

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GÜÇ SİSTEMLERİNDE OPTİMİZASYON TABANLI BULANIK MANTIK
DENETLEYİCİ İLE YÜK FREKANS KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Müh. Oğuzkağan ALIÇ

**HAZİRAN 2014
TRABZON**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GÜÇ SİSTEMLERİNDE OPTİMİZASYON TABANLI BULANIK MANTIK
DENETLEYİCİ İLE YÜK FREKANS KONTROLÜ

Mühendis Oğuzkağan ALIÇ

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20.05.2014
Tezin Savunma Tarihi : 10.06.2014

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ

Trabzon 2014

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında
Oğuzkağan ALIÇ tarafından hazırlanan

GÜÇ SİSTEMLERİNDE OPTİMİZASYON TABANLI BULANIK MANTIK
DENETLEYİCİ İLE YÜK FREKANS KONTROLÜ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 20 / 05 / 2014 gün ve 1554 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda

YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ

Üye : Prof. Dr. Cemil GÜRÜNLÜ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Tuğrul ÇAVDAR

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı kapsamında yapılan bu çalışmada optimizasyon tabanlı bulanık mantık denetleyici ile güç sistemlerinde yük frekans kontrolü işlemi gerçekleştirilmiştir.

Yapmış olduğum bu çalışmanın başından sonuna kadar akademik bilgi ve birikimini benimle paylaşan, mesleki etik kurallarının uygulanmasında kıymetli fikirlerini ve tecrübelerini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ tarafından kurulan ve önderliğinde çalışmalarını yürüten POWENCON (Power, Energy and Control) Araştırma grubunun çok değerli üyelerine ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak bugünlere gelmem için maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen çok değerli aileme sonsuz şükran, saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Oğuzkağan ALIÇ

Trabzon 2014

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Güç Sistemlerinde Optimizasyon Tabanlı Bulanık Mantık Denetleyici ile Yük Frekans Kontrolü” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 10/06/2014

Oğuzkağan ALIÇ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ	XII
KISALTMALAR DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Literatür Araştırması.....	3
1.3. Teorik Alt Yapı ve Modelleme.....	7
1.3.1. Güç Sistemlerinin Kontrolü.....	7
1.3.2. Yük Frekans Kontrolü	10
1.3.3. Frekansın Aktif Güçle Değişimi.....	11
1.3.4. Yük Frekans Kontrolü Çevrimleri.....	14
1.3.4.1. Birincil Kontrol Çevrimi	14
1.3.4.2. İkincil Kontrol Çevrimi	18
1.3.5. Güç Sisteminin Modellenmesi	21
1.3.5.1. Türbin Modeli.....	22
1.3.5.2. Generatör Modeli.....	23
1.3.5.3. Yük Modeli.....	26
1.3.5.4. Hidrolik Yükselteç Modeli	27
1.3.5.5. Hız Regülatörü Modeli	28
1.3.5.6. Kontrol Alanı Modeli	29
1.3.5.7. Tek Bölge Güç Sistemi Modeli	31
1.3.5.8. Bağlantı Hattı Modeli	33
1.3.5.9. Alan Kontrol Hatası.....	36

1.3.5.10.	İki Bölge Güç Sisteminin Modellenmesi	36
1.3.6.	Bağlantı Hattı Kontrolü	38
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	42
2.1.	Kontrol Yöntemleri	42
2.1.1.	PI Denetleyici	42
2.1.2.	Bulanık Mantık Denetleyici	44
2.1.2.1.	Bulanıklık ve Bulanık Küme Kavramı	44
2.1.2.2.	Üyelik Fonksiyonları	47
2.1.2.3.	Bulanık Mantık Denetleyicili Sistem	47
2.1.2.3.1.	Bulanıklaştırma Birimi	48
2.1.2.3.2.	Kural İşleme Ünitesi.....	49
2.1.2.3.3.	Durulaştırma Birimi.....	52
2.1.2.4.	Bulanık Mantık Denetleyici Modeli	53
2.2.	Optimizasyon Yöntemleri.....	56
2.2.1.	Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO).....	56
2.2.1.1.	Eylemsizlik Katsayısı	58
2.2.1.2.	İvmelenme Sabitleri.....	60
2.2.1.3.	Parçacık Sürüsü Algoritmasının İşleyişi.....	61
2.2.2.	Genetik Algoritmalar (GA)	62
2.2.2.1.	Genetik Algoritmaların İşleyişi	63
2.2.2.2.	Genetik Operatörler	65
2.2.2.2.1.	Yeniden Üreme.....	65
2.2.2.2.2.	Yeniden Üreme.....	66
2.2.2.2.3.	Mutasyon	67
3.	BENZETİM ÇALIŞMALARI VE SONUÇLAR.....	68
4.	SONUÇ VE ÖNERİLER	78
5.	KAYNAKLAR.....	80
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

GÜÇ SİSTEMLERİNDE OPTİMİZASYON TABANLI BULANIK MANTIK
DENETLEYİCİ İLE YÜK FREKANS KONTROLÜ

Oğuzkağan ALIÇ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ
2014, 86 Sayfa

Bu tez çalışmasında ilk adım olarak güç sistemlerinin önemli kontrol problemlerinden biri olan yük frekans kontrolü (YFK) problemi tanımlanmıştır. Daha sonra ise güç sistemine ait bileşenlerin doğrusal modelleri ve bu modellerin bir araya getirilmesiyle de ara ısıtmasız iki bölgeli güç sistem modeli elde edilmiştir. İki bölgeli ara ısıtmasız güç sisteminde yük frekans kontrolünü gerçekleştirmek amacıyla bulanık mantık denetleyici (BMD) tasarımı yapılmış ve kontrol yöntemi olarak önerilmiştir. BMD'ye ait üçgen üyelik fonksiyonlarının sınır değerlerinin en uygun değerlerde belirlenebilmesi amacıyla parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) ve genetik algoritmalara (GA) başvurulmuştur. Böylece BMD'nin kontrol işlemini daha hızlı ve etkin bir biçimde yapabilmesi amaçlanmıştır. Benzetim çalışmaları kapsamında ise önerilen optimizasyon tabanlı BMD'nin farklı yük değişimi durumlarında verdiği cevaplar gözlemlenmiş ve sonuçlar klasik PI denetleyiciden elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Buna ek olarak optimizasyon yöntemleri oturma süresi, maksimum aşma, minimum aşma ve uygunluk değerleri gibi bazı performans kriterleri açısından kıyaslanmıştır ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Güç sistemleri, yük frekans kontrolü, bulanık mantık denetleyici, parçacık sürüsü optimizasyonu, genetik algoritmalar.

Master Thesis

SUMMARY

LOAD FREQUENCY CONTROL IN POWER SYSTEMS WITH OPTIMIZATION
BASED FUZZY LOGIC CONTROLLER

Oğuzkağan ALIÇ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical-Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ
2014, 86 Pages

In this thesis, load frequency control (LFC) problem, one of the major control problems of power systems, is defined as the beginning. Then linear models of power system components and, with the combination of these components, linear model of a two area non reheat power system are obtained. In order to realize load frequency control of a two area non reheat power system, the design of a fuzzy logic controller (FLC) is carried out and proposed as a control method. Particle swarm optimization (PSO) and genetic algorithms (GA) are used to be able to bring optimality to the upper and lower limits of triangular membership functions of FLC. Thus it is aimed to enable FLC to work faster and more effective. Within the simulation studies, the results obtained from optimization based FLC proposed are observed and compared to the results given by conventional PI controller under varying load conditions. In addition, optimization methods are compared in terms of some performance criteria such as settling time, maximum and minimum overshoot and fitness value and the results are evaluated.

Key Words: Power systems, load frequency control, fuzzy logic controller, particle swarm optimization, genetic algorithms.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Güç sistemlerinin kontrolünün zaman ölçekli gösterimi.....	8
Şekil 1.2. Güç sistemlerinde gerilim ve frekans kontrolünün blok gösterimi	9
Şekil 1.3. Üretimden tüketime elektrik enerjisi	12
Şekil 1.4. Türbin-generatör sisteminin fiziksel modeli	12
Şekil 1.5. Hız regülatörü ideal hız ayar karakteristiği	15
Şekil 1.6. Birincil kontrol sonucu sistem frekansı ve sürekli durum hatası	16
Şekil 1.7. Birincil kontrol çevrimi içeren bir güç üretim ünitesi.....	17
Şekil 1.8. İkincil kontrol çevriminin sistem frekansı üzerindeki etkisi.....	19
Şekil 1.9. İkincil kontrol çevrimi içeren bir güç üretim ünitesi.....	20
Şekil 1.10. Ara ısıtmasız buhar türbini şematik gösterimi	22
Şekil 1.11. Ara ısıtmasız buhar türbini doğrusal modeli	23
Şekil 1.12. Generatöre ilişkin doğrusal model	26
Şekil 1.13. Generatör ve yüke ait doğrusal model.....	27
Şekil 1.14. Hidrolik yükseltece ilişkin doğrusal model.....	27
Şekil 1.15. Hız regülatörü doğrusal modeli.....	29
Şekil 1.16. Kontrol alanı doğrusal modeli.....	31
Şekil 1.17. Tek bölgeli güç sisteminin doğrusal modeli	32
Şekil 1.18. İki bölgeli güç sisteminin elektriksel eşdeğer devresi.....	34
Şekil 1.19. Bağlantı hattına ilişkin doğrusal model.....	35
Şekil 1.20. İki bölgeli güç sisteminin doğrusal modeli	37
Şekil 1.21. Paralel olarak çalışan üretim üniteleri arasındaki yük paylaşımı	38
Şekil 1.22. İki bölgeli güç sisteminde yük değişimi.....	39
Şekil 2.1. PI denetleyici blok gösterimi.....	43
Şekil 2.2. Yük frekans kontrolünde PI denetleyici.....	43
Şekil 2.3. Hız uzayında hızlı klasik kümesi	45
Şekil 2.4. Hız uzayında hızlı bulanık kümesi	46
Şekil 2.5. Üçgen üyelik fonksiyonu	47
Şekil 2.6. Bulanık mantık denetleyici yapısı	48
Şekil 2.7. Bulanıklaştırma işleminin yapılışı [70]	49

Şekil 2.8. Kural işleme ünitesinde kuralların bulanık kümelerle gösterimi [70].....	50
Şekil 2.9. Bulanık karar verme mekanizması blok gösterimi [68]	54
Şekil 2.10. Bulanık mantık denetleyici genel blok şeması [68]	55
Şekil 2.11. BMD'nin yük frekans kontrolünde kullanımı	55
Şekil 2.12. Parçacığın konum değiştirmesi	58
Şekil 2.13. Hız güncelleme denklemi bileşenleri	60
Şekil 2.14. PSO algoritması akış diyagramı [74]	62
Şekil 2.15. GA akış diyagramı.....	64
Şekil 2.16. Rulet çemberi seçim operatörü.....	65
Şekil 2.17. Tek noktalı çaprazlama işlemi.....	66
Şekil 2.18. Tek bir kromozom için mutasyon işlemi.....	67
Şekil 3.1. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sistemi doğrusal modeli	69
Şekil 3.2. Optimize edilmemiş BMD'ye ait üçgen üyelik fonksiyonu.....	70
Şekil 3.3. PSO ile optimize edilmiş BMD üyelik fonksiyonları	70
Şekil 3.4. GA ile optimize edilmiş BMD üyelik fonksiyonları	70
Şekil 3.5. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=0.00$ p.u. yük değişim durumu için birinci güç bölgesinde frekansın zamanla değişimi .	71
Şekil 3.6. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=0.00$ p.u. yük değişim durumu için ikinci güç bölgesinde frekansın zamanla değişimi...	72
Şekil 3.7. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=0.00$ p.u. yük değişim durumu için bağlantı hattından akan gücün değişimi	73
Şekil 3.8. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=-0.01$ p.u. yük değişim durumu için birinci güç bölgesinde frekansın zamanla değişimi .	74
Şekil 3.9. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=-0.01$ p.u. yük değişim durumu için ikinci güç bölgesinde frekansın zamanla değişimi..	75
Şekil 3.10. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=-0.01$ p.u. yük değişim durumu için bağlantı hattından akan gücün değişimi	76

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Rotor hızının ve sistem frekansının mekanik ve elektriksel momentlere göre değişimi	13
Tablo 1.2. Yük frekans kontrolünde bağlantı hattı kontrolü durumları.....	40
Tablo 2.1. Üyelik fonksiyonları ile temsil edilen kural tablosu	52
Tablo 2.2. Bulanık ifadeler ile temsil edilen kural tablosu.....	52
Tablo 3.1. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde PSO ve GA ile optimize edilmiş BMD parametreleri.....	69
Tablo 3.2. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=0.00$ p.u. yük değişim durumu için birinci bölge frekansına ait oturma süresi, maksimum ve minimum aşma değerleri	71
Tablo 3.3. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=0.00$ p.u. yük değişim durumu için ikinci bölge frekansına ait oturma süresi, maksimum ve minimum aşma değerleri	72
Tablo 3.4. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=0.00$ p.u. yük değişim durumu için bağlantı hattından akan gücün değişimine ait oturma süresi, maksimum ve minimum aşma değerleri	73
Tablo 3.5. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=0.00$ p.u. yük değişim durumu için uygunluk değerleri sonuçları	74
Tablo 3.6. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=-0.01$ p.u. yük değişim durumu için birinci bölge frekansına ait oturma süresi, maksimum ve minimum aşma değerleri	75
Tablo 3.7. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=-0.01$ p.u. yük değişim durumu için ikinci bölge frekansına ait oturma süresi, maksimum ve minimum aşma değerleri	75
Tablo 3.8. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=-0.01$ p.u. yük değişim durumu için bağlantı hattından akan gücün değişimine ait oturma süresi, maksimum ve minimum aşma değerleri	76

SEMBOLLER DİZİNİ

V_{ref}	Referans gerilimi
E_{fd}	Uyartım sargısı gerilimi
V_t	Generatör gerilimi
ω	Rotor mili hızı
J	Generatör eylemsizlik momenti
P	Güç
T	Momet
F	Frekans
P_e	Elektriksel güç
P_m	Mekanik güç
T_e	Elektriksel moment
T_m	Mekanik moment
P_0	Gücün anma değeri
f_0	Frekansın anma değeri
f_{NL}	Yüksüz durumdaki frekans
f_{FL}	Tam yükteki frekans
Δf	Frekanstaki değişim
Δf_1	Birinci bölge frekansındaki değişim
Δf_2	İkinci bölge frekansındaki değişim
ΔP	Güçteki değişim
ΔP_g	Hız regülatörü çıkış gücündeki değişim
ΔP_{ref}	Referans güçteki değişim
ΔP_m	Mekanik güçteki değişim
ΔP_e	Elektriksel güçteki değişim
ΔT_m	Mekanik momentteki değişim
ΔT_e	Elektriksel momentteki değişim
$\Delta \omega$	Açısal hızdaki değişim
ΔP_V	Vana konumundaki değişim
ΔP_G	Generatör tarafından üretilen güçteki değişim
ΔP_L	Omik yüklerdeki güç değişimi

ΔP_D	Endüktif veya kapasitif yüklerdeki güç değişimi
$\Delta P_{bağ.hattı}$	Bağlantı hattından akan güçteki değişim
R	Hız ayar karakteristiğinin eğimi
B	Frekans kutuplama sabiti
τ_T	Türbin zaman sabiti
τ_H	Hidrolik yükselteç zaman sabiti
I	Generatör eylemsizlik momenti
M	Açısal momentum
D	Yük sönüm sabiti
W_{kin}	Üretim ünitesinde depo edilen kinetik enerji
H	Generatör eylemsizlik sabiti
K_P	Kontrol alanı kazancı
T_P	Kontrol alanı zaman sabiti
V_1	Birinci bölge hat sonu gerilimi
V_2	İkinci bölge hat sonu gerilimi
X_T	Toplam reaktans
δ_1	Birinci bölge hat sonu gerilimi faz açısı
δ_2	İkinci bölge hat sonu gerilimi faz açısı
T_{12}	Senkronize edici moment katsayısı
K_P	Oransal kazanç
K_I	İntegral kazancı
$e(t)$	Hata
$U(t)$	Kontrol işareti
Δe	Hatadaki değişim
$\mu(x)$	Üyelik derecesi
V^i	Parçacık hızı
x^i	Parçacık konumu
c_1 ve c_2	İvmelenme sabitleri
p_{best}	Yerel en iyi değer
g_{best}	Global en iyi değer
w	Eylemsizlik katsayısı
χ	Kısıtlama faktörü

KISALTMALAR DİZİNİ

PSO	Parçacık Sürüsü Optimizasyonu
GA	Genetik Algoritmalar
UCTE	Union for the Co-ordination of Trnasmission of Electricity
ITAE	Integral Time Absolute Error
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage
BMD	Bulanık Matık Denetleyici
YFK	Yük Frekans Kontrolü
OÜK	Otomatik Üretim Kontrolü
AKH	Alan Kontrol Hatası
MW	Mega Watt
OGD	Otomatik Gerilim Düzenleyici
FACTS	Flexible AC Transmission Systems
ACE	Area Control Error
LFC	Load Frequency Control
AGC	Automatic Generation Control
AVR	Automatic Voltage Regulators
FLC	Fuzzy Logic Controller
AVR	Automatic Voltage Regulators
PSS	Power System Stabilizer

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Elektrik enerjisi günlük hayatımızın ve endüstriyel uygulamaların vazgeçilmez gereksinimi olarak günümüz dünyasında en çok kullanılan enerji kaynağı konumundadır. Gelişen teknolojiye, artan nüfusa ve sanayileşmeye bağlı olarak elektrik enerjisine olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır ve bu durum elektrik enerjisini daha da önemli bir enerji kaynağı haline getirmektedir. Enerjiye olan bağımlılıktaki ve talepteki artış enerji üretimi ile tüketimi arasındaki açığın hızla büyümesine yol açmaktadır [1]. Tüketilen elektrik enerjisi toplumdaki kalkınmışlığın ve refah seviyesinin en önemli göstergelerinden biri olsa da bu tüketimi karşılayabilecek üretimin de sağlanması büyük önem arz etmektedir [2].

Elektrik enerjisi doğada mevcut bulunan birçok enerji kaynağından elde edilebilme, diğer enerji çeşitlerine dönüştürülebilme (ısı, aydınlatma, hareket vb.), sonradan kullanılmak üzere küçük miktarlarda da olsa depo edilebilme, artık madde bırakmadığından dolayı çevre kirliliği oluşturmama, ekonomik olarak üretilebilme, üretildiği noktadan tüketileceği noktaya kadar hızlı, kolay ve ekonomik olarak taşınabilme gibi nedenlerden dolayı diğer enerji kaynaklarından çok daha üstün bir konumdadır. Bütün bu üstünlüklere rağmen bir güç sisteminden hizmet alan tüketicilerin kaliteli, güvenilir ve sürekli bir elektrik enerjisi talep etmeleri güç sistemlerinde enerjinin üretiminden tüketimine kadar olan süreçte elektrik enerjisinin ve güç sistemlerinin analizinin, yönetiminin, işletilmesinin ve kontrolünün dikkatli bir şekilde yapılması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır.

Burada söz konusu olan güç sistemleri son derece karmaşık, büyük ölçekli, doğrusal olmayan ve normal çalışma koşulları beklenmedik bir nedenle her an bozulmaya maruz kalabilecek bir yapıya sahiptir. Tüketicinin talep ettiği elektrik enerjisi bu güç sistemleri tarafından sağlanır. Bu sistemlerin temel görevi tüketicilerin ihtiyaç duyduğu enerjiyi gerçek zamanlı, kabul edilebilir gerilim ve frekans aralığında, güvenilir, sürekli ve ekonomik olarak üretmek, iletmek ve dağıtmaktır. Güç sistemleri tüm bu işlevleri yerine getirebilmek için enterkonnekte (ağ yapılı) bir sistem içerisinde işletilirler. Enterkonnekte sistem içerisinde işletilen güç sistemleri temel olarak bağlantı hatlarıyla birbirine bağlı güç

üretim üniteleri ile iletim ve dağıtım şebekelerinden oluşur. İletim şebekesi üretilen enerjinin tüketim bölgesine yüksek ve orta gerilim değerlerinde taşınması işlevini yerine getirirken, dağıtım şebekesi tüketim bölgesine taşınan enerjinin alçak gerilimde tüketiciye temin edilmesi işlevini yerine getirmektedir. Güç üretim üniteleri ise tüketicilerin talep ettikleri kaliteli, güvenilir, sürekli, sabit frekans ve gerilimdeki elektrik enerjisini ekonomik olarak üretme işlevini yerine getirir [3].

Enterkonnekte güç sistemi kesintisiz bir enerji sağlamak amacıyla bütün üretim santrallerini ve şebekeleri birbirine bağlayan sistem olarak tanımlanabilir. Enterkonnekte güç sistemlerinde tüketicinin talep ettiği sürekli ve kararlı yapıdaki enerji büyük ve küçük ölçekli bütün üretim merkezlerinin paralel ve senkronize çalışmasıyla sağlanabilir. Böyle bir çalışma durumunda ise bütün enerji üretim merkezlerinde üretilen enerjinin aynı frekansta olma zorunluluğu ortaya çıkmaktadır.

Üretilen elektrik enerjisinin frekansında sağlanması gereken bu kararlı durum Avrupa enterkonnekte güç sistemine bağlanmaya çalışan ülkemizin uyum çalışmaları kapsamında büyük önem arz etmektedir. Avrupa’da 1950 yılında kurulmuş olan “Elektrik İleticileri Koordinasyon Birliği” olarak bilinen UCTE (Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity) tarafından uyum programı çerçevesinde en önemli kriter olarak frekans kontrol kalitesi sunulmuştur [4].

Üretilen elektrik enerjisinin frekansının sistemde mevcut bulunan toplam yük miktarıyla doğrudan ilgili olduğu ve bu mevcut talep edilen yükün tüketici ihtiyaçlarına göre anlık değişimler gösterdiği dikkate alınırca üretilen elektrik enerjisinin frekansının sabit bir değerde kalmasını sağlamak güçtür. Kaliteli elektrik enerjisinin en önemli göstergelerinden biri olan frekanstaki karalılığı sağlamak için ise güç sisteminde üretilen ve tüketilen aktif güç dengesinin sağlanması gerekmektedir [5,6]. Sistemdeki toplam yük değişiminden kaynaklanan bu frekans salınımları normalde küçük değerlerde olup tüketici yüklerine çok büyük olumsuz etkisi olmamakla birlikte yük değişimlerinin yüksek miktarda ve uzun süreli olması durumunda hem güç sisteminin işletimine hem de tüketici yüklerine ciddi zararlar verebilmektedir [7, 8].

Sistemdeki toplam yükteki değişime dayalı olarak salınım gösteren frekans güç üretim ünitelerinin çıkış güçlerinin ayarlanmasıyla giderilebilir [9]. Böylece sistemde mevcut bulunan toplam yük güç üretim üniteleri arasında paylaşılır.

Güç sistemlerinde üretilen ve tüketilen güçler arasındaki dengesizlikten kaynaklanan problemler tek bölgeli güç sistemlerinde sadece frekans kontrol problemi olarak ortaya

çıkarken çok bölgeli enterkonnekte güç sistemlerinde frekans kontrol probleminin yanı sıra güç bölgelerinin birbirine bağlayan bağlantı hatlarından akan aktif gücün kontrolü problemi olarak ta ortaya çıkmaktadır. Bu sebepten dolayı her güç bölgesi kendi yük değişimini karşılamak mecburiyetindedir. Güç sistemlerinin kararlılığının en önemli parametrelerinden biri olan sabit frekansın güç sisteminin düzgün işletilebilmesi, tüketici yüklerinin düzgün çalışabilmesi ve bağlantı hattından akan gücün daha önceden belirlenmiş sınırlar içerisinde kalmasının sağlanması güç sistemlerinin en önemli problemlerinden biri olup yük frekans kontrolü (YFK veya LFC-Load Frequency Control) veya otomatik üretim kontrolü (OÜK veya AGC-Automatic Generation Control) olarak adlandırılır [10].

1.2. Literatür Araştırması

Elgerd ve Fosha 1970 yılında güç sistemlerinin yük frekans kontrolüne ilişkin gerçekleştirmiş oldukları çalışmalarda ilk modern kontrol tasarımını ortaya koymuşlar ve farklı bir geri besleme düzeni ile tasarladıkları oransal denetleyici ile optimum yük frekans kontrolü çalışmalarının temelini atmışlardır [5,11]. Yapılan bu çalışmadan sonra yük frekans denetleyicilerinin tasarımında modern kontrol teorisi uygulamalarına, klasik, dayanıklı, optimum ve adaptif kontrolör tasarımına yönelik bir çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda farklı stratejilerde kontrol işlemi gerçekleştirilmiştir. Kazanç güncellemeli kontrolör tasarımları sistemde meydana gelebilecek olan bozucu etkilerden daha az etkilenmeleri ve kolay tasarlanabilmeleri sebebiyle kontrol stratejileri arasında önemli bir yer edinmiştir [12].

Yük frekans kontrolünde kazanç güncellemeli kontrolörler 1990'lı yıllardan itibaren giderek artan bir oranda kullanılmaya başlamıştır. 1991 yılında yapılan çalışmada Lee ve arkadaşları enterkonnekte güç sistemleri için tasarlamış oldukları kazanç güncellemeli kontrolör ile yük frekans kontrolü gerçekleştirmişlerdir [13].

Rubai ve Udo 1994 yılındaki çalışmalarında güç sistemlerinin yük frekans kontrolü için farklı bir maliyet fonksiyonlu kazanç güncellemeli çok değişkenli kontrol yöntemi önermişlerdir [14].

Klasik kontrol teorisinde yer alan kazanç güncellemeli kontrol yöntemlerinin güç sistemlerinin doğrusal olmayan yük karakteristiği ve anlık değişimler gösteren çalışma koşulları gibi özelliklere sahip olması nedeniyle yük frekans kontrolünde yetersiz

kaldığının görülmesi üzerine araştırmacılar yapay zekâ temelli kontrolörlerin tasarımına yönelik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir.

Abdel-Magid ve Dawoud 1995 yılında yapmış oldukları çalışma ile iki bölgeli enterkonnekte güç sisteminin yük frekans kontrolü için I (Integral) kontrolörün kazancını genetik algoritmalar ile güncellemişlerdir [15].

Chang C.S. ve Fu W. 1997 yılında gerçekleştirmiş oldukları çalışma ile PI (Proportional-Integral) kontrolörün K_P ve K_I katsayılarını bulanık mantık aracılığıyla belirledikleri bir kontrol mekanizması tasarlamışlardır [16].

Talaq ve Al Basri, 1999 yılında yapmış oldukları çalışma ile adaptif bir bulanık kazanç güncelleme metodu önerip bu metot ile enterkonnekte sistem üzerinde PI kontrolörün parametrelerini belirlemişlerdir [17].

Moon Young-Hyun ve arkadaşları, 2001 yılında PID (Proportional-Integral-Derivative) geri beslemeli bir sistemle yük frekans kontrolü problemini incelemişlerdir [18].

El Sherbiny ve arkadaşları, 2002 yılında iki bölgeli bir güç sisteminde önerdikleri bulanık mantık kontrolörü ile klasik PI denetleyici arasında performans kıyaslaması yapmıştır [19].

Ping Kang ve arkadaşları, 2002 yılındaki çalışmaları ile enterkonnekte sistem modeli üzerinde PI ve PID kontrolör ile bir kayan modlu kontrolörün kazançlarını güncellemek için gerçek sayılarla kodlanmış genetik algoritma kullanmışlardır [20].

2002 yılında Demirören A. ve arkadaşları, çok bölgeli güç sistemlerinde yapay sinir ağı kontrolör ile otomatik üretim kontrolü uygulaması yapmışlardır [21].

Papadopoulos D. P. ve Karnavas Y. L. 2002 yılındaki çalışmalarıyla tek bölgeli bir güç sistemi modeli üzerinde üzerinde, bulanık mantık kontrolör ile yapay sinir ağı kontrolörü kullanarak yük frekans kontrolünü incelemişlerdir [22].

2003 yılında Abdel-Magid ve Abido, enterkonnekte sistemin yük-frekans kontrolünde kullandıkları I kontrolör ve PI kontrolör kazançları ile frekans kutuplama sabitini güncellemek için Parçacık Sürüsü algoritmasını kullanmışlardır [23].

Yeşil ve arkadaşları, 2004 yılında aynı amaçla bir kazanç güncellemeli bulanık mantık PID kontrolör önermişler, kazanç güncelleme metodu olarak modifiye edilmiş bir tepe değeri gözleyici kullanmışlardır [24].

Aynı yıl Juang ve Lu, enterkonnekte sistemin yük-frekans kontrolü için genetik algoritma tabanlı bulanık kazanç güncellemeli PI kontrolör tasarımını önermişlerdir.

Çalışmalarında kazanç güncelleme için kullandıkları bulanık mantık yapısına ait bulanık kural kümesinin tasarımı için genetik algoritmaları kullanmışlardır [25].

Oysal Y. ve arkadaşları 2004 yılında, elektrik güç sistemlerinde bulanık ağ tabanlı bir yük frekans denetleyici tasarımı ile ilgili çalışma yapmışlardır [26].

Demirören A. ve Yeşil E. 2004 yılında yaptıkları çalışmada SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) üniteleri içeren güç sistemlerinde otomatik üretim kontrolünün bulanık mantıkla yapıldığı kontrolör tasarlamışlardır [27].

Kocaarslan İ. ve Çam E. 2005 yılında yaptıkları çalışmayla PI denetleyici katsayılarını bulanık mantık yardımıyla bulmuşlardır [28].

2006 yılında Massiala ve arkadaşları, yük frekans kontrolü amacıyla iki katmanlı bir bulanık güncellemeli PI kontrolör kullanmışlardır. Kontrolörün ilk katını bulanık mantık PD (Proportional-Derivative) kontrolör ile ön kompanzator olarak tasarlamışlar, ikinci katını ise asıl kontrolör olan bulanık mantık kazanç güncellemeli PI kontrolör şeklinde tasarlamışlardır [29].

Lee H.J. ve arkadaşları 2006 yılında kararsız lineer olmayan güç sistemlerinde bulanık mantık yardımıyla yük frekans kontrolü işlemini yapabilme üzerine çalışmalar yapmıştır [30].

Çam E. 2007 yılında hidroelektrik güç sistemlerindeki yük frekans kontrolü uygulamalarında bulanık mantık kullanılması üzerine çalışma yapmıştır. Bu çalışmasında klasik PI kontrolörle bulanık mantık kontrolör arasında karşılaştırma yapmıştır [31].

Tan W., Sui L., Xu Z., 2008 yılında yaptıkları çalışmada, güç sistemlerindeki yük frekans kontrolü için kontrolör tasarımı ve analizi yapmışlardır [32].

2008 yılında Taher ve arkadaşları, iki kontrol alanına sahip bir enterkonnekte sistem modelinde PI kontrolörün kazanç güncellemesi için parçacık sürüsü algoritması ve yine parçacık sürüsü algoritması ile oluşturdukları hibrit bir algoritma kullanmışlardır. Hibrit algoritmada, parçacık sürüsü algoritması içinde genetik algoritmalarda ya da evrimsel gelişim algoritmasında olduğu gibi doğal seçim ve mutasyon gibi evrimsel operatörler kullanmışlardır [33].

Aynı yıl Pothiya ve Ngamroo, süper iletkenli manyetik enerji depolama ünitesi içeren iki kontrol alanlı bir enterkonnekte sistem için optimal kazanç güncellemeli bulanık mantık PID kontrolör önermişlerdir. Tasarımlarında bulanık mantık PID kontrolörün kazançlarının güncellemesi için arama performansı geliştirilmiş çoklu tabu arama algoritması kullanmışlardır [34].

2009 yılında Gözde ve arkadaşları, governor ölü bölgesi içeren iki kontrol alanlı bir enterkonnekte sistem için literatürde çilgın parçacık sürüsü algoritması olarak tanımlanan algoritmayı kullanmışlardır [35].

2009 yılında Nanda ve arkadaşları, benzer bir enterkonnekte sistem modeli üzerinde kazançları, bakteriyel gelişim algoritması ile güncellenen bir PI kontrolör kullanmışlardır. Çalışmalarında üç kontrol alanına sahip bir enterkonnekte sistem modeli kullanmışlardır. Sonuçları farklı yük ve parametre değışimleri için genetik algoritmalar ve klasik yöntemlerle karşılaştırmışlardır [36].

2010 yılında Gözde ve arkadaşları, bir enterkonnekte sistemde yük-frekans kontrolü için tasarladıkları PI kontrolörün kazançlarını güncellemek için kullandıkları parçacık sürüsü algoritmasında farklı bir maliyet fonksiyonu önererek sistem performansını artırmışlardır [37].

Wrdoljak K. ve arkadaşları 2010 yılında yapmış oldukları çalışmada parametreleri genetik algoritmalar ile belirlenen kayan mod temelli kontrolör yapısı yük frekans kontrolü çalışması yapmışlar ve elde ettikleri sonuçları klasik PI denetleyici ile karşılaştırmışlardır [38].

2011 yılında Shanmura ve Jayabarathi yapmış oldukları çalışmada iki bölgele güç sisteminde yük frekans kontrolü gerçekleştirmek amacıyla parametrelerini yapay sinir ağları ile belirledikleri PID kontrolör yapısını kullanmışlar ve elde ettikleri sonuçları klasik I ve PID denetleyicilerle kıyaslamışlardır [39].

Rathor S. ve arkadaşları 2011 yılındaki çalışmalarında iki bölgele güç sisteminin yük frekans kontrolü için klasik PI denetleyicinin parametrelerini yapay arı kolonisi ile belirlemişlerdir [40].

Ismail A.Mohammed ve arkadaşları 2011 yılında gerçekleştirmiş oldukları çalışmada durum uzay yaklaşımını kullanarak tasarladıkları dayanıklı denetleyici ile güç sistemlerinde yük frekans kontrolünü gerçekleştirmişlerdir [41].

Prakash S. ve Sinha S.K. 2012 yılındaki çalışmaları ile yapay sinir ağları ile dört bölgele güç sisteminin yük frekans kontrolünü gerçekleştirmişlerdir [42].

2012 yılında Duman S. ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada tek bölgele güç sisteminin kontrolünü gerçekleştirmek için PI ve PID denetleyici katsayılarını yer çekimi araştırma algoritması kullanarak belirlemiş ve elde ettikleri sonuçları klasik PI denetleyici ile karşılaştırmışlardır [43].

2012 yılında Xiangjie Liu ve arkadaşları enterkonnekte güç sistemlerinin yük frekans kontrolü için model öngörülü kontrol yöntemini kullanmışlardır [44].

Sheikh M.R.I. ve Mondol N. 2012 yılındaki çalışması ile SMES üniteleri içeren güç sisteminde yük frekans kontrolünü gerçekleştirmek amacıyla öz uyarlamalı bulanık mantık kazançlı PI denetleyici yapısını kullanmışlardır [45].

2013 yılında Neha Modi ve arkadaşları iki bölgeci güç sisteminin yük frekans kontrolü için kullandıkları PID denetleyicinin parametrelerini parçacık sürüsü optimizasyonu ile belirlemişlerdir [46].

2014 yılında Hassan A. Yousef ve arkadaşları adaptif bulanık kontrol tekniği ile çok bölgeci güç sistemlerinde yük frekans kontrolü yapmışlardır [47].

Yapılan bu çalışmada ise Matlab/Simulink ortamında tasarlanan ve $7 \times 7 = 49$ adet bulanık kural içeren bulanık mantık denetleyici parametrelerinin optimizasyonu için parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) ve genetik algoritmalar (GA) kullanılmış ve üçgen üyelik fonksiyonlarının sınır değerleri belirlenip ara ısıtmasız iki bölgeci güç sisteminin yük frekans kontrolü değişik değerlerdeki yük değişimleri için gerçekleştirilmiştir.

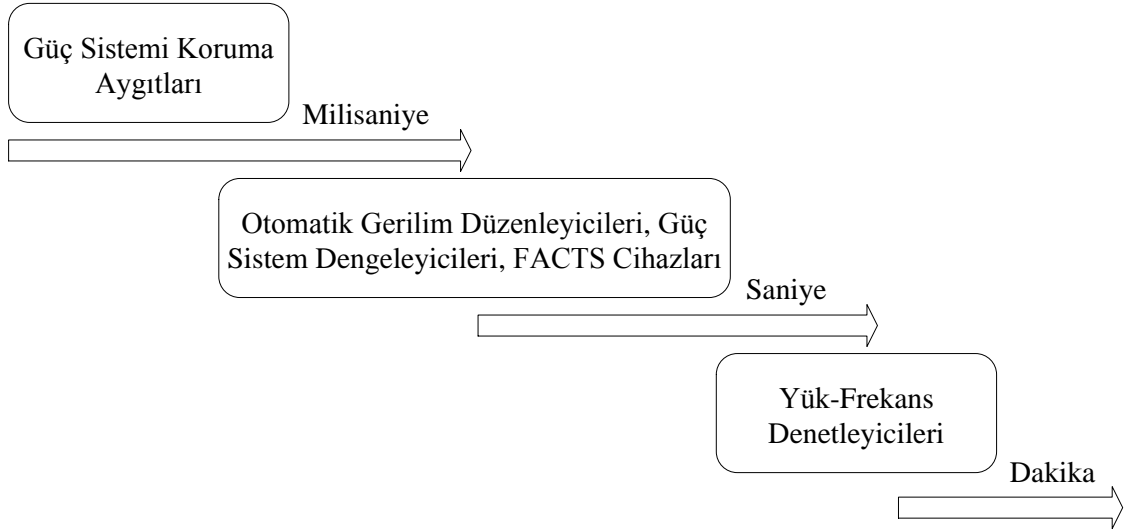
1.3. Teorik Alt Yapı ve Modelleme

1.3.1. Güç Sistemlerinin Kontrolü

Güç sistemlerinin kontrolünün temel amacı elektrik enerjisinin üretiminin, iletiminin ve dağıtımının mümkün olduğunca ekonomik, güvenilir ve kaliteli bir şekilde yapılmasını sağlamaktır. Bu amaç doğrultusunda sağlanması gereken en önemli kriterler ise sistem frekansının ve geriliminin sabit bir değerde tutulmasıdır. Güç sistemlerinin kontrolü sistemdeki farklı parametreleri kontrol eden ve farklı çevrimlerden oluşan kontrol sistemleriyle gerçekleştirilir.

Güç sistemlerinin kontrolü kontrol edilecek olan parametreye göre farklı zaman ölçeklerinde yapılmaktadır. Örneğin generatör uçlarındaki gerilimin kontrolünü gerçekleştiren otomatik gerilim düzenleyicileri (OGD veya AVR-Automatic Voltage Regulators) saniyeler mertebesindeki zaman aralıklarında bu işlemi gerçekleştirirken, ikincil gerilim kontrolü (İGK veya SVC-Secondary Voltage Control) işlemi dakikalar mertebesindeki zaman aralıklarında sistemdeki değişikliklere cevap vermektedir. Dolayısıyla bu iki kontrol çevrimi birbirinden ayrı olarak işlevlerini yerine getirmektedir.

Bu duruma diğerk bir örnekk olarak ise reaktif güç ve gerilim kontrolü yapan OGD ile aktif güç ve frekans kontrolünü gerçekleştiren YFK kontrol çevrimleri gösterilebilir. Uyarım sisteminin zaman sabiti türbin zaman sabitinden daha küçük olduğu için, yani sistemdeki herhangi bir değişikliğe veya bozucu etkiye uyarım sistemi daha hızlı cevap verdiği için bu kontrol çevrimleri de farklı zaman ölçeklerinde birbirinden ayrı olarak işlevlerini yerine getirmektedirler. Genel olarak bu ayrık yapıdaki kontrol çevrimleri güç sistemlerinin diğerk kontrol çevrimlerinde de mevcuttur. Bu nedenle güç sistemlerinde frekans, gerilim, bağlantı hattı gücü, türbin kontrolü ve sistem korumasında kullanılan koruma aygıtları farklı zaman aralıklarında sistemdeki değişikliklere cevap vermektedirler. Şekil 1.1’de güç sistem kontrolörlerinin ve koruma cihazlarının farklı zaman ölçeklerindeki çalışması şematik olarak gösterilmektedir.

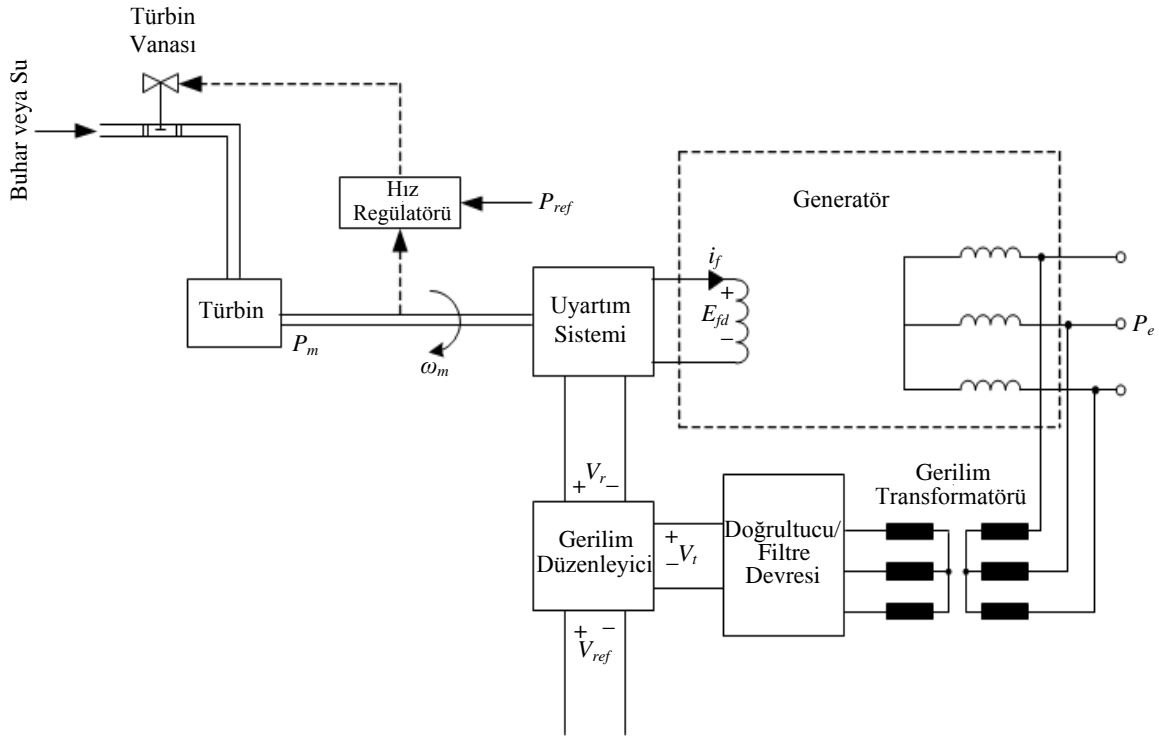


Şekil 1.1. Güç sistemlerinin kontrolünün zaman ölçekli gösterimi

Şekil 1.1’de görüldüğü üzere sistemde koruma amaçlı kullanılan cihazlar çok hızlı bir şekilde cevap vermeliyken, reaktif güç ve gerilim kontrolörleri (OGD), FACTS (Flexible AC Transmission Systems) cihazları ve güç sistem dengeleyicileri (PSS-Power System Stabilizer) saniyeler mertebesindeki zaman aralıklarında sistemdeki değişimlere cevap vermelidir. Yük-Frekans denetleyicileri ise daha geniş bir zaman aralığında sistemdeki değişikliklere cevap verip ilgili kontrol işlemini gerçekleştirmektedirler.

Yukarıda da bahsedildiği gibi güç sistemlerinin ekonomik ve güvenilir enerji sağlayabilmesi için kararlı yapıda olması gerekmektedir. Bu ise ancak sistem frekansının

ve geriliminin kabul edilebilir sınırlar içerisinde tutulmasıyla mümkündür ve bu sebepten dolayı bu iki parametrenin kontrolü enterkonnekte güç sistemlerinde büyük önem arz etmektedir. Güç sistemlerinde gerilim ve frekansın kontrolünün gerçekleştirilmesine ilişkin yapı Şekil 1.2’de verilmektedir.



Şekil 1.2. Güç sistemlerinde gerilim ve frekans kontrolünün blok gösterimi

Şekil 1.2’de görüldüğü üzere gerilim düzenleyici generatör gerilimi V_t ’nin istenilen büyüklükte olması için uyartım sargılarındaki reaktif gücü kontrol etmektedir. Referans gerilimi V_{ref} ’in artması veya azalması durumunda regülatör generatör uyartım sargılarına uygulanan E_{fd} gerilimini artırmakta veya azaltmaktadır. Böylece generatör gerilimi V_t ’nin istenilen değerde kalması sağlanmaktadır. Gerilim düzenleyici V_t gerilimini bir geribesleme sinyali olarak kullanıp uyartım alanını kontrol etmektedir.

Yine Şekil 1.2’de görülen türbin-regülatör sistemi ise türbin mekanik çıkış gücünü kontrol etmek amacıyla türbin vanasının konumunu ayarlamaktadır. Referans güç seviyesi P_{ref} ’de herhangi bir artış veya azalış meydana geldiği zaman türbin regülatör sistemi türbin vanasını açmakta veya kapatmaktadır. Hız regülatörü rotor hızı ω_m ’yi elektriksel güç P_e ve mekanik güç P_m arasındaki dengeyi sağlamak için bir geribesleme sinyali olarak

kullanılmaktadır. Sistemdeki kayıpların ihmal edilmesi durumunda, üretilen mekanik güç P_m tüketilen elektriksel güç P_e 'den büyükse rotor hızında bir artış meydana gelir ve hız regülatörü mekanik gücü azaltmak amacıyla türbin vanasını kapanma yönünde hareket ettirir. Benzer şekilde mekanik güç elektriksel güçten küçükse rotor yavaşlar ve regülatör vanayı açma yönünde hareket ettirir [48].

1.3.2. Yük Frekans Kontrolü

Güç sistemlerinde mevcut bulunan yükler genellikle doğrusal olmayan ve anlık değişimler gösteren bir yapıya sahiptir. Sistemdeki yük karakteristikleri güç sisteminin çalışma koşullarını etkileyen faktörlerin başında gelmektedir. Bir güç sistemindeki yükler genel olarak iki başlık altında ele alınabilir. Bunlar,

- Frekanstan Bağımsız Yükler
- Frekansa Bağımlı Yükler

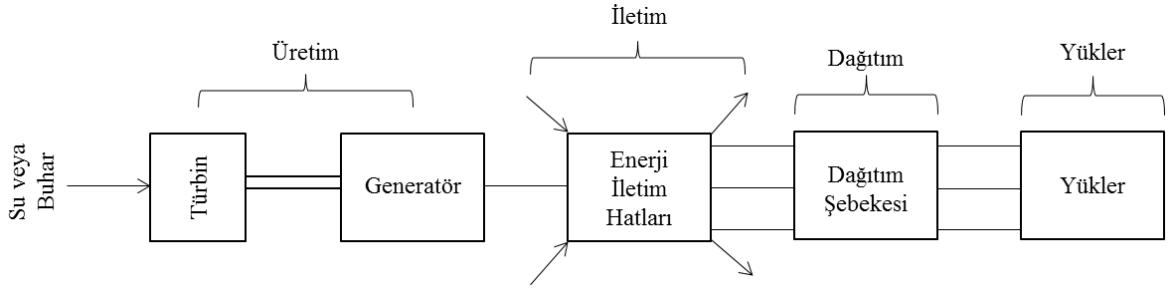
Burada bahsedilen frekanstan bağımsız yükler üretilen enerjinin frekansından etkilenmeyen bir yapıdadır fakat frekansa bağımlı yükler frekans hassasiyeti olan bir başka ifadeyle frekanstaki değişimlerden etkilenen yüklerdir. Bu sebepten dolayı, frekansa bağımlı yüklerin düzgün çalışabilmesi için üretilen elektrik enerjisinin frekansının sabit bir değerde tutulması gerekmektedir. Ayrıca güç sistemlerinin sürekli ve kararlı bir yapıda çalışması sistem frekansının belirli sınırlar dâhilinde tutulması ile mümkündür [48]. Bir güç sisteminde frekansı belirli sınırlar içerisinde tutmanın temel sebepleri genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Alternatif akım motorlarının hızı sistem frekansına bağlıdır ve sabit motor hızının sağlanması gereken yerlerde frekans kararlılığı büyük önem taşımaktadır.
- Frekansta meydana gelebilecek büyük genlikteki ve uzun süreli değişimler üretim ünitelerinin ve dolayısıyla tüm güç sisteminin devre dışı kalmasına yol açabilir. Bu nedenle frekansın anma değerinde tutulması gerekmektedir.
- Güç transformatörlerinin anma değerinden düşük bir frekansta çalışması güç sistemlerinde arzu edilmeyen bir durumdur. Bu durum güç transformatörlerinin veriminin düşmesine ve sargılarının ısınmasına yol açmaktadır. Bu nedenle anma değerinin altına düşen frekans değerinin tekrar denge durumuna getirilmesi gerekmektedir.

Güç sistemleri son derece karmaşık, doğrusal olmayan ve çalışma koşulları geniş bir aralıkta değişiklik gösteren bir yapıdadır. Tüketicilere kaliteli ve güvenilir enerji sağlamanın önemi dikkate alındığında güç sisteminde kontrol edilmesi gereken en önemli değişkenlerin gerilim ve frekans olduğu görülmektedir [41]. Bir güç sisteminde gerilimin değeri sistemdeki reaktif güç dengesi ile doğrudan ilgili bir büyüklük iken, frekansın değeri sistemdeki aktif gücün dengesi ile doğrudan alakalı bir büyüklüktür [6]. Sistemde tüketilen aktif gücün değişiklik göstermesi ve frekansın anma değeri sınırları içerisinde kalabilmesi için generatörler tarafından üretilen aktif gücün tüketime göre ayarlanması gerekmektedir [49]. Ayrıca güç sistemlerinin işletiminin ve enerji iletiminin ekonomik olarak yapılması gereği göz önüne alındığında güç bölgelerini birbirine bağlayan bağlantı hattından akan güçlerin ve üretim ünitelerinin yük paylaşımının da en uygun şekilde yapılması da gerekmektedir. Ancak sistemdeki aktif güç dengesinin sağlanması anlık yük değişimleri nedeniyle saptalar gösteren sistem frekansını yeniden anma değerine getirmek için yeterli değildir. Güç sistemlerinde bu frekansın anma değerinde kalmasını sağlamak amacıyla yapılan kontrol işlemine yük frekans kontrolü adı verilir ve genel olarak enterkonnekte güç sistemi içerisinde yer alan her güç bölgesinin frekansını ve bu güç bölgelerini birbirine bağlayan bağlantı hatlarından akan aktif gücün üretime katılan generatörlerin aktif güç çıkışlarının ayarlanması ile kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalmasını sağlamak amacıyla yapılan kontrol işlemi olarak tanımlanabilir [50].

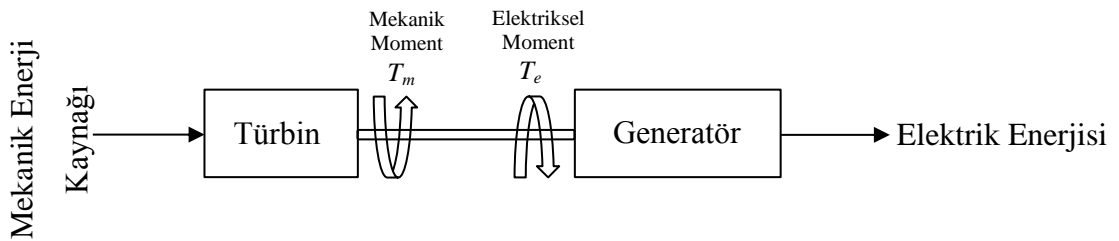
1.3.3. Frekansın Aktif Güçle Değişimi

Bir güç sistemi enerjini bir bölgeden başka bir bölgeye transfer eden bir mekanizma olarak düşünülebilir. Güç sistemlerinde enerji dönüşümü işlemi enerji üretim santrallerinde gerçekleştirilir. Bu işlem genel olarak su veya buhardan elde edilen mekanik enerjinin generatörler vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülüp iletim hatları yardımıyla iletilmesi ve dağıtım hatları yardımıyla tüketiciye ulaştırılması ile yapılır. Üretilen elektrik enerjisinin tüketiciye kadar ulaşması şematik olarak Şekil 1.3'te gösterilmiştir [51].



Şekil 1.3. Üretimden tüketime elektrik enerjisi

Şekil 1.3'te görüldüğü gibi enerji üretim merkezlerinde üretilen enerji depo edilemeden doğrudan tüketiciye ulaştırılmaktadır. Bu nedenle enerji üretiminin sürekli olarak tüketim talebine göre yapılması gerekmektedir. Bir başka ifadeyle sistemde sürekli olarak üretilen güçle tüketilen güç arasında bir denge söz konusu olmalıdır. Fakat güç sistemlerinin doğrusal olmayan yapısı ve anlık değişim gösteren çalışma koşulları nedeniyle bu denge bozulabilir. Bu durum sistemdeki senkron generatörlerin kinetik enerjisinde değişime yol açmaktadır. Generatörlerin rotor milinin dönüş hızı kinetik enerjilerine bağlı olarak değişen bir parametredir. Generatörlerin kinetik enerjilerinde meydana gelen değişim rotor milinin hızının ve buna bağlı olarak üretilen enerjinin frekansının değişmesine yol açar. Bir enerji üretim ünitesinde generatör rotorunun mili, bağlı olduğu türbin yardımıyla dönme işlemini gerçekleştirir. Türbin rotor milinin dönmesi için gerekli olan mekanik enerjiyi su, buhar veya doğal gaz gibi enerji kaynaklarından sağlayabilir. Şekil 1.4'te gösterildiği gibi türbin-generatör sistemi ile elde edilen mekanik moment elektriksel momente dönüştürülür. Elde edilen net momentin rotor milinin hızına bağlı olarak ifadesi J generatörün eylemsizlik momenti ve ω rotor milinin hızı olmak üzere denklem (1.1) ile tanımlanabilir [52].



Şekil 1.4. Türbin-generatör sisteminin fiziksel modeli

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.1)$$

Denklem 1.1'den de görüleceği üzere rotor milinin denge konumunda sabit hızla dönmesi durumunda mekanik moment ve elektriksel moment birbirine eşit olacaktır. Generatörün kinetik enerjisindeki değişim sebebiyle rotor milinin hızının değişmesi sistem frekansının değişimini de beraberinde getirir. Diğer bir ifadeyle mekanik momentin elektriksel momentten fazla olması durumunda rotor mili hızlanacak ve sistem frekansı artış gösterecektir az olması durumunda ise rotor mili yavaşlayacak ve sistem frekansı azalacaktır [53]. Bu durum Tablo 1.1'de ifade edilmektedir.

Tablo 1.1. Rotor hızının ve sistem frekansının mekanik ve elektriksel momentlere göre değişimi

<i>Rotor Mili Hızı</i>	<i>Mekanik ve Elektriksel Momentler Arasındaki İlişki</i>	<i>Sistem Frekansı</i>
Artar	$T_m - T_e > 0$	Artar
Sabit	$T_m - T_e = 0$	Sabit
Azalı	$T_m - T_e < 0$	Azalı

Mekanik moment değerinin rotor milini hızı ile çarpımı türbinin girişindeki mekanik güç P_m 'yi verirken, elektriksel moment değerinin rotor milinin hızı ile çarpımı generatör çıkışındaki elektriksel güç P_e 'yi verir. Mekanik ve elektriksel güç büyüklükleri denklem (1.2) ve (1.3) ile ifade edilebilir.

$$T_m \omega = P_m \quad (1.2)$$

$$T_e \omega = P_e \quad (1.3)$$

Tablo 1.1'den de görüldüğü üzere rotor mili hızının yani sistem frekansının değişmemesi için mekanik ve elektriksel güçlerin denklem (1.4)'te ifade edildiği gibi birbirine eşit olması gerekmektedir.

$$P_m = P_e \quad (1.4)$$

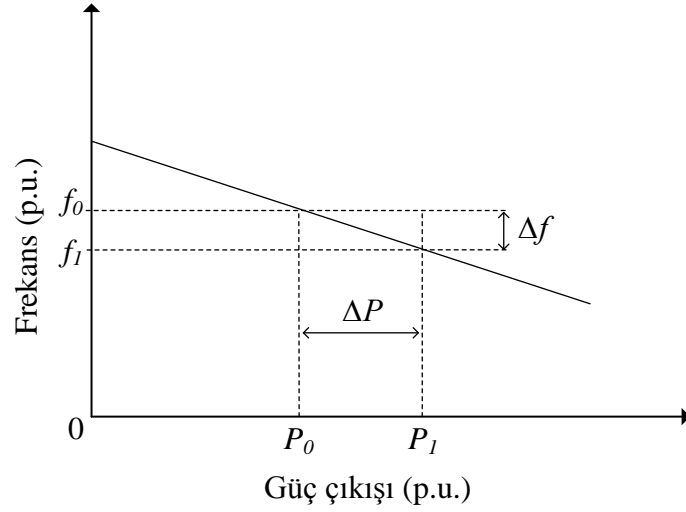
Bu denge durumunun sağlandığı çalışma koşullarında üretilen elektrik enerjisinin frekansı anma değerindedir. Güç sistemlerinde frekans normal çalışma koşullarının ve sistemdeki aktif güç dengesinin bir göstergesi olarak sürekli izlenir ve herhangi bir değişiklik durumunda gerekli müdahaleler yapılır. Üretilen ve tketlenen gler arasındaki dengesizlik ilk olarak generatörlerde depo edilen kinetik enerji yardımıyla giderilmeye çalışılır ve daha sonra yük frekans kontrolörleri yardımıyla sistem frekansı yeniden anma değerine getirilir.

1.3.4. Yük Frekans Kontrolü Çevrimleri

Güç sistemlerinde yük frekans kontrolü iki kontrol çevrimi ile gerçekleştirilen bir kontrol işlemidir. Bunlar; Birincil (Primary) kontrol çevrimi ve İkincil (Secondary) kontrol evrimleridir.

1.3.4.1. Birincil Kontrol evrimi

Birincil kontrol çevrimi sistemdeki toplam g tüketimindeki değişim sonucu ortaya çıkan aktif güç dengesizliğinin yol açtığı sistem frekansındaki değişimi kabul edilebilir sınırlar içerisinde tutmaya yarayan ve bu işlemi çok kısa bir sürede gerçekleştiren bir kontrol çevrimi olarak tanımlanabilir. Bu kontrol işlemi enterkonnekte güç sistemi içerisinde yer alan g üretim ünitelerindeki hız regülatör sistemleriyle gerçekleştirilir. Hız regülatör sistemleriyle her bir üretim ünitesinin çıkış güç kendi hız regülasyonu oranında düzenlenir ve sistemdeki aktif güç dengesi yeniden sağlanmış olur. Hız regülatör sistemleri birincil kontrol işlemini hız regülatörü, hidrolik yükselteç ve hız regülatör denetimli vanalarla gerçekleştirir [54]. Bir g üretim ünitesindeki hız regülatörünün idealdeki hız ayar karakteristiği Şekil 1.5' te verilmiştir.



Şekil 1.5. Hız regülatörü ideal hız ayar karakteristiği

Şekil 1.5'ten de görüleceği üzere sistemdeki güç çıkışı P_0 iken üretilen enerji f_0 frekans değerine sahiptir. Yük değişimi sonucu üretilen güç hız regülatörü tarafından P_1 olacak şekilde ayarlanır ve sonuç olarak üretimde ΔP kadar bir artış meydana gelir. Böylece üretimle tüketim arasındaki denge sağlanmış olur. Bu durumda sistem frekansının yeni değeri ise f_1 olur.

Denklem (1.5)'te hız regülatörü tarafından gerçekleştirilen hız regülasyonun matematiksel ifadesi verilmiştir. Burada R hız ayar karakteristiğinin eğimi olup hız regülasyonunu temsil eder. Birimi Hz/MW 'dir.

$$R = \frac{f_1 - f_0}{P_1 - P_0} = \frac{\Delta f}{\Delta P} \quad (1.5)$$

Denklem (1.5) ile tanımlanan hız regülasyonu yüzde değer olarak ise denklem (1.6)'da ki gibi tanımlanabilir.

$$\%R = \frac{f_{NL} - f_{FL}}{f_0} \times 100 \quad (1.6)$$

Burada,

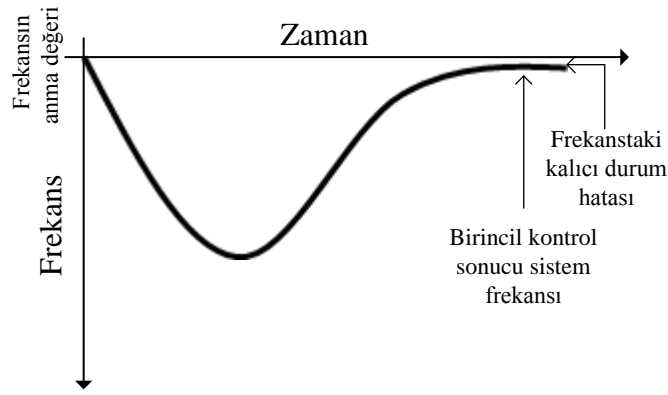
f_{NL} : Yüksüz durumdaki frekans

f_{FL} : Tam yükteki frekans

f_0 : Frekansın anma değeri

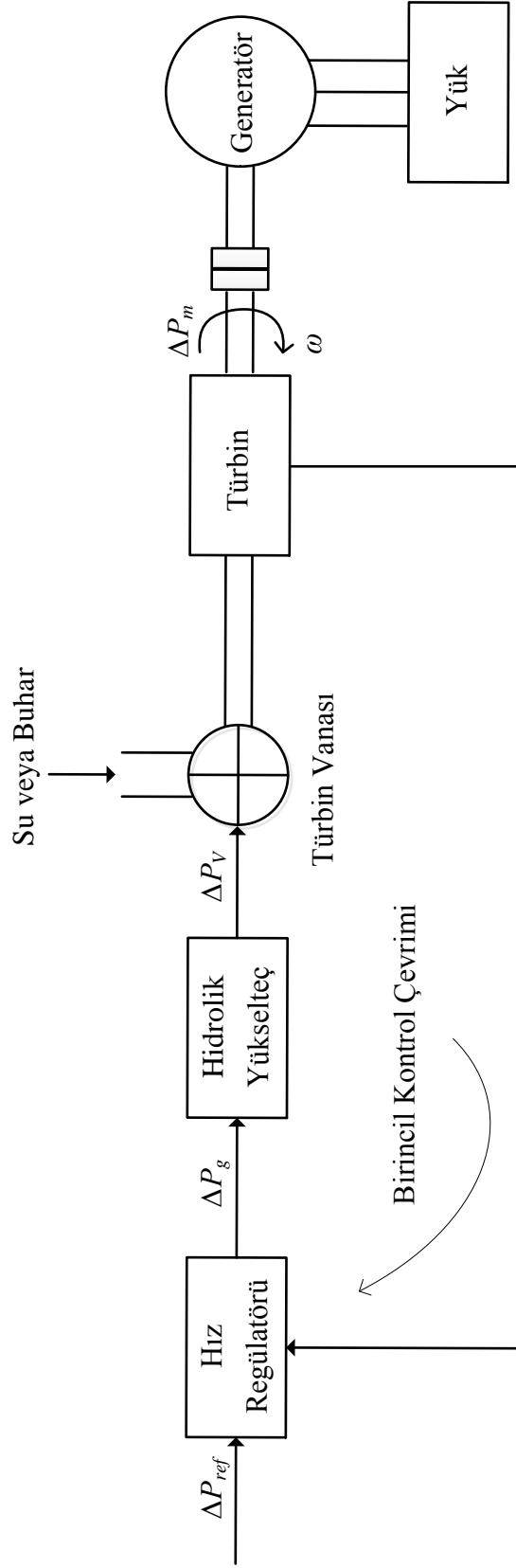
Bu ifadeye göre, örneğin %3 regülasyon oranına sahip bir hız regülatörü frekansta meydana gelebilecek %3'lük bir bozulma sonucunda güç çıkışında %100'lük bir değişime sebep olacaktır.

Birincil kontrol sonunda sistemdeki aktif güç dengesi frekansta meydana gelen Δf değerindeki bir kalıcı durum hatasıyla da olsa sağlanır. Herhangi bir yük artışı sonrasında birincil kontrolün etkisi ve sistemde meydana gelen kalıcı durum hatası Şekil 1.6 ile ifade edilebilir.



Şekil 1.6. Birincil kontrol sonucu sistem frekansı ve sürekli durum hatası

Birincil kontrol çevrimi içeren bir güç üretim ünitesinin şematik gösterimi Şekil 1.7'de gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Birincil kontrol çevrimi içeren bir güç üretim ünitesi

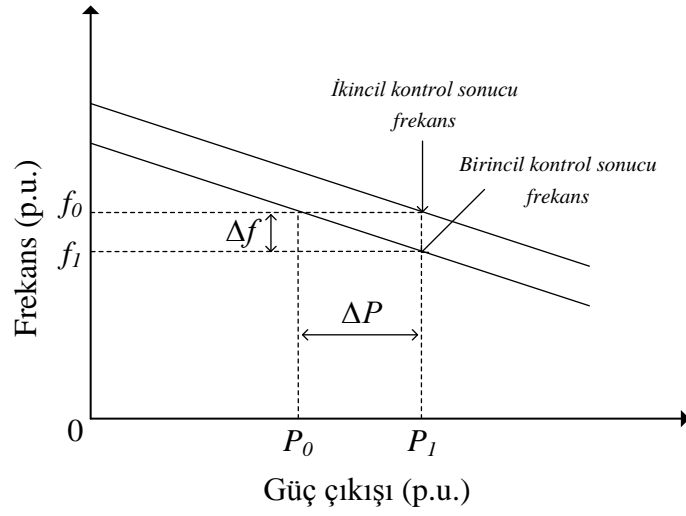
Özetle, bu kontrol çevriminde rotor hızındaki değişim bir başka ifadeyle frekanstaki değişim hız regülatörü ile algılanır. Hız regülatörü tarafından üretilen ΔP_g komut sinyali ile hidrolik yükselteç devreye sokulur. Böylece türbine giren su veya buhar miktarı ayarlanarak üretilen güç değiştirilir [55].

1.3.4.2. İkincil Kontrol Çevrimi

Birincil kontrol çevriminde belirli bir kalıcı durum hatasıyla da olsa sistem frekansının ve aktif güç dengesinin kontrol altına alındığından bahsedilmişti. İkincil kontrol çevrimi ise temelde kontrol altına alınan bu sorunların en aza indirgenmesi amacıyla yapılan bir kontrol işlemidir ve yük frekans kontrolü olarak ta bilinir [53]. İkincil kontrol çevrimi birincil kontrol çevrimine göre sistemdeki değişikliklere daha yavaş cevap verir. UCTE kriterlerine göre ikincil kontrol çevrimi en geç 30 sn içerisinde cevap vermelidir. Bu kontrol çevrimi 15 dk'lık bir zaman diliminde sistemdeki frekans hatasını en aza indirgeyebilmelidir [4]. İkincil kontrol çevrimi temel olarak iki görevi yerine getirir. Bunlar,

- Sistem frekansındaki kalıcı durum hatasını ortadan kaldırmak
- Güç bölgelerini birbirine bağlayan bağlantı hatlarındaki güç akışını istenilen sınırlar içerisinde tutmak

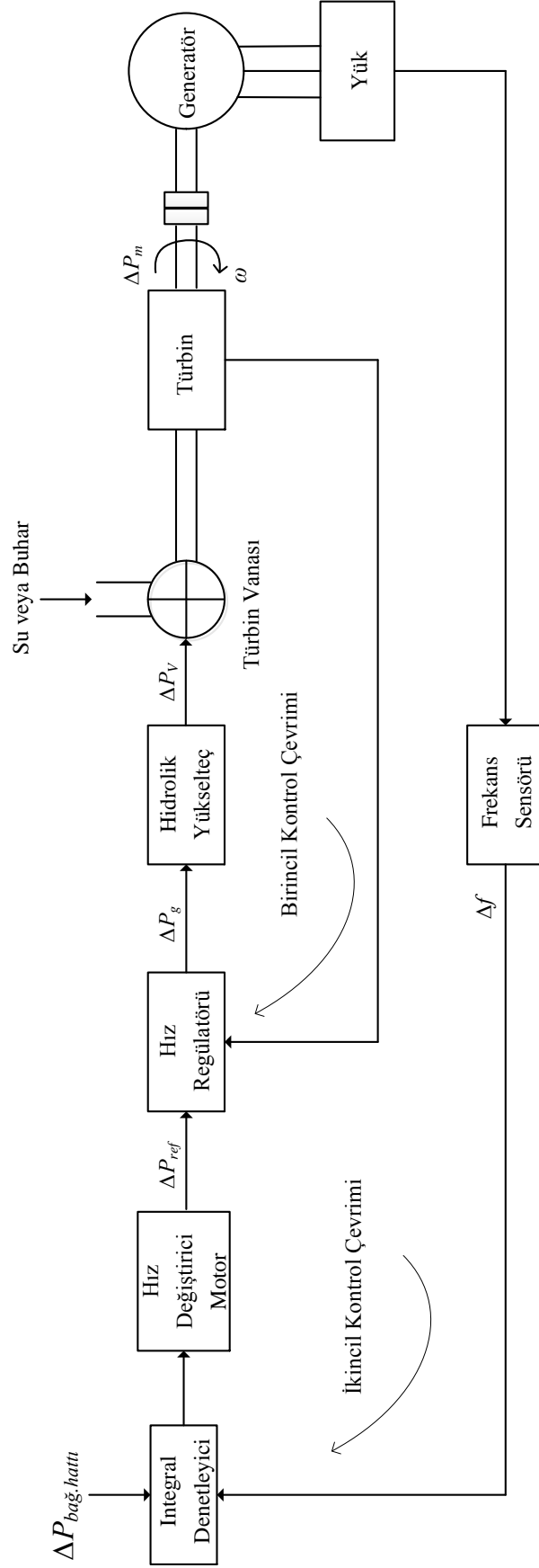
Güç sistemindeki bir yük artışı sonrasında ikincil kontrol çevriminin sistem frekansı üzerindeki etkisi Şekil 1.8 ile ifade edilebilir.



Şekil 1.8. İkincil kontrol çevriminin sistem frekansı üzerindeki etkisi

Şekil 1.8’de görüldüğü üzere ikincil kontrol çevrimi öncesi sistem frekansı kontrol altına alınmış ve üretim ile tüketim arasındaki denge sağlanmıştır. İkincil kontrol çevriminin devreye girmesiyle sistem frekansındaki değişim en aza indirgenir ve tekrar anma değerine getirilir.

İkincil kontrol çevrimi frekanstaki bu değişikliği temelde bir integratör içeren kontrolör ile gerçekleştirir [53]. İkincil kontrol çevrimine sahip bir güç üretim ünitesinin şematik gösterimi Şekil 1.9’da verilmiştir.



Şekil 1.9. İkincil kontrol çevrimi içeren bir güç üretim ünitesi

Şekil 1.9’da görüldüğü üzere ikincil kontrol çevrimine gelen hata değerinin integrali alınır ve birincil kontrol çevrimi sonucu frekansta meydana gelen kalıcı durum hatası en aza indirgenmeye çalışılır. Tek bölgeli güç sistemleri için kontrolöre gelen hata sinyali sadece frekanstaki değişimdir. Çok bölgeli güç sistemlerinde ikincil kontrol çevriminde kullanılan kontrolöre gelen hata ise Alan Kontrol Hatası (AKH veya ACE-Area Control Error) olarak adlandırılır ve denklem (1.7) ile ifade edilir [53,55].

$$AKH = \Delta P_{bağ.hattı} + B\Delta f \quad (1.7)$$

Burada $\Delta P_{bağ.hattı}$ güç bölgelerini birbirine bağlayan bağlantı hattından akan güçteki değişimi ifade ederken, B yükün ve hız regülatörünün frekansa olan duyarlılığını ifade eden frekans kutuplama sabitidir ve MW/Hz cinsinden ifade edilir. Alan kontrol hatasının matematiksel ifadesinin elde edilmesine ilişkin bilgi ilerleyen bölümlerde verilecektir.

Kontrolör bağlantı hattından ve frekanstan gelen bu hata değerlerini kullanarak hız üretim ünitelerinin hız değiştirici motorlarının konumunu denetler. Hız değiştirici motor ΔP_{ref} gücünü ayarlar ve hız regülatörü hidrolik yükselteç yardımıyla vananın kontrolünü yapıp sistem frekansındaki kalıcı durum hatasını yok eder. Bu işlem ise üretim ünitelerindeki hız regülatörlerinin hız ayar karakteristiklerinin kaydırılması ile yapılır.

1.3.5. Güç Sisteminin Modellenmesi

Dinamik bir sistemin davranışının nasıl değiştiğini gözlemlemek için mevcut sisteme ilişkin uygun bir matematiksel modelin elde edilmesi gerekmektedir. Güç sistemleri de dinamik bir yapıda olup hız regülatörler sistemleri, üretim üniteleri, türbin sistemleri ve bağlantı hattı gibi bileşenler içermektedir. Güç sistemine ilişkin bu bileşenlerin güç sisteminin kontrolünü gerçekleştirmek amacıyla bazı varsayımlar ve dönüşümler doğrultusunda matematiksel modelleri elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada ele alınan yük-frekans kontrolü, güç sistemlerinin normal çalışma durumunda işletilen kontrol işlemlerinden biridir. Güç sistemlerinin normal çalışma koşullarında sistem parametrelerinin ve bozucu yük etkilerinin genlik bakımından küçük ölçekteki değişimleri dinamik yapıdaki güç sistemlerini temsil eden diferansiyel denklemlerin doğrusal yapıdaki denklemlerle ifade edilebilmesine olanak sağlamaktadır.

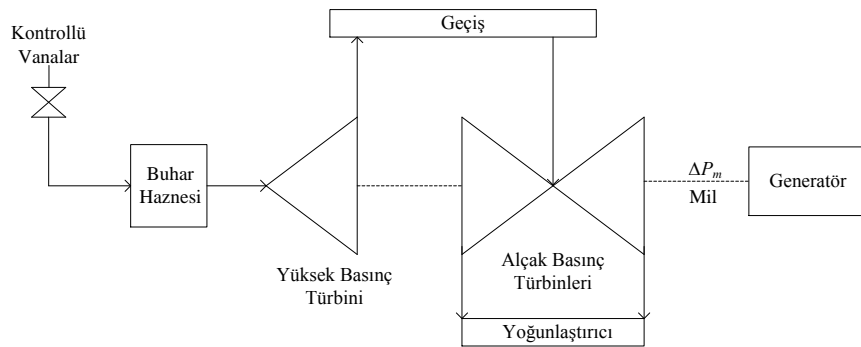
Böylece güç sistemlerinin yük frekans kontrolünde güç sistem bileşenlerinin doğrusal modellerini kullanmak mümkün olmaktadır [53].

Çalışmanın bu bölümünde güç sistemi bileşenlerinin doğrusal modelleri elde edilmiştir. Daha sonra ise elde edilen doğrusal modeller kullanılarak ara ısıtmasız iki bölgeli güç sistemine ait model oluşturulmuştur. Benzetim çalışmaları ile de modellenen güç sisteminin yük frekans kontrolü ele alınmıştır.

1.3.5.1. Türbin Modeli

Generatör tarafından üretilen elektrik enerjisinin frekansı generatör rotorunun açısal hızı ile belirlenen bir büyüklüktür. Generatör rotorunun sürekli durumdaki açısal hızı ise rotorun dönmesini sağlayan türbin milinin hızı tarafından belirlenir [56].

Bir türbin sistemi genel olarak elektrik enerjisinin temel kaynağı olan su veya su buharından elde edilen kinetik enerjiyi ve ısı enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren sistemdir. Enerji üretiminde yaygın olarak kullanılan türbinler hidrolik ve buhar türbinleridir [57]. Bu bölümde yapılan tez çalışmasında kullanılan ara ısıtmasız buhar türbininin doğrusal modeli verilmiştir. Ara ısıtmasız buhar türbinine ilişkin şematik gösterim Şekil 1.10'da ki gibidir.



Şekil 1.10. Ara ısıtmasız buhar türbinini şematik gösterimi

Burada akış miktarı kontrollü vanalar ile ayarlanan buhar herhangi bir ara ısıtma işlemine tabi tutulmamaktadır. Ara ısıtmasız buhar türbinin doğrusal modeline ilişkin matematiksel ifade denklem (1.8)'de verilmiştir.

$$\tau_T \frac{d\Delta P_m}{dt} = -\Delta P_m + \Delta P_v \quad (1.8)$$

Denklem (1.8)'e Laplace dönüşümü uygulanırsa;

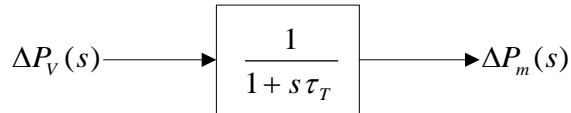
$$s\tau_T \Delta P_m(s) = -\Delta P_m(s) + \Delta P_v(s) \quad (1.9)$$

elde edilir.

Sonuç olarak ara ısıtmasız buhar türbinin doğrusal modeline ilişkin transfer fonksiyonu denklem (1.10) ile ifade edilebilir.

$$G_T(s) = \frac{\Delta P_m(s)}{\Delta P_v(s)} = \frac{1}{1 + s\tau_T} \quad (1.10)$$

Burada τ_T ifadesi buharın türbin vanasından geçişi ile mekanik enerjinin üretimi arasında meydana gelen zaman gecikmesi ya da diğer bir ifadeyle türbin zaman sabiti olarak tanımlanabilir. ΔP_m ve ΔP_v sırasıyla türbinin çıkışındaki mekanik gücün değişimi ve vananın konumundaki değişikliği ifade etmektedir [58]. Ara ısıtmasız buhar türbinine ilişkin doğrusal model Şekil 1.11'de verilmiştir.



Şekil 1.11. Ara ısıtmasız buhar türbini doğrusal modeli

1.3.5.2. Generatör Modeli

Bir güç sisteminde aktif güç dengesi türbin tarafından üretilen mekanik güç P_m ile generatör tarafından üretilen güç P_e 'nin eşit olması durumu olarak tanımlanır. Denge durumunda generatör rotorunun açısal dönme hızı ω ve dolayısıyla sistem frekansı f anma değerinde sabittir. Güç sistemine bağlı tüketici yüklerinde meydana gelen herhangi bir değişim bu denge durumunun bozulmasına dolayısıyla açısal hızın ve frekansın anma değerinden sapmasına yol açar. Anma değerindeki bu sapmaların giderilebilmesi için

mekanik ve elektriksel güçler arasındaki eşitliğin tekrar ve sürekli şekilde sağlanması gerekmektedir. Bu bölümde güç dengesi ve frekans arasındaki bu ilişki doğrultusunda generatöre ilişkin doğrusal model elde edilmiştir. [48, 54, 57].

Genereatör modeli elde edilirken tanımlanan eşitliklerdeki “ ω_0 ” indisi ilgili parametrenin başlangıç veya diğer bir ifadeyle denge durumundaki anma değerini ifade ederken “ Δ ” ile ifade edilen büyüklükler denge durumunun bozulması sonucu anma değerden meydana gelen sapmayı göstermektedir. Bütün büyüklükler birim değer (p.u.) olarak ifade edilmiştir. Güç sistemlerinde moment T ve güç P arasındaki ilişki açısal hız ω 'ya bağlı olarak denklem (1.11) ile ifade edilir.

$$P = \omega T \quad (1.11)$$

Güç, moment ve açısal hızın başlangıç değerleri ve anma değerlerden sapma cinsinden ifadeleri ise denklem (1.12)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} P &= P_0 + \Delta P \\ T &= T_0 + \Delta T \\ \omega &= \omega_0 + \Delta \omega \end{aligned} \quad (1.12)$$

Denklem (1.12) denklem (1.11)'de yerine konulursa,

$$P_0 + \Delta P = (\omega_0 + \Delta \omega)(T_0 + \Delta T) \quad (1.13)$$

olur.

Denklem (1.13)'te ki güç ifadesi mekanik güç P_m ve elektriksel güç P_e 'ye, yine benzer şekilde moment ifadesi mekanik moment T_m ve elektriksel moment T_e 'ye bağlı olarak denklem (1.14)'te gösterilmiştir.

$$(P_{m0} - P_{e0}) + (\Delta P_m - \Delta P_e) = (\omega_0 + \Delta \omega)[(T_{m0} - T_{e0}) + (\Delta T_m - \Delta T_e)] \quad (1.14)$$

Sürekli durumda $P_{m0} = P_{e0}$ ve $T_{m0} = T_{e0}$ 'dır. ΔT ve $\Delta \omega$ çarpımlarının ihmal edilmesi durumunda;

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \omega_0 (\Delta T_m - \Delta T_e) \quad (1.15)$$

olur.

Moment ifadesi generatör eylemsizlik momenti I 'ya bağlı olarak denklem (1.16)'da verilmiştir.

$$T = (T_{m0} - T_{e0}) + (\Delta T_m - \Delta T_e) = I \frac{d(\Delta\omega)}{dt} \quad (1.16)$$

Sürekli durumda $T_{m0} = T_{e0}$ olduğuna göre

$$(\Delta T_m - \Delta T_e) = I \frac{d(\Delta\omega)}{dt} \quad (1.17)$$

olur.

Denklem (1.17) denklem (1.15)'te yerine konulursa

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \omega_0 I \frac{d(\Delta\omega)}{dt} \quad (1.18)$$

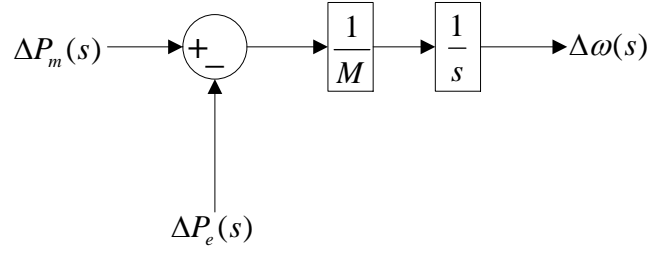
olduğu görülür.

Burada $\omega_0 I = M$ olup makinanın açısal momentumunu ifade etmektedir. Buna göre denklem (1.18) düzenlenirse denklem (1.19) aşağıda verildiği gibi elde edilir.

$$\Delta P_m - \Delta P_e = M \frac{d(\Delta\omega)}{dt} \quad (1.19)$$

Denklem (1.19)'a Laplace dönüşümü uygulanırsa generatörün doğrusal modelinin elde edilmesinde kullanılan denklem (1.20) elde edilir ve buna bağlı olarak elde edilen doğrusal model Şekil 1.12'de gösterilmiştir [54, 57].

$$\Delta P_m(s) - \Delta P_e(s) = Ms\Delta\omega(s) \quad (1.20)$$



Şekil 1.12. Generatöre ilişkin doğrusal model

1.3.5.3. Yük Modeli

Bir güç sistemine bağlı olarak işletilen yükler elektrikli cihazların farklı karakteristiklerinden dolayı omik, endüktif veya kapasitif özellik gösterebilirler. Aydınlatma ve ısıtıcı yükleri omik yapıda olup sistem frekansındaki değişimden etkilenmezken, sisteme bağlı elektriksel yüklerin önemli bir kısmını oluşturan fan ve pompa gibi motor yükleri endüktif yapıda olup frekans hassasiyeti olan yüklerdir. Bu nedenle frekansta meydana gelen herhangi bir değişim şebekeye bağlı motorların hızlarında dolayısıyla sistemden çekilen toplam güçte değişikliklere yol açacaktır. Bu durum göz önüne alınarak omik ve endüktif bileşen içeren bir elektriksel yükün sistem frekansındaki değişimden nasıl etkilendiği denklem (1.21) ile ifade edilebilir.

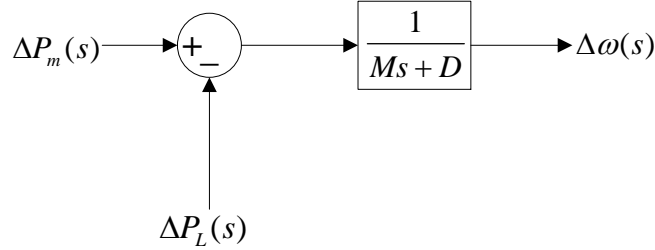
$$\Delta P_e = \Delta P_L + \Delta P_D \quad (1.21)$$

Burada ΔP_L frekans hassasiyeti olmayan yani omik yüklerdeki değişimi ifade ederken ΔP_D frekansa bağlı yani endüktif veya kapasitif yüklerdeki değişimi temsil etmektedir. ΔP_e ise elektriksel yükteki toplam değişimi göstermektedir. ΔP_D 'nin frekans değişimi $\Delta\omega$ 'ya bağlı ifadesi denklem (1.22)'de verilmiştir.

$$\Delta P_D = D\Delta\omega \text{ veya } D = \frac{\Delta P_D}{\Delta\omega} \quad (1.22)$$

Denklem (1.22)'de ki D ifadesi yük değişiminin frekans değişimine oranı olup yük sönüm sabiti olarak tanımlanır. Yük sönüm sabiti %1 ile %2 arasında bir değere sahiptir. Örneğin; eğer $D=\%1$ ise yükte meydana gelen %1'lik bir değişim sistem frekansının anma

değerinden %1 oranında sapması anlamına gelmektedir. Yük sönüm sabitinin etkisini gösteren ve generatör modeline eklenmiş yük modeli Şekil 1.13'te verilmiştir [57].



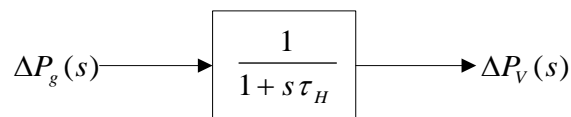
Şekil 1.13. Generatör ve yüke ait doğrusal model

1.3.5.4. Hidrolik Yükselteç Modeli

Türbin vanalarını harekete geçirebilmek için büyük mekanik güçlere ihtiyaç vardır. Bir güç sisteminde hız regülatörünün çıkışından elde edilen güç vanayı harekete geçirmek için gerekli olan mekanik kuvveti sağlayamaz. Bu nedenle sisteme, hız regülatörü çıkışındaki gücü artırarak türbin vanasını harekete geçirecek mekanik kuvveti sağlayan hidrolik yükselteç ilave edilir [59]. Hidrolik yükseltece ilişkin transfer fonksiyonu denklem (1.23)'te verilmiştir.

$$G_H(s) = \frac{\Delta P_V(s)}{\Delta P_g(s)} = \frac{1}{1 + s\tau_H} \quad (1.23)$$

Burada ΔP_V vana konumundaki değişikliği yada bir başka ifadeyle hidrolik yükseltecin çıkışındaki değişimi ifade eder. ΔP_g hız regülatörü çıkışındaki güç ifadesidir. τ_H ise hidrolik yükseltecin geometrik yapısı ve buhar akış basıncı gibi parametrelere bağlı olarak değişen hidrolik zaman sabitidir [53]. Hidrolik yükseltecin doğrusal modeli Şekil 1.14'te verilmiştir.



Şekil 1.14. Hidrolik yükseltece ilişkin doğrusal model

1.3.5.5. Hız Regülatörü Modeli

Hız regülatör sistemi yük frekans kontrolünün en önemli bileşenlerinden biri olup sistemdeki toplam yük değişiminden kaynaklanan frekans sapmalarını algılayıp ve bu sapmaları gidermek amacıyla türbin çıkışındaki mekanik gücü ayarlayan vanaların konumunu değiştirme görevini gerçekleştirmektedir. Bir hız regülatör sistemi hız regülatörü, hız değiştirici motor, hidrolik yükselteç ve kontrollü vanalardan oluşmaktadır. Burada hız regülatör sisteminin temel elemanı olan hız regülatörünün modellenmesi ele alınmıştır.

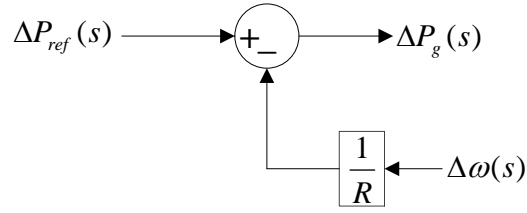
Hız regülatörü rotor hızındaki değişimi konum değişikliği olarak ifade eden mekanik bir çevirici olarak düşünülebilir. Hız regülatörünün çıkışında ΔP_g komutu üretilir ve bu komutla türbine giren su veya buhar miktarı ayarlanarak türbin çıkış gücü frekans sapmasını yok edecek şekilde ayarlanır. Hız regülatörü referans güçteki ΔP_{ref} değişimi ile rotor hızının değişiminin farkını alan bir karşılaştırıcı olarak çalışır. Bu ifadeye göre hız regülatörünün iki girişi olduğu söylenebilir (Bkz.Şekil 1.9). Bu duruma ilişkin matematiksel ifade denklem (1.24)'te verilmiştir.

$$\Delta P_g = \Delta P_{ref} - \frac{1}{R} \Delta \omega \quad (1.24)$$

Burada R ifadesi daha önce bahsedilen hız ayar karakteristiğinin eğimidir. Denklem (1.24)'de de görüldüğü üzere hız regülatörünün çıkış gücü referans gücün artması ve rotor hızının azalmasıyla artarken, referans güçteki azalma ve rotor hızındaki artış hız regülatörü çıkış gücünün azalmasına sebep olmaktadır. Denklem (1.24)'e Laplace dönüşümü uygulanırsa;

$$\Delta P_g(s) = \Delta P_{ref}(s) - \frac{1}{R} \Delta \omega(s) \quad (1.25)$$

elde edilir ve denklem (1.25)'e göre oluşturulmuş hız regülatörünün doğrusal modeli Şekil 1.15'te verilmiştir [59].



Şekil 1.15. Hız regülatörü doğrusal modeli

1.3.5.6. Kontrol Alanı Modeli

Kontrol alanı gerilim ve frekans gibi parametreleri denetlenecek olan güç sistemine ait birim olarak tanımlanabilir. Güç sistemlerinde yer alan kontrol alanlarına ait güç üretim ünitelerinin giriş ve çıkış ifadelerine bağlı olarak kontrol alanı modellenmesi gerçekleştirilebilir. Bir güç sisteminde üretilen ve tüketilen güçler arasındaki fark genel olarak üç kaynaktan giderilir. Bunlar,

- Güç üretim ünitelerinin kinetik enerjisindeki değişim
- Frekanstaki değişimden kaynaklanan güç tüketimi
- Bağlantı hattı gücündeki değişim

Güç sistemlerinde kontrol alanının giriş ve çıkışı arasındaki ifade üretilen ve tüketilen güçler bakımından denklem (1.26) ile ifade edilebilir.

$$\Delta P_G - \Delta P_D = \frac{d}{dt} W_{kin} + D\Delta f + \Delta P_{bağ.hattı} \quad (1.26)$$

Burada ΔP_G ve ΔP_D sırasıyla üretilen ve tüketilen güçlerdeki değişimi ifade eder. W_{kin} ise üretim ünitesinde depo edilen kinetik enerji olarak tanımlanır ve denklem (1.27)'de ki gibi ifade edilir. Güç sistemlerinde tüketilen güçteki artışa bağlı olarak sistem frekansında bir azalma meydana gelir. Frekansta oluşan bu azalma güç sistemine bağlı yüklerin önemli bir kısmını oluşturan endüktif yüklerin şebekeden talep ettiği gücün düşmesine neden olur. Bu durum daha önceki bölümlerde tanımlanan yük sönüm sabiti D ile ifade edilir.

$$W_{kin} = \left(\frac{f^0 + \Delta f}{f^0} \right)^2 W_{kin}^0 \cong \left(1 + 2 \frac{\Delta f}{f^0} \right) W_{kin}^0 \quad (1.27)$$

Burada,

- W_{kin} : Üretim ünitesinde depolanan kinetik enerji
 W_{kin}^0 : Üretim ünitesinde depolanan kinetik enerjinin anma değeri
 f : Frekans
 f^0 : Frekansın anma değeri
 $\Delta f = f - f^0$: Frekanstaki değişim

Denklem (1.27)'nin zamana bağlı olarak türevi alınırsa,

$$\frac{d}{dt} W_{kin} = 2 \frac{W_{kin}^0}{f^0} \frac{d}{dt} \Delta f = 2 \frac{H}{f^0} \frac{d}{dt} \Delta f \quad (1.28)$$

elde edilir. Burada H generatör eylemsizlik sabiti olup kontrol alanı gücü ΔP_T cinsinden denklem (1.29)'da ki gibi tanımlanır.

$$H = \frac{W_{kin}^0}{P_T} \quad (1.29)$$

Denklem (1.28) denklem (1.26)'da yerine konulursa;

$$\Delta P_G - \Delta P_D = 2 \frac{H}{f^0} \frac{d}{dt} \Delta f + D \Delta f + \Delta P_{bağ.hatı} \quad (1.30)$$

elde edilir. Denklem (1.30)'a Laplace dönüşümü uygulanması durumunda kontrol alanının doğrusal modeli için kullanılacak olan denklem (1.31) elde edilir.

$$\left[\Delta P_G(s) - \Delta P_D(s) - \Delta P_{bağ.hatı}(s) \right] \frac{f^0}{2Hs + f^0 D} = \Delta f(s) \quad (1.31)$$

Burada,

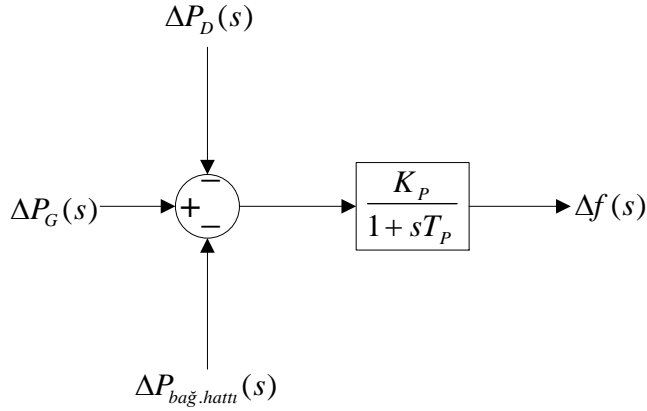
$$\frac{f^0}{2Hs + f^0 D} = \frac{K_p}{1 + sT_p} \quad (1.32)$$

olarak tanımlanır.

$$K_p = \frac{1}{D} \quad : \text{Kontrol alanı kazancı (Hz/p.u.MW)} \quad (1.33)$$

$$T_p = 2 \frac{H}{f^0 D} \quad : \text{Kontrol alanı zaman sabiti (Saniye)} \quad (1.34)$$

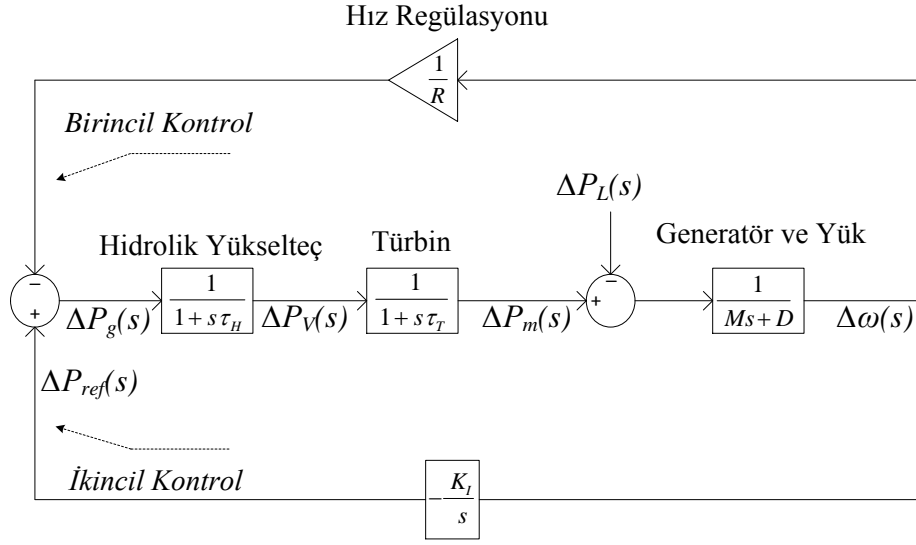
Tüm bu eşitliklere göre elde edilen kontrol alanının doğrusal modeli Şekil 1.16'da verilmiştir [60].



Şekil 1.16. Kontrol alanı doğrusal modeli

1.3.5.7. Tek Bölge Güç Sistemi Modeli

Bu bölümde tek bölge bir güç sisteminin yük frekans kontrolünde kullanılacak olan doğrusal modeli oluşturulacaktır. Daha önceki bölümlerde doğrusal modelleri elde edilen türbin, generatör, yük, hız regülatörü ve hidrolik yükselteç modelleri birleştirilerek güç sistemine ait doğrusal model Şekil 1.17'de gösterildiği gibi elde edilebilir. Tek bölge güç sisteminde kontrolörün girişi olan hata işareti frekanstaki değişimdir. Bu nedenle tek bölge güç sistemlerinde yük frekans kontrolünün amacı sadece frekanstaki sapmayı gidermektir. Daha önce bahsedildiği gibi birincil kontrol çevrimi frekanstaki kalıcı durum hatasını giderememektedir. İkincil kontrol çevriminin devreye girmesiyle frekanstaki kalıcı durum hatası ortadan kaldırılır ve frekans tekrar anma değerine getirilir. Yük frekans kontrolünde ikincil kontrolü gerçekleştirmek amacıyla integral kontrol işlemi uygulanır.



Şekil 1.17. Tek bölgeli güç sisteminin doğrusal modeli

Sistemde denklem (1.35)'te gösterildiği birim adım yük artışı olduğu varsayılmıştır. P_{ref} sabit ve dolayısıyla $\Delta P_{ref}=0$ alınmıştır

$$\Delta P_L(s) = \frac{\Delta P_L}{s} \quad (1.35)$$

Bu şartlar altında tek bölgeli güç sisteminde sadece hız regülatör sistemi ile birincil kontrol işlemi gerçekleştirilirse hızdaki diğer bir ifadeyle frekanstaki değişim denklem (1.36) ile ifade edilebilir.

$$\Delta \omega(s) = - \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{R}\right) \left(\frac{1}{1+s\tau_H}\right) \left(\frac{1}{1+s\tau_T}\right) \left(\frac{1}{Ms+D}\right)} \frac{\Delta P_L}{s} \quad (1.36)$$

Frekanstaki değişimin sürekli durumdaki değeri sonlu değer teoremi denklem (1.36)'ya uygulanarak denklem (1.38)'de ki gibi elde edilir.

$$\Delta \omega = \lim_{s \rightarrow 0} [s \Delta \omega(s)] \quad (1.37)$$

$$\Delta\omega = -\frac{\frac{\Delta P_L}{D}}{1 + \frac{1}{R} + \frac{1}{D}} = -\frac{\Delta P_L}{\frac{1}{R} + D} \quad (1.38)$$

Burada D daha önce bahsedilen yük sönüm sabiti olup sıfır ($D=0$) alınırsa frekanstaki değişim $\Delta\omega = -R\Delta P_L$ olur. Sistemde m adet generatör bulunması durumunda ise frekansta meydana gelen değişim denklem (1.39) ile ifade edilir.

$$\Delta\omega = -\frac{\Delta P_L}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_m} + D} \quad (1.39)$$

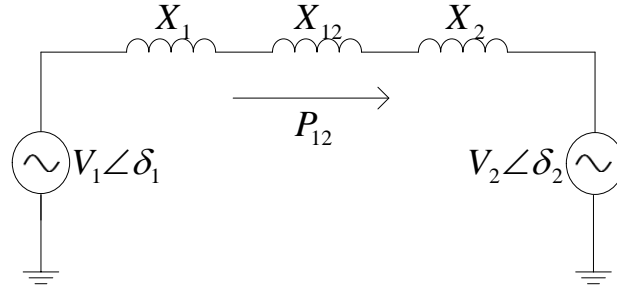
Görüldüğü üzere sadece hız regülatörü ile birincil kontrol işleminin gerçekleştirilmesi durumunda sistem frekansında bir kalıcı durum hatası meydana gelmektedir. İntegratör içeren ikincil kontrol çevriminin uygulanmasıyla frekanstaki değişim denklem (1.40)'da ki gibidir.

$$\Delta\omega(s) = -\frac{s(1 + s\tau_H)(1 + s\tau_T)}{s(Ms + D)(1 + s\tau_H)(1 + s\tau_T) + K_I + \frac{s}{R}} \times \frac{\Delta P_L}{s} \quad (1.40)$$

Sürekli durum teoreminin denklem (1.40)'a uygulanması durumunda frekanstaki değişimin $\Delta\omega=0$ olduğu görülecektir [57, 59, 60].

1.3.5.8. Bağlantı Hattı Modeli

Enterkonnekte güç sistemlerinde kontrol edilecek güç bölgelerini birbirine bağlayan hatlara bağlantı hattı denir. İki bölgenin frekanslarının farklı olması durumunda bağlantı hattından akan net aktif güç miktarı değişir ve yük frekans kontrolünün temel görevlerinden biri de bu bölgeler arası bağlantı hattından akan gücün daha önce belirlenen sınırlar içerisinde kalmasını sağlamaktır. Bu bölümde güç akışının birinci bölgeden ikinci bölgeye doğru olduğu varsayımı ile bağlantı hattına ilişkin doğrusal model elde edilmiştir. İki bölgeyi bir güç sisteminin elektriksel eşdeğer devresi Şekil 1.18'de verilmiştir.



Şekil 1.18. İki bölge güç sisteminin elektriksel eşdeğer devresi

Bu eşdeğer devrede kontrol edilecek güç bölgeleri birer AA güç kaynağı olarak temsil edilmiştir. Burada V hat sonu gerilimini, δ hat sonu gerilimi faz açısını ve X eşdeğer reaktansı ifade etmektedir. P_{12} ise bölgeler arasındaki net aktif güç alışverişini göstermektedir. Normal işletme koşullarında ve hat kayıplarının ihmal edilmesi durumunda bölgeler arası net güç alışverişi denklem (1.41)'de verilmiştir.

$$P_{12} = \frac{|V_1||V_2|}{X_T} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (1.41)$$

Burada,

V_1 ve V_2 : Sırasıyla 1.Bölge ve 2. Bölge hat sonu gerilimi

$X_T = X_1 + X_2 + X_{12}$: Elektriksel eşdeğer devrenin toplam reaktansı

δ_1 ve δ_2 : Sırasıyla 1. ve 2. Bölge hat sonu gerilimleri faz açıları

T_{12} güç bölgeleri arasındaki güç akışı ile orantılı hattın senkronize edici moment katsayısı olup denklem (1.42) ile ifade edilebilir.

$$T_{12} = \frac{|V_1||V_2|}{X_T} \cos(\delta_1 - \delta_2) \quad (1.42)$$

Bu durumda bağlantı hattından akan güç ΔP_{12} , T_{12} cinsinden denklem (1.43)'te ki gibi yazılabilir.

$$\Delta P_{12} = T_{12}(\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2) \quad (1.43)$$

Hat sonu gerilimlerinin faz açılarının frekansa bağlı ifadesi ise denklem (1.44)'te verilmiştir.

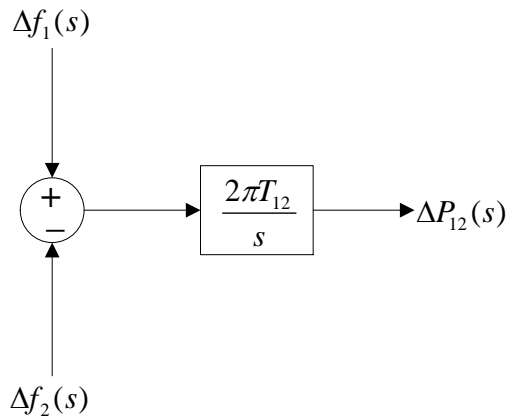
$$\begin{aligned}\Delta\delta_1 &= 2\pi \int \Delta f_1 dt \\ \Delta\delta_2 &= 2\pi \int \Delta f_2 dt\end{aligned}\quad (1.44)$$

Denklem (1.44) denklem (1.43)'te yerine konulursa bağlantı hattından akan güçteki değişimin senkronize edici moment katsayısı ve frekanslar cinsinden ifadesini gösteren denklem (1.45) elde edilir.

$$\Delta P_{12} = 2\pi T_{12} \left(\int \Delta f_1 dt - \int \Delta f_2 dt \right) \quad (1.45)$$

Denklem (1.45)'e Laplace dönüşümü uygulanması durumunda denklem (1.46) elde edilir ve bu denklem bağlantı hattının doğrusal modelinin elde edilmesinde kullanılmakta olup bağlantı hattına ilişkin doğrusal model Şekil 1.19'da gösterilmiştir [57,59].

$$\Delta P_{12}(s) = \frac{2\pi T_{12}}{s} [\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)] \quad (1.46)$$



Şekil 1.19. Bağlantı hattına ilişkin doğrusal model

1.3.5.9. Alan Kontrol Hatası

Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi güç sistemlerinde yük frekans kontrolünün amacı sadece frekansta meydana gelen hatayı gidermek değil aynı zamanda bağlantı hattından akan güçteki değişimleri daha önceden belirlenmiş anlaşmalara göre istenilen sınırlar dâhilinde tutmaktır. Bir güç sisteminde bağlantı hattından akan güç bölgeler arasındaki frekans farkının integraline bağlı olarak ifade edilir (Bkz. denklem (1.45)). Dolayısıyla frekansta meydana gelen herhangi bir hata bağlantı hattından akan gücün de değişimine yol açacaktır. Bu durumda frekanstaki değişimin yanı sıra bağlantı hattından akan güçteki sapmaya ilişkin bilgide yük frekans kontrolünde kullanılan denetleyicilere hata işareti olarak uygulanmalıdır. Bu bilgiler ışığında Alan Kontrol Hatası (AKH) denklem (1.47)'de verildiği gibi ifade edilir.

$$AKH_i = \sum_j^n \Delta P_{ij} + B_i \Delta f_i, \quad j = 1, \dots, n \quad (j \neq i) \quad (1.47)$$

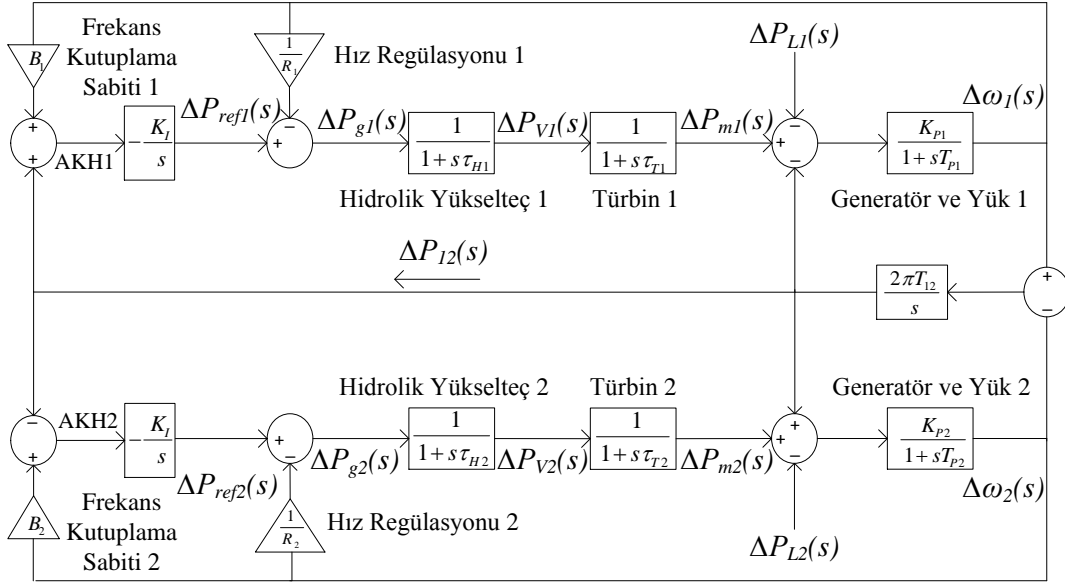
Burada B_i frekans kutuplama sabitidir ve birimi MW/Hz 'dir. Frekans kutuplama sabitinin matematiksel ifadesi denklem (1.48)'de verilmiştir.

$$B_i = D_i + \frac{1}{R_i} \quad (1.48)$$

Her bölgeye ait alan kontrol hatası güç sisteminde yer alan üretim ünitelerinin çıkışı olarak alınır. AKH işaretinin minimize edilmesi durumunda sistem frekansı ve bağlantı hattından akan güç anma değerlerinde kalacaktır [57].

1.3.5.10. İki Bölge Güç Sisteminin Modellenmesi

İki bölge güc sisteminin doğrusal modeli elde edilirken tek bölge güc sisteminin modelinin elde edilmesinde kullanılan güç sistem bileşenlerine ek olarak bağlantı hattı modeli de kullanılır. Bağlantı hattıyla birbirine bağlanan iki özdeş güç bölgesi içeren model Şekil 1.20'de verilmiştir. Burada güç akışının birinci bölgeden ikinci bölgeye doğru olduğu varsayılmıştır.



Şekil 1.20. İki bölge güc sisteminin doğrusal modeli

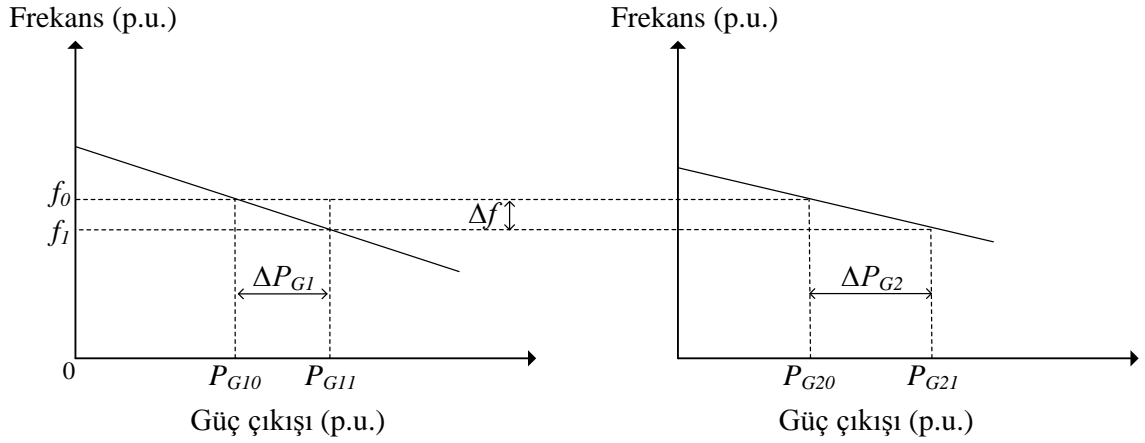
Sistemde sadece 1.Bölgede yük değişiminin olduğu varsayılırsa $\Delta P_{m1} = \Delta P_{G1}$ ve $\Delta P_{m2} = \Delta P_{G2}$ olmak üzere;

$$\begin{aligned} \Delta P_{G1} - \Delta P_{12} - \Delta P_{L1} &= \Delta f D_1 \\ \Delta P_{G2} + \Delta P_{12} &= \Delta f D_2 \end{aligned} \quad (1.49)$$

olduğu görülür. İki bölge güc sisteminde her üretim ünitesi kendi yük talebini karşılamalıdır. Her bölge kendi düşüm karakteristiğine göre üretim miktarını denklem (1.50) ve (1.51)'de gösterildiği gibi ayarlar. Paralel olarak çalışan bu üretim üniteleri arasındaki yük paylaşımı Şekil 1.21'de gösterilmiştir.

$$\Delta P_{G1} = -\frac{\Delta f}{R_1} \quad (1.50)$$

$$\Delta P_{G2} = -\frac{\Delta f}{R_2} \quad (1.51)$$



Şekil 1.21. Paralel olarak çalışan üretim üniteleri arasındaki yük paylaşımı

Denklem (1.50) ve (1.51), denklem (1.49)'da yerine konulursa sırasıyla frekansta meydana gelen değişimi ve bağlantı hattından akan güçte meydana gelen değişimi ifade eden denklem (1.52) ve (1.53) elde edilir [53, 57].

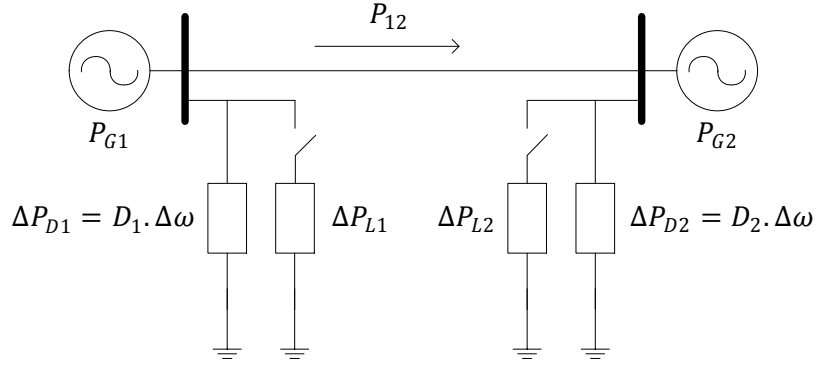
$$\Delta f = -\frac{\Delta P_L}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)} \quad (1.52)$$

$$\Delta P_{12} = -\frac{\Delta P_L \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)} \quad (1.53)$$

1.3.6. Bağlantı Hattı Kontrolü

Yük frekans kontrolünde birincil kontrol işlemi hız regülatörlerince gerçekleştirilmekte olup sistem frekansındaki değişimi belirli bir kalıcı durum hatasıyla da olsa durdurmaktadır. İkincil kontrol ise frekansta meydana gelen bu kalıcı durum hatasını ortadan kaldırma işlemini gerçekleştiren kontrol çevrimidir. İkincil kontrol çevrimi çok bölgesel güç sistemlerinde bu işlemi güç bölgelerini birbirine bağlayan bağlantı hattından akan gücü minimum maliyet hedefi gözeterek ve daha önceden belirlenmiş anlaşmalar

çerçevesinde denetleyerek gerçekleştirmektedir. Burada bağlantı hattından akan gücün denetimini açıklamak amacıyla aynı karakteristik değerlere sahip iki bölgeyi bir güç sistemi ele alınmıştır. Ele alınan ilgili iki bölgeyi güç sisteminin temsili gösterimi Şekil 1.22’de verilmiştir. İki bölge arasındaki güç akışının birinci bölgeden ikinci bölgeye doğru olduğu varsayılmıştır ve bu yön pozitif yön olarak kabul edilmiştir.



Şekil 1.22. İki bölgeyi güç sisteminde yük değişimi

Şekil 1.22’de görüldüğü gibi birinci bölgeden ikinci bölgeye doğru güç akışının daha önce yapılan anlaşmalar çerçevesinde P_{12} olduğu durumda ikinci bölgede yük talebinde ΔP_{L2} kadar bir artış meydana gelirse her iki bölge aynı karakteristik değerlere sahip olduğundan dolayı üretim miktarlarını talepteki artışı karşılamak amacıyla eşit oranda artıracaktır. Yani her iki bölgenin üretim miktarında $0.5\Delta P_{L2}$ kadar bir artış meydana gelecektir. Birinci bölgenin üretimini artırması durumunda daha önce P_{12} değerinde olan güç akışı $P_{12} + 0.5\Delta P_{L2}$ olacak ve istenilen değeri aşacaktır. İkincil kontrol çevrimi ile bağlantı hattından akan güç her bölgenin kendi yük talebine göre üretimini ayarlamasıyla istenilen değerler dâhilinde kalır. Bu durum matematiksel olarak denklem (1.54) ve (1.55)’te ifade edilmiştir. İkinci bölgede meydana gelen yük artışı ikinci bölge tarafından karşılanırken, birinci bölgede herhangi bir yük artışının olmaması nedeniyle üretim miktarında herhangi bir değişim meydana gelmemiştir.

$$\Delta P_{G1} = 0 \quad (1.54)$$

$$\Delta P_{G2} = \Delta P_{L2} \quad (1.55)$$

İkincil kontrol çevrimi bağlantı hattından akan gücün ve frekansın değişimine göre ilgili bölgenin üretim miktarını ayarlar. İki bölgeyi bir güç sisteminin bağlantı hattının kontrolünde ortaya çıkabilecek durumlar Tablo 1.2’de belirtilmiştir. Örneğin ikinci bölgede yük talebinde herhangi bir azalma meydana geldiği zaman sistem frekansı artacak ve bağlantı hattından akan güç istenmeyen şekilde azalacaktır. Bu durumda ikinci kontrol çevrimi devreye girerek ikinci bölgenin üretimi P_{G2} ’yi talepteki düşüş oranında azaltılır ve bağlantı hattından akan güçteki değişim sıfırlanır. Böylece sistem frekansındaki kalıcı durum hatası ortadan kaldırılır.

Tablo 1.2. Yük frekans kontrolünde bağlantı hattı kontrolü durumları

Frekans Değişimi (Δf)	Bağlantı Hattı Gücü Değişimi (ΔP_{12})	1.Bölge Yük Değişimi (ΔP_{L1})	2.Bölge Yük Değişimi (ΔP_{L2})	İlgili Kontrol İşlemi
Negatif	Negatif	Pozitif	Sıfır	P_{G1} artırılır
Pozitif	Pozitif	Negatif	Sıfır	P_{G1} azaltılır
Negatif	Pozitif	Sıfır	Pozitif	P_{G2} artırılır
Pozitif	Negatif	Sıfır	Negatif	P_{G2} azaltılır

İkincil kontrol çevrimi bu işlemi gerçekleştirmek AKH’ni kullanır. Denklem (1.56) ve (1.57)’de sırasıyla birinci ve ikinci bölgeler için alan kontrol hatasının matematiksel ifadesi verilmiştir.

$$AKH_1 = \Delta P_{12} + B_1 \Delta f \quad (1.56)$$

$$AKH_2 = \Delta P_{21} + B_2 \Delta f \quad (1.57)$$

Burada B_1 ve B_2 sırasıyla daha önceki bölümlerde bahsedilen birinci ve ikinci bölgenin frekans kutuplama sabitidir. Her iki bölgenin frekans kutuplama sabiti yük sönüm sabiti ve hız regülasyon oranı cinsinden denklem (1.58) ve (1.59)’da verilmiştir.

$$B_1 = \frac{1}{R_1} + D_1 \quad (1.58)$$

$$B_2 = \frac{1}{R_2} + D_2 \quad (1.59)$$

Şekil 1.20'de verilen iki bölgeli bir güç sisteminde yukarıda bahsedildiği gibi P_{L2} kadar bir yük değişimi olsun. Bu durumda frekansta ve bağlantı hattı gücünde meydana gelen değişim denklem (1.60) ve (1.61)'de ki gibi olur.

$$\Delta f = \frac{\Delta P_{L2}}{B_1 + B_2} \quad (1.60)$$

$$\Delta f = \frac{\Delta P_{L2}}{B_1 + B_2} \quad (1.61)$$

Bu durumda birinci ve ikinci bölgeler için alan kontrol hataları

$$AKH_1 = \frac{\Delta P_{L2} B_1}{B_1 + B_2} - (B_1) \frac{\Delta P_{L2}}{B_1 + B_2} = 0 \quad (1.62)$$

$$AKH_2 = -\frac{\Delta P_{L2} B_1}{B_1 + B_2} - (B_2) \frac{\Delta P_{L2}}{B_1 + B_2} = -\Delta P_{L2} \quad (1.63)$$

şeklinde elde edilir. Böylece her bölge kendi alan kontrol hatasını yok etmek üzere üretimini ayarlayacaktır. Tablo 1.2'den de görüldüğü üzere P_{L2} 'lik bir yük artışı durumunda ikinci bölgenin üretimi P_{L2} kadar artırılır ve böylece ikinci bölgeye ait alan kontrol hatası dolayısıyla frekans ve bağlantı hattı gücü değişimi sıfırlanmış olur [26, 53, 57, 59].

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Kontrol Yöntemleri

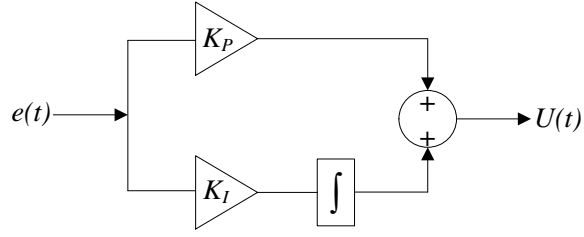
Bu bölümde iki bölgeli ara ısıtmasız güç sisteminde yük frekans kontrol işlemini gerçekleştirmek amacıyla PI (Oransal+İntegral) denetleyici ve Bulanık Mantık Denetleyici (BMD) tasarımlarının aşağıda verilen bilgiler ışığında Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmesi ele alınmıştır.

2.1.1. PI Denetleyici

Güç sistemlerinde yük frekans kontrolünün temel amacı tek bölgeli sistemlerde çıkış olarak kabul edilen frekanstaki değişimin sıfırlanması ve iki bölgeli güç sistemlerinde de buna ek olarak bağlantı hattından akan güçteki değişimin giderilmesidir. Bunun gerçekleştirilebilmesi için ise integral etkisi içeren denetleyicilerin kullanılması gerekmektedir. PI denetleyici tasarım ve uygulanabilirlik kolaylığı bakımından yük frekans kontrolünde sıklıkla tercih edilen bir denetleyicidir. PI denetleyici girişindeki hata işaretini belirli bir katsayıyla çarpar ve bu değeri hatanın yine belirli bir değerle çarpılmış integraliyle toplar. Böylece hata ve hatanın integraline bağlı bir kontrol işareti üretilmiş olur. Bu yapıdaki kontrol işaretinin üretilmesi ile sistem çıkışındaki aşma azaltılmaya ve kalıcı durum hatası giderilmeye çalışılır. PI denetleyiciye ilişkin matematiksel ifade denklem (2.1)'de verilmiştir.

$$U(t) = K_p \cdot e(t) + K_I \int e(t) dt \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'de $U(t)$ kontrol işaretini, $e(t)$ hatayı, K_p oransal kazancı ve K_I ise integral kazancını temsil eder. PI denetleyicinin blok gösterimi ise Şekil 2.1'de ki gibidir.

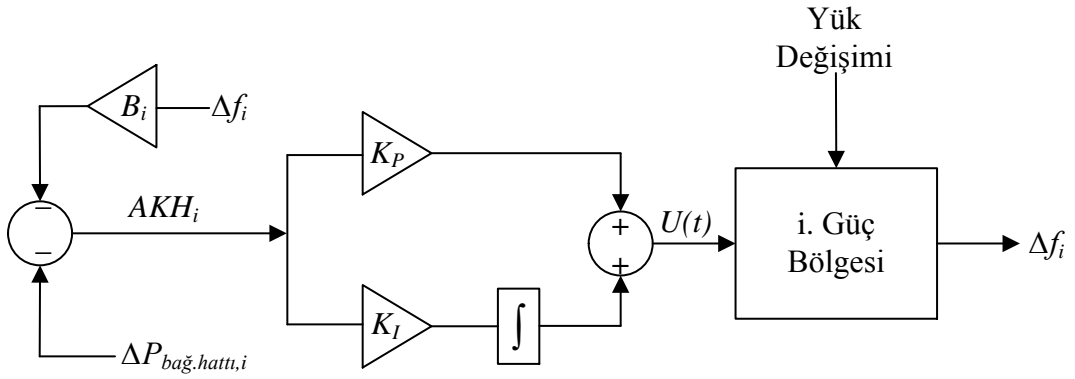


Şekil 2.1. PI denetleyici blok gösterimi

Yük frekans kontrolünde daha önceki bölümde belirtildiği gibi hata sinyali olarak AKH kullanılır. PI denetleyici tarafından üretilen kontrol işaretinin AKH'na bağlı ifadesi denklem (2.2)'de verilmiştir.

$$U(t) = K_P \cdot AKH_i(t) + K_I \int AKH_i(t) dt \quad (2.2)$$

Herhangi bir i. güç bölgesi için PI denetleyicinin yük frekans kontrolündeki kullanımı Şekil 2.2'de ki gibi ifade edilebilir.



Şekil 2.2. Yük frekans kontrolünde PI denetleyici

K_P ve K_I katsayıları ideal değerlerde ayarlanarak PI denetleyici kontrol amacına uygun olarak tasarlanabilir [12, 61].

2.1.2. Bulanık Mantık Denetleyici

Güç sistemlerinin doğrusal olmayan ve sürekli değişkenlik gösteren yapısı klasik denetleyicilerin güç sistemlerinin kontrolünde her zaman iyi sonuçlar verememesine yol açmaktadır. Klasik denetleyicilerin güç sistemlerine uygulanmasındaki bu dezavantajlı yapısı nedeniyle alternatif olarak akıllı denetleyiciler daha hızlı ve daha verimli denetim işlemi gerçekleştirmek amacıyla güç sistemlerine uygulanmaktadır. Bulanık mantık denetleyici de bu amaçla uygulanan denetleyicilerden biridir.

Bulanık mantığın kontrol uygulamalarındaki kullanımı son yıllarda artan bir öneme sahiptir. Bulanık mantığın temelleri Lotfi A. Zadeh tarafından 1965 yılında yayınlanan makale [62] ile atılmıştır. Yine Zadeh tarafından yapılan çalışmalar [63, 64] ile bulanık mantığın belirsizlik içeren sistemlere uygulanabileceği gösterilmiştir [65]. Mamadani'nin gerçekleştirmiş olduğu çalışma [66] ile de bulanık mantık teorisinin kontrol sistemlerine uygulanması hız kazanmıştır.

Bulanık mantık denetleyici klasik denetleyicilerden farklı olarak denetlenecek sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duymaz. Bulanık denetimde sistemin girişine uygulanan işaret sistem çıkışını istenilen seviyeye getirmek amacıyla uzman bir kişinin bilgi ve deneyimleri ile bir sistemi kontrol etmesine benzer bir şekilde ayarlanır [65].

Bulanık mantık özellikle doğrusal olmayan sistemlerin denetiminde alternatif bir kontrol yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bulanık mantık denetimde sistem davranışı klasik denetimden farklı olarak kesin değerler yerine dilsel değişkenlerle ifade edilir. Böylece bulanık mantığın ve bulanık kümelerin kullanılması ile makinaların karar verme mekanizması insanlarınkine benzetilebilmektedir.

2.1.2.1. Bulanıklık ve Bulanık Küme Kavramı

Bulanık kümeler bulanıklık ve bulanık mantık kavramlarının temelini oluşturur. Günlük hayatımızda dile getirdiğimiz birçok kavram ve terim aslında bulanıklık içerir. Buna örnek olarak sıcak, soğuk, ılık, hızlı, yavaş, yaşlı genç, az, biraz, fazla gibi terimler gösterilebilir. Tüm bu ve benzeri terimler bulanık mantıkta bulanık küme kavramlarıyla ifade edilirler.

Klasik küme kavramında bir nesne hiçbir zaman herhangi bir kümeye kısmi üyelik içermez. Diğer bir ifadeyle bir nesne ya o kümeye aittir ya da değildir. Klasik küme

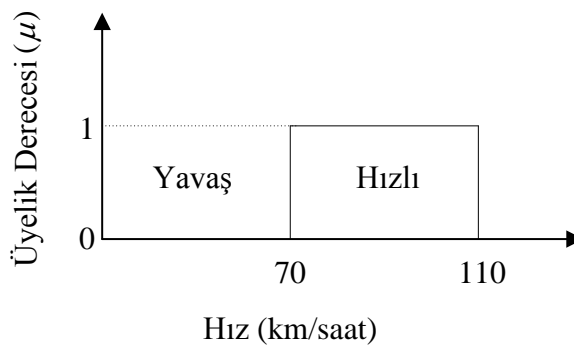
kavramında bir nesne o kümeye aitse 1 üyelik değerine sahiptir eğer üye değilse 0 üyelik değerine sahiptir. Bu durum matematiksel olarak aşağıdaki fonksiyon ile ifade edilebilir. Burada μ ilgili nesnenin o kümedeki üyelik derecesini ifade etmektedir.

$$\mu: U \Rightarrow \{0,1\} \quad (2.3)$$

Bulanık küme kavramında ise bir nesnenin o kümedeki üyelik derecesi 0 ile 1 arasında ifade edilebilir. Bu durum ise aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\mu: U \Rightarrow \{0-1\} \quad (2.4)$$

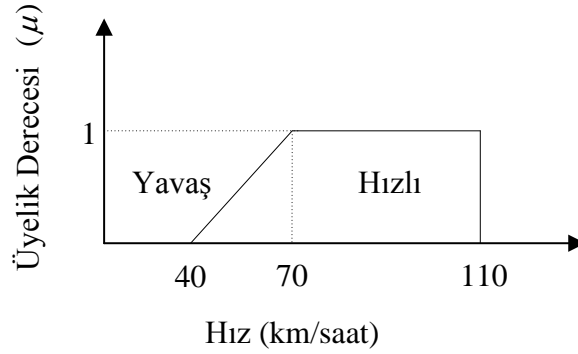
Bulanık ve klasik küme kavramlarının farkını açıklamak için bir araca ait hızı örnek olarak alalım. Şekil 2.3 bir araca ait hız değerinin klasik kümede nasıl tanımlandığını göstermektedir. Buna göre aracın hızı 70 km/saat veya 70 km/saat'den fazla ise araç hızlı olarak yani üyelik derecesi 1 olarak tanımlanırken hızı 70 km/saat'den az ise araç yavaş yani üyelik derecesi 0 olarak tanımlanmaktadır. Burada anlaşılacağı üzere aracın hızı 70 km/saat'e çok yakın bir değer olan örneğin 69 km/saat ise araç yavaş olarak kabul edilmektedir. Bu ise yukarıda ifade edilen günlük hayatımızda sıklıkla kullandığımız bulanık terimlerin aksine bir esneklik içermemektedir.



Şekil 2.3. Hız uzayında hızlı klasik kümesi

Aracın hızı bulanık küme kavramı ile Şekil 2.4'te ki gibi temsil edilebilir. Burada aracın hızı 70-100 km/saat arasında ise araç hızlı olarak yani bu aradaki hız değerlerinin üyelik dereceleri 1 olarak tanımlanır. Eğer aracın hızı 40-70 km /saat arasında ise bu

aradaki hız değerlerinin üyelik dereceleri 0-1 arasında değişecektir. Yani bir başka ifadeyle araç hızlı veya yavaş gibi kesin değerlerle tanımlanmak yerine az hızlı veya biraz hızlı gibi bulanıklık içeren ifadelerle tanımlanır.



Şekil 2.4. Hız uzayında hızlı bulanık kümesi

Şekil 2.3 ve Şekil 2.4 ile gösterilen şekiller hız uzayında tanımlı hızlı kümesini sırasıyla kesin ve bulanık biçimlerde ifade eden birer üyelik fonksiyonudur. Herhangi bir bulanık küme elemanlarının ait olma derecelerini gösteren bir karakteristik veya üyelik fonksiyonu ile gösterilebilir. Örneğin bir A bulanık kümesi genel anlamda ayrık ve sürekli biçimde aşağıda verildiği gibi temsil edilebilir [65].

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \text{ öyleki } x \in X\} \quad (2.5)$$

$$A = \sum_{x_i \in X} \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} \text{ (ayrık) ve } A = \int_x \frac{\mu_A(x)}{x} \text{ (sürekli)} \quad (2.6)$$

Yukarıdaki denklemlerde,

X : uzay kümesi (kesin küme)

x : uzay kümesinin kesin küme elemanları

A : bulanık küme

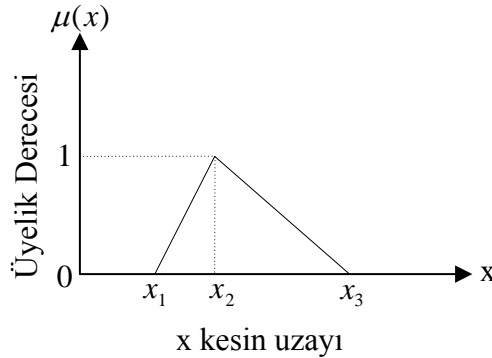
$\mu_A(x)$: x kesin sayılarının A bulanık kümesindeki üyelik dereceleridir.

2.1.2.2. Üyelik Fonksiyonları

Üyelik fonksiyonları, bulanık mantık denetleyiciye ait kesin giriş bilgilerini bulanık kümelerde üyelik dereceleriyle ifade etmek için kullanılır. Böylece herhangi bir x girişinin bulanık bir kümeye ait olma derecesi belirlenmiş olur. Üyelik fonksiyonlarının şekli ve sayısına yönelik herhangi bir kısıtlama bulunmamaktadır. Üyelik fonksiyonları üçgen, yamuk, cauchy, sinüsoid, gaussian, sigmoid ve çan gibi çeşitli yapıda olabilirler. Bu çalışmada ise üçgen üyelik fonksiyonunun kullanılması tercih edilmiştir. Üçgen üyelik fonksiyonunun matematiksel ifadesi denklem (2.7)'de verildiği gibidir.

$$\mu(x) = \max \left[\min \left(\frac{x-x_1}{x_2-x_1}, \frac{x_3-x}{x_3-x_2} \right), 0 \right] \quad (2.7)$$

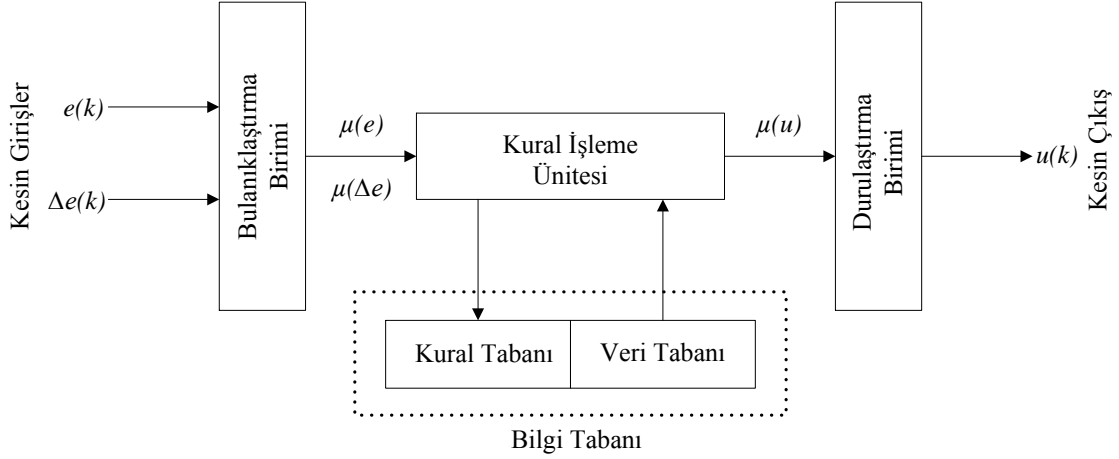
Denklem (2.7)'de x_1 , x_2 ve x_3 sırasıyla üçgen üyelik fonksiyonunun alt sınır değerini, maksimum noktasını ve üst sınır değerini temsil eder. Şekil 2.5 denklem (2.7) kullanılarak elde edilen üçgen üyelik fonksiyonu görsel olarak ifade etmektedir [67, 70].



Şekil 2.5. Üçgen üyelik fonksiyonu

2.1.2.3. Bulanık Mantık Denetleyicili Sistem

Bulanık mantık denetleyicili sistem üç ana birimden meydana gelmektedir. Bunlar, bulanıklaştırma birimi, kural işleme ünitesi ve durulaştırma birimidir. Bulanık mantık denetleyicinin temel yapısı Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Bulanık mantık denetleyici yapısı

Şekil 2.6'dan da görüldüğü üzere bulanık mantık denetleyicinin $e(k)$ ve $\Delta e(k)$ olmak üzere iki kesin girişi vardır. $e(k)$ referans işareti $r(k)$ ile çıkış işareti $y(k)$ arasındaki farkı gösteren hatayı ve $\Delta e(k)$ ise hatadaki değişimi temsil etmekte olup denklem (2.8) ile ifade edilmiştir.

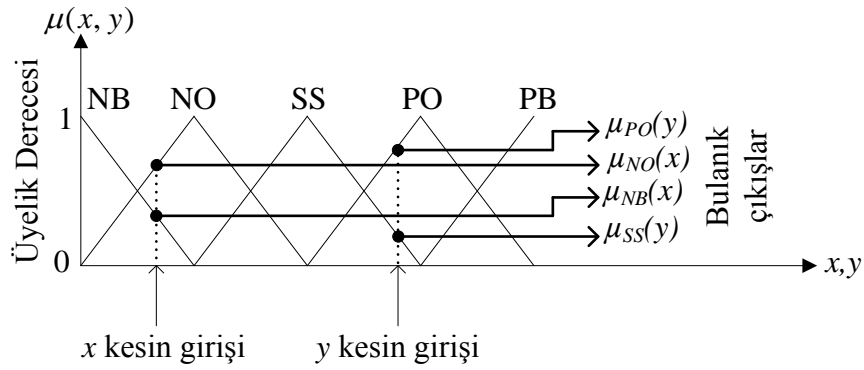
$$\begin{aligned} e(k) &= r(k) - y(k) \\ \Delta e(k) &= e(k) - e(k-1) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Bulanıklaştırma birimi bulanık mantık denetleyicinin ilk elemanıdır. Bu birimde kesin giriş değerleri bulanık değerlere dönüştürülür. Diğer bir ifadeyle bulanıklaştırma biriminde kesin giriş değerleri 0 ile 1 arasında değişen üyelik değerleriyle ifade edilirler. Bir sonraki aşamada ise bulanıklaştırma biriminde elde edilen bulanık değerler bilgi tabanına dayalı olarak bulanık kurallarla işlenir. En son aşama olarak ise kural işleme ünitesinde elde edilen bulanık çıkarımlar durulaştırma biriminde kesin sayılara dönüştürülür ve denetlenen sisteme uygulanan kontrol işareti elde edilmiş olur. Bu birimlerin detaylı anlatımı ilerleyen bölümlerde verilmiştir [68, 69].

2.1.2.3.1. Bulanıklaştırma Birimi

Bir önceki bölümde kısaca bahsedildiği üzere bulanık mantık denetleyicinin ilk elemanı olarak devreye girer. Bulanıklaştırma biriminde ilk olarak bulanık mantık

denetleyiciye uygulanan kesin giriş değerleri bulanıklaştırılır yani dilsel olarak nitelendirilen bulanık değerlere dönüştürülür. Şekil 2.7’de bulanıklaştırma işleminin nasıl yapıldığı görsel olarak ifade edilmiştir. Şekil 2.7’de de görüldüğü üzere bulanıklaştırma birimine uygulanan x ve y kesin değerlerinin burada tanımlı olan bulanık kümelerdeki varsa üyelik derecesi araştırılır. Burada her bir giriş değerinin tanımlamak için beş adet dilsel değişken seçilmiştir. Bunlar, Negatif büyük (NB), Negatif Orta (NO), Sıfır (SS), Pozitif Orta (PO) ve Pozitif Büyük (PB) şeklinde ifade edilmiştir. Şekil 2.7 incelenirse x kesin girişinin NB ve NO bulanık kümelerinde, y kesin girişinin ise SS ve PO bulanık kümelerinde üyeliğinin olduğu görülür. Bu üyelikler $\mu_{NB}(x)$, $\mu_{NO}(x)$, $\mu_{SS}(y)$ ve $\mu_{PO}(y)$ olarak belirlenir ve bu bulanık değerler kural işleme ünitesine gönderilir [70].



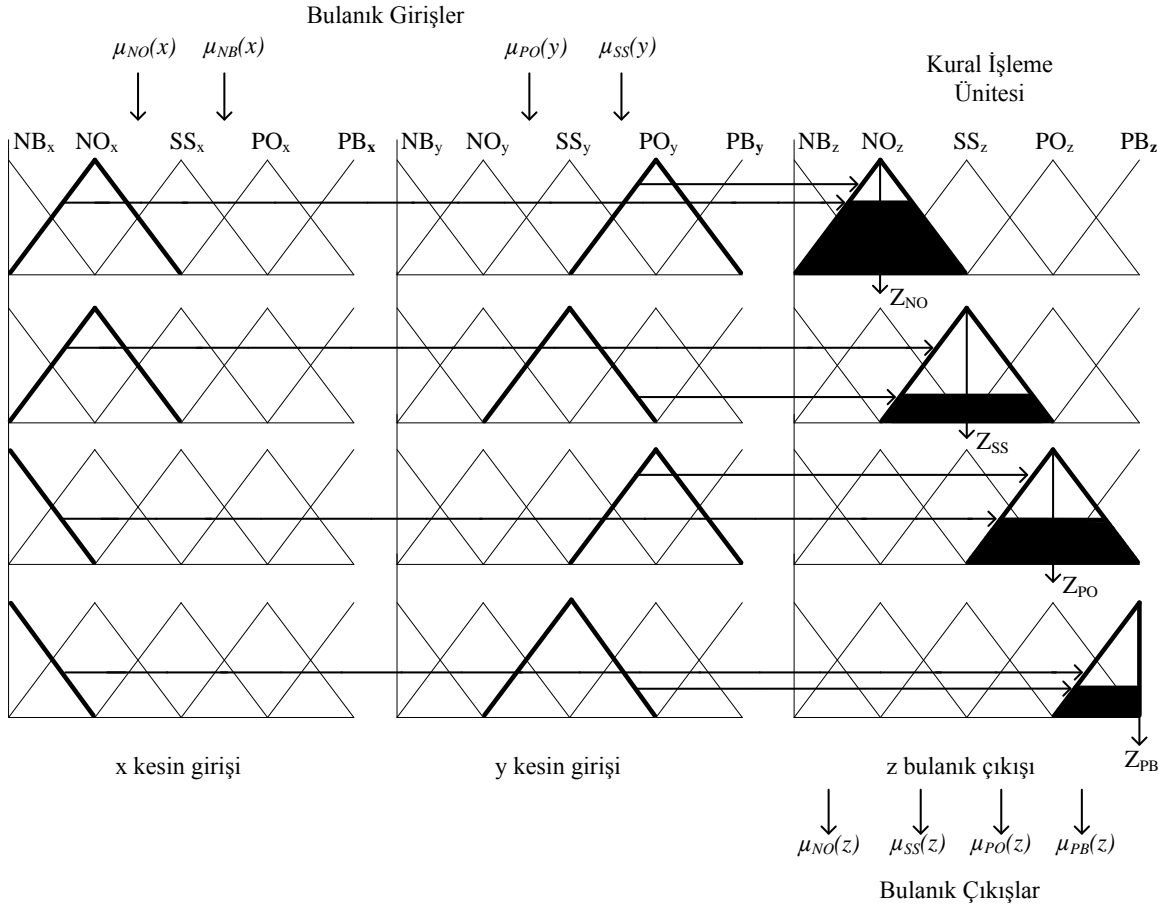
Şekil 2.7. Bulanıklaştırma işleminin yapıları [70]

2.1.2.3.2. Kural İşleme Ünitesi

Kural işleme ünitesinde depolanmış halde bulunan bilgi tabanı dayalı bilgi kümeleri ile bulanıklaştırıcıdan gelen üyelik fonksiyonları bu birimde birlikte kullanılarak bulanık bir sonuç elde edilir. Burada kullanılan bilgi tabanı bulanıklaştırıcıdan gelen bulanık değerlerin karar verme biriminde hangi kurallar ile işleneceği ve bu kuralların sonuçları olan veri tablosunu içeren birimdir. Bundan dolayı bilgi tabanı, kural tabanı ve veri tabanı olmak üzere ikiye ayrılır. Girişler ve çıkış arasındaki bağlantılar kural tabanındaki kurallar kullanılarak,

If.....then.....else

biçimindeki koşul cümleleri ile sağlanır. Bu koşul cümlelerinin her biri kural olarak tanımlanır. Şekil 2.8’de kural işleme ünitesinde kuralların nasıl işlendiği ifade edilmiştir [70].



Şekil 2.8. Kural işleme ünitesinde kuralların bulanık kümelerle gösterimi [70]

Şekil 2.8’de görüldüğü üzere dört aktif kural bulanık kümelerle gerçekleştirilip her bir kural için bulanık $\mu(z)$ çıkışı elde edilmektedir. Bu dört kural *If.....then.....else* biçimindeki koşul cümleleriyle aşağıdaki gibi de gerçekleştirilebilir.

$$\begin{aligned}
 & \text{Kural1 if } (x = NO_x) \text{ and } (y = PO_y) \text{ then } (z = NO_z) \text{ else} \\
 & \text{Kural2 if } (x = NO_x) \text{ and } (y = SS_y) \text{ then } (z = SS_z) \text{ else} \\
 & \text{Kural3 if } (x = NB_x) \text{ and } (y = PO_y) \text{ then } (z = PO_z) \text{ else} \\
 & \text{Kural4 if } (x = NB_x) \text{ and } (y = SS_y) \text{ then } (z = PB_z)
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Burada NB, NO, SS, PO ve PB daha önce tanımlanan bulanık sözleri temsil etmektedir. x , y ve z ise bu sözlerin tanımlandığı genel uzay kümelerini ifade etmektedir. Yukarıda tanımlanan kurallar x ve y girişlerinin bulanık kümelerde aldığı değerlere göre z çıkışının bulanık kümelerde aldığı değerlerin belirlendiğini göstermektedir. x ve y 'nin durumuna göre z 'nin alacağı değerlere ilişkin bilgi uzman görüşüne başvurularak belirlenir ve kurallar biçiminde depolanır. Yukarıda tanımlanan kurallar daha kısa bir biçimde ifade edilecek olursa,

$$\begin{aligned}
& \text{Kural 1 if } NO_x \text{ and } PO_y \text{ then } NO_z \text{ else} \\
& \text{Kural 2 if } NO_x \text{ and } SS_y \text{ then } SS_z \text{ else} \\
& \text{Kural 3 if } NB_x \text{ and } PO_y \text{ then } PO_z \text{ else} \\
& \text{Kural 4 if } NB_x \text{ and } SS_y \text{ then } PB_z
\end{aligned} \tag{2.10}$$

Burada kullanılan **and** terimi küme işlemlerindeki kesişim işlemi eşdeğerdir. Bulanık kümelerin üyelik fonksiyonları dikkate alındığında **and** bağlacının bir minimum alma işlemi olduğu görülür. Dolayısıyla denklem (2.10)'da **and** ile birbirine bağlanan terimlere minimum alma işlemi uygulandığında, üyelik fonksiyonlarına bağlı olarak aşağıda yazılan ifadeler elde edilir. Yani her bir kural için z çıkışının bu Z uzayında tanımlı NB_z , NO_z , SS_z , PO_z ve PB_z bulanık kümelerindeki üyelik değeri aşağıdaki gibi belirlenir.

$$\begin{aligned}
& \text{Kural 1 } \min [\mu_{NO}(x), \mu_{PO}(y)] = \mu_{NO}(z) \\
& \text{Kural 2 } \min [\mu_{NO}(x), \mu_{SS}(y)] = \mu_{SS}(z) \\
& \text{Kural 3 } \min [\mu_{NB}(x), \mu_{PO}(y)] = \mu_{PO}(z) \\
& \text{Kural 4 } \min [\mu_{NB}(x), \mu_{SS}(y)] = \mu_{PB}(z)
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Bu denklemler kısaca denklem (2.12)'de ki gibi ifade edilebilir.

$$\mu(z) = \min [\mu(x), \mu(y)] \tag{2.12}$$

Bu ifade aslında X ve Y uzayları arasındaki ilişkiyi temsile eder ve kartezyen çarpım olarak,

$$Z = X \times Y \quad (2.13)$$

şeklinde yazılabilir. Buradaki x ve y arasındaki bulanık ilişki genel olarak kuralları içeren tablolarla tanımlanır. Denklem (2.13) ile ifade edilen kartezyen çarpım sonucu X ve Y uzayında tanımlı bulanık kümeler iki boyutlu bir küme olarak Z uzayına taşınır. Z uzayında oluşan bu bulanık kümenin üyelik dereceleri ise kendisini oluşturan X ve Y düzlemindeki bulanık kümelerin üyelik dereceleri ile belirlenir. Bu ilişki üyelik fonksiyonlarına bağlı olarak tablo biçiminde yazılabilir ve bu tablo kural tablosu olarak adlandırılır. Denklem (2.11) ile tanımlanan kurallar üyelik fonksiyonlarına bağlı olarak Tablo 2.1’de verilmiştir. Tablo 2.2’de ise kural tablosu bulanık ifadelerle bağlı olarak verilmiştir.

Tablo 2.1. Üyelik fonksiyonları ile temsil edilen kural tablosu

	$\mu_{PO}(y)$	$\mu_{SS}(y)$
$\mu_{NO}(x)$	$\mu_{NO}(z)$	$\mu_{SS}(z)$
$\mu_{NB}(x)$	$\mu_{PO}(z)$	$\mu_{PB}(z)$

Tablo 2.2. Bulanık ifadeler ile temsil edilen kural tablosu

	PO(y)	SS(y)
NO(x)	NO(z)	SS(z)
NB(x)	PO(z)	PB(z)

Kural işleme ünitesinde elde edilen sonuç bulanık bir kümeyi ifade eder. Bu sonuç kesin bir sonuç elde etmek amacıyla durulaştırma birimine gönderilir [70].

2.1.2.3.3. Durulaştırma Birimi

Bulanık mantık denetleyicinin son elemanı olarak devreye girer. Kural işleme ünitesinde elde edilen sonuçlar durulaştırma biriminde kesin bir sonuç elde etmek amacıyla değerlendirilir. Durulaştırma işlemini gerçekleştirmek amacıyla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar,

- Alanların Merkezi Yöntemi (COA-Center of Area)
- İki Bölge Yöntemi (BOA-Bisector of Area)
- Maksimum Ortalaması Yöntemi (MOM-Mean of Maximum)
- Maksimumun En Küçüğü Yöntemi (SOM-Smallest of Maximum)
- Maksimumun En Büyüğü Yöntemi (LOM-Largest of Maximum)

Bu tez çalışmasında kullanılan bulanık mantık denetleyicide durulaştırma işlemi alanların merkezi yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem burada örnek alınan kurallar için aşağıdaki gibi uygulanır.

$$z_{\zeta} = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_i(z_i)z_i}{\sum_{i=1}^N \mu_i(z_i)} \quad (2.14)$$

Bu denklem ilgili örnek için açılırsa;

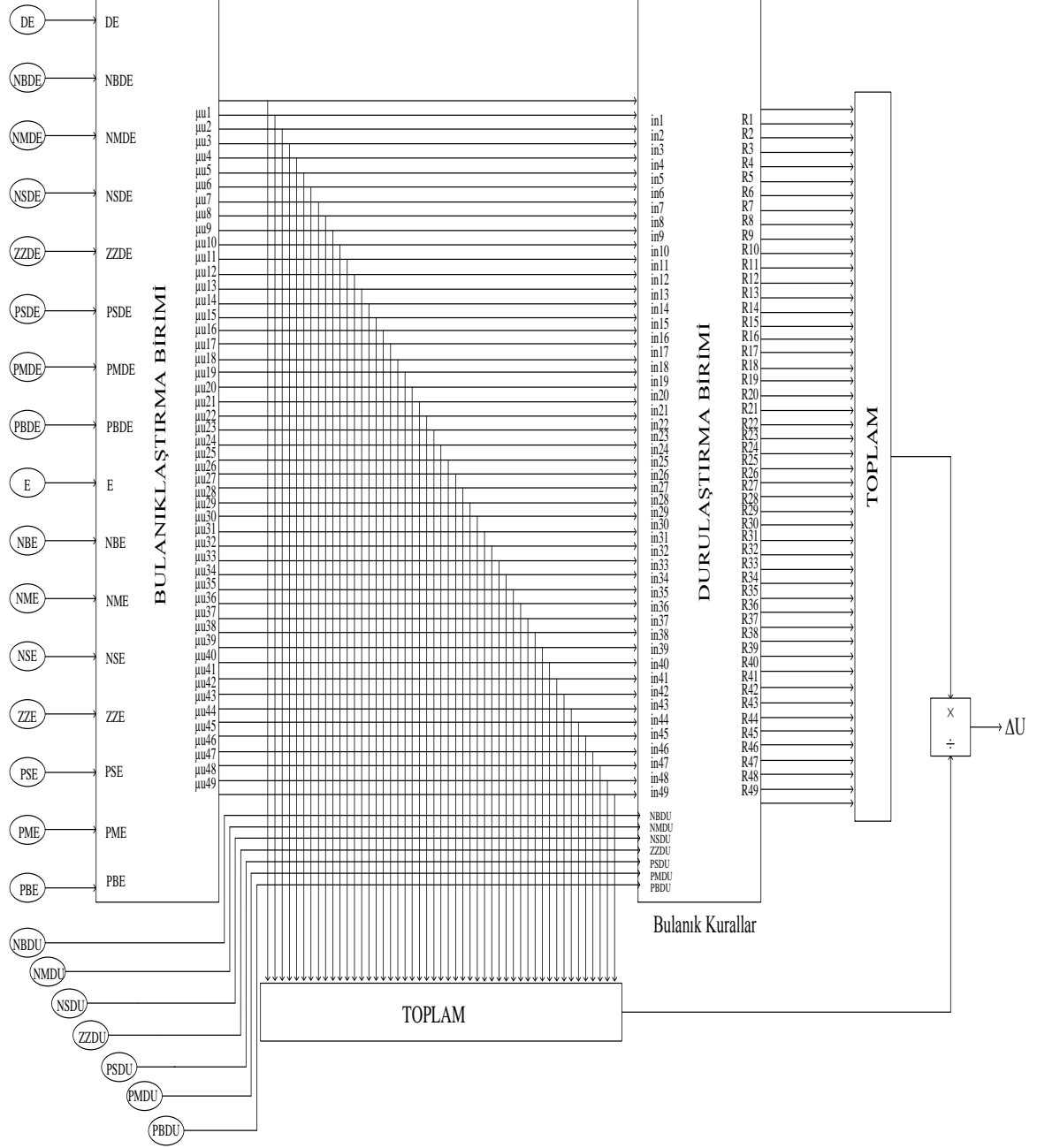
$$z_{\zeta} = \frac{\mu_{NO}(z_{NO})z_{NO} + \mu_{SS}(z_{SS})z_{SS} + \mu_{PO}(z_{PO})z_{PO} + \mu_{PB}(z_{PB})z_{PB}}{\mu_{NO}(z_{NO}) + \mu_{SS}(z_{SS}) + \mu_{PO}(z_{PO}) + \mu_{PB}(z_{PB})} \quad (2.15)$$

elde edilir. Bu ifadede i kural numarasını N ise toplam kural sayısını göstermektedir. Etkin olmayan kurallar için daima $\mu_i(z_i)=0$ 'dır. Etkin kurallar için ise i kural numarası ile birlikte i .kural için geçerli sözel ifadeyi de tanımlar. Ele alınan bu örnekte i 1., 2., 3. ve 4. kurallar için sırasıyla NO_z , SS_z , PO_z ve PB_z sözel ifadelerini temsil eder. Bu nedenle denklem (2.14)'te ki i yerine her bir kuralda karşılık geldikleri sözel ifadeler denklem (2.15)'te görüldüğü üzere yazılmıştır. z_i ifadesi ise ait olduğu bulanık kümedeki maksimum üyeliğe sahip z değerini ifade eder. Durulaştırma işlemi sonunda elde edilen bu z_{ζ} değeri denetlenecek sisteme gönderilen işarettir [70].

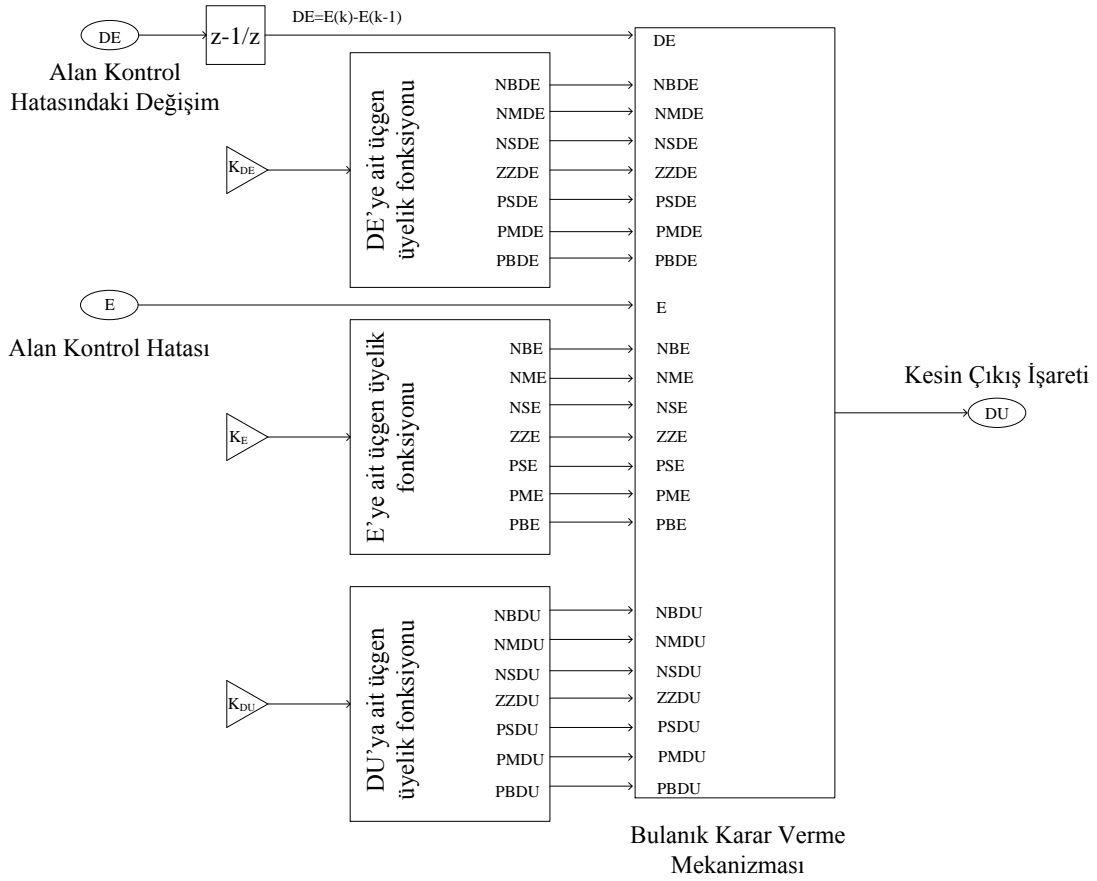
2.1.2.4. Bulanık Mantık Denetleyici Modeli

Bu tez çalışması kapsamında yukarıda verilen bilgiler ışığında tasarlanan $7 \times 7 = 49$ kurallı, üçgen üyelik fonksiyonlu bulanık mantık denetleyicinin bulanık karar verme

mekanizması ve genel blok gösterimi sırasıyla Şekil 2.9 ve 2.10'da verilmiştir. Burada E hatayı, DE hatadaki değişimi ve DU çıkış işaretindeki değişimi ifade eder.

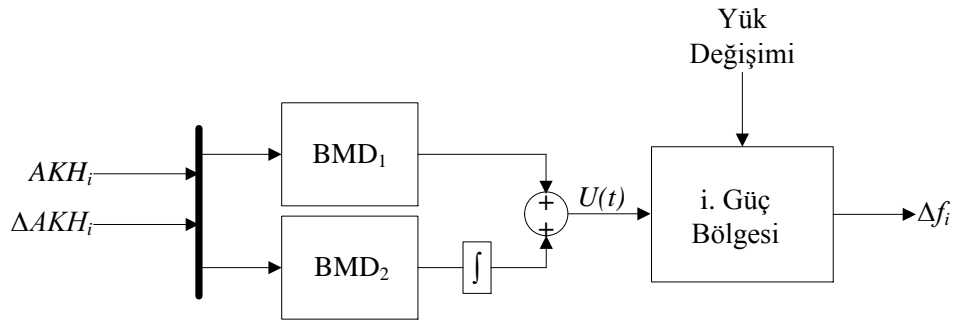


Şekil 2.9. Bulanık karar verme mekanizması blok gösterimi [68]



Şekil 2.10. Bulanık mantık denetleyici genel blok şeması [68]

Önerilen denetleyicinin yük frekans kontrolü işleminde kullanılışı Şekil 2.11' de gösterilmiştir. Bu yapıdaki bir denetim ile yük frekans kontrolü işleminin daha etkin bir biçimde gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Denetleyici giriş işaretleri olarak AKH ve ΔAKH 'da ki değişim uygulanmıştır. Kullanılan BMD modeli İ.H. Altaş'a ait [68]'den alınmıştır. Modele ilişkin detaylı bilgi bu kaynakta mevcuttur.



Şekil 2.11. BMD'nin yük frekans kontrolünde kullanımı

Burada ele alınan iki bölgeli güç sisteminde yük frekans kontrolü işlemini daha etkin bir biçimde gerçekleştirmek için her iki BMD'de ki üyelik fonksiyonlarının sınır değerlerini belirleyen K_{DE1} , K_{E1} , K_{DU1} , K_{DE2} , K_{E2} ve K_{DU2} parametrelerinin en uygun değerlerinin bulunabilmesi amacıyla PSO ve GA yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemlere ilişkin detaylı bilgi bir sonraki bölümde verilmiştir.

2.2. Optimizasyon Yöntemleri

2.2.1. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO)

Parçacık sürüsü optimizasyonu uygulama alanı her geçen gün artmakta olan bir iyileme yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Daha önceki bölümlerde bahsedilen güç sistemlerinin kararlılığının göstergesi olan değişkenlerin kontrolü için tasarlanan denetleyicilerin en uygun parametrelerle çalıştırılması ihtiyacı güç sistemlerinde optimizasyon tekniklerinin kullanılmasını yaygınlaştırmış olup parçacık sürü optimizasyonu bu tekniklerin başında gelmektedir [71].

Parçacık sürüsü algoritması Reynolds'un [72] 1987 yılında gerçekleştirmiş olduğu kuş sürülerinin sürü içerisindeki sosyal davranışlarının bilgisayar destekli benzetim çalışması ışığında Eberhart ve Kennedy tarafından [73] 1995 yılında geliştirilmiş bir yöntem olup kuş ve balık sürülerinin besin arama esnasındaki davranışlarından esinlenen popülasyon temelli sezgisel bir optimizasyon yöntemidir [74,75,76]. Bu yöntem doğrusal olmayan, çok parametre ve değişken içeren problemlerin çözümü için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [73]. Parçacık sürü algoritması diğer optimizasyon tekniklerine göre basit yapıda olması, uygulanabilirliğinin yüksek olması ve etkin hesaplama gibi avantajlara da sahiptir [75].

PSO algoritmasında sürü içerisindeki kuşlar belirli bir bölge içerisinde düzensiz bir başka ifadeyle rastgele dağılmış bir şekilde besin arama işlemini gerçekleştirirler. Besinin nerde olduğu ile ilgili bilgiye sahip olmayan kuşlar ani hareketlerle eş zamanlı olarak konum ve yön değiştirerek bölge içerisinde yayılırlar ve besin ararlar. Bu işlemten sonra sürü içerisindeki bütün kuşlar bir araya gelerek her bir kuşun besin kaynağına ne kadar mesafede olduğu konusu ile ilgili bilgi paylaşımında bulunur ve bu bilgiye dayanarak ilgili besine ulaşırlar. Burada söz konusu olan her bir kuş PSO algoritmasında bir parçacığa karşılık gelmektedir ve her bir parçacığa ait konum bilgisi optimize edilmeye çalışılan

sisteme ilişkin bir aday çözümü temsil eder. Besin bölgesi içerisinde hareket eden her bir parçacığın mevcut ve bir önceki konumu arasındaki adım aralığı ise parçacığın hızı olarak tanımlanır [77].

Bu optimizasyon algoritmasında bir parçacığın konumu o parçacığın ulaştığı en iyi konum (aranan besin kaynağına en yakın konum) ve sürü içerisindeki diğer parçacıklar tarafından elde edilen en iyi konuma göre değişmektedir. Burada herhangi bir parçacık tarafından elde edilen en iyi konum değeri $pbest_i$ olarak adlandırılırken sürü içerisinde elde edilen en iyi konum $gbest$ olarak tanımlanır. Her bir parçacığın besin arama performansı yani global optimum değere yakınlığı optimize edilmeye çalışılan probleme göre değişen bir uygunluk fonksiyonu kullanılarak ölçülür [78].

Parçacıklar iki boyutlu arama uzayında x ve y eksenleri boyunca konum değiştirir. Her bir parçacığın x ve y eksenleri boyunca hızları sırasıyla V_x ve V_y olarak ifade edilir. Parçacıkların konumlarındaki değişiklik daha önce elde edilen hız ve konum bilgisine dayanılarak gerçekleştirilir [79]. Her bir parçacık arama uzayı boyunca elde ettiği en iyi değeri ve sürü içerisinde elde edilen en iyi değeri bilir. Sürüdeki parçacıklar kendi mevcut konumu ile $pbest_i$ ve $gbest$ değerleri arasındaki farka ve x ve y eksenleri boyunca hızına göre global optimum değerine yaklaşmak amacıyla konum ve hız değiştirir. PSO algoritmasında her bir parçacığın hızı ve konumu sırasıyla denklem (2.16) ve (2.17) ile güncellenir.

$$V_i^{k+1} = V_i^k + c_1 r_1 \times (pbest_i - x_i^k) + c_2 r_2 \times (gbest - x_i^k) \quad (2.16)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + V_i^{k+1} \quad (2.17)$$

Denklem (2.16) ve (2.17)'de

V_i^k : k. iterasyon sonunda i. parçacığın mevcut hızı

V_i^{k+1} : k+1. iterasyon sonunda i. parçacığın mevcut hızı

x_i^k : k. iterasyon sonunda i. parçacığın mevcut konumu

x_i^{k+1} : k+1. iterasyon sonunda i. parçacığın mevcut konumu

c_1 : parçacığı lokal en iyi konuma doğru çeken pozitif ivmelenme sabiti

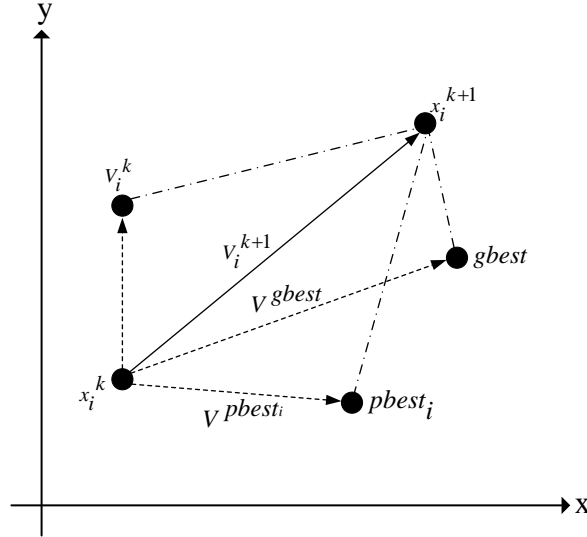
c_2 : parçacığı global en iyi konuma doğru çeken pozitif ivmelenme sabiti

r_1 ve r_2 : 0 ile 1 arasında normal dağılımlı rastgele sayılar

$pbest_i$: i. parçacığın bireysel en iyi değeri

$gbest$: sürünün en iyi değeri

Şekil 2.12 optimizasyon işlemi esnasında parçacığın konum değiştirmesini görsel olarak ifade etmektedir.



Şekil 2.12. Parçacığın konum değiştirmesi

Yukarıda bahsedilen PSO algoritması ilerleyen iterasyon adımlarında yüksek miktarda salınım yapma gibi bir dezavantaja sahiptir. Kennedy hızdaki bu olası salınımları sönmölemek amacıyla yapmış olduğu çalışmada [79] değeri daha önceden belirlenmiş maksimum hız değeri parametresi V^{max} 'ı PSO algoritmasına uygulamış ve bir kod yazılımı gerçekleştirip aşağıda verildiği gibi ifade etmiştir;

Eğer $V_i^{k+1} > V^{max}$ ise $V_i^{k+1} = V^{max}$

Eğer $V_i^{k+1} < -V^{max}$ ise $V_i^{k+1} = -V^{max}$

Bu kod parçasının PSO algoritmasına uygulanmasıyla parçacık hızlarındaki salınım belirli bir limit dâhilinde tutulmuştur [79, 80].

2.2.1.1. Eylemsizlik Katsayısı

1995 yılında Kennedy ve Eberhart tarafından geliştirilen PSO algoritması eylemsizlik katsayısı içermemekteydi. Denklem (2.16) ile ifade edilen parçacık hızı

güncelleme denkleminde de görüleceği üzere her bir parçacığın hızı bir önceki hıza bağlı olarak güncellenmektedir. Shi ve Eberhart [81] 1998 yılında yapmış oldukları çalışmada parçacığın arama uzayında hedefe yaklaştıkça hızında bir azalma meydana gelmesini sağlamak amacıyla hız güncelleme denklemindeki hız ifadesini değeri her bir iterasyon sonunda doğrusal olarak azalan eylemsizlik katsayısı ile çarpıp yeni bir hız güncelleme denklemi elde etmişlerdir. İlgili çalışmada en uygun eylemsizlik katsayısı değerinin 0.9 ile 1.2 arasında olduğu ifade edilmektedir [81]. Eylemsizlik katsayısının matematiksel ifadesi denklem (2.18)'de ifade edildiği gibidir. Denklem (2.18)'de w_{\max} ve w_{\min} sırasıyla atalet katsayısının en büyük ve en küçük değerini ifade etmekte olup genelde 0.9 ve 0.4 değerlerini alır. k_{\max} ve k ise sırasıyla maksimum iterasyon sayısını ve mevcut iterasyonu temsil eder.

$$w = w_{\max} - \frac{(w_{\max} - w_{\min})}{k_{\max}} \times k \quad (2.18)$$

Denklem (2.18)'den de görüleceği üzere eylemsizlik katsayısının değeri her bir iterasyon sonunda doğrusal olarak azalmaktadır. Atalet ağırlığının hız güncelleme denkleminde eklenmesiyle her bir parçacığın hızının bir sonraki iterasyon sonunda elde ettiği güncel hızına olan etkisi kontrol edilmektedir. Eylemsizlik katsayısının değerindeki değişim parçacıkların global ve lokal arama yeteneklerine etki etmektedir. Büyük eylemsizlik katsayısı değeri global arama yeteneğinin artmasını, küçük eylemsizlik katsayısı değeri ise lokal arama yeteneğinin artmasını sağlamaktadır. Arama uzayındaki hedefe olan yakınsama hızının artması için iterasyonun başlangıç aşamasında global arama yeteneğinin yüksek olması gerekmektedir. İterasyonun sonuna doğru ise lokal arama yeteneğinin yüksek olması gerekmektedir. Denklem (2.18) ile bu durumun sağlandığı görülebilir [81]. Atalet katsayısının mevcut PSO algoritmasına uyarlanması sonucu elde edilen yeni hız güncelleme denklemi denklem (2.19)'da verilmiştir.

$$V_i^{k+1} = w \times V_i^k + c_1 r_1 \times (pbest_i - x_i^k) + c_2 r_2 \times (gbest - x_i^k) \quad (2.19)$$

Atalet katsayısının eklenmesiyle elde edilen parçacık hızı güncelleme denklemi Şekil 2.13'te gösterildiği gibi üç bileşenden meydana gelmektedir [82].

$$V_i^{k+1} = \underbrace{w \times V_i^k}_{\text{Birinci Bileşen}} + \underbrace{c_1 r_1 \times (pbest_i - x_i^k)}_{\text{İkinci Bileşen}} + \underbrace{c_2 r_2 \times (gbest - x_i^k)}_{\text{Üçüncü Bileşen}}$$

Şekil 2.13. Hız güncelleme denklemi bileşenleri

Şekil (2.13)'te birinci bileşen olarak ifade edilen terim arama uzayında hareket eden parçacıkların ani hız ve buna bağlı olarak yön değişimlerini parçacık hızının bir önceki hızına göre güncellenmesini sağlayarak engellemektedir. İkinci bileşen parçacığın arama uzayında bu elde ettiği kişisel en iyi değerine ($pbest_i$) doğru yönelmesini sağlayan kişisel hafıza bileşenidir ve $c_1 r_1$ çarpanı ile ölçeklendirilmiştir. Üçüncü bileşen ise sosyal hafıza bileşeni olup parçacığın arama uzayında sürü tarafından elde edilen en iyi değere ($gbest$) doğru olan adım boyunu belirler ve bu bileşende $c_2 r_2$ çarpanı ile ölçeklendirilmiştir [74].

2.2.1.2. İvmelenme Sabitleri

İvmelenme sabitleri c_1 ve c_2 parçacıkların arama uzayında $pbest_i$ ve $gbest$ değerlerinde doğru yönelmesini sağlayan sabitlerdir. Bu sabitlerin değeri parçacıkların arama uzayı içindeki hareketini önemli ölçüde etkilemektedir. İvmelenme sabitlerinin büyük değerlerde seçilmesi durumunda parçacıklar birbirinden uzaklaşırken küçük değerlerde seçilmesi durumunda ise arama uzayının yeterince taranamaması gibi bir problem ortaya çıkar. Bu katsayılar optimize edilmeye çalışılan problemin türüne göre seçilebilirler. Clerc 1999 yılında yapmış olduğu çalışma [83] ile parçacıkların hız güncelleme denkleminde atalet katsayısı w yerine bir χ kısıtlama faktörü kullanılmasını önermiştir. Bu çalışmada önerilen χ kısıtlama faktörü ivmelenme sabitlerine bağlı olarak değişmektedir ve denklem (2.20)' te ki gibi ifade edilmiştir.

$$\chi = \frac{2}{\left| 2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi} \right|} \quad (2.20)$$

Burada φ ile ifade edilen terim ivmelenme katsayıları cinsinden denklem (2.21)'de ki gibi tanımlanmıştır.

$$\varphi = c_1 + c_2 \quad (2.21)$$

Clerc bu çalışmada c_1 ve c_2 katsayılarını 2.05 almıştır. Kısıtlama faktörünün kullanılması ile elde edilen yeni hız güncelleme denklemi denklem (2.22)'de verilmiştir [86].

$$V_i^{k+1} = \chi \times [V_i^k + c_1 r_1 \times (pbest_i - x_i^k) + c_2 r_2 \times (gbest - x_i^k)] \quad (2.22)$$

Bu çalışmada ise ivmelenme katsayıları c_1 ve c_2 genel olarak önerilen değer olan 2 alınmıştır. Hız güncelleme denklemi olarak ise denklem (2.19)'da verilen denklem kullanılmıştır.

2.2.1.3. Parçacık Sürüsü Algoritmasının İşleyişi

Şekil 2.14 PSO algoritmasının işleyişini ifade eden akış diyagramıdır. Algoritma temelde 4 adım içermektedir. Bu adımlar aşağıda verildiği gibidir.

Adım 1: Her bir parçacık için başlangıç değerlerinin belirlenmesi

Her bir parçacık için başlangıç konum (x_i^0) ve hız (V_i^0) değerleri belirlenen limitler dâhilinde rastgele üretilir. Her parçacığın o andaki konumu kendi kişisel en iyi değeri olan $pbest_i$ olarak tanımlanır ve bu $pbest_i$ değerleri arasındaki en iyi değer ise $gbest$ olarak tanımlanır.

Adım 2: Her bir parçacık için uygunluk değerinin belirlenmesi

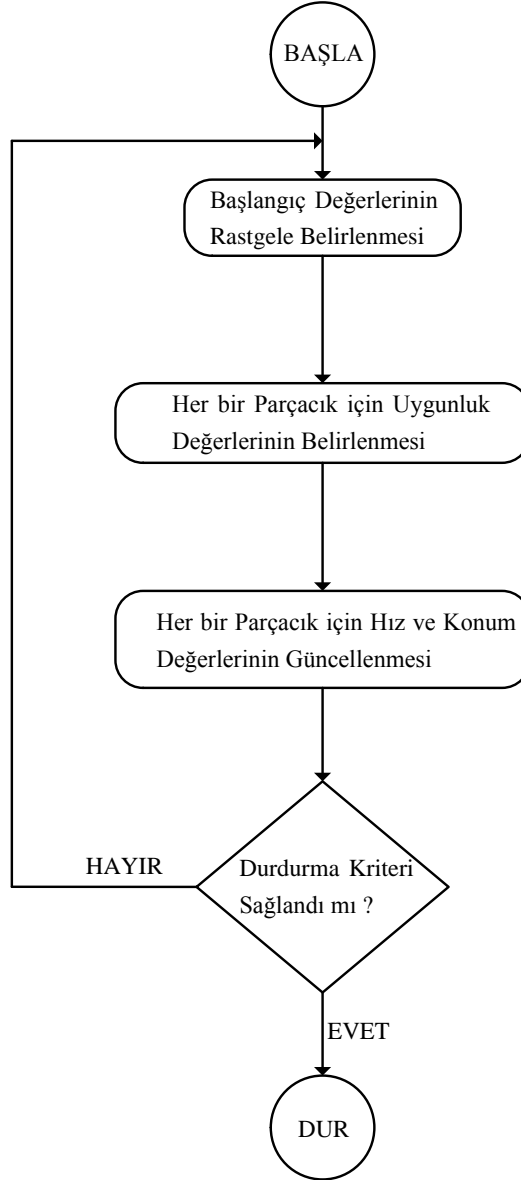
Her bir parçacık için seçilen hedef fonksiyonu hesaplanır. Her bir parçacığın birinci adımda belirlenen mevcut kişisel en iyi değeri hesaplanan değerden kötüyse yeni hesaplanan değer kişisel en iyi değer $pbest_i$ olarak atanır. Birinci adımda belirlenen sürünün en iyi değeri hesaplanan değerden kötüyse yeni hesaplanan değer sürünün en iyi değeri $gbest$ olarak atanır.

Adım 3: Her bir parçacığın hız ve konum değerleri güncellenmesi

Atalet katsayısı ω 'nın kullanılması durumunda bu güncellemeler denklem (2.17), (2.18) ve (2.19)'e göre yapılır. Atalet ağırlığı yerine kısıtlama faktörü χ 'in kullanılması durumunda ise bu güncellemeler denklem (2.17), (2.20) ve (2.22)'ye göre yapılır.

Adım 4: Durdurma kriterinin kontrol edilmesi

Daha önceden belirlenen iterasyon sayısına ulaşılması veya belirlenen en iyi uygunluk değerinin sağlanması durumunda optimizasyon işlemi durur. Bu durumda sürü tarafından elde edilen değer en iyi değer olup problemin nihai çözümüdür.



Şekil 2.14. PSO algoritması akış diyagramı [74]

2.2.2. Genetik Algoritmalar (GA)

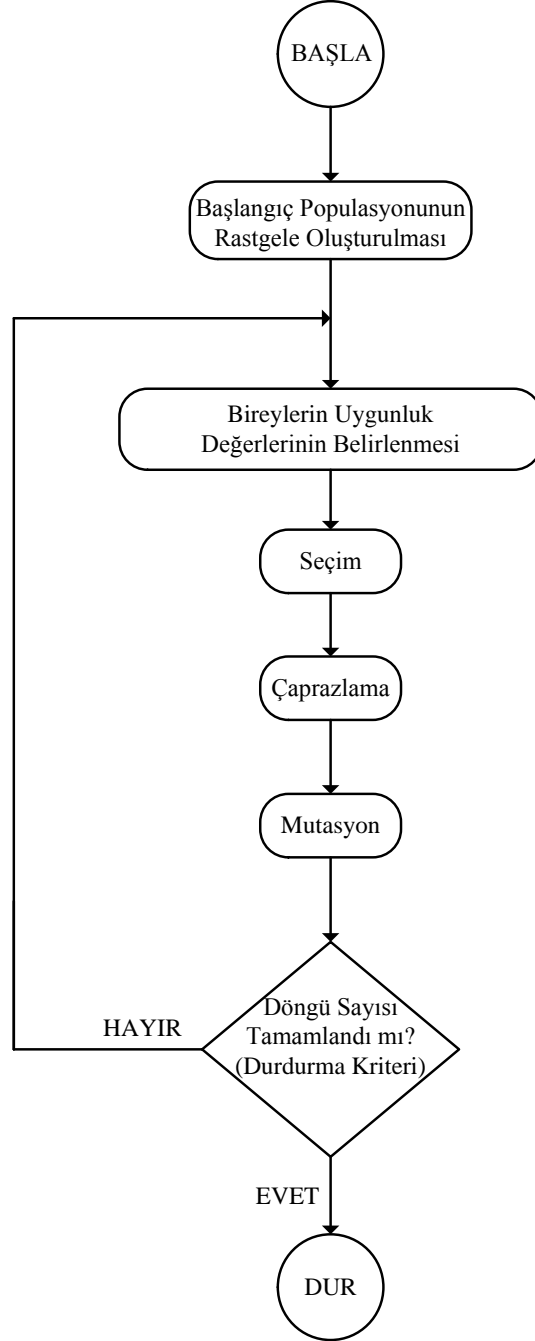
Genetik algoritmalar Michigan Üniversitesi'nde John Holland tarafından geliştirilmiş olup doğal seçim ve genetik kurallara dayanan sezgisel bir optimizasyon tekniğidir. Bu

algoritma diğer benzer evrimsel algoritmalar gibi geleneksel çözüm yöntemleriyle incelenmesi zor olan problemlerin analizinde kullanılır. Genetik algoritmalar problemin çözümü için herhangi bir başlangıç veya türev bilgisine ihtiyaç duymazlar. Genetik algoritmaların işleyişindeki bu durum bu algoritmanın optimizasyon problemlerinin çözümünde sıklıkla kullanılmasını sağlamıştır [84]. Genetik algoritmalar çok boyutlu arama uzayında en iyinin hayatta kalması temelinde en uygun çözümü ulaşırlar. Bu yöntemde en uygun sonuca ulaşmak için tek bir çözüm yerine arama uzayında bir çözüm kümesi oluşturulur ve böylece genel çözüme ulaşma ihtimali artırılmış olur. Oluşturulan bu çözüm kümesi popülasyon olarak adlandırılır ve bu popülasyonu oluşturan sayı dizileri ise kromozom veya birey olarak isimlendirilir. Bu bireyler evrimsel olarak genetik operatörler tarafından belirlenir. Genetik algoritmaların en uygun çözüme ulaşabilmesindeki en önemli faktör problemin olası çözümlerini temsil eden bireylerin gösterimidir. Her bir bireyin çözümü temsil edip etmemesi uygunluk fonksiyonu tarafından belirlenir. Uygunluk değeri yüksek olan bireylerin popülasyon içerisindeki diğer bireylerle çoğalması sağlanır. Bu işlem nesiller boyunca tekrarlanarak iyi özellikteki bireylerin popülasyon içerisinde yayılması sağlanır. İyi özelliklere sahip bu bireylerin genetik işlemler sonucunda diğer iyi özelliklerle birleşmesiyle arama uzayında çözümün elde edilmesi kolaylaştırılmış olur [85].

2.2.2.1. Genetik Algoritmaların İşleyişi

Genetik algoritmanın işleyişindeki ilk adım başlangıç popülasyonun rastgele oluşturulmasıdır. Çözüm grubu olarak adlandırılan bu popülasyonda olası çözümler kodlanır. Çözüm grubu içinde kodlanan kromozom veya diğer bir ifadeyle birey sayısı problemin türüne farklılık gösterebilir. Başlangıç popülasyonun oluşturulmasından sonra her bir bireyin uygunluk değeri hesaplanır. Uygunluk değeri yüksek olan bireyler popülasyon içerisinde seçilir. Bir sonraki adımda ise seçilen bu kromozomlar eşlenir. Böylece eşleşme havuzu oluşturulur. Bu havuzda bireylerin çaprazlanması ve mutasyona uğraması işlemleri gerçekleştirilir. İlerleyen adım ise yeni nesil kromozomlar ebeveyn kromozomlarla yer değiştir ve böylece popülasyonun sabit büyüklükte kalması sağlanmış olur ve elde edilen bu yeni nesil kromozomların uygunluk değerleri yeniden hesaplanır. Algoritmanın en son adımı olarak ise belirli bir nesil sayısı kadar devam eden döngü sonrasında uygunluk değerleri hesaplanır ve nesiller içerisinde en uygun değere sahip olan

kromozom aranan çözüm olarak kabul edilir [86]. Şekil 2.15'te genetik algoritmaya ilişkin akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.15. GA akış diyagramı

2.2.2.2. Genetik Operatörler

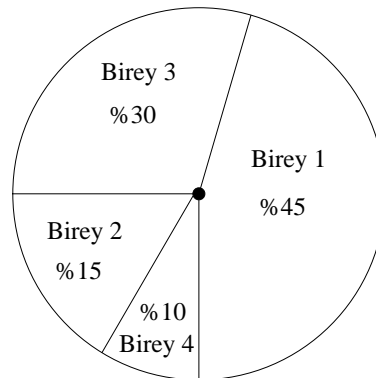
Temel bir genetik algoritma üç adet ana operatör içermemektedir. Bunlar yeniden üreme (reproduction), çaprazlama (cross-over) ve mutasyon (mutation)'dur. Bu operatörlere ilişkin bilgi aşağıda verilmiştir.

2.2.2.2.1. Yeniden Üreme

Yeniden üremede kromozomlar uygunluk değerlerine göre kopyalanır. Böylece uygunluk değeri yüksek olan kromozomların bir sonraki nesilde var olma ihtimali artırılmış olur [87]. Yeniden üreme işleminin uygulanmasında çeşitli yollar vardır. Bunlar,

- Rulet Çemberi
- Rank Seçimi
- Turnuva Seçimi
- Elitistik Seçim

Yukarıda verilen yöntemlerden en basiti rulet çemberi yöntemidir. Bu yöntemde kromozomlar uygunluk değerlerine göre bir rulet etrafında toplanır. Rulet çemberi üzerinde bireylerin seçilme olasılıklarına diğer bir ifadeyle uygunluk değerlerine bağlı olarak dağılımı Şekil 2.16'da verilmiştir. Uygunluk fonksiyonu herhangi bir kıstasa uyan bireyler rasgele seçilir. Burada geniş alana sahip bireylerin seçilme ihtimali daha fazladır [88].



Şekil 2.16. Rulet çemberi seçim operatörü

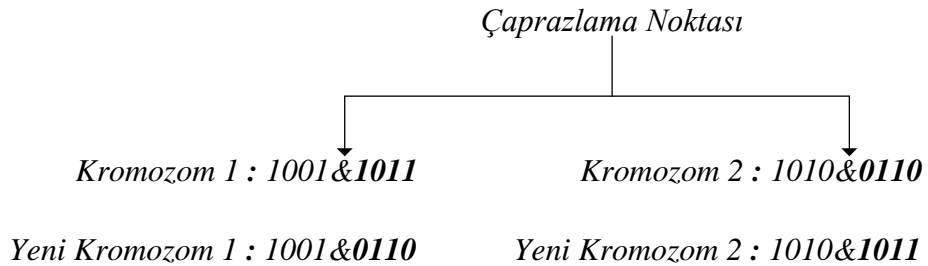
Bu yöntemde bireyin seçilme ihtimali kendi uygunluk değerinin bireylerin toplam uygunluk değerine oranı ile tanımlanır [89]. Bu durum denklem (2.23) ile ifade edilmiştir.

$$olasılık(birey) = \frac{uygunluk(i)}{\sum_i uygunluk(i)} \quad (2.23)$$

Burada seçilen bireyler diğer genetik operatörlerin uygulanabilmesi amacıyla eşleşme havuzunda toplanır.

2.2.2.2.2. Yeniden Üreme

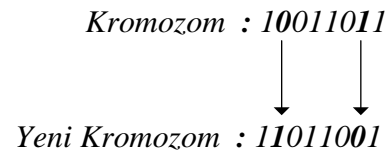
Genetik algoritmalarda bir önceki nesile ait kromozomlardan daha iyi özelliklere sahip kromozomlar üretmek için çaprazlama operatörü kullanılır. Çaprazlama işlemi yapılırken eşleşme havuzundan birer kromozom çifti seçilir ve ele alınan problem için olası çözümler olan bu kromozomlar çaprazlama işlemi sonucu yeni olası çözümleri temsil eder. Eski ve yeni çözümler uygunluk değerine göre karşılaştırılır ve daha iyi çözümü temsil eden kromozomlar mevcut nesilde tutulur diğerleri ise atılır. Böylece populasyon büyüklüğü sabit tutulmuş olur [85, 90]. Genetik algoritmalarda sıklıkla kullanılan çaprazlama yöntemleri tek ve iki noktalı çaprazlama yöntemleri olup bu tez çalışmasında tek noktalı çaprazlama operatörü kullanılmıştır. Tek noktalı çaprazlama işleminde kromozomlar üzerinde rasgele bir nokta seçilir ve kromozomlar buradan ikiye bölünür ve kromozomların ikiye bölündükleri noktadan sonraki kısımları birbirleriyle yer değiştirir. Böylece daha iyi nesiller elde edilmesi sağlanmaya çalışılmaktadır [91]. Bu işlemin nasıl yapıldığı Şekil 2.17’de ifade edilmiştir.



Şekil 2.17. Tek noktalı çaprazlama işlemi

2.2.2.2.3. Mutasyon

Genetik algoritmalarda sadece çaprazlama işleminin uygulanması sonraki nesillerde kromozom çeşitliliğinin istenilen seviyede olmasını engelleyebilir. Mutasyon operatörü ile kromozomlardaki çeşitlilik sağlanır ve korunurken aynı zamanda algoritmanın yerel minimuma veya maksimuma takılması önlenir [85,92]. Mutasyon işlemi kromozomları ifade eden sayı dizilerinin bitlerinde rasgele değişiklikler yapılması ile gerçekleştirilir. Örneğin bir bit 0 iken 1 veya 1 iken 0 yapılır. Bu durum Şekil 2.18 ile ifade edilmiştir.



Şekil 2.18. Tek bir kromozom için mutasyon işlemi

3. BENZETİM ÇALIŞMALARI VE SONUÇLAR

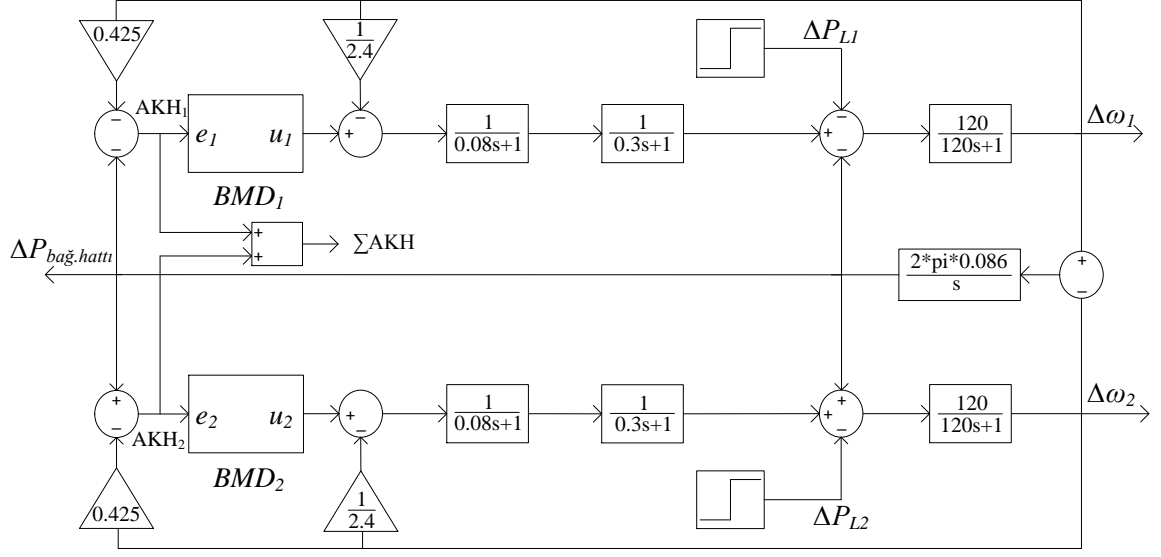
Bu bölümde ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminin yük frekans kontrolü MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma kapsamında parametreleri PSO ve GA kullanılarak optimize edilen BMD'nin yük frekans kontrolü performansına etkisi araştırılmıştır. Optimizasyon yöntemlerinin kontrol performansı üzerindeki etkisinin karşılaştırılmasına ek olarak klasik PI denetleyici de önerilen optimizasyon tabanlı kontrol yapısının ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminin yük frekans kontrolündeki verimliliğini ortaya koymak açısından benzetim çalışmalarına dâhil edilmiştir. Benzetim çalışmalarında güç sisteminin, ikinci bölümde elde edilen, doğrusal modeli kullanılmıştır.

Optimizasyon çalışmaları kapsamında BMD'nin üçgen üyelik fonksiyonlarının sınır değerleri en uygun şekilde belirlenmeye çalışılmıştır. Optimize edilmeye çalışılan parametreler [0,1] aralığında 20 iterasyonda PSO algoritması için 10 adet parçacık ve GA için ise yine 10 adet birey ile çözüm uzayında aratılmıştır. Her iki optimizasyon yönteminde de denklem (3.1) ile ifade edilen ITAE (Integral Time Absolute Error) uygunluk fonksiyonu kullanılmıştır.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t.e(t).dt \quad (3.1)$$

Elde edilen sonuçlar maksimum ve minimum aşma, yük değişiminin %0.5 aralığında ki oturma süresi ve uygunluk değerleri açısından kıyaslanmıştır.

Ele alınan eşit parametrelili ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminin doğrusal modeli MATLAB/Simulink ortamında Şekil 3.1' de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Güç sistem modelinde yer alan bütün parametreler birim değer (p.u.) olarak ifade edilmiştir.



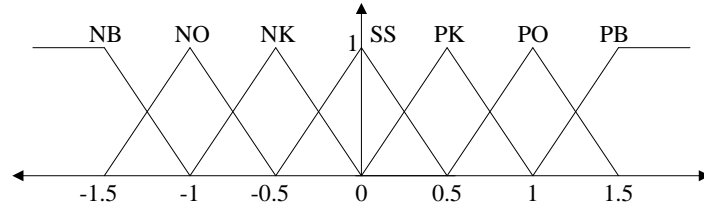
Şekil 3.1. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sistemi doğrusal modeli

Benzetim ve optimizasyon çalışmaları ilk olarak $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=0.00$ p.u. birim basamak yük değişimi durumu için yapılmıştır. Bu yük değişim koşulu altında PSO ve GA ile optimize edilmiş BMD parametreleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

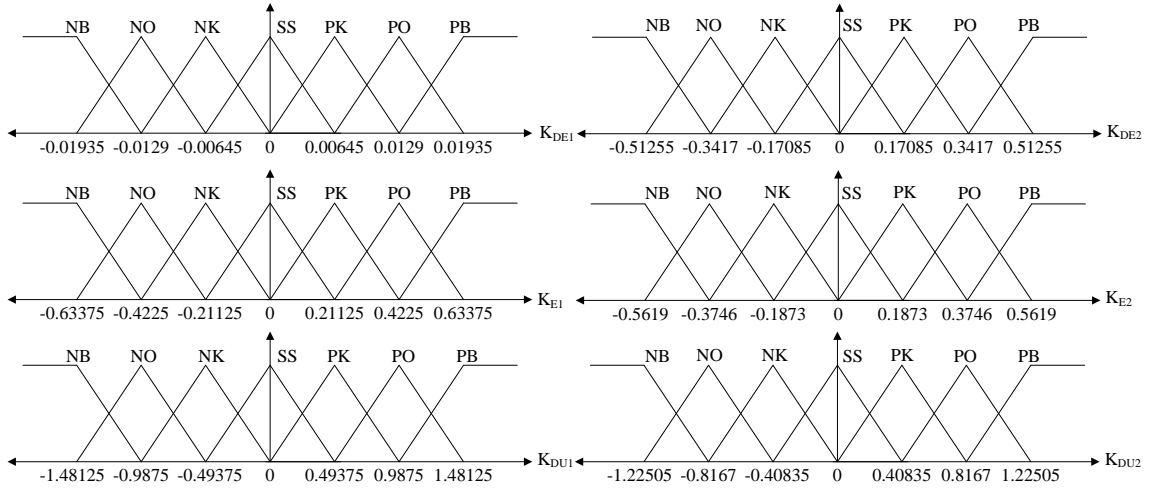
Tablo 3.1. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde PSO ve GA ile optimize edilmiş BMD parametreleri

	BMD Parametreleri					
	K_{DE1}	K_{E1}	K_{DU1}	K_{DE2}	K_{E2}	K_{DU2}
PSO	0.0129	0.4225	0.9875	0.3417	0.3746	0.8167
GA	0.0311	0.6478	0.7445	0.6134	0.5076	0.7561

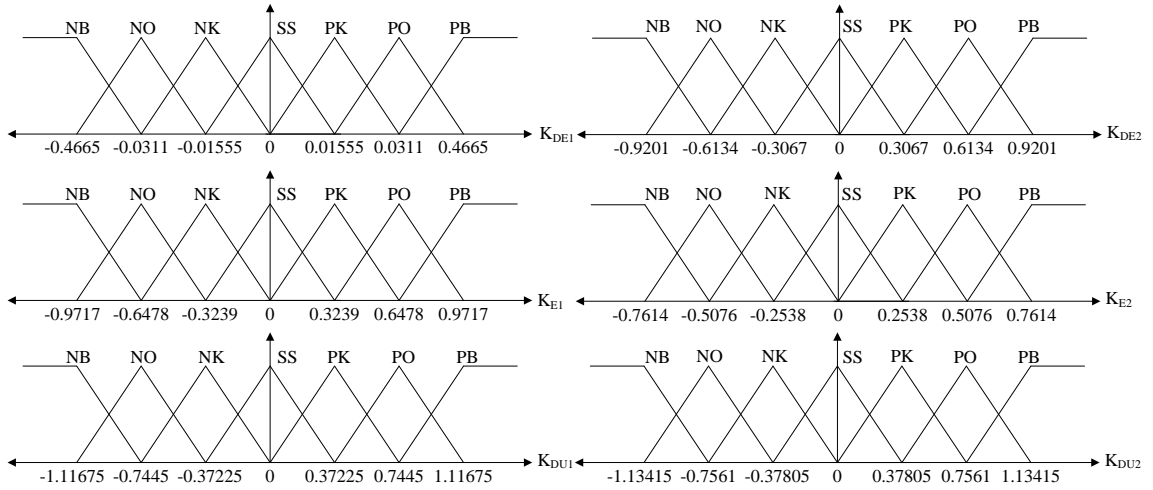
Optimizasyon işlemine tabi tutulmamış BMD’ye ait giriş değişkenleri olan hata ve hatadaki değişim ile çıkış değişkenine ilişkin üçgen üyelik fonksiyonu Şekil 3.2.’de verilmiştir. Tablo 3.1’de ki değerlere bağlı olarak BMD’nin hata, hatadaki değişim ve çıkış işaretindeki değişime ilişkin üçgen üyelik fonksiyonları ise Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’te gösterildiği gibidir.



Şekil 3.2. Optimize edilmemiş BMD'ye ait üçgen üyelik fonksiyonu

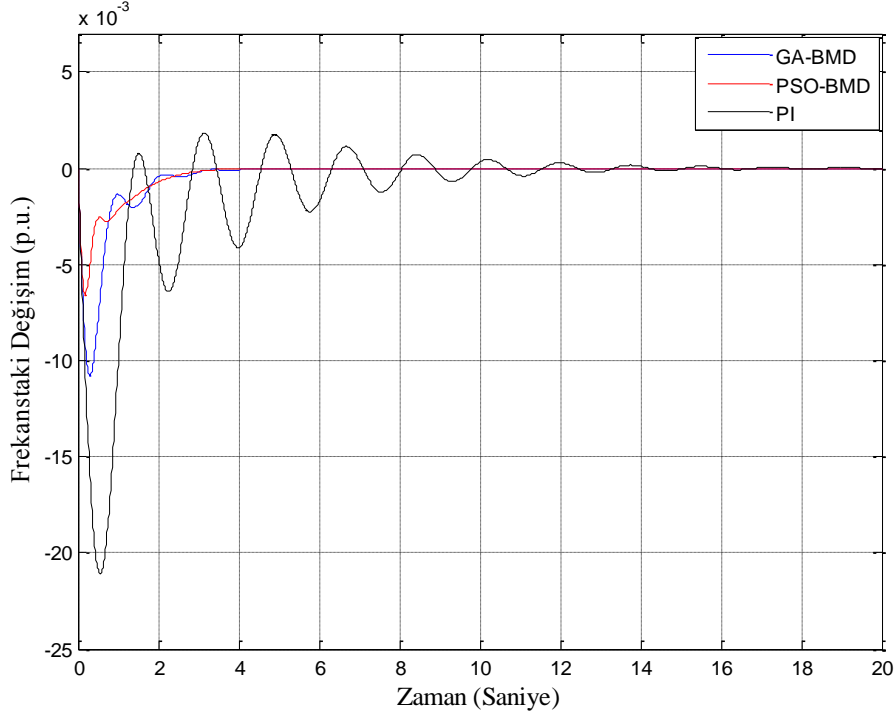


Şekil 3.3. PSO ile optimize edilmiş BMD üyelik fonksiyonları



Şekil 3.4. GA ile optimize edilmiş BMD üyelik fonksiyonları

Yukarıda elde edilen verilere göre tasarlanmış BMD ve parametreleri $K_p=0.11$ ve $K_I=0.49$ olarak seçilen klasik PI denetleyicinin $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=0.00$ p.u. yük değişimine karşı birinci güç bölgesinde vermiş oldukları cevap Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



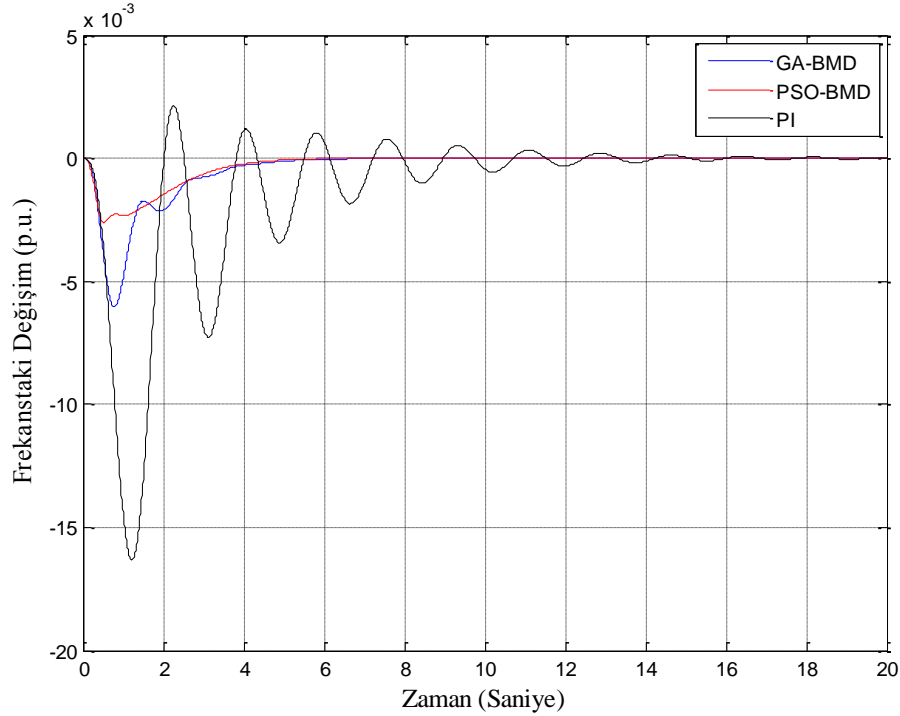
Şekil 3.5. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=0.00$ p.u. yük değişim durumu için birinci güç bölgesinde frekansın zamanla değişimi

Birinci bölge frekans cevabının oturma süresi, maksimum ve minimum aşma değerleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=0.00$ p.u. yük değişim durumu için birinci bölge frekansına ait oturma süresi, maksimum ve minimum aşma değerleri

	<i>Birinci bölge frekansındaki değişim Δf_1</i>		
	<i>Oturma Süresi (s)</i>	<i>Maksimum Aşma (p.u.)</i>	<i>Minimum Aşma (p.u.)</i>
PSO-BMD	3.6206	4.8761e-6	-6.644e-3
GA-BMD	4.2284	0	-10.8e-3
PI	17.4608	1.836e-3	-21.1e-3

İkinci güç bölgesine ait frekans değişimi ise Şekil 3.6’da verilmiştir.



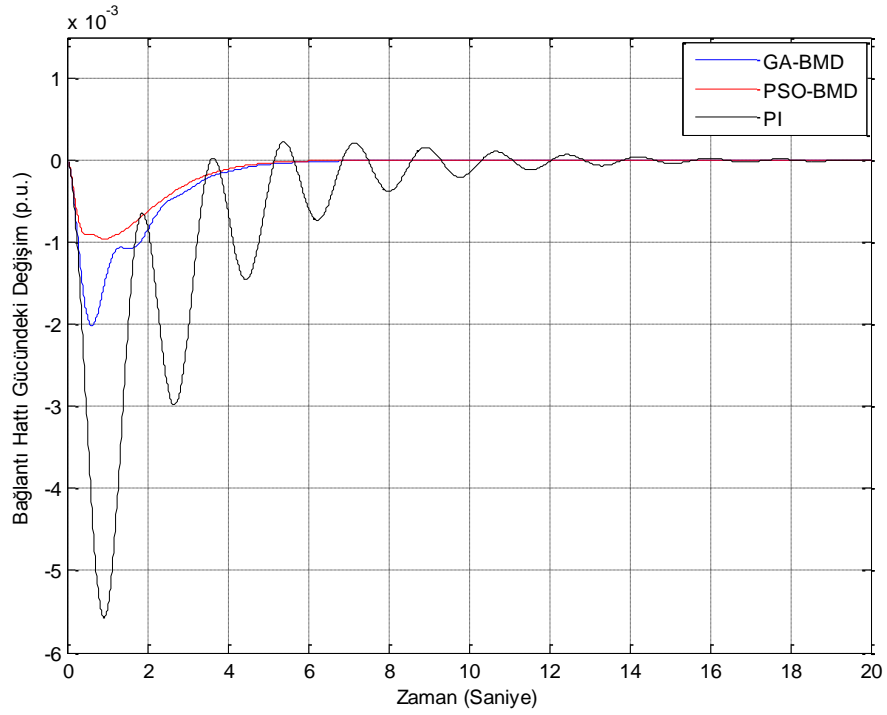
Şekil 3.6. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=0.00$ p.u. yük değişim durumu için ikinci güç bölgesinde frekansın zamanla değişimi

İkinci bölge frekans cevabının oturma süresi, maksimum ve minimum aşma değerleri Tablo 3.3’te verilmiştir.

Tablo 3.3. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=0.00$ p.u. yük değişim durumu için ikinci bölge frekansına ait oturma süresi, maksimum ve minimum aşma değerleri

	<i>İkinci bölge frekansındaki değişim Δf_2</i>		
	<i>Oturma Süresi (s)</i>	<i>Maksimum Aşma (p.u.)</i>	<i>Minimum Aşma (p.u.)</i>
PSO-BMD	5.3063	0.152e-6	-2.6051e-3
GA-BMD	5.9087	0	-6.0544e-3
PI	17.4823	2.1248e-3	-16.3e-3

Her iki güç bölgesinin birbirine bağlayan bağlantı hattından akan gücün değişimi ise Şekil 3.7’de ki gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.7. Ara ısıtmasız iki bölgeci güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=0.00$ p.u. yük değişim durumu için bağlantı hattından akan gücün değişimi

Bağlantı hattından akan gücün değişimine ilişkin oturma süresi, maksimum ve minimum aşma değerleri Tablo 3.4 'te verilmiştir.

Tablo 3.4. Ara ısıtmasız iki bölgeci güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=0.00$ p.u. yük değişim durumu için bağlantı hattından akan gücün değişimine ait oturma süresi, maksimum ve minimum aşma değerleri

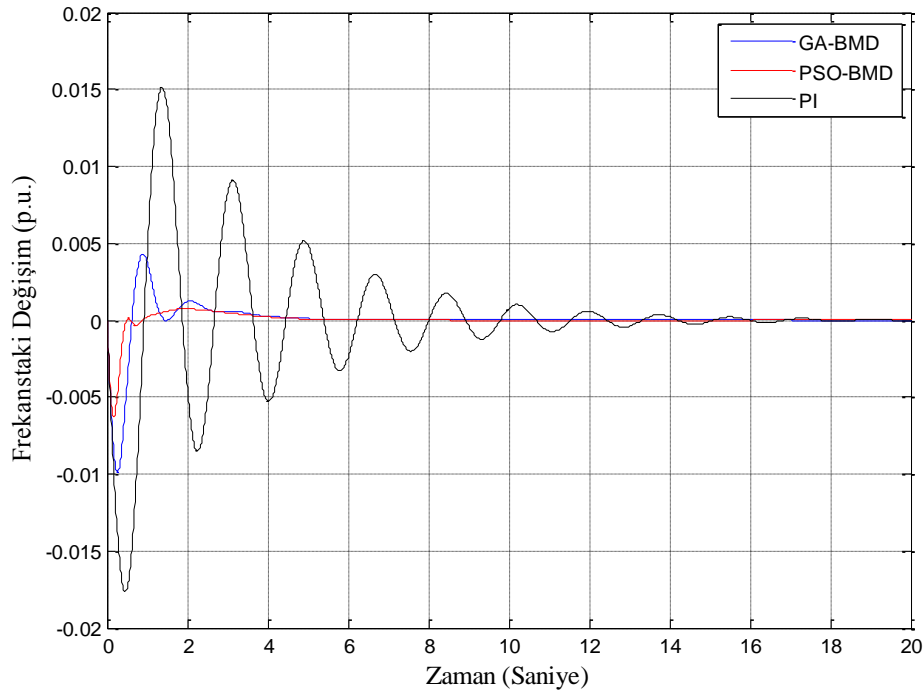
	<i>Bağlantı hattından akan gücün değişimi $\Delta P_{bağ.hattı}$</i>		
	<i>Oturma Süresi (s)</i>	<i>Maksimum Aşma (p.u.)</i>	<i>Minimum Aşma (p.u.)</i>
PSO-BMD	4.6542	0.43457e-6	-0.95424e-3
GA-BMD	4.9936	0	-2.0136e-3
PI	13.5388	0.22263e-3	-5.5691e-3

PSO ve GA ile optimize edilmiş BMD'nin ve klasik PI denetleyicinin $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=0.00$ p.u. yük değişim durumu için vermiş oldukları cevaplar uygunluk değerleri açısından da kıyaslanmış ve sonuçlar Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=0.00$ p.u. yük değişim durumu için uygunluk değerleri sonuçları

	<i>ITAE (Integral Time Absolute Error)</i>
PSO-BMD	0.005702
GA-BMD	0.007754

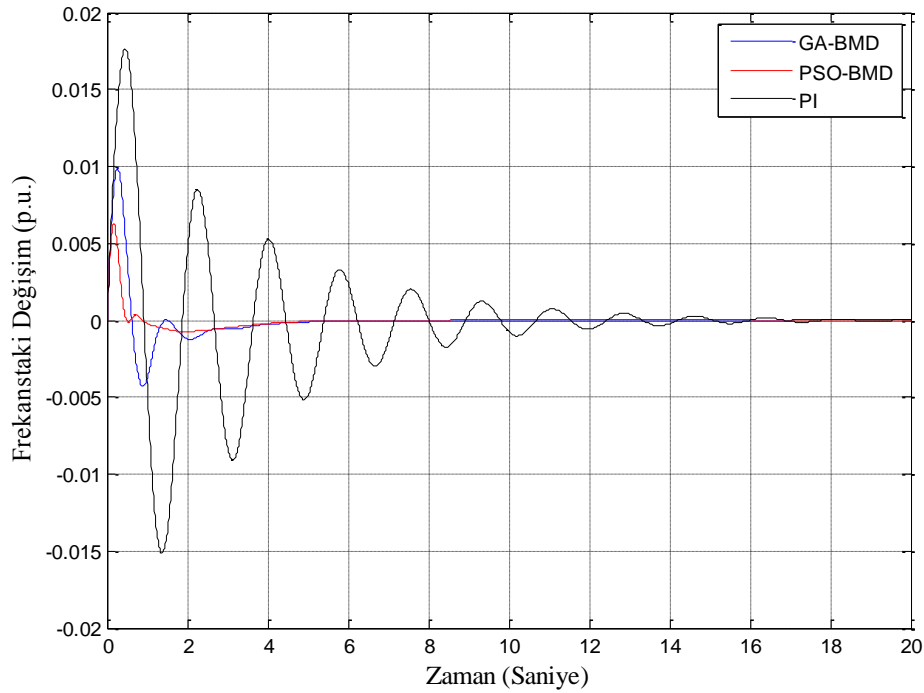
Benzetim çalışmaları kapsamında ikinci durum olarak bir önceki yük değişim durumu için elde edilen parametrelere sahip BMD'nin ve klasik PI denetleyicinin ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=-0.01$ p.u. değerindeki yük değişimine karşı vermiş olduğu cevap önerilen kontrol yapısının farklı durumlardaki verimli çalışmasını göstermek açısından incelenmiştir. Birinci bölge frekansına ait değişim Şekil 3.8'de, ikinci bölge frekansına ait değişim Şekil 3.9'da ve bağlantı hattından akan gücün değişimi de Şekil 3.10'da verilmiştir. Birinci bölge frekansı, ikinci bölge frekansı ve bağlantı hattından akan gücün değişimine ilişkin oturma süreleri, maksimum ve minimum aşma değerleri ise sırasıyla Tablo 3.6, Tablo 3.7 ve Tablo 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=-0.01$ p.u. yük değişim durumu için birinci güç bölgesinde frekansın zamanla değişimi

Tablo 3.6. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=-0.01$ p.u. yük değişim durumu için birinci bölge frekansına ait oturma süresi, maksimum ve minimum aşma değerleri

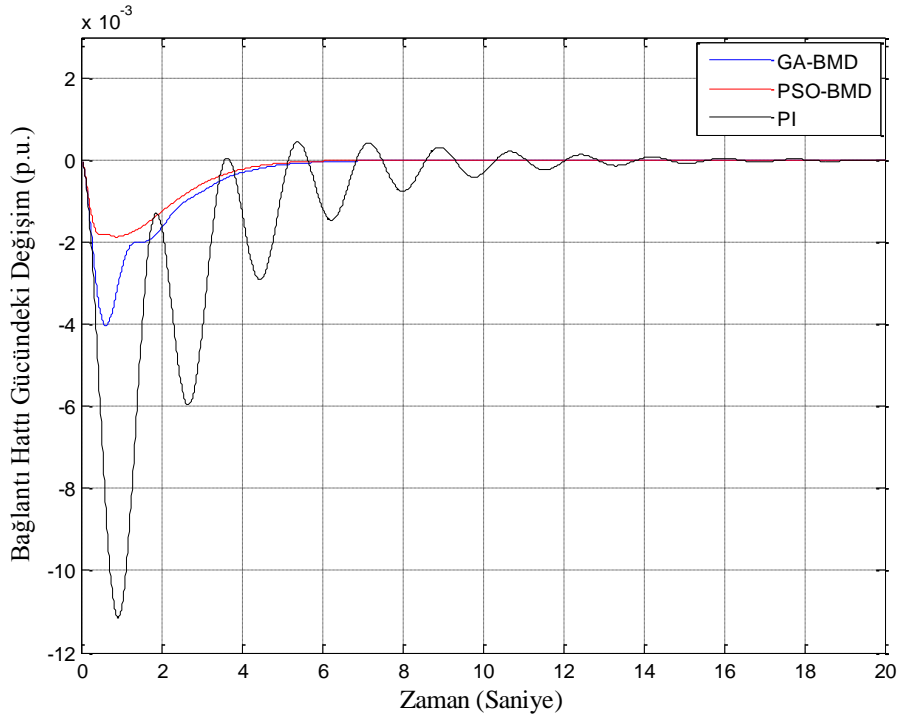
	<i>Birinci bölge frekansındaki değişim Δf_1</i>		
	<i>Oturma Süresi (s)</i>	<i>Maksimum Aşma (p.u.)</i>	<i>Minimum Aşma (p.u.)</i>
PSO-BMD	5.4219	0.72318e-3	-6.3188e-3
GA-BMD	5.8289	4.2893e-3	-9.867e-3
PI	20.08	15.2e-3	-17.6e-3



Şekil 3.9. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=-0.01$ p.u. yük değişim durumu için ikinci güç bölgesinde frekansın zamanla değişimi

Tablo 3.7. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=-0.01$ p.u. yük değişim durumu için ikinci bölge frekansına ait oturma süresi, maksimum ve minimum aşma değerleri

	<i>İkinci bölge frekansındaki değişim Δf_2</i>		
	<i>Oturma Süresi (s)</i>	<i>Maksimum Aşma (p.u.)</i>	<i>Minimum Aşma (p.u.)</i>
PSO-BMD	2.9515	6.3188e-3	-0.72318e-3
GA-BMD	3.4221	9.867e-3	-4.2893e-3
PI	20.0799	17.6e-3	-15.2e-3



Şekil 3.10. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=-0.01$ p.u. yük değişim durumu için bağlantı hattından akan gücün değişimi

Tablo 3.8. Ara ısıtmasız iki bölgeli güç sisteminde $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=-0.01$ p.u. yük değişim durumu için bağlantı hattından akan gücün değişimine ait oturma süresi, maksimum ve minimum aşma değerleri

	<i>Bağlantı hattından akan gücün değişimi $\Delta P_{bağ.hattı}$</i>		
	<i>Oturma Süresi (s)</i>	<i>Maksimum Aşma (p.u.)</i>	<i>Minimum Aşma (p.u.)</i>
PSO-BMD	5.2342	8.1939e-7	-1.8635e-3
GA-BMD	5.7928	0	-4.0325e-3
PI	16.0676	0.44526e-3	-11.1e-3

Yukarıda elde edilen sonuçlar önerilen optimizasyon temelli BMD'nin farklı yük değişim durumları için klasik PI denetleyiciye göre daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Benzetim çalışmaları kapsamında ilk durum olarak ele alınan $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=0.00$ p.u. yük değişim durumu için PSO ile optimize edilmiş BMD, GA ile optimize edilmiş BMD'ye göre oturma süresi, minimum aşma ve uygunluk değeri açısından daha iyi sonuç verirken maksimum aşma açısından çok yakın değerler olsa da daha kötü sonuçlar verdiği söylenebilir. Tablo 3.4 incelendiğinde PSO ile elde edilen

sonuca göre bağlantı hattından akan gücün değişimi $0.43457e-6$ p.u. ile $-0.95424e-3$ p.u. maksimum ve minimum değerleri arasında tutulup sıfıra indirgenmiştir. GA ile elde sonuca göre ise bağlantı hattındaki gücün değişimi 0 p.u. ile $-2.0136e-3$ p.u. arasında tutulmuş ve sıfıra indirgenmiştir. Bu sonuç istenmeyen yük değişimlerinde güç bölgelerini birbirine bağlayan bağlantı hattından akan gücün daha küçük değerler arasında kaldığını göstermektedir. buna ek olarak optimizasyon temelli BMD'nin kullanılmasıyla frekans ve bağlantı hattı gücündeki değişimlerde sönümlü salınımların büyük oranda giderildiği gözlemlenmiştir. Şekil 3.5 ve Şekil 3.6 incelendiğinde birinci bölge frekansındaki değişimin minimum sapma miktarının ikinci bölge frekansındaki değişimin minimum sapma miktarından daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum ise anlık yük değişimini birinci güç bölgesinde meydana gelmiş olmasından kaynaklanmaktadır.

Benzetim çalışmaları kapsamında ikinci durum olarak ele alınan $\Delta P_{L1}=0.01$ p.u. ve $\Delta P_{L2}=-0.01$ p.u. yük değişim durumu için PSO ile optimize edilmiş BMD, GA ile optimize edilmiş BMD'ye göre yine ilk durumda olduğu gibi oturma süresi ve minimum aşma bakımından daha iyi sonuçlar vermiştir. Bağlantı hattından akan gücün değişiminde ise PSO, GA'ye göre maksimum aşma açısından çok yakın değerde de olsa daha kötü sonuç verirken, her iki bölge için maksimum frekans sapsmaları açısından daha iyi sonuç vermiştir. Şekil 3.8 ve Şekil 3.9 incelendiğinde PI denetleyici ile yapılan yük frekans kontrolü işleminde meydana gelen sönümlü salınımların optimizasyon temelli BMD'nin kullanılmasıyla yine büyük oranda giderildiği görülmektedir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında iki bölgeli ara ısıtmasız güç sisteminde yük frekans kontrolü ele alınmıştır. Bu kontrol işlemini etkin bir biçimde gerçekleştirebilmek amacıyla bir BMD modeli önerilmiştir. Önerilen BMD'nin daha verimli, hızlı ve etkin bir kontrol işlemi yapabilmesi için optimizasyon yöntemlerine başvurulmuştur. Parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) ve genetik algoritmalar (GA) kullanılarak bulanık mantık denetleyiciye ait üçgen üyelik fonksiyonlarının en uygun sınır değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Kullanılan optimizasyon yöntemleri oturma süresi, maksimum aşma, minimum aşma ve uygunluk değeri olarak belirlenen performans kriterleri açısından kıyaslanmıştır. Buna ek olarak önerilen optimizasyon temelli BMD farklı yük değişim durumları altında çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar klasik PI denetleyici ile de kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar parametreleri optimize edilmiş BMD'nin klasik PI denetleyiciye göre çok daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Benzetim çalışmaları sonucunda aynı zamanda PSO yönteminin GA'ya göre performans kriterleri bakımından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Güç sistemlerinin çalışma koşulları anlık değişim gösteren yapıdadır. Özellikle güç tüketim talebinde meydana gelen ani değişimler güç sistemlerinin kararlı çalışmasını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durum güç sistem bileşenlerinin yapısına zarar vermekle beraber üretilen enerjinin kalitesini de etki etmektedir. Güvenilir ve kaliteli enerjinin en önemli göstergesi olan frekanstaki kararlılık ve güç sistemlerini birbirine bağlayan bağlantı hatlarından akan gücün daha önceden belirlenen sınırlar içerisinde tutulması hem üretim santralleri hem de tüketici açısından büyük önem arz etmektedir. Anlık yük değişimlerinin yol açtığı frekanstaki ve bağlantı hattı gücündeki değişimler mümkün olan en kısa sürede istenilen değerlere getirilmelidir. Avrupa enterkonnekte güç sistemine bağlanmaya çalışan ülkemizin sağlaması gereken en önemli kriterin frekans kontrol kalitesi olduğu göz önüne alınırsa güç sistemlerinde yük frekans kontrolünün önemi daha iyi anlaşılabilir.

Bu tez çalışması kapsamında frekans kontrol kalitesi göz önüne alınarak yük frekans kontrolü işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi hedeflenmiştir. İlerleyen zamanlarda araştırmacılar tarafından yapılacak çalışmalarda mevcut yapay zeka ve optimizasyon yöntemlerinin daha etkin ve başarılı kullanılabilmesi veya farklı akıllı

yöntemlerin kullanılması, hibrit yapıdaki algoritmaların geliştirilmesi, bulanık mantık denetleyici kurallarının değişen güç sistem çalışma koşullarına göre adaptif hale getirilebilmesine yönelik çalışmalar bu konudaki ilerlemelere hız kazandıracaktır. Bu tez kapsamında iki bölgeli güç sistemi ele alınmış olup daha fazla güç bölgesinin adaptif ve akıllı yük frekans kontrolünü içeren çalışmalar da yapılabilir.

5. KAYNAKLAR

1. Güner, Ü., Türkiye’ de Enerji Kaynakları ve Hidroelektrik Enerjinin Önemi, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi Türkiye 10. Enerji Kongresi, Kasım, 2006, İstanbul, 91-99.
2. Adıgüzel, F., Türkiye’de Enerji Sektöründe Hidroelektrik Enerjinin Önemi, TMH-Türkiye Mühendislik Haberleri, 420-421-422 (2002) 24-26.
3. Bergen, R. ve Vittal, V., Power System Analysis, Second Edition, Prentice Hall, USA, 2000.
4. Bircan, M., Türkiye Elektrik Sisteminin UCTE Bağlantısı Kapsamında Frekans Kontrolü Kalitesinin UCTE Standartlarına Çıkarılması, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi Türkiye 10. Enerji Kongresi, Kasım 2006, İstanbul, 265-273.
5. Elgerd, O.I. ve Fosha, C., Optimum Megawatt Frequency Control of Multi-area Electric Energy Systems, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 89, 4 (1970) 556–563.
6. Yılmaz, A.S., Yanıkoğlu, E. Ve Turan, M., Enerji Sistemlerinde PID Denetleyiciler ile Yük Frekans Kontrolü, SAÜ Fen Bilimleri Dergisi, (1997) 105-109.
7. Yalçın, E., Çam, E., Vardar, T. Ve Lüy, M., PID Kontrolör ile İki Bölge Güç Sistemlerinde Yük Frekans Kontrolünün İncelenmesi, Int.J.Eng.Research & Development, 2, 1 (2010) 67-71.
8. Weedy, B.M. ve Cory, B.J., Electric Power Systems, Fourth Edition, John Wiley & Sons Inc, USA, 1998.
9. Gözde, H., Kocaarslan, İ. ve Taplamacıoğlu, M.C., İki Bölge Güç Sisteminde Parçacık Sürüsü Algoritması ile Yük-Frekans Kontrolü Optimizasyonu, ELECO Kasım 2008, Bursa.
10. Ramakrishna, K.S.S. ve Bhatti, T.S., Sampled-data Automatic Load Frequency Control of a Single Area Power System with Multi-source Power Generation, Electric Power Components and Systems, 35, 8 (2007) 955-980.
11. Fosha, C. ve Elgerd O.I., The Megawatt-Frequency Control Problem: a New Approach Via Optimal Control, IEEE Trans. Power Apparatus & Systems, 89, 4 (1970) 563-577.
12. Aström, K.J. ve Hagglund, T., PID Controllers, Instrument Society of America, New York, (1995) 64-70, 232-235.

13. Lee, K.A., Yee, H. ve Teo, C.Y., Self-tuning Algorithm for Automatic Generation Control in an Interconnected Power System, Electric Power Systems Research, 20, 2 (1991) 157-165.
14. Rubaai, A. ve Udo, V., Self tuning LFC: Multilevel Adaptive Approach, Proceedings of Institution of Electrical Engineering Generation, Transmission, Distribution, 141,4 1994.USA 285-290
15. Magid, A.Y.L.ve Dawoud, M.M., Genetic Algorithms Applications in Load Frequency Control, Genetic Algorithms In Engineering Systems Innovation and Applications, IEEE, (1995) 414.
16. Chang, C.S. ve Fu, W., Area Load Frequency Control Using Fuzzy Gain Scheduling of PI Controllers, Electric Power Systems Research, 42 (1997) 145-152.
17. Talaq, J. ve Al-Basri, F., Adaptive Fuzzy Gain Scheduling for Load Frequency Control, IEEE Transactions on Power Systems, 14, 1 (1999) 145-150.
18. Moon, Y.H., Ryu H.S., Lee J.G. ve Kim S.G., Power System Load Frequency Control Using Noise – Tolerable PID Feedback, IEEE (2001) 1714-1718.
19. El-Sherbiny, M.K., El-Saady, G. ve Yousef A.M., Efficient Fuzzy Logic Load Frequency Controller, Energy Conversion and Management, 43 (2002) 1853-1863.
20. Pinkang, L., Hengjun, Z.ve Yuyun, L., Genetic Algorithm Optimization for AGC of Multi-area Power systems, IEEE Region 10 Technical Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering, 2002, China, 1818-1821.
21. Zeynelgil, H.I., Demirören, A. ve Sengor, N.S., The Application of ANN Technique to Automatic Generation Control for Multi-area Power System, Electrical Power and Energy Systems, Elsevier, 24 (2002), 345-354.
22. Karnavas, Y.L. ve Papadopoulos, D.P., AGC for Autonomous Power System Using Combined Intelligent Techniques, Electric Power Systems Research, 62 (2002) 225-239.
23. Magid, A.Y.L. ve Abido, M.A., AGC Tuning of Interconnected Reheat Thermal Systems with Particle Swarm Optimization”, 10th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 2003, United Arab Emirates, 376-379.
24. Yeşil, E., Güzelkaya, M. ve Ekşin, I., Self-tuning Fuzzy PID Type Load and Frequency Controller, Energy Conversion and Management, 45, 3 (2004) 377-390.
25. Juang, C.F., Lu, C.F., Power System Load Frequency Control by Evolutionary Fuzzy PI Controller”, IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2004, Hungary, 715-719.

26. Oysal, Y., Yılmaz, A.S. ve Köklükaya, E., Dynamic Fuzzy Networks Based Load Frequency Controller Design in Electrical Power Systems, G.U. Journal of Science, 17, 3 (2004) 101-114.
27. Demirören, A. ve Yeşil, E., Automatic Generation Control with Fuzzy Logic Controllers in the Power System Including SMES Units, Electrical Power and Energy Systems 26 (2004) 291-305.
28. Cam, E. ve Kocaarslan, İ., A fuzzy Gain Scheduling PI Controller Application for an Interconnected Electrical Power System, Electric Power Systems Research, 73, 3 (2005) 267-274.
29. Massiala, M., Ghribi, M. ve Kaddouri, A., A Two-layered Self-tuning Fuzzy Controller for Interconnected Power Systems", Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2006, Ottawa, 1086-1089.
30. Lee, H.J., Park J.B., ve Joo Y.H., Robust Load Frequency Control For Uncertain Nonlinear Power Systems: A Fuzzy Logic Approach, Information Science, Elsevier, 176 (2006) 3520-3537.
31. Çam, E., Application of Fuzzy Logic for Load Frequency Control of Hydroelectrical Power Plants, Energy Conversion and Management 48 (2007) 1281-1288.
32. Tan, W., Sug, L. ve Xu, Z., Robust Analysis of Design of Load Frequency Controller for Power Systems, 17th IEEE International Conference on Control Applications Part of 2008 IEEE Multi-conference on Systems and Control, September, 2008, San Antonio, Texas, USA, 3-5.
33. Taher, S.A., Hemati, R., Abdolalipour, A. ve Tabie, S.H., Optimal Decentralized Load Frequency Control Using HPSO Algorithms in Deregulated Power Systems, American Journal of Applied Sciences, 5, 9 (2008) 1167-1174.
34. Pothiya, S. ve Ngamroo, I., Optimal Fuzzy Logic-based PID Controller for Load Frequency Control Including Superconducting Magnetic Energy Storage Units, Energy Conversion and Management, 49 (2008) 2833-2838.
35. Gözde, H., Taplamacıoğlu, M.C.ve Kocaarslan, İ., A Swarm Optimization Based Load Frequency Control Application in a Two Area Thermal Power System, IEEE International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Kasım 2009, Bursa, 124-128.
36. Nanda, J., Mishra, S. ve Saikia, L.C., Maiden Application of Bacterial Foraging Based Optimization Technique in Multiarea Automatic Generation Control, IEEE Transactions on Power Systems, 24, 2 (2009) 602-609.
37. Gözde, H., Taplamacıoğlu, M.C., Kocaarslan, İ. ve Şenol, M.A., Particle Swarm Optimization Based PI-Controller Design to Load-Frequency Control of a Two Area Reheat Thermal Power System, Journal of Thermal Science and Technology, 30, 1 (2010) 13-21.

38. Vrdoljak, K., Peric, N. ve Petrovic, I., Sliding Mode Based Load-Frequency Control in Power Systems, Electrical Power Systems Research, Elsevier, 80 (2010) 514-527.
39. Shamuga, V.ve Jayabarathi, T., Load Frequency Control Using PID Tuned ANN Controller in Power System, 1st International Conference on Electrical Energy Systems, 2011, 269-274.
40. Rathor, S., Acharya, S., Gude, S. ve Mishra, P., Application of Artificial Bee Colony Optimization for Load Frequency Control, World Congress on Information and Communication Technologies, 2011, 743-747.
41. Mohammed, I.A., Mahir, R.A. ve Ibraheem, I.K., Robust Controller Design for Load Frequency Control in Power Systems Using State-Space Approach, Journal of Engineering, 2, 17 (2011), 265-278.
42. Surya, P. ve Sinha K.S., Intelligent PI Control Technique in Four Area Load Frequency Control of Interconnected Hydro-thermal Power System, International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies [ICCEET], 2012, 145-150.
43. Duman, S., Yorukeren, N. ve Altas, I.H., Load Frequency Control of a Single Area Power System Using Gravitational Search Algorithm, International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications, INISTA, 2012, Trabzon, 1-5.
44. Xiangjie, L., Xiaobing, K. ve Xizhi D., Power System Model Predictive Load Frequency Control, American Control Conference Fairmont Queen Elizabeth, Montréal, Canada June 27-June 29, 2012, 6602-6607.
45. Sheikh, M.R.I. ve Mondol, N., Application of Self-Tuning FPIC to AGC for Load Frequency Control in Wind Farm Interconnected Large Power System, IEEE/OSA/IAPR International Conference on Infonnatics, Electronics & Vision, ICIEV, 2012, 812-816.
46. Neha, M., Amol, B., ve Kanchan, C., Particle Swarm Optimization Based Load Frequency Control in Two Area Power System, International Journal on Emerging Technologies, 4, 1 (2013) 132-138.
47. Hassan, A., Yousef, K., Kharusi, A., Mohammed, H.A. ve Nasser, H., Load Frequency Control of a Multi-Area PowerSystem: An Adaptive Fuzzy Logic Approach, IEEE Transactions on Power Systems, (2014).
48. Glover, J.D., Sarma M.S.ve Overbye, T.J., Power System Analysis&Design, Fifth Edition, USA, 2012.
49. Klein, M., Rogers, G.J. ve Kundur, P. A Fundamental Study of Inter-Area Oscillations in Power Systems, Transactions on PowerSystems, Toronto, Ontario, 6, 3 (1991).

50. Pour, M.E., Khodabakhshian, A. ve Hooshmand, R., A New Design Approach to Load Frequency Control Tuning, 18th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2010, Isfahan, Iran, 830 – 835.
51. Laithwaite, E.R. ve Freris, L.L., Electrical Energy: Its Generation, Transmission and Use, McGraw Hill - London, 1980.
52. Gross, A.C., Power System Analysis, John Wiley&Sons, USA, 1986.
53. Elgerd, O.I., Electric Energy Systems Theory, Mc Graw-Hill Press., New York, 1982.
54. Wood, A.J. ve Wollenberg, B.F., Power Generation Operation and Control, Second Edition, 1996.
55. Bevrán, H. ve Hıyama, T., Intelligent Automatic Generation Control, CRC Press, 2011.
56. Sauer, P.W. ve Pai, M.A., Power System Dynamics and Stability, Stipes Publishing, 2006.
57. Kundur, P., Neal, J.B. ve Lauby, M.G., Power System Stability and Control, McGraw-Hill, USA, 1994.
58. IEEE Committee Report, Dynamic Models for Steam and Hydro Turbines in Power System Studies, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 92, 6 (1973) 1904-1915.
59. Saadat, H., Power System Analysis, McGraw-Hill, USA, 2002.
60. Murty, P.S.R., Operation and Control in Power Systems, BS Publications, 2008.
61. Ogata, K. Modern Control Engineering Fifth Edition, Prentice-Hall Inc., USA, 2010.
62. Zadeh, L.A., "Fuzzy Sets, Information and Control, 8, 1965 338-353.
63. Zadeh, L.A., Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 3, 1 (1973) 28-44.
64. Zadeh, L.A., The Concept of Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning, Part 1, 2, and 3, Information Sciences, 8, 8, 9, (1975) 199-249, 301-357, 43-80.
65. Altaş, İ.H., Bulanık Mantık: Bulanık Denetim, Enerji Elektrik Elektromekanik-3e, Eylül 1999, Sayı 62, İstanbul, Bilesim Yayıncılık A.Ş., 80-85.
66. Mamdani, E.H. ve Assilian, S., An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller, Int. J. Man-Machine Studies 7 (1975) 1-13.

67. Altas, İ.H., Bulanık Mantık Denetleyici: Matlab/Simulink Ortamı İçin Bir Modelleme, , Otomasyon Dergisi, Mart (2007), 158-162.
68. Altas, İ.H. ve Sharaf, A.M., A Generalized Direct Approach for Designing Fuzzy Logic Controllers in Matlab/Simulink GUI Environment, International Journal of Information Technology and Intelligent Computing, Int. J. IT&IC no.4 vol.1.
69. Wang, L.X., Adaptive Fuzzy System and Control, Design and Stability Analysis, Prentice Hall, 1996.
70. Altaş, İ.H., Bulanık Mantık: Bulanıklık Kavramı, Enerji Elektrik Elektromekanik-3e, Temmuz 1999, Sayı 64, İstanbul, Bilesim Yayıncılık A.Ş., 76-81.
71. Yang, B., Chen, Y. ve Zhao, Z., Survey on Applications of Particle Swarm Optimization in Electric Power Systems”, IEEE International Conference on Control and Automation, 2007, China, 481-486.
72. Reynolds, C., Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behavioral Model, Computer Graphics, 21, 4 (1987) 25-34.
73. Kennedy J. ve Eberhart R., Particle Swarm Optimization, Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks, 4 (1995) 1942-1948.
74. Eberhard, R.C. ve Kennedy, J. New Optimizer Using Particle Swarm Theory, Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, 1995, Nagoya, Japan.
75. Abido, M.A., Optimal Design of Power System Stabilizers Using Particle Swarm Optimization, IEEE Transactions on Energy Conversion, 17, 3, (2002) 406-413.
76. Liu, L., Liu, W. ve Cartes, D.A., Particle Swarm Optimization Based Parameter Identification Applied to Permanent Magnet Synchronous Motors, Engineering Applications of Artificial Intelligence 21, (2008) 1092–1100.
77. Hu, X., Shi, Y. ve Eberhart, R., Recent Advances in Particle Swarm, Evolutionary Computation CEC2004 Congress on, CEC, 2004, 90-97.
78. Chen, J., Ren, Z. ve Fan, X., Particle Swarm Optimization with Adaptive Mutation and its Application Research in Tuning of PID Parameters, First International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics, Harbin, 2006 990-994.
79. Kennedy J., Russell, R.C. ve Shi, Y., Swarm Intelligence, The Morgan Kaufmann Series in Evolutionary Computation, 2001.
80. Carlisle, A. ve Dozier, G., An Off-The-Shelf PSO, In Proceedings of the PSO Workshop, 2001, 1-6.

81. Shi, Y. ve Eberhart, R.C., A Modified Particle Swarm Optimizer, Proceeding of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 1998, 69-73.
82. Valle, Y., Vanayagamoorthy, D., Mohagheghi, G. K., Hernandez, S.,J.C. ve Harley R.G., Particle Swarm Optimization: Basic Concepts, Variants and Applications in Power System, IEEE Transactions on Evolutionary Computations, 12, 2 (2008) 171-195.
83. Clerc, M., The Swarm and the Queen: Towards a Deterministic and Adaptive Particle Swarm Optimization, Congress on Evolutionary Computation, 1999, USA, 1951-1957.
84. Mitchell, M., An Introdution to Genetic Algoritihms, MIT Press, Fifth Edition, 1998.
85. Randy L.H., Sue, E.H., Practical Genetic Algorithms, Second Edition, A John Wiley&Sons, Inc., Publication, USA, 2004.
86. Coley, D.A., An Introdution to Genetic Algorithms for Scientist and Engineers, World Scientific Publishing Co. Pte.Ltd., Singapore, 1999.
87. Zbigniew, M., Genetic Algorithms+Data Structures=Evolution Programs, Third, Revised and Extenden Edition, Springer series Artificial Intelligence, 1992.
88. Goldberg, D.E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989.
89. Booker, L.B., Goldberg, D.E. ve Holland, J.H., Classifier Systems and Genetic Algorithms, Artificial Intelligence, 40, 1-3 (1989) 235-282.
90. Jang J.S.R., Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach To Learning and Machine Intelligence, Chapter 7: Derivative-Free Optimization, Prentice-Hall, 1997, USA, 173-196.
91. Fığlalı, A. ve Engin, O. Genetik Algoritmalarla Akış Tipi Çizelgelemede Üreme Yöntemi Optimizasyonu, İTÜ Dergisi, 2002, 1-6.
92. Elmas, Ç., Yapay Zekâ Uygulamaları, Seçkin Yayıncılık, 2007. Ankara, 379-401.

ÖZGEÇMİŞ

31.10.1987 tarihinde Kahramanmaraş'ta doğdu. İlk, ortaokul ve lise öğrenimini Kahramanmaraş'ta tamamladı. Üniversite eğitimine 2004 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde başladı. 2011 yılında Elektrik-Elektronik Mühendisi unvanı ile mezun oldu. Aynı yıl içerisinde Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda hem yüksek lisans öğrenimine hem de aynı bölümde araştırma görevlisi olarak başladı. Yabancı dil olarak İngilizce bilmektedir.