çarpımları ihmal edildiğinde Denklem (3.14) elde edilmektedir.

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

Hız değişimi ve moment arasındaki ilişki Denklem (3.15) ile ifade edilmektedir.

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

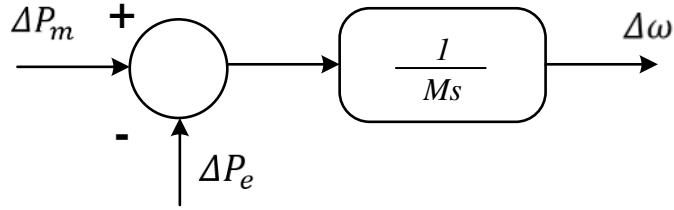
$T_{m0} = T_{e0}$ olduğu durum için Denklem (3.14) ve (3.15) birleşirse Denklem (3.16) elde edilmektedir.

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

Denklem (3.16) Laplas dönüşümü kullanılarak Denklem (3.17) elde edilmektedir.

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

Hız değişimi ile elektriksel ve mekaniksel güç arasındaki ilişkinin transfer fonksiyonu Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



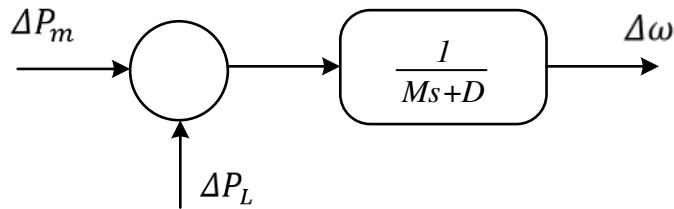
Şekil 3.2. Hız – güç ilişkisi.

3.2. YÜK MODELİ

Bir güç sistemindeki yükler çeşitli elektrikli ekipmanları içermektedir. Aydınlatma ve ısıtma gibi dirençli yükler için elektrik gücü frekanstan bağımsız olarak sabit kalır, ancak fanlar ve motorlar gibi endüktif yükler için güç frekansa bağlı olarak değişir. Elektrik yüklerinin büyük bir kısmı motor yükleri olduğundan, sistem tarafından talep edilen yükün frekans üzerindeki etkisini analiz etmek için bir model gereklidir. Aşağıdaki Denklem (3.18) yük ve frekans arasındaki korelasyonu temsil etmektedir [2].

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

Burada, ΔP_L frekansa bağlı olmayan yük değişimini, $D\Delta\omega$ frekansa bağlı olan yük değişimini ve D yük sönümlenme sabitini temsil etmektedir. Yük sönümlenme sabiti, yükteki yüzde değişimin frekansta neden olduğu yüzde değişim olarak tanımlanır ve değeri genellikle %1 ile %2 arasındadır. Örneğin, $D = 2$ olduğunu varsayarsak, yükteki %2'lik bir değişiklik frekansta %1'lik bir değişikliğe yol açacaktır. Yük sönümlenme sabitinin etkisini içeren jeneratör-yük modeli Şekil 3.3'te gösterilmektedir [2].



Şekil 3.3. Jeneratör – yük modeli.

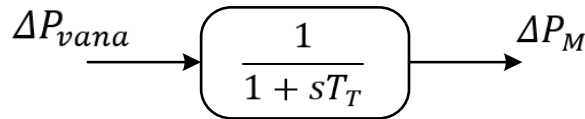
3.3. TÜRBİN MODELİ

Güç sistemlerinde, jeneratörü tahrik etmekten sorumlu ana taşıyıcı bir buhar türbini veya bir hidro türbin olabilir. Tahrik ünitesi modelini tasarlarlarken, bir buhar türbini için buhar kaynağının ve ısıtıcı sisteminin spesifik özelliklerini ve bir hidro türbin için cebri borunun

özelliklerini dikkate almak önemlidir. Türbin modeli, vana pozisyonundaki değişim ile mekanik çıkış gücündeki değişim arasındaki korelasyon ile tanımlanır. Ara ısıtmasız türbin için transfer fonksiyonu Denklem (3.19) ile tanımlanırken, türbin modeli Şekil 3.4'te gösterilmektedir [103].

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

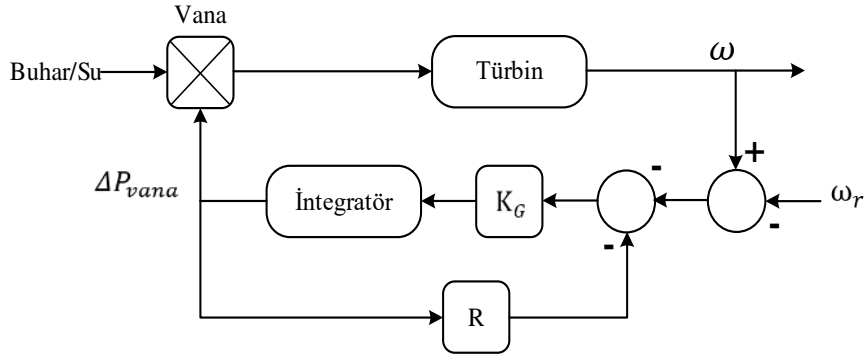
Denklem (3.19)'da T_T , 0,2 ila 2 arasında değişebilen zamansal sabiti temsil eder.



Şekil 3.4. Türbin modeli.

3.4. HIZ DÜZENLEYİCİ (GOVERNOR) MODELİ

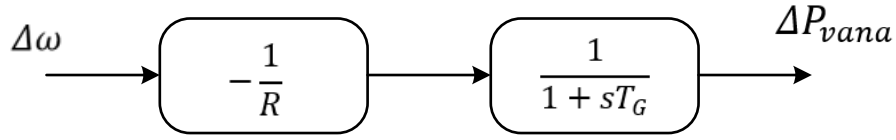
Generatörün elektrik yükünde hızlı bir artış olduğunda, elektrik gücü mekanik gücü aşmaktadır. Güç eşitsizliği, dönen sistemde biriken kinetik enerji ile dengelenir. Kinetik enerjideki düşüş türbin hızında azalmaya yol açarak sistem frekansının tolere edilebilir eşiklerin üzerine çıkmasına neden olur. Hız regülatörü hızdaki değişimi algılar. Hız regülatörü, yükteki değişikliklere yanıt olarak mekanik güç çıkışını değiştirmek için türbin girişini düzenler ve böylece sistem frekansını belirlenen değere geri getirir. Birden fazla generatör ünitesi ortak bir sisteme bağlandığında, her generatör sistem hızını kendi hızına göre düzenlemeye çalışacağından senkron hız düzenleyici kullanmak mümkün değildir. Yükün birkaç generatör ünitesi arasında dengeli bir şekilde dağıtılmasını sağlamak için, farklı çıkışlara sahip generatörler için hız hatasının sıfıra indirilmesini sağlayan bir geri besleme düzenleme sistemi kullanmak gerekir. Şekil 3.5 hız düzenleyici sisteminin blok diyagramını göstermektedir. Kaydedilen rotor hızı (ω), belirlenen hız (ω_r) ile karşılaştırılır. Hızlardaki fark ($\Delta\omega$) negatifleştirilir ve bir K_G kazancı ile büyütülür. ΔP_{vana} kontrol sinyali, integral operatörü ile işlenerek elde edilmektedir [1].



Şekil 3.5. Hız düzenleyici sistemi.

Makinenin belirtilen hızda çalışması sırasında elektrik yükünün artması durumunda, rotor hızı belirtilen hızın altına düşecek ve negatif bir hata sinyaline neden olacaktır. Bu senaryoda, entegratör ve kazanç blokları valfi etkinleştirerek türbinin mekanik çıkışında bir artışa ve dolayısıyla generatörün elektrik çıkışında bir artışa neden olur.

Şekil 3.6 hız düzenleyicinin basitleştirilmiş blok diyagramını göstermektedir. Hız düzenleyicileri, kazancı $1/R$ ve zaman sabiti T_G olan oransal kontrolörler olarak gösterilmektedir.

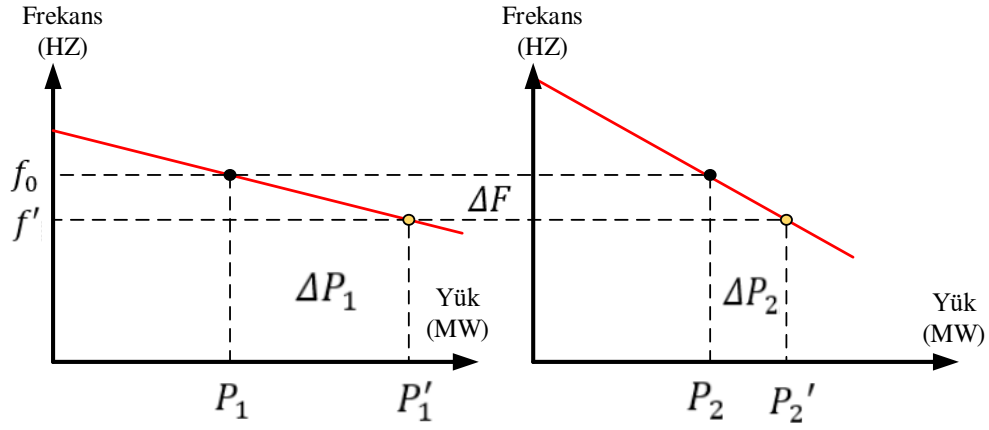


Şekil 3.6. Hız düzenleyici sistemi blok diyagramı.

R parametresi, generatör ünitesinin yük özellikleri ile kararlı durum hızı arasındaki korelasyonu yöneten düzenleyici sabiti olarak adlandırılır. Açısal hızdaki ($\Delta\omega$) veya frekanstaki (Δf) değişimin valf çıkışındaki (ΔP_{vana}) veya çıkış gücündeki (ΔP) değişime oranı R 'ye eşittir. Örneğin, R %5 olduğunda, frekanstaki %5'lik bir değişiklik valf konumunda veya çıkış gücünde %100'lük bir değişikliğe neden olacaktır. Denklem (3.20), eğim olarak da adlandırılan yönetim sabitinin yüzde gösterimini sağlar.

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

Hız düzenleyicileri ile donatılmış birçok generatör bir güç sistemine bağlandığında, ortak bir frekansa senkronize olacak ve sistemde ortaya çıkan yük dalgalanmalarını toplu olarak ele almalarına izin verecektir. Şekil 3.7, başlangıç çıkış güçleri P_1 ve P_2 olan ve f_0 frekansında çalışan iki üretim biriminin bulunduğu bir senaryoyu göstermektedir.



Şekil 3.7. Paralel birimler arasında yük paylaşımı.

Yük değişimi ΔP_L ünitelerin yavaşlamasına ve yeni bir ortak çalışma frekansı (f') elde edilene kadar hız düzenleyicinin çıkışında bir artışa neden olacaktır. Yük değeri, her bir üretim ünitesinin eğim özelliklerine dayalı olarak Denklem (3.21) ve Denklem (3.22) kullanılarak türetilmektedir.

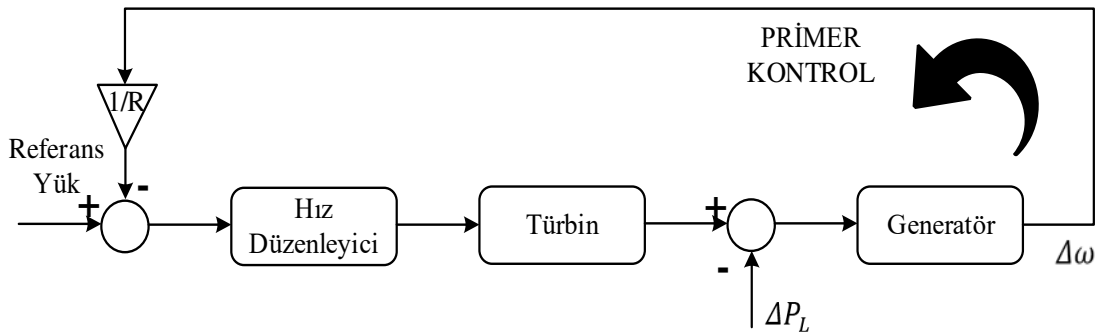
$$\Delta P_1 = P'_1 - P_1 = \frac{\Delta f}{R_1} \quad (3.21)$$

$$\Delta P_2 = P'_2 - P_2 = \frac{\Delta f}{R_2} \quad (3.22)$$

Denklem (3.23), Denklem (3.21) ve Denklem (3.22) kullanılarak elde edilmektedir.

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

Şekil 3.8'de hız düzenleyici, türbin ve generatör için transfer fonksiyonu modellerini kullanan tek alanlı bir güç sisteminin blok diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Tek alanlı güç sistemi modeli.

Generatörde birim basamak değerinde bir yük artışı olduğu düşünülürse;

$$\Delta P_L(s) = \frac{\Delta P_L}{s} \quad (3.24)$$

Yükteki değişimi hızdaki değişimle, özellikle de frekanstaki değişimle ilişkilendiren transfer fonksiyonu Denklem (3.25) ile verilmektedir.

$$\Delta \omega(s) = \Delta P_L(s) \left[\frac{\frac{-1}{Ms + D}}{1 + \frac{1}{R} \left(\frac{1}{1 + sT_G} \right) \left(\frac{1}{1 + sT_T} \right) \left(\frac{1}{Ms + D} \right)} \right] \quad (3.25)$$

$\Delta \omega(s)$ ifadesinin kalıcı durum değeri Denklem (3.26) ile bulunmaktadır.

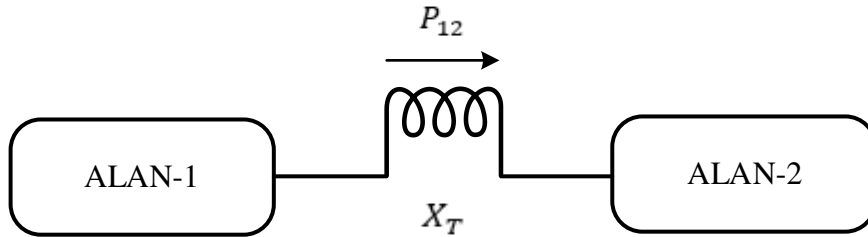
$$\Delta \omega_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} [s \Delta \omega(s)] = \Delta \omega_{ss} = \frac{-\Delta P_L \left(\frac{1}{D} \right)}{1 + \left(\frac{1}{R} \right) \left(\frac{1}{D} \right)} = \frac{-\Delta P_L}{\frac{1}{R} + D} \quad (3.26)$$

Burada yük sönüm sabiti $D = 0$ olursa, hızdaki değişimin ifadesi Denklem (3.27) gibi olmaktadır.

$$\Delta \omega = -R \Delta P_L \quad (3.27)$$

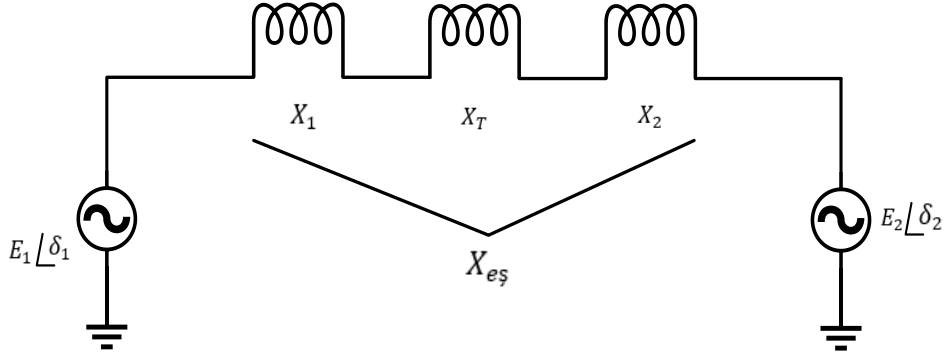
3.5. BAĞLANTI HATTI MODELİ

Şekil 3.9'da gösterildiği gibi, X_T reaktansına sahip bir bağlantı hattı ile birbirine bağlı olan iki alanlı enterkonnekte güç sistemi ele alınmıştır [128].



Şekil 3.9. İki alanlı güç sistemi.

Yük frekans kontrolü, sistemdeki her bir konumun benzer bir üretim birimi olarak temsil edilmesini içermektedir. Şekil 3.10, her bir alanın bir gerilim kaynağı ve eşdeğer bir reaktans ile gösterildiği bir güç sisteminin elektriksel gösterimini göstermektedir [128].



Şekil 3.10. Güç sistemi elektriksel eş değeri.

Bu sistemde, Alan-1'den Alan-2'ye bağlantı hattı üzerinden güç akışı Denklem (3.28) ile gösterilmiştir.

$$P_{12} = \frac{E_1 E_2}{E_T} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (3.28)$$

Başlangıç çalışma noktasında, $\delta_1 = \delta_{10}$ ve $\delta_2 = \delta_{20}$ eşitlikleri kullanılarak doğrusallaştırma yapılırsa Denklem (3.29) elde edilmektedir.

$$\Delta P_{12} = \frac{E_1 E_2}{E_T} \cos(\delta_{10} - \delta_{20}) (\Delta \delta_1 - \Delta \delta_2) \quad (3.29)$$

Denklem (3.30) ile T senkronizasyon katsayısı hesaplanmaktadır.

$$T = \frac{E_1 E_2}{E_T} \cos(\delta_{10} - \delta_{20}) \quad (3.30)$$

Bu durumda bağlantı hattı güç değişimi Denklem (3.31)'daki gibi olmaktadır.

$$\Delta P_{12} = T(\Delta \delta_1 - \Delta \delta_2) \quad (3.31)$$

Güç açısı ile frekans arasındaki ilişkiden faydalanılarak, Denklem (3.32) elde edilmektedir.

$$\Delta P_{12} = 2\pi T \left(\int \Delta f_1 - \int \Delta f_2 \right) \quad (3.32)$$

Bağlantı hattı güç değişimi Laplas dönüşümü ile Denklem (3.33) elde edilmiştir.

$$\Delta P_{12}(s) = \frac{2\pi}{s} T (\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)) \quad (3.33)$$

Şekil 3.11'de iki bölge bir güç sisteminin blok diyagramı sunulmakta olup, her bölge bir hız regülatörü, türbin ve generatörden oluşmaktadır. Sistemdeki pozitif bir bağlantı hattı

güç değişimi değeri, Alan-1'den Alan-2'ye güç aktarımında bir artış olarak belirtilmektedir. Basitçe ifade etmek gerekirse, Alan-1'deki yük değeri artarken alan-2'deki yükün azaldığı anlamına gelmektedir.

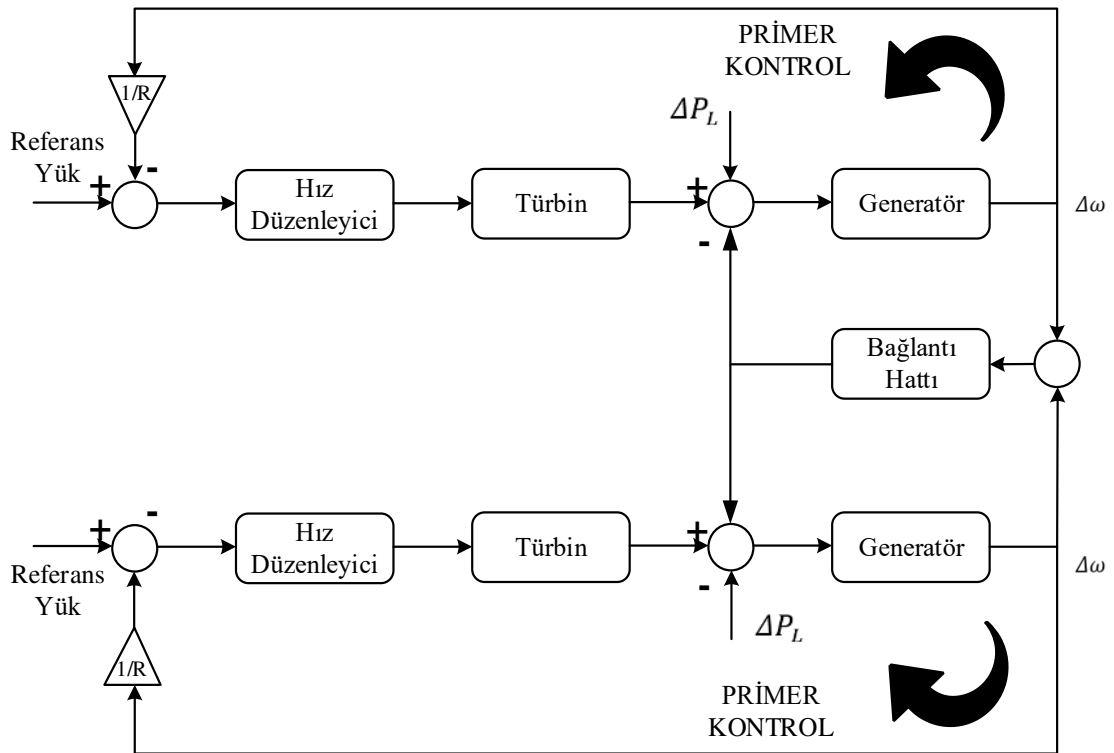
Sistemdeki tüm salınımlar bastırıldıktan sonra, frekans sabit kalacak ve kararlı durumdaki her iki alan için de aynı olacaktır. Sistemdeki bir yük değişiminden kaynaklanan frekans kayması Denklem (3.34) kullanılarak belirlenir.

$$\Delta f = \Delta \omega_1 = \Delta \omega_2 = \frac{-\Delta P_L}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \quad (3.34)$$

Alan-1'deki yük değişikliğinden kaynaklanan bağlantı hattı gücündeki değişiklik Denklem (3.35) kullanılarak belirlenebilir.

$$\Delta P_{12} = \frac{-\Delta P_L \left(\frac{1}{R_2} + D_2 \right)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \quad (3.35)$$

Tutarlı bir frekansın korunmasına rağmen, birincil kontrolde hatalı bir değer mevcuttur. Bu nedenle, ek bir kontrol mekanizması gereklidir. İkincil kontrol prosedürü sırasında, frekansı belirlenen değerine geri getirmek için bir sıfırlama (integral) kontrolü kullanılır.

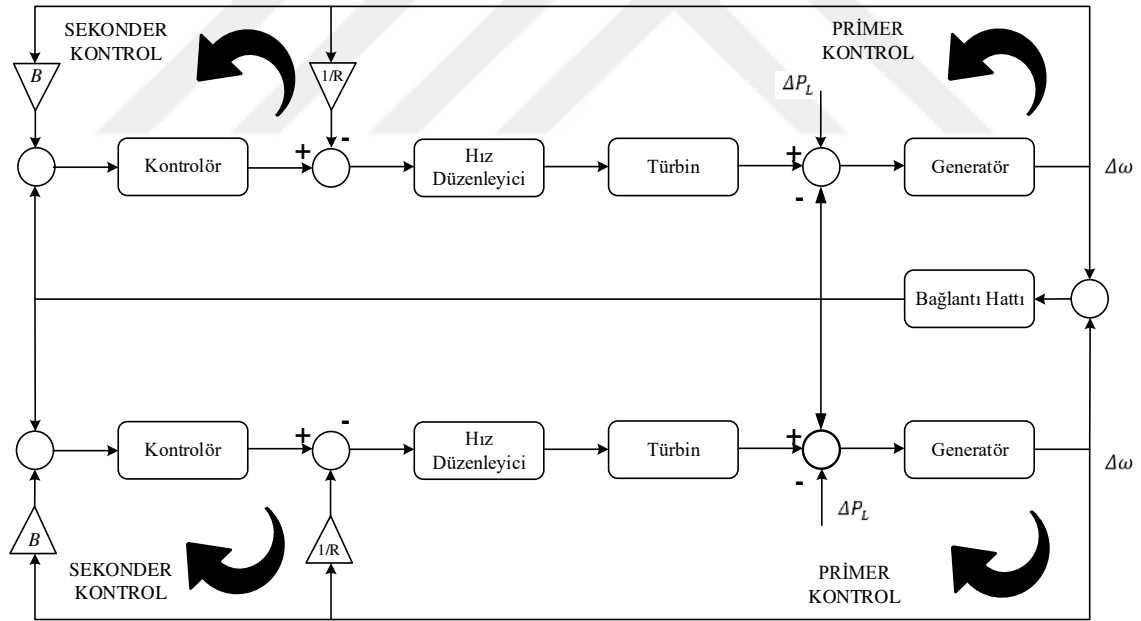


Şekil 3.11. Güç sistemi YFK modeli.

İki farklı üretim birimini birbirine bağlamanın birincil amacı, olası bir değişim durumunda birimler arasında güç alışverişini kolaylaştırmak ve frekansı belirlenen değerine geri getirmektir. Aynı üretim ve yük karakteristiklerine sahip iki farklı üretim birimi olduğunu varsayalım ($R_1 = R_2$, $D_1 = D_2$). İki üretici birim arasındaki anlaşmaya göre, Alan-1'den Alan-2'ye iletilecek elektriğin 100 MW olması öngörülmektedir. Alan-2'de 30 MW'lık bir yük artışı olduğunda, bu artış aynı üretim özelliklerine sahip oldukları için iki ünite arasında paylaştırılır.

Sonuç olarak, her iki bölgede de eşzamanlı olarak 15 MW'lık bir artırım olacaktır. Bu koşullar altında, enterkonneksiyon hattı üzerinden güç iletimi 100 MW'tan 115 MW'a çıkacaktır. Bu durum Alan-2'deki yük talebinin karşılanması açısından avantajlı olsa da, iki enerji üretim birimi arasındaki anlaşmalar nedeniyle sorun yaratabilir.

İkincil kontrol yöntemi, bu sorunları çözmek için sistem frekansı ve bağlantı hattı güç dalgalanması hakkındaki bilgileri kullanarak yürütülür. İki bölgeli güç sistemlerinde YFK sürecinin blok diyagramı Şekil 3.12'de gösterildiği gibi mevcut modellerden türetilmiştir.



Şekil 3.12. İkincil kontrol içeren güç sistemi YFK modeli.

B_1 ve B_2 her iki alan için frekans bias faktörü olup Denklem (3.36) ve (3.37)'den elde edilir.

$$B_1 = \left(\frac{1}{R_1} + D_1 \right) \quad (3.36)$$

$$B_2 = \left(\frac{1}{R_2} + D_2 \right) \quad (3.37)$$

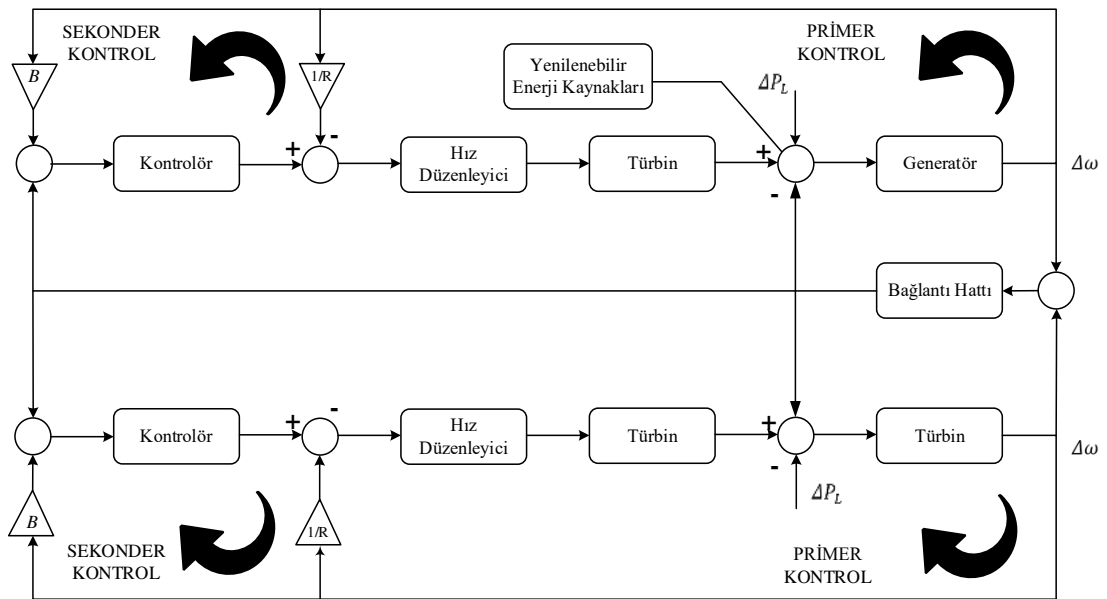
İkincil kontrol prosedürü, frekans sapma faktörünün frekans dalgalanmasıyla çarpılması ve bağlantı hattı güç değişimine eklenmesiyle hesaplanan AKH olarak bilinen bir kontrol sinyali kullanır. AKH, Denklem (3.38) ve (3.39) kullanılarak belirlenir.

$$AKH_1 = B_1 \cdot \Delta f_1 + \Delta P_{tie} \quad (3.38)$$

$$AKH_2 = B_2 \cdot \Delta f_2 + \Delta P_{tie} \quad (3.39)$$

3.6. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARINI İÇEREN YÜK FREKANS KONTROL MODELİ

Günümüzde, fosil yakıt bazlı güç sistemleri pazarın önemli bir bölümünü elinde tutmaktadır [8]. Bununla birlikte, fosil yakıtların kıtlığı ve karbon emisyonlarını azaltma ihtiyacı göz önüne alındığında, alternatif enerji kaynakları gelecekteki güç sistemleri için tercih edilen seçenek olarak önem kazanmaktadır. Sonuç olarak, rüzgar ve güneş enerjisi teknolojileri güç sistemlerine dahil edilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları gelecekte elektrik üretiminde önemli bir rol oynayacaktır. Yenilenebilir enerji kaynakları fosil bazlı güç sistemlerinin yerini alacak, böylece ekolojik açıdan daha sağlam ve daha az kirli bir enerji üretim aracı sunacaktır [9].



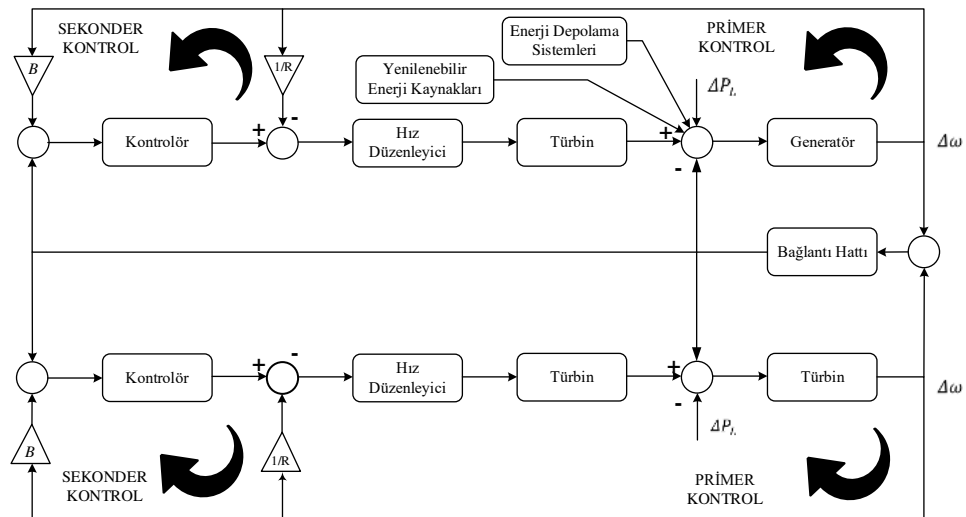
Şekil 3.13. Yenilenebilir enerji kaynaklarını içeren güç sistemi YFK modeli.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyeli çevresel koşullardan büyük ölçüde etkilenmektedir. Örneğin, güneş enerjisi doğrudan güneş ışığı aldığı dönemlerde daha fazla güç üretirken, rüzgar enerjisi güçlü bir rüzgar olduğunda daha yüksek bir üretim oluşturur [8]. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarının simüle edilmesi ve incelenmek üzere yük frekansı kontrol sistemine dahil edilmesi çok önemlidir [11]. Yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip güç sistemi için yük frekansı kontrol modeli Şekil 3.13'de gösterilmektedir.

3.7. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİ İÇEREN YÜK FREKANS KONTROL MODELİ

Kapsamlı yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, aktif güç üretiminde riskleri de beraberinde getirmektedir [130]. Zayıf atalet, öngörülemezlik ve düzensizlik gibi bu sorunlar, sistem kararlılığının korunmasında zorluklara yol açabilir [131]. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynakları, Enerji Depolama Sistemlerinin (EDS) entegrasyonunu gerektiren düzensiz modeller sergiler [132]. Enerji depolama sistemleri, birçok uygulamada güç dalgalanmalarını azaltma ve güç kalitesini artırma yeteneğine sahiptir [133].

Son literatür araştırmaları çoğunlukla batarya enerji depolama sistemleri ve volan enerji depolama sistemleri de dahil olmak üzere enerji depolama sistemlerine odaklanmıştır [32]. Yük frekans kontrolüne entegre edilmiş enerji depolama sistemlerinin temel gösterimi Şekil 3.14'te gösterilmektedir.



Şekil 3.13. Yenilenebilir enerji kaynaklarını içeren güç sistemi YFK modeli.

4. KONTROLÖR YAPILARI

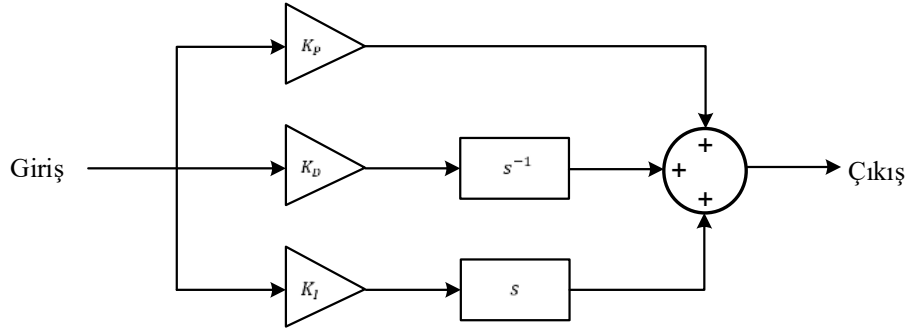
Yük frekansı kontrolü, sistem kararlılığını korumak ve kararlı durum hatasını en aza indirmek için birincil ve ikincil kontrollerin kullanılmasını içermektedir [1]. Birincil kontrol öncelikle sistem kararsızlığını önlemeye odaklanırken, ikincil kontrol kontrolörlerin kullanımı yoluyla kararlı durum hatasını azaltmayı veya ortadan kaldırmayı amaçlar. Bu nedenle, yük frekansı kontrolü temel olarak ikincil kontrole dayanmaktadır. Bu nedenle, yük frekansı kontrolünde kullanılan kontrolörlerin seçimi ve bu kontrolörler için ideal parametrelerin hesaplanması, sistem kararlılığının sağlanması için çok önemlidir [2].

Yük frekansı kontrolünde kullanılan kontrolörler analiz edildiğinde, temelde üç ana operatörün mevcut olduğu görülmektedir. İlk operatör, P ile gösterilen oransal (proportional) operatördür. P operatörünün birincil sorumluluğu, hata sinyalinin yükseltilmesi veya zayıflatılması gereken uygun oranı tespit etmektir. İntegral (I) operatörünün rolü, sistem çıkışını referans değere yaklaşacak şekilde ayarlayarak kararlı durum hatasını en aza indirmektir. Bu serideki son operatör, D ile gösterilen türev (derivative) operatörüdür. D operatörünün rolü, sistemin çıkışındaki değişimleri en aza indirmektir. Yani, geçici hatayı sıfıra geri getirmektir [128].

4.1. PID KONTROLÖR

PID kontrolörleri güç sistemi kontrollerinde yaygın olarak kullanılmakta, hem modelleme ve analiz hem de gerçek uygulamalar için yaygın olarak kullanılan bir çerçeve olarak hizmet vermektedir. Sistemin performansı, üç operatörünün varlığı nedeniyle önemli ölçüde geliştirilebilir: Oransal (P), İntegral (I) ve Türev (D). Genellikle basit yapısı ve performansı nedeniyle seçilmektedir [134]. Şekil 4.1'de PID kontrolörünün blok diyagramı Denklem (4.1)'de blok diyagramının denklemi gösterilmektedir.

$$\Sigma(t) = P_{out} + I_{out} + D_{out} \quad (4.1)$$

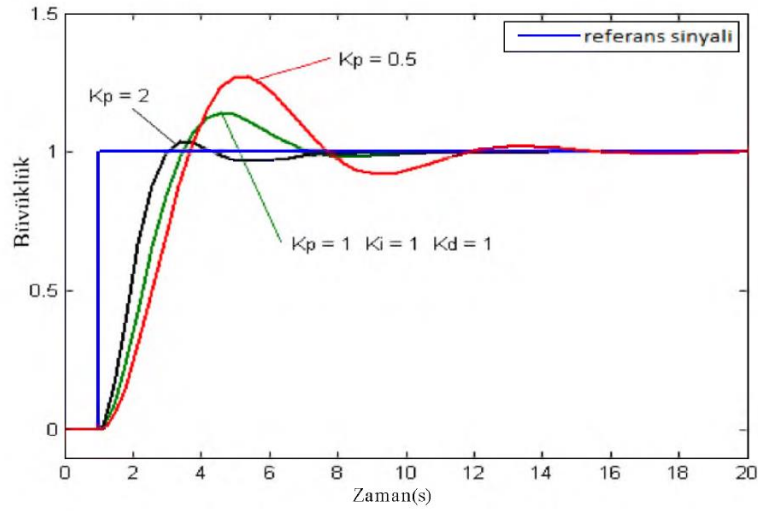


Şekil 4.1. PID kontrolör yapısı.

4.1.1. Oransal (Proportional) Terim

Oransal bir terimin ortaya çıkışı mevcut hata değeriyle doğru orantılıdır [135]. Oransal yanıt, hatanın K_p olarak bilinen bir sabitle çarpılmasıyla ayarlanabilir ve Şekil 4.2 ile gösterilmiştir. Oransal Denklem (4.2) ile hesaplanır:

$$P_{out} = K_p e(t) \quad (4.2)$$



Şekil 4.2. Genliğin zamana karşı K_p grafiği (K_I ve K_D sabit).

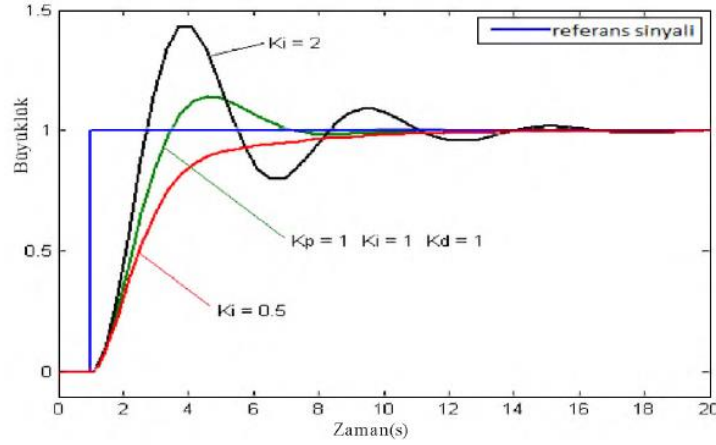
Aşırı yüksek bir oransal kazanç sistem kararsızlığına yol açabilmektedir. Bununla birlikte, küçük bir artış, daha az reaktif veya hassas bir kontrolör gibi, büyük bir giriş hatasına sınırlı bir yanıtla sonuçlanmaktadır. Ayarlama teorisi ve endüstri uzmanlığına dayanarak, oransal terimin çıkış değişiminin büyük kısmından sorumlu olmaktadır.

4.1.2. İntegral Terimi

İntegral bileşenin etkisi doğrudan hatanın büyüklüğü ve uzunluğu ile ilgilidir. Bir PID kontrolörünün integral bileşeni, Şekil 4.3 ile gösterilmiş olup, önceki iterasyonlarda

düzeltilmiş olması gereken birikmiş hatayı temsil eder ve Denklem (4.3) ile ifade edilmektedir.

$$I_{out} = K_I \int_0^t e(t) dt \quad (4.3)$$



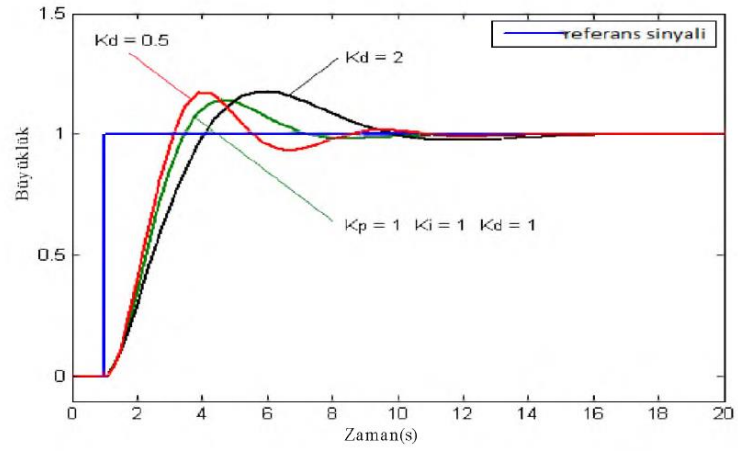
Şekil 4.3. Genliğin zamana karşı K_I grafiği (K_P ve K_D sabit).

İntegral teriminin kontrolöre dahil edilmesi, sürecin istenen ayar noktasına doğru yakınsamasını hızlandırır ve tamamen oransal bir kontrolörün kullanılmasından kaynaklanabilecek kalan kararlı durum hatasını ortadan kaldırmaktadır [134]. Öte yandan, önceki hatalara karşı duyarlı olması nedeniyle mevcut sonucun istenen değeri aşması mümkündür.

4.1.3. Türev (Derivative) Terimi

Proses hatasının türevini hesaplamak için, hatanın zamana göre değişim oranının belirlenir ve ardından bu türev kazancı K_D ile çarpılır. Türev kazancı, K_D , genel kontrol eyleminin türev terimine atfedilen kısmıdır ve Şekil 4.4 ile gösterilmiştir [134]. Türev terimini belirlemek için Denklem (4.4) kullanılır:

$$D_{out} = K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (4.4)$$



Şekil 4.4. Genliğin zamana karşı K_D grafiği (K_P ve K_I sabit).

5. YÜK FREKANS KONTROLÜNDE KULLANILAN AMAÇ FONKSİYONLARI

Bir optimizasyon sorununu ele almak için, performans endeksine dayalı amaç fonksiyonunun oluşturulması esastır. Kontrol parametresi optimizasyon yaklaşımlarının başarılı bir performans göstermesini sağlamak için bir amaç fonksiyonu oluşturmak çok önemlidir [136].

Literatürde, Mutlak Hatanın Toplamı (Integral Absolute Error - IAE), Hata Karelerinin Toplamı (Integral Squared Error - ISE), Zaman Ağırlıklı Mutlak Hatanın Toplamı (Integral Time-weighted Absolute Error - ITAE) ve Zaman Ağırlıklı Hata Karelerinin Toplamı (Integral Time-weighted Squared Error - ITSE) gibi çeşitli amaç fonksiyonları mevcuttur ve aşağıdaki denklemlerde gösterilmiştir [137].

$$ISE = \int_0^{\infty} \{(\Delta f_1)^2 + (\Delta f_2)^2 + (\Delta P_{tie})^2\} \cdot dt \quad (5.1)$$

$$ITSE = \int_0^{\infty} \{(\Delta f_1)^2 + (\Delta f_2)^2 + (\Delta P_{tie})^2\} \cdot t \cdot dt \quad (5.2)$$

$$IAE = \int_0^{\infty} \{|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + |\Delta P_{tie}|\} \cdot dt \quad (5.3)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} \{|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + |\Delta P_{tie}|\} \cdot t \cdot dt \quad (5.4)$$

ITAE amaç fonksiyonu, diğer amaç fonksiyonlarına kıyasla bekleme süresini düşürme ve maksimum aşımı azaltma konusundaki etkinliği ile dikkat çekmektedir [138], [139]. Bu tez çalışmasında denetleyici parametrelerinin uygun şekilde tasarlanması için amaç fonksiyonu olarak ITAE tercih edilmiştir.

6. SEZGİSEL OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ

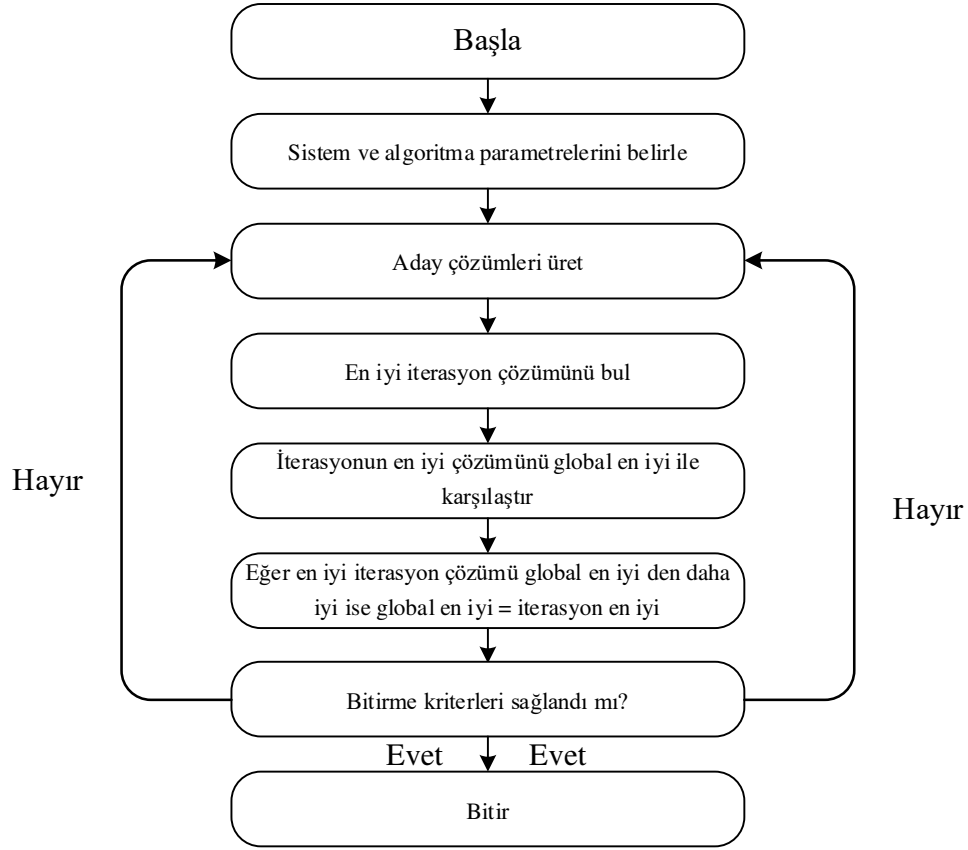
Günümüzde, önemli ölçüde modernize edilen güç sistemleri karmaşık bir yapıya sahiptir ve bu da karmaşık mühendislik sorunlarını beraberinde getirmektedir. Yük frekansı Kontrol sistemlerinde optimum performans elde etmek için ideal parametreleri bulmak gerekir.

Sezgisel optimizasyon yaklaşımları, literatür incelemelerinden de görüldüğü üzere, birçok yük frekans kontrolü uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Sezgisel optimizasyon stratejileri, karmaşık ve çok kısıtlı konular için optimum çözümleri keşfetme yeteneğine sahiptir. Bu optimizasyon stratejileri kullanılarak çözümler hızlı ve kolay bir şekilde yakınsanabilir [140]–[157].

Sezgisel optimizasyon yöntemleri doğadan ilham almaktadırlar ve popülasyon tabanlı yöntemler, fizik tabanlı yöntemler ve evrimsel tabanlı yöntemler olarak gruplandırılabilirler.

Sezgisel teknikler, ilk olarak kullanılacak algoritmanın parametrelerinin ve değerlerinin tanımlanmasını içermektedir. Daha sonra, yük frekansı kontrol sistemleri için optimum kontrolör ayarlarının belirlenmesine yönelik belirtilen problemi ele almak için, kullanıcı tarafından katkıda bulunulan aday çözümler geliştirilir. Aday çözümler için arama uzayı kullanıcı tarafından belirlenir ve tüm aday çözümler bu uzayın içinde yer almalıdır. Bu potansiyel çözümler arasından en uygun seçenek seçilir ve bellekte saklanır. Sonraki her iterasyonda, aday çözümler benzer bir süreç kullanılarak geliştirilir. Her iterasyonun sonunda, o iterasyonda elde edilen en iyi değer, şimdiye kadar belirlenen en iyi çözüm (küresel en iyi olarak bilinir) karşılaştırılır. Optimum iterasyon değeri küresel optimuma kıyasla daha üstün sonuçlar veriyorsa, küresel optimum olarak belirlenir ve korunur. Bununla birlikte, optimum iterasyon değeri küresel en iyiye kıyasla daha az elverişli bir sonuca sahip ise küresel en iyi değer sonraki iterasyonda değişmeden kalır. Sezgisel yaklaşım, sonlandırma gereksinimleri karşılanana kadar bu iterasyonlar devam etmektedir.

Şekil 6.1'de sezgisel optimizasyon tekniklerinin genel işleyişini gösteren bir akış diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 6.1. Sezgisel optimizasyon teknikleri temel akış diyagramı.

Son yıllarda, optimizasyon zorluklarını ele almak için birçok optimizasyon tekniği oluşturulmuştur. Bu tez çalışmasında klasik sezgisel optimizasyon tekniklerinden biri olan PSO, güncel sezgisel optimizasyon tekniklerinden BA, BPA ve GKO kullanılmıştır.

6.1. BAL PORSUĞU ALGORİTMASI

Bal porsuğu, yumuşak ve kalın olan siyah beyaz kürke sahip bir memelidir. Güney Fas'tan Güney Afrika'ya ve Hazar Denizi'nden Hindistan'a kadar uzanan bir dizi habitatta bulunabilir. Bal porsuğu olarak adlandırılmasına rağmen, bu hayvan aslında porsuktan ziyade gelinciklerle daha yakından ilişkilidir. Bal porsukları, bal tüketmeyi tercih ettikleri için bu şekilde adlandırılmıştır.

Bal porsuğu, usta koku alma yeteneklerini kullanarak avının yerini bilinçli ve tutarlı bir yürüyüş temposuyla tespit etmektedir. Süreç, avın yaklaşık konumunun kazılarak tespit edilmesiyle başlar ve nihayetinde yakalanmasıyla sonuçlanır. Tek bir gün içinde, yiyecek bulmaya çalışırken kırk kilometre veya daha fazla bir yarıçap içinde elliye kadar oyuk kazma kapasitesine sahiptir. Bal porsuğunun bala karşı güçlü bir ilgisi vardır, ancak arı

kovanlarını bulma konusunda yetkin değildir. Buna karşılık, bir kuş türü olan bal rehberi, arı kovanlarını tespit etme yeteneğine sahiptir ancak bal alma yeteneğinden yoksundur. Bu olaylar kuş ve porsuk arasında bir bağlantı yaratır; kuş porsuğu arı kovanlarına yönlendirir ve kovanların açılmasına yardımcı olmak için uzun pençelerini kullanır. Sonuç olarak, her iki hayvan da ortak çabalarından fayda sağlamaktadır [156].

6.1.1. Esinlenme

Bal Porsuğu Algoritması bal porsuğunun yiyecek arama davranışını taklit etmektedir. Bal porsuğu yiyecek kaynağını ya koku alma ve kazma yöntemlerini kullanarak ya da yol gösterici bir kuşu takip ederek bulur. İlk senaryo "kazma modu" olarak adlandırılırken, sonraki durum "bal modu" olarak bilinmektedir. Kazma aşaması sırasında canlı, avının yerini tespit etmek için koku alma becerisini kullanır. Avın konumuna ulaştığında, kazmak ve avı yakalamak için uygun bir nokta seçmek üzere çevreyi dikkatle inceler. Bal modu sırasında bal porsuğu, arı kovanını hassas bir şekilde bulmak için bal rehberi kuşunun yardımına güvenir [159].

6.1.2. Matematiksel Model

Bal Porsuğu Algoritması, "kazma aşaması" ve "bal aşaması" olarak iki aşamaya ayrılmıştır.

Algoritmik Adımlar

HBA, teorik olarak, hem keşif hem de sömürü aşamalarını içerir ve bu da onu küresel bir optimizasyon yöntemi haline getirir ve matematiksel olarak modellenmektedir [111].

$$\text{Aday çözümlerin popülasyonu} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & \cdots & \cdots & X_{1d} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & \cdots & \cdots & X_{2d} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & X_{n3} & \cdots & \cdots & X_{nd} \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

$$i_{th} \text{ bal porsuğunun pozisyonu } x_i = [x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^D] \quad (6.2)$$

İlk olarak, n popülasyonlu bir bal porsuğunun konumlarını başlatmak için Denklem (6.3) kullanılır;

$$x_j = LB_i + r_1(UB_i - LB_i), \quad r_1 \in [0, 1] \quad (6.3)$$

UB_i ve LB_i aranan alanın en üst ve en alt sınırlarını temsil etmektedir. Bu arada x_j , n büyüklüğündeki bir popülasyon içinde potansiyel bir çözüm olan bal porsuğunun j_{th} konumunu ifade eder. Yoğunluk (I), avın konsantrasyonu ve i_{th} bal porsuğundan

[159].

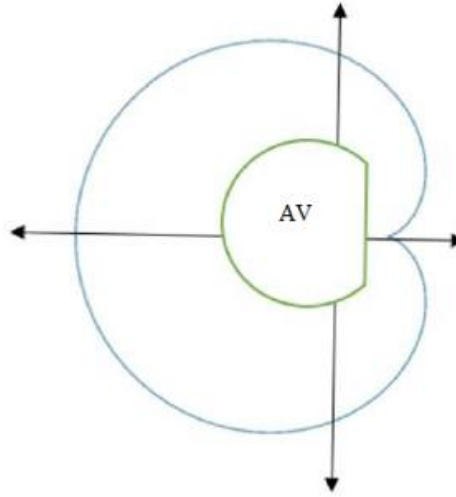
Kazma Aşaması

Bal porsuğu kazma aşaması sırasında kardiodid bir şekilde kazı yapmaktadır [160]. Denklem (6.8) bir kardiodidin tahmini hareketini modeller:

$$x_{yeni} = x_{av} + F\beta I x_{av} + Fr_3\alpha d_j |\cos(2\pi r_4)[1 - \cos(2\pi r_5)]| \quad (6.8)$$

x_{av} değişkeni, küresel optimum olarak da bilinen, avın şimdiye kadar bulunmuş en uygun konumunu temsil eder. $\beta \geq 1$ değeri, bal porsuğunun yiyecek bulma yeteneğini temsil eder r_3, r_4 ve r_5 , 0 ile 1 arasındaki değerler aralığından rastgele oluşturulmuş üç farklı tam sayıdır. Son olarak F , aramanın yönünü değiştiren bir bayraktır ve Denklem (6.9)'da seçilir:

$$F = \begin{cases} 1 & \text{if } r_6 \leq 1/2 \\ -1 & \text{aksi taktirde} \end{cases} \quad r_6 \in [0,1] \quad (6.9)$$



Şekil 6.3. Kazma modunda avına yaklaşan bal porsuğu.

Bal Aşaması

Denklem (6.10), bir bal porsuğunun bir arı kovanını bulmak için bir bal rehberi kuşunu takip ettiği senaryoyu modellemektedir.

$$x_{yeni} = x_{av} + \alpha d_j r_7 F, \quad r_7 \in [0,1] \quad (6.10)$$

Burada x_{yeni} bal porsuğunun güncellenmiş konumunu, x_{av} ise avın güncellenmiş konumunu temsil etmektedir. Denklem, BPA'nın aramasını en uygun av konumu x_{av} 'ye doğru yönlendirmek için mesafe bilgisini (d_j) kullandığını göstermektedir. BPA'nın üç

temel belirleyicisi popülasyon büyüklüğü (n), maksimum iterasyon sayısı (max_{iter}) ve durum değişkenlerinin miktarıdır (d).

BPA optimizasyon yaklaşımı, yerel arama kapasitesini artırmak için bal noktalarını kullanır ve popülasyon üyelerini en yetkin adaya yakınsamaya yönlendirir. Ayrıca, yoğunluk faktörünün dahil edilmesi, algoritmanın kapsamlı bir keşif yapmasını ve çeşitli bir popülasyonu korumasını sağlar, böylece optimal olmayan çözümlerin kullanılmasını önler.

Bal Porsuğu Algoritması için sözde kod Şekil 6.4' te verilmiştir.

```

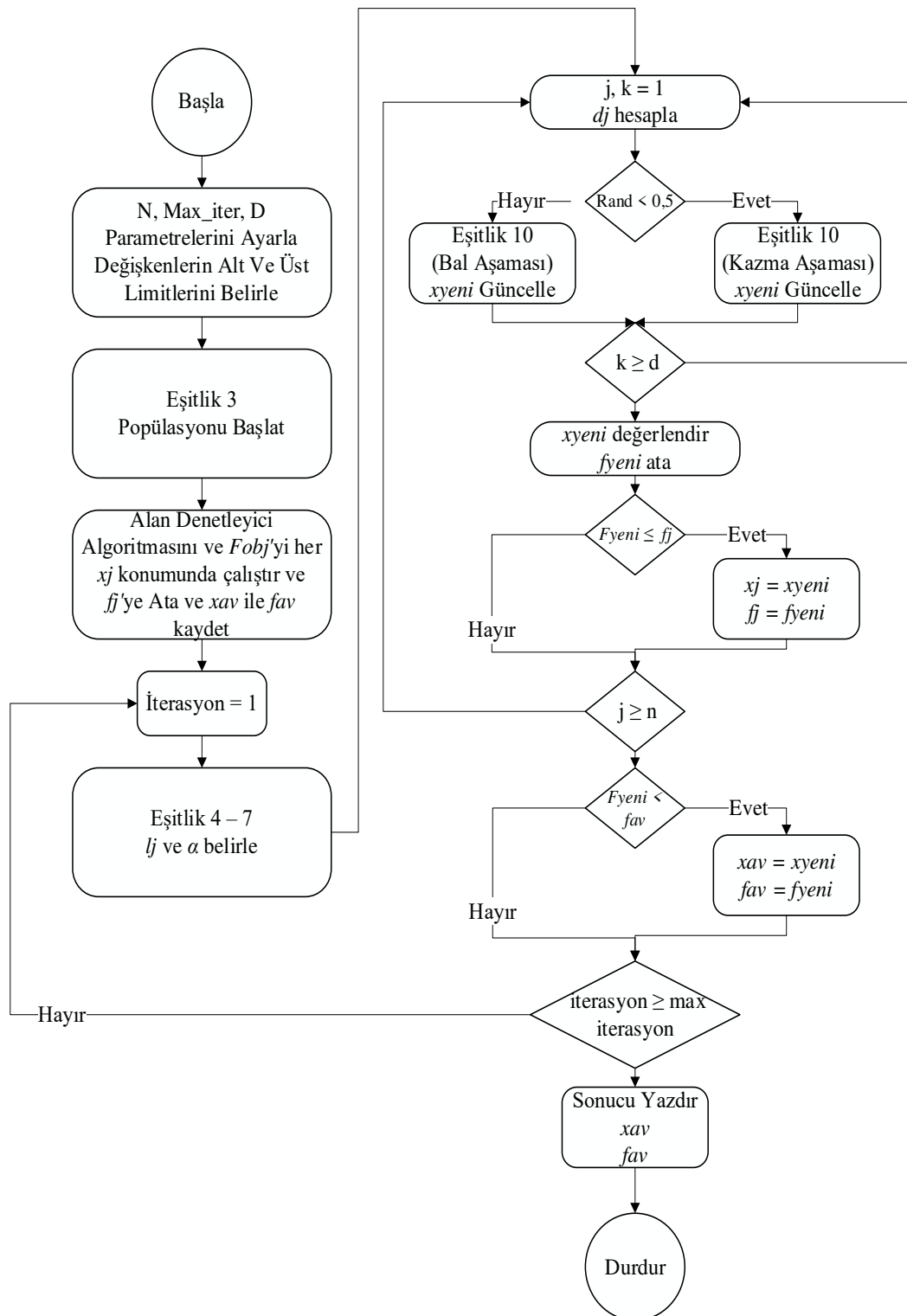
 $t_{max}$ ,  $C$ ,  $N$ ,  $\beta$  için parametreleri ayarla
Popülasyonu rastgele konumlarla başlat
Amaç fonksiyonunu kullanarak her bir bal porsuğu pozisyonu  $x_i$ 'nin uygunluğunu değerlendir ve
 $f_i$ ,  $i \in [1, 2, \dots, N]$  şeklinde ata
 $x_{prey}$ 'in en iyi konumunu kaydedilir ve  $f_{av}$  'e uygunluk ata
while  $t \leq t_{max}$  do
    Eşitlik (6.7) kullan azalan faktör  $\alpha$  güncelle
    for  $i = 1$  to  $N$  do
        Eşitlik (6.4,6.5,6.6) kullan  $I_i$  yoğunluk hesapla
        if  $r < 0,5$  then  $r \in [0,1]$ 
            Eşitlik (6.8) kullan  $x_{yeni}$  pozisyonunu güncelle
        else
            Eşitlik (6.10) kullan  $x_{yeni}$  pozisyonunu güncelle
        end if
        Yeni pozisyonu değerlendir ve  $f_{yeni}$  ata
        if  $f_{yeni} \leq f_i$  then
            Ayarla  $x_i = x_{yeni}$  ve  $f_i = f_{yeni}$ 
        end if
        if  $f_{yeni} \leq f_{av}$  then
            Ayarla  $x_{av} = x_{yeni}$  ve  $f_{av} = f_{yeni}$ 
        end if
    end for
end while Durdurma kriterleri karşılanırsa
Return  $x_{av}$ 

```

Şekil 6.4. BPA sözde kodu [165].

Şekil 6.5, bal porsuğu algoritmasının uygulanmasında yer alan prosedürel adımlarını göstermektedir. Algoritma, popülasyon büyüklüğünü tanımlayarak ve arama bölgesinin sınırlarını belirleyerek ve bal porsuğunun ilgili yerlerini tanımlayarak başlar. Daha sonra, Bal porsuklarının konumlarını ve av yoğunluğunun derecesini hesaplamak için ISL'yi kullanır. I_j ve α değerleri, maksimum tekrar sayısına ulaşılan kadar uygun denklemler uygulanarak belirlenir. Algoritmanın geri kalanında, bal porsuğunun konumu "kazma aşaması" ve "bal aşaması"nda değiştirilir. Nihayetinde prosedür, sırasıyla x_{av} ve f_{av}

olarak gösterilen değerlerin hesaplanmasıyla sona erer.



Şekil 6.5. BPA uygulama süreci.

6.2. GRİ KURT OPTİMİZASYONU ALGORİTMASI

Gri kurtlar, genellikle 5 ila 12 üyeden oluşan sosyal birimlerde ikamet etmeyi tercih etmektedirler. Gri kurtlar, sosyal grupları içinde güçlü bir hiyerarşi kurma konusunda dikkate değer bir özelliğe sahiptir. Grup hiyerarşisi dört farklı gruptan oluşur: alfa (α), beta (β), delta (δ) ve omega (ω). Çete bir kadın ve bir erkek tarafından yönetilir. Bu bireyler alfa olarak adlandırılır. Grup içinde alfalar öncelikle grubun dinlenme yerini, uyanma programını, avlanma faaliyetlerini ve diğer ilgili konuları belirleme sorumluluğunu üstlenir. Betalar grubun yapısında ikinci pozisyonda yer alır. Betalar, kolektif görevlerde alfaları destekleyen ast kurtlardır. Omega kurtlar sürü içinde kalan son gri kurtlardır. Sürü hiyerarşisinde alfa ve beta kurtların gerisinde ama omega kurtların üstünde yer alan gri kurt delta olarak adlandırılır. Bu kurtlar alfa ve betanın emirlerine uymakla yükümlüdür.

6.2.1. Matematiksel Model

GKO, doğadaki gri kurtların popülasyonunu ve davranışlarını optimizasyon süreci için bir temel olarak kullanan sezgisel bir algoritmadır [113]. Yöntemde alfa kurdu en uygun cevaptır, onu sırasıyla ikinci ve üçüncü en iyi çözümler olarak beta ve delta kurtları takip eder. Omega kurtlar ise potansiyel çözümleri sembolize etmektedir. Avlanma optimizasyon süreci alfa, beta ve delta tarafından yürütülmektedir. Süreç boyunca gri kurtlar konumlarını alfa, beta veya deltanın konumlarına göre ayarlar. Nihayetinde, avın yeri tespit edildikten sonra (en etkili çözüme ulaşıldığında), takibi sonuçlandırmak için yırtıcı bir saldırı gerçekleştirilir.

Avı Çevreleme

Gri kurtlar, avlanma aşaması boyunca kurbanlarının etrafını sarar. Denklem (6.11) ve Denklem (6.12) avın çevreleme davranışını tanımlayan matematiksel modeli sağlamaktadır.

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{x}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (6.11)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{x}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (6.12)$$

Denklemlerde; t mevcut iterasyonu, $\vec{A}$ ve $\vec{C}$ katsayı vektörlerini, $\vec{x}_p$ avın konum vektörünü ve $\vec{X}$ gri kurdun konum vektörünü temsil etmektedir. $\vec{A}$ ve $\vec{C}$ katsayı vektörleri Denklem (6.13) ve Denklem (6.14) kullanılarak belirlenir. $\vec{A}$ 'nın elemanları iterasyon

ilerledikçe doğrusal olarak 2'den 0'a düşerken, $\vec{r}_1$ ve $\vec{r}_2$ 0 ile 1 arasında değişen rastgele vektörlerdir.

$$\vec{A} = 2\vec{\alpha} \cdot \vec{r}_1 - \vec{\alpha} \quad (6.13)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (6.14)$$

Avlama

Gri kurtlar avlarının nerede olduğunu algılama ve onları çevreleme kapasitesine sahiptir. Avlanma prosedürü genellikle alfa tarafından yönetilir. Bununla birlikte, gerekli görüldüğünde beta ve delta kurtları da katılabilir. Başlangıçta, arama alanı içindeki en uygun konum hakkında bilgi eksikliği vardır. GKO prosedürü sırasında arama süreci rastgele bir şekilde başlar. Daha sonra her bir kurdun uygunluk değeri hedef fonksiyonuna göre belirlenir. En yüksek uygunluk değerine sahip üç bölge sırasıyla alfa, beta ve delta kurtları olarak etiketlenir. Alfa, beta ve delta kurtlarının yerleşimleri Denklem (6.15)-(6.21) kullanılarak revize edilir.

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}| \quad (6.15)$$

$$\vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}| \quad (6.16)$$

$$\vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \quad (6.17)$$

Burada, $\vec{X}_\alpha$, $\vec{X}_\beta$ ve $\vec{X}_\delta$ alfa, beta ve delta kurtlarının göreceli konumlarını ifade eder. En baskın üç kurdun sıralaması her iterasyonda sürekli olarak güncellenir.

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha) \quad (6.18)$$

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta) \quad (6.19)$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta) \quad (6.20)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (6.21)$$

Ava Saldırma

Bu adımda, $\vec{\alpha}$ büyüklüğü azalır, bu da $\vec{A}$ 'nın değişim aralığında bir azalmaya neden olur. $\vec{A}$ 'nın $[-1,1]$ aralığında rastgele değerler aldığı göz önüne alındığında, arama aracının sonraki konumu, mevcut konumundan avın konumuna kadar uzanan aralıkta yer alacaktır. GKO sözde kodu Şekil 6.6'da, akış diyagramı ise Şekil 6.7'de gösterilmiştir.

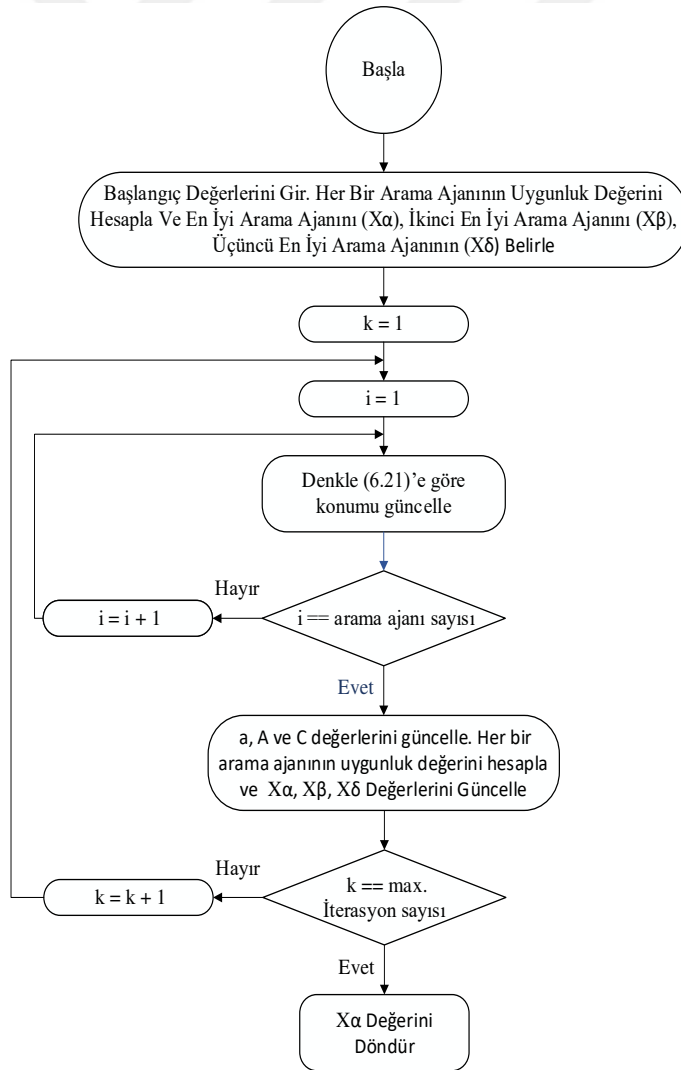
```

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

```

Şekil 6.6. GKO sözde kodu.

Şekil 6.7, GKO algoritması uygulanmasında yer alan prosedürel adımlarını göstermektedir.



Şekil 6.7. GKO uygulama süreci.

6.3. BALİNA OPTİMİZASYON ALGORİTMASI

Balina Optimizasyon Algoritması, kambur balinaların avlanma davranışını taklit eden metasezgisel bir algoritmadır. Kril ve küçük balık sürüleri kambur balinaların başlıca avlarıdır ve Balina Optimizasyon Algoritmasının geliştirilmesinde ana ilham kaynağı olmuştur. Kambur balinalar, sadece bu türe özgü olan ve "kabarcık ağı" olarak bilinen benzersiz avlanma teknikleri nedeniyle özellikle büyüleyicidir.

6.3.1. Matematiksel Model

Kambur balinalar avlanırken yukarı doğru daralan spiral bir harekete sahiptir.

Avın Kuşatılması

Kambur balinalar avlarını tespit etme ve çevreleme yeteneğine sahiptir. Balina Optimizasyon Algoritması, en uygun çözümü av veya ava en yakın çözüm olarak kabul eder. En uygun arama aracısı belirlendikten sonra, diğer arama araçlarının konumları en iyi arama aracısının konumuna göre ayarlanır. Bu davranış için Denklem (6.22) ve Denklem (6.23) kullanılmaktadır.

$$\vec{D} = |\vec{C} \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (6.22)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (6.23)$$

Denklem (6.22) ve Denklem (6.23)'te t değişkeni iterasyon sayısını, $\vec{A}$ ve $\vec{C}$ katsayı vektörünü, X^* mevcut en iyi konum vektörünü ve $\vec{X}$ ilgili arama ajanının konum vektörünü ifade etmektedir.

Her iterasyondan sonra, X^* 'in mevcut değerinden daha üstün bir çözüm olup olmadığı karşılaştırılır. Daha üstün bir çözüm bulunursa X^* değeri güncellenir.

$\vec{A}$ ve $\vec{C}$ katsayı vektörlerini hesaplamak için Denklem (6.24) ve Denklem (6.25) kullanılmaktadır.

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (6.24)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r} \quad (6.25)$$

$\vec{r} [0 \ 1]$ aralığında rastgele bir değerdir. $\vec{a}$ iterasyon süresince lineer olarak 2'den 0'a azalır.

Kabarcık-Ağ Metodu

Kambur balinaların kabarcık ağı davranışı iki farklı metodoloji kullanılarak matematiksel

olarak simüle edilmiştir.

Daralan Kuşatma Mekanizması

Bu sürecin nedeni Denklem (6.24)'deki $\vec{a}$ vektörünün azalan büyüklüğüdür. Eş zamanlı olarak, $\vec{A}$ 'nın olası değerlerindeki değişkenlik, iterasyon sırasında a 'nın 2'den 0'a düşmesiyle azalır ve $\vec{A}$ $[-a,a]$ aralığında kısıtlanır.

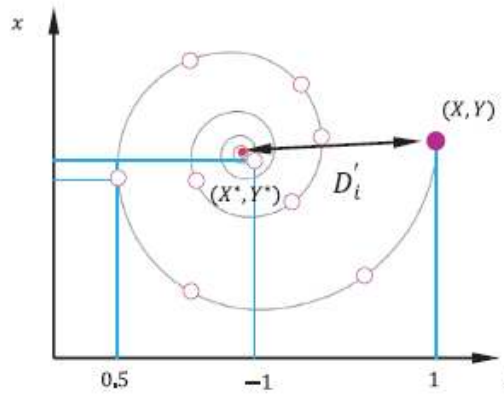
Spiral Hareket

Bu metodolojiye göre, Şekil 6.8'de görüldüğü gibi, balinanın (X,Y) ve balinanın (X^*, Y^*) koordinatları aralarındaki mesafeyi belirlemek için kullanılır. Daha sonra, kambur balinalar Denklem (6.26) kullanılarak sarmal hareket modellenir.

$$\vec{X}(t+1) = \vec{D} e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad (6.26)$$

Denklem (6.26)'da b sabiti spiral modelini oluşturmak için kullanılır. l değişkeni -1 ile 1 aralığında rastgele bir değeri temsil etmektedir. $\vec{D}$, balina ile av arasındaki mesafeyi gösterir ve Denklem (6.27) uyarınca şu ana kadar üretilen en iyi cevap olarak belirlenir.

$$\vec{D} = |\vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (6.27)$$



Şekil 6.8. Spiral hareket [112].

Kambur balinalar avlarının etrafında eş zamanlı olarak yüzmek için daralma ve spiral hareketin bir kombinasyonunu kullanırlar. Balina Optimizasyon Algoritmasında bu eşzamanlı hareketi temsil etmek için, daralma mekanizmasının veya spiral hareketin seçilme olasılığının %50 ile eşit olduğu varsayılır. Bunun matematiksel modeli Denklem (6.28) ile açıklanmaktadır.

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} & p < 0,5 \\ \vec{D} e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) & p \geq 0,5 \end{cases} \quad (6.28)$$

Denklem (6.28)'de p , 0 ile 1 arasında değerler alan rastgele bir değişkeni temsil eder.

Av Arama

Kabarcık-Ağ yaklaşımına ek olarak, kambur balinalar avlarını yakalamak için rastgele avlanma davranışı sergileyebilmektedir. Rastgele avlanma sırasında, referans balinadan uzaklaşmak için $\vec{A}$ vektörüne 1'den büyük veya -1'den küçük rastgele değerler atanır. Kabarcık-Ağ mekanizmasının aksine, Av Arama yöntemi, arama ajanının konumunu güncellemek için o $|\vec{A}| > 1$ vektörünün büyüklüğü rastgele bir arama ajanı ile kullanıldığında, Balina Optimizasyon Algoritmasının küresel bir arama yapmasına yol açar. Bu süreçte kullanılan matematiksel model Denklem (6.29) ve Denklem (6.30)'da gösterilmiştir.

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{Xrand} - \vec{X}| \quad (6.29)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{Xrand} - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (6.30)$$

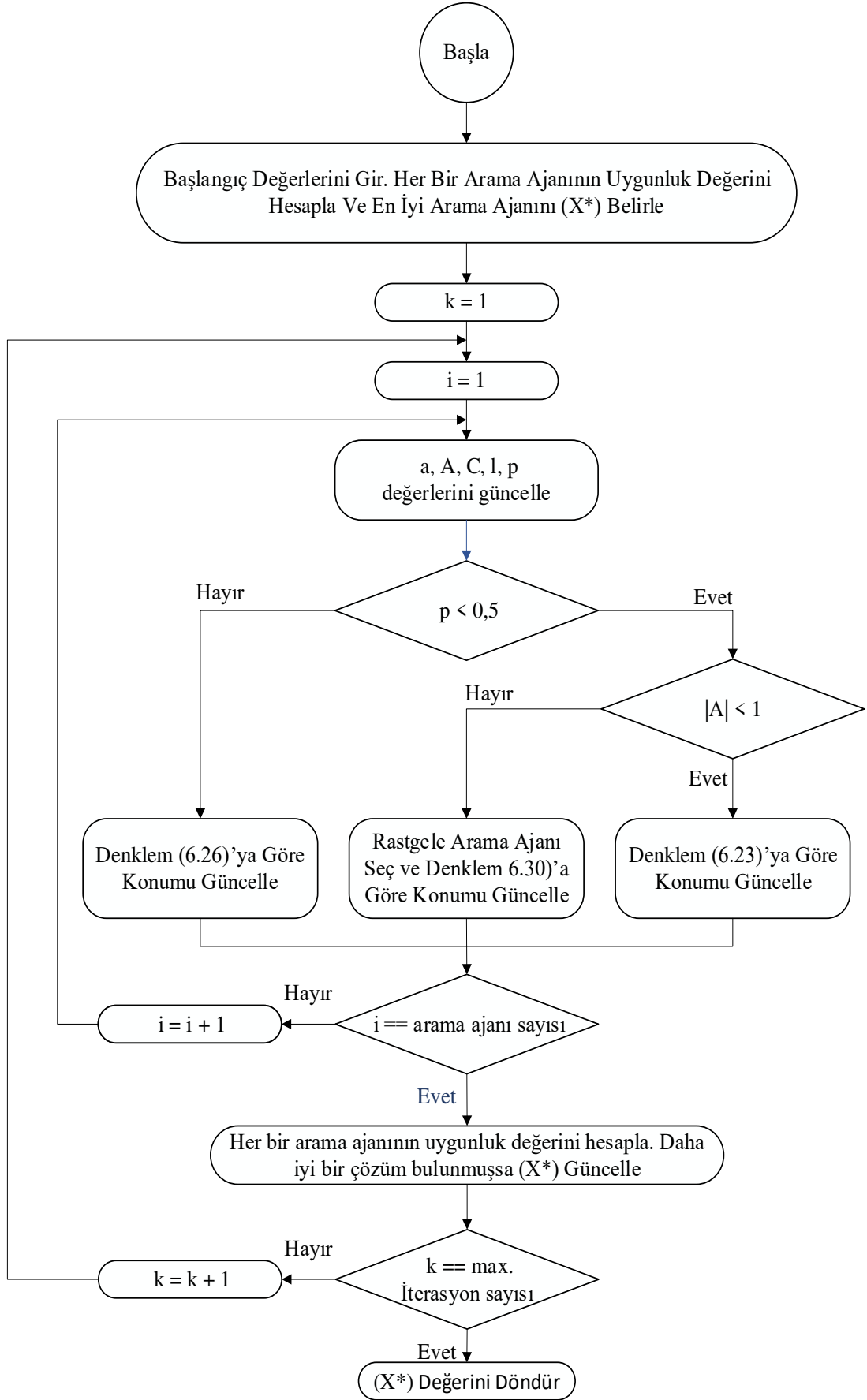
Balina Optimizasyon Algoritmasının için sözde kod Şekil 6.9'da verilmiştir.

```

a, A, C, l, p, maksimum iterasyon sayısı, popülasyon büyüklüğü değerlerinin ilk
atamasını yap ve popülasyonu oluştur.
for: her bir arama ajanı için
    Uygunluk değerini hesapla
end
X* = Bilinen en iyi arama ajanı
t=0
while ( t < maksimum iterasyon sayısı)
    for: her bir arama ajanı için
        Güncelle a, A, C, l, p
        if (p<0.5)
            if (|A| <1)
                Denklem (6.23)'e göre arama ajanının konumunu güncelle
            else if (|A| >=1)
                Rastgele bir arama ajanı seç (Xrand)
                Denklem (6.30)'a göre arama ajanının konumunu güncelle.
            end if
        else if ( p>=0.5)
            Denklem (6.26)'ya göre arama ajanının konumunu güncelle.
        end if
    end for
    Arama ajanının kısıt dışına çıkıp çıkmadığına bak çıkıyorsa sınır değerini ver
    Her bir arama ajanının uygunluk değerini hesapla, daha iyi bir çözüm varsa X*değerini
    güncelle.
    t = t + 1
end while
X* değerini döndür.

```

Şekil 6.9. BA sözde kodu.



Şekil 6.10. Balina optimizasyon algoritması akış diyagramı.

6.4. PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU

PSO, 1995 yılında Russell Eberhart ve James Kennedy tarafından tanıtılan sezgisel bir optimizasyon tekniğidir. Popülasyon tabanlı bir yaklaşımla çalışmaktadır.

PSO, kuş ve balık sürülerinin kolektif davranışlarından ilham alan bir hesaplama algoritmasıdır. PSO' da her bir birey parçacık olarak adlandırılır ve tüm parçacık grubu sürü olarak bilinir [114], [161].

Her bir parçacığın sonraki konumu, en uygun iki parçacık değeri kullanılarak hesaplanır. Yerel en iyi, sürüdeki bir parçacık tarafından belirli bir noktaya kadar elde edilen en yüksek değeri ifade eder. İkincisi ise sürüdeki tüm parçacıklar arasında en uygun değeri temsil eder.

Küresel en iyi olarak bilinen sürü içindeki en uygun değer en avantajlı olduğu kabul edilir. Esasen, bir parçacığın gelecekteki konumunu belirlerken, hem parçacığın kendi deneyimsel anlayışını (bilişsel bileşen) hem de çevresindeki parçacıklardan topladığı bilgileri (sosyal bileşen) dikkate alınır.

6.4.1. Parçacığın Konumunun Hesaplanması

PSO yönteminde sürü içindeki her bir parçacık Denklem (6.31)'de verildiği gibi hız V 'nin mevcut konumuna göre konumu vektör toplama kullanılarak belirlenir.

$$X_i(t + 1) = X_i(t) + V_i(t + 1) \quad (6.31)$$

Denklem (5.31)'deki i indeks değişkeni sürüdeki i 'inci parçacığı temsil eder ve l 'den sürünün büyüklüğüne kadar herhangi bir değer alabilir. $X_i(t)$ i . parçacığın t zamanındaki uzamsal konumunu temsil ederken $V_i(t + 1)$ i . parçacığın $t + 1$ zamanındaki hızını gösterir.

6.4.2. Parçacığın Hızının Hesaplanması

Parçacık Sürü Optimizasyonu tekniği, hızı hesaplamak için hem bilişsel hem de sosyal bileşenleri kullanır. p_i olarak kısaltılan bilişsel bileşen, her bir parçacığın optimum konum bilgisini temsil eder. Öte yandan, p_{best} olarak adlandırılan sosyal bileşen, her bir parçacığın optimum konum bilgilerinin karşılaştırılmasıyla elde edilen sürüdeki en iyi konumu temsil eder. PSO'da parçacık hızı Denklem (6.32)' deki gibi hesaplanır.

$$V_{i,j}(t+1) = V_{i,j}(t) + c_1 \cdot r_{1,j}(t) \cdot [p_{i,j}(t) - X_{i,j}(t)] \\ + c_2 \cdot r_{2,j}(t) \cdot [p_{best,j}(t) - X_{i,j}(t)] \quad (6.32)$$

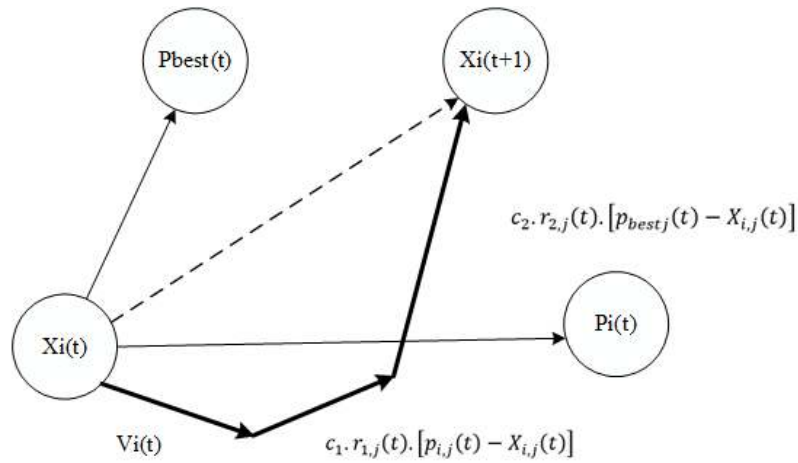
Denklem (6.32)'deki c_1 ve c_2 değerleri, formüldeki bilişsel bileşenin ve sosyal bileşenin göreceli önemini belirleyen pozitif katsayılardır. $r_{1,j}(t)$ ve $r_{2,j}(t)$, 0 ile 1 arasında tekdüze bir dağılım izleyen rastgele değişkenlerdir. Bu değişkenler, yöntemin stokastik karakteristiğini etkilemek için kullanılır.

Denklem (6.32)'deki p_i ve p_{best} değerleri hesaplanırken, i parçacığının f uygunluk fonksiyonundaki konumları değerlendirilir ve sonuçta parçacığın kalitesi (çözümü) belirlenir. Minimizasyon konuları bağlamında, i parçacığının f uygunluk fonksiyonundaki değerinin düşük olması, o parçacığın kalitesinin daha yüksek olduğunu gösterir. Denklem (6.33) minimizasyon sorunları bağlamında p_i değerini temsil ederken, Denklem (6.34) p_{best} değerini temsil etmektedir.

$$p_i(t+1) = \begin{cases} p_i(t), & f(X_i(t+1)) \geq f(X_i(t)) \\ X_i(t+1), & f(X_i(t+1)) < f(X_i(t)) \end{cases} \quad (6.33)$$

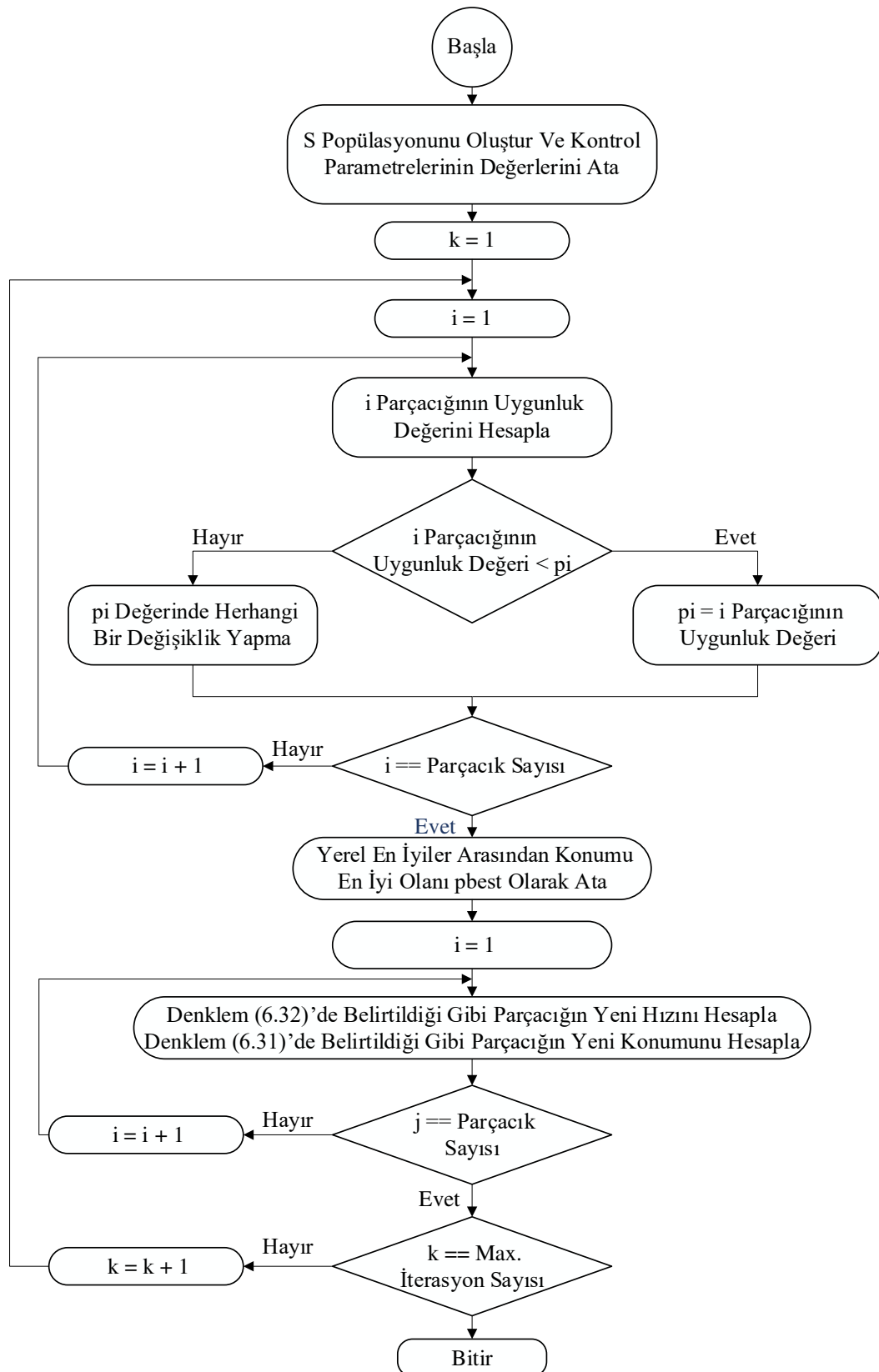
$$p_{best}(t) \in \{p_0(t), \dots, p_n(t)\} | f(p_{best}(t)) = \min\{f(p_0(t)), \dots, f(p_n(t))\} \quad (6.34)$$

Denklem (6.34)'te n değişkeni sürüdeki parçacıkların toplam miktarını ifade etmektedir. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu algoritmasına dayalı konum ayarlama prosedürü Şekil 6.11'de özetlenmiştir. Diyagram, parçacığın en iyi konumu (p_i) ve sürünün en iyi konumu (p_{best}) kullanılarak hesaplanan hız vektörünün parçacığın mevcut konumu ile birleştirilmesiyle belirlenen parçacığın güncellenmiş konumunu göstermektedir.



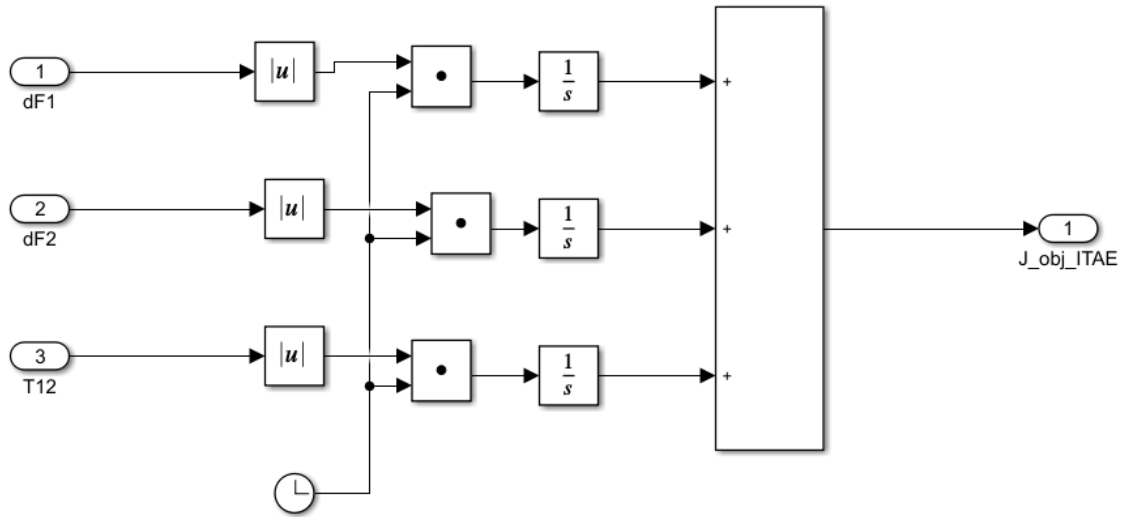
Şekil 6.11. Parçacık sürü optimizasyon algoritmasında konum güncelleme işlemi.

Şekil 6.12, Parçacık Sürüsü Optimizasyonu uygulanmasında yer alan prosedürel adımlarını göstermektedir.



Şekil 6.12. Parçacık sürü optimizasyon algoritması akış diyagramı.

Şekil 7.2, Alan-1 ve Alan-2'deki frekans ve bağlantı hattı güç değişimindeki toplam salınımları ortadan kaldırma hedefini göstermektedir. Amaç fonksiyonu ITAE bu amaca uygun şekilde tasarlanmıştır. Popülasyon içindeki her potansiyel çözümün uygunluk değerleri, Denklem (5.4)'te belirtildiği gibi amaç fonksiyonu ITAE'ye göre hesaplanır. Potansiyel çözümler elde ettikleri uygunluk değerlerine göre derecelendirilir. Sistem frekansındaki salınımları ve bağlantı hattı güç değişimini azaltan optimum kontrolör parametreleri hesaplanır.



Şekil 7.2. ITAE amaç fonksiyonu blok diyagramı.

MATLAB/SIMULINK ortamında modelleme işlemi tamamlandıktan sonra ilgili algoritma Şekil 7.3'de gösterildiği gibi MATLAB ortamında m.file dosyasında oluşturulur. Tasarlanan model ve algoritma birlikte çalıştırılarak optimizasyon süreci başlatılır.

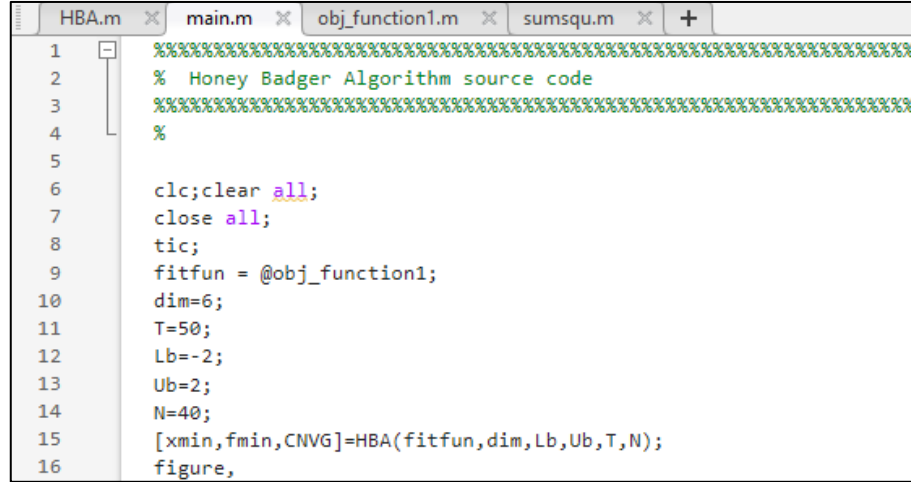
```

HBA.m  main.m  obj_function1.m  sumsqu.m  +
1  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2  % Honey Badger Algorithm source code
3  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
4  %
5  function [Xprey, Food_Score,CNVG] = HBA(objfunc, dim,lb,ub,tmax,N)
6  beta      = 6;      % the ability of HB to get the food Eq.(4)
7  C         = 2;      %constant in Eq. (3)
8  vec_flag=[1,-1];
9  %initialization
10 X=initialization(N,dim,ub,lb);
11 %Evaluation
12 fitness = fun_calcobjfunc(objfunc, X);
13 [GYbest, gbest] = min(fitness);

```

Şekil 7.3. Algoritmanın m.file dosyasında oluşturulması.

Popülasyon büyüklüğü, iterasyon sayısı, değişken sayısı ve kontrolör kazançlarının alt ve üst sınırlarını içeren optimizasyon parametreleri Şekil 7.4'te sunulan bilgilere göre belirlenir. Bu çalışmada "değişken sayısı" terimi, yük frekansı kontrol problemi için optimizasyon gerektiren kontrolör parametrelerinin miktarını ifade etmektedir.



```

1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2 % Honey Badger Algorithm source code
3 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
4 %
5
6 clc;clear all;
7 close all;
8 tic;
9 fitfun = @obj_function1;
10 dim=6;
11 T=50;
12 Lb=-2;
13 Ub=2;
14 N=40;
15 [xmin,fmin,CNVG]=HBA(fitfun,dim,Lb,Ub,T,N);
16 figure,

```

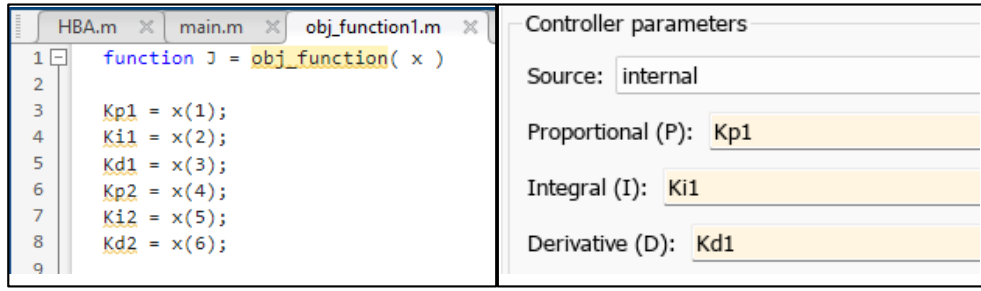
Şekil 7.4. Optimizasyon parametrelerinin belirlenmesi.

Şekil 7.1’de verilen örnek güç sisteminde 2 adet kontrolör olup her kontrolör için 3’er adet olmak üzere toplamda 6 adet değişken ($Kp_1, Ki_1, Kd_1, Kp_2, Ki_2, Kd_2$) bulunmaktadır. Optimizasyon probleminde popülasyon, olası optimal kontrolör kazançlarından meydana gelmektedir. Popülasyon büyüklüğü, iterasyon sayısı ve kontrol kazançlarının alt ve üst sınırları literatürdeki çalışmalarla karşılaştırmayı sağlıklı yapmak için literatürdeki çalışmalarla aynı değerler ile modelleme yapılmıştır. Buna göre iterasyon sayısı 50, popülasyon sayısı 40 ve min(ITAE) değeri için kontrolör kazançlarının alt ve üst sınırları Denklem (7.1) ve Denklem (7.2)’de gösterilmiştir.

$$\min (ITAE) = \int_0^T \{|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + |\Delta P_{tie}|\} \cdot t \cdot dt \quad (7.1)$$

$$\begin{cases} -2 \leq K_{p1,2} \leq 2 \\ -2 \leq K_{i1,2} \leq 2 \\ -2 \leq K_{d1,2} \leq 2 \end{cases} \quad (7.2)$$

Şekil 7.5, optimizasyonun çalışabilmesi için modellenen güç sistemindeki kontrolör değişkenlerinin SIMULINK programındaki kontrolörlere algoritma içerisinde alacağı değerlerin atanması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 7.5. Değişkenlerin belirlenmesi ve MATLAB-SIMULINK bağlantısı.

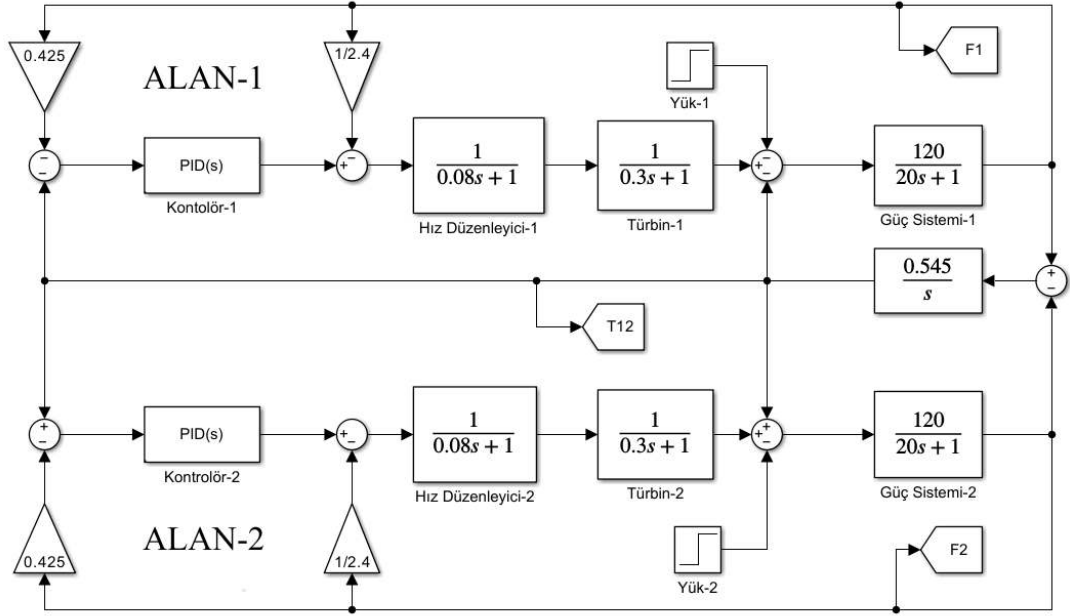
Optimizasyon sürecinin ilk aşamasında, en iyi sonucu veren kontrolör kazançları hakkında ön bilgi olmadığı için popülasyon rastgele üretilir. Bu nedenle, belirtilen popülasyon büyüklüğüne eşit sayıda kontrolör kazancı içeren bir çözüm kümesi oluşturulur.

Her bir optimizasyon tekniğinin çözüm aşamaları kullanılarak, her bir iterasyonda en optimum sonucu veren kontrolör kazançları belirlenir. Bu kazançlar daha sonra önceki uyum değerleri ile karşılaştırılır. Sistem frekansındaki salınımları ve bağlantı hattı güç değişimini azaltan en uygun çözüm belirlenir.

Belirlenen iterasyon sayısı tamamlandığında ve/veya durdurma gereksinimi karşılandığında, kontrolör kazançları optimize edilmiş kazançlar olarak belirlenir ve optimizasyon süreci sonlandırılır.

7.2. TEST SİSTEMİ-1 İÇİN OPTİMİZASYON SONUÇLARI

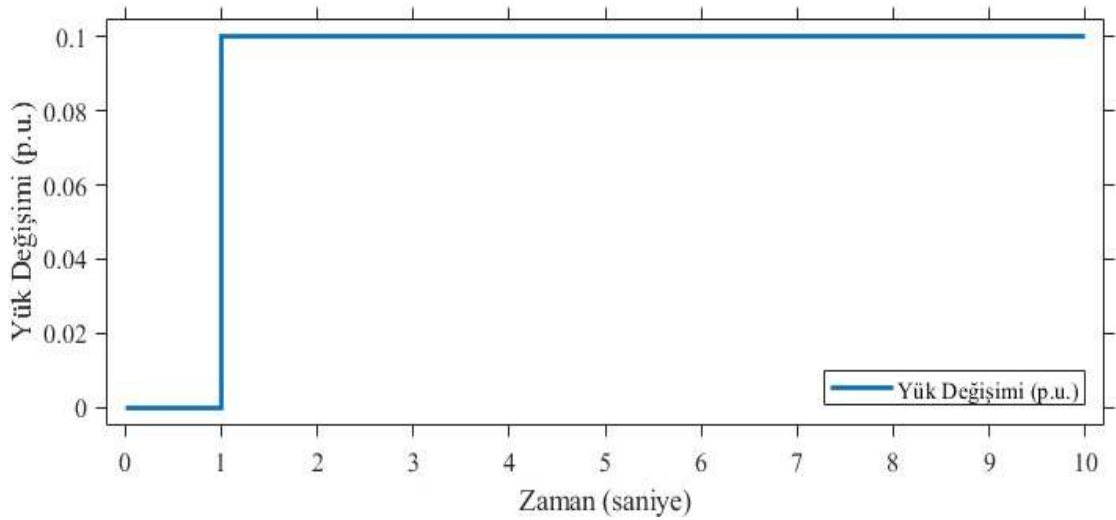
Test Modeli-1 Şekil 7.6’da gösterildiği gibi iki alandan oluşan ara ısıtmasız bir termik güç sistemidir. Literatürde sıklıkla başvuru bir modeldir ve mevcut optimizasyon tekniğinin etkinliğini değerlendirmek için güvenilir bir çerçeve görevi görmektedir. Popülasyon büyüklüğü, iterasyon sayısı ve kontrol kazançlarının alt ve üst sınırları literatürdeki mevcut çalışmalarla aynı değerler kullanılarak modellenilecektir. Bu, literatürle adil bir karşılaştırma yapılmasına ve algoritma etkinliğinin tutarlı koşullar altında değerlendirilmesine olanak sağlayacaktır.



Şekil 7.6. Test Sistemi-1 SIMULINK modeli.

7.2.1. Test Sistemi-1 Senaryo-1: Alan-1'de Yük Değişimi

Şekil 7.7'de gösterildiği gibi, Şekil 7.6'daki Test Sistemi-1 güç sisteminde Alan-1'de 1. saniyede 0,1 pu artan yük değişimi için sistem performansı incelenmiştir.



Şekil 7.7. Test Sistemi-1 Senaryo-1 Alan-1 yük değişimi.

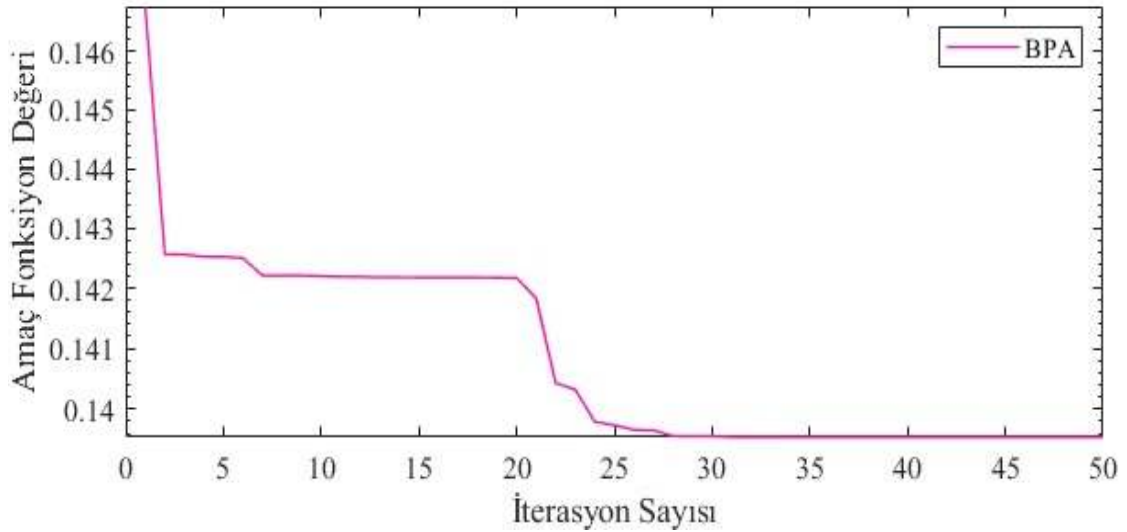
Şekil 7.6'daki Test Sistemi-1 güç sisteminde Alan-1'de gerçekleşen yük değişimi durumunda BPA, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemleri için optimum kontrol parametre değerleri Çizelge 7.1'de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Test Sistemi-1 Senaryo-1 için optimum kontrol parametre değerleri.

Optimizasyon Tekniği	Kp_1	Ki_1	Kd_1	Kp_2	Ki_2	Kd_2	Amaç Fonksiyon Değeri
BPA: PID	2,0000	2,0000	0,5226	-2,0000	0,1812	2,0000	0,1395
GKO: PID	1,2607	2,0000	0,4541	-0,5935	0,0415	1,9225	0,2726
PSO: PID	1,2342	2,0000	0,4487	0,8956	-0,0785	1,8589	0,2742
BA: PID	1,4757	2,0000	0,4095	2,0000	1,3072	1,1968	0,2818

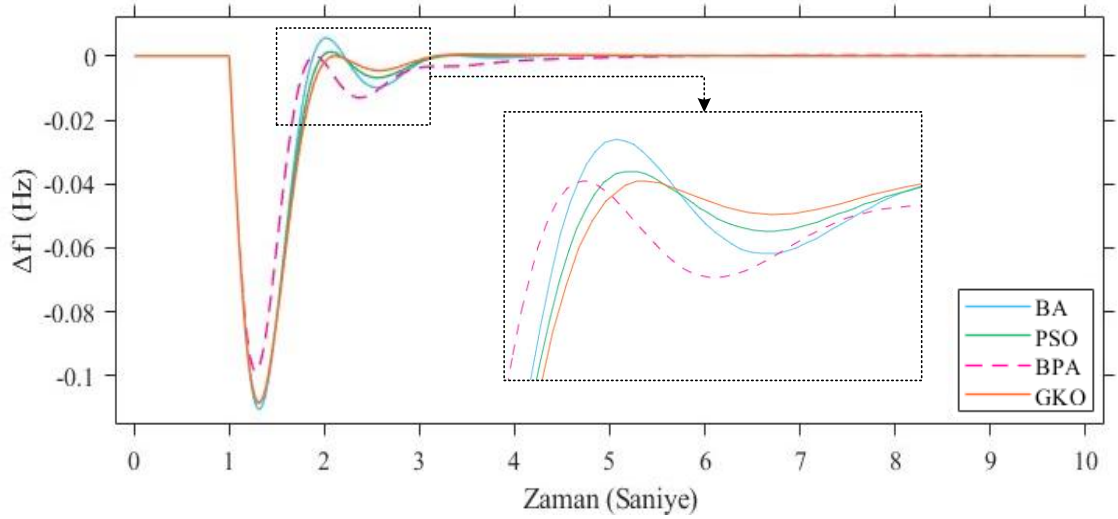
Amaç fonksiyonu değerinin iterasyon sayısına bağlı grafiği Test Sistemi-1 Senaryo-1 için Şekil 7.8’de verilmiştir.

Test Sistemi-1 güç sistemi için Alan-1’de gerçekleşen 0,1 pu artan yük değişimi durumunda BPA, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemleri için Δf_1 , Δf_2 ve ΔP_{tie} açısından sistem performansları Şekil 7.9, Şekil 7.10 ve Şekil 7.11’de verilmiştir.



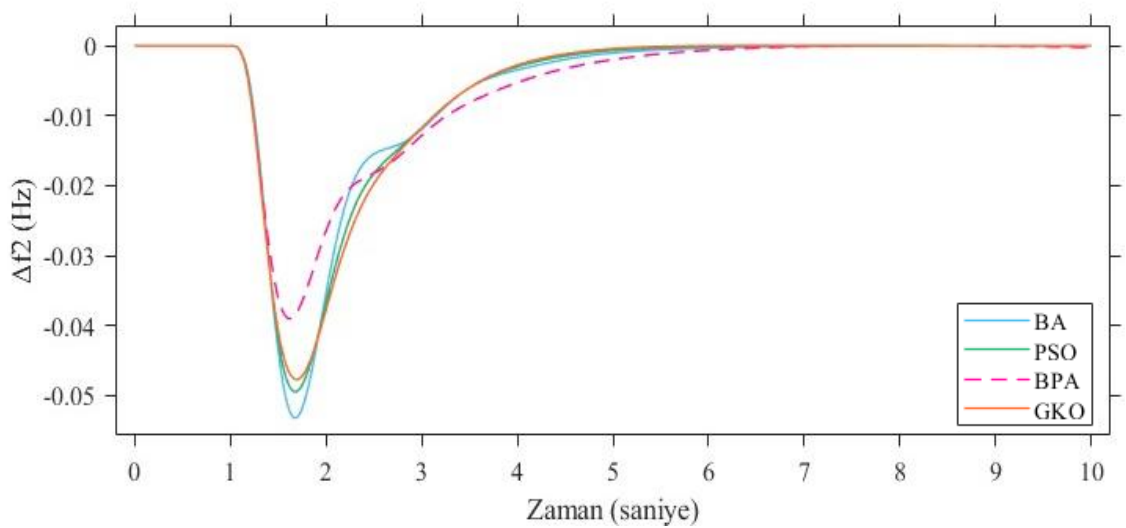
Şekil 7.8. Test Sistemi-1 Senaryo-1 için BPA optimizasyon yöntemine göre amaç fonksiyon değeri.

Test Sistemi-1 Senaryo-1 için min(ITAE) değeri BPA için 0,1395 olarak bulunmuş olup BPA; BA’dan, PSO’dan ve GKO’dan daha iyi performans göstermektedir.



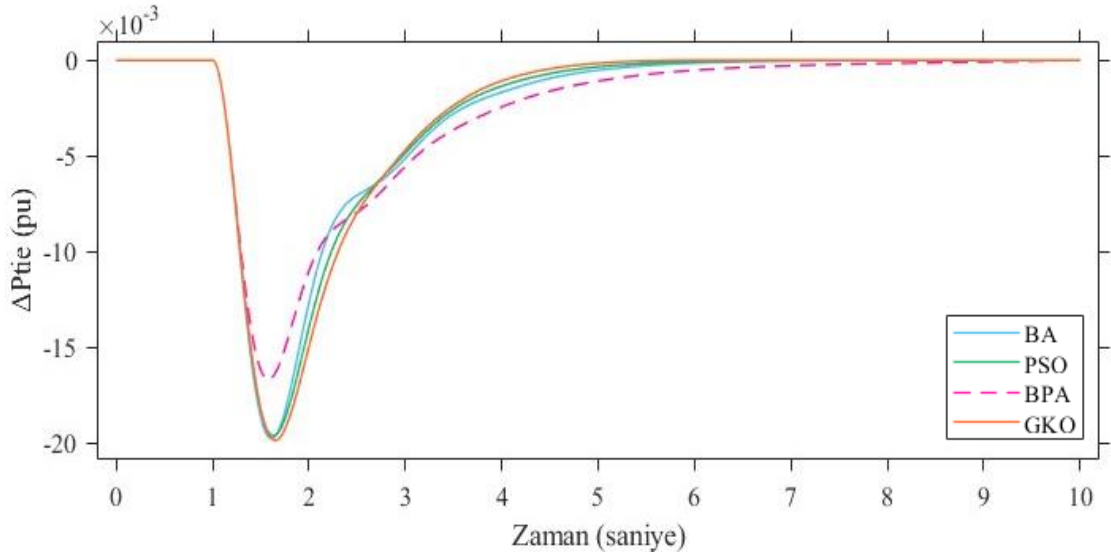
Şekil 7.9. Test Sistemi-1 Senaryo-1 Alan-1'deki frekans değişimi.

Test Sistemi-1 Senaryo-1 Alan-1 için sistem performans değerleri incelendiğinde, maksimum aşma değeri BPA için 0,001 Hz, BA için 0,006 Hz, PSO için 0,002 Hz, GKO için 0,002 Hz olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan %83, PSO'dan %50, GKO'dan %50 maksimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermektedir. Minimum aşma değeri BPA için -0,099 Hz, BA için -0,110 Hz, PSO için -0,109 Hz, GKO için -0,108 Hz olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan %10, PSO'dan %9,2, GKO'dan %8,3 minimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermektedir. Frekans değişimlerinin sönümlenmesi için geçen süre BPA için 1,84 sn, GKO için 1,95 sn, PSO için 1,98 sn, BA için 2,02 sn olarak görülmektedir.



Şekil 7.10. Test Sistemi-1 Senaryo-1 Alan-2'deki frekans değişimi.

Test Sistemi-1 Senaryo-1 Alan-2 için sistem performans değerleri incelendiğinde minimum aşma değeri BPA için -0,039 Hz, BA için -0,053 Hz, PSO için -0,049 Hz, GKO için -0,047 Hz olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan %26,4, PSO'dan %20,4, GKO'dan %17 minimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermektedir. Frekans değişimlerinin sönümlenmesi için geçen süre BPA için 2,37 sn, GKO için 2,98 sn, PSO için 3,01 sn, BA için 2,68 sn olarak görülmektedir.



Şekil 7.11. Test Sistemi-1 Senaryo-1 Bağlantı hattı güç değişimi.

Test Sistemi-1 senaryo-1 bağlantı hattı güç değişimi için sistem performans değerleri incelendiğinde minimum aşma değeri BPA için -0,0167 pu.MW, BA için -0,0198 pu.MW, PSO için -0,0196 pu.MW, GKO için -0,0199 pu.MW olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan %15,6, PSO'dan %14,7, GKO'dan %16,1 minimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermektedir. Güç değişimlerinin sönümlenmesi için geçen süre BPA için 2,32 sn, GKO için 2,92 sn, PSO için 2,96 sn, BA için 2,57 sn olarak görülmektedir.

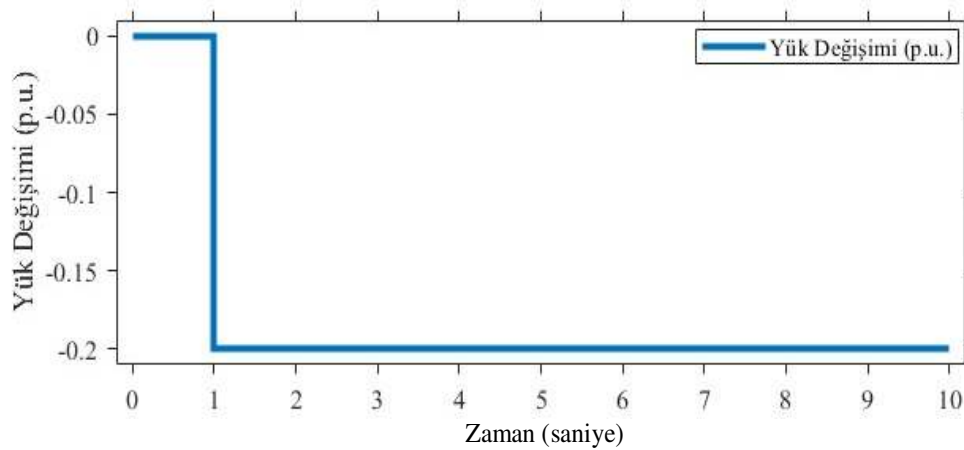
Test Sistemi-1 Senaryo-1'de; BPA, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemleri için amaç fonksiyon değeri ve sistem oturma sürelerinin literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılması Çizelge 7.2' de verilmiştir.

Çizelge 7.2. Test Sistemi-1 Senaryo-1 için amaç fonksiyon değeri ve sistem oturma süreleri.

Optimizasyon Tekniği	Amaç Fonksiyon Değeri	Oturma Süresi (s)		
		Δf_1	Δf_2	ΔP_{tie}
BPA: PID	0,1395	1,84	2,37	2,32
GKO: PID	0,2726	1,95	2,98	2,92
PSO: PID	0,2742	1,98	3,01	2,96
BA: PID	0,2818	2,02	2,68	2,57
PSO: Fuzzy PI [162]	0,4470	5,13	6,22	4,83
PS: Fuzzy PI [162]	0,6334	6,05	7,10	5,56
hPSO-PS: Fuzzy PI [162]	0,1438	2,26	3,74	2,94
DE: PI [163]	0,9911	8,96	8,16	5,75
BFOA: PI [163]	1,7978	5,52	7,09	6,35
GA: PI [163]	2,7475	10,59	11,39	9,37
Geleneksel PI [163]	3,7568	45,00	45,00	28,00
hBFOA-PSO: PI [164]	1,1865	7,39	7,65	5,73
PSO: PI [164]	1,2142	7,37	7,85	5,00

7.2.2. Test Sistemi-1 Senaryo-2: Alan-2’de Yük Değişimi

Şekil 7.12’de gösterildiği gibi, Şekil 7.6’daki Test Sistemi-1 güç sisteminde Alan-2’de 1. saniyede 0,2 pu azalan yük değişimi için sistem performansı incelenmiştir.



Şekil 7.12. Test Sistemi-1 Senaryo-2 Alan-2 yük değişimi.

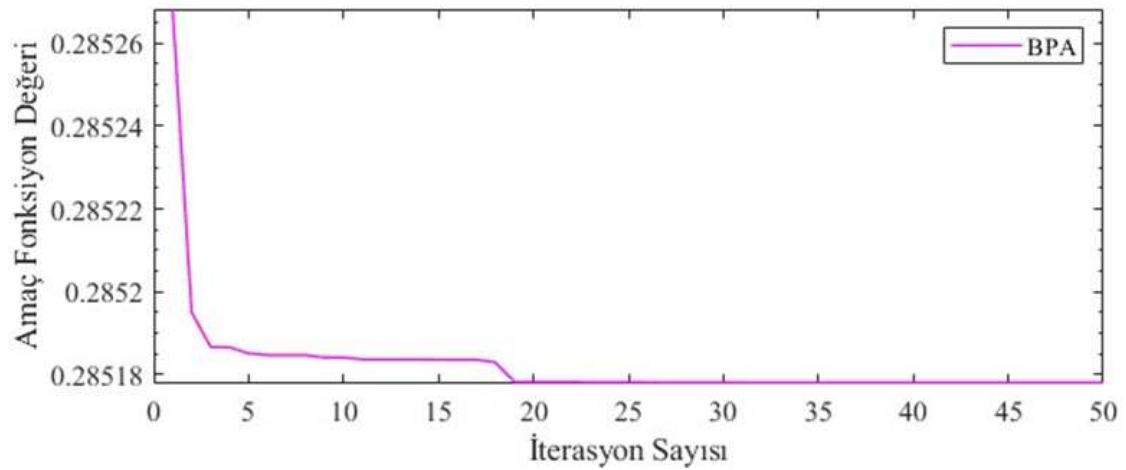
Şekil 7.6'daki Test Sistemi-1 güç sisteminde Alan-2'de gerçekleşen yük değişimi durumunda BPA, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemleri için optimum kontrol parametre değerleri Çizelge 7.3'te verilmiştir.

Çizelge 7.3. Test Sistemi-1 Senaryo-2 için optimum kontrol parametre değerleri.

Optimizasyon Tekniği	Kp_1	Ki_1	Kd_1	Kp_2	Ki_2	Kd_2	Amaç Fonksiyon Değeri
BPA: PID	0,5724	1,0243	2,0000	2,0000	2,0000	0,5110	0,2850
PSO: PID	-0,8517	0,0840	1,0306	1,1500	2,0000	0,4570	0,5190
GWO: PID	0,2941	0,0556	2,0000	1,2650	2,0000	0,4500	0,5495
BA: PID	2,0000	2,0000	2,0000	1,2080	2,0000	0,4453	0,5518

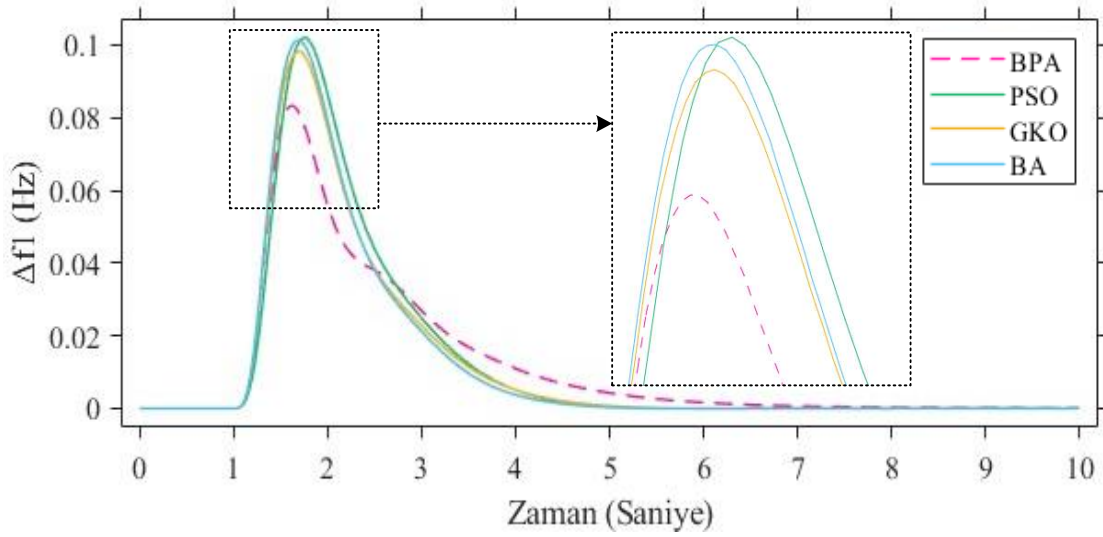
Amaç fonksiyonu değerinin iterasyon sayısına bağlı grafiği Test Sistemi-1 Senaryo-2 için Şekil 7.13'te verilmiştir.

Test Sistemi-1 güç sistemi için Alan-2'de gerçekleşen 0,2 pu azalan yük değişimi durumunda BPA, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemleri için Δf_1 , Δf_2 ve ΔP_{tie} açısından sistem performansları Şekil 7.14, Şekil 7.15 ve Şekil 7.16'da verilmiştir.



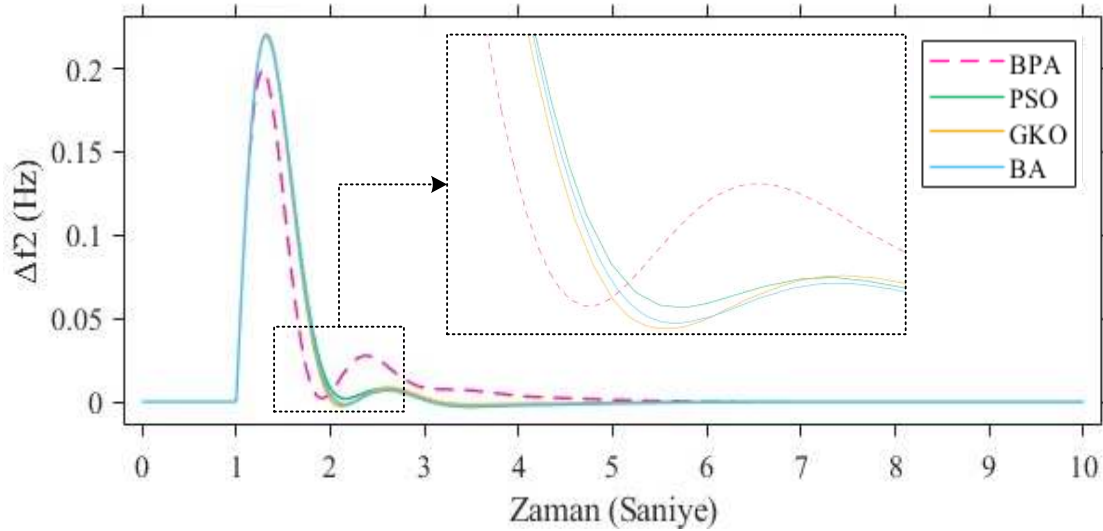
Şekil 7.13. Test Sistemi-1 Senaryo-2 BPA optimizasyon yöntemine göre amaç fonksiyon değeri.

Test Sistemi-1 Senaryo-2 için min(ITAE) değeri BPA için 0,2850 olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan, PSO'dan ve GKO'dan daha iyi performans göstermektedir.



Şekil 7.14. Test Sistemi-1 Senaryo-2 Alan-1'deki frekans değişimi.

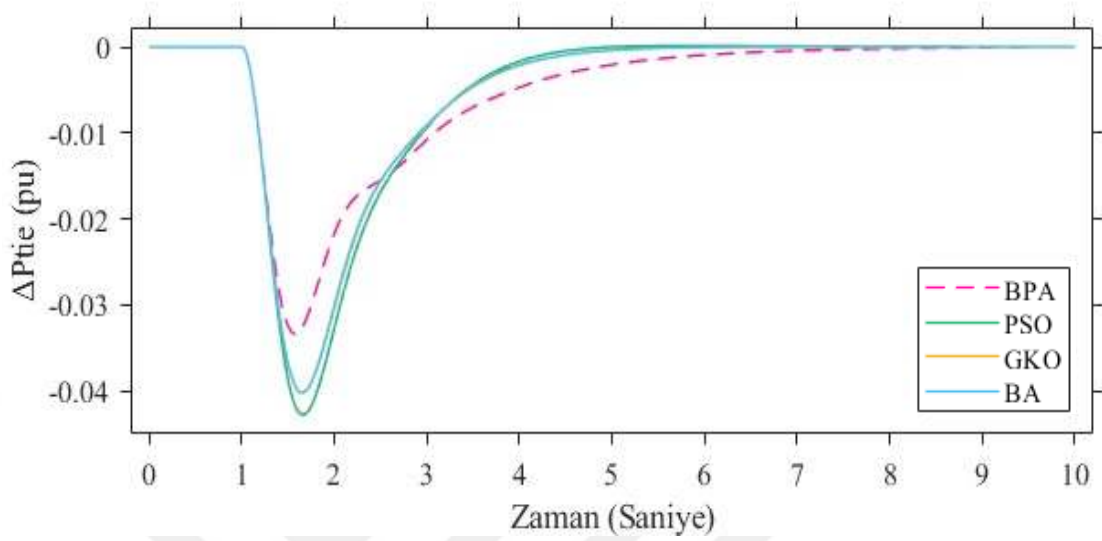
Test Sistemi-1 Senaryo-2 Alan-1 için sistem performans değerleri incelendiğinde maksimum aşma değeri BPA için 0,083 Hz, BA için 0,101 Hz, PSO için 0,103 Hz, GKO için 0,098 Hz olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan %17,8, PSO'dan %19,4, GKO'dan %15,3 maksimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermektedir. Frekans değişimlerinin sönümlenmesi için geçen süre BPA için 2,87 sn, GKO için 2,74 sn, PSO için 2,84 sn, BA için 2,81 sn olarak görülmektedir.



Şekil 7.15. Test Sistemi-1 Senaryo-2 Alan-2'deki frekans değişimi.

Test Sistemi-1 Senaryo-2 Alan-2 için sistem performans değerleri incelendiğinde, maksimum aşma değeri BPA için 0,199 Hz, BA için 0,220 Hz, PSO için 0,221 Hz, GKO için 0,219 Hz olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan %9,5, PSO'dan %9,9, GKO'dan %9,1

maksimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermektedir. Frekans değişimlerinin sönümlenmesi için geçen süre BPA için 1,71 sn, GKO için 1,85 sn, PSO için 1,90 sn, BA için 1,89 sn olarak görülmektedir.

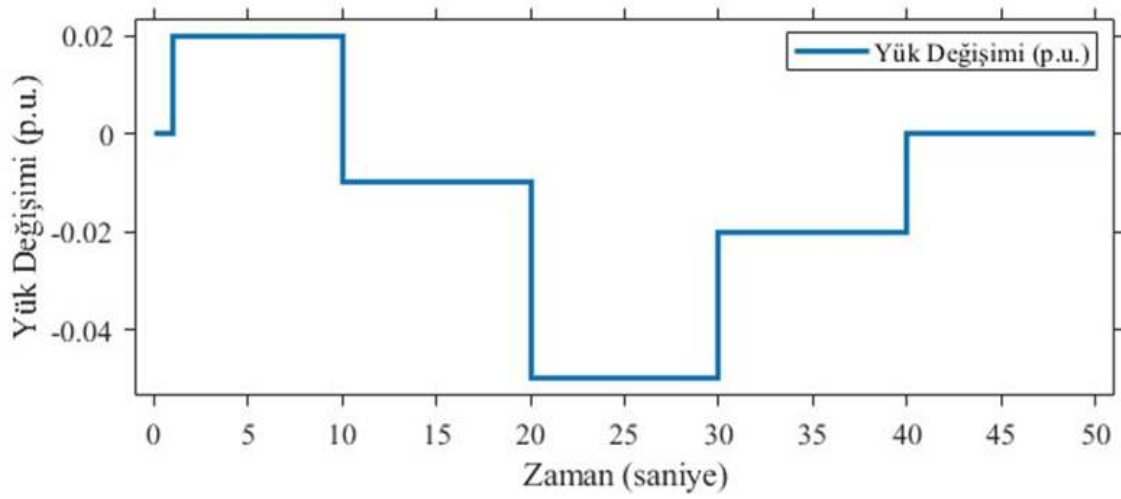


Şekil 7.16. Test Sistemi-1 Senaryo-2 Bağlantı hattı güç değişimi.

Test Sistemi-1 Senaryo-2 bağlantı hattı güç değişimi için sistem performans değerleri incelendiğinde minimum aşma değeri BPA için -0,0333 pu.MW, BA için -0,0401 pu.MW, PSO için -0,0428 pu.MW, GKO için -0,0402 pu.MW olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan %16,9, PSO'dan %22,1, GKO'dan %17,1 minimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermiştir. Güç değişimlerinin sönümlenmesi için geçen süre BPA için 2,45 sn, GKO için 2,54sn, PSO için 2,63 sn, BA için 2,56 sn olarak görülmektedir.

7.2.3. Test Sistemi-1 Senaryo-3: Alan-1'de Rastgele Yük Değişimi

Şekil 7.17'de gösterildiği gibi, Şekil 7.6'daki Test Sistemi-1 güç sisteminde Alan-1'de 50 saniye boyunca rastgele yük değişimi için sistem performansı incelenmiştir.



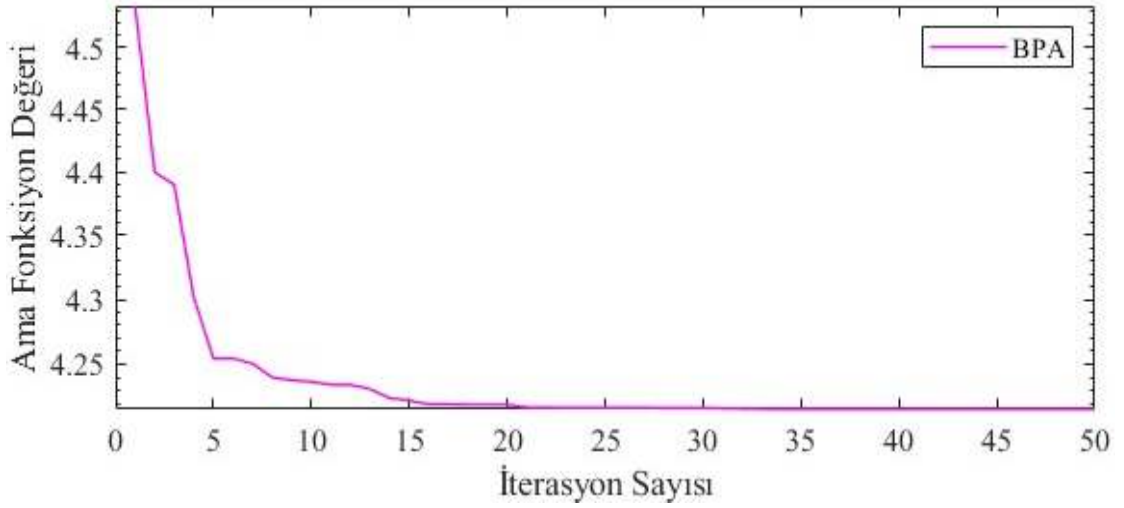
Şekil 7.17. Test Sistemi-1 Senaryo-3 Alan-1 rastgele yük değişimi.

Şekil 7.6'daki Test Sistemi-1 güç sisteminde Alan-1'de gerçekleşen yük değişimi durumunda BPA, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemleri için optimum kontrol parametre değerleri Çizelge 7.4' te verilmiştir.

Çizelge 7.4. Test Sistemi-1 Senaryo-3 için optimum kontrol parametre değerleri.

Optimizasyon Tekniği	Kp_1	Ki_1	Kd_1	Kp_2	Ki_2	Kd_2	Amaç Fonksiyon Değeri
BPA: PID	1,5459	2,0000	0,4496	2,0000	2,0000	0,7154	4,2057
PSO: PID	1,5008	2,0000	0,4671	-0,1322	-0,0739	1,9805	4,2223
GKO: PID	1,6095	2,0000	0,4725	0,9383	0,2820	1,1807	4,2292
BA: PID	2,0000	2,0000	0,5030	2,0000	1,8545	1,3045	4,2589

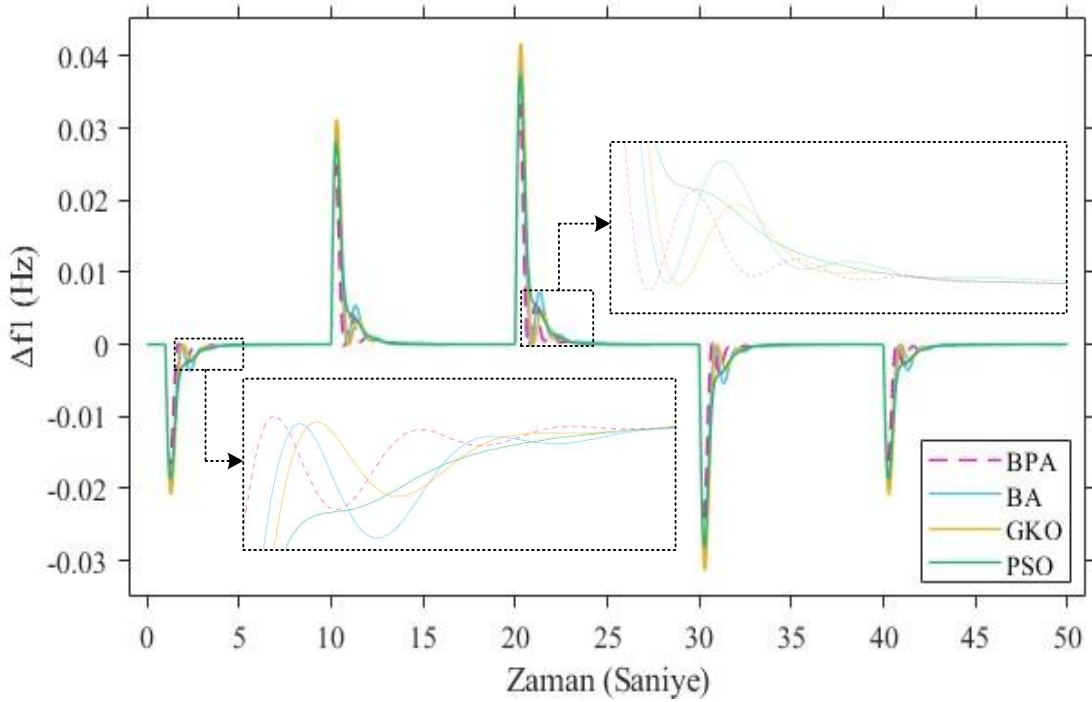
Amaç fonksiyonu değerinin iterasyon sayısına bağlı grafiği test Sistemi-1 Senaryo-3 için Şekil 7.18'te verilmiştir.



Şekil 7.18. Test Sistemi-1 Senaryo-3 BPA optimizasyon yöntemine göre amaç fonksiyon değeri.

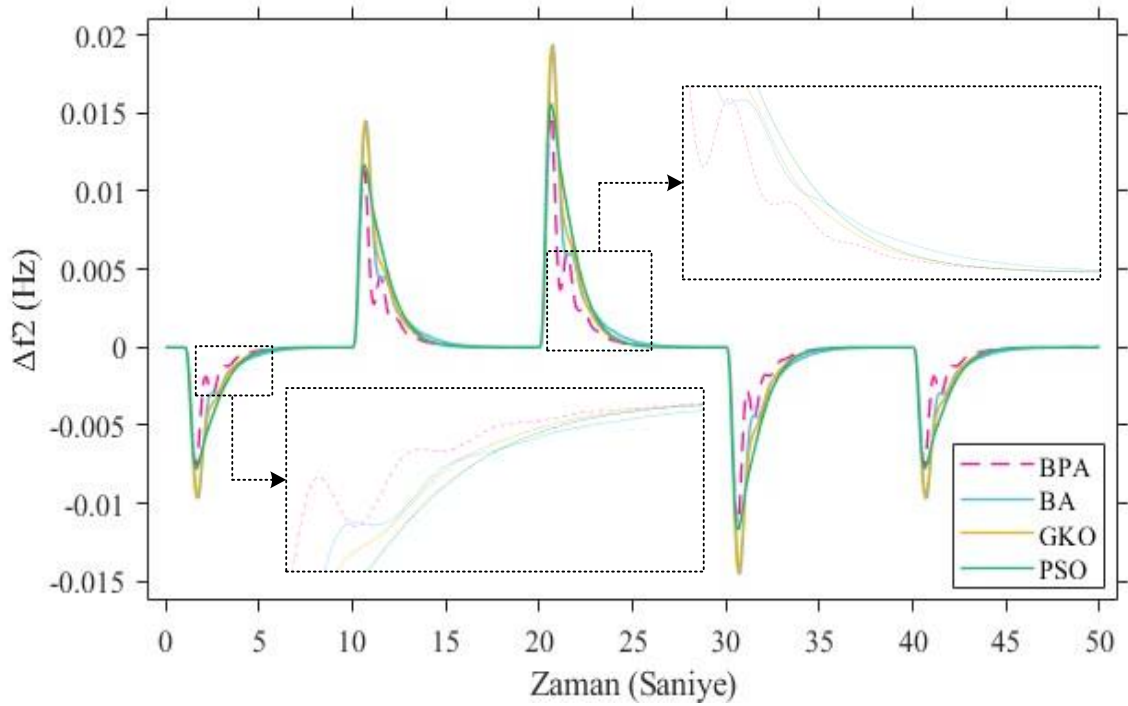
Test Sistemi-1 Senaryo-3 için min(ITAE) değeri BPA için 4,2057 olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan, PSO'dan ve GKO'dan daha iyi performans göstermektedir.

Test Sistemi-1 güç sisteminde Alan-1'de 50 saniye boyunca rastgele yük değişimi durumunda BPA, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemleri için Δf_1 , Δf_2 ve ΔP_{tie} açısından sistem performansları Şekil 7.19, Şekil 7.20 ve Şekil 7.21'de verilmiştir.



Şekil 7.19. Test Sistemi-1 Senaryo-3 Alan-1'deki frekans değişimi.

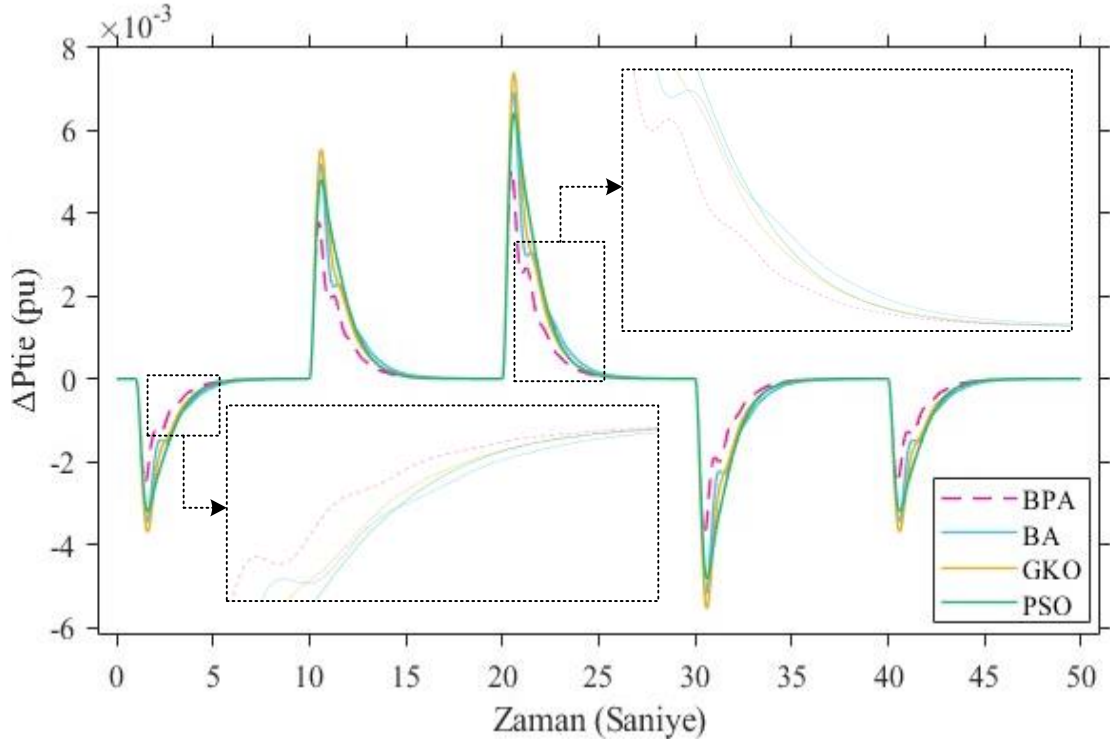
Test Sistemi-1 Senaryo-3 Alan-1 için sistem performans değerleri incelendiğinde, en büyük yük değişimi 20. saniyedeki yük değişimi olup bu yük değişimindeki maksimum aşma değeri BPA için 0,0333 Hz, BA için 0,0396 Hz, PSO için 0,0374 Hz, GKO için 0,0418 Hz olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan %15,9, PSO'dan %10,9, GKO'dan %20,3 maksimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermiştir. Frekans değişimlerinin sönümlenmesi için geçen süre en büyük yük değişimi olan 20. Saniyedeki yük değişimi için BPA için 1,21 sn, GKO için 1,67 sn, PSO için 1,66 sn, BA için 1,79 sn olarak görülmektedir. Test Sistemi-1 Senaryo-3 Alan-1'de 50 saniye süresince olan yük değişimi incelendiğinde BPA optimizasyon yöntemi, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemlerine göre sistem frekansında meydana gelen dalgalanmaların aşma değerlerini daha düşük tutarak daha iyi performans gösterdiği ve bu aşma değerlerini daha kısa sürede sönümlendiği görülmektedir.



Şekil 7.20. Test Sistemi-1 Senaryo-3 Alan-2'deki frekans değişimi.

Test Sistemi-1 Senaryo-3 Alan-2 için sistem performans değerleri incelendiğinde, en büyük yük değişimi 20. saniyedeki yük değişimi olup bu yük değişimindeki maksimum aşma değeri BPA için 0,0151 Hz, BA için 0,0194 Hz, PSO için 0,0156 Hz, GKO için 0,0192 Hz olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan %22,1, PSO'dan %3,2, GKO'dan %21,3 maksimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermiştir. Frekans değişimlerinin sönümlenmesi için geçen süre en büyük yük değişimi olan 20. Saniyedeki yük değişimi

için BPA için 1,23 sn, GKO için 2,45 sn, PSO için 2,78 sn, BA için 2,91 sn olarak görülmektedir. Test Sistemi-1 Senaryo-3 Alan-2’de 50 saniye süresince olan yük değişimi incelendiğinde BPA optimizasyon yöntemi, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemlerine göre sistem frekansında meydana gelen dalgalanmaların aşma değerlerini daha düşük tutarak daha iyi performans gösterdiği ve bu aşma değerlerini daha kısa sürede sönümlendiği görülmektedir.



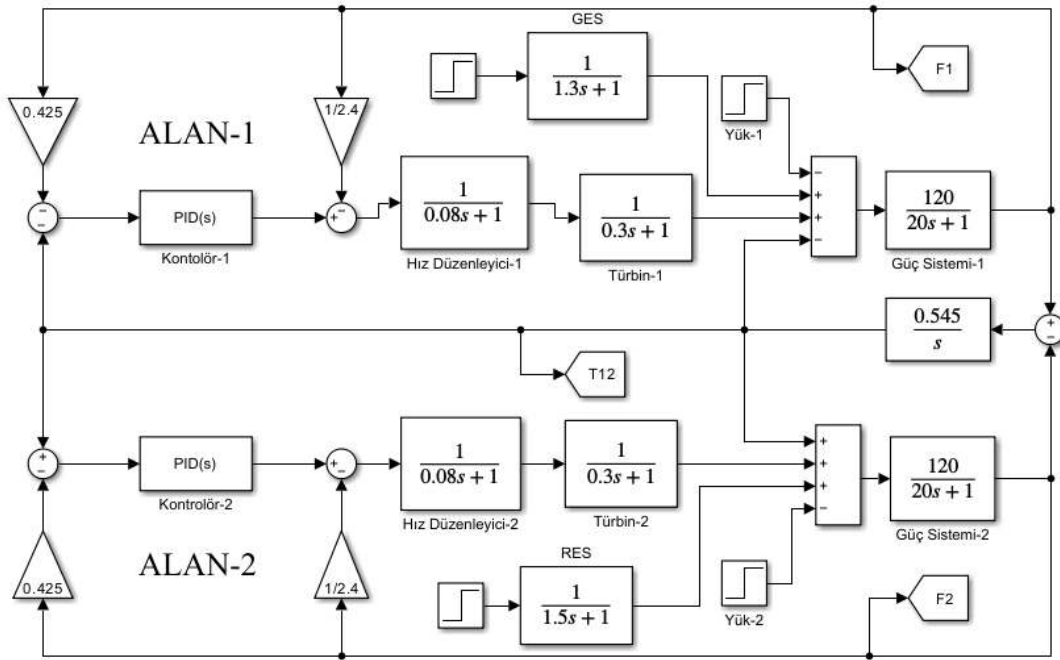
Şekil 7.21. Test Sistemi-1 Senaryo-3 Bağlantı hattı güç değişimi.

Test Sistemi-1 Senaryo-3 Alan-1’de 50 saniye süresince olan yük değişimi incelendiğinde BPA optimizasyon yöntemi, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemlerine göre bağlantı hattı güç değişiminde meydana gelen dalgalanmaların aşma değerlerini daha düşük tutarak daha iyi performans gösterdiği ve bu aşma değerlerini daha kısa sürede sönümlendiği görülmektedir.

7.3. TEST SİSTEMİ-2 İÇİN OPTİMİZASYON SONUÇLARI

Test Modeli-2 Şekil 7.22’de gösterildiği gibi iki alanlı ve alanlarda ara ısıtmasız bir termik ve yenilenebilir enerji kaynağı içeren güç sistemleri kullanılarak oluşturulmuştur. BPA, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemleri kullanılarak yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşan güç sistemlerinin kullanılmasının sisteme olan etkileri

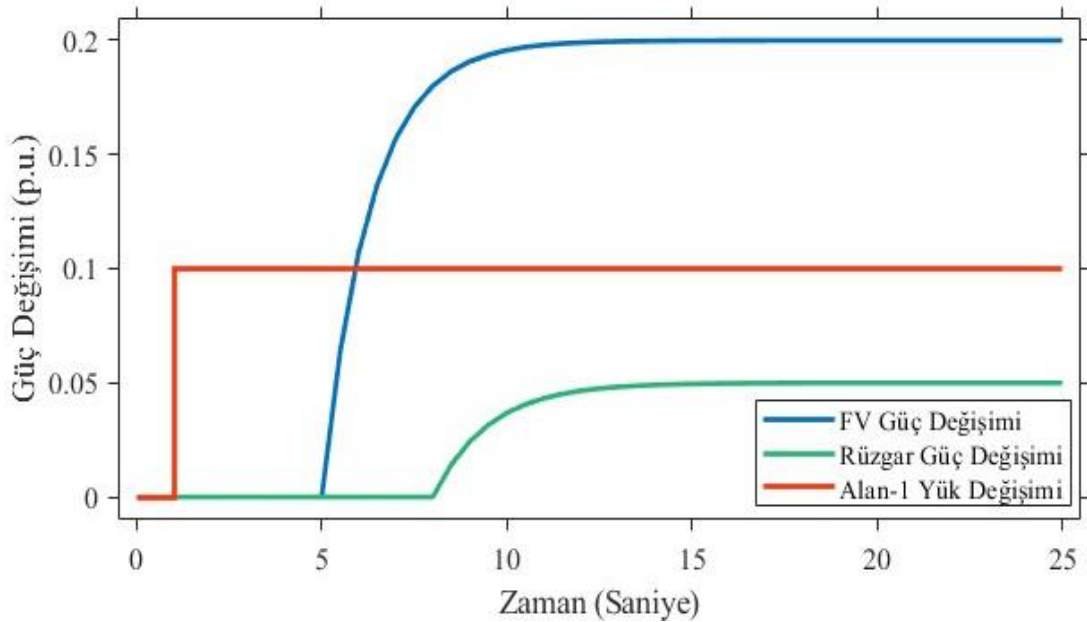
incelenmiştir.



Şekil 7.22. Test Sistemi-2 SIMULINK modeli.

7.3.1. Test Sistemi-2 Senaryo-1: Alan-1'de Yük Değişimi

Şekil 7.23'de gösterildiği gibi, Şekil 7.22'deki Test Sistemi-2 güç sisteminde Alan-1'de 1.saniyede 0,1 pu artan yük değişimi ve 5. ve 8. Saniyede enerji üretimine başlayan yenilenebilir enerji kaynakları içeren güç sistemi için sistem performansı incelenmiştir.



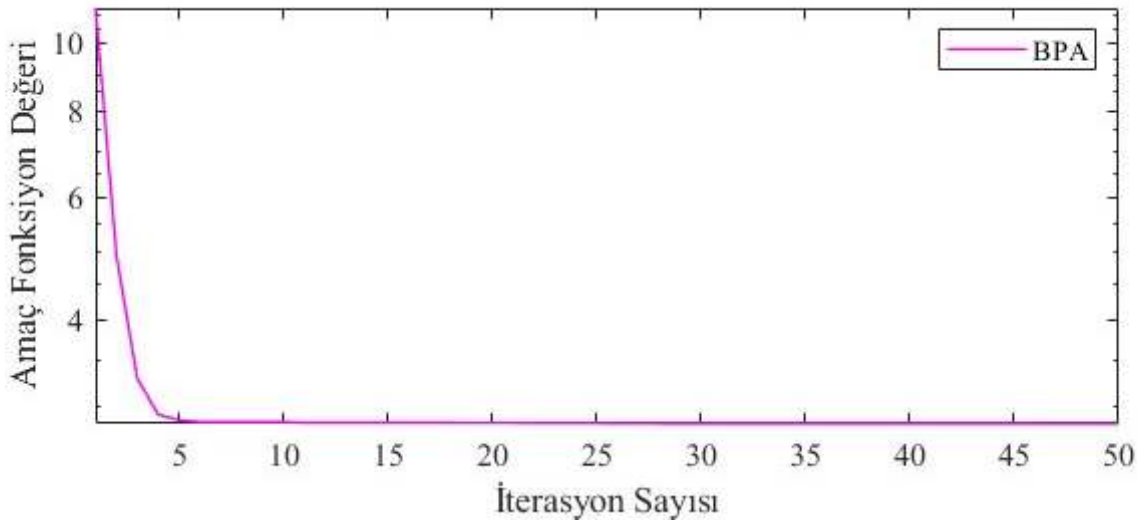
Şekil 7.23. Test Sistemi-2 Senaryo-1 güç değişimleri.

Şekil 7.22'deki Test Sistemi-2 güç sisteminde Senaryo-1'deki yük ve üretim değişiklikleri durumunda BPA, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemleri için optimum kontrol parametre değerleri Çizelge 7.5'te verilmiştir.

Çizelge 7.5. Test Sistemi-2 Senaryo-1 için optimum kontrol parametre değerleri.

Optimizasyon Tekniği	Kp_1	Ki_1	Kd_1	Kp_2	Ki_2	Kd_2	Amaç Fonksiyon Değeri
BPA: PID	0,9573	2,0000	0,3842	0,3174	2,0000	0,5256	2,8412
GKO: PID	0,9142	2,0000	0,3773	0,3524	2,0000	0,5292	2,8489
PSO: PID	0,9523	2,0000	0,3632	0,7406	2,0000	0,7992	2,8548
BA: PID	2,0000	2,0000	0,4647	1,7542	2,0000	2,0000	2,9658

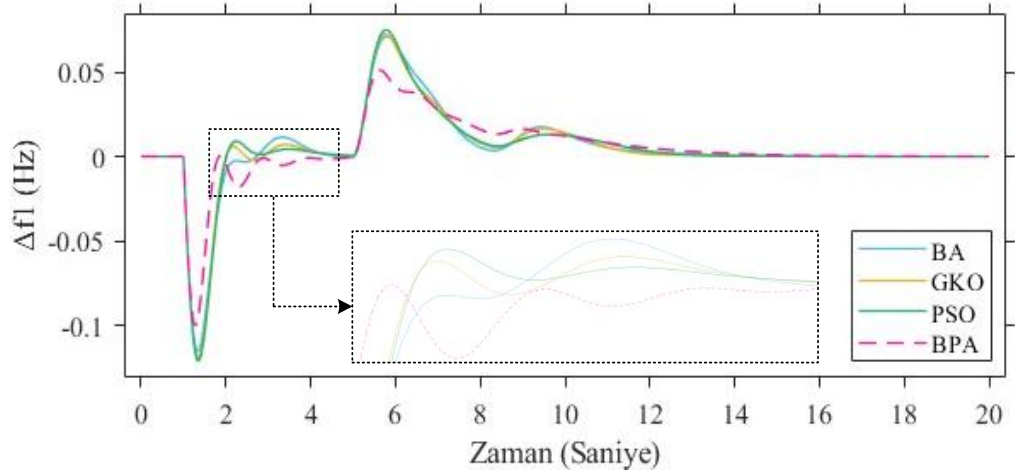
Amaç fonksiyonu değerinin iterasyon sayısına bağlı grafiği Test Sistemi-2 Senaryo-1 için Şekil 7.19'te verilmiştir.



Şekil 7.24. Test Sistemi-2 Senaryo-1 BPA optimizasyon yöntemine göre amaç fonksiyon değeri.

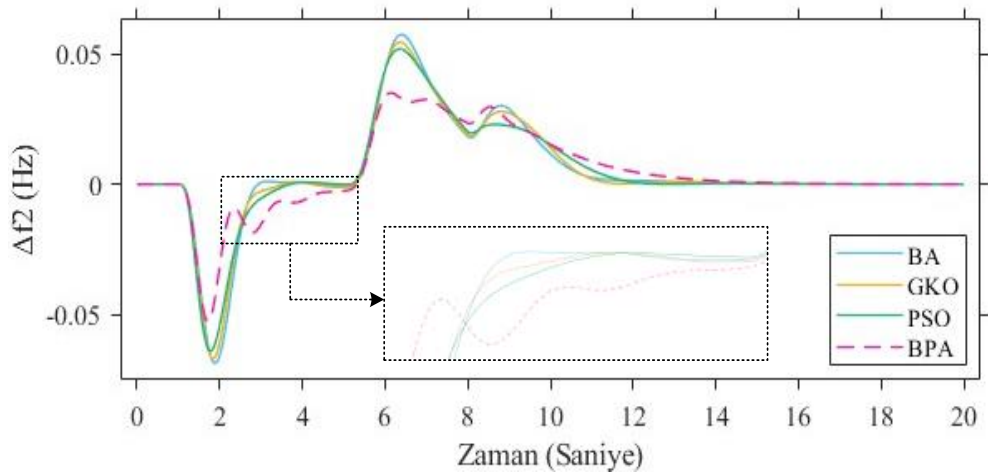
Test Sistemi-2 Senaryo-1 için min(ITAE) değeri BPA için 2,8412 olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan, PSO'dan ve GKO'dan daha iyi performans göstermektedir.

Test Sistemi-2 güç sisteminde Alan-1'de 1.saniyede 0,1 pu artan yük değişimi ve 5. ve 8. saniyede enerji üretimine başlayan yenilenebilir enerji kaynakları içeren güç sistemi için BPA, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemleri için Δf_1 , Δf_2 ve ΔP_{tie} açısından sistem performansları Şekil 7.25, Şekil 7.26 ve Şekil 7.27'de verilmiştir.



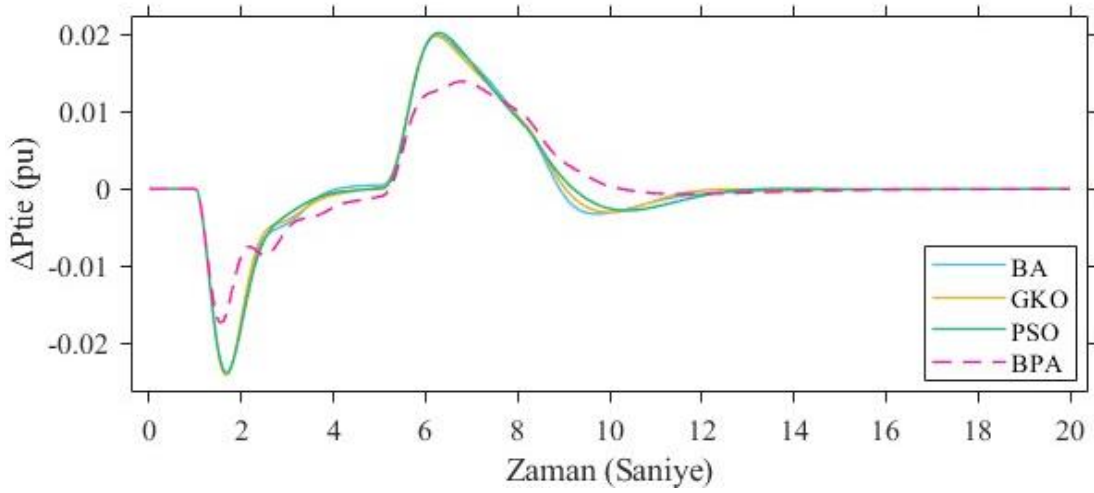
Şekil 7.25. Test Sistemi-2 Senaryo-1 Alan-1'deki frekans değişimi.

Test Sistemi-2 Senaryo-1 Alan-1 için sistem performans değerleri incelendiğinde 1. saniyede 0,1 pu artan yük değişimi sebebiyle frekans düşmüştür. Buna bağlı olarak minimum aşma değeri BPA için -0,100 Hz, BA için -0,115 Hz, PSO için -0,121 Hz, GKO için -0,119 Hz olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan %13,0, PSO'dan %17,3, GKO'dan %15,9 minimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermiştir. Test Sistemi-1 Senaryo-2'de 5. ve 8. saniyede enerji üretimine başlayan yenilenebilir enerji kaynaklarının da dahil olduğu bölüm incelendiğinde maksimum aşma değeri BPA için 0,051 Hz, BA için 0,071 Hz, PSO için 0,075 Hz, GKO için 0,072 Hz olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan %28,1, PSO'dan %32,0, GKO'dan %29,1 maksimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermiştir. Frekans değişimlerinin sönümlenmesi için geçen süre incelendiğinde; BPA optimizasyon yöntemi, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemlerine göre aşma değerlerini daha kısa sürede sönümlediği görülmektedir.



Şekil 7.26. Test Sistemi-2 Senaryo-1 Alan-2'deki frekans değişimi.

Test Sistemi-2 Senaryo-1 Alan-2 için sistem performans değerleri incelendiğinde 1. saniyede 0,1 pu artan yük değişimi sebebiyle frekans düşmüştür. Buna bağlı olarak minimum aşma değeri BPA için -0,052 Hz, BA için -0,069 Hz, PSO için -0,064 Hz, GKO için -0,067 Hz olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan %24,6, PSO'dan %18,7, GKO'dan %22,4 minimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermiştir. Test Sistemi-1 Senaryo-2'de 5. ve 8. saniyede enerji üretimine başlayan yenilenebilir enerji kaynaklarının da dahil olduğu bölüm incelendiğinde maksimum aşma değeri BPA için 0,035 Hz, BA için 0,057 Hz, PSO için 0,052 Hz, GKO için 0,057 Hz olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan %38,5, PSO'dan %32,6, GKO'dan %38,5 maksimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermiştir. Frekans değişimlerinin sönümlenmesi için geçen süre incelendiğinde; BPA optimizasyon yöntemi, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemlerine göre aşma değerlerini daha kısa sürede sönümlendiği görülmektedir.



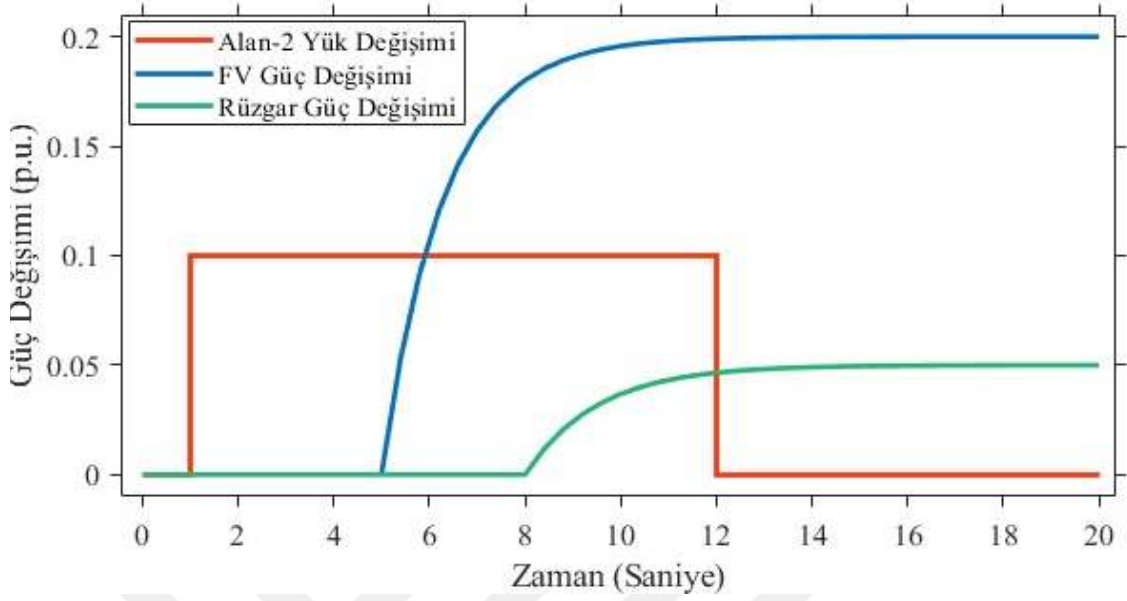
Şekil 7.27. Test Sistemi-2 Senaryo-1 Bağlantı hattı güç değişimi.

Test Sistemi-2 Senaryo-1 bağlantı hattı güç değişimi için sistem performans değerleri incelendiğinde BPA optimizasyon yöntemi, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemlerine göre bağlantı hattı güç değişiminde meydana gelen dalgalanmaların aşma değerlerini daha düşük tutarak daha iyi performans gösterdiği ve bu aşma değerlerini daha kısa sürede sönümlendiği görülmektedir.

7.3.2. Test Sistemi-2 Senaryo-2: Alan-2'de Yük Değişimi

Şekil 7.28'de gösterildiği gibi, Şekil 7.22'deki Test Sistemi-2 güç sisteminde Alan-2'de 1. saniyede 0,1 pu artan ve 12. saniyede 0,1 pu azalan yük değişimi ve 5. ve 8. Saniyede enerji üretimine başlayan yenilenebilir enerji kaynakları içeren güç sistemi için sistem

performansı incelenmiştir.



Şekil 7.28. Test Sistemi-2 Senaryo-2 güç değişimleri.

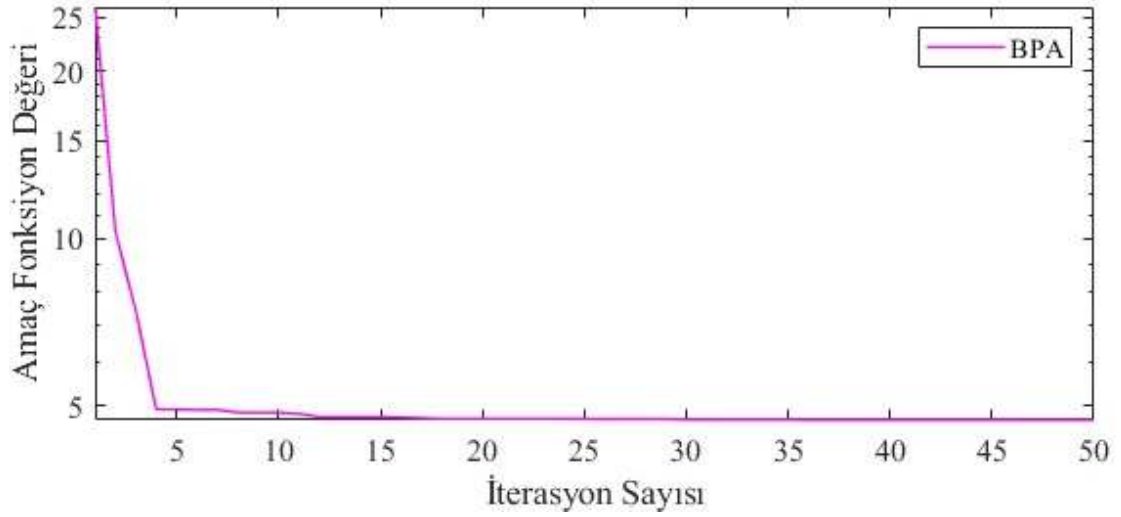
Şekil 7.22'deki Test Sistemi-2 güç sisteminde Senaryo-2'deki yük ve üretim değişiklikleri durumunda BPA, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemleri için optimum kontrol parametre değerleri Çizelge 7.6'te verilmiştir.

Çizelge 7.6. Test Sistemi-2 Senaryo-2 için optimum kontrol parametre değerleri.

Optimizasyon Tekniği	Kp_1	Ki_1	Kd_1	Kp_2	Ki_2	Kd_2	Amaç Fonksiyon Değeri
BPA: PID	0,4928	2,0000	0,3978	1,6564	2,0000	0,5524	4,7072
PSO: PID	0,6410	2,0000	0,4484	1,5416	2,0000	0,4877	4,7184
GKO: PID	0,9289	2,0000	0,3261	1,5995	2,0000	0,5722	4,7378
BA: PID	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	2,0000	0,4977	4,9011

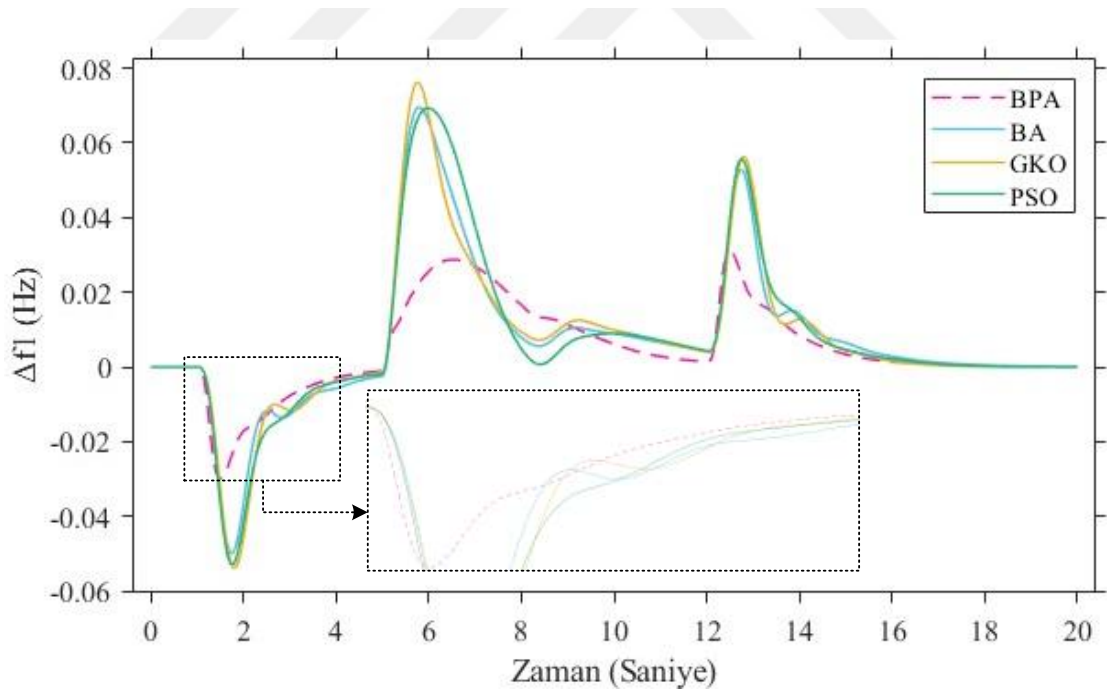
Amaç fonksiyonu değerinin iterasyon sayısına bağlı grafiği Test Sistemi-2 Senaryo-2 için Şekil 7.29'te verilmiştir.

Test Sistemi-2 güç sisteminde Alan-2'de 1. saniyede 0,1 pu artan ve 12. saniyede 0,1 pu azalan yük değişimi ve 5. ve 8. saniyede enerji üretimine başlayan yenilenebilir enerji kaynakları içeren güç sistemi için BPA, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemleri için Δf_1 , Δf_2 ve ΔP_{tie} açısından sistem performansları Şekil 7.30, Şekil 7.31 ve Şekil 7.32'de verilmiştir.



Şekil 7.29. Test Sistemi-2 Senaryo-2 BPA optimizasyon yöntemine göre amaç fonksiyon değeri.

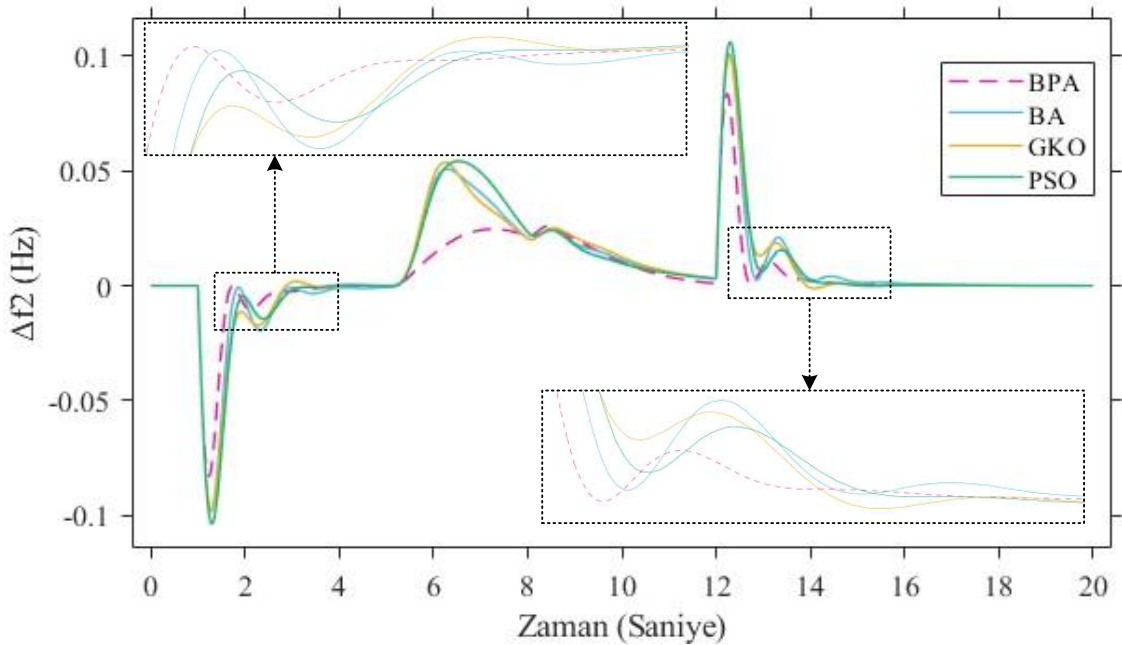
Test Sistemi-2 Senaryo-2 için min(ITAE) değeri BPA için 4,7072 olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan, PSO'dan ve GKO'dan daha iyi performans göstermektedir.



Şekil 7.30. Test Sistemi-2 Senaryo-2 Alan-1'deki frekans değişimi.

Test Sistemi-2 Senaryo-2 Alan-1 için sistem performans değerleri incelendiğinde 1. saniyede 0,1 pu artan yük değişimi sebebiyle frekans düşmüştür. Buna bağlı olarak minimum aşma değeri BPA için -0,030 Hz, BA için -0,050 Hz, PSO için -0,053 Hz, GKO için -0,054 Hz olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan %40,0, PSO'dan %43,3, GKO'dan

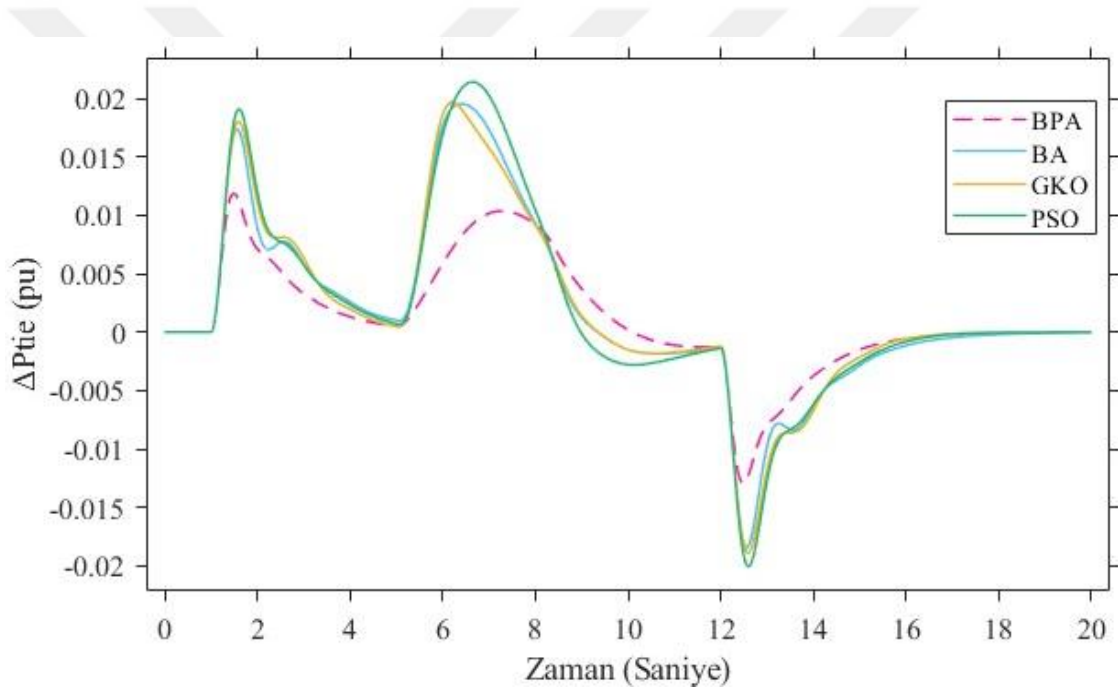
%44,4 minimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermiştir. Test Sistemi-2 Senaryo-2’de 5. ve 8. saniyede enerji üretimine başlayan yenilenebilir enerji kaynaklarının da dahil olduğu bölüm incelendiğinde maksimum aşma değeri BPA için 0,029 Hz, BA için 0,070 Hz, PSO için 0,069 Hz, GKO için 0,076 Hz olarak bulunmuş olup BPA; BA’dan %58,5, PSO’dan %57,9, GKO’dan %61,8 maksimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermiştir. Test Sistemi-2 Senaryo-2’de 12. saniyede 0,1 pu azalan yük değişimi sebebiyle frekans tekrar yükselmiştir. Buna bağlı olarak maksimum aşma değeri BPA için 0,031 Hz, BA için 0,053 Hz, PSO için 0,056 Hz, GKO için 0,056 Hz olarak bulunmuş olup BPA; BA’dan %41,5, PSO’dan %44,6, GKO’dan %44,6 maksimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermiştir. Frekans değişimlerinin sönümlenmesi için geçen süre incelendiğinde; BPA optimizasyon yöntemi, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemlerine göre aşma değerlerini daha kısa sürede sönümlendiği görülmektedir.



Şekil 7.31. Test Sistemi-2 Senaryo-2 Alan-2’deki frekans değişimi.

Test Sistemi-2 Senaryo-2 Alan-2 için sistem performans değerleri incelendiğinde 1. saniyede 0,1 pu artan yük değişimi sebebiyle frekans düşmüştür. Buna bağlı olarak minimum aşma değeri BPA için -0,083 Hz, BA için -0,098 Hz, PSO için -0,0104 Hz, GKO için -0,098 Hz olarak bulunmuş olup BPA; BA’dan %15,3, PSO’dan %20,1, GKO’dan %15,3 minimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermiştir. Test Sistemi-2 Senaryo-2’de 5. ve 8. saniyede enerji üretimine başlayan yenilenebilir enerji

kaynaklarının da dahil olduğu bölüm incelendiğinde maksimum aşma değeri BPA için 0,025 Hz, BA için 0,051 Hz, PSO için 0,054 Hz, GKO için 0,055 Hz olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan %50,9, PSO'dan %53,7, GKO'dan %54,5 maksimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermiştir. Test Sistemi-2 Senaryo-2'de 12. saniyede 0,1 pu azalan yük değişimi sebebiyle frekans tekrar yükselmiştir. Buna bağlı olarak maksimum aşma değeri BPA için 0,084 Hz, BA için 0,101 Hz, PSO için 0,106 Hz, GKO için 0,100 Hz olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan %16,8, PSO'dan %20,7, GKO'dan %16,0 maksimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermiştir. Frekans değişimlerinin sönümlenmesi için geçen süre incelendiğinde; BPA optimizasyon yöntemi, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemlerine göre aşma değerlerini daha kısa sürede sönümlendiği görülmektedir.



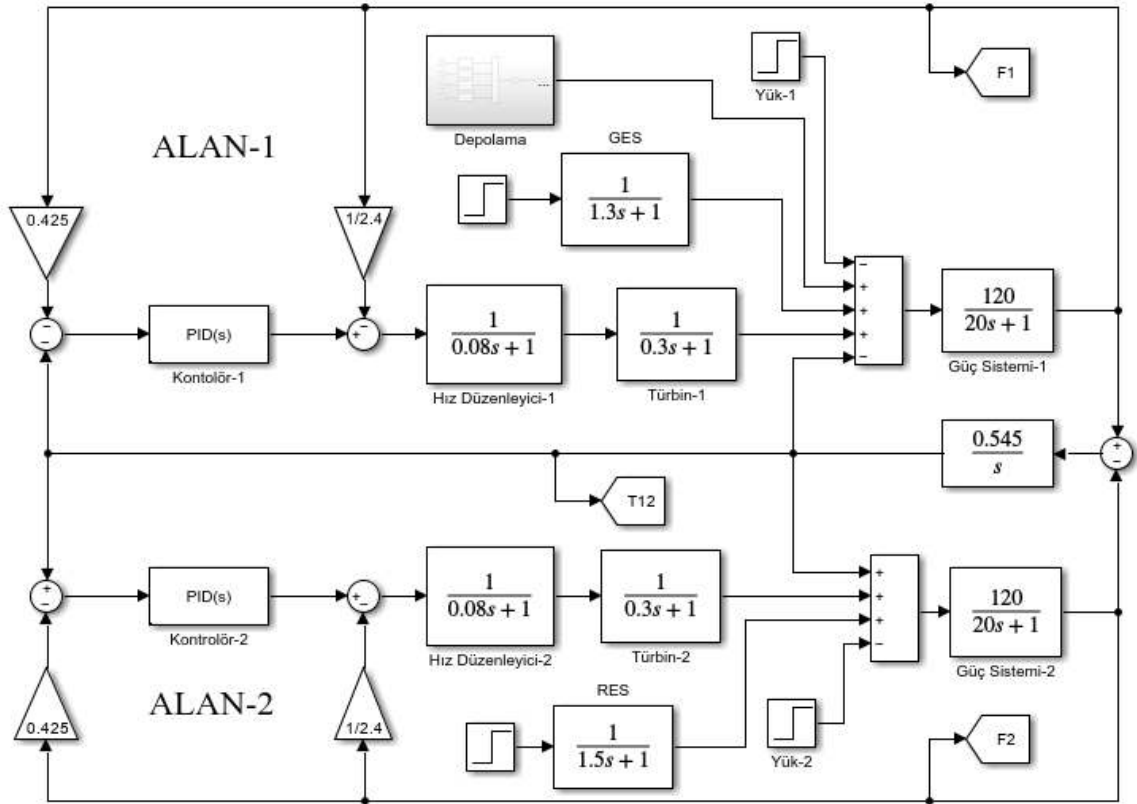
Şekil 7.32. Test Sistemi-2 Senaryo-2 Bağlantı hattı güç değişimi.

Test Sistemi-2 Senaryo-2 bağlantı hattı güç değişimi için sistem performans değerleri incelendiğinde BPA optimizasyon yöntemi, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemlerine göre bağlantı hattı güç değişiminde meydana gelen dalgalanmaların aşma değerlerini daha düşük tutarak daha iyi performans gösterdiği ve bu aşma değerlerini daha kısa sürede sönümlendiği görülmektedir.

7.4. TEST SİSTEMİ-3 İÇİN OPTİMİZASYON SONUÇLARI

Test Modeli-3 Şekil 7.33'de gösterildiği gibi iki alanlı ve alanlarda ara ısıtmasız bir

termik, yenilenebilir enerji kaynağı ve enerji depolama sistemleri içeren güç sistemleri kullanılarak oluşturulmuştur. BPA, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemleri kullanılarak yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşan güç sistemlerinin kullanılmasının sisteme olan etkileri incelenmiştir.

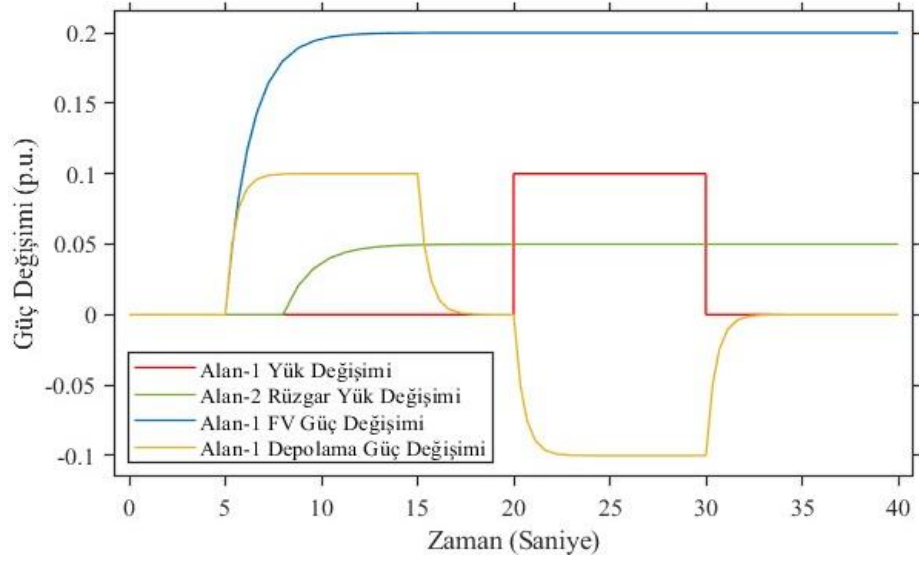


Şekil 7.33. Test Sistemi-3 SIMULINK modeli.

7.4.1. Test Sistemi-3 Senaryo-1: Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Depolama Sistemleri ve Alan-1’de Yük Değişimi

Şekil 7.33’de gösterildiği gibi, Test Sistemi-3 güç sisteminde Alan-1’de 20. saniyede 0,1 pu artan ve 30. saniyede 0,1 pu azalan yük değişimi, 5. saniyede Alan-1’de ve 8. saniyede Alan-2’de enerji üretimine başlayan yenilenebilir enerji kaynakları ve 5. saniyede enerji depolamaya başlayan enerji depolama sistemlerini içeren güç sistemi için sistem performansı incelenmiştir.

Şekil 7.33’deki Test Sistemi-3 güç sisteminde Senaryo-1’deki yük ve üretim değişiklikleri durumunda BPA, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemleri için optimum kontrol parametre değerleri Çizelge 7.7’ te verilmiştir.

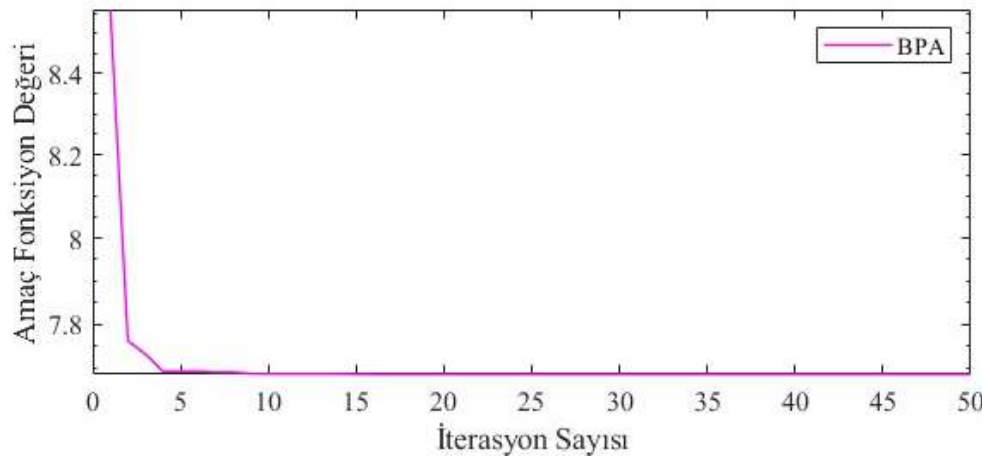


Şekil 7.34. Test Sistemi-3 Senaryo-1 güç değişimleri.

Çizelge 7.7. Test Sistemi-3 Senaryo-1 için optimum kontrol parametre değerleri.

Optimizasyon Tekniği	Kp_1	Ki_1	Kd_1	Kp_2	Ki_2	Kd_2	Amaç Fonksiyon Değeri
BPA: PID	2,0000	2,0000	1,6875	0,7056	2,0000	0,3229	7,5849
PSO: PID	2,0000	2,0000	1,3597	0,6578	2,0000	0,4360	7,6525
BA: PID	2,0000	2,0000	1,5170	2,0000	2,0000	0,3517	7,6687
GKO: PID	2,0000	1,9998	1,6574	-0,0100	2,0000	0,2833	7,7025

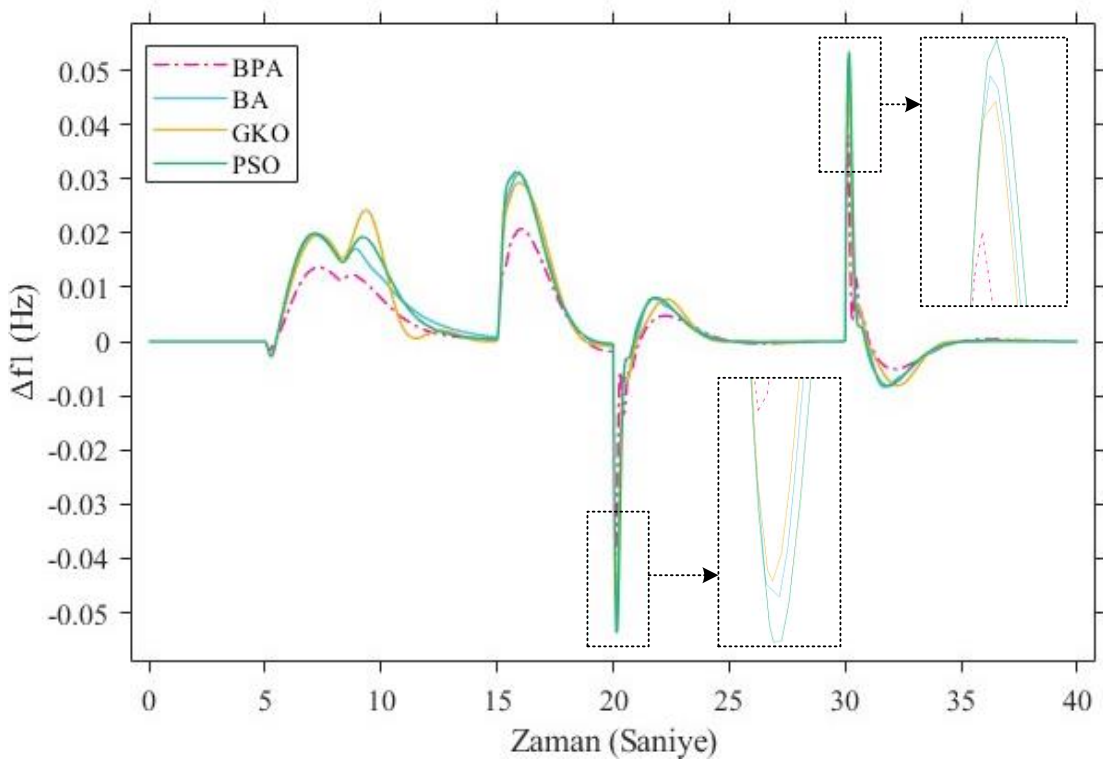
Amaç fonksiyonu değerinin iterasyon sayısına bağlı grafiği test Sistemi-3 Senaryo-1 için Şekil 7.35’de verilmiştir.



Şekil 7.35. Test Sistemi-3 Senaryo-1 BPA optimizasyon yöntemine göre amaç fonksiyon değeri.

Test Sistemi-3 Senaryo-1 için min(ITAE) değeri BPA için 7,5849 olarak bulunmuş olup BPA; BA‘dan, PSO‘dan ve GKO‘dan daha iyi performans göstermektedir.

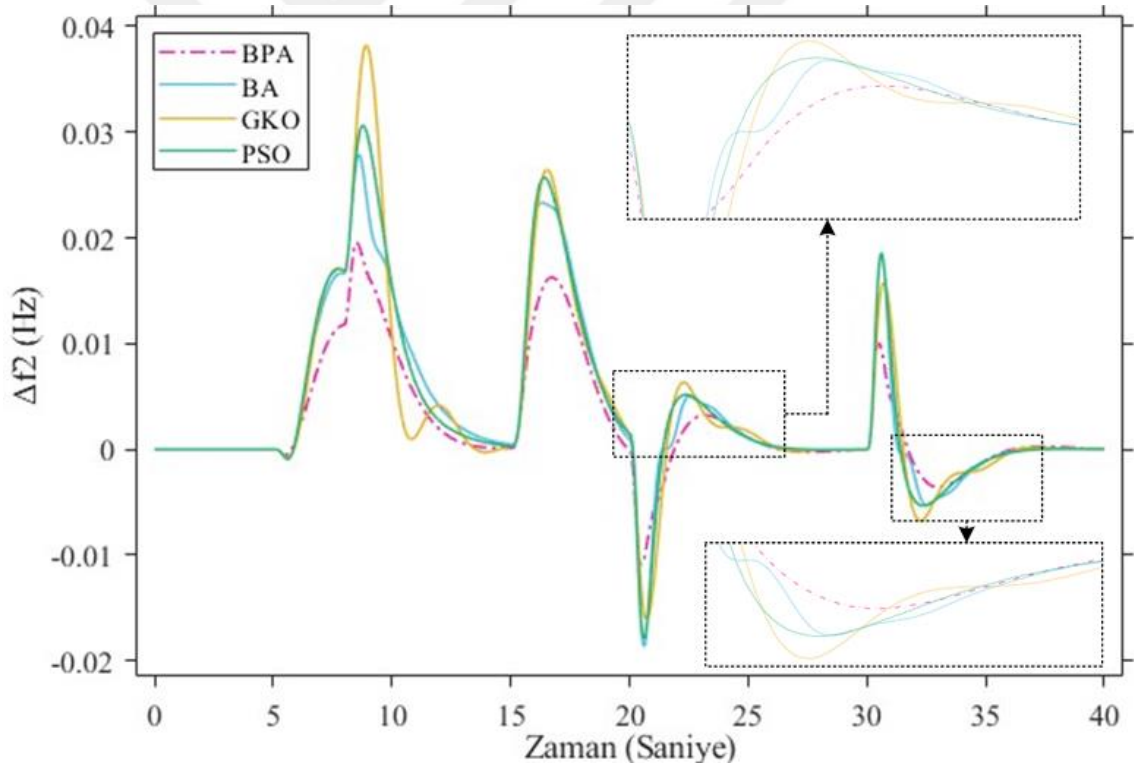
Test Sistemi-3 güç sisteminde Alan-1’de 20. saniyede 0,1 pu artan ve 30. saniyede 0,1 pu azalan yük değişimi, 5. saniyede Alan-1’de ve 8. saniyede Alan-2’de enerji üretimine başlayan yenilenebilir enerji kaynakları ve 5. saniyede enerji depolamaya başlayan enerji depolama sistemlerini içeren güç sistemi için BPA, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemleri için Δf_1 , Δf_2 ve ΔP_{tie} açısından sistem performansları Şekil 7.36, Şekil 7.37 ve Şekil 7.38’de verilmiştir.



Şekil 7.36. Test Sistemi-3 Senaryo-1 Alan-1’deki frekans değişimi.

Test Sistemi-3 Senaryo-1 Alan-1 için sistem performans değerleri incelendiğinde 5. saniyede 0,1 pu enerji depolama sistemlerini içeren güç sistemi enerji depolamaya başlamış, 5. saniyede 0,2 pu değerinde ve 8. saniyede 0,05 pu değerinde yenilenebilir enerji kaynaklarını içeren enerji üretim tesisleri enerji üretmeye başlamıştır. Üretimin fazla olması sebebiyle frekans yükselmiştir. Buna bağlı olarak bu bölüm için maksimum aşma değeri BPA için 0,014 Hz, BA için 0,020 Hz, PSO için 0,020 Hz, GKO için 0,024 Hz olarak bulunmuş olup BPA; BA‘dan %30,0, PSO‘dan %30,3, GKO‘dan %41,6 maksimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermiştir. 15. saniyeden sonra enerji depolama sistemlerini içeren güç sistemi enerji depolamasını tamamlamasıyla

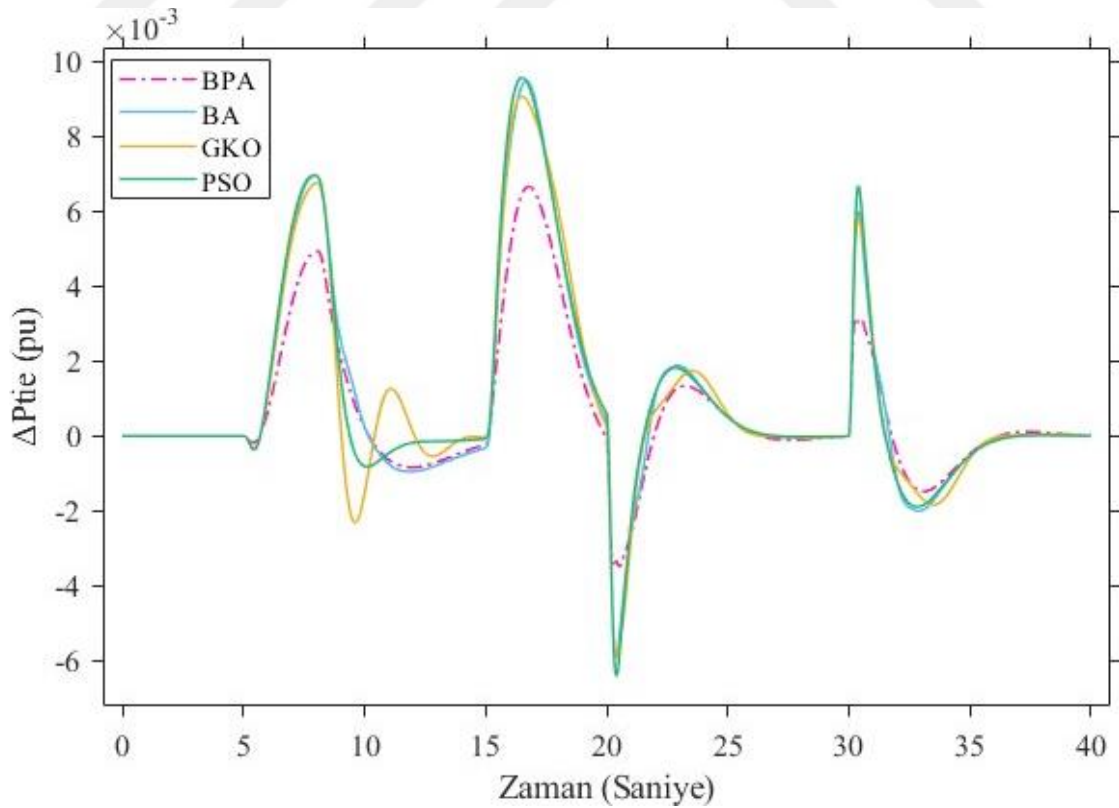
frekansta yükselme meydana gelmiştir. Buna bağlı olarak bu bölüm için maksimum aşma değeri BPA için 0,021 Hz, BA için 0,031 Hz, PSO için 0,031 Hz, GKO için 0,029 Hz olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan %32,2, PSO'dan %30,3, GKO'dan %27,5 maksimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermiştir. 20. saniyede 0,1 pu artan yük değişimi enerji depolama sistemlerini içeren güç sistemi tarafından karşılanmaktadır. Buna bağlı olarak bu bölüm için minimum aşma değeri BPA için -0,039 Hz, BA için -0,051 Hz, PSO için -0,054 Hz, GKO için -0,050 Hz olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan %23,5, PSO'dan %27,7, GKO'dan %22,0 minimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermiştir. 30. saniyede 0,1 pu azalan yük değişimi ve enerji depolama sistemlerini içeren güç sisteminin depoladığı enerjinin tükenmesine bağlı olarak bu bölüm için maksimum aşma değeri BPA için 0,038 Hz, BA için 0,051 Hz, PSO için 0,053 Hz, GKO için 0,048 Hz olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan %25,4, PSO'dan %28,3, GKO'dan %20,8 maksimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermiştir.



Şekil 7.37. Test Sistemi-3 Senaryo-1 Alan-2'deki frekans değişimi.

Test Sistemi-3 Senaryo-1 Alan-2 için sistem performans değerleri incelendiğinde 5. saniyede 0,1 pu enerji depolama sistemlerini içeren güç sistemi enerji depolamaya başlamış, 5. saniyede 0,2 pu değerinde ve 8. saniyede 0,05 pu değerinde yenilenebilir enerji kaynaklarını içeren enerji üretim tesisleri enerji üretmeye başlamıştır. Üretimin fazla olması sebebiyle frekans yükselmiştir. Buna bağlı olarak bu bölüm için maksimum

aşma değeri BPA için 0,020 Hz, BA için 0,028 Hz, PSO için 0,031 Hz, GKO için 0,038 Hz olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan %28,5, PSO'dan %35,4, GKO'dan %47,3 maksimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermiştir. 15. saniyeden sonra enerji depolama sistemlerini içeren güç sistemi enerji depolamasını tamamlamasıyla frekansta yükselme meydana gelmiştir. Buna bağlı olarak bu bölüm için maksimum aşma değeri BPA için 0,016 Hz, BA için 0,023 Hz, PSO için 0,026 Hz, GKO için 0,027 Hz olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan %30,4, PSO'dan %38,4, GKO'dan %40,7 maksimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermiştir. 20. saniyede 0,1 pu artan yük değişimi enerji depolama sistemlerini içeren güç sistemi tarafından karşılanmaktadır. Buna bağlı olarak bu bölüm için minimum aşma değeri BPA için -0,011 Hz, BA için -0,019 Hz, PSO için -0,018 Hz, GKO için -0,016 Hz olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan %42,1, PSO'dan %38,8, GKO'dan %31,2 minimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermiştir. 30. saniyede 0,1 pu azalan yük değişimi ve enerji depolama sistemlerini içeren güç sisteminin depoladığı enerjinin tükenmesine bağlı olarak bu bölüm için maksimum aşma değeri BPA için 0,010 Hz, BA için 0,019 Hz, PSO için 0,018 Hz, GKO için 0,016 Hz olarak bulunmuş olup BPA; BA'dan %47,3, PSO'dan %44,4, GKO'dan %37,5 maksimum aşma değeri olarak daha iyi performans göstermiştir.



Şekil 7.38. Test Sistemi-3 Senaryo-1 Bağlantı hattı güç değişimi.

Test Sistemi-3 Senaryo-1 bağlantı hattı güç değişimi için sistem performans değerleri incelendiğinde BPA optimizasyon yöntemi, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemlerine göre bağlantı hattı güç değişiminde meydana gelen dalgalanmaların aşma değerlerini daha düşük tutarak daha iyi performans gösterdiği ve bu aşma değerlerini daha kısa sürede sönümlediği görülmektedir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, güneş ve rüzgar enerjisi sistemleri gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını çok alanlı güç sistemleri içinde enerji depolama teknolojileriyle ilk kez birleştiren yenilikçi bir çok alanlı güç sisteminin tasarımını tanımlamaktadır. Bu konsept, etkili bir yük frekansı kontrolü sağlamayı amaçlamaktadır. PID kontrolörünün parametreleri, yeni geliştirilen BPA, BA, GKO ve geleneksel PSO yöntemi kullanılarak optimum sonuçlar elde etmek için oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonu olarak ITAE kullanılmıştır

İlk test sistemi olarak, literatürde yaygın olarak atıfta bulunulan ve mevcut optimizasyon tekniğinin etkinliğini değerlendirmek için sağlam bir çerçeve sunan iki alanlı ara ısıtmasız bir termal güç sistemi seçilmiştir.

Birinci test sistemi birinci senaryo olarak güç sistemi Alan-1’de 1. saniyede 0,1 pu artan yük değişimi için BPA, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemleri kullanılarak sistem performansı incelenmiş ve kullanılan optimizasyon yöntemlerinin etkinliğini görmek için literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Alan-1 için frekans değişimleri incelendiğinde minimum aşma değeri olarak BPA; BA’dan %10, PSO’dan %9,2, GKO’dan %8,3 daha iyi performans göstermiştir. Alan-2 için frekans değişimleri incelendiğinde minimum aşma değeri olarak BPA; BA’dan %26,4, PSO’dan %20,4, GKO’dan %17 daha iyi performans göstermiştir. Bağlantı hattı güç değişimi için sistem performans değerleri incelendiğinde minimum aşma değeri olarak BPA; BA’dan %15,6, PSO’dan %14,7, GKO’dan %16,1 daha iyi performans göstermiştir. Ayrıca BPA optimizasyon yönteminin, literatürdeki diğer optimizasyon yöntemlerine göre frekans değişimleri ve bağlantı hattı güç değişimlerine göre dalgalanmaların aşma değerlerini daha düşük tutarak daha iyi performans gösterdiği ve GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemlerine kıyasla tüm aşma değerlerini daha kısa sürede sönümlediği görülmektedir.

Birinci test sistemi ikinci senaryo olarak güç sistemi Alan-2’de 1. saniyede 0,2 pu azalan yük değişimi için BPA, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemleri kullanılarak sistem performansı incelenmiştir. Alan-1 için frekans değişimleri incelendiğinde maksimum aşma değeri olarak BPA; BA’dan %17,8, PSO’dan %19,4, GKO’dan %15,3; Alan-2 için frekans değişimleri incelendiğinde maksimum aşma değeri olarak BPA; BA’dan %9,5,

PSO'dan %9,9, GKO'dan %9,1; bağlantı hattı güç değişimi için sistem performans değerleri incelendiğinde minimum aşma değeri olarak BPA; BA'dan %16,9, PSO'dan %22,1, GKO'dan %17,1 daha iyi performans göstermiştir. Ayrıca BPA optimizasyon yönteminin, bağlantı hattı güç değişimlerine göre dalgalanmaların aşma değerlerini daha düşük tutarak daha iyi performans gösterdiği ve GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemlerine kıyasla tüm aşma değerlerini daha kısa sürede sönümlediği görülmektedir.

Birinci test sistemi üçüncü senaryo olarak güç sistemi Alan-1'de 50 saniye boyunca rastgele yük değişimi için BPA, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemleri kullanılarak sistem performansı incelenmiştir. Optimizasyon yönteminin frekans duyarlılığı, test süresi boyunca sistem üzerindeki yükün hem artırılması hem de azaltılmasıyla değerlendirilmiştir. En büyük yük değişimi 20. saniyedeki yük değişimi olup bu yük değişimindeki Alan-1 için frekans değişimleri incelendiğinde maksimum aşma değeri olarak BPA; BA'dan %15,9, PSO'dan %10,9, GKO'dan %20,3; Alan-2 için frekans değişimleri incelendiğinde maksimum aşma değeri olarak BPA; BA'dan %22,1, PSO'dan %3,2, GKO'dan %21,3 daha iyi performans göstermiştir. BPA optimizasyon yönteminin 50 saniye boyunca rastgele yük değişimi süresince oluşan aşma değerlerini GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemlerine kıyasla daha kısa sürede sönümlediği görülmektedir.

İkinci test sistemi, iki alanlı ve alanlarda ara ısıtmasız bir termik güç sistemi ve GES, RES içeren güç sistemleri kullanılarak tasarlanmıştır.

İkinci test sistemi birinci senaryo olarak Alan-1'de 1. saniyede 0,1 pu artan yük değişimi, 5. saniyede üretime başlayan GES ve 8. saniyede enerji üretimine başlayan RES içeren güç sistemi için BPA, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemleri kullanılarak sistem performansı incelenmiştir. Alan-1 için frekans değişimleri incelendiğinde yük artışına bağlı olarak bu bölümde frekans düşmüş olup minimum aşma değeri olarak BPA; BA'dan %13,0, PSO'dan %17,3, GKO'dan %15,9 daha iyi performans göstermiştir. 5. ve 8. saniyede enerji üretimine başlayan yenilenebilir enerji kaynaklarının da dahil olduğu bölüm için frekans yükselmiş olup Alan-1'deki frekans değişimleri incelendiğinde maksimum aşma değeri olarak BPA; BA'dan %28,1, PSO'dan %32,0, GKO'dan %29,1 daha iyi performans göstermiştir. Alan-2 için frekans değişimleri incelendiğinde yük artışına bağlı olarak bu bölümde frekans düşmüş olup minimum aşma değeri olarak BPA; BA'dan %24,6, PSO'dan %18,7, GKO'dan %22,4 daha iyi performans göstermiştir. 5. ve 8. saniyede enerji üretimine başlayan yenilenebilir enerji kaynaklarının da dahil olduğu bölüm için frekans yükselmiş olup Alan-2'deki frekans değişimleri incelendiğinde

maksimum aşma değeri olarak BPA; BA'dan %38,5, PSO'dan %32,6, GKO'dan %38,5 daha iyi performans göstermiştir. BPA optimizasyon yönteminin, bağlantı hattı güç değişimlerine göre dalgalanmaların aşma değerlerini daha düşük tutarak daha iyi performans gösterdiği ve GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemlerine kıyasla tüm aşma değerlerini daha kısa sürede sönümlediği görülmektedir.

İkinci test sistemi ikinci senaryo olarak Alan-2'de 1. saniyede 0,1 pu artan, 12. saniyede 0,1 pu azalan yük değişimi, 5. saniyede üretime başlayan GES ve 8. saniyede enerji üretimine başlayan RES içeren güç sistemi için BPA, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemleri kullanılarak sistem performansı incelenmiştir. Alan-1 için frekans değişimleri incelendiğinde yük artışına bağlı olarak bu bölümde frekans düşmüş olup minimum aşma değeri olarak BPA; BA'dan %40,0, PSO'dan %43,3, GKO'dan %44,4 daha iyi performans göstermiştir. 5. ve 8. saniyede enerji üretimine başlayan yenilenebilir enerji kaynaklarının da dahil olduğu bölüm için frekans yükselmiş olup Alan-1'deki frekans değişimleri incelendiğinde maksimum aşma değeri olarak BPA; BA'dan %58,5, PSO'dan %57,9, GKO'dan %61,8 daha iyi performans göstermiştir. 12. saniyede 0,1 pu azalan yük değişimi sebebiyle bu bölümde frekans yükselmiş olup maksimum aşma değeri olarak BPA; BA'dan %41,5, PSO'dan %44,6, GKO'dan %44,6 daha iyi performans göstermiştir. BPA optimizasyon yönteminin, bağlantı hattı güç değişimlerine göre dalgalanmaların aşma değerlerini daha düşük tutarak daha iyi performans gösterdiği ve GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemlerine kıyasla tüm aşma değerlerini daha kısa sürede sönümlediği görülmektedir.

Üçüncü test sistemi, iki alanlı ve alanlarda ara ısıtmasız bir termik güç sistemi ve GES, RES içeren güç sistemlerine ilave olarak enerji depolama sistemleri içeren güç sistemleri kullanılarak oluşturulmuştur.

Üçüncü test sistemi birinci senaryo olarak Alan-1'de 20. saniyede 0,1 pu artan, 30. saniyede 0,1 pu azalan yük değişimi, 5. saniyede Alan-1'de 0,2 pu enerji üretimine başlayan GES ve 8. saniyede Alan-2'de 0,05 pu enerji üretimine başlayan RES içeren güç sistemi, 5. saniyede 0,1 pu enerji depolamaya başlayan enerji depolama sistemlerini içeren güç sistemi için BPA, GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemleri kullanılarak sistem performansı incelenmiştir. Alan-1 için frekans değişimleri incelendiğinde 5. saniyedeki enerji üretim artışına bağlı olarak bu bölümde frekans yükselmiş olup maksimum aşma değeri olarak BPA; BA'dan %30,0, PSO'dan %30,3, GKO'dan %41,6 daha iyi performans göstermiştir. 15. saniyeden sonra enerji depolama sistemlerini içeren

güç sistemi enerji depolamasını tamamlamasıyla frekansta tekrar yükselme meydana gelmiştir. Buna bağlı olarak bu bölüm için maksimum aşma değeri olarak BPA; BA'dan %32,2, PSO'dan %30,3, GKO'dan %27,5 daha iyi performans göstermiştir. 20. saniyede 0,1 pu artan yük değişimi enerji depolama sistemlerini içeren güç sistemi tarafından karşılanmakta olup bu bölüm için minimum aşma değeri olarak BPA; BA'dan %23,5, PSO'dan %27,7, GKO'dan %22,0 daha iyi performans göstermiştir. 30. saniyede 0,1 pu azalan yük değişimi ve enerji depolama sistemlerini içeren güç sisteminin depoladığı enerjinin tükenmesine bağlı olarak bu bölüm için maksimum aşma değeri olarak BPA; BA'dan %25,4, PSO'dan %28,3, GKO'dan %20,8 daha iyi performans göstermiştir. BPA optimizasyon yönteminin, bağlantı hattı güç değişimlerine göre dalgalanmaların aşma değerlerini daha düşük tutarak daha iyi performans gösterdiği ve GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemlerine kıyasla tüm aşma değerlerini daha kısa sürede sönümlendiği görülmektedir.

Çalışmanın sonuçları göz önünde bulundurulduğunda GKO, PSO ve BA optimizasyon yöntemlerine kıyasla hem literatürde çokça referans verilen test sistemi üzerinde ve hem de daha kompleks ve zor sistemler olan güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynakları ile enerji depolama sistemlerinin kullanıldığı güç sistemlerinde daha düşük minimum/maksimum aşım ve daha hızlı yerleşme süresine sahip olması nedeniyle BPA, yük frekansı kontrolü için başarılı ve etkili bir alternatif çözüm olarak değerlendirilebilir.

Bu tezde sunulan analizlerin ve sonuçların, yük frekans kontrolü ile ilgili gelecekteki araştırmalara ışık tutması ve referans sağlaması beklenmektedir. Gelecekteki araştırmalar, yük frekansı kontrol süreçlerinin etkinliğini artırmak için yeni kontrolör tasarımları geliştirmenin yanı sıra mevcut tekniklerin güçlü yönlerini entegre eden hibrit optimizasyon yöntemleri oluşturmaya ve yeni optimizasyon teknikleri geliştirmeye odaklanmalıdır. Ayrıca yaygınlıklarının artmasından dolayı, elektrikli arabaların yük frekansı yönetim sistemlerine entegre edilerek şebeke ve sistem performansı üzerindeki etkisini analiz etmeye odaklanması planlanmaktadır.

9. KAYNAKLAR

- [1] H. Jiang, Y. Zhang, & E. Muljadi, *New Technologies for Power System Operation and Analysis*, 1. baskı, Academic Press, 2020.
- [2] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, 1. baskı, McGraw-Hill, New York, A.B.D., ss. 601-620, 1994.
- [3] H. Bevrani, *Robust Power System Frequency Control*, 1. baskı, Springer, New York, 2009.
- [4] A. Fathy, D. Yousri, H. Rezk, S. B. Thanikanti & H.M. Hasanien, “A robust fractional-order PID controller based load frequency control using modified hunger games search optimizer,” *Energies*, c. 15, sayı 361, 2022.
- [5] Y.V. Hote & S. Jain, “PID controller design for load frequency control: Past, present and future challenges,” *IFAC-PapersOnLine*, c. 51, sayı 4, ss. 604-609, 2018.
- [6] SHURA, “Türkiye elektrik sistemine yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu,” *SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi Raporu*, Türkiye, 2022.
- [7] T. Kerdphol, F. S. Rahman, M. Watanabe, Y. Mitani, D. Turschner & H. P. Beck, “Enhanced virtual inertia control based on derivative technique to emulate simultaneous inertia and damping properties for microgrid frequency regulation,” *IEEE Access*, c. 7, ss. 14422-14433, 2019.
- [8] H. H. Alhelou, M. E. Hamedani-Golshan, R. Zamani, E. Heydarian-Forushani & P. Siano, “Challenges and opportunities of load frequency control in conventional, modern and future smart power systems: a comprehensive review,” *Energies*, c. 11, sayı 10, ss. 2497, 2018.
- [9] J. Fang, H. Li, Y. Tang & F. Blaabjerg, “On the inertia of future more-electronics power systems,” *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, c. 7, sayı 4, ss. 2130-2146, 2019.
- [10] E. E. Ejegi, “Model predictive based load frequency control studies in a deregulated environment,” Doktora Tezi, University of Sheffield, Sheffield, 2017.
- [11] F. Díaz-González, M. Hau, A. Sumper & O. Gomis-Bellmunt, “Participation of wind power plants in system frequency control: Review of grid code requirements and control methods,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 34, ss. 551-564, 2014.

- [12] A. Oshnoei, R. Khezri & S. M. Muyeen, "Model predictive-based secondary frequency control considering heat pump water heaters," *Energies*, c. 12, sayı 3, ss. 411, 2019.
- [13] M. Khan & H. Sun, "Complete provision of MPC-based LFC by electric vehicles with inertial and droop support from DFIG-based wind farm," *IEEE Transactions on Power Delivery*, c. 37, sayı 2, ss. 716-726, 2022.
- [14] T. Chen, J. Guo, B. Chaudhuri & S. Y. Hui, "Virtual inertia from smart loads," *IEEE Transactions on Smart Grid*, c. 11, sayı 5, ss. 4311-4320, 2020b.
- [15] S. Yan, Z. Gu, J. H. Park, X. Xie & C. Dou, "Probability-density-dependent load frequency control of power systems with random delays and cyber-attacks via circuit implementation," *IEEE Transactions on Smart Grid*, c. 13, sayı 6, ss. 4837-4847, 2022.
- [16] T. Kerdpol, F. S. Rahman, Y. Mitani, M. Watanabe & S. Küfeoğlu, "Robust virtual inertia control of an islanded microgrid considering high penetration of renewable energy," *IEEE Access*, c. 6, ss. 625-636, 2017.
- [17] R. Khezri, A. Oshnoei, M. Tarafdar Hagh & S. M. Muyeen, "Coordination of heat pumps, electric vehicles and AGC for efficient LFC in a smart hybrid power system via SCA-based optimized FOPID controllers," *Energies*, c. 11, sayı 2, ss. 420, 2018.
- [18] A. Oshnoei, R. Khezri, S. M. Muyeen & F. Blaabjerg, "On the contribution of wind farms in automatic generation control: Review and new control approach," *Applied Sciences*, c. 8, sayı 10, ss. a848, 2018.
- [19] A. Aziz, A. Than Oo & A. Stojcevski, "Frequency regulation capabilities in wind power plant," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, c. 26, ss. 47-76, 2018.
- [20] S. J. Zhou, H. B. Zeng & H. Q. Xiao, "Load frequency stability analysis of time-delayed multi-area power systems with EV aggregators based on Bessel-Legendre inequality and model reconstruction technique," *IEEE Access*, c. 8, ss. 99948-99955, 2020.
- [21] B. Hartmann, I. Vokony & I. Táci, "Effects of decreasing synchronous inertia on power system dynamics—Overview of recent experiences and marketization of services," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, c. 29, sayı 12, ss. e12128, 2019.
- [22] Elektrik Mühendisleri Odası. (21 Aralık 2016). "Türkiye elektrik sistemi ve sistem sorunları," Erişim: https://www.emo.org.tr/ekler/91c64a4f58f3c88_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sube=14.
- [23] ENTSO-E, "Report on blackout in Turkey on 31st march 2015", *ENTSO-E Report*, 2015.

- [24] D. M. McGreevy, C. MacDougall, D. M. Fisher, M. Henley & F. Baum, "Expediting a renewable energy transition in a privatised market via public policy: The case of South Australia 2004-18," *Energy Policy*, c. 148, ss. 111940, 2021.
- [25] R. Yan, N. A. Masood, T. Kumar Saha, F. Bai & H. Gu, "The anatomy of the 2016 South Australia blackout: A catastrophic event in a high renewable network," *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 33, sayı 5, ss. 5374-5388, 2018.
- [26] AEMO, "Black system South Australia 28 September 2016: Final report," *Australian Energy Market Operator*, Australia, 2017.
- [27] G. Zhang, H. Zhong, Z. Tan, T. Cheng, Q. Xia & C. Kang, "Texas electric power crisis of 2021 warns of a new blackout mechanism," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, c. 8, sayı 1, ss. 1-9, 2022.
- [28] J. W. Busby, K. Baker, M. D. Bazilian, A. Q. Gilbert, E. Grubert, V. Rai, J. D. Rhodes, S. Shidore, C. A. Smith & M. E. Webber, "Cascading risks: Understanding the 2021 winter blackout in Texas," *Energy Research & Social Science*, c. 77, ss. 102106, 2021.
- [29] D. Wu, X. Zheng, Y. Xu, D. Olsen, B. Xia, C. Singh & L. Xie, "An open-source model for simulation and corrective measure assessment of the 2021 Texas power outage," *Advances in Applied Energy*, c. 4, ss. 100056, 2021.
- [30] A. Moretti, C. Pitas, G. Christofi, E. Bué & M. G. Francescato, "Grid integration as a strategy of MED-TSO in the mediterranean area in the framework of climate change and energy transition," *Energies*, c. 13, sayı 20, ss. 5307, 2020.
- [31] R. Khezri, A. Oshnoei, S. Oshnoei, H. Bevrani & S. M. Muyeen, "An intelligent coordinator design for GCSC and AGC in a two-area hybrid power system," *Applied Soft Computing*, c. 76, ss. 491-504, 2019.
- [32] Q. Shi, F. Li, Q. Hu & Z. Wang, "Dynamic demand control for system frequency regulation: Concept review, algorithm comparison, and future vision," *Electric Power Systems Research*, c. 154, ss. 75-87, 2018.
- [33] K. Zare, M. T. Hagh & J. Morsali, "Effective oscillation damping of an interconnected multi-source power system with automatic generation control and TCSC," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 65, ss. 220-230, 2015.
- [34] S. A. Hasen, Ş. Sönmez & S. Ayasun, "Enhancement of stability delay margins by virtual inertia control for microgrids with time delay," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, c. 30, sayı 6, ss. 2221-2236, 2022.

- [35] M. H. Khooban, "An Optimal non-integer MPC-based load frequency control for modern AC power grids with V2G technology," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, c. 36, sayı 2, ss. 1336-1346, 2020.
- [36] N. Sockeel, J. Gafford, B. Papari & M. Mazzola, "Virtual inertia emulator-based model predictive control for grid frequency regulation considering high penetration of inverter-based energy storage system," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, c. 11, sayı 4, ss. 2932-2939, 2020.
- [37] D. Katipoğlu, Ş. Sönmez, S. Ayasun & A. Naveed, "Impact of participation ratios on the stability delay margins computed by direct method for multiple-area load frequency control systems with demand response," *Automatika*, c. 63, sayı 1, ss. 185-197, 2022.
- [38] T. Clarke, T. Slay, C. Eustis & R. B. Bass, "Aggregation of residential water heaters for peak shifting and frequency response services," *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, c. 7, ss. 22-30, 2020.
- [39] X. Wu, J. He, Y. Xu, J. Lu, N. Lu & X. Wang, "Hierarchical control of residential HVAC units for primary frequency regulation," *IEEE Transactions on Smart Grid*, c. 9, sayı 4, ss. 3844-3856, 2018.
- [40] H. N. T. Nguyen, C. Zhang & J. Zhang, "Dynamic demand control of electric vehicles to support power grid with high penetration level of renewable energy," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, c. 2, sayı 1, ss. 66-75, 2016.
- [41] S. A. Pourmousavi & M. H. Nehrir, "Introducing dynamic demand response in the LFC model," *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 29, sayı 4, ss. 1562-1572, 2014.
- [42] S. Küfeoğlu & D. Melchiorre, "Electric vehicles and batteries as domestic storage units in the United Kingdom," *In 2020 2nd International Conference on Smart Power Internet Energy Systems (SPIES)*, Bangkok, Tayland, ss. 199-204, 15-18 Eylül 2020.
- [43] A. Naveed, Ş. Sönmez & S. Ayasun, "Impact of electric vehicle aggregator with communication time delay on stability regions and stability delay margins in load frequency control system," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, c. 9, sayı 3, ss. 595-601, 2021a.
- [44] H. R. Kermani, M. V. Dahraie & H. R. Najafi, "Frequency control of a microgrid including renewable resources with energy management of electric vehicles," *In 2016 Iranian Conference on Renewable Energy & Distributed Generation (ICREDG)*, Mashhad, Iran, ss. 114-118, 02-03 Nisan 2016.
- [45] S. Chen, T. Zhang, H. B. Gooi, R. D. Masiello & W. Katzenstein, "Penetration rate and effectiveness studies of aggregated BESS for frequency regulation," *IEEE Transactions on Smart Grid*, c. 7, sayı 1, ss. 167-177, 2016.

- [46] Y. Tang, J. Yang, J. Yan & H. He, "Intelligent load frequency controller using GrADP for island smart grid with electric vehicles and renewable resources," *Neurocomputing*, c. 170, ss. 406-416, 2015.
- [47] K. Peddakapu, M. R. Mohamed, P. Srinivasarao, Y. Arya, P. K. Leung, & D. J. K. Kishore, "A state-of-the-art review on modern and future developments of AGC/LFC of conventional and renewable energy-based power systems," *Renewable Energy Focus*, c. 43, ss. 146-171, 2022.
- [48] L. Janota, T. Králík & J. Knápek, "Second life batteries used in energy storage for frequency containment reserve service," *Energies*, c. 13, sayı 23, ss. 6396, 2020.
- [49] K. S. Ko & D. K. Sung, "The effect of cellular network-based communication delays in an EV aggregator's domain on frequency regulation service," *IEEE Transactions on Smart Grid*, c. 10, sayı 1, ss. 65-73, 2019.
- [50] L. Liu, H. Matayoshi, M. E. Lotfy, M. Datta & T. Senjyu, "Load frequency control using demand response and storage battery by considering renewable energy sources," *Energies*, c. 11, sayı 12, ss. 3412, 2018.
- [51] Z. A. Obaid, L. M. Cipcigan, L. Abraham & M. T. Muhssin, "Frequency control of future power systems: Reviewing and evaluating challenges and new control methods," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, c. 7, sayı 1, ss. 9-25, 2019.
- [52] H. Jia, X. Li, Y. Mu, C. Xu, Y. Jiang, X. Yu, J. Wu & C. Dong, "Coordinated control for EV aggregators and power plants in frequency regulation considering time-varying delays," *Applied Energy*, c. 210, ss. 1363-1376, 2018.
- [53] K. S. Ko, & D. K. Sung, "The effect of EV aggregators with time-varying delays on the stability of a load frequency control system," *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 33, sayı 1, ss. 669-680, 2018.
- [54] H. Bevrani, A. Ghosh & G. Ledwich, "Renewable energy sources and frequency regulation: Survey and new perspectives," *IET Renewable Power Generation*, c. 4, sayı 5, ss. 438-457, 2010.
- [55] Y. Zhang, X. Liu & B. Qu, "Distributed model predictive load frequency control of multi-area power system with DFIGs," *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, c. 4, sayı 1, ss. 125-135, 2017.
- [56] H. Shayeghi, H. A. Shayanfar & A. Jalili, "Load frequency control strategies: A state-of-the-art survey for the researcher," *Energy Conversion and Management*, c. 50, sayı 2, ss. 344- 353, 2009.
- [57] H. Wang & Z. S. Li, "Multi-area load frequency control in power system integrated with wind farms using fuzzy generalized predictive control method," *IEEE Transactions on Reliability*, ss. 1-11, 2022.

- [58] C. E. Fosha & O. I. Elgerd, "The megawatt-frequency control problem: A new approach via optimal control theory," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, c. 89, sayı 4, ss. 563-577, 1970.
- [59] M. Ahmadi Kamarposhti, H. Shokouhandeh, M. Alipur, I. Colak, H. Zare & K. Eguchi, "Optimal designing of fuzzy-PID controller in the load-frequency control loop of hydro-thermal power system connected to wind farm by HVDC lines," *IEEE Access*, c. 10, ss. 63812-63822, 2022.
- [60] Q. Zhong, J. Yang, K. Shi & S. Zhong, "Design of observer-based discrete-type PID control for reconstructed jump model of interconnected power system under hybrid attacks," *IEEE Transactions on Smart Grid*, ss. 1-1, 2022.
- [61] Ş. Sönmez & S. Ayasun, "Computation of PI controllers ensuring desired gain and phase margins for two-area load frequency control system with communication time delays," *Electric Power Components and Systems*, c. 46, sayı 8, ss. 938-947, 2018a.
- [62] M. Hajiakbari Fini & M. E. Hamedani Golshan, "Determining optimal virtual inertia and frequency control parameters to preserve the frequency stability in islanded microgrids with high penetration of renewables," *Electric Power Systems Research*, c. 154, ss. 13-22, 2018.
- [63] A. Hassan, M. Aly, A. Elmelegi, L. Nasrat, M. Watanabe & E. A. Mohamed, "Optimal frequency control of multi-area hybrid power system using new cascaded TIDPIλDμN controller incorporating electric vehicles," *Fractal and Fractional*, c. 6, sayı 10, ss. 548, 2022.
- [64] Z. Chen, X. Bu & J. Guo, "Model-free adaptive sliding mode control for interconnected power systems under DoS attacks," *In 2022 IEEE 11th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS)*, Chengdu, Çin, ss. 487-492, 03-05 Ağustos 2022.
- [65] M. Negahban, M. V. Ardalani, M. Mollajafari, E. Akbari, M. Talebi & E. Pouresmaeil, "A novel control strategy based on an adaptive fuzzy model predictive control for frequency regulation of a microgrid with uncertain and time-varying parameters," *IEEE Access*, c. 10, ss. 57514-57524, 2022.
- [66] X. Qiu, Y. Wang, H. Zhang & X. Xie, "Resilient model free adaptive distributed LFC for multi-area power systems against jamming attacks," *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, ss. 1-10, 2021.
- [67] M. Kumar & Y. V. Hote, "Robust PID2 controller design for perturbed load frequency control of an interconnected time-delayed power systems," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, c. 29, sayı 6, ss. 2662-2669, 2021.
- [68] K. Ullah, A. Basit, Z. Ullah, S. Aslam & H. Herodotou, "Automatic generation control strategies in conventional and modern power systems: A comprehensive overview," *Energies*, c. 14, sayı 9, ss. 2376, 2021.

- [69] H. Bevrani, H. Golpîra, A. R. Messina, N. Hatziargyriou, F. Milano & T. Ise, "Power system frequency control: An updated review of current solutions and new challenges," *Electric Power Systems Research*, c. 194, ss. 107114, 2021.
- [70] Y. Arya, "Automatic generation control of two-area electrical power systems via optimal fuzzy classical controller," *J Franklin Institute*, c. 355, sayı 5, ss. 2662–2688, 2018.
- [71] S. M. Abd-Elazim & E. S. Ali, "Load frequency controller design of a two-area system composing of PV grid and thermal generator via firefly algorithm," *Neural Computing and Applications*, c. 30, sayı 2, ss. 607–616, 2018.
- [72] E. Sahin, "Design of an Optimized Fractional High Order Differential Feedback Controller for Load Frequency Control of a Multi-Area Multi-Source Power System with Nonlinearity," *IEEE Access*, c. 8, ss. 12327–12342, 2020.
- [73] A. Khanjanzadeh, S. Soleymani, B. Mozafari, & M. Fotuhi, "Integrated multi-area power system with HVDC tie-line to enhance load frequency control and automatic generation control," *Electrical Engineering*, c. 102, sayı 3, ss. 1223–1239, 2020.
- [74] Y. Arya ve N. Kumar, "AGC of a multi-area multi-source hydrothermal power system interconnected via AC/DC parallel links under deregulated environment," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, c. 75, ss. 127–138, 2016.
- [75] S. Davtalab, B. Tousi, & D. Nazarpour, "Optimized Intelligent Coordinator for Load Frequency Control in a Two-Area System with PV Plant and Thermal Generator," *IETE Journal of Research*, 2020.
- [76] M. S. Alam, F. S. Al-Ismaïl, & M. A. Abido, "Pv/wind-integrated low-inertia system frequency control: Pso-optimized fractional-order pi-based smes approach," *Sustainability (Switzerland)*, c. 13, sayı 14, 2021.
- [77] H. Gözde, M. C. Taplamacıoğlu, İ. Kocaarslan & M. A. Şenol, "İki Bölge Ara-Isıtmalı Termal Güç Sisteminin Yük-Frekans Kontrolü İçin Parçacık Sürü Optimizasyonu Tabanlı PI-Kontrolör," *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, c. 30, sayı 1, ss. 13–21, 2010.
- [78] A. A. Abou El-Ela, R. A. El-Sehiemy, A. M. Shaheen, & A. E. G. Diab, "Design of cascaded controller based on coyote optimizer for load frequency control in multi-area power systems with renewable sources," *Control Engineering Practice*, c. 121, 2022.
- [79] K. Ranjitha, P. Sivakumar, & M. Monica, "Load frequency control based on an improved Chimp optimization algorithm using adaptive weight strategy," *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 2022.

- [80] M. Ali, H. Kotb, K. M. Aboras, & N. H. Abbasy, "Design of cascaded pi-fractional order PID controller for improving the frequency response of hybrid microgrid system using gorilla troops optimizer," *IEEE Access*, c. 9, ss. 150715–150732, 2021.
- [81] Y. Arya, "AGC of restructured multi-area multi-source hydrothermal power systems incorporating energy storage units via optimal fractional-order fuzzy PID controller," *Neural Computing and Applications*, c. 31, sayı 3, ss. 851–872, 2019.
- [82] Z. Civelek, G. Gorel, M. Luy, N. Barisci, & E. Cam, "Effects on load-frequency control of a solar power system with a two-area interconnected thermal power plant and its control with a new BFA algorithm," *Elektronika ir Elektrotechnika*, c. 24, sayı 6, ss. 3–10, 2018.
- [83] A. M. Agwa, "Equilibrium optimization algorithm for automatic generation control of interconnected power systems," *Przegląd Elektrotechniczny*, c. 96, sayı 9, ss. 143–148, 2020.
- [84] E. M. Ahmed, A. Elmelegi, A. Shawky, M. Aly, W. Alhosaini, & E. A. Mohamed, "Frequency Regulation of Electric Vehicle-Penetrated Power System Using MPA-Tuned New Combined Fractional Order Controllers," *IEEE Access*, c. 9, ss. 107548–107565, 2021.
- [85] A. H. A. Elkasem, M. Khamies, G. Magdy, I. B. M. Taha, & S. Kamel, "Frequency stability of ac/dc interconnected power systems with wind energy using arithmetic optimization algorithm-based fuzzy-pid controller," *Sustainability (Switzerland)*, c. 13, sayı 21, 2021.
- [86] E. Çelik, N. Öztürk, Y. Arya, & C. Ocak, "(1 + PD)-PID cascade controller design for performance betterment of load frequency control in diverse electric power systems," *Neural Computing and Applications*, c. 33, sayı 22, ss. 15433–15456, 2021.
- [87] H. Abubakr, M. Hussein, T. H. Mohamed, & M. M. Hussein, "Frequency Stabilization of Two Area Power System Interconnected by AC/DC Links using Jaya Algorithm," *International Journal of Advanced Science and Technology*, c. 29, sayı 1, ss. 548–559, 2020.
- [88] N. C. Patel & B. K. Sahu, "Design and Implementation of FIPID Controller for LFC of Multi-unit Multi-source Linear/Non-linear Power System," *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, c. 6, sayı 1, 2021.
- [89] B. Khokhar, S. Dahiya, & K. P. Singh Parmar, "A Robust Cascade Controller for Load Frequency Control of a Standalone Microgrid Incorporating Electric Vehicles," *Electric Power Components and Systems*, c. 48, sayı 6–7, ss. 711–726, 2020.
- [90] M. Raju, L. C. Saikia, & N. Sinha, "Load frequency control of a multi-area system incorporating distributed generation resources, gate controlled series capacitor

along with high-voltage direct current link using hybrid ALO-pattern search optimised fractional order controller,” *IET Renewable Power Generation*, c. 13, sayı 2, ss. 330–341, 2019.

- [91] Z. Y. Yilmaz, G. Bal, E. Çelik, N. Öztürk, U. Güvenç, & Y. Arya, “A new objective function design for optimization of secondary controllers in load frequency control,” *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, c. 36, sayı 4, ss. 2053–2067, 2021.
- [92] M. G. O. Abdelfadeel, “Modeling of Automatic Generation Control and Automatic Voltage Regulator of Interconnected Thermal Power System,” M.Sc. Thesis, Department of Electrical Engineering, Sudan University of Science and Technology College of Graduate Studies, Sudan, 2017.
- [93] Z. A. O. Al-Obaidi, “Control of Frequency in Future Power Systems,” PhD Thesis, School of Engineering, Cardiff Univesity, 2018.
- [94] S. O. O. A. Rahim, “Load Freqecy Control for a Two Area Power System,” B.Sc. Thesis, Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Khartoum, 2017.
- [95] K. P. S. Parmar, “State Space Based Load Frequency Control of Multi-Area Power Systems,” Phd Thesis, Department of Electronics and Electrical Engineering, Indian Institute of Technology Guwahati, Guwahati, India, 2013.
- [96] S. Ekka, “Automatic Load Frequency Control of Multi Area Power Systems,” M.Sc. Thesis, Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Odisha, India, 2014.
- [97] P. Takhur, “An Analysis of Robust Fuzzy - PID Control for AGC Systems Focusing On PID Tuning and Design,” PhD Thesis, School of Electrical and Electronic Engineering, University of Johannesburg, 2015.
- [98] C. Zobi, “Yük-Frekans Kontrolunun İncelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 1996.
- [99] O. O. Darçın, “Güç Sistemlerinde Yük-Frekans Kontrolü ve Sınır Ağı Kontrol Uygulaması,” Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, Türkiye, 2004.
- [100] H. Çelik, “Güç Sistemlerinde Frekans Kontrolü,” Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Eğitimi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye, 2010.
- [101] B. Tabakoğlu, “Üç Alanlı Güç Sisteminde Genetik Algoritma ile Otomatik Üretim Kontrolü,” Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2009.

- [102] F. A. Y. Alhayani, "Tuning of PID Load Frequency Control Using Elephant Herding Optimization Method for Four Area Power System," M.Sc. Thesis, Electrical and Computer Engineering, Altınbas University, Istanbul, Turkey, 2019.
- [103] S. J. Safi, "Güç Sistemin Frekans Kontrolü ve Modellenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2014.
- [104] Z. Y. Yılmaz, "Güç Sistemlerinde Yük-Frekans Kontrolünde PID Denetleyici ve Parametrelerinin Simbiyotik Organizmalar Arama Algoritması ile Ayarı," Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2020.
- [105] O. Alıç, "Güç Sistemlerinde Optimizasyon Tabanlı Bulanık Mantık Denetleyici ile Yük Frekans Kontrolü," Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2014.
- [106] H. Sezer, "Yenilenebilir Enerji Kaynakları İçeren Zaman Gecikmeli Yük Frekans Kontrol Sisteminin Kararlılık Analizi," Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye, Türkiye, 2016.
- [107] E. Çam, "Güç Sistemlerinde Yeni Kontrol Yöntemlerinin Uygulanması," Doktora Tezi, Makina Anabilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, Türkiye, 2004.
- [108] G. Görel, "Güneş Enerji Sistemli İki Bölge Enterkonnekte Şebekede Modern Kontrol Teknikleri ile Yük-Frekans Kontrolü," Doktora Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, Türkiye, 2017.
- [109] Z. Hamodat, "Automated Generation Control of Multiple Area Electrical System with an Availability-Based Tariff Pricing Scheme Regulated by Whale Optimized Fuzzy PID Controller," PhD Thesis, Electrical and Computer Engineering, Altınbas University, Istanbul, Turkey, 2021.
- [110] H. Gözde, "Güç Sistemlerinde Yapay Arı Kolonisi Algoritması Yöntemi ile Yük-Frekans Kontrolü Optimizasyonu," Doktora Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2010.
- [111] F. A. Hashim, E. H. Houssein, K. Hussain, M. S. Mabrouk, & W. Al-Atabany, "Honey Badger Algorithm: New metaheuristic algorithm for solving optimization problems," *Mathematics and Computers in Simulation*, c. 192, ss. 84–110, 2022.
- [112] S. Mirjalili & A. Lewis, "The Whale Optimization Algorithm," *Advances in Engineering Software*, c. 95, ss. 51–67, 2016.
- [113] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, & A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," *Advances in Engineering Software*, c. 69, ss. 46–61, 2014.

- [114] R. Eberhart & J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory," *In: MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. IEEE*, ss. 39-43, 1995.
- [115] G. Dileep, "A survey on smart grid technologies and applications," *Renewable Energy*, c. 146, ss. 2589-2625, 2020.
- [116] P. Duffy, C. Fitzpatrick, T. Conway & R. P. Lynch, "Energy sources and supply grids – The growing need for storage," *Environmental Science and Technology*, c. 46, ss. 1-41, 2018.
- [117] ENTSO-E, "UCTE OH-Policy 1: load-frequency control," *European Networks of Transmission System Operators for Electricity Report*, 2009.
- [118] X. Fang, S. Misra, G. Xue & D. Yang, "Smart grid — The new and improved power grid: A survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, c. 14, sayı 4, ss. 944-980, 2012.
- [119] S. Islam, J. Dias & A. Sunda-Meya, "Distributed cooperative LFC protocols for regulation synchronization for networked multi-area power grid networks," *In IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Toronto, ON, Kanada, ss. 1-6, 13-16 Ekim 2021.
- [120] M. T. Söylemez, N. Munro & H. Baki, "Fast calculation of stabilizing PID controllers," *Automatica*, c. 39, sayı 1, ss. 121-126, 2003.
- [121] N. Tan, I. Kaya, C. Yeroglu & D. P. Atherton, "Computation of stabilizing PI and PID controllers using the stability boundary locus," *Energy Conversion and Management*, c. 47, sayı 18-19, ss. 3045-3058, 2006.
- [122] D. H. Tungadio & Y. Sun, "Load frequency controllers considering renewable energy integration in power system," *Energy Reports*, c. 5, ss. 436-453, 2019.
- [123] E. Yalçın, E. Çam, T. Vardar & M. Lüy, "PID kontrolör ile iki bölge güç sistemlerinde yük frekans kontrolünün incelenmesi," *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, c. 5, ss. 1-5, 2013.
- [124] M. Saka, M. Çoban, İ. Eke, S. S. Tezcan & M. C. Taplamacıoğlu, "A novel hybrid global optimization algorithm having training strategy: hybrid Taguchi-vortex search algorithm," *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, c. 29, ss. 1908- 1928, 2021.
- [125] A. K. Barisal, "Comparative performance analysis of teaching learning based optimization for automatic load frequency control of multi-source power systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 66, ss. 67-77, 2015.

- [126] D. Guha, P. K. Roy & S. Banerjee, "Load frequency control of interconnected power system using grey wolf optimization," *Swarm and Evolutionary Computation*, c. 27, ss. 97-115, 2016.
- [127] D. Guha, P. K. Roy & S. Banerjee, "Symbiotic organism search algorithm applied to load frequency control of multi-area power system," *Energy Systems*, c. 9, ss. 439-468, 2017.
- [128] H. Saadat, *Power System Analysis*, 1. baskı, New York: McGraw-Hill, 1999.
- [129] A. Wood & B. Wollenberg, *Power Generation Operation and Control*, 2. baskı, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [130] F. Zhu, X. Zhou, Y. Zhang, D. Xu & J. Fu, "A load frequency control strategy based on disturbance reconstruction for multi-area interconnected power system with hybrid energy storage system," *Energy Reports*, c. 7, ss. 8849-8857, 2021.
- [131] H. H. Alhelou, M. E. H. Golshan & N. D. A. Hatziargyriou, "Decentralized functional observer based optimal LFC Considering unknown inputs, uncertainties, and cyber-attacks," *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 34, sayı 6, ss. 4408-4417, 2019.
- [132] D. Yu, H. Zhu, W. Han & D. Holburn, "Dynamic multi agent-based management and load frequency control of PV/Fuel cell/wind turbine/CHP in autonomous microgrid system," *Energy*, c. 173, ss. 554-568, 2019.
- [133] K. Gholami & M. H. Parvaneh, "A mutated salp swarm algorithm for optimum allocation of active and reactive power sources in radial distribution systems," *Applied Soft Computing Journal*, c. 85, ss. 1-14, 2019.
- [134] B. Kuo, *Otomatik kontrol sistemleri*, 7.baskı, İstanbul: Literatür Yayınları, 2006
- [135] H. Hurma, "PID kontrolör ve PLC uygulaması," Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1998.
- [136] M. Khamies, G. Magdy, A. Selim, & S. Kamel, "An improved Rao algorithm for frequency stability enhancement of nonlinear power system interconnected by AC/DC links with high renewables penetration," *Neural Computing and Applications*, c. 34, sayı 4, ss. 2883–2911, 2022.
- [137] A. B. Campo, "PID Control Design," *A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications*, 2012, böl. 1
- [138] E. Çelik, "Design of new fractional order PI–fractional order PD cascade controller through dragonfly search algorithm for advanced load frequency control of power systems," *Soft Computing*, c. 25, sayı 2, ss. 1193–1217, 2021.

- [139] M. Gheisarnejad, "An effective hybrid harmony search and cuckoo optimization algorithm based fuzzy PID controller for load frequency control," *Soft Computing*, c. 65, ss. 121–138, 2018.
- [140] B. Abdollahzadeh, F. Soleimanian Gharehchopogh, & S. Mirjalili, "Artificial gorilla troops optimizer: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems," *International Journal of Intelligent Systems*, c. 36, sayı 10, ss. 5887–5958, 2021.
- [141] Y. Meraihi, A. B. Gabis, S. Mirjalili, & A. Ramdane-Cherif, "Grasshopper optimization algorithm: Theory, variants, and applications," *IEEE Access*, c. 9, ss. 50001–50024, 2021.
- [142] B. Abdollahzadeh, F. S. Gharehchopogh, & S. Mirjalili, "African vultures optimization algorithm: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems," *Computers and Industrial Engineering*, c. 158, 2021.
- [143] H. Karami, M. V. Anaraki, S. Farzin, & S. Mirjalili, "Flow Direction Algorithm (FDA): A Novel Optimization Approach for Solving Optimization Problems," *Computers and Industrial Engineering*, c. 156, 2021.
- [144] A. Faramarzi, M. Heidarinejad, S. Mirjalili, & A. H. Gandomi, "Marine Predators Algorithm: A nature-inspired metaheuristic," *Expert Systems with Applications*, c. 152, 2020.
- [145] L. Abualigah, A. Diabat, S. Mirjalili, M. Abd Elaziz, & A. H. Gandomi, "The Arithmetic Optimization Algorithm," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, c. 376, 2021.
- [146] W. Zhao, L. Wang, & S. Mirjalili, "Artificial hummingbird algorithm: A new bio-inspired optimizer with its engineering applications," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, c. 388, 2022.
- [147] S. Mirjalili, "SCA: A Sine Cosine Algorithm for solving optimization problems," *Knowledge-Based Systems*, c. 96, ss. 120–133, 2016.
- [148] Y. Zhang, Z. Jin, & S. Mirjalili, "Generalized normal distribution optimization and its applications in parameter extraction of photovoltaic models," *Energy Conversion and Management*, c. 224, 2020.
- [149] S. Mirjalili, A. H. Gandomi, S. Z. Mirjalili, S. Saremi, H. Faris, & S. M. Mirjalili, "Salp Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems," *Advances in Engineering Software*, c. 114, ss. 163–191, 2017.
- [150] S. Mirjalili, "The ant lion optimizer," *Advances in Engineering Software*, c. 83, ss. 80–98, 2015.

- [151] S. Mirjalili, "Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm," *Knowledge-Based Systems*, c. 89, ss. 228–249, 2015.
- [152] F. A. Hashim, E. H. Houssein, M. S. Mabrouk, W. Al-Atabany, & S. Mirjalili, "Henry gas solubility optimization: A novel physics-based algorithm," *Future Generation Computer Systems*, c. 101, ss. 646–667, 2019.
- [153] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, & A. Hatamlou, "Multi-Verse Optimizer: a nature-inspired algorithm for global optimization," *Neural Computing and Applications*, c. 27, sayı 2, ss. 495–513, 2016.
- [154] S. Mirjalili, "Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems," *Neural Computing and Applications*, c. 27, sayı 4, ss. 1053–1073, 2016.
- [155] A. Faramarzi, M. Heidarinejad, B. Stephens, & S. Mirjalili, "Equilibrium optimizer: A novel optimization algorithm," c. 191, ss. 105190, 2020.
- [156] V. Heptner, "Mammals of the Soviet Union: Vol. 2, Part 1b: Carnivora (Weasels, Additional Species)", *Smithsonian Institution Libraries & The National Science Foundation*, 2001.
- [157] C. Andic, S. Ozumcan, A. Ozturk, & B. Turkay, "Honey Badger Algorithm Based Tuning of PID Controller for Load Frequency Control in Two-Area Power System Including Electric Vehicle Battery," *In 2022 4th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*, Kapadokya, Turkiye, 2022, ss. 307-310.
- [158] D. Kapner, T. Cook, E. Adelberger, J. Gundlach, B. R. Heckel, C. Hoyle & H. Swanson, "Tests of the gravitational inverse-square law below the dark-energy length scale," *Phys. Rev. Lett.* c. 98, sayı 2, ss. 021101, 2007.
- [159] C. Andic, E. Aydin, A. Ozturk, & B. Turkay, "The Application of HBA Technique to Economic Dispatch: A Case Study From Turkey," *In 2022 Global Energy Conference (GEC)*, Batman, Turkiye, 2022, ss. 258-261.
- [160] A. V. Akopyan, "Geometry of the cardioid," *Amer. Math. Monthly*, c. 122, sayı 2, ss. 144-150, 2015.
- [161] R. Eberhart & J. Kennedy, "Particle swarm optimization," *Proceedings of the IEEE international conference on neural networks*, 1995, ss. 1942-1948.
- [162] R. K. Sahu, S. Panda & G. T. C. Sekher, "A novel hybrid PSO–PS optimized fuzzy PI controller for AGC in multi area interconnected power system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 64, ss. 880-893, 2015.
- [163] U. K. Rout, R. K. Sahu & S. Panda, "Design and analysis of differential evolution algorithm based automatic generation control for interconnected power system," *Ain Shams Engineering*, c. 4, sayı 3, ss. 409-421, 2013.

- [164] S. Panda, B. Mohanty & P. K. Hota, “Hybrid BFOA–PSO algorithm for automatic generation control of linear and nonlinear interconnected power system,” *Applied Soft Computing*, c. 13, sayı 12, 4718–4730, 2013.
- [165] S. Ozumcan, A. Ozturk, M. Varan ve C. Andic, “A novel honey badger algorithm based load frequency controller design of a two-area system with renewable energy sources,” *Energy Reports*, c. 9, ss. 272-279, 2023.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Sercan ÖZÜMCAN

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2024
Y. Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2019
Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Dumlupınar Üniversitesi	2009
Lise		Düzce Anadolu Öğretmen Lisesi	2005

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR

C. Andic, **S. Ozumcan**, A. Ozturk ve M. Varan, “A novel sea horse optimizer based load frequency controller for two-area power system with PV and thermal units,” *International Journal of Robotics and Control Systems*, c. 4, sayı 2, ss. 606-627, 2024.

S. Ozumcan, A. Ozturk, M. Varan ve C. Andic, “A novel honey badger algorithm based load frequency controller design of a two-area system with renewable energy sources,” *Energy Reports*, c. 9, ss. 272-279, 2023.

C. Andic, **S. Ozumcan**, A. Ozturk and B. Turkay “Honey badger algorithm based tuning of PID controller for load frequency control in two-area power system including electric vehicle battery,” *2022 4th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*, Nevsehir, Türkiye, ss. 307-310, 2022.

S. Özümcan, A. Öztürk ve C. Andiç, “Honey badger algorithm for AGC of two-area power system,” *VII. Uluslararası Marmara Fen Bilimleri Kongresi - Güz (IMASCON21)*, Kocaeli, Türkiye, c. 1, ss. 2, 2021.

DİĞER YAYINLAR

C. Andiç, M. Dursun ve **S. Özümcan**, “Çift beslemeli asenkron generatörün back to back konvertör ile şebeke bağlantılı kontrolü,” *V. Uluslararası Marmara Fen Bilimleri Kongresi - Güz (IMASCON20)*, Kocaeli, Türkiye, c. 1, ss. 207-213, 2020.

