

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

## ÇOK BÖLGELİ ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE OPTİMUM YÜK FREKANS KONTROLÜ

**Ahmet KARYEYEN**

**Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Yrd.Doç.Dr. Nurettin ÇETİNKAYA**

**2009, 106 Sayfa**

**Jüri: Yrd.Doç.Dr. Nurettin ÇETİNKAYA**

**Yrd.Doç.Dr. Musa AYDIN**

**Yrd.Doç.Dr. Erkan ÜLKER**

Enterkonnekte elektrik güç sistemlerinde bütün enerji üretim merkezleri sisteme ve dolayısıyla birbirlerine senkronize bir şekilde bağlıdır. Bu sebepten dolayı her biri aynı frekansa sahiptir.

Bir güç sisteminin kararlı çalışabilmesi için frekans sabit kalmalıdır. Denge durumu bozulduğu zaman sistem frekansı da değişmeye başlar. Çok fazla üretim frekansı artırırken, çok az üretim sistem frekansını azaltır. Frekans sürekli olarak standart duruma karşı kontrol edilir ve uzun süreli düşme ya da artma eğilimi gösterdiği durumlarda üretim generatörlerinin çıkışları düzenlenerek duruma uygun müdahaleler yapılır.

Genel olarak yük frekans kontrolü kavramı şu şekilde tanımlanabilir. Güç sisteminde çalışma durumundaki bir değişiklik, frekansı ve önceden ayarlanan ara bağlantı hatları üzerindeki yük akışını değiştirir. Bunları yeniden nominal değerlerine geri getirme işlemine yük frekans kontrolü denir. Yük frekans kontrolü kavramı, otomatik üretim kontrolü (AGC) olarak da adlandırılır. AGC sistemlerinde kontrol olayı, genellikle paylaşım merkezlerinde belirlenir. Bağlantı hattı güç akışlarına, sistem frekansına ve generatör birimlerinin MW yüklenmesine ait olan bilgi; kontrol olaylarının dijital bir bilgisayar tarafından saptandığı merkezi yere uzaktan kumanda ile iletilir.

Bu çalışmada bir güç sisteminde yük frekans kontrol uygulamasının simülasyonunu yapabilmek için güç sistemi modeli oluşturulmuştur. Çok kontrol bölgeli bir güç sistemi modelini temsil eden önce iki bölgeli, sonra da dört bölgeli bir sistem modeli üzerinde uygulamalar yapılmıştır. Kontrolör olarak bu çalışmada önerilen bulanık mantık kontrolörü kullanılmıştır.

Çalışmanın sonucunda ise PI kontrolör ile önerilen bulanık mantık kontrolör arasında performans açısından karşılaştırma yapılmış ve elde edilen sonuçlar belirtilmiştir. Ayrıca aynı sistem parametrelerinin kullanıldığı daha önceki çalışmalarla, bu çalışmada elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Otomatik Üretim Kontrolü, Yük Frekans Kontrolü, Güç Sistemi Modeli, Bulanık Mantık Kontrolör, PI Kontrolör, Çok Kontrol Bölgeli Sistemler.

## **ABSTRACT**

**MS Thesis**

### **OPTIMUM LOAD FREQUENCY CONTROL IN MULTI-AREA ELECTRICAL POWER SYSTEMS**

**Ahmet KARYEYEN**

**Selçuk University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Electrical and Electronic Engineering Department**

**Advisor: Assist.Prof.Dr. Nurettin ÇETİNKAYA**

**2009, 106 Pages**

**Jury: Assist.Prof.Dr. Nurettin ÇETİNKAYA**

**Assist.Prof.Dr. Musa AYDIN**

**Assist.Prof.Dr. Erkan ÜLKER**

Interconnected electric power systems, all energy generation centers are connected to the system and also each other in a synchronized. This reason, each has the same frequency.

Frequency must keep in a constant value for operating power system stable. When equilibrium condition get out of order, system frequency begins to change. Too much generation increases the system frequency and too low generation decreases the system frequency. Frequency is always controlled against nominal condition and when it shows increasing or decreasing inclination, the outputs of generators are arranged for suitable interference.

Generally, the load frequency problem could be described like this: A change of operation condition in power system, change the frequency and the power flow at the tie-lines which is set before. The process of returning this changes to the nominal values again, is called load frequency control. Load frequency control is named automatic generation control (AGC), too. The control of AGC systems is determined at the sharing centers. The data of tie-line power flows, system frequency and loading MW of generator units; are transmitted to central place where the control events are determined by a digital computer.

In this study, a power system model is created for doing simulation of the load frequency control application at power system. The applications are made on two area system model at first, then, four area system models as a representative of a multi-area power system. The proposed fuzzy logic controller is used as a controller of this power system models.

The comparisons are made about performance between the PI controller and the proposed fuzzy logic controller at the conclusion of this study and the obtained data signed. Furthermore, the results of studies which are used the same system parameters before are compared with the results of this study.

**Keywords:** Automatic Generation Control, Load Frequency Control, Power System Model, Fuzzy Logic Controller, PI Controller, Multi Control Area Systems.

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanması sürecinde maddi ve manevi desteğini hep yanımda hissettiğim sayın danışman hocam Yrd.Doç.Dr. Nurettin ÇETİNKAYA' ya, Selçuk Üniversitesi Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü hocalarına, Selçuk Üniversitesi İlgın Meslek Yüksek Okulundaki mesai arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ediyorum.

Yıllardır sürdürdüğüm eğitim-öğretim hayatımın her aşamasında bana destek olan ve bundan sonraki her aşamasında da bana destek olacaklarını bildiğim, maddi ve manevi bütün katkılardan dolayı; anne ve babama, kardeşlerime teşekkür ederim. Burada ismini saymadığım ama bu çalışmanın gerçekleşmesine sayısız katkıları olan kişilere de sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışmayı, yüksek lisans tez çalışmalarına başladığım günden beri dualarını ve manevi desteğini hiç esirgemeyen, bu çalışmanın neticelenmesini görmeyi en çok isteyenlerden biri olmasına rağmen ömrü buna yetmeyen, merhum babaannem Saime KARYEYEN' e armağan ediyorum.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ .....	vii
İÇİNDEKİLER .....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	x
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER.....	xv
1. GİRİŞ .....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....	4
3. MATERYAL VE METOT .....	7
3.1. Yük Frekans Kontrolü.....	7
3.1.1. Yük frekans kontrolünde hız regülasyonu .....	7
3.1.2. Paralel üniteler arasında yükün paylaşımı.....	16
3.1.3. Birincil ve ikincil kontrol çevrimleri.....	19
3.1.4. Güç sistemine ait birimlerin yük frekans kontrolüne uygun olarak modellenmesi .....	23
3.1.4.1. Generatör modeli.....	23
3.1.4.2. Yük modeli.....	28
3.1.4.3. Türbin modeli.....	29
3.1.4.4. Hız regülatör modeli .....	31
3.1.4.5. Bağlantı hattı modeli .....	32
3.1.5. Güç sisteminin yük frekans kontrolüne uygun bileşik modeli.....	33
3.1.6. Alan kontrol hatası .....	37
3.1.7. İki ya da daha fazla kontrol bölgesine sahip güç sistemlerinde otomatik yük frekans kontrolü .....	38
3.1.8. Bağlantı hattı kontrolü.....	45
3.2. Mühendislikte MATLAB Uygulamaları ve Bulanık Mantık.....	50
3.2.1. Mühendislikte MATLAB uygulamaları.....	50
3.2.2. Bulanık Mantık .....	54
3.2.2.1. Bulanıklık kavramı.....	55
3.2.2.2. Bulanık kümeler .....	57

3.2.2.3. Üyelik fonksiyonları.....	57
3.2.2.4. Giriş değişkenlerinin bulanıklaştırılması .....	58
3.2.2.5. Kural kümesinin tanımı ve bulanık çıkarım.....	58
3.2.2.6. Durulama.....	59
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA .....	60
4.1. İki Bölgeli Bir Güç Sisteminde Yük Frekans Kontrolü Uygulaması.....	60
4.1.1. PI Kontrolör kullanılarak yapılan yük frekans kontrolü uygulaması.....	62
4.1.2. Bulanık Mantık Kontrolör kullanılarak yapılan yük frekans kontrolü uygulaması.....	65
4.1.3. Kontrolörler arasında performans karşılaştırması.....	72
4.2. Dört Bölgeli Bir Güç Sisteminde Yük Frekans Kontrolü Uygulaması.....	76
4.2.1. PI Kontrolör kullanılarak yapılan yük frekans kontrolü uygulaması.....	78
4.2.2. Bulanık Mantık Kontrolör kullanılarak yapılan yük frekans kontrolü uygulaması.....	86
4.2.3. Kontrolörler arasında performans karşılaştırması.....	97
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	103
6. KAYNAKLAR .....	105

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Hız Regülatör Sisteminin Basitleştirilmiş Fonksiyonel Diyagramı.....	8
Şekil 3.2. Bir Generatör Ünitesinin İdealdeki Hız Regülasyon Karakteristiği .....	9
Şekil 3.3. Yük Artışı ( $\Delta P_L$ ) Öncesi, Sonrası ve İkincil Kontrol.....	11
Şekil 3.4. Sürekli-durum Geri Beslemeli Bir Hız Regülatörü Çevrimi .....	13
Şekil 3.5. a) Sürekli-Hal Geri Beslemeli Blok Diyagram.....	13
b) İndirgenmiş Blok Diyagram.....	13
Şekil 3.6. Hız-kayma karakteristikli regülatörün ideal sürekli-durum karakteristiği.	14
Şekil 3.7. Hız-yük ilişkisini ayarlayan yük-referans kontrolü blok diyagramı .....	15
Şekil 3.8. Hız regülatörünün hız-çıkış gücü karakteristiğine hız değiştirici servo motor ile gerçekleşen yük-referans ayarının etkisi .....	15
Şekil 3.9. Paralel üniteler arasında yük paylaşımı karakteristiği .....	18
Şekil 3.10. Sadece Ünite 1' in ikincil kontrole katılması durumunda üniteler arasında yükün paylaşımı .....	19
Şekil 3.11. Yük Frekans Kontrol Çevrimleri .....	20
Şekil 3.12. İkincil Kontrol Çevriminden Önceki, Çevrim Esnasındaki ve Sonrasındaki Hız ve Çıkış Gücü Karakteristiği .....	22
Şekil 3.13. Türbin-Generatör Sistemi Fiziksel Modeli .....	23
Şekil 3.14. Mekanik ve Elektriksel Güç ile Hız Değişikliği Arasındaki Transfer Fonksiyonu .....	27
Şekil 3.15. Hız ve Moment Arasındaki Transfer Fonksiyonu .....	27
Şekil 3.16. Dönen Kütle ve Yükün Blok Diyagramı .....	29
Şekil 3.17. İndirgenmiş Blok Diyagram .....	29
Şekil 3.18. Ön Isıtmasız Türbin Blok Diyagramı .....	30
Şekil 3.19. Türbin Matematiksel Modeli .....	30
Şekil 3.20. Buhar Türbini İçin Hız Regülatör Sisteminin Matematiksel Modeli .....	31
Şekil 3.21. Bağlantı Hattının Matematiksel Modeli.....	33
Şekil 3.22. Bir Güç Sisteminin Yük Frekans Kontrolüne Uygun Modeli .....	33
Şekil 3.23. İntegral Kontrolörlü Tek Bölge Bir Güç Sisteminin Yük Frekans Kontrol Diyagramı .....	36
Şekil 3.24. Çok Bölge Sistemlerde Her Bir Kontrol Bölgesi İçin AGC Mantiğı ....	40

Şekil 3.25. İki Bölge Bir Güç Sistemi İçin Yük Frekans Kontrol Çevrimi .....	42
Şekil 3.26. İki bölge bir sistem .....	46
Şekil 3.27. Basite indirgenmiş dinamik lineer veya dinamik non-lineer sistem Modeli .....	52
Şekil 3.28. Yeşil, Siyah ve Mavi Bulanık Renk Kümeleri.....	56
Şekil 3.29. Çeşitli Biçimde Üyelik Fonksiyonları .....	57
Şekil 3.30. Beş ayrı etiketli üyelik fonksiyonları örneği.....	58
Şekil 3.31. Bulanık Mantık Akış Diyagramı.....	59
Şekil 4.1. İki Bölge Bir Güç Sisteminde Yük Frekans Kontrolü Modeli .....	61
Şekil 4.2. i.Bölge İçin PI Kontrolör .....	62
Şekil 4.3. $K_p = 0.1$ ve $K_i = 0.5$ iken Sistem Cevabı ( $\Delta f_1$ ) .....	63
Şekil 4.4. $K_p = 0.1$ ve $K_i = 0.5$ iken Sistem Cevabı ( $\Delta f_2$ ) .....	63
Şekil 4.5. $K_p = 0.1$ ve $K_i = 0.5$ iken Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE}$ ) .....	64
Şekil 4.6. Önerilen Bulanık Mantık Kontrolör Yapısı Modeli.....	66
Şekil 4.7. Giriş Değişkeni ACE için Üyelik Fonksiyonları ( $K_{p,i}$ ) .....	67
Şekil 4.8. Giriş Değişkeni $\Delta ACE$ için Üyelik Fonksiyonları ( $K_{p,i}$ ).....	67
Şekil 4.9. Giriş Değişkeni ACE için Üyelik Fonksiyonları ( $K_{i,i}$ ).....	67
Şekil 4.10. Giriş Değişkeni $\Delta ACE$ için Üyelik Fonksiyonları ( $K_{i,i}$ ) .....	68
Şekil 4.11. i. Bölge için $K_{p,i}$ ve $K_{i,i}$ Sinyallerine ait Bulanık Mantık Kuralları Tablosu .....	68
Şekil 4.12. $K_{p,i}$ Çıkış Sinyali için Üyelik Fonksiyonları .....	69
Şekil 4.13. $K_{i,i}$ Çıkış Sinyali için Üyelik Fonksiyonları.....	70
Şekil 4.14. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta f_1$ ).....	70
Şekil 4.15. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta f_2$ ).....	71
Şekil 4.16. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE}$ ).....	71
Şekil 4.17. Daha Önceden Yapılmış Olan Çalışmaların Sonuçları ( $\Delta f_1$ ) .....	73
Şekil 4.18. Daha Önceden Yapılmış Olan Çalışmaların Yük Değişiminin %5' ini Temsil Eden Band Aralığına Oturma Zamanları .....	74
Şekil 4.19. Önerilen Kontrolör İçin Yük Değişiminin %5' ini Temsil Eden Band Aralığına Oturma Zamanı .....	75
Şekil 4.20. Dört Bölge Bir Güç Sisteminde Yük Frekans Kontrolü Modeli .....	77
Şekil 4.21. $K_p = 0.02$ , $K_i = 0.06$ ve $\Delta P_{LI} = 0.01$ pu iken Sistem Cevabı ( $\Delta f_1$ ) .....	78

Şekil 4.22. $K_p = 0.02$ , $K_i = 0.06$ ve $\Delta P_{LI} = 0.01$ pu iken Sistem Cevabı ( $\Delta f_2$ ) .....	79
Şekil 4.23. $K_p = 0.02$ , $K_i = 0.06$ ve $\Delta P_{LI} = 0.01$ pu iken Sistem Cevabı ( $\Delta f_3$ ) .....	79
Şekil 4.24. $K_p = 0.02$ , $K_i = 0.06$ ve $\Delta P_{LI} = 0.01$ pu iken Sistem Cevabı ( $\Delta f_4$ ) .....	80
Şekil 4.25. $K_p = 0.02$ , $K_i = 0.06$ ve $\Delta P_{LI} = 0.01$ pu iken Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE1}$ ).....	80
Şekil 4.26. $K_p = 0.02$ , $K_i = 0.06$ ve $\Delta P_{LI} = 0.01$ pu iken Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE2}$ ).....	81
Şekil 4.27. $K_p = 0.02$ , $K_i = 0.06$ ve $\Delta P_{LI} = 0.01$ pu iken Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE3}$ ).....	81
Şekil 4.28. $K_p = 0.02$ , $K_i = 0.06$ ve $\Delta P_{LI} = 0.01$ pu iken Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE4}$ ).....	82
Şekil 4.29. $K_p = 0.02$ , $K_i = 0.06$ , $\Delta P_{LI} = \Delta P_{L3} = 0.01$ pu ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ pu iken Sistem Cevabı ( $\Delta f_1$ ) .....	82
Şekil 4.30. $K_p = 0.02$ , $K_i = 0.06$ , $\Delta P_{LI} = \Delta P_{L3} = 0.01$ pu ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ pu iken Sistem Cevabı ( $\Delta f_2$ ) .....	83
Şekil 4.31. $K_p = 0.02$ , $K_i = 0.06$ , $\Delta P_{LI} = \Delta P_{L3} = 0.01$ pu ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ pu iken Sistem Cevabı ( $\Delta f_3$ ) .....	83
Şekil 4.32. $K_p = 0.02$ , $K_i = 0.06$ , $\Delta P_{LI} = \Delta P_{L3} = 0.01$ pu ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ pu iken Sistem Cevabı ( $\Delta f_4$ ) .....	84
Şekil 4.33. $K_p = 0.02$ , $K_i = 0.06$ , $\Delta P_{LI} = \Delta P_{L3} = 0.01$ pu ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ pu iken Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE1}$ ).....	84
Şekil 4.34. $K_p = 0.02$ , $K_i = 0.06$ , $\Delta P_{LI} = \Delta P_{L3} = 0.01$ pu ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ pu iken Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE2}$ ).....	85
Şekil 4.35. $K_p = 0.02$ , $K_i = 0.06$ , $\Delta P_{LI} = \Delta P_{L3} = 0.01$ pu ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ pu iken Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE3}$ ).....	85
Şekil 4.36. $K_p = 0.02$ , $K_i = 0.06$ , $\Delta P_{LI} = \Delta P_{L3} = 0.01$ pu ve $\Delta P_{L2} = -0.01$ pu iken Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE4}$ ).....	86
Şekil 4.37. Giriş Değişkeni ACE için Üyelik Fonksiyonları ( $K_{p,i}$ ) .....	86
Şekil 4.38. Giriş Değişkeni $\Delta ACE$ için Üyelik Fonksiyonları ( $K_{p,i}$ ).....	87
Şekil 4.39. $K_{p,i}$ Çıkış Sinyali için Üyelik Fonksiyonları .....	87
Şekil 4.40. Giriş Değişkeni ACE için Üyelik Fonksiyonları ( $K_{i,i}$ ).....	87
Şekil 4.41. Giriş Değişkeni $\Delta ACE$ için Üyelik Fonksiyonları ( $K_{i,i}$ ) .....	88
Şekil 4.42. $K_{i,i}$ Çıkış Sinyali için Üyelik Fonksiyonları.....	88
Şekil 4.43. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta f_1$ ).....	89
Şekil 4.44. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta f_2$ ).....	89
Şekil 4.45. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta f_3$ ).....	90

Şekil 4.46. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta f_4$ ).....	90
Şekil 4.47. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE1}$ ).....	91
Şekil 4.48. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE2}$ ).....	91
Şekil 4.49. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE3}$ ).....	92
Şekil 4.50. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE4}$ ).....	92
Şekil 4.51. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta f_1$ ).....	93
Şekil 4.52. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta f_2$ ).....	93
Şekil 4.53. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta f_3$ ).....	94
Şekil 4.54. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta f_4$ ).....	94
Şekil 4.55. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE1}$ ).....	95
Şekil 4.56. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE2}$ ).....	95
Şekil 4.57. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE3}$ ).....	96
Şekil 4.58. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE4}$ ).....	96
Şekil 4.59. Yapay Sinir Ağı Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı a) ( $\Delta f_1$ ) b) ( $\Delta f_2$ ) c) ( $\Delta f_3$ ) d) ( $\Delta f_4$ ).....	98
Şekil 4.60. Yapay Sinir Ağı Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı a) ( $\Delta P_{TIE1}$ ) b) ( $\Delta P_{TIE2}$ ) c) ( $\Delta P_{TIE3}$ ) d) ( $\Delta P_{TIE4}$ ).....	99
Şekil 4.61. Yapay Sinir Ağı Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı a) ( $\Delta f_1$ ) b) ( $\Delta f_2$ ) c) ( $\Delta f_3$ ) d) ( $\Delta f_4$ ).....	100
Şekil 4.62. Yapay Sinir Ağı Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı a) ( $\Delta P_{TIE1}$ ) b) ( $\Delta P_{TIE2}$ ) c) ( $\Delta P_{TIE3}$ ) d) ( $\Delta P_{TIE4}$ ).....	101

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. Bağlantı Hattı Yük Frekans Kontrolü .....	47
Tablo 3.2. $\Delta P_{L1}$ ' lik Bir Artışta Frekans ve Güçteki Değişim.....	47
Tablo 4.1. Farklı $K_p$ ve $K_i$ Değerleri İçin Sistemden Elde Edilen Sonuçlar.....	64
Tablo 4.2. Her İki Bölgede Birbirinden Farklı $K_p$ ve $K_i$ Kazanç Değerleri Uygulandığında Sistemden Elde Edilen Sonuçlar .....	65
Tablo 4.3. Sonuçlar ile İlgili Verilerin Karşılaştırılması.....	75

## SİMGELER

LFC : Yük frekans kontrolü

$\Delta P_{ref}$  : Yük referansı (MW)

$\Delta P_G, \Delta P_g$  : Hata sinyali, güç değişimi (MW)

$R_u$  : Bir Generatör Ünitesinin Hız Regülasyonu (Hz/MW)

$f_1$  : Yüksüz durumda frekans (Hz)

$f_2$  : Nominal güç çıkışında ( $P_{Gn}$ ) frekans (Hz)

$f_n$  : Nominal frekans (Hz)

$P_{Gn}$  : Generatör ünitesinin nominal çıkış gücü (MW)

$S_n$  : Megawatt baz değeri

$R$  : Hız regülasyonu veya hız kayması (Hz/MW)

$f_0$  : İlk frekans (Hz)

$P_G$  : İlk güç çıkışı (MW)

$\Delta P_L$  : Yük artışı (MW)

$P'_G$  : Yük artışından sonraki güç çıkışı (MW)

$f'$  : Yeni frekans (Hz)

$\Delta f$  : Frekans değişimi (Hz)

$\Delta w_R$  : Hız bozulması (Hz)

$\Delta P_v$  : Valf Pozisyonu (MW)

$X_D$  : Pilot valfin kuvvetlendiriciye giriş pozisyonu (MW)

$X_E$  : Pilot valfin kuvvetlendiriciye çıkış pozisyonu (MW)

$K_g$  : Açıklığa, silindir şekline ve akışkan basıncına bağlı sabit.

$\Delta X_C$  : Pozisyon Değişimi (MW)

$\Delta X_B$  : Pozisyon Değişimi (MW)

$R\%$  : Hız Regülasyonu % Değeri

$I_0, I_1, I_2$  : İkincil kontrol çevriminde önceki, çevrim esnasındaki ve sonrasındaki hız-  
çıkış gücü karakteristikleri (Hz/MW)

$w$  : Açısal hız

$\alpha$  : Açısal ivme

$\delta$  : Generatör faz açısı

$T_{net}$  : Makinedeki net ivmelendirme momenti

$T_m$  : Türbin tarafından makine üzerine uygulanan mekanik moment  
 $T_e$  : Generatör tarafından makine üzerine uygulanan elektriksel moment  
 $P_{net}$  : Net ivmelendirme gücü  
 $P_m$  : Mekanik giriş gücü  
 $I$  : Makinenin eylemsizlik momenti  
 $M$  : Makinenin açısal momentumu  
 $\Delta$  : Sapmalar  
 $H$  : Atalet sabiti (MW-sn/MVAr)  
 $\Delta P_D$  : Frekansa Duyarlı Yük Değişimi (MW)  
 $D$  : Yük Sönüm Sabiti (MW/Hz)  
 $\Delta \omega$  : Açısal Hızdaki Değişim (rad/sn)  
 $\Delta P_T$  : Türbin çıkış gücü (MW)  
 $G_T(s)$  : Türbin modeli transfer fonksiyonu  
 $T_T$  : Buhar türbini için türbin zaman sabiti (sn)  
 $G_G(s)$  : Hız regülatörü modeli transfer fonksiyonu  
 $T_g$  : Buhar türbini için hız regülatörü zaman sabiti (sn)  
 $V_1$  : 1.bölge hat sonu gerilimi  
 $V_2$  : 2.bölge hat sonu gerilimi  
 $X_{12}$  : 1 ve 2 bölgeleri arasındaki iletim hattının eşdeğer reaktansı  
 $\delta_1$  : 1.bölge hat sonu gerilimi faz açısı  
 $\delta_2$  : 2.bölge hat sonu gerilimi faz açısı  
 $T_{12}$  : Hattın senkronize edici moment katsayısı  
 $\Delta P_{hat12}$  : 1. ve 2. Hat arasındaki güç alışverişi değişimi (MW)  
 $\Delta f_i$  : i. Bölgedeki frekans değişimi (Hz)  
 $K_{pi}$  : i.bölgedeki generatörün transfer fonksiyonu kazancı (Hz/MW)  
 $T_{pi}$  : i.bölgedeki generatörün zaman sabiti (sn)  
 $G_P(s)$  : Güç sistemi modeli transfer fonksiyonu  
 $W_{kin}$  : Makinenin kinetik enerjisi  
 $\beta$  : Sistemin sıklığı (stiffness) (MW/Hz)  
ACE : Alan Kontrol Hatası  
 $K_I$  : İntegral sabiti  
 $K_P$  : Oransal sabit

$K_D$  : Türev sabiti  
 $K$  : Sistemin güç-frekans sabitesi  
 $f_D$  : İstenilen frekans  
 $f_A$  : Gerçekleşen (aktüel) frekans  
 $DNI_T$  : İstenilen net alışveriş  
 $ANI_T$  : Aktüel net alışveriş  
AGC : Otomatik Üretim Kontrolü  
EDC : Ekonomik Paylaşım Kontrolü  
PF : Katılma Faktörü  
 $a_{12}$  : İki bölge arasındaki transfer fonksiyonu  
 $P_{\gamma 1}$  : Birinci kontrol bölgesinin güç kapasitesi  
 $P_{\gamma 2}$  : İkinci kontrol bölgesinin güç kapasitesi  
 $P_{12}$  : Bağlantı hattı üzerindeki net değişim gücü (+ : çıkan güç, - : giren güç)  
 $P_{ind}$  : istenen net değişim değeri  
 $B_1$  ve  $B_2$  : 1. ve 2.bölgenin frekans yönelim faktörü  
GUI : Grafikselsel kullanıcı arayüzü  
FLC : Bulanık Mantık Kontrolör  
ANN : Yapay sinir ağı kontrolör  
 $T_i$  : integral zaman sabiti  
 $G_c(s)$  : PI kontrolörün transfer fonksiyonu  
 $U_i(t)$  : Kontrol vektörü  
 $K_{p,i}$  : i.bölge için oransal kazanç  
 $K_{i,i}$  : i.bölge için integral kazancı  
 $\Delta P_{TIEi}$  : i.bölge için bağlantı hattı yük akış değişimi (MW)  
 $\Delta ACE$  : Alan kontrol hatasının türevi (Hata Değişimi)  
NÇB : Negatif çok büyük  
NB : Negatif büyük  
NO : Negatif orta  
NK : Negatif küçük  
S : Sıfır  
PK : Pozitif küçük  
PO : Pozitif orta

PB : Pozitif büyük

PÇB : Pozitif çok büyük

$T_1, T_2, T_3$  : Hidrogovernör zaman sabitleri

$T_w$  : Su başlama zamanı

FGPI : Kazancı bulanık mantıkla bulunan PI kontrolör

## 1.GİRİŞ

Bir bölgenin veya bir ülkenin elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak üzere, o yerin bütün elektrik santralleri, trafo merkezleri ve aboneleri arasında kurulmuş olan sisteme enterkonnekte sistem adı verilir. Enterkonnekte sistemlerde santral türü farkı gözetilmediği gibi büyük küçük santral ayırımı da yapılmaz. Çok büyük veya önemli arızalar olmadığı sürece tüketim merkezleri bu sistemden kesintisiz enerji alabilirler. Enterkonnekte sistemlerin verimi yüksektir.

Bir enterkonnekte elektrik güç sisteminde büyüklü küçüklü bütün enerji üretim merkezleri sisteme ve dolayısıyla birbirlerine senkronize bir şekilde bağlıdır. Bu sebepten dolayı her biri aynı frekansa sahiptir. Aktif gücün kontrolü enterkonnekte güç sistemine bağlı generatör üretimlerinin değişen sistem frekansına duyarlı hale getirilmesi ile yerine getirilir (Özdemirci 2002).

Enterkonnekte güç sistemine bağlı generatörlerin çıkış güçlerinin tamamının, sistem yüküne tamamen eşit olması istenilen bir durum olmasına rağmen pratikte bu durumun herhangi bir anda olması çok zayıf bir ihtimaldir. Çünkü talep edilen güç sürekli değişme halindedir ve aniden artması ya da azalması söz konusudur. Eğer üretilen güç miktarı talep edilen güçten yüksek olursa sistemdeki generatör hızları artış eğiliminde olacaktır. Bu da frekansın artmasına sebep olacaktır. Tam tersi düşünülecek olursa; yani üretilen güç miktarı talep edilen güçten düşük olursa frekansın azalmasına sebep olacaktır. Bahsedildiği gibi frekans sabit kalması istenilen bir nicelik olmasına rağmen uygulamalarda sabit değildir ve değişebilir. Bu değişimler normal işleyişte küçüktür ve tüketicilere bariz bir etkisi yoktur. Ancak ani ve yüksek miktardaki değişimler zararlara yol açar (Weedy ve Cory 1998).

Frekans sürekli olarak standart duruma karşı kontrol edilir ve uzun süreli düşme ya da artma eğilimi gösterdiği durumlara dikkat edilir. Söz konusu üretim generatörlerinin çıkışları düzenlenerek duruma uygun müdahaleler yapılır. Bu güçlerin otomatik olarak kontrolü analog ya da dijital bilgisayar sistemleri tarafından

sürekli yük akışının hesaplanmasına dayalıdır. Generatörlerde üretilecek güç miktarı, daha önceki güç hareketlerine bağlı olarak yaklaşık tahmin edilip kararlaştırılmalıdır. Bahsedilen analizler ise gücün önceki yıllardaki aynı zaman periyotları içerisindeki kullanımının istatistiksel yaklaşımları ile yapılır. Hava tahminleri ve yakın zaman yük değerleri bu hesaplama dahil edilir. Tahmin edilen yük sisteme bağlı generatörler arasında paylaşılır.

Enterkonnekte güç sistemlerindeki frekans kontrol problemleri, tek alanlı güç sistemlerinin birçoğundan daha önemlidir. Çünkü güç sistemleri enterkonnekte şekilde komşu sistemlere bağlandıklarında herhangi birinde oluşacak bir yük frekans kontrol problemi ortak bir sorun haline gelir. Benzer şekilde enterkonnekte güç sistemlerini birbirine bağlayan bağlantı hatları üzerinden akan aktif gücü kontrol etme de ortak bir sorundur. Ancak “ karşılıklı yardımlaşma “ olarak özetlenebilecek olan önemli bir avantaj göz ardı edilemez (Zobi 1996). Büyük sistemlerdeki ani yük değişimleri sistemin yapısını çok fazla etkileyemez.

Güç sistemlerinde her alan kendi yük değişimlerini karşılayabilmek zorundadır. İki ya da daha fazla birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilen alana sahip bir enterkonnekte sistemde frekans kontrolüne ek olarak her bir alandaki üretim de kontrol edilmelidir. Çünkü bağlantı hatları üzerinden akan yükün belirlenmiş güç değişimlerini muhafaza etmek amacıyla kontrolü söz konusudur. Genel olarak yük frekans kontrolü kavramı şu şekilde tanımlanabilir. Güç sisteminde çalışma durumundaki bir değişiklik, frekansı ve önceden ayarlanan ara bağlantı hatları üzerindeki yük akışını değiştirir. Bunları yeniden nominal değerlerine geri getirme işlemine yük frekans kontrolü denir (Özdemirci 2002).

Bir güç sisteminin kararlı çalışabilmesi için frekans sabit kalmalıdır. Sabit frekansta çalışabilme ise güç dengesi durumunda söz konusu olur (Zobi 1996). Sistemde üretilen aktif gücün toplamı; sistem aktif yükleri, sistemdeki kayıplar ve sistemden bağlantı hatlarıyla başka bir sisteme akan güç toplamına eşit olmalıdır. Bahsedilen bu denge durumu bozulduğu zaman sistem frekansı da değişmeye başlar. Çok fazla üretim frekansı arttırırken, çok az üretim sistem frekansını azaltır.

Yapılan bu çalışmada öncelikli olarak yük frekans kontrolünün temelleri ve dinamikleri anlatılmıştır. Daha sonra bir güç sisteminde yük frekans kontrol uygulamasının simülasyonunu yapabilmek üzere güç sistemine ait dinamiklerin matematiksel modellemelerinden bahsedilmiştir. Bu matematiksel modellemeler birleştirilerek bir güç sistemi modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan güç sistemi modeline etki eden diğer unsurlar belirtilmiş ve çok kontrol bölgesi bir güç sistemi modelini temsilen önce iki bölgesi, sonra da dört bölgesi bir sistem üzerinde uygulamalar yapılmıştır. Yapılan uygulamalarda önce PI kontrolör kullanılmış ve PI kontrolöre ait farklı kazanç katsayılarının sonuçları karşılaştırılmıştır. Daha sonra bu çalışmada önerilen bulanık mantık kontrolörü kullanılmıştır. Bulanık mantık kontrolörünün kazancını belirleyen kavramlardan bahsedilmiş ve gerekli veriler ortaya konmuştur.

Çalışmanın sonucunda ise PI kontrolör ile bulanık mantık kontrolör arasında performans açısından karşılaştırma yapılmış ve elde edilen sonuçlar belirtilmiştir. Ayrıca aynı sistem parametrelerinin kullanıldığı daha önceki çalışmalarla, bu çalışmada elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak kıyas yapılmıştır.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Yük frekans probleminin öneminden ve bu problemin olabildiğince çabuk çözülebilmesinin gerekliliğinden dolayı bu konuda birçok çalışmalar yapılmıştır.

Chang C.S. ve Fu W., 1997 yılında yaptıkları çalışmada bir PI kontrolöründeki  $K_p$  ve  $K_i$  kazançlarının bulanık mantık yardımıyla bulunduğu bir kontrol sistemi tasarlamışlardır. (Chang ve Fu 1997)

Benzer şekilde, Kocaarslan İ. ve Çam E., 2004 ve 2005 yıllarında yaptıkları çalışmada bulanık mantıkla integral ve oransal kazanç katsayıları üreterek yük frekans kontrolü problemine çözüm getirmişlerdir. (Kocaarslan ve Çam 2004)

2002 yılında Demirören A. ve arkadaşları, çok bölgeli güç sistemlerinde yapay sinir ağı kontrolör ile otomatik üretim kontrolü uygulaması yapmışlardır. (Demirören ve ark. 2002)

1996 yılında Zobi C., yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında, yük frekans kontrolüyle ilgili temellerden bahsetmiştir. (Zobi 1996)

2002 yılında Özdemirci E., yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında, Türkiye Elektrik Güç Sisteminde yük frekans kontrolünü incelemiştir. (Özdemirci 2002)

2004 yılında Darçın O., yüksek lisans çalışmasında, güç sistemlerinde sinir ağı kontrol uygulaması yapmıştır. (Darçın 2004)

2000 yılında Akalın Kurt G., yapmış olduğu doktora çalışmasında  $K_p$  ve  $K_i$  kazançlarının elde edilmesinde bulanık mantık kontrolünü kullanmıştır ve Chang C.S. ve Fu W.'nin çalışmasıyla kıyas yapmıştır. (Akalın 2000)

El-Sherbiny ve arkadaşları 2001 yılındaki çalışmasında, biri hidroelektrik, biri termik olmak üzere iki bölgele bir güç sistemi modeli üzerinde çalışmış ve önerdiği bulanık mantık kontrolör ile klasik PI kontrolör arasında performans karşılaştırması yapmıştır. (El-Sherbiny ve ark. 2001)

Yeşil E. ve arkadaşları ise 2003 yılındaki çalışmasında yük frekans probleminin çözümü için PID tipi bulanık mantık kontrolör tasarlamış ve bu kontrolörü iki bölgele bir güç sistemi modeline uygulamıştır. (Yeşil ve ark. 2003)

Ghoshal S.P., çok bölgele güç sistemini temsilen üç kontrol bölgele bir güç sistemi modeli üzerinde çalışmalar yapmıştır. 2003 yılında yaptığı çalışmada önerdiği kontrolörde genetik algoritma kullanmıştır. (Ghoshal 2003)

Lee H.J. ve arkadaşları kararsız lineer olmayan güç sistemlerinde bulanık mantık yardımıyla yük frekans kontrolü işlemini yapabilme üzerine, 2006 yılında çalışmalar yapmıştır. (Lee ve ark. 2006)

Moon Young-Hyun ve arkadaşları, PID geri beslemeli bir sistemle güç sistemlerindeki yük frekans problemi üzerine çalışmalar yapmıştır. (Moon ve ark. 2001)

Tan W., Sui L., Xu Z., 2008 yılında yaptıkları çalışmada, güç sistemlerindeki yük frekans kontrolü için kontrolör tasarımı ve analizi yapmışlardır. (Tan ve ark. 2008)

Demirören A. ve Yeşil E., 2004 yılında yaptıkları çalışmada SMES üniteleri içeren güç sistemlerinde otomatik üretim kontrolünün bulanık mantıkla yapıldığı kontrolör tasarlamışlardır. (Demirören ve Yeşil 2004)

Çam E., 2006 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. (Çam 2006)

Papadopoulos D. P. ve Karnavas Y. L., tek bölgeli bir güç sistemi modeli üzerinde, bulanık mantık kontrolör ile yapay sinir ağı kontrolör kullanarak, 2002 yılında yük frekans kontrolü ile ilgili çalışma yapmıştır. (Papadopoulos ve Karnavas 2002)

Oysal Y. ve arkadaşları 2004 yılında, elektrik güç sistemlerinde dinamik bulanık ağ tabanlı bir yük frekans denetleyici tasarımı ile ilgili çalışma yapmışlardır. (Oysal ve ark. 2004)

### 3. MATERYAL VE METOT

#### 3.1. Yük Frekans Kontrolü

Yük frekans kontrolü (LFC – Load Frequency Control) kavramı, güç sistemlerinin nominal çalışma şartlarındaki değişiklikler sonucu artan ya da azalan sistem frekansının ve birbirine bağlı hatlardaki güç akşının yeniden nominal değerlerine getirilmesi olarak tanımlanabilir. Generatör hızı, rotorun hızı ile belirlendiği için frekansın kontrolü, generatör türbin hızının kontrolüne eşdeğer bir kavramdır (Darçın 2004).

Yük frekans kontrolünün birinci görevi, frekansı belirli bir nominal değere ayarlamak ve seçilmiş generatörlerin aktif gücünü değiştirerek istenen değerlerde, kontrol alanları arasında güç alışverişini sağlamaktır. İkinci görevi ise, çalışma maliyetlerini minimum yapmak için üretimdeki gerekli değişimi birimler arasında paylaşmaktır.

Temel olarak; güç sistemlerindeki kontrol bölgelerinde, yük frekans kontrol çevriminin rolü; aynı kontrol bölgesi içindeki bir ya da birkaç generatör ünitesinin aktif güç çıkışını ve frekansını kontrol etmektir.

Tüm üretim kaynakları yük frekans kontrolüne iştirak ederlerse bu durumda sistem performansı mükemmelere yakın olabilir. Yük frekans kontrolü sistemleri nedeniyle oluşan ilave maliyetler, sistem performansını yükseltmek suretiyle kabul edilebilir limitlere getirilebilir (Özdemirci 2002).

##### 3.1.1. Yük frekans kontrolünde hız regülasyonu

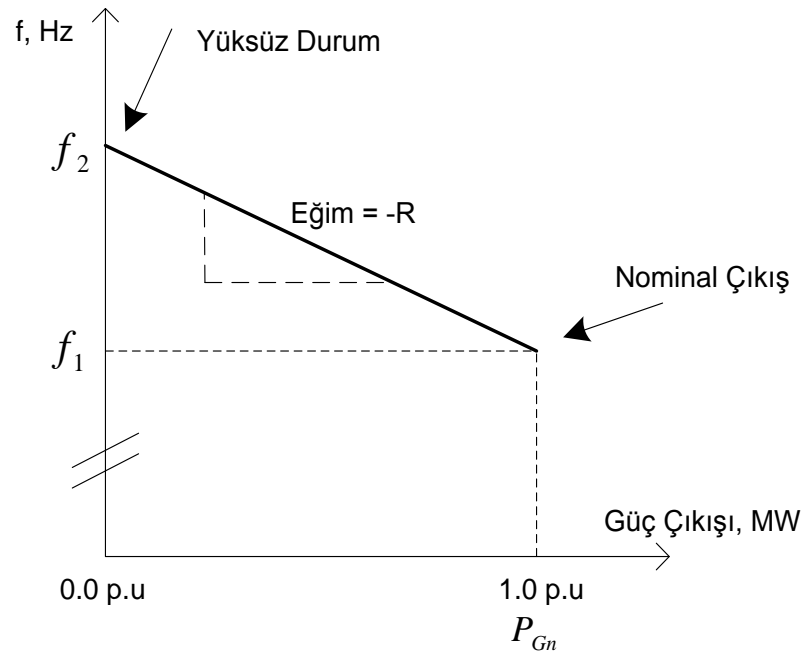
Yük frekans kontrolü kavramından anlaşıldığı üzere, sürekli değişen sistem yüküne üretilen gücün adapte edilmesi gerekmektedir. Bu işleme *hız regülasyonu* adı verilir. Hız regülasyonu iki şekilde olur:



Temelde hız regülatörü, mil hızını bir pozisyon çıkışına çeviren mekanik bir çeviricidir. Hız regülatörü çıkışı, hız değıştiricinin pozisyonu ile belirlenen bir hız-yük referansı ( $\Delta P_{ref}$ ) ile karşılaştırılır. Hata sinyali ( $\Delta P_g$ ), kontrol valfini kontrol etmek için kullanılır.

$$\Delta P_g = \Delta P_{ref} - \frac{1}{R} \Delta f \quad (MW) \quad (3.1)$$

Hız regülatörünün idealde hız-güç çıkışı ayar karakteristiğı Şekil 3.2' de olduğu gibi doğrusaldır. Bir generatör ünitesinin hız regülasyonu ( $R_u$ ); ünite çıkışındaki nominal gücün, 1.00 p.u' den 0.00 p.u' e azaltıldığında, per-unit cinsinde açıklanan nominal hızın değışimi olarak açıklanabilir. Frekans eksenini ve çıkış gücü eksenini nominal değerlerine bağılı olarak per-unit cinsinden ölçeklendirildiğinde, per-unit hız regülasyonu; hız-çıkış gücü karakteristiğinin eğiminin genliğidir (Akalin 2000).



Şekil 3.2. Bir Generatör Ünitesinin İdealdeki Hız Regülasyon Karakteristiğı (Akalin 2000)

Şekil 3.2' de per-unit cinsinden hız regülasyonu,  $R_u$  şu şekilde verilebilir:

$$R_u = \frac{(f_2 - f_1)/f_n}{P_{Gn}/S_n} \quad \text{per - unit} \quad (3.2)$$

Burada;

$f_1$ =Yüksüz durumda frekans (Hz)

$f_2$ =Nominal güç çıkışında ( $P_{Gn}$ ) frekans (Hz)

$f_n$ =Nominal frekans (Hz)

$P_{Gn}$ =Generatör ünitesinin nominal çıkış gücü (MW)

$S_n$ =Megawatt baz değeri

dir.

Eşitliğin her iki tarafı ( $f_n / S_n$ ) ile çarpılır ise;

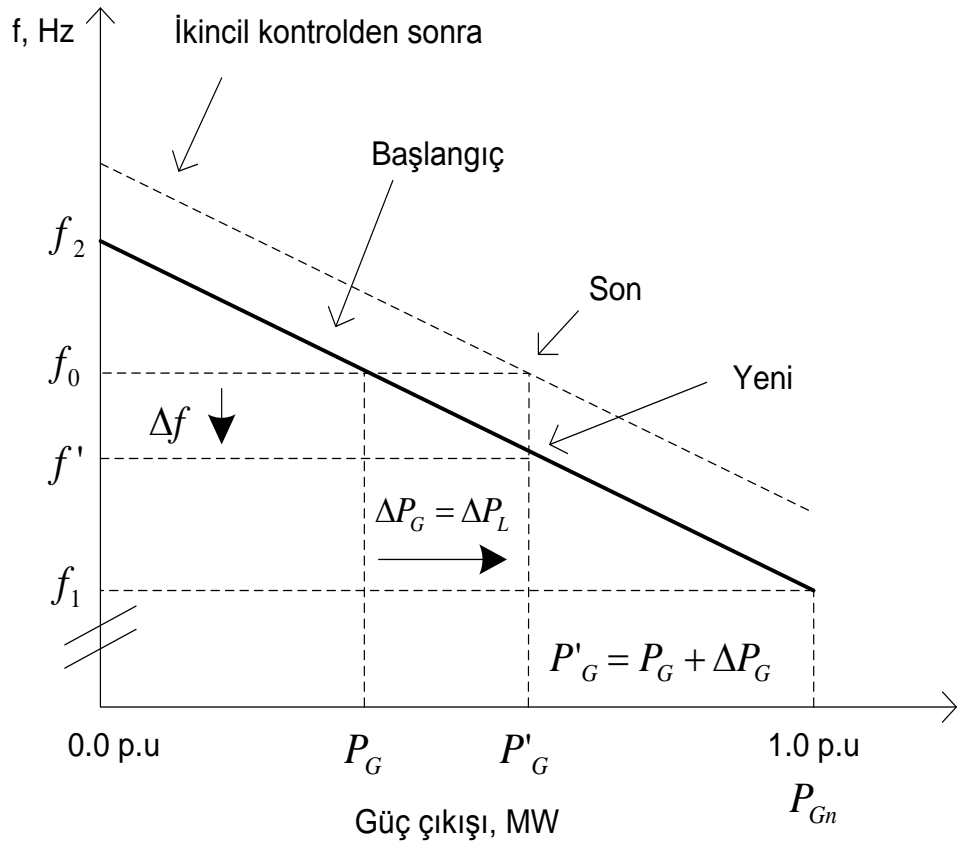
$$R = R_u \frac{f_n}{S_n} = \frac{f_2 - f_1}{P_{Gn}} \quad (\text{Hz/MW}) \quad (3.3)$$

elde edilir. Burada,  $R$  ifadesi hız ayar karakteristiğinin eğiminin (Hz/MW) genliğidir.

Şekil 3.3' te görüldüğü gibi  $f_0$  frekansında ünitenin sağladığı güç çıkışı  $P_G$  iken yük artışı  $\Delta P_L$  olduğundan  $P'_G = P_G + \Delta P_L$  olur. Bu durumda ünitenin hızı azalır ve hız regülatörü ile kazandan türbine daha fazla buharın alınmasına izin verilir.

Yeni frekansta ( $f' = f_0 + \Delta f$ ), üretilen ve tüketilen güçler arasında eşitlik olur. Denklem (3.3)' te verilen hız-çıkış gücü karakteristiğinin eğimine göre frekans değişikliği şöyle ifade edilir (Akalin 2000):

$$\Delta f = -R \cdot \Delta P_G = - \left( R_u \frac{f_n}{S_n} \right) \Delta P_G \quad (\text{Hz}) \quad (3.4)$$



Şekil 3.3. Yük Artışı ( $\Delta P_L$ ) Öncesi, Sonrası ve İkincil Kontrol (Akalin 2000)

$R$  değeri üretim ünitesinin hız-çıkış gücü karakteristiğini belirler.  $R$ ; hız bozulması ( $\Delta w_R$ ) veya frekans bozulması ( $\Delta f$ )' in, valf pozisyonu ( $\Delta P_v$ ) veya güç değişimi ( $\Delta P_g$ )' ye oranına eşittir.  $R$ , hız regülasyonu veya hız kayması olarak da tanımlanır. Birimi Hz/MW tır.

Hız regülatörünün düzeneği buhar valfini kontrol etmek için gereken kuvveti geliştiremez. Bu nedenle hız regülasyon sinyalini düzeltmek için hız yol verici olarak nitelendirilen bir pilot valf veya hidrolik kuvvetlendirici kullanılır. Pilot valfin bu kuvvetlendiriciye giriş pozisyonu  $X_D$  ve çıkış pozisyonu  $X_E$ ' dir. Pilot valfteki değişim  $\Delta X_D$  ise:

$$\Delta X_D = \Delta P_g - \Delta P_V \quad (MW) \quad (3.5)$$

$$\Delta P_V = K_g \int \Delta X_D dt \quad (3.6)$$

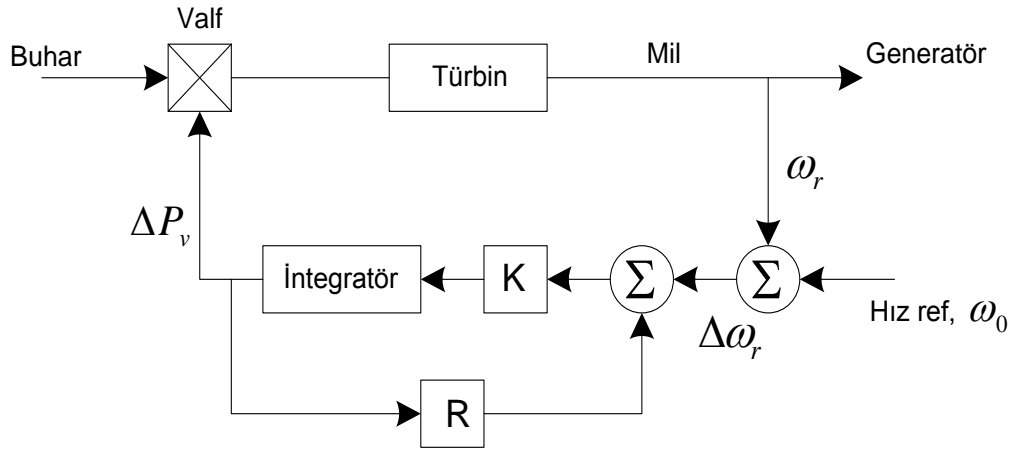
olup, pozitif bir değer olan  $K_g$  sabiti; açıklığa, silindir şekline ve akışkan basıncına bağlıdır. Burada pilot vananın pozisyonu 3 yolla değiştirilebilir:

1. Direkt olarak, hız değiştiricinin A noktasındaki küçük bir hareketi ve referans güç ayarı  $\Delta P_{ref}$ ' in değişmesiyle,
2. Endirekt olarak, ana pistonun durum değiştirmesinin sebep olduğu geri beslemeyle,
3. Yine endirekt olarak, hız değişimi sonucunda B noktasının durum değiştirmesinin sebep olduğu geri beslemeyle (Darçın 2004).

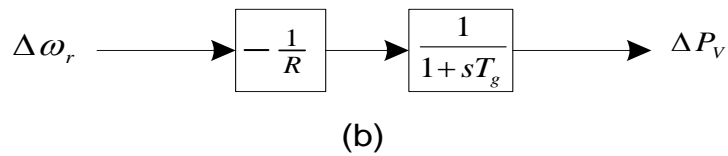
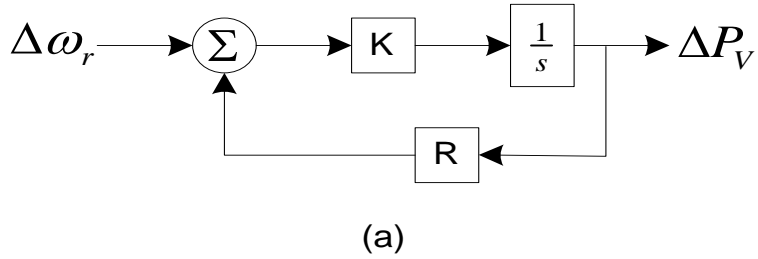
A' dan E' ye kadar olan bağlantı noktalarında ölçümler milimetre cinsindedir. Kullanılan büyüklükler ise güç artışı olduğundan Megawatt olacaktır. Şekil 3.1' de gösterilen ok yönleri ise hareketlerin frekans farkının pozitif olduğu durumu göstermektedir. Hata sinyali, yani regülatör çıkışı olan  $\Delta P_g$ ,  $\Delta X_C$ ' deki pozisyon değişimi ile ölçülür. Regülatörün iki girişi vardır. Bunlar  $\Delta P_{ref}$  ve  $\Delta X_B$ ' deki pozisyon değişimi olan  $\Delta f$  (generatör frekans değişimi)' tir.

Regülatörün çalışması örneklenirse; üretilen gücün talep edilen güçten az olması durumu incelenir. Böyle bir durumda frekans azalacaktır ve böylece generatörün yavaş olduğu ve hızlanması gerektiği durumu ortaya çıkacaktır. Hız değiştirici hızın artması için aşağı (A noktası) gidecektir. B noktası da frekanstaki azalmadan dolayı aşağı gidecektir. Regülatör çıkışı C noktası yukarı, pilot vana girişi D noktası yukarı ve ana piston yani E noktası aşağı inecektir. Kontrol vanası aşağı inince buhar girişi artacağından türbin daha hızlı dönecek ve generatör hızlanarak frekansı tekrar istenilen değere getirecektir. Böylece birincil kontrol tamamlanacaktır. Sistemin yeni çıkış gücüne göre sistemi tekrar istenen frekans değerinde çalıştırmak ve üretimin kinetik enerjisini arttırmak için regülatör yük-frekans ayarı yapılarak ikincil kontrol de gerçekleştirilir (Darçın 2004).

Şekil 3.2' de verilen karakteristik Şekil 3.4' te verilen çevrim ile elde edilir. Şekil 3.5' te ise bu çevrimin blok diyagramı ile indirgenmiş blok diyagramı verilmiştir. Şekil 3.5' teki indirgenmiş blok diyagramında da görüldüğü gibi hız regülatörü, oransal kontrolör gibi temsil edilebilir (Akalin 2000).



Şekil 3.4. Sürekli-durum Geri Beslemeli Bir Hız Regülatörü Çevrimi



$$T_g = \frac{1}{KR}$$

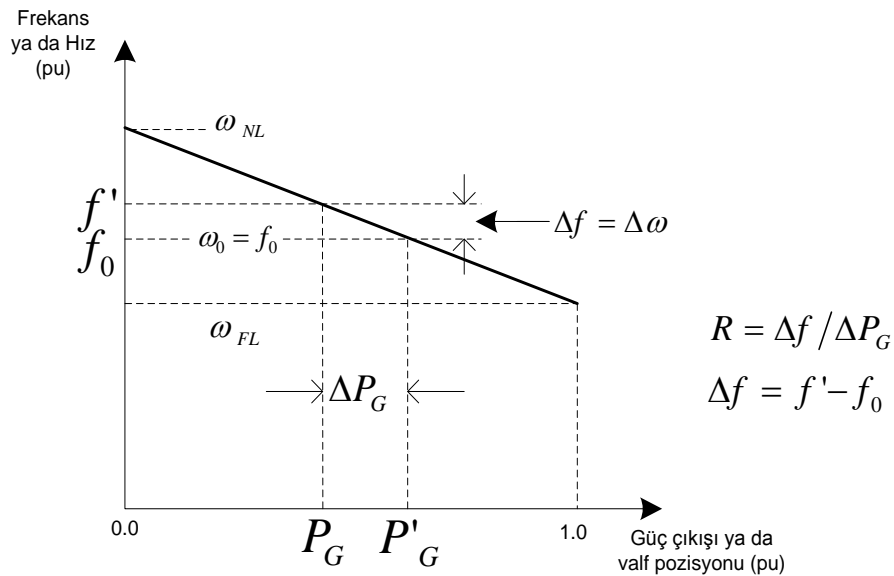
Şekil 3.5. a) Sürekli-Hal Geri Beslemeli Blok Diyagram  
b) İndirgenmiş Blok Diyagram

$R$  parametresinin; hız bozulmasının ( $\Delta\omega_R$ ) ya da frekans bozulmasının ( $\Delta f$ ), valf pozisyonu ( $\Delta P_v$ ) ya da çıkış gücündeki değişime ( $\Delta P_g$ ) oranı ile ifade edildiği daha önceden belirtilmişti. Buna göre  $R$  parametresi yüzde değer olarak şu şekilde açıklanabilir:

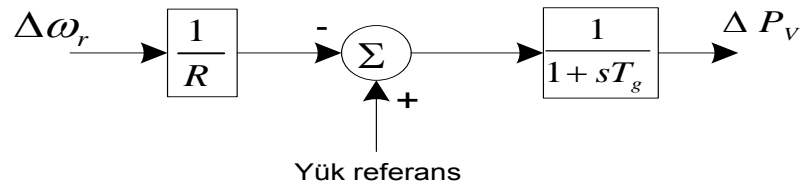
$$R\% = \frac{\text{Hız ya da Frekans değişiminin yüzde değeri}}{\text{Güç çıkışındaki değişimin yüzde değeri}} * 100 \quad (3.7)$$

Örneğin; %5 regülasyon oranı; %5' lik bir frekans bozulmasının, valf pozisyonunda ya da güç çıkışında %100' lük bir değişikliğe sebep olacağı anlamını taşır.

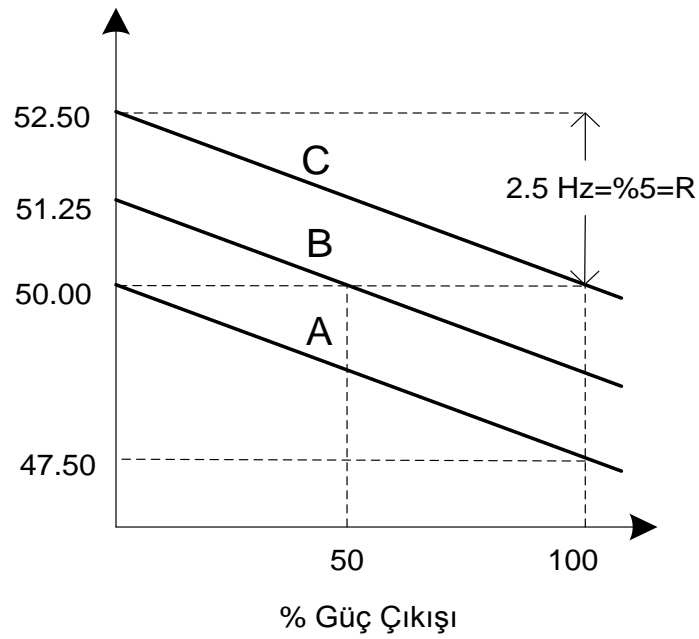
$R$  değeri; Şekil 3.6' da görüldüğü gibi üretim ünitesinin hız-çıkış gücü karakteristiğini belirler. Hız ile çıkış gücü (yük) arasındaki ilişki Şekil 3.7' de görüldüğü gibi yük referans değeri olarak adlandırılan bir giriş değerinin değişmesiyle ayarlanabilir. Bu ayarlama bir hız değiştirici servo-motor aracılığı ile yapılır. Hız regülatörünün yük referans ayarının etkisi Şekil 3.8' deki karakteristikte verilmiştir (Akalin 2000).



Şekil 3.6. Hız-kayma karakteristikli regülatörün ideal sürekli-durum karakteristiği



Şekil 3.7. Hız-yük ilişkisini ayarlayan yük-referans kontrolü blok diyagramı



Şekil 3.8. Hız regülatörünün hız-çıkış gücü karakteristiğine hız değiştirici servomotor ile gerçekleşen yük-referans ayarının etkisi

Şekil 3.8' de üç değişik yük-frekans değeri ayarı için üç paralel karakteristik ailesi görülmektedir. Örneğin; 50 Hz' de A karakteristik eğrisi %0 güç akışı sonucunu verirken, B karakteristik eğrisi %50 güç akışı sağlar. C karakteristiği ise %100 güç akışı sonucunu verir (Akalın 2000).

Yük değişiminin meydana gelmesi ile sistemin yeni işleyiş koşullarının oluşması arasında gecikme oluşabilir. Bunun nedeni yalnızca regülatör

mekanizmasındaki sürtünmeler ve mekanik tepkiler değildir. Aynı zamanda su ve buhar akışının rotoru yeni hıza erdirtirebilmek için artması veya azalmasıdır. Her artış ya da azalış rotor hızını etkiler. Bu da zaman gecikmesine yol açar. Akışı söz konusu olan buhar ya da sıvının türbine ulaşmasından önce türbin sistemi ani durumlar için normal işleyiş esnasında belirli miktarda su ya da buhar rezervi bulundurur. Akış gerçekleşinceye kadar ihtiyacı rezervden sağlar.

### 3.1.2. Paralel üniteler arasında yükün paylaşımı

İki ya da daha fazla üretim ünitesinin paralel işletildiği durumlarda, kayma karakteristiği; tek bir genel frekans oluşacak şekilde, yükün üniteler arasında kapasiteleri oranınca paylaşılmasını sağlar.

K adet üretim ünitesinin verilen frekansta senkronize işletildiğinde  $\Delta P_L$  megawatt kadar yük değişikliğinin olduğunu düşünelim. Başlangıçtaki hız regülasyon aksiyonundan sonraki sürekli-durum eşitliğinde bütün ünitelerin frekans artış miktarı  $\Delta f$  Hz olacak şekilde değişecektir. Değişikliğe cevap olarak ünite çıkışları şu şekildedir:

Ünite 1 için;

$$\Delta P_{G1} = -\frac{S_{n1}}{R_{1u}} * \frac{\Delta f}{f_n} \quad (MW)$$

.....

Ünite i için;

$$\Delta P_{Gi} = -\frac{S_{ni}}{R_{iu}} * \frac{\Delta f}{f_n} \quad (MW)$$

Ünite k için;

$$\Delta P_{Gk} = -\frac{S_{nk}}{R_{ku}} * \frac{\Delta f}{f_n} \quad (MW)$$

(3.8)

Bu eşitliklerin birbirine eklenmesi ile güç çıkışındaki toplam değişiklik şu şekilde elde edilir:

$$\Delta P_L = - \left( \frac{S_{n1}}{R_{1u}} + \dots + \frac{S_{ni}}{R_{iu}} + \dots + \frac{S_{nk}}{R_{ku}} \right) \frac{\Delta f}{f_n} \quad (3.9)$$

Buradan frekans değışikliği:

$$\frac{\Delta f}{f_n} = - \frac{\Delta P_L}{\left( \frac{S_{n1}}{R_{1u}} + \dots + \frac{S_{ni}}{R_{iu}} + \dots + \frac{S_{nk}}{R_{ku}} \right)} \quad \text{per - unit} \quad (3.10)$$

olarak bulunur. Denklem 3.10, Denklem 3.8' de yerine konulduğunda ünite i için ilave güç çıkışı ( $\Delta P_{Gi}$ ) hesaplanır.

$$\Delta P_{Gi} = - \frac{S_{ni}/R_{iu}}{\left( \frac{S_{n1}}{R_{1u}} + \dots + \frac{S_{ni}}{R_{iu}} + \dots + \frac{S_{nk}}{R_{ku}} \right)} \Delta P_L \quad MW \quad (3.11)$$

Şekil 3.9' da gösterilen kayma karakteristiklerine sahip iki ünite başlangıçta  $P_{G1}$  ve  $P_{G2}$  gücünde ve nominal frekansta ( $f_0$ ) işletildiği düşünülür ise; yükte  $\Delta P_L$  kadar bir artış söz konusu olduğunda, ünitelerin hızı düşecektir. Hız regülatörleri çıkışlarını yeni işletme frekansına gelinceye kadar arttıracaklardır. Her ünitenin kaldıracağı yük miktarı kayma karakteristiğine bağlıdır (Akalin 2000).

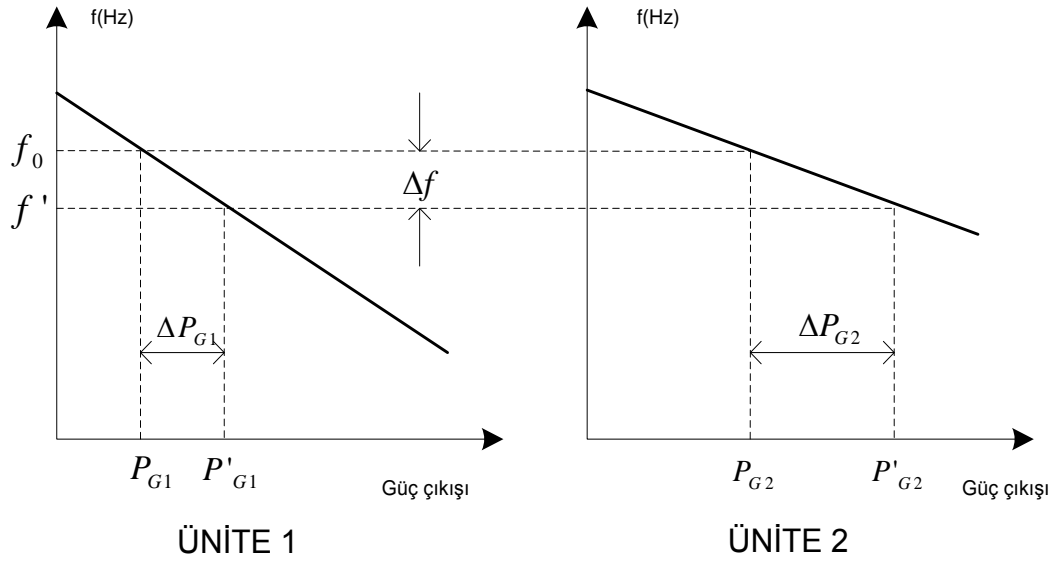
$$\Delta P_{G1} = P'_{G1} - P_{G1} = \frac{\Delta f}{R_1} \quad (3.12)$$

$$\Delta P_{G2} = P'_{G2} - P_{G2} = \frac{\Delta f}{R_2} \quad (3.13)$$

Böylece denklem 3.12 ve denklem 3.13' den;

$$\frac{\Delta P_{G1}}{\Delta P_{G2}} = \frac{R_2}{R_1} \quad (3.14)$$

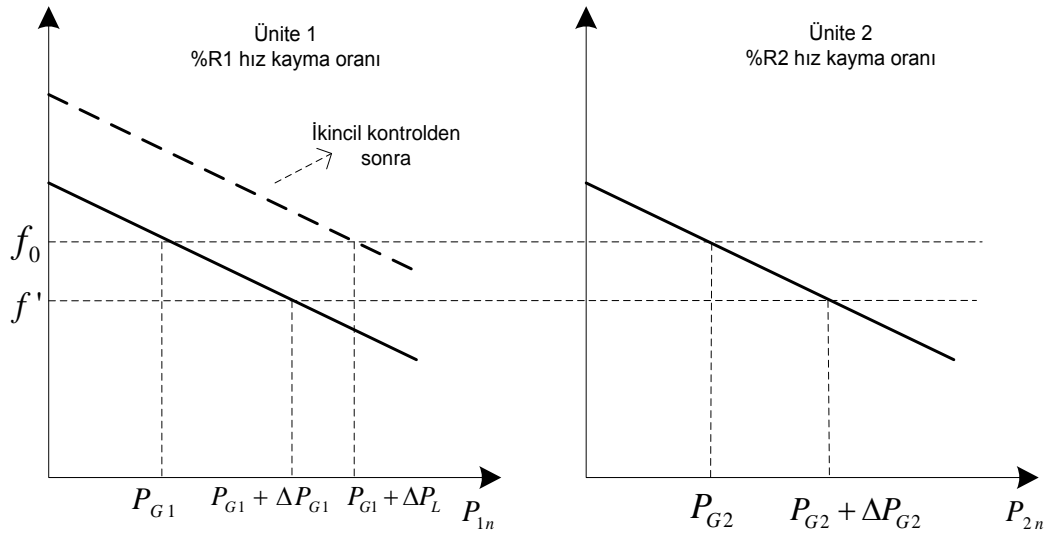
olduğu görülebilir.



Şekil 3.9. Paralel üniteler arasında yük paylaşımı karakteristiği (Akalin 2000)

Yük değişikliğinin olduğu bölgede, üniteler senkronize olarak yeni sistem frekansı ile çalışmaya devam ederler. “Düşür” ya da “Yükselt” sinyalleri, o bölgedeki güç santrallerinde seçilmiş ya da bütün hız değiştiricilere gönderilir. Hız regülatörlerinin yük referans ayarlarının koordineli kontrolü ile sistem bütün üniteleri arzu edilen  $f_0$  frekansına geri getirmek ve üretim ünitelerinin kapasitelerine göre istenilen yük paylaşımını sağlamak mümkündür. Böylece ikincil frekans kontrolü gerçekleştirilir.

Şekil 3.10’ da gösterilen sistemde, kayma karakteristikli hız regülatörüne sahip iki ünite başlangıçta  $P_{G1}$  ve  $P_{G2}$  gücünde ve nominal frekansta işletildiği düşünülürse; yükte  $\Delta P_L$  kadar bir artış olduğunda ünitelerin hızı düşecektir. Hız regülatörleri çıkışlarını yeni işletme frekansına gelinceye kadar artırırlar. Sadece Ünite 1’ in ikincil kontrole katıldığı düşünülecek olursa, Ünite 1’ in yük referans ayarı değiştirilerek yük artışını üzerine alması ile birlikte sistem yeniden nominal frekansta işletilmeye başlanır (Akalin 2000).

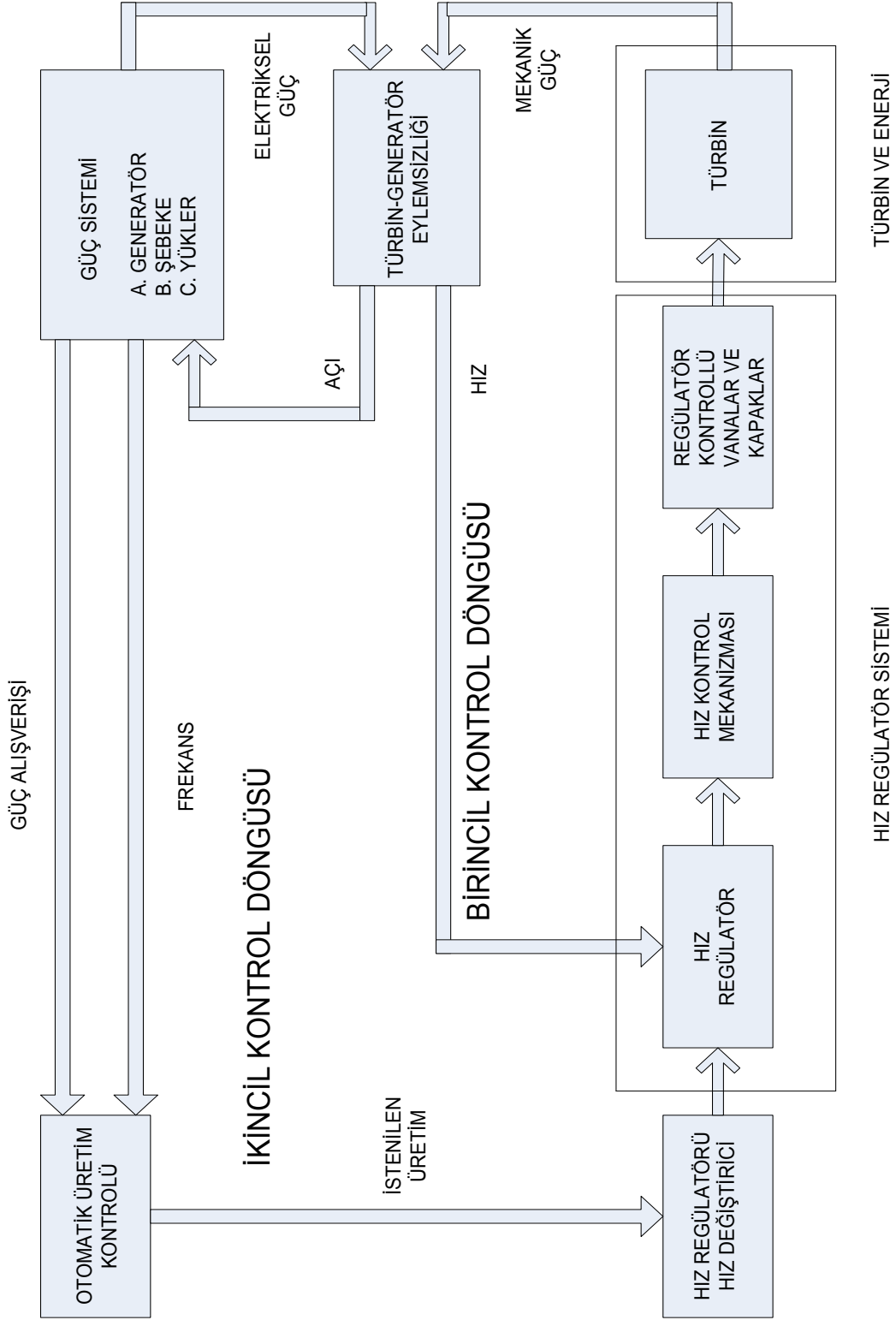


Şekil 3.10. Sadece Ünite 1' in ikincil kontrole katılması durumunda üniteler arasında yükün paylaşımı (Akalin 2000)

### 3.1.3. Birincil ve ikincil kontrol çevrimleri

Enterkonnekte güç sistemlerinde regülasyon işlemi Şekil 3.11' de de görüldüğü üzere birincil kontrol çevrimi ve ikincil kontrol çevrimi olmak üzere ikiye ayrılır.

Birincil kontrol çevrimi ile; herhangi bir nedenle güç dengesinin bozulması sırasında frekans saptmalarını kabul edilebilir sınırlar içinde tutulmasını sağlayarak frekansın kararlılığı sağlanır. Birincil kontrol çevrimi bir ile birkaç saniye içerisinde sisteme cevap verdiği için oldukça hızlı olduğu söylenebilir. Her bir güç sistemindeki üretim merkezlerinde birincil kontrol çevrimini sağlayan hız regülatör sistemleri mevcuttur. Bu çevrimde, hız regülatörleri doğrudan etkilidir ve üretimin regüle edilmesiyle frekans değişimine bağlı olarak sistem yükünün değişmesini sağlarlar. Birincil kontrol çevrimi ya da regülasyonu sonrasında sistemin üretim tüketim dengesi sağlanmış olur. Fakat bu dengeleme neticesinde sistem frekansı nominal değerinden saptmıştır (Wood ve Wollenberg 1996).



Şekil 3.11. Yük Frekans Kontrol Çevrimleri (Wood ve Wollenberg 1996)

Birincil kontrol çevriminde belli sınırlar içerisinde kontrol altına alınan sorunlar, ikincil kontrol çevrimi ile istenilen optimum seviyeye getirilir. Frekansın istenilen nominal değerine restorasyonu sağlanır. Ayrıca; seçilmiş generatörlerin aktif güç çıkışları değiştirilerek kontrol bölgeleri arasındaki istenilen güç alışverişi sağlanır. Yani, santral üretimleri yeniden ayarlanır. İkincil kontrol çevriminin cevap yeteneği birincil kontrol çevrimine göre yavaştır. 10-30 dakika arasında değişebilir.

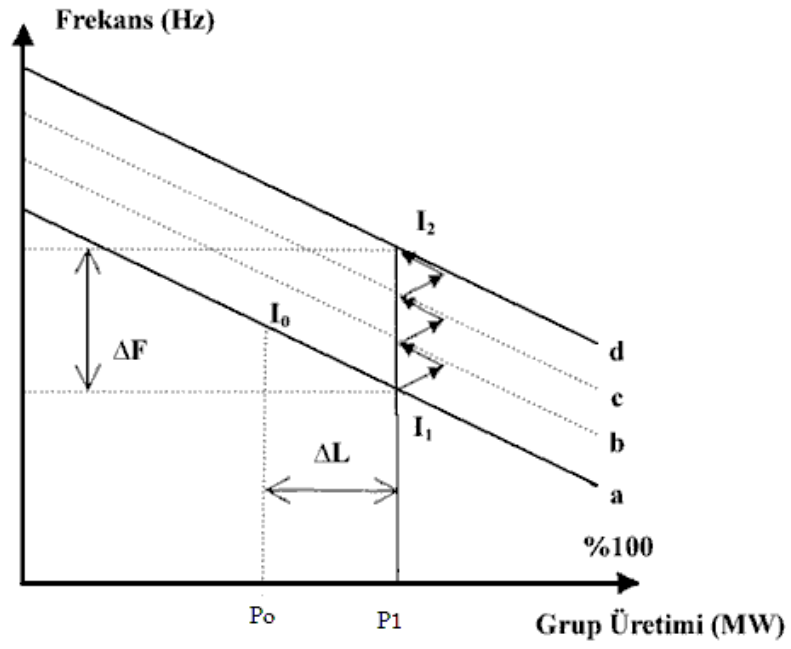
Genel olarak birincil kontrol çevrimi probleme acil ve geçici bir müdahale iken, ikincil kontrol çevrimi tam anlamıyla bir müdahaledir denilebilir.

Tamamlayıcı kontrol olarak da isimlendirilen ikincil kontrol çevriminin görevi hız regülatörlerinin eğilimli karakteristiklerinden dolayı meydana gelen frekans kaymalarını düzeltmek, diğer güç sistemleri ile bağlantı hatları üzerindeki güç akışını anlaşmalar çerçevesinde ayarlamak ve hız regülatörlerinin doğal davranışları sonucu grupların paylaştıkları yükü, ekonomi ve emniyet kriterlerine göre gruplar arasında yeniden düzenlemektir (Özdemirci 2002).

İkincil kontrol çevrimi, üretim ayar ( hız – üretim ) karakteristiğini kaydırarak elde edilir. Var olan yük şartlarında her ikincil kontrol çevrimi adımını bir hız ayarı takip eder. Çünkü mevcut uygulamalarda, hız ayarı ikincil kontrol çevriminden çok daha hızlıdır. Herhangi bir yük değişiminde ikincil kontrol çevrimi başlamadan önce, sistem yeni yük değerine kararlı duruma erişmiş olur. Yani toplam yük ile toplam üretim eşitlenmiş olur.

Şekil 3.12' de a eğrisi, ikincil kontrol çevrimi başlamadan önceki hız ayar karakteristiği, b ve c eğrileri ikincil kontrol çevrimi esnasındaki hız ayar karakteristiği, d eğrisi ise ikincil kontrol çevrimi tamamlandıktan sonra oluşan yeni hız ayar karakteristiğidir.

Sıfır yük karakteristikli yük değişiminde, sistem frekansı 50 Hz seviyesine erişinceye kadar şematik olarak şekilde gösterildiği gibi üretim geçici olarak yükü geçer, sonra hız regülatörü ile denge sağlanır (Özdemirci 2002).

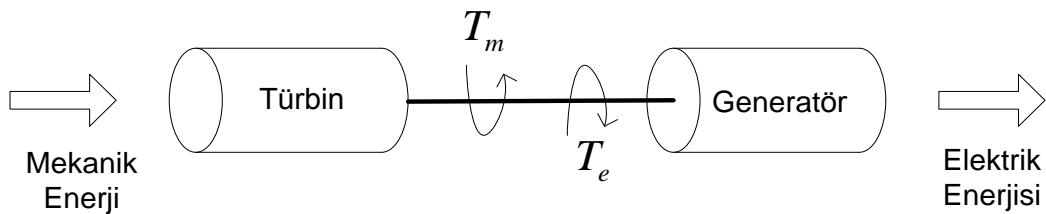


Şekil 3.12. İkincil Kontrol Çevriminden Önceki, Çevrim Esnasındaki ve Sonrasındaki Hız ve Çıkış Gücü Karakteristiği (Özdemirci 2002)

### 3.1.4. Güç sistemine ait birimlerin yük frekans kontrolüne uygun olarak modellenmesi

Güç sisteminin kontrolünü gerçekleştirebilmek için sistemdeki her elemanın çalışma dinamiğini anlamak gerekmektedir. Yük-frekans kontrolü ile ilgili yapılan bu çalışmada kullanılacak olan temel elemanların bilgisayar simülasyonunda kullanılabilecek şekilde matematiksel olarak modellenmesi gereklidir. Bu şekilde güç sistemleri bilgisayar ortamında incelenebilecek hale dönüştürülüp yük-frekans kontrolünün sistemdeki davranışı gözlemlenecektir.

#### 3.1.4.1. Generatör modeli



Şekil 3.13. Türbin-Generatör Sistemi Fiziksel Modeli (Özdemirci 2002)

Bir buhar türbini ile tahrik edilen generatör, dönmeye etki eden iki zıt momentli bir büyük dönen kütle gibi temsil edilebilir. Mekaniksel moment ( $T_m$ ), dönüş hızının artmasını sağlarken, elektriksel moment ( $T_e$ ), buna zıt yönde etki ederek azalmasını sağlar.  $T_m$  ve  $T_e$  büyüklük olarak eşit olduğu zaman dönüş hızı, ( $w=w_0$ ) sabit olur. Elektriksel yük arttırılırsa ( $T_e > T_m$ ) tüm dönen sistem yavaşlamaya başlar. Çok fazla yavaşlaması sisteme zarar vereceğinden dengeyi sağlamak için mekanik momenti arttırmak amacıyla bir şeyler yapılmalıdır. Bu, dönüş hızını kabul edilebilir bir değere geri getirmek ve hız tekrar sabit kalacak şekilde momentlerin eşitliğini sağlamak ile mümkündür. Bu işlem güç sistemlerinde sürekli olarak tekrarlanır, çünkü yükler sürekli olarak değişir. Aşağıda yapılan bazı tanımlamalar ışığında generatör modeli oluşturulacaktır (Wood ve Wollenberg 1996).

$w$  = Açısal hız

$\alpha$  = Açısal ivme

$\delta$  = Generatör faz açısı

$T_{net}$  = Makinedeki net ivmelendirme momenti

$T_m$  = Türbin tarafından makine üzerine uygulanan mekanik moment

$T_e$  = Generatör tarafından makine üzerine uygulanan elektriksel moment

$P_{net}$  = Net ivmelendirme gücü

$P_m$  = Mekanik giriş gücü

$I$  = Makinenin eylemsizlik momenti

$M$  = Makinenin açısal momentumu

Generatör modeli oluşturulurken faz açısı hariç tüm büyüklükler makine temel değerleri cinsinden per-unit değerde alınıp, sürekli halde büyüklüklerin türevi ile ilgilenilecektir. Tüm sürekli hal ya da nominal durum değerleri “0” indisıyla ve nominal değerden tüm sapmalar “ $\Delta$ ” ifadesi ile gösterilecektir. Kullanılacak olan bazı temel bağıntılar şu şekildedir:

$$I \cdot \alpha = T_{net} \quad (3.15)$$

$$M = \omega \cdot I \quad (3.16)$$

$$P_{net} = \omega \cdot T_{net} = \omega \cdot (I \cdot \alpha) = M \cdot \alpha \quad (3.17)$$

Bir tek dönen makine olduğu ve makinenin  $w_0$  sürekli hızında,  $\delta_0$  faz açısına sahip olduğu varsayılırsa; değişik elektriksel ve mekaniksel bozulmalardan dolayı makine, hızlanmasına ya da yavaşlamasına sebep olan elektriksel ve mekaniksel momentlerindeki fark nedeniyle zorlanır. Burada asıl üzerinde durulması gereken, nominal değerlerden  $\Delta w$  kadar hız değişimi ile  $\Delta \delta$  kadar faz açısı değişimi oluşmasıdır. Faz açısı sapması  $\Delta \delta$ ,  $\alpha$  hızlanmasına maruz kalan makine faz açısı ile  $w_0$  hızında dönen bir referans eksenin faz açısı arasındaki farka eşittir. Hızlanma durumunda makinenin hızı,

$$\omega = \omega_0 + \alpha \cdot t \quad (3.18)$$

ise;

$$\Delta\delta = \int (\omega_0 + \alpha t) dt - \int \omega_0 dt = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2 - \omega_0 t = \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad (3.19)$$

olur. Bu durumda nominal hızdan sapma  $\Delta\omega$  şu şekilde ifade edilebilir:

$$\Delta\omega = \alpha t = \frac{d}{dt}(\Delta\delta) \quad (3.20)$$

Faz açısı sapması, hız sapması ve net ivmelendirme momenti arasındaki ilişki:

$$T_{net} = I\alpha = I \frac{d}{dt}(\Delta\omega) = I \frac{d^2}{dt^2}(\Delta\delta) \quad (3.21)$$

şeklindedir.

Dönen hız ve mekanik momentteki sapmalar ile mekanik ve elektrik gücündeki sapmalara bakılır ise, net ivmelendirme gücü ile elektriksel ve mekaniksel güç arasındaki bağıntı;

$$P_{net} = P_{net0} + \Delta P_{net} \quad (3.22)$$

olarak belirtilebilir. Burada,

$$P_{net0} = P_{m0} - P_{e0} \quad (3.23)$$

$$\Delta P_{net} = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (3.24)$$

olduğundan,

$$P_{net} = (P_{m0} - P_{e0}) + (\Delta P_m - \Delta P_e) \quad (3.25)$$

dır. Benzer olarak momentler için de,

$$T_{net} = (T_{m0} - T_{e0}) + (\Delta T_m - \Delta T_e) \quad (3.26)$$

ifadesi ile denklem 3.17' deki ifade kullanılarak,

$$P_{net} = P_{net0} + \Delta P_{net} = (\omega_0 + \Delta\omega)(T_{net0} + \Delta T_{net}) \quad (3.27)$$

yazılabilir. Denklem 3.25 ile Denklem 3.26, Denklem 3.27' de yerine yazılırsa,

$$(P_{m0} - P_{e0}) + (\Delta P_m - \Delta P_e) = (\omega_0 + \Delta\omega)[(T_{m0} - T_{e0}) + (\Delta T_m - \Delta T_e)] \quad (3.28)$$

elde edilir. Senkron çalışma hızında,  $P_{m0}=P_{e0}$  ve  $T_{m0}=T_{e0}$  'dır.  $\Delta T_m$  ve  $\Delta T_e$  ile  $\Delta\omega$ ' nın çarpımları ihmal edilirse,

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \omega_0(\Delta T_m - \Delta T_e) \quad (3.29)$$

eşitliği elde edilir.

Denklem 3.21' de belirtildiği gibi, net moment, hız değişimi ile bağıntılıdır.

$$(T_{m0} - T_{e0}) + (\Delta T_m - \Delta T_e) = I \frac{d}{dt}(\Delta\omega) \quad (3.30)$$

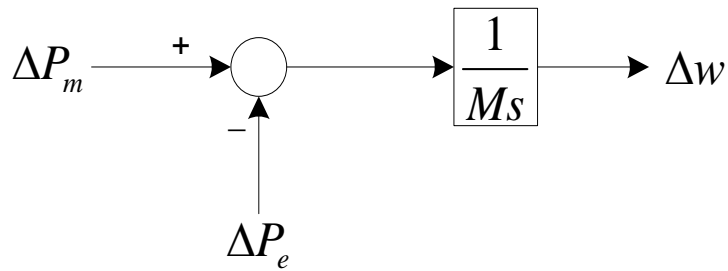
Sürekli durumda  $T_{m0}=T_{e0}$  olduğundan Denklem 3.29 ile Denklem 3.30 birleştirilirse,

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \omega_0 I \frac{d}{dt}(\Delta\omega) = M \frac{d}{dt}(\Delta\omega) \quad (3.31)$$

yazılır. Mekanik güç, elektriksel güç ve hız değişimi arasındaki ilişki, Denklem 3.31’deki gibidir. Bu eşitliğe Laplace dönüşümü uygulanırsa,

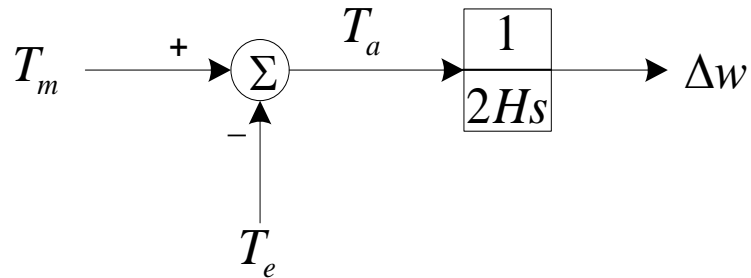
$$\Delta P_m - \Delta P_e = M_s \Delta \omega \quad (3.32)$$

olur. Bu eşitlik ise Şekil 3.14’deki matematiksel modelle temsil edilebilir (Wood ve Wollenberg 1996).



Şekil 3.14. Mekanik ve Elektriksel Güç ile Hız Değişikliği Arasındaki Transfer Fonksiyonu

Hız ile moment arasındaki transfer fonksiyonu ise;  $M=2H$  olmak üzere Şekil 3.15’deki gibidir. Burada,  $H$ =Atalet sabiti (MW-sn/MVAr)’dir (Akalin 2000).



Şekil 3.15. Hız ve Moment Arasındaki Transfer Fonksiyonu

### 3.1.4.2. Yük modeli

Güç sistemlerinin yükleri çeşitli elektriksel aygıtların varlıklarından dolayı farklılıklar göstermektedir. Bu yüklerin bir kısmı tamamen omik yükler, bir kısmı değişken güç-frekans karakteristiği gösteren motor yükleri ve diğer kısmı ise daha farklı karakteristikler sergileyen yüklerden oluşmuştur. Motor yükleri elektriksel yüklerin önemli bir kısmını oluşturduğu için frekans değişikliğinin sistemdeki net yük üzerindeki etkisinin bir model ile belirlenmesi gerekmektedir. Frekanstaki değişiklik nedeniyle yükte meydana gelen değişiklik şu şekilde ifade edilebilir:

$$\Delta P_D = D \cdot \Delta \omega \quad (3.33)$$

ya da

$$D = \frac{\Delta P_D}{\Delta \omega} \quad (3.34)$$

Burada,

$\Delta P_D$  = Frekansa Duyarlı Yük Değişimi

$D$  = Yük Sönüm Sabiti

$\Delta \omega$  = Açısal Hızdaki Değişim (rad/sn)

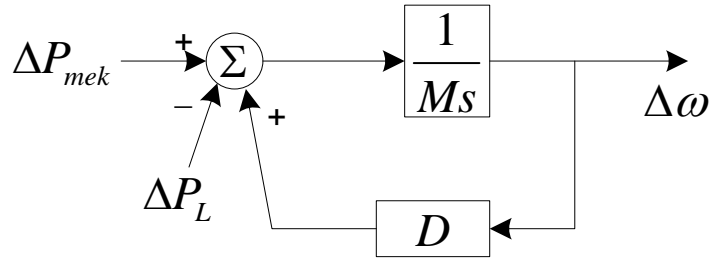
olarak tanımlanmıştır. Sönüm sabiti; yükteki yüzde değişim için frekanstaki yüzde değişim olarak tanımlanır.  $D$ ' nin tipik değeri %1-%2 arasındadır.

Frekansa duyarsız yük değişimi;  $\Delta P_L$  ve elektriksel yükteki net değişiklik  $\Delta P_e$  olmak üzere,

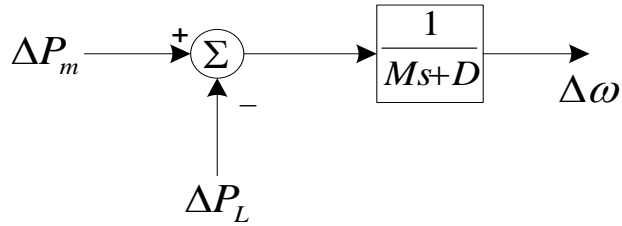
$$\Delta P_e = \Delta P_L + D \Delta \omega \quad (3.35)$$

olarak ifade edilir.

Şekil 3.16’ da yük sönümünün etkisini veren sistemin blok diyagramı ve Şekil 3.17’ de sistemin indirgenmiş modeli verilmiştir (Wood ve Wollenberg 1996).



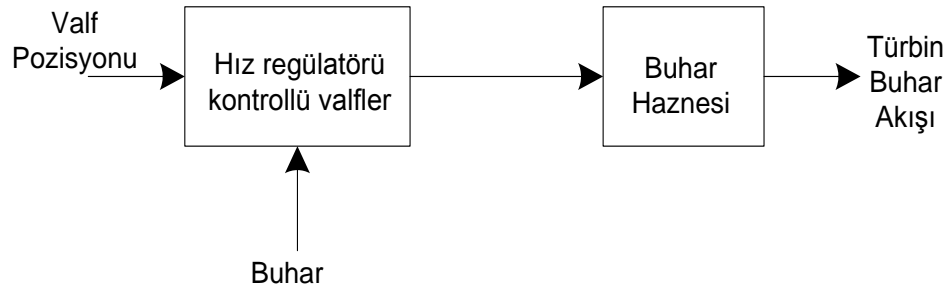
Şekil 3.16. Dönen Kütle ve Yükün Blok Diyagramı



Şekil 3.17. İndirgenmiş Blok Diyagram

### 3.1.4.3. Türbin modeli

Buhar türbinlerinde buhar akışını kontrol etmek için yüksek basınç türbinine girişte, hız regülatörü ile kontrol edilen valfler kullanılmaktadır. Hız regülatör kontrollü valf ile yüksek basınçlı türbin arasında Şekil 3.18’ de görüldüğü gibi bir buhar haznesi vardır. Bu hazne valfdeki buhar akışı ve yüksek basınçlı türbindeki buhar akışı arasındaki gecikme zamanı ile tanımlanır. Şekil 3.19’ da verilen matematiksel modelde ise  $T_t$  zaman sabiti olarak belirtilmiştir (Darçın 2004).



Şekil 3.18. Ön Isıtmasız Türbin Blok Diyagramı

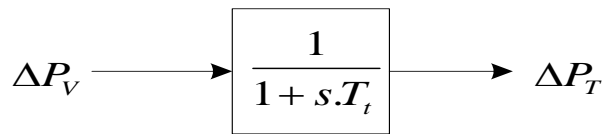
$$G_T(s) = \frac{\Delta P_T}{\Delta P_V} = \frac{1}{1 + s.T_t} \quad (3.36)$$

$$\Delta X_E = \Delta P_V - \Delta P_T \quad (3.37)$$

$$\Delta P_T = K_T \int \Delta X_E dt \rightarrow \Delta X_E = s \frac{\Delta P_T}{K_T} \quad (3.38)$$

$$\Delta P_V - \Delta P_T = s \frac{\Delta P_T}{K_T} \quad (3.39)$$

$$T_T = \frac{1}{K_T} \quad (\text{zaman sabiti}) \quad (3.40)$$



Şekil 3.19. Türbin Matematiksel Modeli

### 3.1.4.4. Hız regülatör modeli

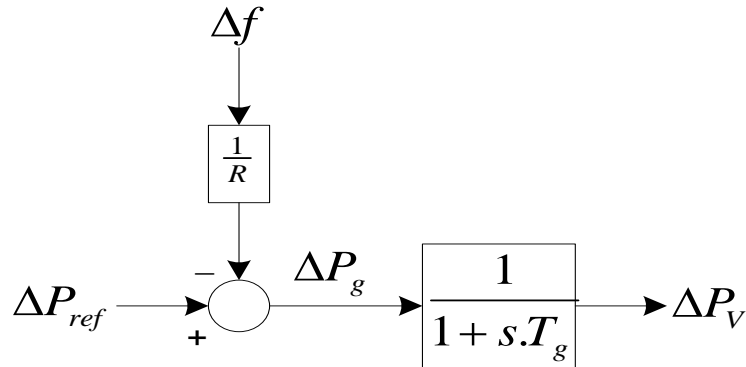
Hız regülatörü ile ilgili sistemden ve sisteme ait eşitliklerden daha önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Bu bilgilerin ışığında; türbine buhar akışını ayarlamak üzere kontrol valfinin pozisyonunu değiştirecek sistemin transfer fonksiyonu şu şekildedir:

$$G_G(s) = \frac{\Delta P_v}{\Delta P_g} = \frac{1}{1 + s.T_g} \quad (3.41)$$

Burada  $T_g$  zaman sabiti olup;

$$T_g = \frac{1}{K_g} \quad (3.42)$$

dir. Sistemin blok diyagramı Şekil 3.20' de verilmiştir (Darçın 2004).



Şekil 3.20. Buhar Türbini İçin Hız Regülatör Sisteminin Matematiksel Modeli

### 3.1.4.5. Bağlantı hattı modeli

İki ayrı bölgeyi birbirine bağlayan hatlarda meydana gelen kayıplar ihmal edilirse her bir hattaki güç şu şekilde yazılabilir:

$$P_{hat12} = \frac{|V_1| \cdot |V_2|}{X_{12}} \cdot \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (3.43)$$

$$T_{12} = \frac{|V_1| \cdot |V_2|}{X_{12}} \cdot \cos(\delta_1 - \delta_2) \quad (3.44)$$

$$P_{hat12} = T_{12}(\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2) \quad (3.45)$$

$$\Delta\delta = 2\pi \int \Delta f \cdot dt \quad (3.46)$$

$$P_{hat12} = 2\pi T_{12} \left( \int \Delta f_1 dt - \int \Delta f_2 dt \right) \quad (3.47)$$

olur. Yapılan işlemler sonucunda toplam güç değişimi,

$$\Delta P_{hat12}(s) = \frac{2\pi}{s} T_{12} [\Delta f_1 - \Delta f_2] \quad (3.48)$$

$V_1$  = 1.bölge hat sonu gerilimi

$V_2$  = 2.bölge hat sonu gerilimi

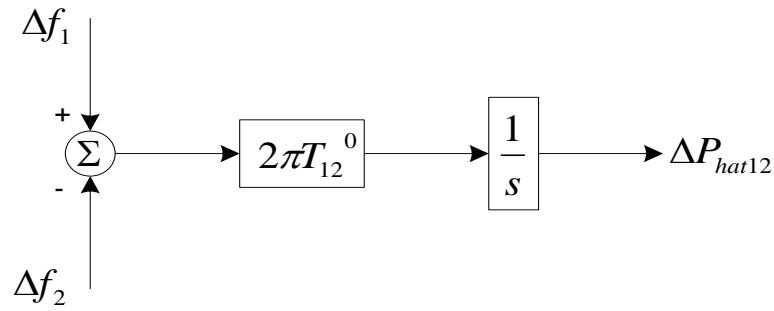
$X_{12}$  = 1 ve 2 bölgeleri arasındaki iletim hattının eşdeğer reaktansı

$\delta_1$  = 1.bölge hat sonu gerilimi faz açısı

$\delta_2$  = 2.bölge hat sonu gerilimi faz açısı

$T_{12}$  = Hattın senkronize edici moment katsayısı

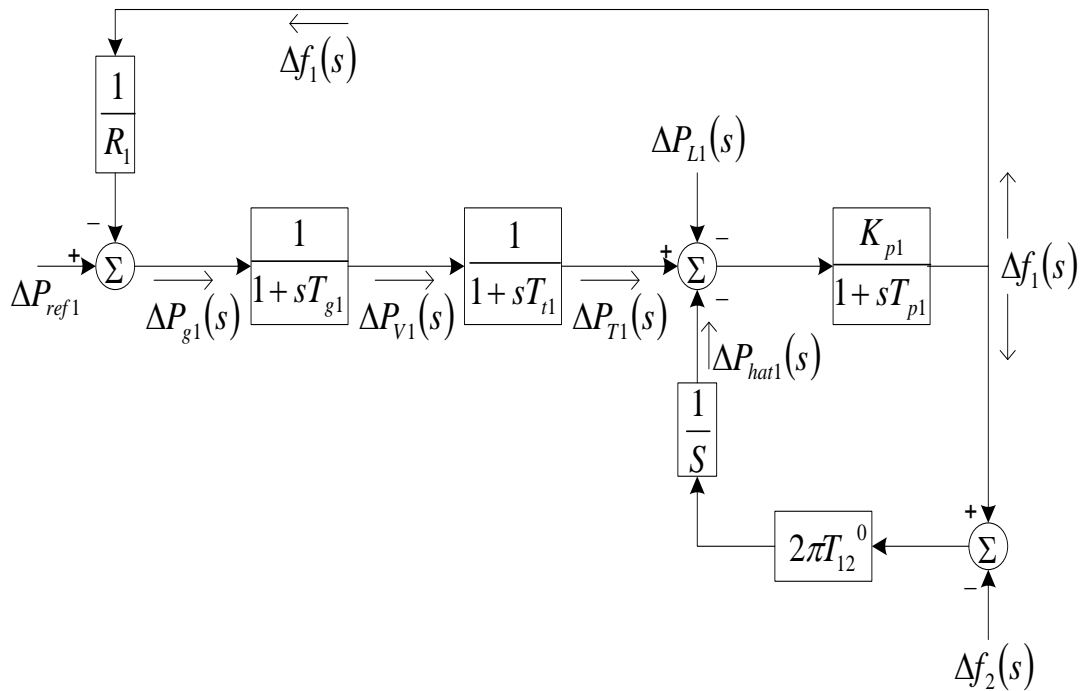
şeklinde olur. Şekil 3.21' de bağlantı hattının matematiksel modeli gösterilmiştir (Darçın 2004).



Şekil 3.21. Bağlantı Hattının Matematiksel Modeli

### 3.1.5. Güç sisteminin yük frekans kontrolüne uygun bileşik modeli

Bu bölümde; yük, generatör, türbin, hız regülatörü ve bağlantı hattı gibi temel elemanların matematiksel modelleri birleştirilmiştir. Güç sisteminin yük frekans kontrolüne uygun şekilde matematiksel modeli Şekil 3.22' de belirtilmiştir.



Şekil 3.22. Bir Güç Sisteminin Yük Frekans Kontrolüne Uygun Modeli

$G_p$ ; güç sistemi transfer fonksiyonudur.

$$G_p(s) = \frac{K_p}{1 + sT_p} \quad (3.49)$$

$$T_p = \frac{2H}{f_0 D} \quad (sn) \quad (3.50)$$

$$K_p = \frac{1}{D} \quad \left( \frac{Hz}{MW} \right) \quad (3.51)$$

Birincil yük frekans kontrol çevriminde hız değiştiricinin pozisyon değiştirmedeği düşünülür ise;  $\Delta P_{ref} = 0$  olur. Bu durumda frekans değişiminin transfer fonksiyonu,

$$\Delta f(s) = \frac{G_p(s)}{1 + \frac{1}{R} G_p(s) G_g(s) G_T(s)} \Delta P_L(s) \quad (3.52)$$

olur. Ayrıca bölge frekans cevap karakteristiği;  $\beta$ , şu şekilde tanımlanabilir.

$$\beta \triangleq D + \frac{1}{R} \quad \left( \frac{MW}{Hz} \right) \quad (3.53)$$

$\beta$  bazen; sistemin sıklığı (stiffness) olarak da ifade edilebilir (Özdemirci 2002).

Birincil yük frekans kontrol çevrimi ile sistem frekansı sabit hale getirilmektedir. Fakat frekans değişimi sıfır seviyesinde olamamaktadır. Frekans bozulmasını sıfır seviyesine yeniden getirmek için ikincil kontrol çevrimi gereklidir. İkincil yük frekans kontrol çevrimi ile frekansın istenilen değere restorasyonu sağlanır ve sabitlenir. Frekans hatasını sıfır yapabilmek için hız değiştiricisi ( $\Delta P_{ref}$ ) uygun bir kontrolör ile kontrol edilmelidir.

Şekil 3.23' te integral kontrolörlü tek bölgeli bir güç sisteminin yük frekans kontrol diyagramı verilmiştir. Bu şekilde kontrolörü besleyen sinyal olarak ACE verilmiştir. ACE ( Area Control Error ); bölgenin kontrol hatasıdır. ACE kavramından çalışmanın ilerleyen bölümlerinde yine bahsedilecektir. Tek bölgeli sistemlerde  $ACE = \Delta f'$  dir.

İntegral kontrolör, sistemde bir hata kaldığı sürece çıkışını arttırır ve hız değiştiricinin hareketine neden olur. İntegratör çıkışı yalnızca frekans hatası sıfır olduğunda sabit bir değere ulaşır ve böylece hız ayarlayıcı pozisyon değiştirmez.

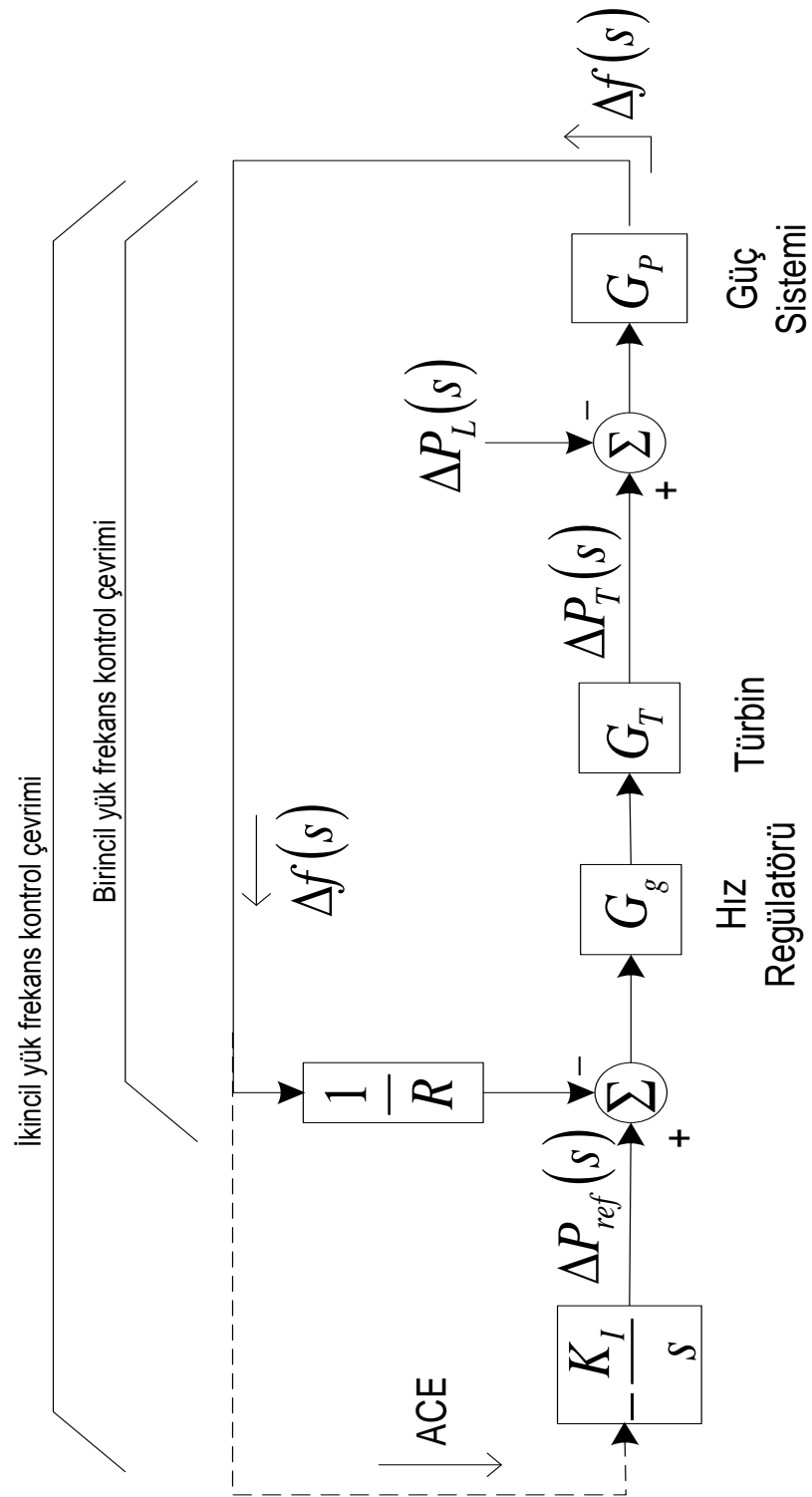
İkincil yük frekans kontrol çevriminde basamak yük değişimine karşılık olarak hız değiştiricinin pozisyon değiştirdiği düşünülür ise;

$$\Delta P_{ref}(s) = -\frac{K_I}{s} \Delta f(s) \quad (3.54)$$

dir. Şekil 3.23' teki blok diyagramdan,

$$\Delta P(s) = -\frac{K_I}{s} \cdot \frac{G_p(s)}{1 + \frac{1}{R} G_p(s) G_g(s) G_T(s)} \cdot \frac{M}{s} \quad (3.55)$$

elde edilir.



Şekil 3.23. İntegral Kontrolörlü Tek Bölge Bir Güç Sisteminin Yük Frekans Kontrol Diyagramı (Akalin 2000)

### 3.1.6. Alan kontrol hatası

Elektrik güç sisteminin yük frekans kontrolü kabiliyeti ve frekans dengesi Alan Kontrol Hatası (Area Control Error - ACE) ile ölçülmektedir. Sistemin üretim üniteleri ACE değeri temelinde kontrol edilmektedir. Belirli zaman aralıklarında alan kontrol hatası sıfırlanmakta bu da üretim-tüketim dengesinin sağlandığı frekans ve bağlantı hattı güç değerinin nominal değere getirildiği anlamına gelmektedir.

Alan Kontrol Hatası (ACE) hesaplanırken, hangi kontrol modunda çalışıldığı ve hangi kontrol uygulamalarının aktif konumda olduğuna dikkat edilmelidir. Sabit alışveriş kontrolü, sabit frekans kontrolü ve bağlantı hattı eğilimi kontrolü olmak üzere 3 ayrı kontrol modu vardır. Bu çalışma modlarına göre ACE hesaplanırken frekans ifadesi ve/veya bağlantı hattı ifadesi dikkate alınır (Özdemirci 2002).

Frekans ifadesi;

$$ACE_f = K. (f_D - f_A) \quad (3.56)$$

olur.

$K$  = Sistemin güç-frekans sabitesi

$f_D$  = İstenilen frekans

$f_A$  = Gerçekleşen (aktüel) frekans

Frekans ifadesi sabit frekans ve bağlantı hattı eğilim modu aktif olduğunda ACE' ye dahil edilir.

Bağlantı hattı (interchange) ifadesi,

$$ACE_T = (DNI_T - ANI_T) \quad (3.57)$$

olur.

$DNI_T$  = İstenilen net alışveriş

$ANI_T$  = Aktüel net alışveriş

Bağlantı hattı ifadesi sabit alışveriş ve bağlantı hattı eğilim modu aktif olduğunda ACE' ye dahil edilir.

Bağlantı hattı üzerinden akan enerji miktarı ülkeler arasında yapılan anlaşmalar çerçevesinde belirli değerlerde sınırlandırılmak zorundadır. Bu nedenle güç akışı önceden belirlenen bir program doğrultusunda yapılır. Fakat sabit frekans kontrol ve bağlantı hattı eğilim kontrol modlarında çalışıldığında önceden programlanan enerji akış değerleri tutturulamamış olabilir. Bu durumda hatalı enerji geri ödeme diye adlandırılan mod devreye girer ve programlanan ile gerçekleşen enerji değerleri arasındaki fark sıfırlanır (Özdemirci 2002).

### **3.1.7. İki ya da daha fazla kontrol bölgesine sahip güç sistemlerinde otomatik yük frekans kontrolü**

İki ya da daha fazla kontrol bölgesine sahip güç sistemlerinde, otomatik yük frekans kontrolü; generatör ünitelerinden istenilen aktif güç çıkışlarının sağlanması yolu ile frekans kontrolüne yardımcı olduğu gibi, bölgeler arasındaki güç alışverişinin arzu edilen değerler arasında tutulmasını da sağlar (Akalin 2000). Günümüzde bu sistemlerde yük frekans kontrolü terimi yerine "Otomatik Üretim Kontrolü" (Automatic Generation Control - AGC) terimi kabul edilmektedir.

1950' lerde geliştirilmiş ilk AGC sistemleri, analog kontrol elemanlarına dayanmaktadır. 1960' ların sonlarında dijital sistemlerdeki gelişmeler sonucu analogların yerini dijital sistemler almıştır. Şimdi tüm dijital sistemler, AGC uygulamaları için evrensel bir seçim haline gelmiştir (Zobi 1996).

AGC, bilgisayarla kontrol edilen güç sistem fonksiyonlarının ilklerinden biridir. Bu alanda elde edilen deneyimler AGC döngüsündeki birçok fonksiyonun

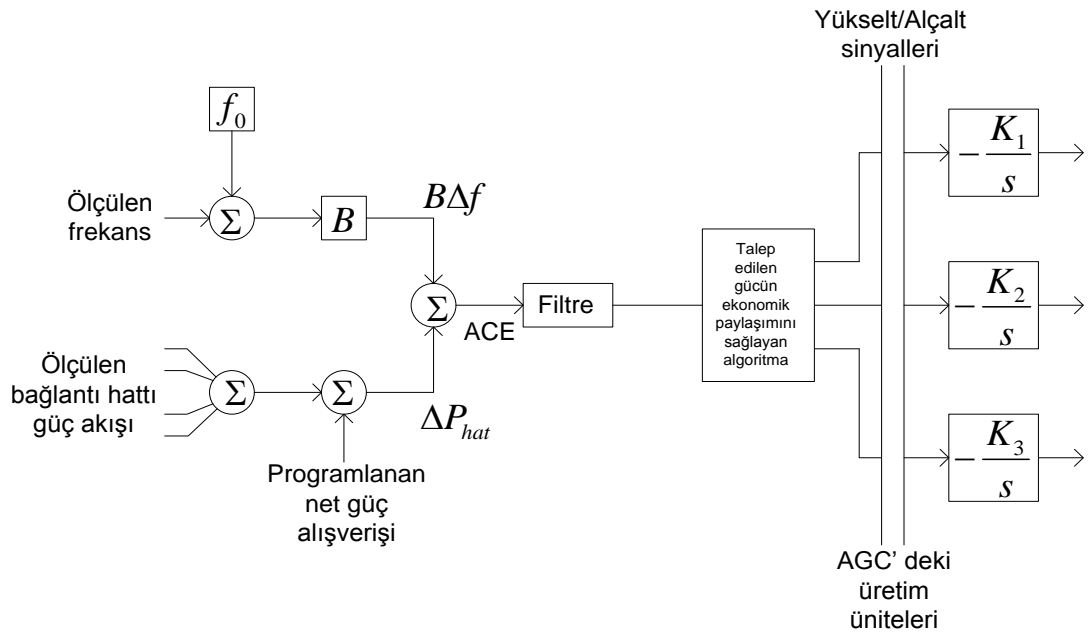
(ekonomik dağılım, emniyet kontrolleri gibi) entegrasyonuna izin vermiştir. Günümüz sistemlerinde dijital bilgisayarlar ile her bir 1-6 saniye aralığında AGC gerçekleştirilebilir. Modern güç sistemleri dijital bilgisayarlar ile birlikte bu kontrolleri gerçekleştirmektedir (Darçın 2004).

Modern AGC projelerinde, kontrol olayı genellikle paylaşım merkezi denen bir yerden her kontrol alanı için belirlenir. Bağlantı hattı güç akışlarına, sistem frekansına ve generatör birimlerinin MW yüklenmesine ait olan bilgi; kontrol olaylarının dijital bir bilgisayar tarafından saptandığı merkezi yere uzaktan kumanda ile iletilir. Kontrol işareti; Şekil 3.24' de gösterildiği gibi AGC' li üretim birimlerine aynı uzaktan kumanda kanalı ile iletilir. Normal uygulama, birimlere değişen uzunluklarda yükselen ya da azalan darbeleri iletmektir. Santrallerdeki kontrol elemanları, birimlerin referans ayar noktalarını darbe uzunluğuyla orantılı olarak aşağı ya da yukarı değiştirir. Kontrol darbelerinin uzunluğu, dijital uzaktan kumanda kanalı üzerinden iletilen bir dijital kelimenin bitlerinde kodlanabilir. Uzaktan kumandalı kontrol (açma ve kapama kesicileri), uzaktan kumanda bilgisi (MW, MVAR, MVA, gerilim vb.) ve kontrol bilgisi (üretim birimi güç artışı ya da azalışı) aynı kanal yolu ile gönderilmiş olan tüm modern sistemlerde dijital kumandanın kullanımı yaygın bir yer almaktadır (Zobi 1996).

Çok bölgeli enterkonnekte sistemlerde otomatik üretim kontrolünün görevleri(Darçın 2004):

1. Her bölgenin kendi yük değişikliğini karşılamasını sağlamak,
2. Komşularla önceden yapılmış anlaşmalar ile güç alışverişini sağlamak,
3. Üretimin ekonomik olarak üniteler arasında dağılımını sağlamak,
4. İstenilen frekans değerine ulaşmak ve bunun için bölgenin yapması gerekeni yapmasına izin vermek

olarak belirtilebilir.



Şekil 3.24. Çok Bölge Sistemlerde Her Bir Kontrol Bölgesi İçin AGC Mantığı (Darçın 2004)

Yukarıda belirtildiği gibi, otomatik üretim kontrolünün üçüncü işlevi, her üretim birimini en ekonomik şekilde yükleyecek üretimi paylaşmaktır. Bu işlem ekonomik paylaşım kontrolü (EDC) olarak bilinir. Ekonomik paylaşım teorisi, farklı maliyetlerin eşitliği ilkesine dayanır (Zobi1996).

Bağlantı hattı gücü ve frekansın kontrolünde, üretimi kontrol etmek için üretim santrallerine işaretler göndermek gereklidir. Ekonomik paylaşım kriterini sağlamak için üretimi kontrol etmede bu işaretleri kullanmak mümkündür. Böylece, ekonomik paylaşım kontrolü, AGC fonksiyonunun bir kısmı gibi ele alınabilir.

Ekonomik paylaşım kontrolü, ilk hız kontrolü ve destekleyici kontrolden sonra üçüncü bir kontrol gibi düşünülebilir. Her üretim birimini en ekonomik şekilde yükleyebilmek için de bir dijital bilgisayara ihtiyaç vardır. Genellikle bilgisayarların enerji kontrol merkezi de denilen bir yerde bulunduğu daha önceden belirtilmişti. Bu merkez farklı üretim birimlerine iletişim kanalları (mikrodalga, telefon vs.) ile bağlanmıştır. Sistem yükü devamlı olarak değiştiğinden ekonomik paylaşım hesaplamaları sık aralıklarla, örneğin her 5 dakikada yapılmış olmalıdır. Kontrol

merkezindeki bilgisayar, üretim birimlerinden megawatt güç değerlerini alır ve bu değerleri optimal değerler ile kıyaslar. Gerçek değerler, optimal değerlerden farklıysa, megawatt çıkışları yeniden ayarlamak için bilgisayar üretim birimlerine talimatları geri gönderir. Bu yeniden ayarlama işlemi tabii ki yine devir sayısı regülatörlerindeki hız değiştirici ile yapılmaktadır. Tek generatör çıkışının katılımı temel nokta ve katılma faktörü ( $PF$ ) kullanılarak gerçekleştirilir. Temel nokta, her üretim birimi için en ekonomik çıkışı ifade eder. Katılma faktörü ise, toplam üretimdeki değişim ile tek tek birim çıkışlarındaki değişimin oranıdır. Her generatör için yeni istenen çıkış aşağıdaki gibi hesaplanılır (Zobi 1996).

$$P_{istenen} = P_{temel\ nokta} + PF(\Delta P_{toplam}) \quad (3.58)$$

Burada  $\Delta P_{toplam}$ , toplam yeni üretim ile tüm üretim için temel nokta güç toplamının farkına eşittir. Tüm birimlerin katılma faktörü toplamı bire eşittir (Zobi 1996).

İki ya da daha fazla kontrol bölgesini içeren bir enterkonnekte sistemdeki otomatik yük frekans kontrolünü incelemek için iki kontrol bölgesi bir güç sistemi modeli Şekil 3.25' te sunulmuştur.

İki bölge arasındaki transfer fonksiyonu,  $a_{12}$ ' yi şu şekilde tanımlanabilir:

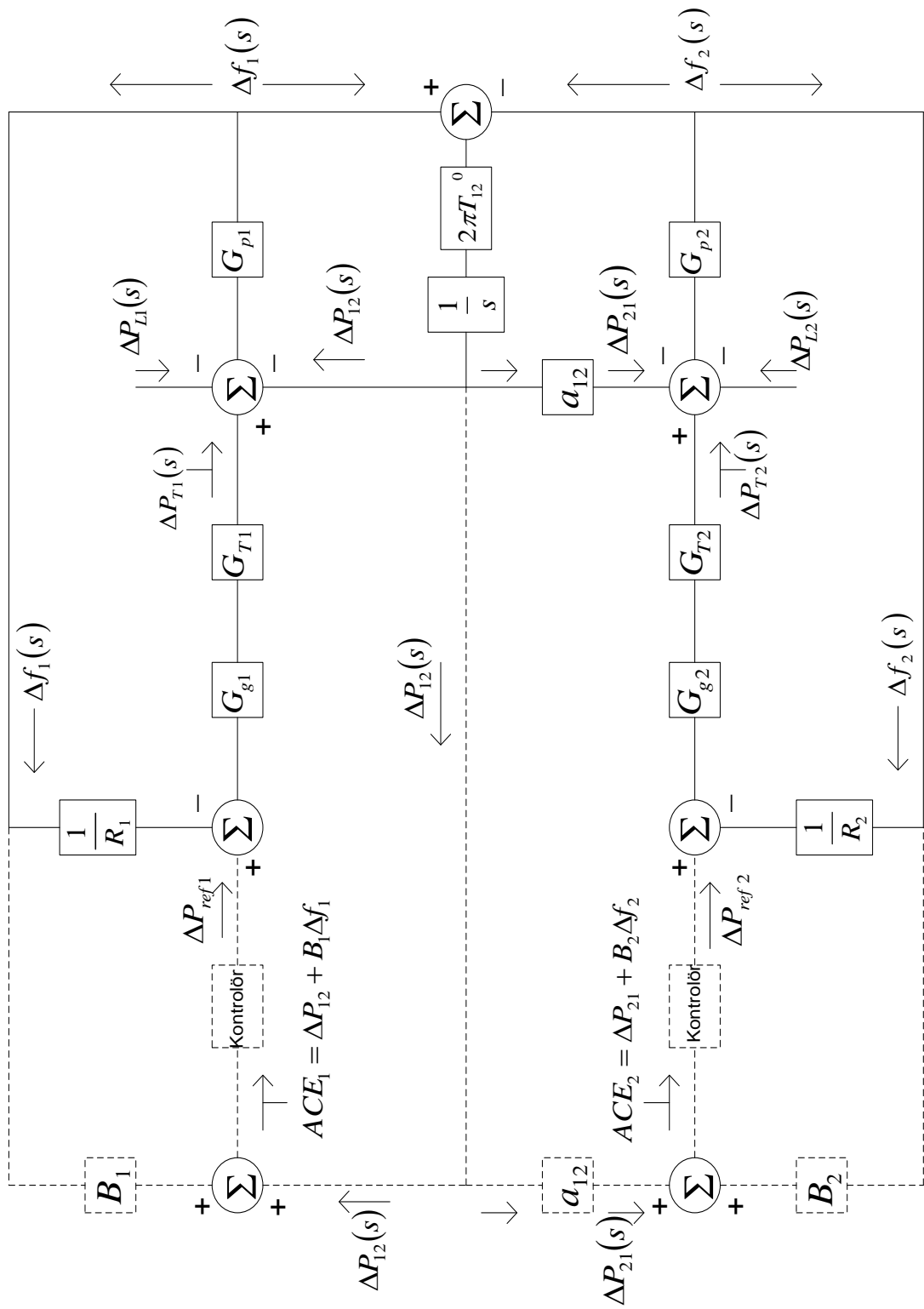
$$a_{12} \triangleq -\frac{P_{\gamma 1}}{P_{\gamma 2}} \quad (3.59)$$

Burada;

$P_{\gamma 1}$  = Birinci kontrol bölgesinin güç kapasitesi

$P_{\gamma 2}$  = İkinci kontrol bölgesinin güç kapasitesi

Eğer iki bölgenin güç kapasitesi birbirinden farklı ise, bağlantı hatları arasında iletilen güç;



Şekil 3.25. İki Bölge Bir Güç Sistemi İçin Yük Frekans Kontrol Çevrimi

$$\Delta P_{hat,2} = -\frac{P_{\gamma 1}}{P_{\gamma 2}} \Delta P_{hat,1} \quad (3.60)$$

$$\Delta P_{hat,2} = a_{12} \cdot \Delta P_{hat,1} \quad (3.61)$$

olur.

İki bölgeyi bir sistemde hız değıştiricinin pozisyonunun sabit olduğu kabul edilir ise,

$$\Delta P_{ref,1} = \Delta P_{ref,2} = 0 \quad (3.62)$$

olur.

Birinci bölgedeki yükün  $\Delta P_{L1}$  ve ikinci bölgedeki yükün  $\Delta P_{L2}$  kadar arttığı düşünülür ise frekanstaki ve bağlantı hattındaki güç değışiminin statik durumu şu şekildedir:

$$\Delta P_{T10} = -\frac{1}{R_1} \Delta f_0 \quad (3.63)$$

$$\Delta P_{T20} = -\frac{1}{R_2} \Delta f_0 \quad (3.64)$$

Bağlantı hatlarındaki güçlerin toplanması ile,

$$\Delta P_{T1} - \Delta P_{L1} - \Delta P_{hat,1} = D_1 \Delta f_0 \quad (3.65)$$

$$\Delta P_{T2} - \Delta P_{L2} - \Delta P_{hat,2} = D_2 \Delta f_0 \quad (3.66)$$

elde edilir. Denklem 3.60, Denklem 3.61, Denklem 3.63 ve Denklem 3.64; Denklem 3.65' te ve Denklem 3.66' da yerine konulur ise;

$$-\frac{1}{R_1}\Delta f_0 - \Delta P_{L1} = D_1\Delta f_0 + \Delta P_{hat,12} \quad (3.67)$$

ve

$$-\frac{1}{R_2}\Delta f_0 - \Delta P_{L2} = D_2\Delta f_0 - a_{12}\Delta P_{hat,12} \quad (3.68)$$

ifadeleri elde edilir.  $\Delta f_0$  ve  $P_{hat,12}$  için Denklem 3.67 ve Denklem 3.68 çözülür ise;

$$\Delta f_0 = \frac{\Delta P_{L2} - a_{12}\Delta P_{L1}}{\beta_2 - a_{12}\beta_1} \quad (3.69)$$

$$\Delta P_{hat,12_0} = \frac{\beta_1\Delta P_{L2} - \beta_2\Delta P_{L1}}{\beta_2 - a_{12}\beta_1} \quad (3.70)$$

olur. Burada bölge frekans cevap karakteristikleri,

$$\beta_1 \triangleq D_1 + \frac{1}{R_1} \quad (3.71)$$

$$\beta_2 \triangleq D_2 + \frac{1}{R_2} \quad (3.72)$$

şeklindedir. Denklem 3.71 ve Denklem 3.72' deki parametreler özdeş kabul edilir ise,

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= D_2 = D \\ R_1 &= R_2 = R \\ \beta_1 &= \beta_2 = \beta \end{aligned} \right\} \quad (3.73)$$

olur ve,

$$a_{12} = -1 \quad (3.74)$$

elde edilir. Bu durumda,

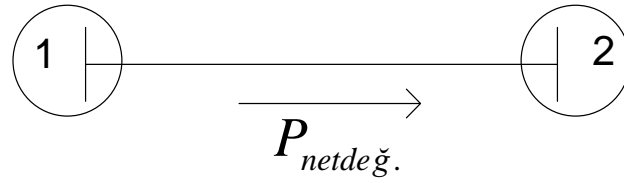
$$\Delta f_0 = \frac{\Delta P_{L2} + \Delta P_{L1}}{2\beta} \quad (Hz) \quad (3.75)$$

$$\Delta P_{hat,12_0} = \frac{\Delta P_{L2} - \Delta P_{L1}}{2} \quad (MW) \quad (3.76)$$

olarak bulunur (Akalin 2000).

### 3.1.8. Bağlantı hattı kontrolü

İki farklı elektrik işletmesinde, sistemleri birbirine bağlamanın nedenlerinden bir tanesi karlı bir şekilde uygun çalışma maliyetleriyle komşu sistemle yapılan güç alışverişidir. Sistemlerin birinde ani bir üretim kaybı meydana gelirse, bu kayıptan dolayı enterkonnekte sistemdeki ünitelerde frekans değişimi olmaktadır. Şekil 3.26' da verilen iki bölgeyi sistemin üretim ve yük karakteristikleri birbirine eşit olarak ( $R_1=R_2$ ,  $D_1=D_2$ ) kabul edilmiştir. Birinci bölgeden ikinci bölgeye 100 MW gönderildiği zaman, aynı esnada ikinci bölgede 30 MW'lık ani bir yük artması durumunda, her iki bölgede de üretim karakteristikleri aynı olduğundan dolayı, üretimlerinde 15 MW'lık bir artış olacaktır. Bu sebeple hat üzerinden 100 MW yerine 115 MW'lık bir güç akışı olacaktır. Böylelikle ikinci bölgede meydana gelen 30 MW'lık artış karşılanmış olacaktır. Fakat birinci bölgedeki bu artış, üretimin artmasına sebep olacak ve maliyetler artacaktır. Bununla beraber böyle bir paylaşım sistem için uygun olsa bile farklı nedenlerden dolayı gerçekleşmeyebilmektedir. Mesela birinci bölge anlaşma gereği 100 MW'ın üstüne çıkmayabilir. Böyle bir durumda ikinci bölge tek başına 30 MW'lık artışı karşılamak için üretimini arttıracaktır. Bu da ekstra bir maliyet getirecektir. Verilen bu örnekte ihtiyaç duyulan durum, ikinci bölgedeki ani artışı algılayıp frekansı nominal değere getirecek, aynı zamanda ikinci bölgedeki üretimi 30 MW artıracak bir kontrol sistemidir (Oysal ve ark. 2004).



$$\Delta P_{L1} = \text{1.alandaki yük değişimi} \quad \Delta P_{L2} = \text{2.alandaki yük değişimi}$$

şekil 3.26. İki bölgele bir sistem (Oysal ve ark. 2004)

Bahsedilen bu kontrol sistemi aynı zamanda aşağıda verilen durumları da algılayabilmek zorundadır:

1. Frekans düşmüşse, sistemden ayrılan net değişim gücü de artmışsa sistem dışında bir yük artışı olmuştur. Yani sistemin frekansı düşerse veya artarsa ve buna ek olarak sistemin diğer sisteme göndermekle yükümlü olduğu güç artarsa diğer sistemde güç artışı olmuştur.
2. Frekans düşmüşse, sistemden ayrılan net değişim gücü de azalmışsa sistem içinde bir yük artışı olmuştur. Yani sistemin frekansı düşerse veya artarsa ve buna ek olarak sistemin diğer sisteme göndermekle yükümlü olduğu güç azalırsa diğer sistemde güç azalması olmuştur (Oysal ve ark. 2004).

Yukarıdaki ifadeler frekans artması durumunda da geçerlidir. Buna bağlı olarak,

$$\Delta P_{12} = P_{12} - P_{ind} \quad (3.77)$$

tanımlanması yapılabilir. Burada;

$P_{12}$  = Bağlantı hattı üzerindeki net değişim gücü (+ : çıkan güç, - : giren güç)

$P_{ind}$  = istenen net değişim değeri

Bağlantı hattı kontrolünde yük frekans kontrolüne ait işlemin özeti Tablo 3.1’ de verilmiştir. İki bölge bir sistem için birinci bölgede meydana gelen  $\Delta P_{L1}$ ’ lik bir yük artışı durumunda frekanstaki ve bağlantı hattından akan güçteki değişim Tablo 3.2’ de verildiği gibi olmaktadır. Tablo 3.2’ de verilen denklemler Tablo 3.1’ in ilk satırına denk gelmektedir ve

$$\Delta P_{gen1} = \Delta P_{L1}, \Delta P_{gen2} = 0 \quad (3.78)$$

olur.

Tablo 3.1. Bağlantı Hattı Yük Frekans Kontrolü (Oysal ve ark. 2004)

$\Delta W$	$\Delta P_{12}$	Yük değişimi	Sonuçlanan kontrol olayı
-	-	$\Delta P_{L1} : +$ ve $\Delta P_{L2} : 0$	1.alandaki $P_{gen}$ ' in artması
+	+	$\Delta P_{L1} : -$ ve $\Delta P_{L2} : 0$	1.alandaki $P_{gen}$ ' in azalması
-	+	$\Delta P_{L1} : 0$ ve $\Delta P_{L2} : +$	2.alandaki $P_{gen}$ ' in artması
+	-	$\Delta P_{L1} : 0$ ve $\Delta P_{L2} : -$	2.alandaki $P_{gen}$ ' in azalması

Tablo 3.2.  $\Delta P_{L1}$ ’ lik Bir Artışta Frekans ve Güçteki Değişim (Oysal ve ark. 2004)

Yük Değişimi	Frekans Değişimi	Bağlantı Hattı Güç Değişimi
$\Delta P_{L1}$	$\Delta f = \frac{-\Delta P_{L1}}{(1/R_1 + D_1) + (1/R_2 + D_2)}$	$\Delta P_{12} = \frac{-\Delta P_{L1}(1/R_2 + D_2)}{(1/R_1 + D_1) + (1/R_2 + D_2)}$

Üretimde meydana gelen değişimlerin, alan kontrol hatasını (ACE) ifade ettiğinden bahsedilmiştir. Alan kontrol hatası (ACE), frekans ve bağlantı hattı güç değişimi ile belirlenmiş bir kontrol işaretidir. Birinci bölge için ACE:

$$ACE_1 = \Delta P_{12} + B_1 \cdot \Delta f \quad (3.79)$$

$$B_1 = \beta_1 = \frac{1}{R_1} + D_1 \quad (3.80)$$

olarak belirtilmiştir. Burada  $B_1$ , birinci bölgenin frekans yönelim faktörüdür. İkinci bölge için ACE:

$$ACE_2 = \Delta P_{21} + B_2 \cdot \Delta f \quad (3.81)$$

$$B_2 = \beta_2 = \frac{1}{R_2} + D_2 \quad (3.82)$$

olarak belirtilmiştir. Burada ise  $B_2$ , ikinci bölgenin frekans yönelim faktörüdür. (Oysal ve ark. 2004)

Frekans yönelim faktörü, bölge frekans cevap karakteristiğinin yıl içinde yükün pik olduğu saatlerde oluşan ve büyük yük kayıpları ile sonuçlanan arızaların olduğu anda gözlemlenen ortalama değerin tahmin edilmesi ile bulunur. Frekans yönelim faktörü  $B'$  nin birimi MW/0,1 Hz' dir. Bu değer hem yükün hem de hız regülatörünün frekansa olan duyarlılığını gösterir (Darçın 2004).

Tablo 3.2' de belirtilen formüller Denklem 3.79 ve Denklem 3.81' de yerine konulursa;

$$ACE_1 = -\frac{\Delta P_{L1} \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right)}{\left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right) + \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right)} + \left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right) \cdot \left( \frac{-\Delta P_{L1}}{\left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right) + \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right)} \right) = \Delta P_{L1} \quad (3.83)$$

$$ACE_2 = \frac{\Delta P_{L1} \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right)}{\left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right) + \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right)} + \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right) \cdot \left( \frac{-\Delta P_{L1}}{\left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right) + \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right)} \right) = 0 \quad (3.84)$$

sonuçları elde edilir.

Frekans yönelim faktörü tahmin edilen değerin altında olursa, bir ünite devre dışı kaldığı zaman diğer kontrol bölgeleri arızalı bölgedeki hız regülasyon oranını çok küçük zannedecek ve ikincil kontrolün üretimini düşürerek frekansın düşmesine sebep olacaktır. Ters durumda eğer büyük seçilirse bu seferde hiç gerekmediği halde otomatik üretim kontrolünü çalıştırmak için alan kontrol hatası verecektir. Bu nedenlerden dolayı bağlantı hattı yönelim faktörü değeri hem normal şartlara hem de arıza durumlarına uygun olarak seçilmelidir. Yapılan araştırmalar sonucunda en uygun frekans yönelim faktörü değerinin frekans cevap karakteristiğine eşit olduğu yani  $|B| = |\beta|$  durumu olduğu belirlenmiştir (Darçın 2004).

## 3.2. Mühendislikte MATLAB Uygulamaları ve Bulanık Mantık

### 3.2.1. Mühendislikte MATLAB uygulamaları

MATLAB, yüksek performanslı bir teknik programlama dilidir. MATLAB kelimesinin açılımı İngilizce “MATrix LABoratory” den gelmektedir. Anlaşılacağı gibi bir matris laboratuvarı olan MATLAB’ ın temelindeki yapı, boyutlandırma gerektirmeyen matrislerdir. Yapılan tüm girdiler ve çıktılar, diğer programlama dillerindeki belirteçleri gerektirmeksizin bir matris tanımlar. Bu özelliği ile Fortran, Basic ve C gibi programlama dillerine kıyasla işlemlere ve programlamaya ayrılacak zaman minimuma indirgeyerek; programlama dilleri arasında kendine has bir yer edinmiştir.

Tüm bu özelliklere sahip olan MATLAB, sayısal analiz, matris ve dizi işlemleri, sinyal işleme, algoritma geliştirme, C, C++, Java ve İnternet ile ilişik programlama ve grafiksel kullanıcı ara yüzü (Graphical User Interface - GUI) formulu program yazma gibi sayısal işlemleri açısından kolaylıklar içerir. Kullanımı kolay bir grafik ara yüzü üzerinden, diğer programlama dillerindeki geleneksel kodlamaya karşın matematiksel denklem yazma kolaylığını da sağlamaktadır (Uzunoğlu ve ark. 2003).

MATLAB farklı sahalardaki kişilerden gelen taleplerle kendini geliştirmiş ve şu an 500.000’nin üzerindeki endüstri, devlet ve akademik kurumlarında kullanılmaktadır.

İş sahalarında MATLAB programlama dili, araştırma ve mühendislik alanlarında karşılaşılan problemlere pratik ve çabuk sonuçlar sunmaktadır.

MATLAB’ ın sahip olduğu kolay kodlama algoritması ile yeni programlar çok hızlı bir şekilde oluşturulabilmektedir.

MATLAB' ın geliştirme araçları da program geliştirmeyi ve MATLAB' ı kullanmayı kolaylaştırmaktadır. İçerdiği MATLAB Derleyicisi/Ayııklayıcısı, online dökümantasyon ve kitapçıklar, çalışma alanı ve demolar bu araçları oluşturmaktadır.

MATLAB birçok işletim sisteminde hatasız biçimde çalışmaktadır. Şu an itibariyle MATLAB, Windows 95/98/NT/2000/XP ve Vista versiyonları ile Unix tabanlı birçok işletim sisteminde çalışmaktadır. Herhangi bir işletim sisteminde yazılmış veri dosyaları diğer işletim sistemlerinde de sorunsuz yürütülmekte, kullanıcıya iletim sistemi güncelleme özgürlüğü sunulmaktadır (Uzunoğlu ve ark. 2003).

Simulink; dinamik sistem modellerinin kurulması, benzetimi ve çözümünde kullanılan bir MATLAB eklentisidir. Simulink blok diyagramları sayesinde bir sistem kurulabilir, kurulan sistemler bir laboratuvar ortamında gibi incelenebilir. Simulink, sanal bir laboratuvar seti gibi çalışarak kurulan sistemlere ait analiz, tasarım ve geliştirme işlemlerinin yapılabilmesine imkân tanır (Uysal 2004).

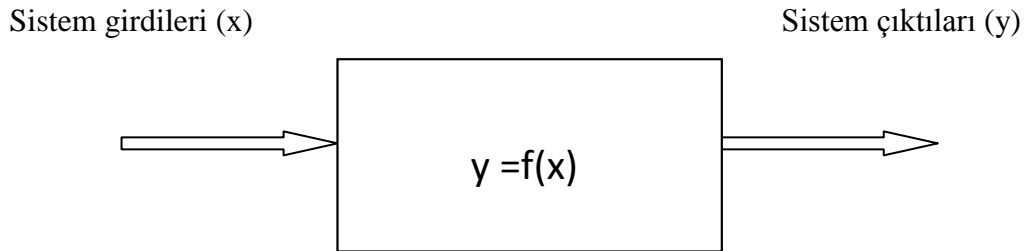
Dinamik sistemleri modellemek, sistem elemanlarının blok diyagramlar halinde verildiği Simulink kütüphanesinden yapılacak sürükle bırak işlemlerinin uygulandığı bir grafiksel kullanıcı ara yüzü ile olur. Bu arabirim ile modeller, kâğıda çiziyormuşçasına bir kolaylıkla tasarlanabilir.

Simulink birçok matematiksel ifadeden başlayarak; elektrik, elektronik, sinyal işleme, kontrol sistemleri gibi özel alanlara kadar yayılmış birçok blok kütüphanesine sahiptir. Ayrıca, kullanıcılar kendi bloklarını geliştirebilme imkânına da sahiptir (Uysal 2004).

Modellerin ayrıntılarını değiştirmek, bir çift tıklama işlemi ile yapılabilmektedir. Her türlü oluşum ve değişimin yapılabildiği modeller üzerinde çalışılabilir ve hemen analizsel veriler elde edilebilir. Simulink, barındırdığı araç kutuları ile en kısa sürede çözümler sunabilmektedir.

Simulink sadece ideal lineer sistemlerin değil, gerçekçi lineer olmayan sistemlerin de sürekli zamanlı (continuous time), örnekleme zamanlı (sampled time) veya her iki ortak zamanlı olarak simülasyonunda kullanılabilir.

Simulink ile dinamik sistemler; şekildeki gibi sistem girdilerinin, sistem çıktıların ve gerekli işlemlerin tayiniyle kolayca modellenir. Bundan dolayıdır ki Simulink, MATLAB kadar programlama ve bilgisayar tecrübesi gerektirmeksizin, blokların kullanımıyla çözüm üretimi sağlar.



Şekil 3.27. Basite indirgenmiş dinamik lineer veya dinamik non-lineer sistem modeli

Simulink hali hazırda blok kütüphaneleri sunmaktadır. Bu bloklar sayesinde her türlü alana (matematiksel ifadeler, sinyal işleme, elektrik devreleri vb.) ait gerçek sistemler modellenir. Bu bloklar Simulink çalışma penceresine atılır ve Simulink çalışma penceresinde bulunan bu bloklar arasında bağlantılar kurularak sistemler meydana getirilir (Uysal 2004).

Simulink blokları, dinamik sistemlere ait en küçük temel yapılardır. Bu yapılar bir kaynak veya bir çıkış olabileceği gibi bir ara işlem elemanı da olabilir.

Simulink blokları birleştirilerek blok diyagramları oluşturulur. Blok diyagramları, dinamik sistemlerin alt sistemleridir. Alt sistemler çalışma sayfasında kapalı bir kutu halinde Simulink özellikleri kullanılarak görüntülenebilir. İçlerinde birçok bloğu içerdiklerinden, farklı sayıda giriş ve çıkış bağlantıları bulunur. Bu alt

sistemler istenirse bir yazı veya resimle de ifade edilebilir. Bu alt sistemler arası bağlantılar kurularak dinamik sistemler oluşturulur (Uysal 2004).

Simulink blokları arasında bağlantı yapılmadan sistemler anlamsızdır. Bloklar arası bağlantı yapılarak bir çalışma algoritması ve hiyerarşisi belirlenir. Sırayla birbirini takip eden bloklarda değer aktarımı olurken blok; kendisine gelen değeri özelliğine göre işler ve bir çıkış değeri üretir. Bu bloğa bağlı diğer bir blok iletilen değeri koruyarak alır. Burada bir değer korunumu söz konusudur.

Simulink bloklarını özellikleri bakımından zamana bağlı bloklar ve zamandan bağımsız bloklar olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Örneğin, bloklar arasında yer alan integral aldırma bloğunun (Integrator) çıkış değerleri zamana göre değişmektedir. Burada zaman olarak belirtilen değerler, dinamik sistem simülasyonunun başlangıç ve bitiş zamanlarıdır. Nitekim matematiksel kazanç (Gain) sağlayan Simulink bloğu, kendisine iletilen değeri bir katsayıyla çarpar ve çıkış ifadesi üretir. Bu çıkış ifadesi zamana göre değişmez.

Belirtildiği gibi bloklar birer fonksiyondur. Bu fonksiyonlar, zaman değeri ( $t$ ), giriş değeri ( $u$ ) ve mevcut değer ( $x$ ) değişkenlerine bağlı M-Fonksiyonlardır. Her bloğun çalışması; çıkış, sürekli zamanlı ve örnekleme zamanlı alt fonksiyonlarını içeren bir ana fonksiyon ile gerçekleştirilir. MATLAB tarafından Simulink uygulamasının matematiksel modele çevriminde otomatik olarak bu alt fonksiyonlar tanımlanır. Fakat bu fonksiyonlar kullanıcıya görüntülenmez. Sürekli zamanda çalışılıyorsa; çıkış fonksiyonu ve sürekli zaman fonksiyon değerleri hesaplanır. Örnekleme zamanlı çalışılıyorsa; çıkış fonksiyonu ve örnekleme zaman fonksiyonu değerleri hesaplanır. Bir Simulink sisteminin çalıştırılması ile her blok için iki değer üretilir. Birinci değer her bloğun çıkış değeri, diğer değer de zaman değeridir. Böylelikle zamana bağlı çıkış değerleri bir matris olarak MATLAB çalışma alanında ve Simulink çalışma penceresinde tanımlanır (Uysal 2004).

### 3.2.2. Bulanık mantık

Günlük hayatta rastgele kullanılan birçok terim genellikle bulanık bir yapıya sahiptir. Bir şeyi tanımlarken, bir olayı açıklarken, komut verirken ve daha birçok durumda kullanılan sözel veya sayısal ifadeler bulanıklık içermektedir. Bu terimlere örnek olarak; *yaşlı, genç, uzun, kısa, sıcak, soğuk, ılık, bulutlu, parçalı bulutlu, güneşli, hızlı, yavaş, çok, az, biraz, fazla, çok az, çok fazla* gibi daha pek çok sözel terim gösterilebilir. Genel olarak bir olayı anlatıp, bir durum karşısında karar verirken bu tür kesinlik ifade etmeyen terimler kullanılır. Kişinin yaş durumuna göre ona; *yaşlı, orta yaşlı, genç, çok yaşlı* ve *çok genç* denilir. Yolun kayganlık ve rampa durumuna göre arabanın gaz veya fren pedalına *biraz daha yavaş* veya *biraz daha hızlı* basılır. Çalışılan odanın ışığı yetersiz ise *biraz artırılır*, yeterinden fazla ise *biraz azaltılır*. Bütün bunlar insan beyninin belirsiz ve kesinlik içermeyen durumlarda nasıl davrandığına ve olayları nasıl değerlendirip, tanımlayıp, komut verdiğine dair birer örnektir.

Bulanık mantığın ve bu mantık kurallarını kullanan bulanık küme teorisinin Lotfi A. Zadeh tarafından geliştirilip 1965 tarihli makalesinde (Zadeh 1965) yayınlanmasından sonra belirsizlik içeren sistemlerin incelenmesi yeni bir boyut kazanmıştır. 1965’ te ortaya atılmasına rağmen, bulanık küme kavramı ancak 1970’li yılların ikinci yarısından sonra kullanılmaya başlanmıştır. Bunda özellikle Zadeh’ in 1965’ deki ilk makalesinden daha fazla etkili olan ve bulanık mantığın belirsizlik içeren sistemlere uygulanabilirliğini açıklayan sonraki makaleleri etkili olmuştur. 1980’ li yılların ikinci yarısından sonra Japonların ürünlerinde bulanık mantığı kullanmalarıyla da hız kazanarak, günümüzdeki doruk noktasına gelmiştir. Artık hemen her alanda bulanık mantık uygulamalarına rastlamak mümkündür (Altaş 1999).

Bulanık mantığın uygulama alanlarından bazıları:

- Otomatik Kontrol Sistemleri: Robotik, otomasyon, akıllı denetim, izleme sistemleri, ticari elektronik ürünler, vb.

- Bilgi Sistemleri: Bilgi depolama ve yeniden çağırma, uzman sistemler, bilgi tabanlı sistemler, vb.
- Görüntü Tanımlama: Görüntü işleme, makine görüntülemesi.
- Optimizasyon: Fonksiyon optimizasyonu, süzgeçleme, eğri uydurma, vb.

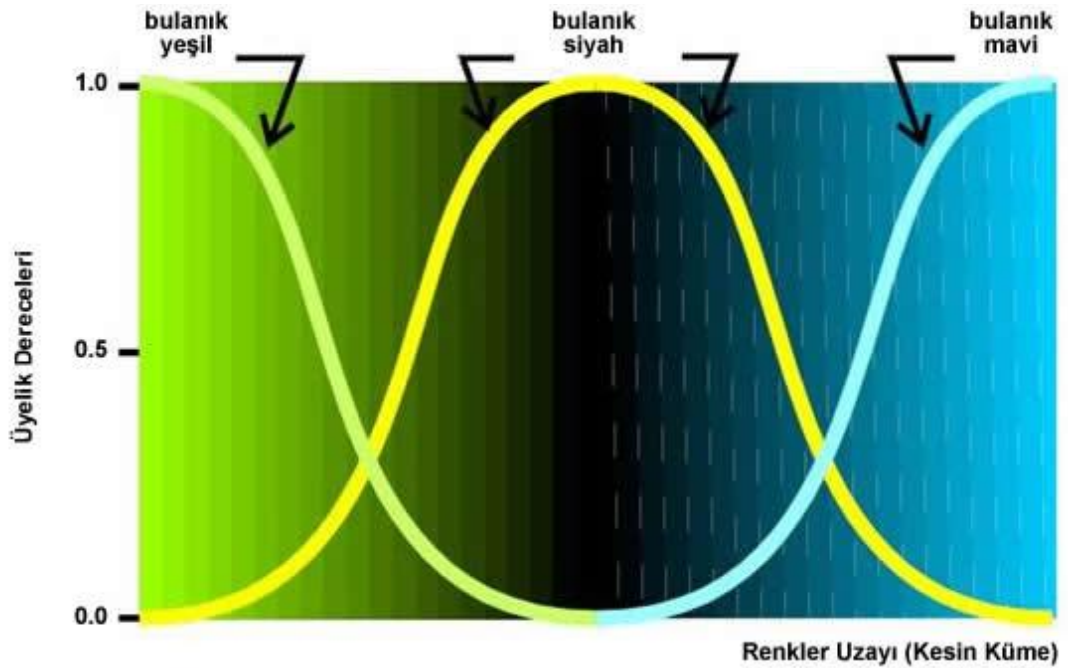
Bulanık mantığın Mamdani ve arkadaşları tarafından denetim sistemlerine ilk uygulanmasından sonra, bu alanda oldukça önemli adımlar atılmaya başlanmıştır. Öyle ki denetim sistemleri bulanık mantığın en fazla uygulandığı alan olarak günümüze kadar gelmiştir. Klasik denetim sistemlerindeki aksine, sistemlerin matematiksel modeline gerek duymadan, sadece istenilen çıkışı verecek şekilde girişe uygulanan işaret ayarlandığından, bulanık denetimin işlemesi tıpkı usta bir insanın o sistemi denetlemesine benzer. Yani bulanık mantık ve bulanık küme işlemleri kullanılarak makinelerin insanlar gibi kararlar vermesi sağlanabilmektedir. Bulanık mantığın bu uyumluluğunun yapay sinir ağları veya genetik algoritmalarla desteklenmesi sonucu nöral-bulanık (Neural Fuzzy) sistemler veya genetik-bulanık sistemler ortaya çıkmıştır. Böylece akıllı (intelligent) sistemler de hızlı bir gelişme kaydetmeye başlamıştır (Altaş 1999).

### 3.2.2.1. Bulanıklık kavramı

Bulanık mantık konusunun temel elemanı bulanık kümedir. Bulanık kümeler, üyelik fonksiyonları ile karakterize edilirler. Aslında üyelik fonksiyonları da birer bulanık sayıdır. Bulanık mantık, üyelik fonksiyonu ve bulanık sayı gibi kavramların iyi anlaşılabilmesi için öncelikle bulanıklık kavramının anlaşılması gereklidir. Şekil 3.28' de, renkler uzayında tanımlı yeşil, siyah ve mavi renkleri değişik tonlara sahiptirler. Örneğin soldan sağa doğru ilerledikçe yeşilin renk tonu koyulaşmakta ve siyaha dönüşmektedir. Şeklin tam ortasında renk tam siyahken, sağa doğru ilerleme sürdürülürse, siyahın renk tonu da açılıp mavi olmaktadır. Görüleceği gibi yeşilin bitip siyahın başladığı, siyahın bitip mavinin başladığı noktalar kesin bir şekilde ayrıştırılamamaktadır. Verilen üç renk bölgesi de kesin, sabit bir renk tonuna sahip değildir. Dolayısıyla bu üç renk bölgesini birer bulanık küme ile temsil etmek uygun olacaktır. Verilen şekilde sadece yeşil, siyah ve mavinin tonları bulunduğundan,

sadece bu üç rengi temsil eden yeşil, siyah ve mavi bulanık kümelerini tanımlamak yeterli olacaktır (Altaş 1999).

Şekil 3.28' in sol yarısındaki ilk bölgede yeşilden siyaha bir geçiş vardır. Dolayısıyla, bu bölgede sağa doğru ilerledikçe, bölgenin yeşil bulanık kümesine ait olma derecesi azalırken, siyah bulanık kümesine ait olma derecesi de artmaktadır. Şekil 3.28' in sağ yarısındaki bölgede ise siyahtan maviye bir geçiş vardır. Dolayısıyla, şeklin ortasından sağa doğru ilerledikçe, bu bölgenin siyah bulanık kümesine ait olma derecesi azalmakta, mavi bulanık kümesine ait olma derecesi de artmaktadır. Yeşil-siyah tonlarının hâkim olduğu şeklin sol yarısının mavi bulanık kümesinde hiç bir üyeliği yoktur. Benzer şekilde siyah-mavi tonlarının hâkim olduğu sağ yarının da yeşil bulanık kümesinde hiçbir üyeliği bulunmamaktadır (Altaş 1999).



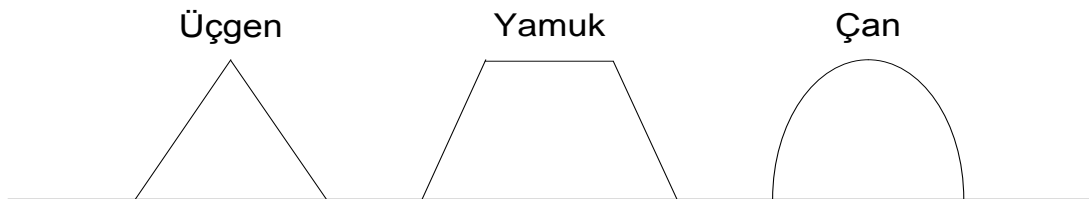
Şekil 3.28. Yeşil, Siyah ve Mavi Bulanık Renk Kümeleri (Altaş 1999)

### 3.2.2.2. Bulanık kümeler

Bulanık sistemlerin en temel elemanı bulanık kümedir. Bulanık bir küme, değişik üyelik yani ait olma derecelerine sahip elemanları olan bir küme türüdür. Böyle bir küme, elemanlarının her birine 0 ile 1 arasında üyelik değeri atayabilen bir üyelik fonksiyonu ile karakterize edilebilir. Bulanık kümelerin bu tanımı, bulanık kümelerle ilgili ilk çalışmaları yapan ve bu konunun mucidi olarak kabul edilen Lotfi A Zadeh tarafından 1965 yılında yayınladığı makalesinde yapılmaktadır. Kümeye dahil olmayan elemanların üyelik değerleri 0, kümeye tam dahil olanların üyelik değerleri de 1 olarak atanmaktadır. Kümeye dahil olup olmadıkları belirsiz olan elemanlara ise belirsizlik durumuna göre 0 ile 1 arasında değerler atanır. Oysa kesin küme teorisinde belirsiz eleman diye bir şey söz konusu değildir. Bir eleman ya kümeye dahildir ya da tamamı ile kümenin dışındadır. Dolayısıyla kesin kümelerde bir elemanın alabileceği üyelik değeri ya 0 ya da 1 dir (Altaş 1999).

### 3.2.2.3. Üyelik fonksiyonları

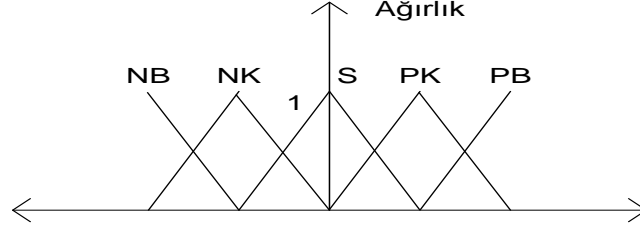
Üyelik fonksiyonları pratiksel olarak yapılan yorumlamaların yaklaşık olarak ifade edilebilen matematiksel fonksiyonlarıdır. Üyelik fonksiyonları biçimsel olarak denetlenen sürecin özelliklerine göre değişik şekiller alabilir. En çok kullanılan üyelik fonksiyonları Şekil 3.29’ da gösterildiği üzere üçgen, çan ve yamuktur.



Şekil 3.29. Çeşitli Biçimde Üyelik Fonksiyonları

Üyelik fonksiyonları sadece Şekil 3.29’ daki biçimlerle sınırlı olmayıp çok çeşitli fonksiyonlar kullanılabilir. Kullanılan bu fonksiyonların şekli sistemin çalışmasını iyi veya kötü yönde etkileyebilmektedir.

Şekil 3.30’ da üyelik işlevlerine örnek olarak NK, NB, S, PK, PB olmak üzere 5 ayrı etiket tanımlanmıştır.



Şekil 3.30. Beş ayrı etiketli üyelik fonksiyonları örneği

#### 3.2.2.4. Giriş değişkenlerinin bulanıklaştırılması

Giriş değişkenlerinin bulanıklaştırılması için üyelik fonksiyonları kullanılır. Giriş değerlerinin seçilen üyelik fonksiyonlarındaki karşılığı bize bulanık değeri verecektir. Bulandırıcı (fuzzifier) olarak adlandırılan bu kısım giriş değişkenlerini (gerçek sayıları) ölçer, onlar üzerinde bir ölçek değişikliği yapar ve bulanık kümelere dönüştürür. Yani onlara bir etiket vererek dilsel nicelik kazandırır (Özdemirci 2002).

#### 3.2.2.5. Kural kümesinin tanımı ve bulanık çıkarım

Girişler üzerinden muhakeme ve bir sonuca varma EĞER-O HALDE (IF-THEN) türünden kuralların kullanımı ile gerçekleştirilir. Çıkarım amaçları ile kullanılan temel bulanık mantık kuralları aşağıda verilmiştir.

a and b	$\min(a' \text{ nin üyelik ağırlığı ; } b' \text{ nin üyelik ağırlığı})$
a or b	$\max(a' \text{ nin üyelik ağırlığı ; } b' \text{ nin üyelik ağırlığı})$
not a	$(1-a)' \text{ nin üyelik ağırlığı}$

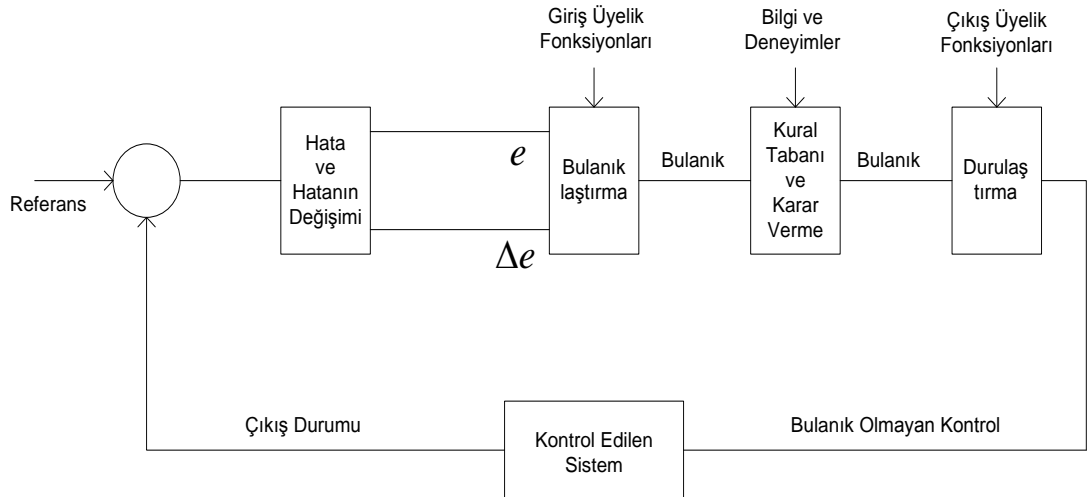
Bulanık mantık kuramı, makinelerle insanların öznel verilerini işleyebilme ve onların deneyimlerinden ve öngörülerinden yararlanarak çalışabilme yeteneği verir ve böylece onların kullanıcıya daha yakın olmasını sağlar (Özdemirci 2002).

### 3.2.2.6. Durulama

Bulanık mantık sisteminin çıkışının bir gerçek değer olması gerektiğinden durulama (defuzzification) işlemi gereklidir. Böyle bir dönüşüm dilsel terimlerin temel değişken ile aralarındaki ilişkiyi göz önüne almalıdır. Çıkarım motorunun bulanık küme çıkışları (birden fazla çıkış olabilir) üzerinde gerekli ölçek değişikliklerini yapar ve bunları gerçel sayılara dönüştürür. Durulama işlemi; ağırlık merkezi, soldakilerin maksimumları, sağdakilerin maksimumları ve maksimumların ortalaması metotlarından biri kullanılarak yapılabilir (Özdemirci 2002).

Bulanık mantık kontrolörü dört ana bileşenden oluşur (Akalın 2000):

- Giriş sinyalinin bulanıklaştırılması,
- Kural tabanı,
- Karar verme mantığı,
- Kontrol elemanları için sinyal üretmek üzere çıkış sinyalinin durulaştırılması.



Şekil 3.31. Bulanık Mantık Akış Diyagramı (Akalın 2000)

#### 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Daha önceki bölümlerde yük frekans kontrolüyle ilgili verilen bilgiler ve yaklaşımlar sonucunda çalışmanın bu bölümünde güç sistemi modellerinin MATLAB – SİMULİNK’ te çalışması incelenmiştir. Önce iki kontrol bölgesinden oluşan bir güç sistemi modeli, daha sonra da dört kontrol bölgesinden oluşan bir güç sistemi modeli için gözlemler yapılmıştır.

##### 4.1. İki Bölgeli Bir Güç Sisteminde Yük Frekans Kontrolü Uygulaması

İnceleme yapılacak olan iki bölgeli güç sistemi modeli Şekil 4.1’ de; güç sistemiyle ilgili sistem parametreleri de aşağıda verilmiştir:

$$T_{g1} = T_{g2} = 0,08 \text{ sn}$$

$$T_{t1} = T_{t2} = 0,3 \text{ sn}$$

$$R_1 = R_2 = 2,4 \text{ Hz / MW}$$

$$K_{p1} = K_{p2} = 120 \text{ Hz / MW}$$

$$T_{p1} = T_{p2} = 20 \text{ sn}$$

$$a_{12} = -1$$

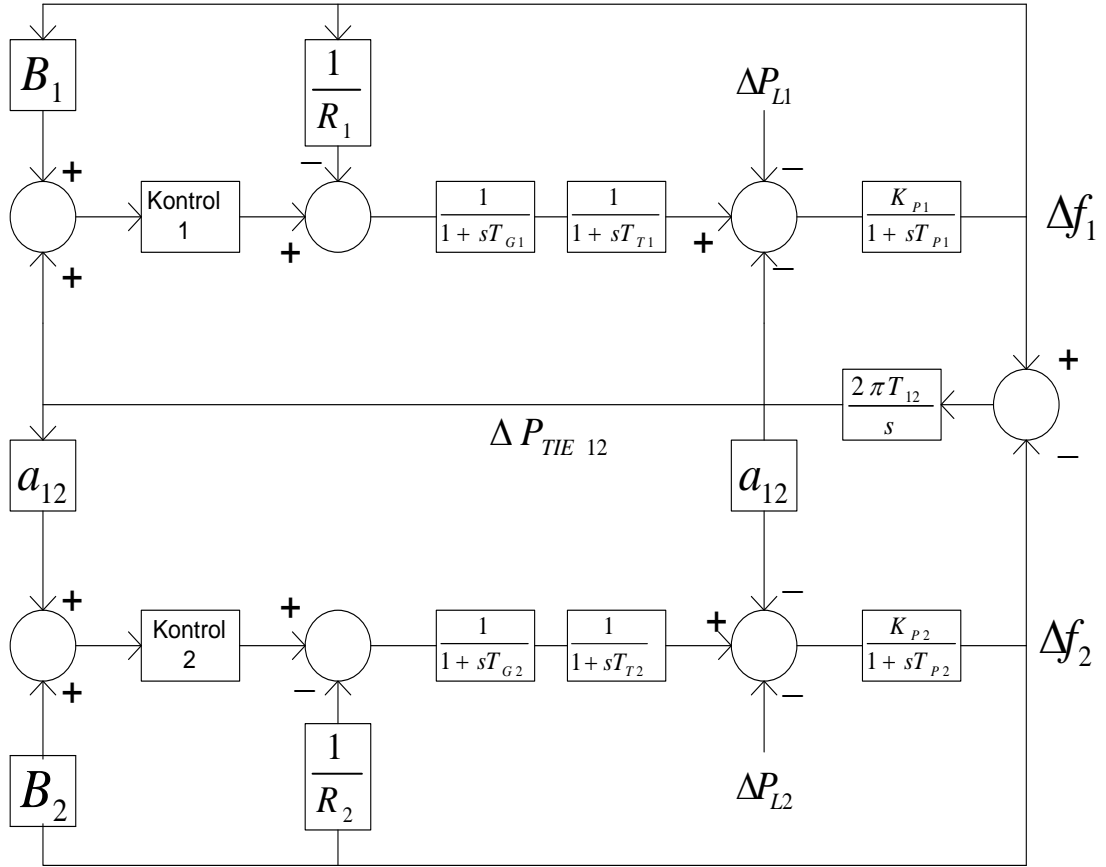
$$T_{12} = 0,086$$

$$\beta_1 = \beta_2 = 0,425 \text{ MW / Hz}$$

$$|B_1| = |B_2| = 0,425$$

$$D_1 = D_2 = 8,33 \cdot 10^{-3} \text{ MW / Hz}$$

$$\Delta P_{L1} = 0,01 \text{ pu}$$



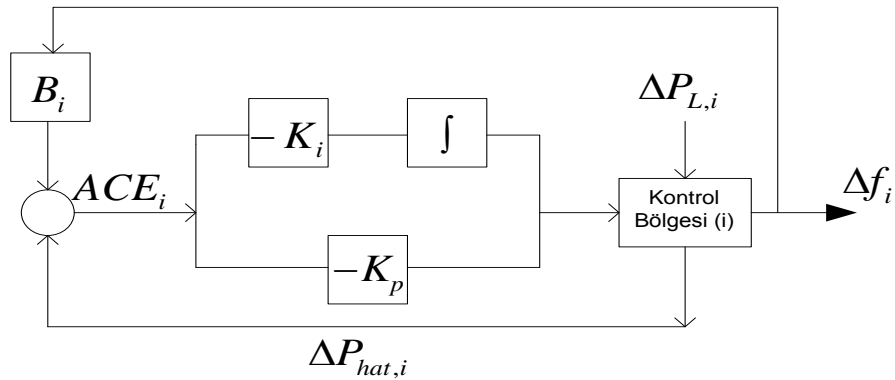
Şekil 4.1. İki Bölge Bir Güç Sisteminde Yük Frekans Kontrolü Modeli

Şekil 4.1' de verilen iki bölge güç sistemi modeli ve bu sisteme ait parametreler ile önce PI kontrolör kullanılarak, daha sonra da bu çalışmada önerilen bulanık mantık kontrolör kullanılarak sistemdeki her bir bölgenin frekans sonuçları ve bölgeler arasındaki bağlantı hattının sonucu ilerleyen kısımlarda verilmiştir. Daha sonra da bu güç sistemi modeli ve aynı sistem parametreleriyle daha önceden yapılmış kontrol çalışmalarının sonuçlarıyla önerilen kontrolör ile elde edilen sonuçlar arasında karşılaştırma yapılmıştır.

#### 4.1.1. PI Kontrolör kullanılarak yapılan yük frekans kontrolü uygulaması

Yük frekans kontrolünün amacı frekans ve bağlantı hattı güç alışverişini istenilen değere ulaştırmak üzere bir  $u$  kontrol sinyali üretmektir. Yük frekans kontrolünde kullanılan PI kontrolörün blok diyagramı Şekil 4.2' de görülmektedir. Kontrol vektörü ise şu şekildedir:

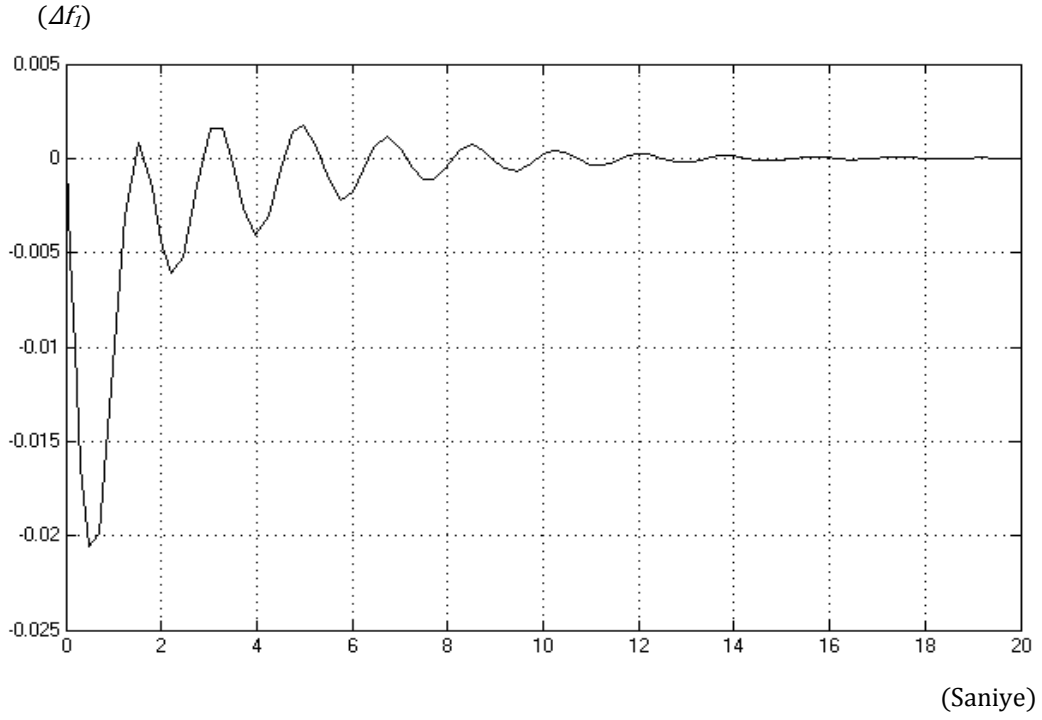
$$U_i(t) = -K_{p,i}ACE_i(t) - K_{i,i} \int ACE_i(t)dt \quad (4.1)$$



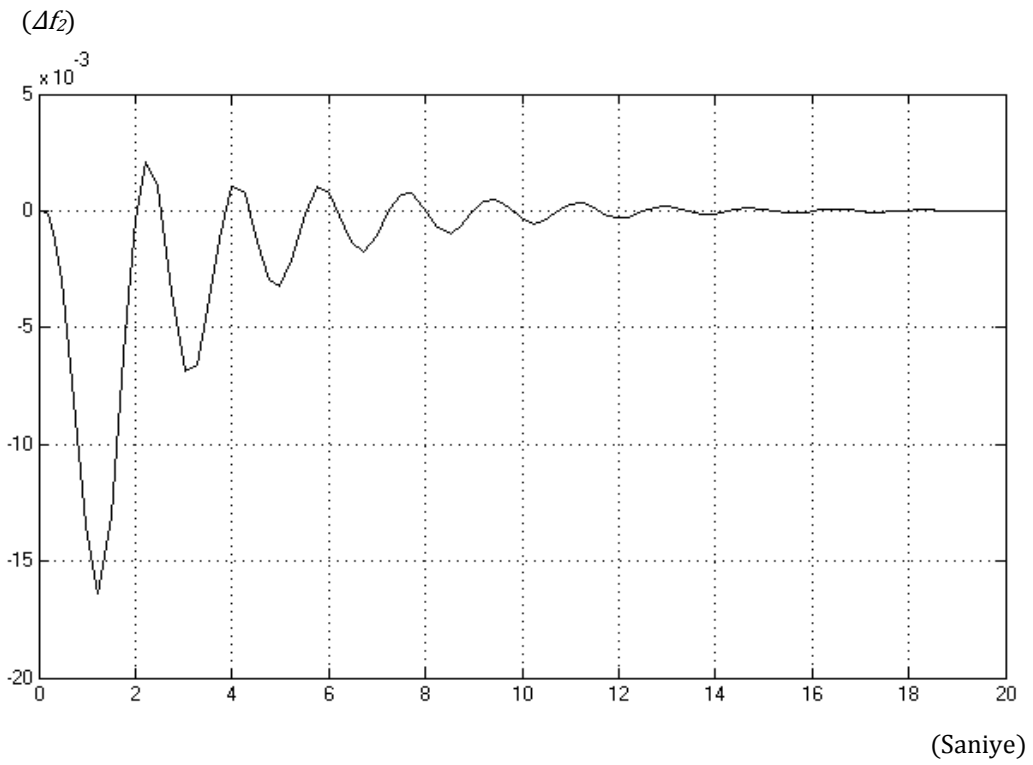
Şekil 4.2. i.Bölge İçin PI Kontrolör

Yük frekans kontrolünde kullanılan PI kontrolörün  $K_p$  ve  $K_i$  kazançlarının değişmesi sistem cevabını farklı şekillerde etkileyebilmektedir. Şekil 4.1' de verilen iki bölgeli güç sistemi ve bu sisteme ait parametreler kullanılarak farklı  $K_i$  ve  $K_p$  kazançları için sistem cevabı gözlemlenmiştir.

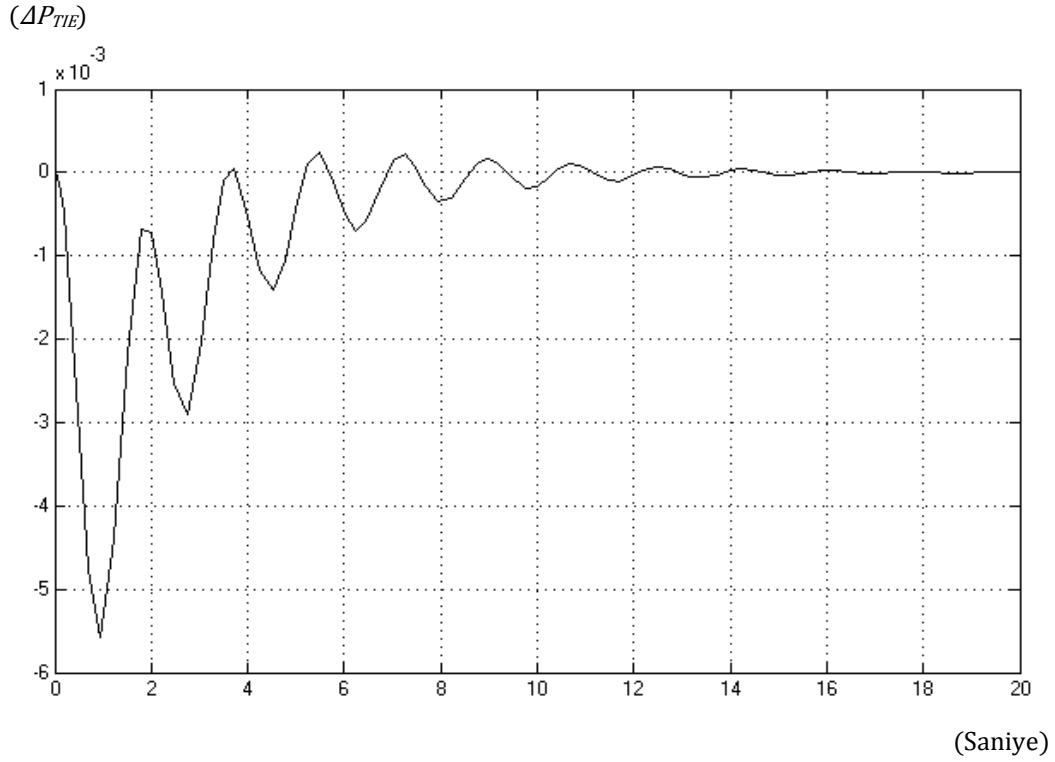
Her iki kontrol bölgesi için  $K_p$  kazancı 0.1;  $K_i$  kazancı 0.5 olarak uygulandığı zaman sistemin birinci bölgede oluşan 0.01 pu' lik adım yük değişimine verdiği cevap; Şekil 4.3' te  $\Delta f_1$ , Şekil 4.4' te  $\Delta f_2$ , Şekil 4.5' te ise  $\Delta P_{TIE}$  olmak üzere gösterilmiştir.



Şekil 4.3.  $K_p = 0.1$  ve  $K_i = 0.5$  iken Sistem Cevabı  $(\Delta f_1)$



Şekil 4.4.  $K_p = 0.1$  ve  $K_i = 0.5$  iken Sistem Cevabı  $(\Delta f_2)$



Şekil 4.5.  $K_p = 0.1$  ve  $K_i = 0.5$  iken Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE}$ )

Her iki kontrol bölgesi için aynı  $K_p$  ve  $K_i$  kazançları uygulandığı zaman sistemin birinci bölgede oluşan 0.01 pu' lik adım yük değişimine verdiği cevaplar ile ilgili veriler Tablo 4.1' de detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 4.1. Farklı  $K_p$  ve  $K_i$  Değerleri İçin Sistemden Elde Edilen Sonuçlar

	$K_p$	0.1	0.2	0.3
	$K_i$	0.5	0.75	1
$\Delta f_1$	Maksimum Bozulma	-0.0206	-0.0200	-0.0196
	Oturma Zamanı (%5 Bandı için)	9.56	15.42	41.24
$\Delta f_2$	Maksimum Bozulma	-0.0164	-0.0155	-0.0142
	Oturma Zamanı (%5 Bandı için)	10.3	16.16	41.99
$P_{TIE}$	Maksimum Bozulma	-0.0056	-0.0051	-0.0046
	Oturma Zamanı (%5 Bandı için)	6.52	9.67	23.8

Tablo 4.1' de de görüldüğü gibi, oransal ve integral kazançlarının büyük değerlerde seçilmesi sistem cevabının oturma zamanını uzatmakta fakat maksimum bozulmayı da küçültmektedir. Bunun tam tersi olarak bu kazanç değerlerinin küçük seçilmesi de oturma zamanını azaltırken maksimum bozulmayı arttırmaktadır.

Yukarıda yapılan uygulamadan farklı olarak; eğer her bir kontrol bölgesi için farklı  $K_p$  ve  $K_i$  kazançları uygulanırsa sistemin birinci bölgede oluşan 0.01 pu' lik adım yük değişimine verdiği cevaplar ile ilgili veriler Tablo 4.2' de detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 4.2. Her İki Bölgede Birbirinden Farklı  $K_p$  ve  $K_i$  Kazanç Değerleri Uygulandığında Sistemden Elde Edilen Sonuçlar

1.Bölge	$K_p$	0.2	0.1	0.1
	$K_i$	0.5	0.75	1
2.Bölge	$K_p$	0.3	0.2	0.3
	$K_i$	0.75	1	0.5
$\Delta f_1$	Maksimum Bozulma	-0.0205	-0.0209	-0.0207
	Oturma Zamanı (%5 Bandı için)	14.20	18.28	13.68
$\Delta f_2$	Maksimum Bozulma	-0.0156	-0.0162	-0.0150
	Oturma Zamanı (%5 Bandı için)	14.97	19.13	15.3
$P_{TIE}$	Maksimum Bozulma	-0.0050	-0.0052	-0.0051
	Oturma Zamanı (%5 Bandı için)	7.92	10.71	8.01

#### 4.1.2. Bulanık Mantık Kontrolör kullanılarak yapılan yük frekans kontrolü uygulaması

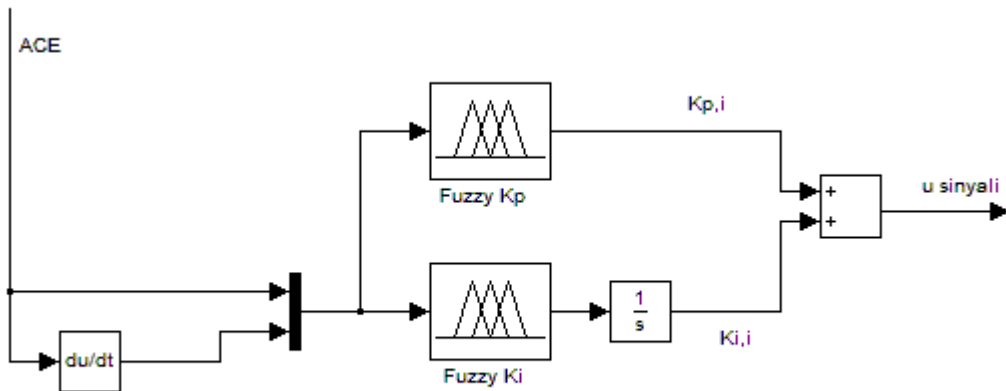
Bulanık mantık, insan düşüncesi ve insan dili açısından klasik mantığa göre daha fazla benzerlik gösterir. Temel olarak gerçek dünyanın belirsiz doğasını kavramanın etkin anlamını sağlar. Bir bulanık mantık kontrolörün ana ögesi bulanık anlam ve çıkarımın birleşme kurallarıyla ilişkili olan dilsel kontrol alt kümesidir.

Temel olarak, bulanık mantık ile kontrol, uzman bilgisine dayanan dilsel kontrol stratejisini otomatik kontrol stratejisine dönüştürebilen bir algoritma sağlar (Akalin 2000).

Bu çalışmada amaçlanan kontrolörün tasarımı üç aşamaya bölünebilir. Bunlar; giriş değişkenleri (ACE,  $\Delta ACE$ ), bulanık mantık kurallarının belirlenmesi ve durulaştırmasıdır.

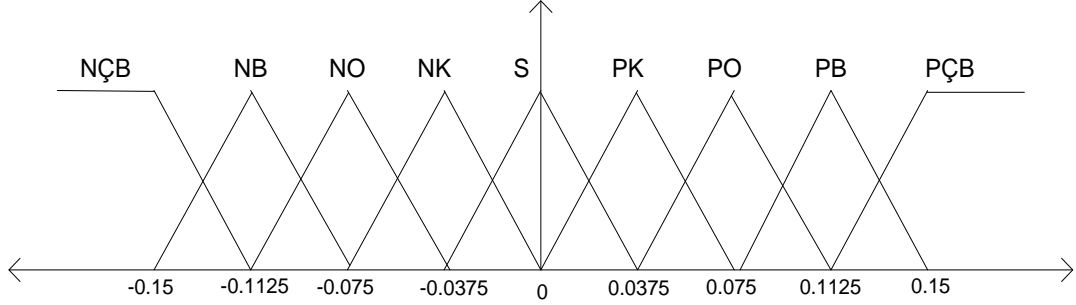
ACE, otomatik üretim kontrolünün gerçekleştirilmesinde esastır. ACE ve türev ACE ( $\Delta ACE$ ) istenilen kontrolün sağlanmasında belirleyici iki faktördür. Bulanık mantık kontrolörün giriş değişkenleri yukarıda da belirtildiği gibi ACE ve ACE' nin türevi (Hata Değişimi), çıkışı ise aynı zamanda sistemin giriş sinyalleri olan  $K_{p,i}$  ve  $K_{i,i}$  sinyalleridir.

Bu çalışmada önerilen kontrolör yapısına ait blok diyagram Şekil 4.6' da verilmiştir ve bu çalışma için ACE ve  $\Delta ACE$ , genliğine ve işaretine bağlı olarak dokuz kontrol bölgesine bölünmüştür. Bunlar; negatif çok büyük (NÇB), negatif büyük (NB), negatif orta (NO), negatif küçük (NK), sıfır (S), pozitif küçük (PK), pozitif orta (PO), pozitif büyük (PB) ve pozitif çok büyüktür (PÇB).

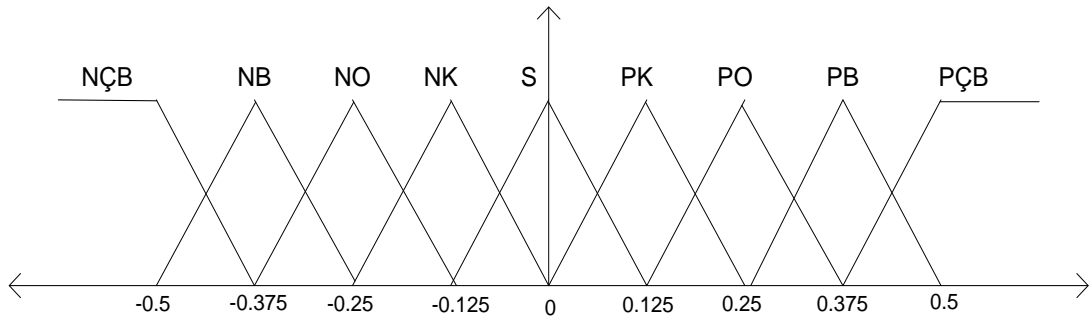


Şekil 4.6. Önerilen Bulanık Mantık Kontrolör Yapısı Modeli

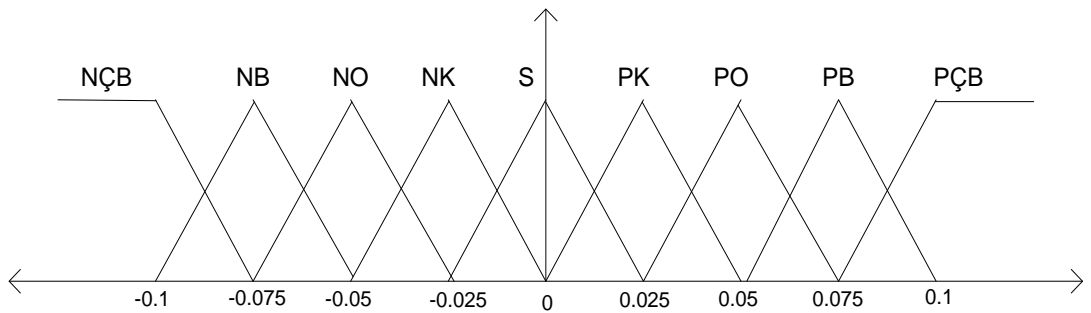
Tasarlanan bulanık mantık kontrolöründe giriş değişkenleri ACE ve  $\Delta ACE$  için üyelik fonksiyonları Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10' da verilmiştir.



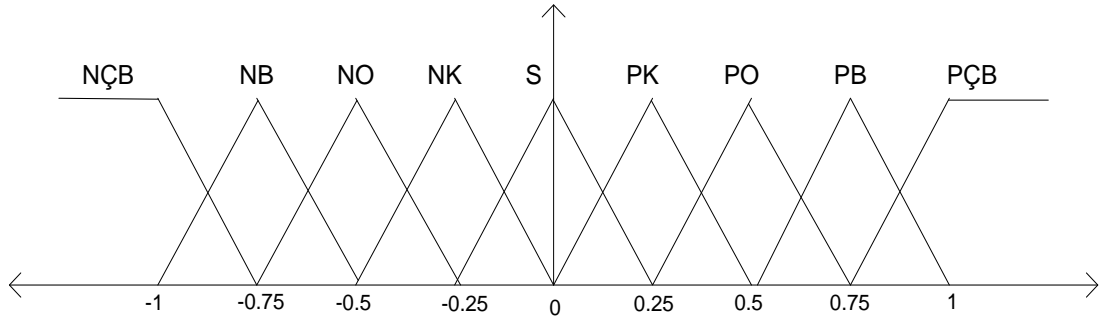
Şekil 4.7. Giriş Değişkeni ACE için Üyelik Fonksiyonları ( $K_{p,i}$ )



Şekil 4.8. Giriş Değişkeni  $\Delta ACE$  için Üyelik Fonksiyonları ( $K_{p,i}$ )



Şekil 4.9. Giriş Değişkeni ACE için Üyelik Fonksiyonları ( $K_{i,i}$ )



Şekil 4.10. Giriş Değişkeni  $\Delta ACE$  için Üyelik Fonksiyonları ( $K_{i,i}$ )

Giriş değişkenleri için verilen üyelik fonksiyonları Şekil 4.11' te verilen bulanık mantık kuralları ile çalışmaktadır. Belirtilen bulanık mantık kural tablosu oluşturulurken; başlangıçta maksimum bozulmayı küçültmek amacıyla  $K_{p,i}$  ve  $K_{i,i}$  kazançlarının büyük seçilmesi ve daha sonra oturma zamanını küçültmek için bu kazanç değerlerinin aşamalı olarak küçültülmesi yaklaşımından yararlanılmıştır.

		$\Delta ACE$								
		NÇB	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB	PÇB
ACE	NÇB	PÇB	PÇB	PÇB	PB	PB	PO	PO	PK	S
	NB	PÇB	PB	PB	PB	PO	PO	PK	S	NK
	NO	PÇB	PB	PO	PO	PK	PK	S	NK	NO
	NK	PB	PB	PO	PK	PK	S	NK	NO	NO
	S	PB	PO	PK	PK	S	NK	NK	NO	NB
	PK	PO	PO	PK	S	NK	NK	NO	NB	NB
	PO	PO	PK	S	NK	NK	NO	NO	NB	NÇB
	PB	PK	S	NK	NO	NO	NB	NB	NB	NÇB
	PÇB	S	NK	NO	NO	NB	NB	NÇB	NÇB	NÇB

Şekil 4.11.  $i$ . Bölge için  $K_{p,i}$  ve  $K_{i,i}$  Sinyallerine ait Bulanık Mantık Kuralları Tablosu

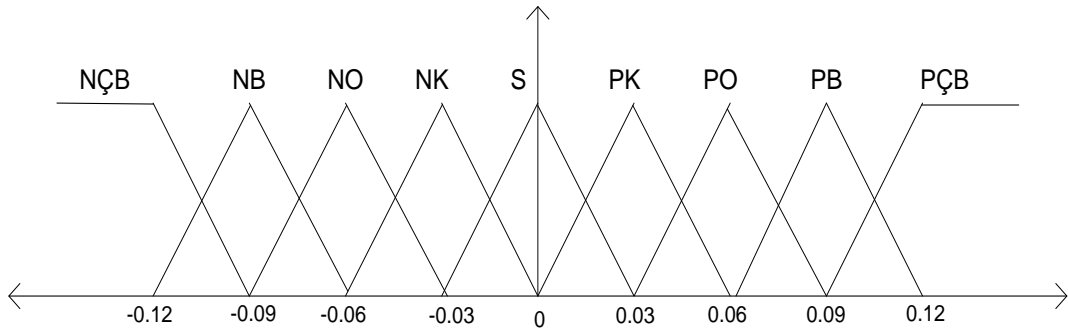
Amaçlanan bulanık mantık kontrolöründe; sisteme uygulanacak çıkış sinyalleri (Kontrolör Kazançları); ACE ve  $\Delta ACE$  giriş değişkenlerine ve bulanık mantık kural tablosuna göre elde edilmektedir. Girişler üzerinden muhakeme ve bir sonuca ulaşma IF – THEN (EĞER – O HALDE) türünden kuralların kullanımı ile gerçekleştirilir. Yani örneklendirilecek olursa;

EĞER; ACE = NÇB ve  $\Delta ACE = NK$  ise; O HALDE K = PB

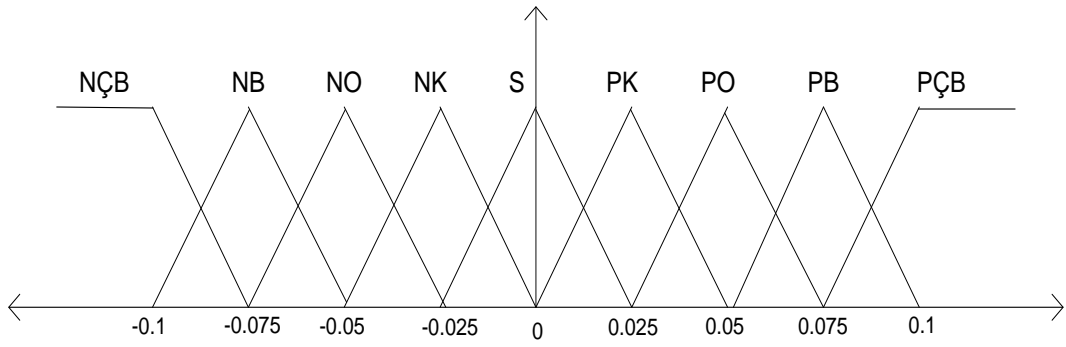
olacaktır. Bu çalışmada tasarlanan bulanık mantık kontrolöründe temel bulanık mantık kurallarından, kesişen kümeler kuralı kullanılmıştır.

a and b  $\min ( a' \text{ nin üyelik ağırlığı; } b' \text{ nin üyelik ağırlığı } )$

Buradaki *min* ifadesi her kural için gerçekleşme derecesini hesaplamakta ve ona göre çıkışı belirlemektedir. Durulama aşamasında kullanılan  $K_{p,i}$  ve  $K_{i,i}$  çıkış sinyalleri için üyelik fonksiyonları Şekil 4.12 ve Şekil 4.13' te verilmiştir.

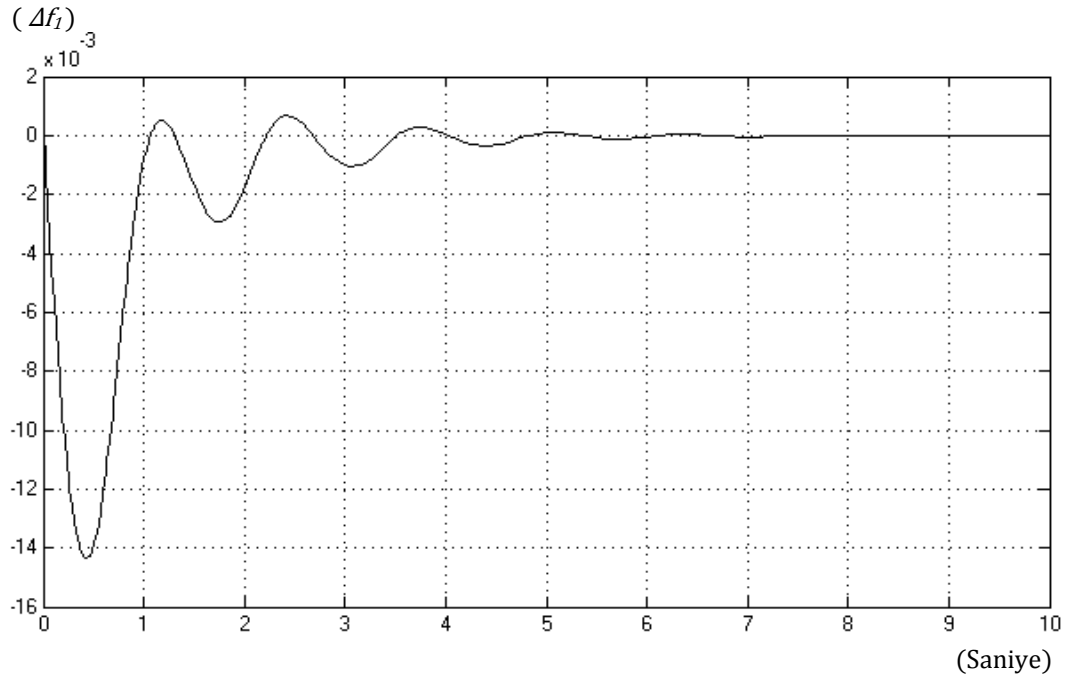


Şekil 4.12.  $K_{p,i}$  Çıkış Sinyali için Üyelik Fonksiyonları

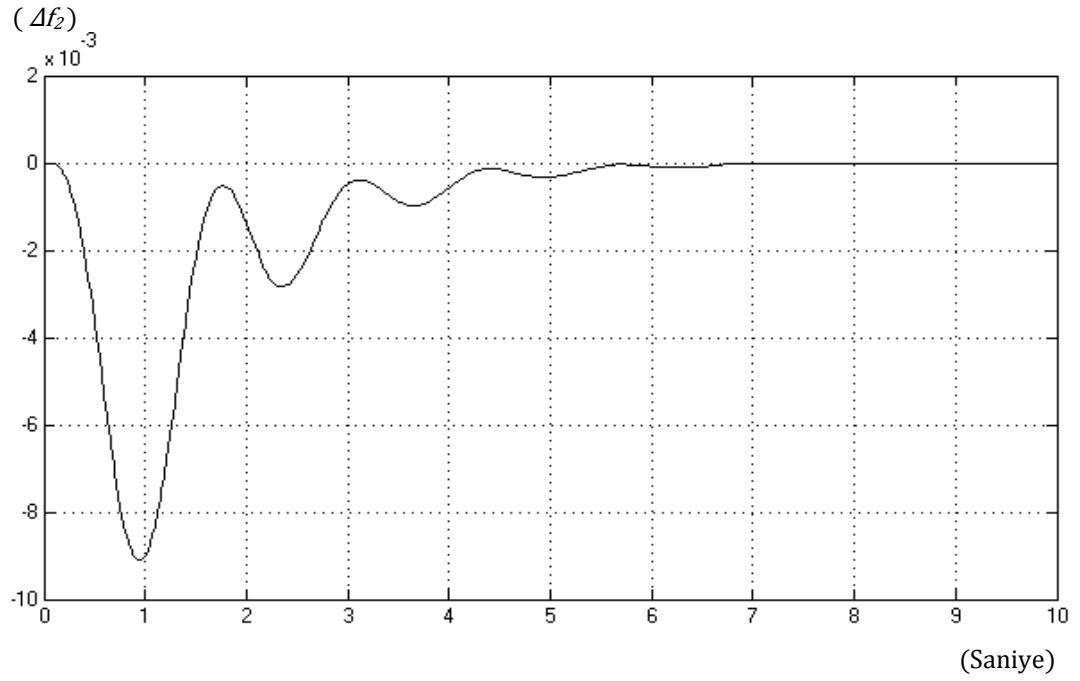


Şekil 4.13.  $K_{i,i}$  Çıkış Sinyali için Üyelik Fonksiyonları

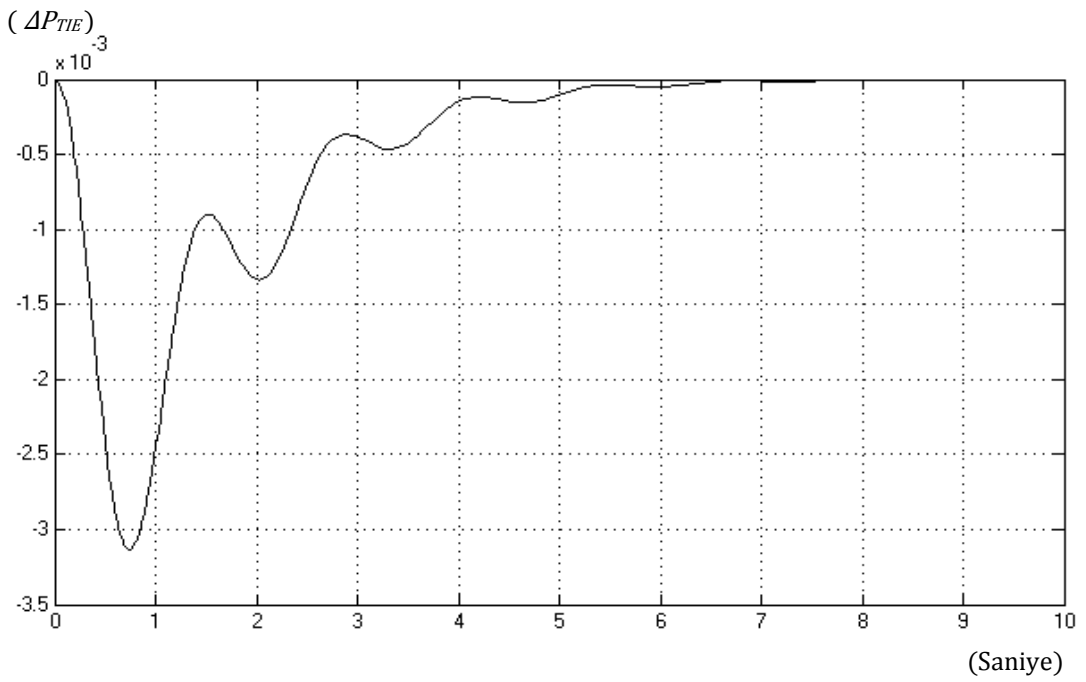
Tasarlanan bulanık mantık kontrolörü Şekil 4.1' deki iki bölgeli güç sistemi modelinde kontrolör olarak kullanılmıştır. Güç sisteminin parametreleri PI kontrolörle yapılan uygulamadaki ile yine aynıdır. Sistemin birinci bölgede oluşan 0.01 pu' lik adım yük değişimine verdiği cevap; Şekil 4.14' te  $\Delta f_1$ , Şekil 4.15' te  $\Delta f_2$ , Şekil 4.16' da ise  $\Delta P_{TIE}$  olmak üzere gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta f_1$ )



Şekil 4.15. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta f_2$ )



Şekil 4.16. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE}$ )

### 4.1.3. Kontrolörler arasındaki performans karşılaştırması

Bulanık mantık kontrolörüne ait sistem cevabını gösteren şekillerden de gözlendiği gibi bulanık mantık kontrolörü, PI kontrolöre göre daha iyi bir performans göstermiştir. Uygulaması yapılan birçok farklı  $K_p$  ve  $K_i$  değerlerinin hepsine göre bulanık mantık kontrolörü sistemi daha kısa sürede kararlı hale getirip, frekans hatalarını daha çabuk kontrol altına almıştır. Yapılan bulanık mantık algoritmasında sistemin kendini daha çabuk toparlaması bulanık mantık kontrolörünün sistem performansını daha olumlu kılmıştır.

Yapılan bu yorumların dışında bulanık mantık kontrolörünün değişebilecek sistem şartlarına göre de gerekli kontrolü yapabileceği unutulmamalıdır.

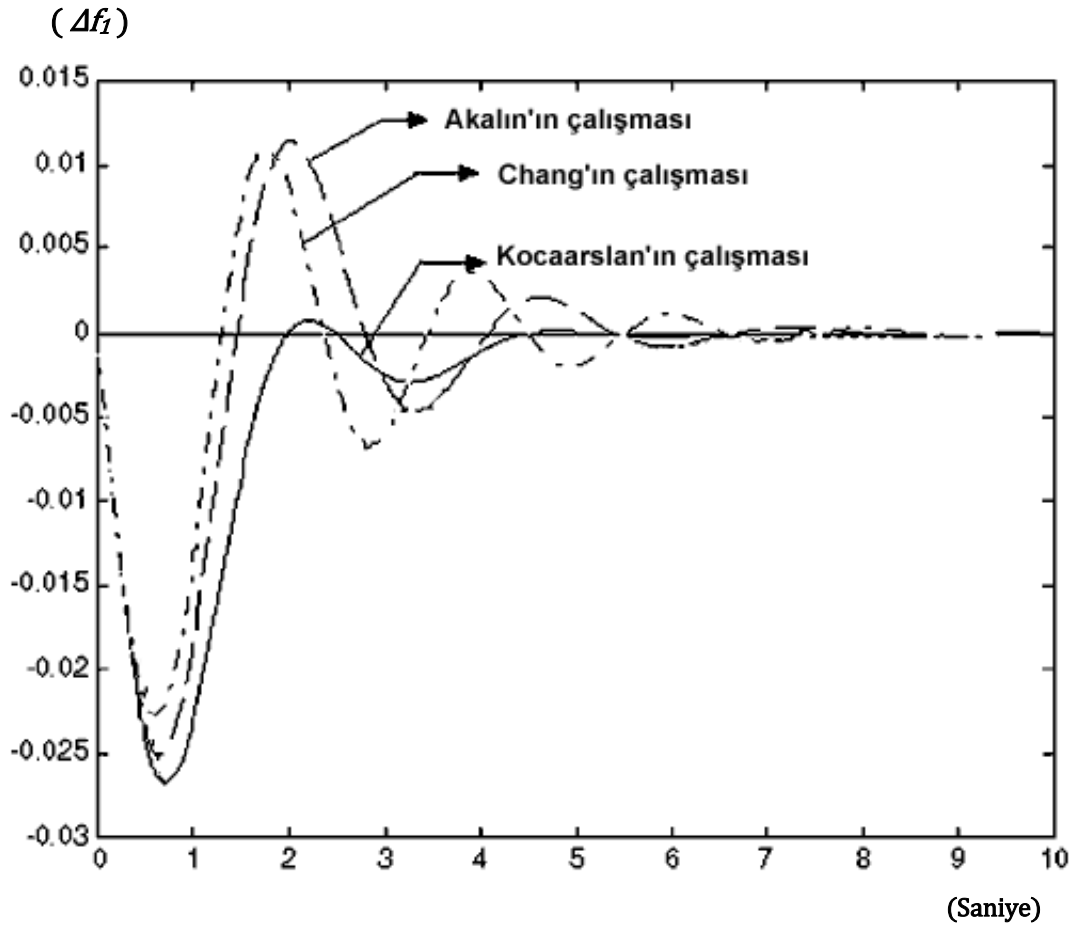
İnceleme yapılan iki bölgeli güç sistemi modeli ve bu modele ait sistem parametreleri kullanılarak daha önceki yıllarda çeşitli çalışmalar yapılmış ve bulanık mantık kullanılarak değişik kontrolör yapıları tasarlanmıştır. Tasarlanan her bir kontrolör yapısında bulanık mantık üyelik fonksiyonları için farklı kontrol aralıkları kullanılmıştır.

1997 yılında Chang C.S. ve Fu W. yaptığı çalışmada PI kontrolöre ait  $K_i$  ve  $K_p$  kazançlarının bulanık mantık ile bulunması üzerine tasarım yapmıştır (Chang ve Fu 1997). Benzer olarak Kurt G.A., 2000 yılındaki doktora tezi çalışmasında yine  $K_i$  ve  $K_p$  kazançlarını bulanık mantık ile elde etmiş ve kontrol bölgelerine uygulamıştır (Akalin 2000).

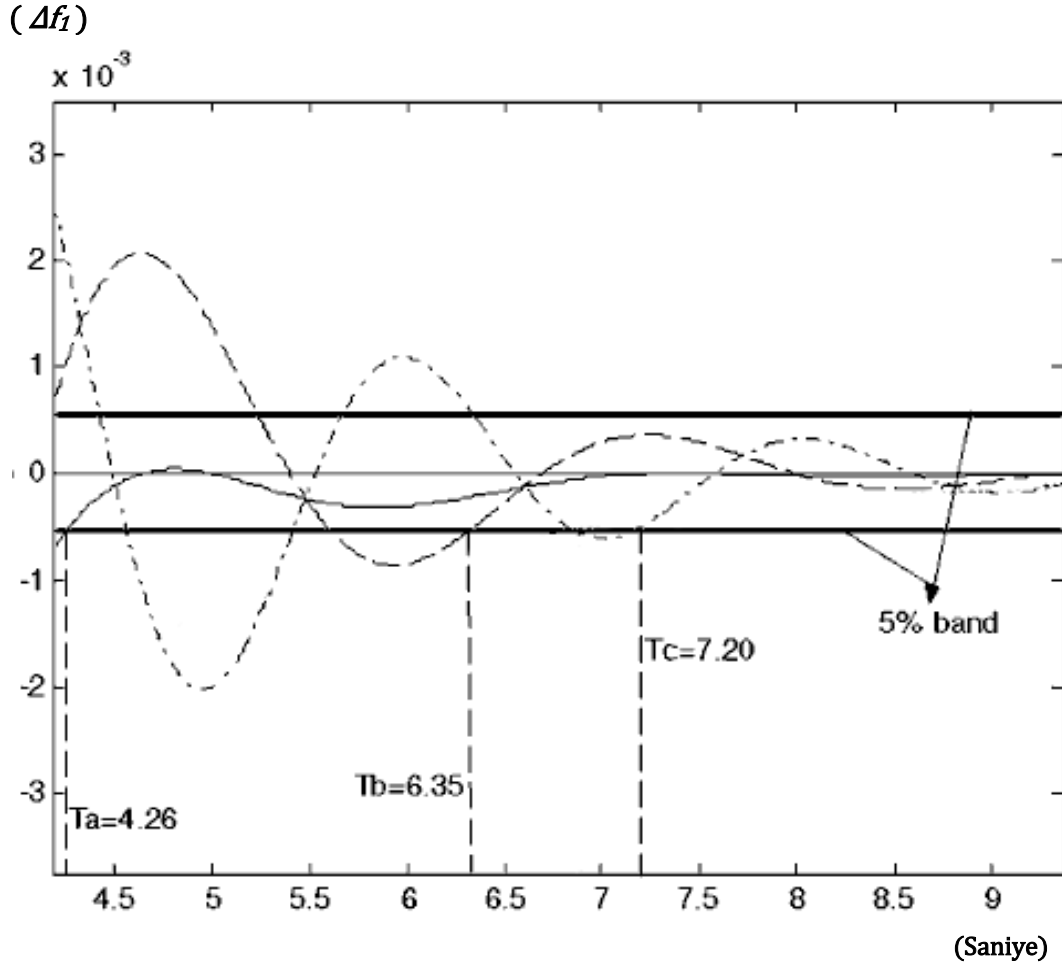
2004 yılında Kocaarslan İ. ve Çam E. tarafından yapılan çalışmada (Kocaarslan ve Çam 2005) tasarlanan FGPI ( Fuzzy Gain Scheduling of PI) kontrolörler ile bulanık mantık kontrolörleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca 2000 ve 1997 yıllarında yapılan çalışmalarla da kıyas yapılmıştır.

2005 yılında, Kocaarslan İ. ve Çam E. 2004 yılında yaptıkları çalışmayı geliştirmişlerdir (Kocaarslan ve Çam 2005). Benzer şekilde bu konuyla ilgili daha farklı çalışmalarda yapılmıştır.

Bu çalışmada önerilen kontrolör ile elde edilen sonuçlar yukarıda bahsedilen çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Birinci bölgede oluşan 0.01 pu' lik adım yük değişimi sonucunda oluşan  $\Delta f_1$  frekans cevabı bahsedilen çalışmalar için Şekil 4.17' de verilmiştir. Şekil 4.18' de ise, her bir çalışma için, uygulanan adım yük değişiminin %5 bandına oturma zamanı gösterilmiştir.



Şekil 4.17. Daha Önceden Yapılmış Olan Çalışmaların Sonuçları ( $\Delta f_1$ )

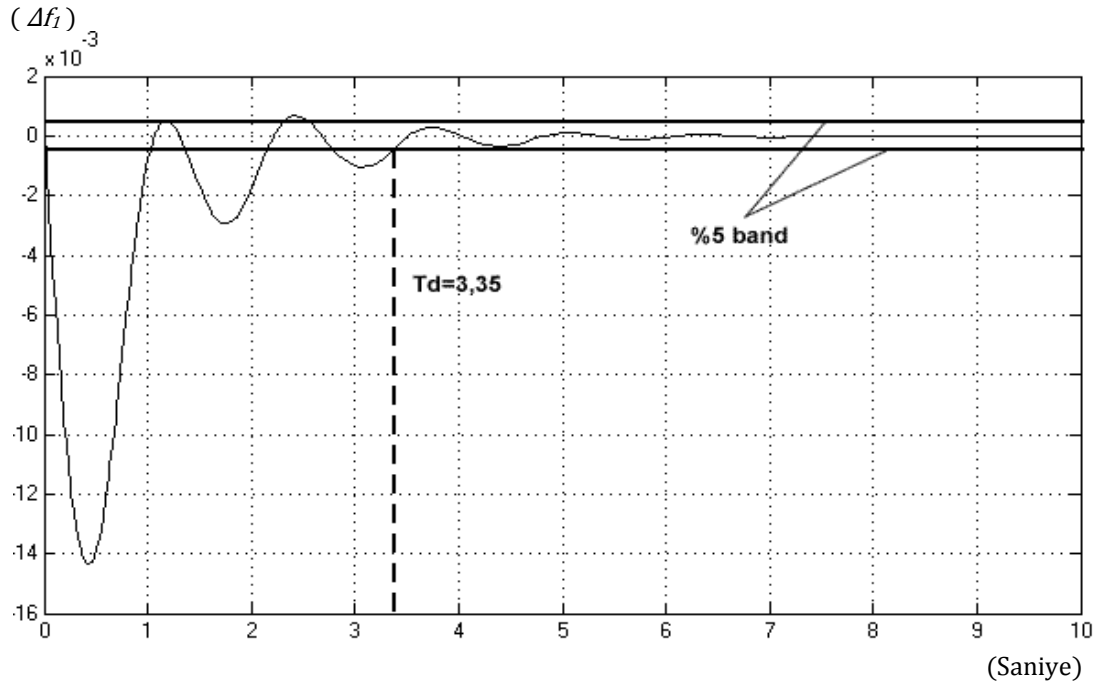


Şekil 4.18. Daha Önceden Yapılmış Olan Çalışmaların Yük Değişiminin %5' ini Temsil Eden Band Aralığına Oturma Zamanları

Şekil 4.18' de görülen  $T_a$  süresi Kocaarslan ve arkadaşının çalışması için oturma zamanını,  $T_b$  süresi Akalın' ın çalışması için oturma zamanını,  $T_c$  süresi Chang ve arkadaşının çalışması için oturma zamanını belirtmektedir.

Bu çalışmada önerilen kontrolöre ait Şekil 4.14' te verilen  $\Delta f_1$  frekans cevabı için %5 bandına oturma zamanı Şekil 4.19' da gösterilmiştir. Bu şekildeki  $T_d$  süresi önerilen kontrolörün oturma zamanını belirtmektedir.

Sonuç olarak iki bölgeyi bir güç sistemi modeli için tasarlanan kontrolör diğer çalışmalara göre birinci bölgede oluşan 0.01 pu' lik adım yük değişimi için %5 bandına oturma zamanını daha çabuk gerçekleştirmiştir. Ayrıca maksimum bozulma değeri de diğer çalışmalara göre daha küçüktür. Sonuçlar ile ilgili veriler Tablo 4.3' te verilmiştir.



Şekil 4.19. Önerilen Kontrolör İçin Yük Değişiminin %5' ini Temsil Eden Band Aralığına Oturma Zamanı

Tablo 4.3. Sonuçlar ile İlgili Verilerin Karşılaştırılması

	Oturma Zamanı (%5 band)	Maksimum Bozulma
Kocaarslan' in Çalışması (Ta)	4.26 sn	-0.027
Akalın' in Çalışması (Tb)	6.35 sn	-0.025
Chang' in Çalışması (Tc)	7.20 sn	-0.022
Önerilen Çalışma (Td)	3.35 sn	-0.0145

## 4.2. Dört Bölge Bir Güç Sisteminde Yük Frekans Kontrolü Uygulaması

Şekil 4.20' de verilen dört bölge güç sistemi modeline ait sistem parametreleri aşağıda verilmiştir:

$$K_{p1} = K_{p2} = K_{p3} = 120 \text{ Hz / MW}$$

$$T_{p1} = T_{p2} = T_{p3} = 20 \text{ sn}$$

$$K_{R1} = K_{R2} = K_{R3} = 0.333$$

$$T_{R1} = T_{R2} = T_{R3} = 10 \text{ sn}$$

$$T_{G1} = T_{G2} = T_{G3} = 0.2 \text{ sn}$$

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 2.4 \text{ Hz / MW}$$

$$T_{t1} = T_{t2} = T_{t3} = 0.3 \text{ sn}$$

$$a_{ij} = -1, \quad T_{ij} = 0.0707, \quad |B_1| = |B_2| = |B_3| = |B_4| = 0,425$$

$$T_{p4} = 13 \text{ sn}$$

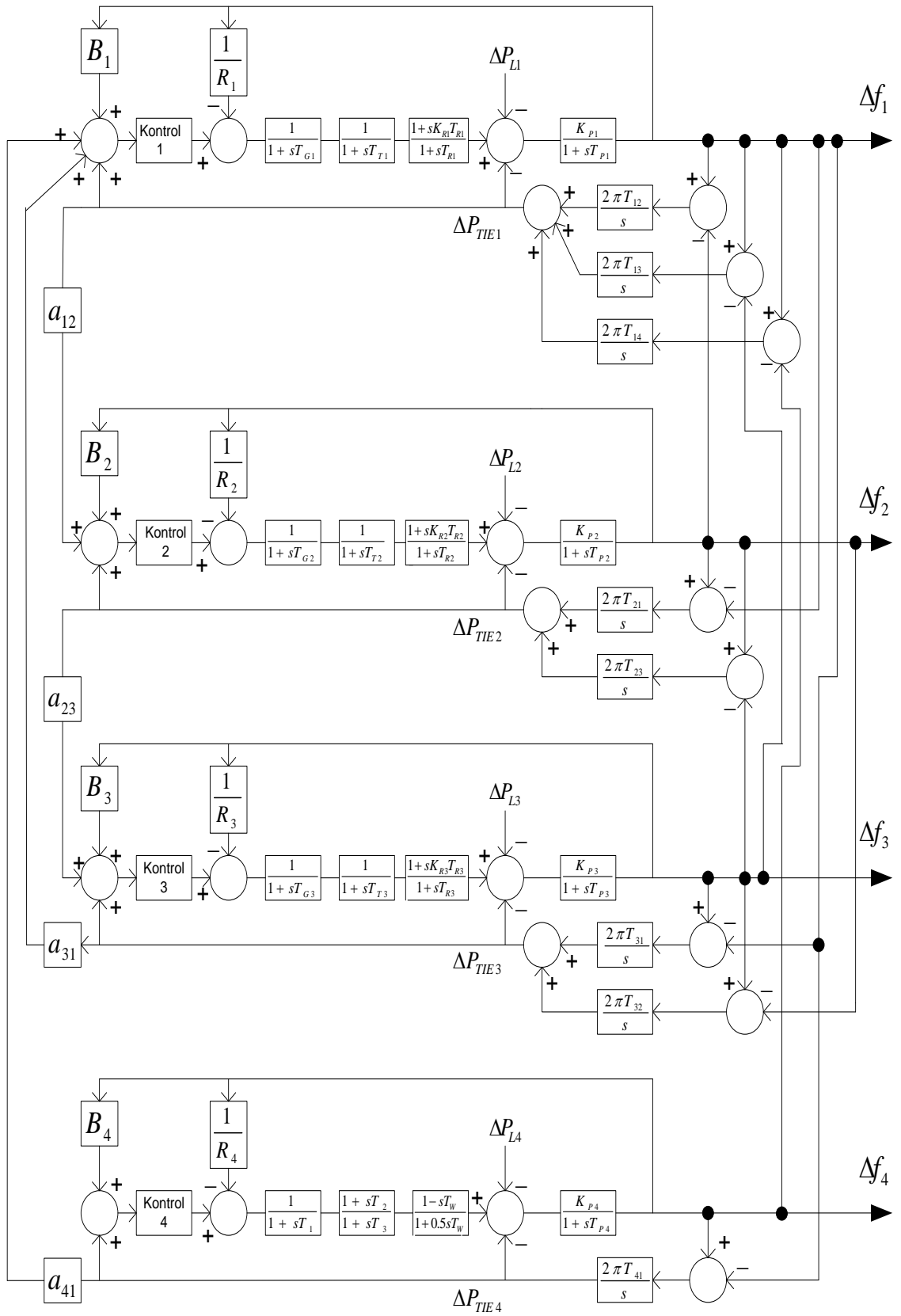
$$K_{p4} = 80 \text{ Hz / MW}$$

$$T_1 (4.\text{bölge}) = 48.7 \text{ sn}$$

$$T_2 (4.\text{bölge}) = 0.513 \text{ sn}$$

$$T_3 (4.\text{bölge}) = 10 \text{ sn}$$

$$T_w (4.\text{bölge}) = 1 \text{ sn}$$

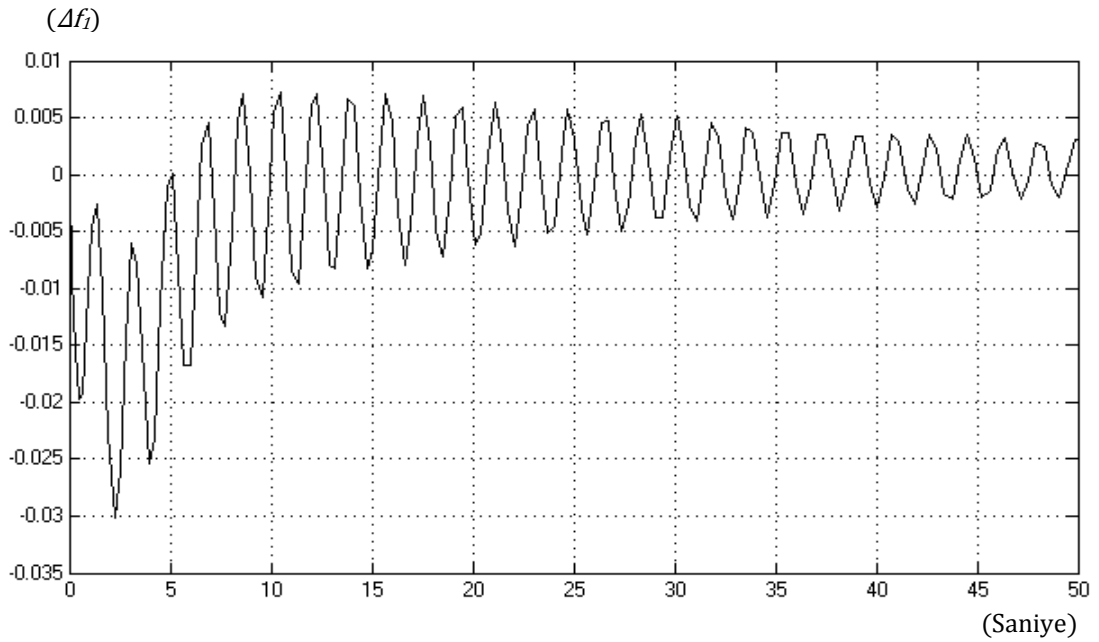


Şekil 4.20. Dört Bölge Bir Güç Sisteminde Yük Frekans Kontrolü Modeli

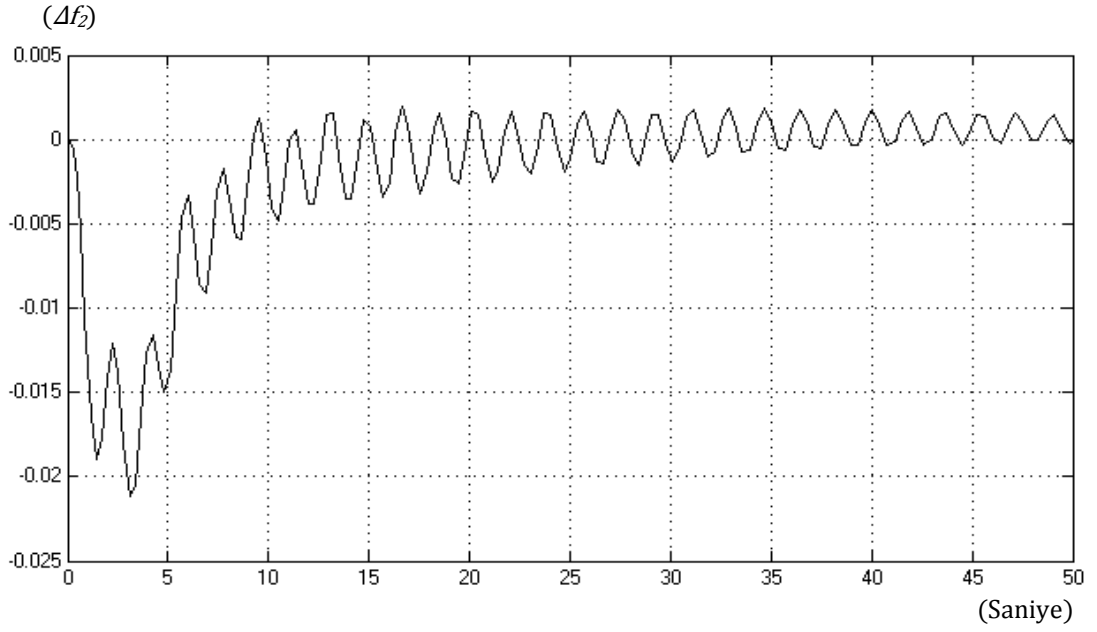
Şekil 4.20' de verilen dört bölgeyi güç sistemi modeli ve bu sisteme ait parametreler ile önce PI kontrolör kullanılarak, daha sonra da bu çalışmada önerilen bulanık mantık kontrolör kullanılarak sistemdeki her bir bölgenin frekans sonuçları ve bölgeler arasındaki bağlantı hattı sonuçları ilerleyen kısımlarda verilmiştir. Elde edilen sonuçlar aynı sistem modeli ve parametreleri ile yapılan başka bir çalışmayla karşılaştırılmıştır.

#### 4.2.1. PI Kontrolör kullanılarak yapılan yük frekans kontrolü uygulaması

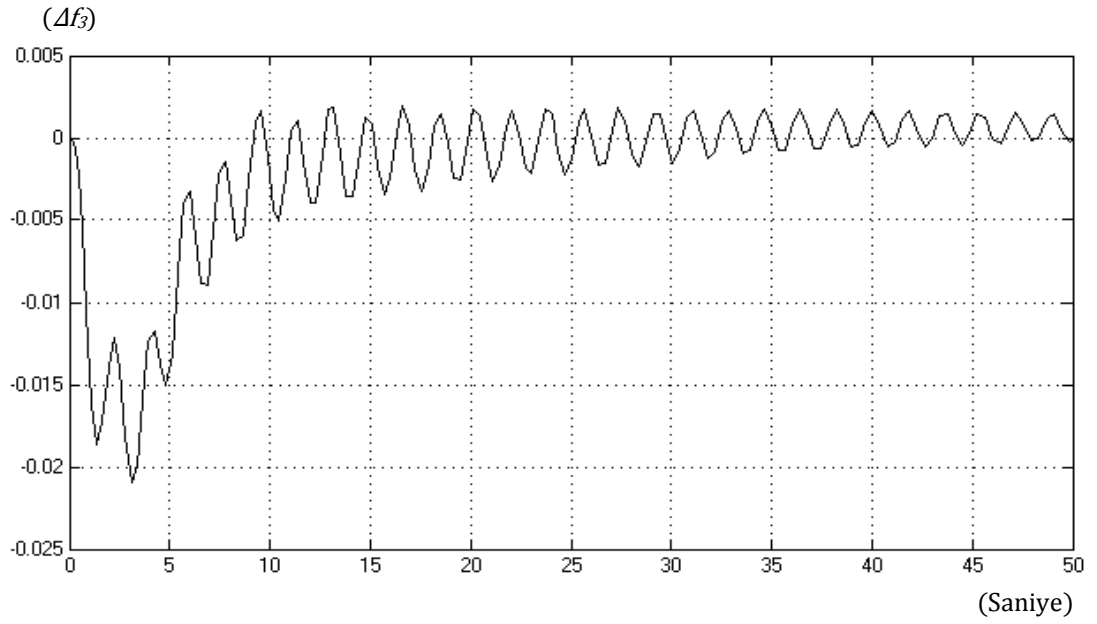
Her bir kontrol bölgesi için  $K_p$  kazancı 0.02;  $K_i$  kazancı 0.06 olarak uygulandığı zaman sistemin birinci bölgede oluşan 0.01 pu' lik adım yük değişimine verdiği cevap; Şekil 4.21' de  $\Delta f_1$ , Şekil 4.22' de  $\Delta f_2$ , Şekil 4.23' te  $\Delta f_3$ , Şekil 4.24' te  $\Delta f_4$ , Şekil 4.25' te  $\Delta P_{TIE1}$ , Şekil 4.26' da  $\Delta P_{TIE2}$ , Şekil 4.27' de  $\Delta P_{TIE3}$ , Şekil 4.28' de ise  $\Delta P_{TIE4}$  olmak üzere gösterilmiştir.



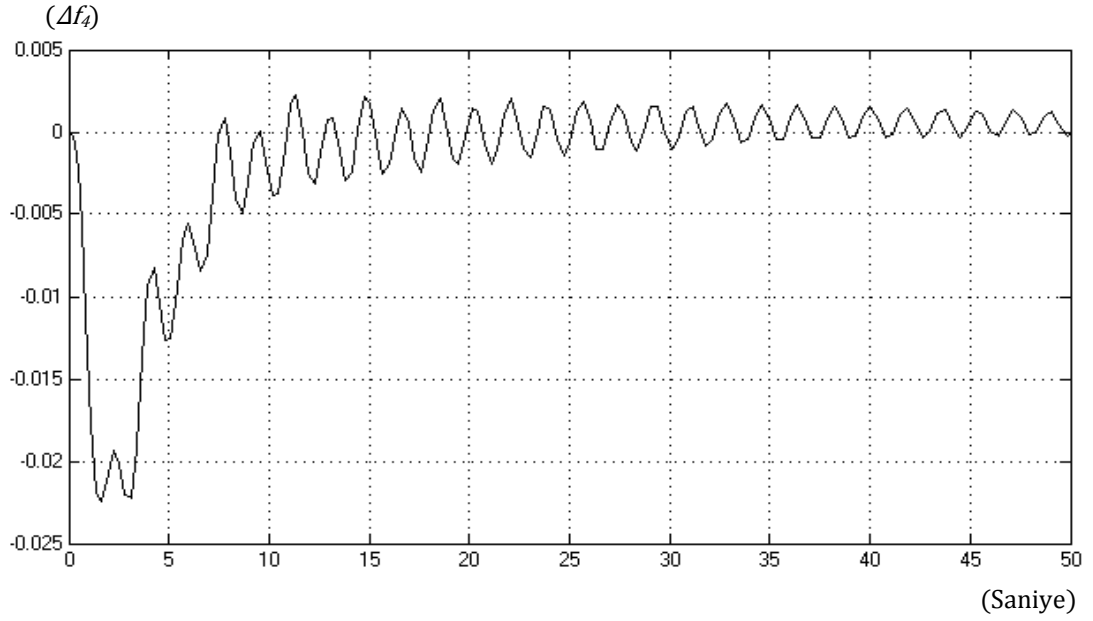
Şekil 4.21.  $K_p = 0.02$ ,  $K_i = 0.06$  ve  $\Delta P_{LI} = 0.01$  pu iken Sistem Cevabı ( $\Delta f_1$ )



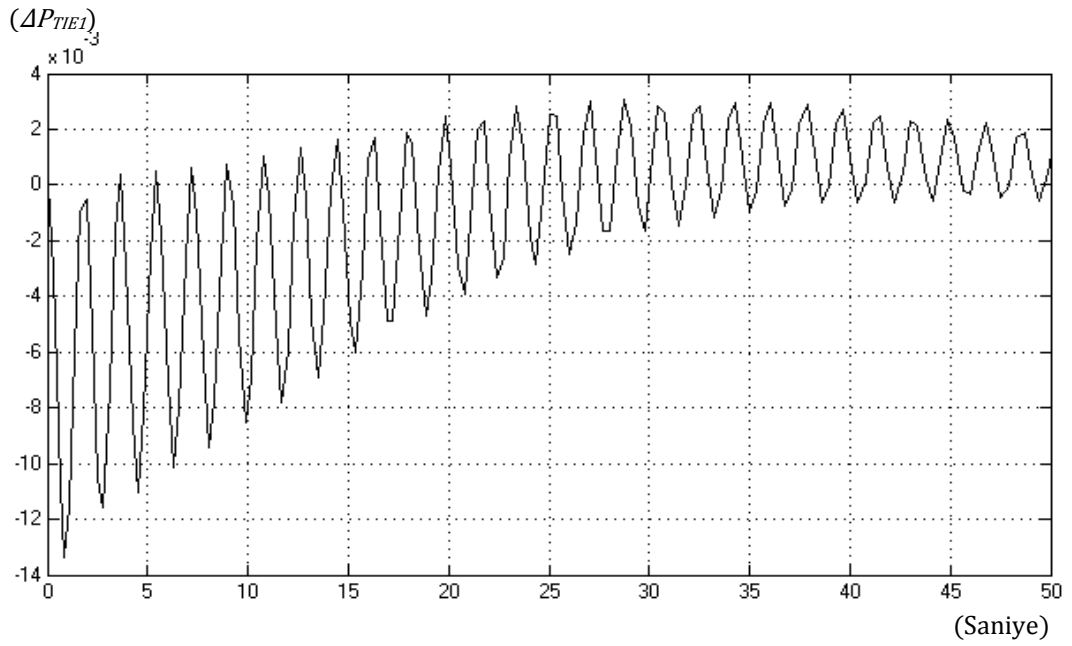
Şekil 4.22.  $K_p = 0.02$ ,  $K_i = 0.06$  ve  $\Delta P_{LI} = 0.01$  pu iken Sistem Cevabı  $(\Delta f_2)$



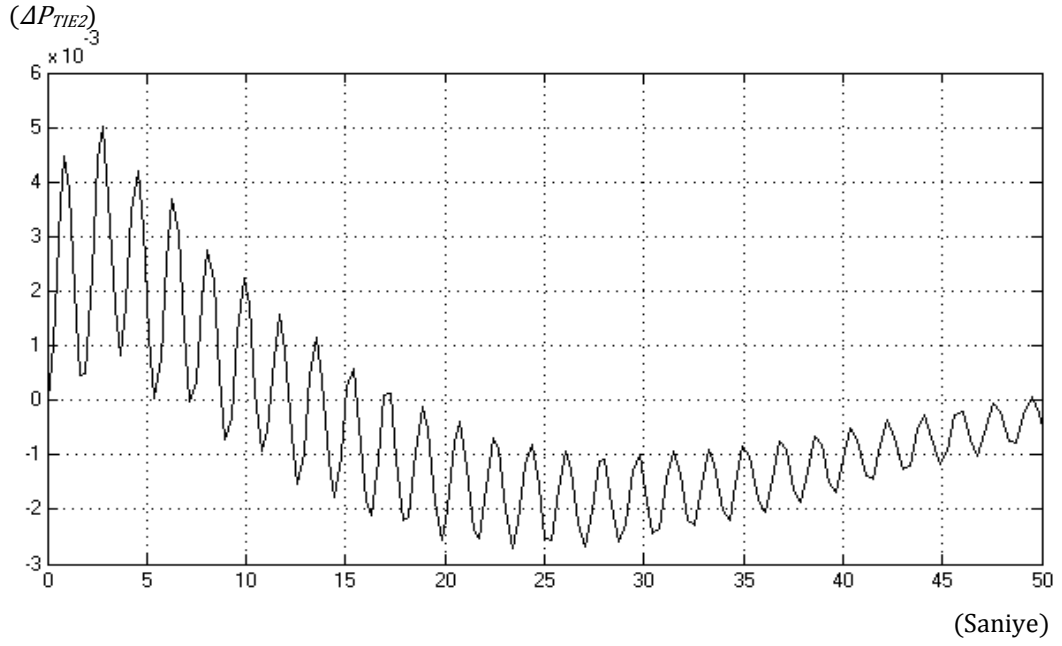
Şekil 4.23.  $K_p = 0.02$ ,  $K_i = 0.06$  ve  $\Delta P_{LI} = 0.01$  pu iken Sistem Cevabı  $(\Delta f_3)$



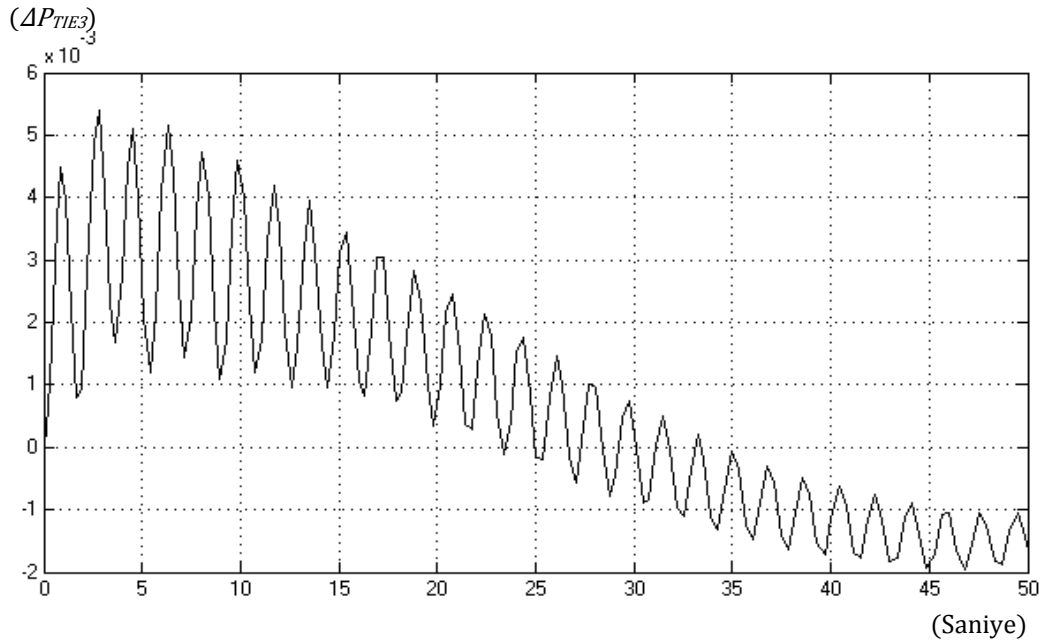
Şekil 4.24.  $K_p = 0.02$ ,  $K_i = 0.06$  ve  $\Delta P_{LI} = 0.01$  pu iken Sistem Cevabı ( $\Delta f_4$ )



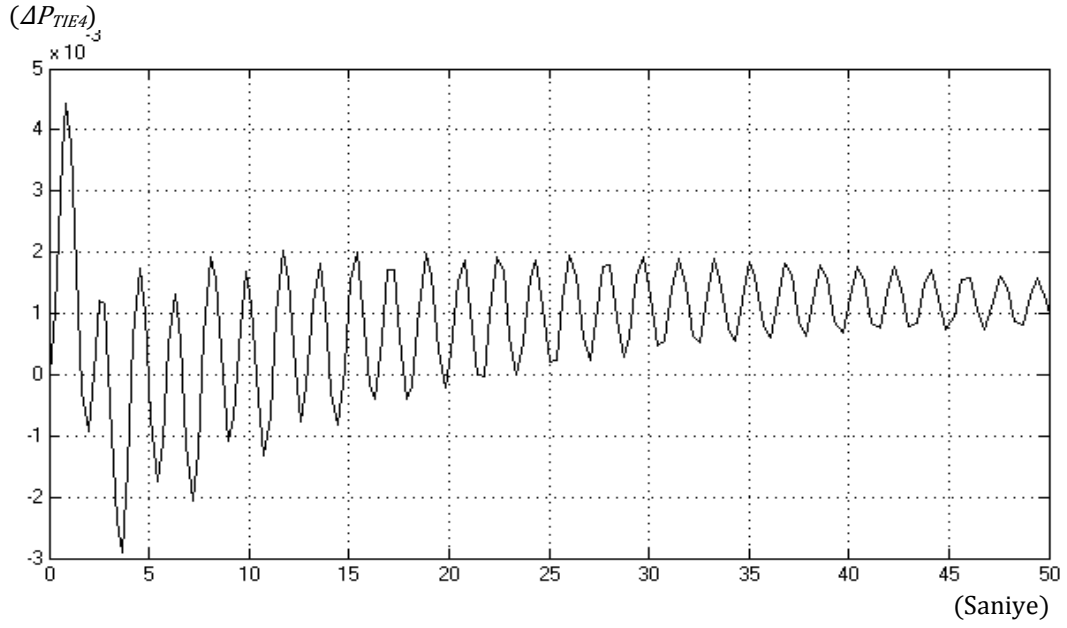
Şekil 4.25.  $K_p = 0.02$ ,  $K_i = 0.06$  ve  $\Delta P_{LI} = 0.01$  pu iken Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE1}$ )



Şekil 4.26.  $K_p = 0.02$ ,  $K_i = 0.06$  ve  $\Delta P_{LI} = 0.01$  pu iken Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE2}$ )

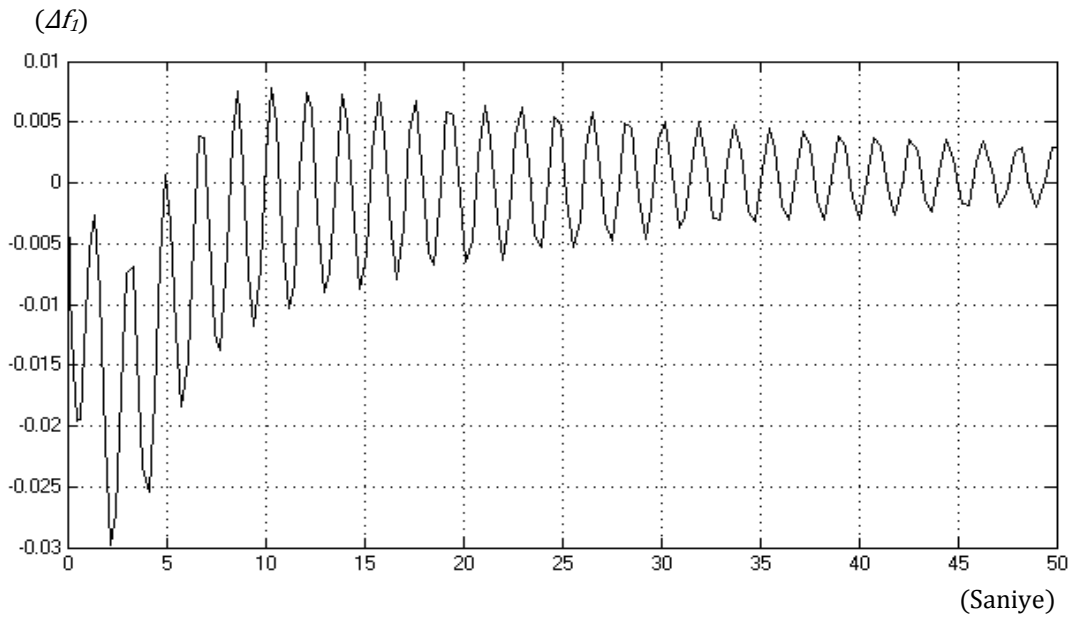


Şekil 4.27.  $K_p = 0.02$ ,  $K_i = 0.06$  ve  $\Delta P_{LI} = 0.01$  pu iken Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE3}$ )

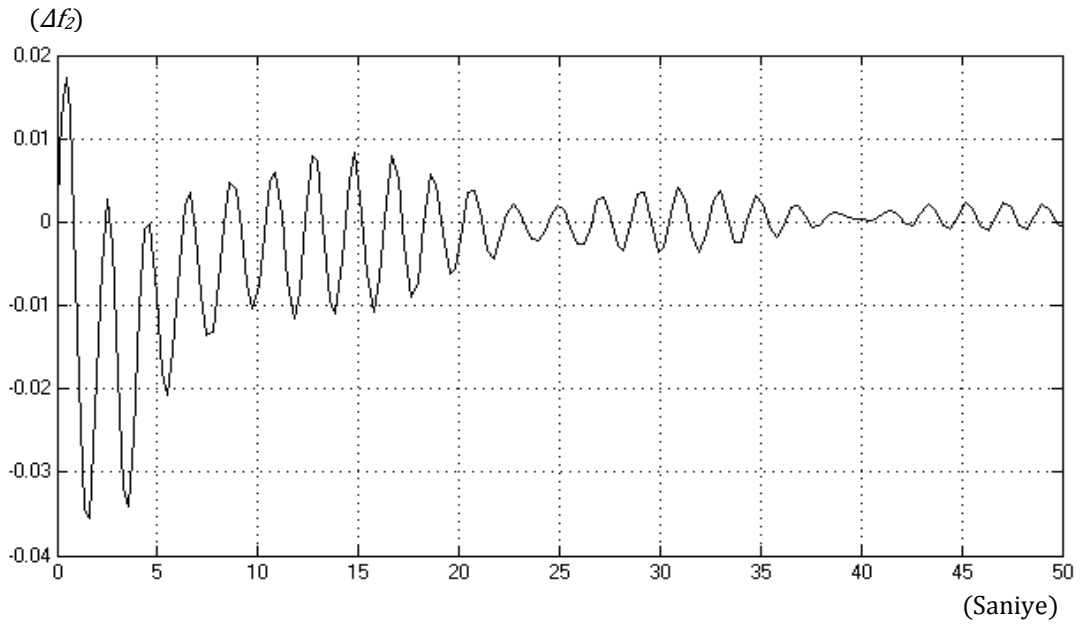


Şekil 4.28.  $K_p = 0.02$ ,  $K_i = 0.06$  ve  $\Delta P_{L1} = 0.01$  pu iken Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIEA}$ )

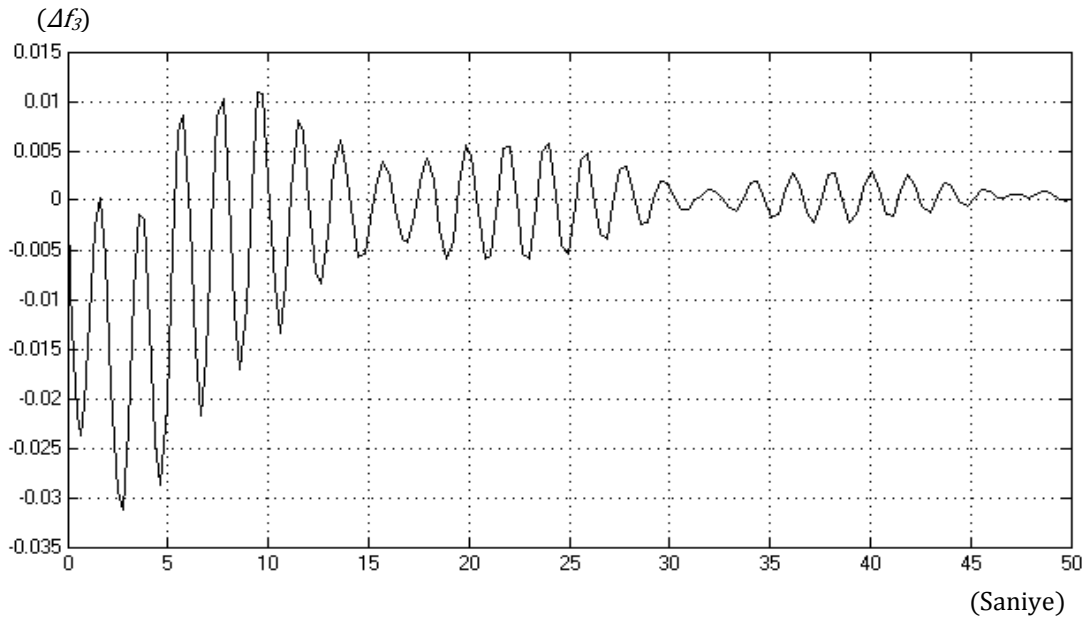
Her bir bölge için yine aynı  $K_p$  ve  $K_i$  kazançları kullanılarak; birinci bölgede ve üçüncü bölgede 0.01 pu' lik adım yük değişimi, ikinci bölgede ise -0.01 pu' lik adım yük değişimi söz konusu olursa, elde edilen sistem sonuçları sırasıyla aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



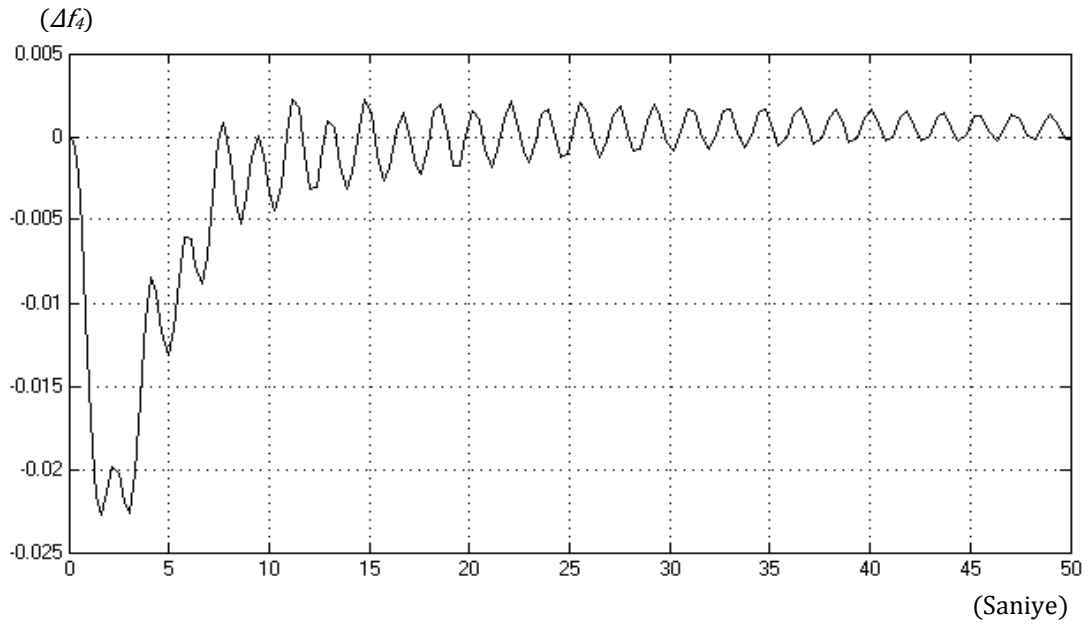
Şekil 4.29.  $K_p = 0.02$ ,  $K_i = 0.06$ ,  $\Delta P_{L1} = \Delta P_{L3} = 0.01$  pu ve  $\Delta P_{L2} = -0.01$  pu iken Sistem Cevabı ( $\Delta f_i$ )



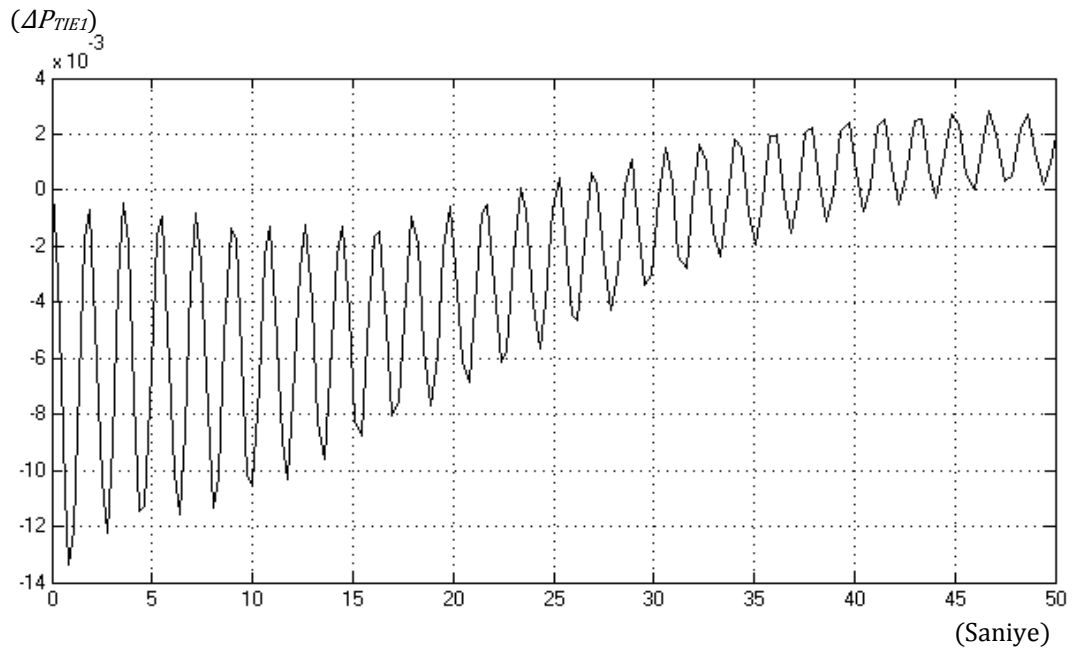
Şekil 4.30.  $K_p = 0.02$ ,  $K_i = 0.06$ ,  $\Delta P_{L1} = \Delta P_{L3} = 0.01$  pu ve  $\Delta P_{L2} = -0.01$  pu iken Sistem Cevabı  $(\Delta f_2)$



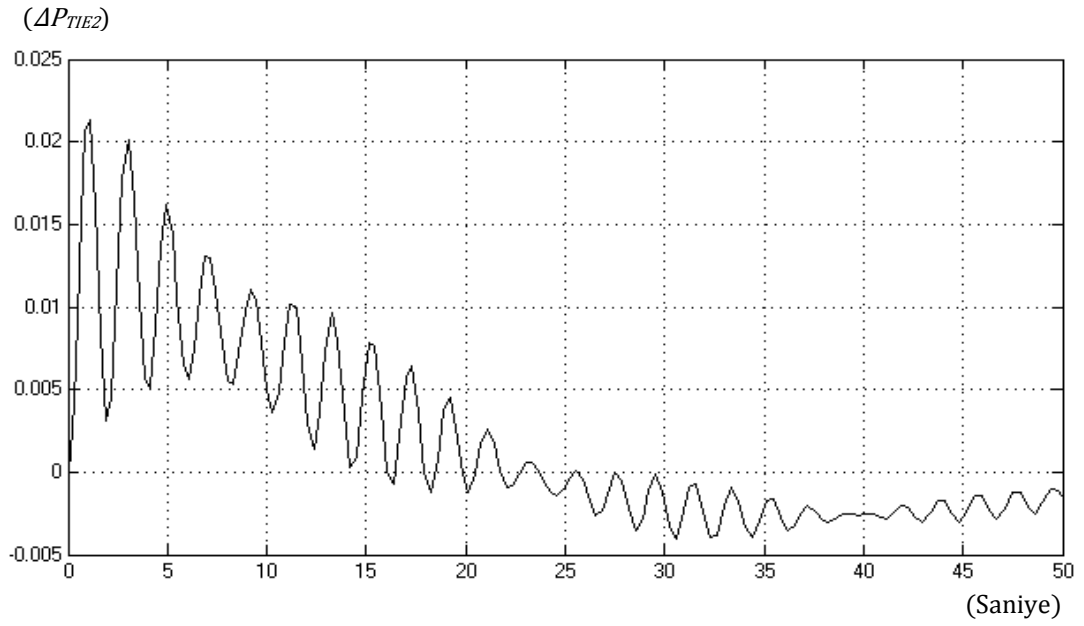
Şekil 4.31.  $K_p = 0.02$ ,  $K_i = 0.06$ ,  $\Delta P_{L1} = \Delta P_{L3} = 0.01$  pu ve  $\Delta P_{L2} = -0.01$  pu iken Sistem Cevabı  $(\Delta f_3)$



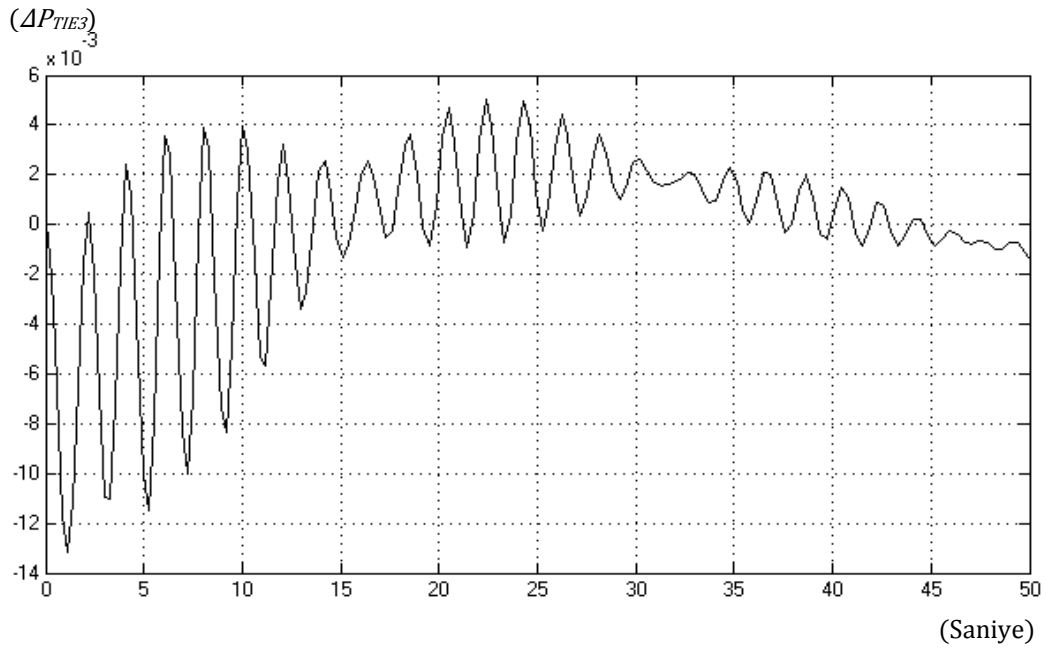
Şekil 4.32.  $K_p = 0.02$ ,  $K_i = 0.06$ ,  $\Delta P_{L1} = \Delta P_{L3} = 0.01$  pu ve  $\Delta P_{L2} = -0.01$  pu iken Sistem Cevabı  $(\Delta f_4)$



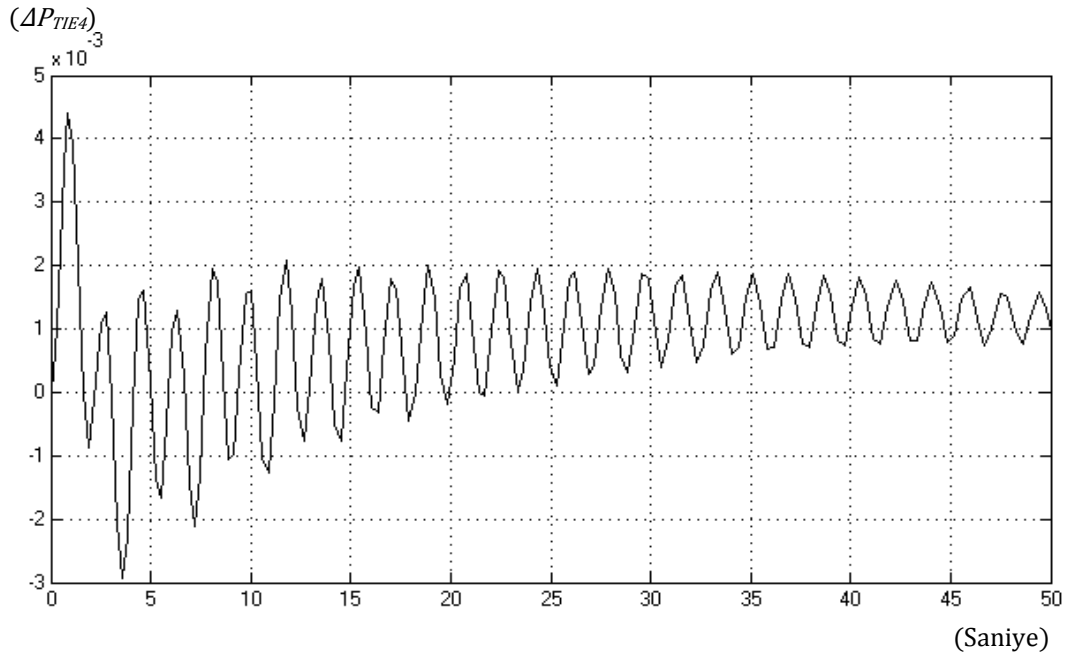
Şekil 4.33.  $K_p = 0.02$ ,  $K_i = 0.06$ ,  $\Delta P_{L1} = \Delta P_{L3} = 0.01$  pu ve  $\Delta P_{L2} = -0.01$  pu iken Sistem Cevabı  $(\Delta P_{TIE1})$



Şekil 4.34.  $K_p = 0.02$ ,  $K_i = 0.06$ ,  $\Delta P_{L1} = \Delta P_{L3} = 0.01$  pu ve  $\Delta P_{L2} = -0.01$  pu iken Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE2}$ )



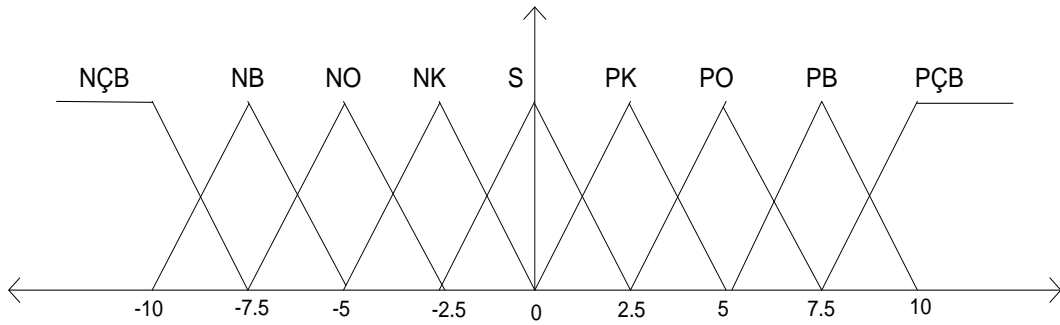
Şekil 4.35.  $K_p = 0.02$ ,  $K_i = 0.06$ ,  $\Delta P_{L1} = \Delta P_{L3} = 0.01$  pu ve  $\Delta P_{L2} = -0.01$  pu iken Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE3}$ )



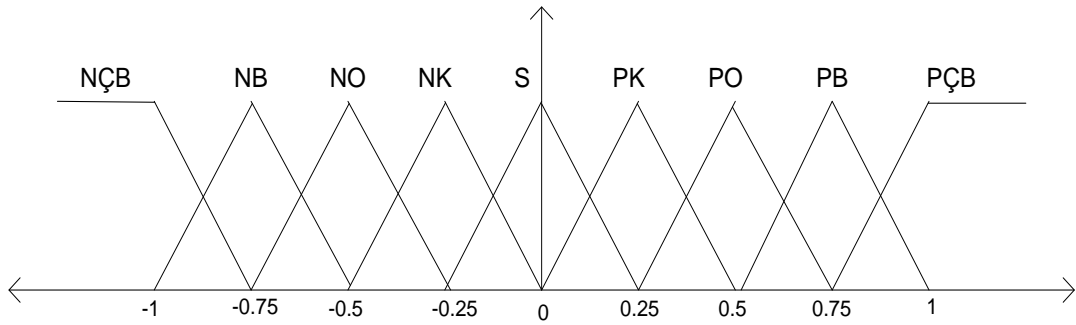
Şekil 4.36.  $K_p = 0.02$ ,  $K_i = 0.06$ ,  $\Delta P_{L1} = \Delta P_{L3} = 0.01$  pu ve  $\Delta P_{L2} = -0.01$  pu iken Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE4}$ )

#### 4.2.2. Bulanık Mantık Kontrolör kullanılarak yapılan yük frekans kontrolü uygulaması

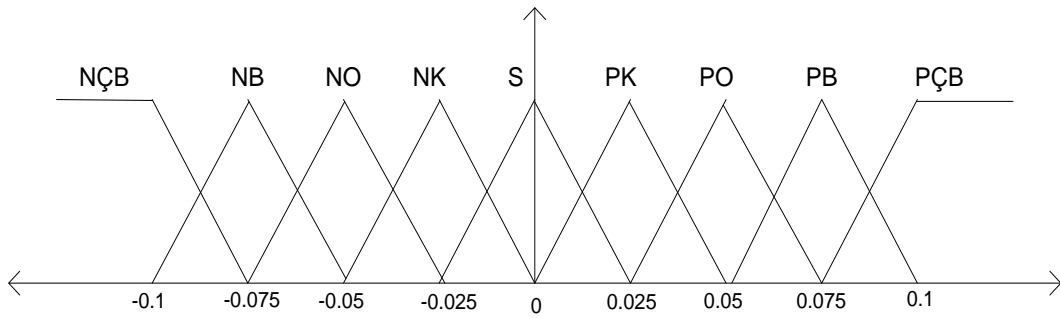
Çalışmanın bu bölümünde iki bölgeli model için önerilen kontrolör yapısı dört bölgeli güç sistemi için uygulanmıştır. Dört bölgeli sistemde kullanılan kontrolöre ait ACE,  $\Delta ACE$ ,  $K_{p,i}$  ve  $K_{i,i}$  için belirlenen üyelik fonksiyonları ve kontrol aralıkları şekillerde sırasıyla verilmiştir.



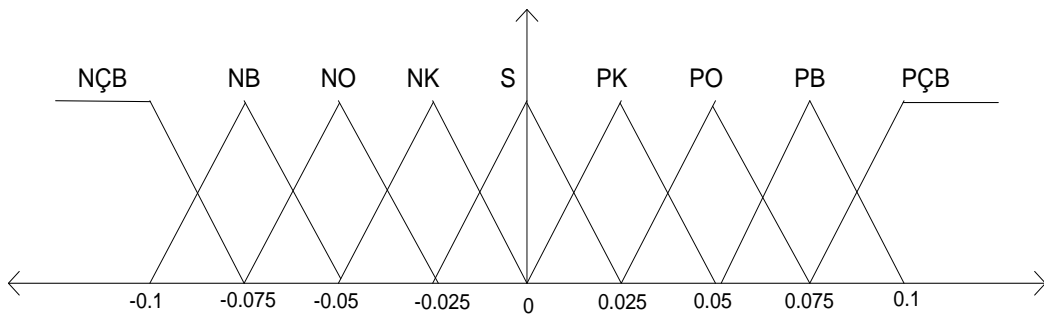
Şekil 4.37. Giriş Değişkeni ACE için Üyelik Fonksiyonları ( $K_{p,i}$ )



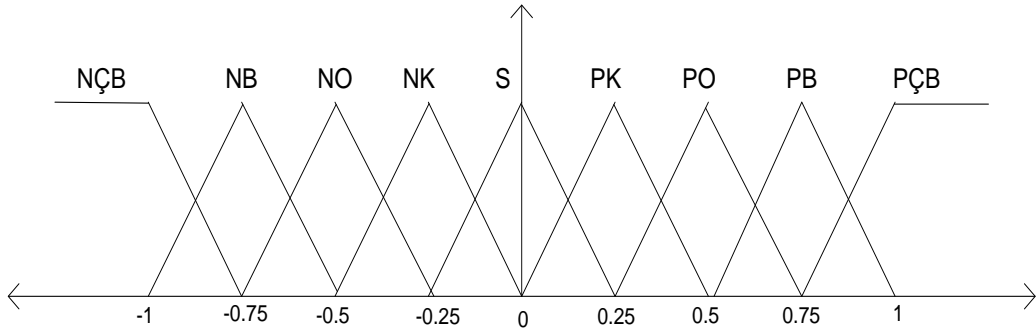
Şekil 4.38. Giriş Değişkeni  $\Delta ACE$  için Üyelik Fonksiyonları ( $K_{p,i}$ )



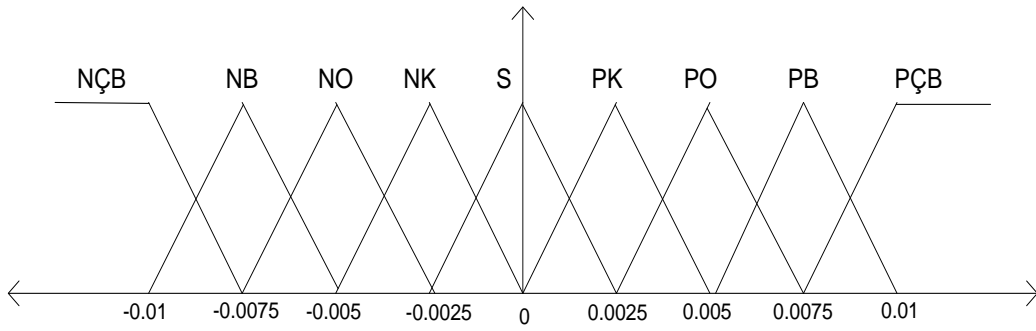
Şekil 4.39.  $K_{p,i}$  Çıkış Sinyali için Üyelik Fonksiyonları



Şekil 4.40. Giriş Değişkeni ACE için Üyelik Fonksiyonları ( $K_{i,i}$ )

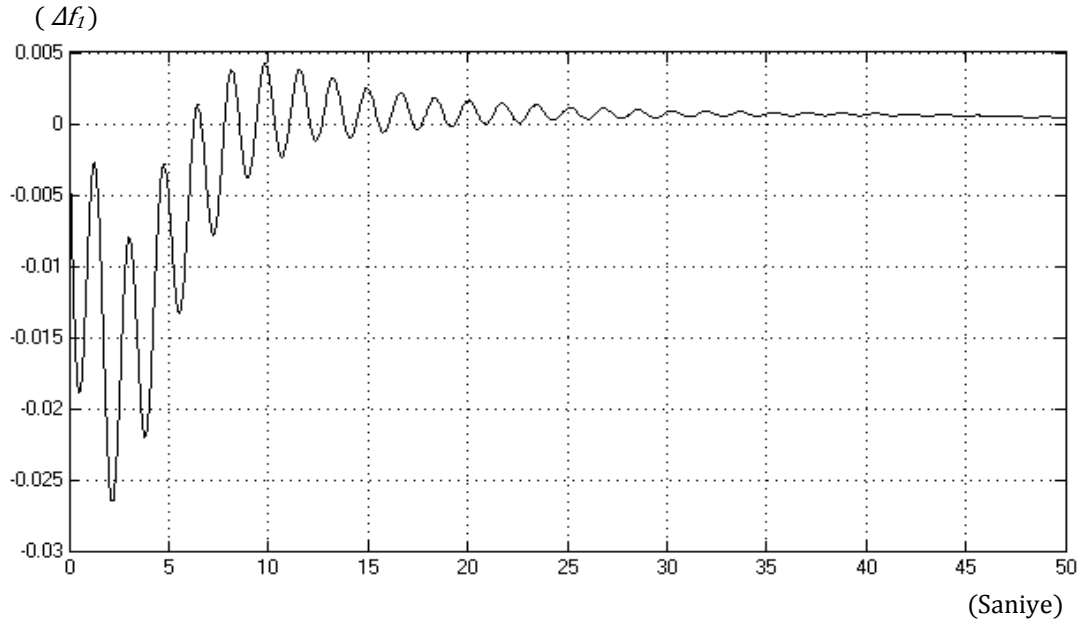


Şekil 4.41. Giriş Değişkeni  $\Delta ACE$  için Üyelik Fonksiyonları ( $K_{i,i}$ )

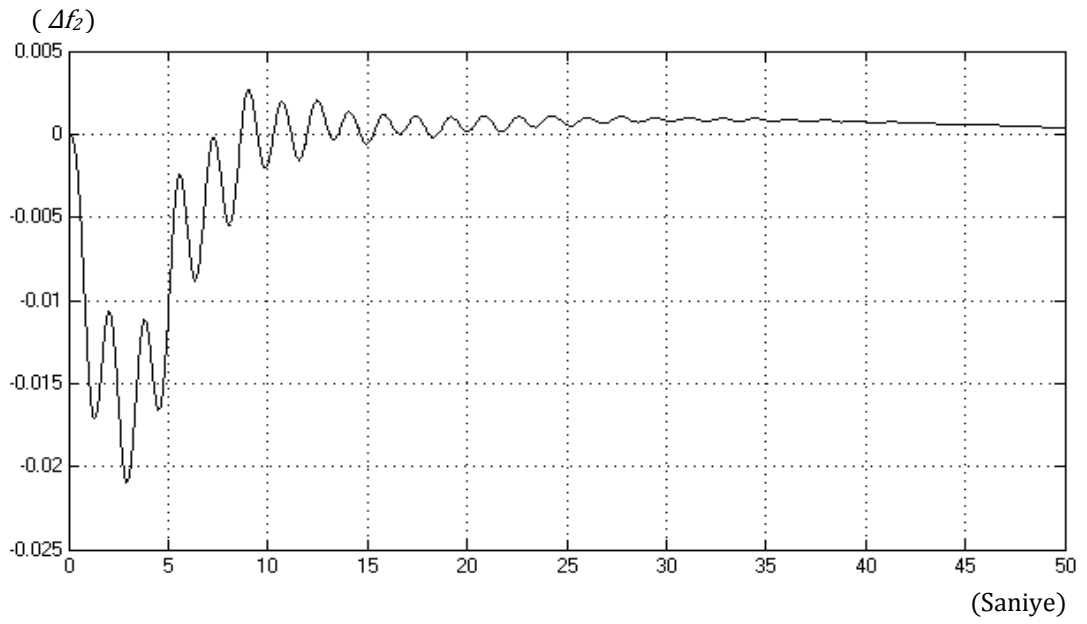


Şekil 4.42.  $K_{i,i}$  Çıkış Sinyali için Üyelik Fonksiyonları

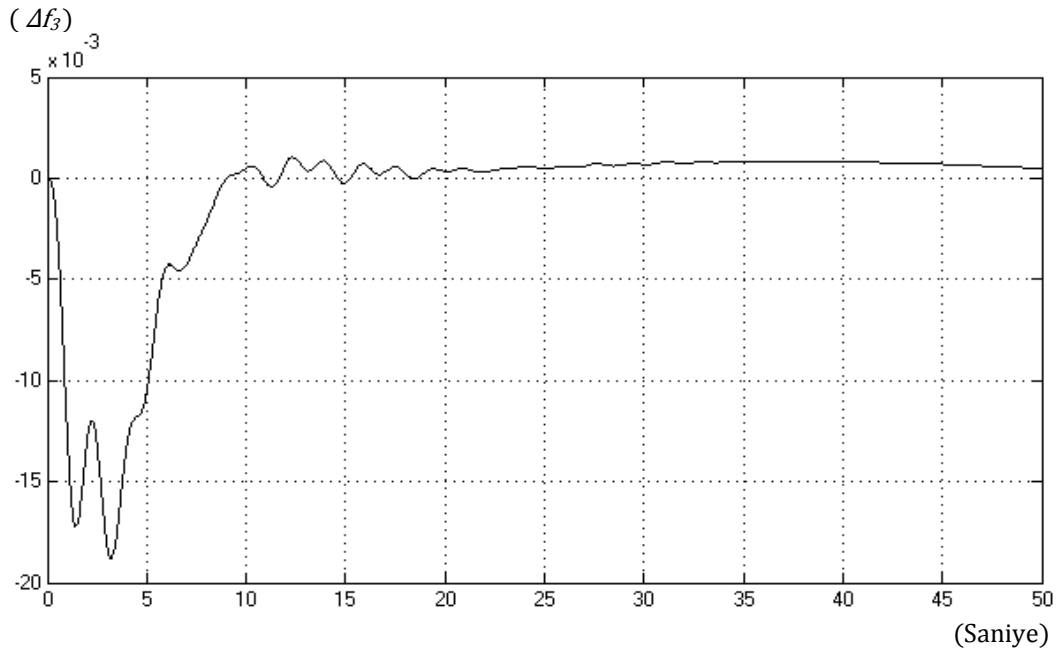
Dört bölgeli sistem için de yine Şekil 4.11' de verilen Bulanık Mantık Kuralları tablosu uygulanmıştır. Önerilen bulanık mantık kontrolörü kullanıldığında, sistemin birinci bölgede oluşan 0.01 pu' lik adım yük değişimine verdiği cevap; Şekil 4.43' ten, Şekil 4.50' ye kadar sırasıyla verilmiştir.



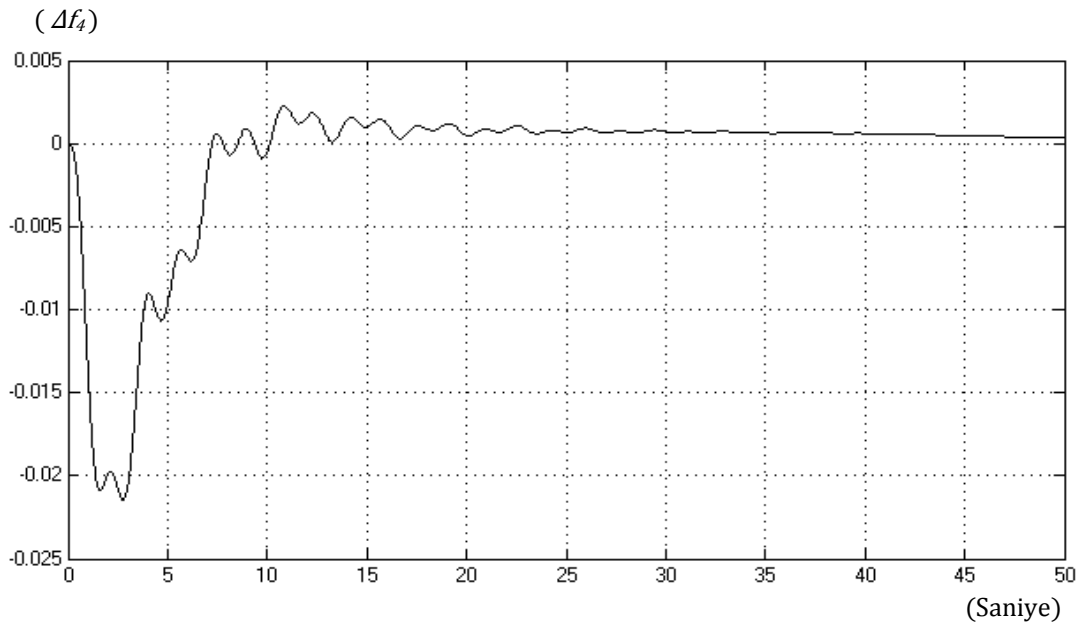
Şekil 4.43. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta f_1$ )



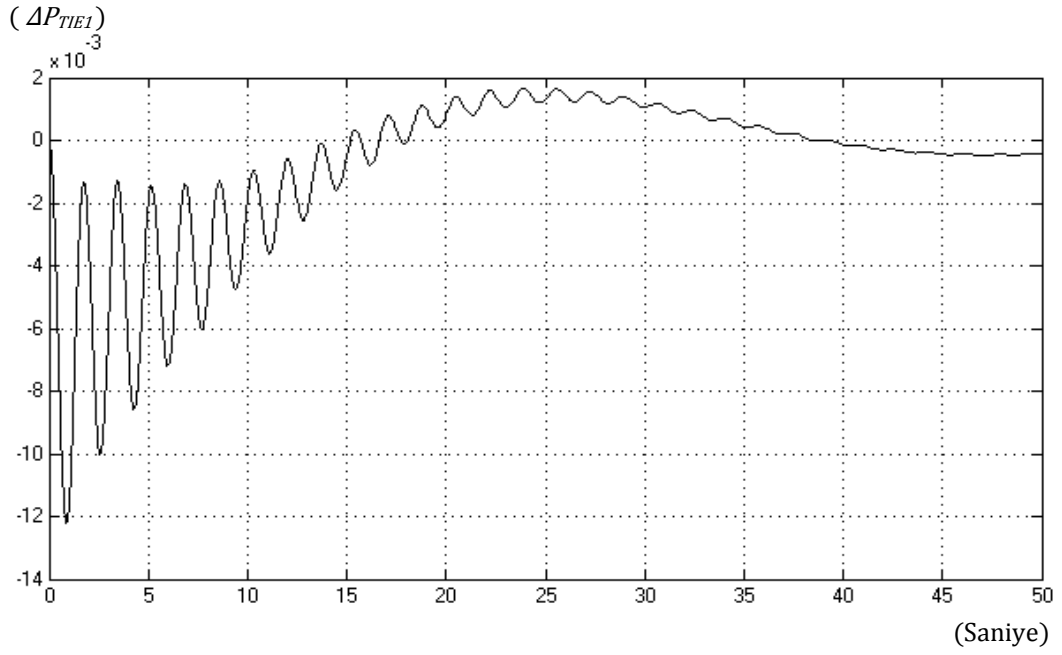
Şekil 4.44. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta f_2$ )



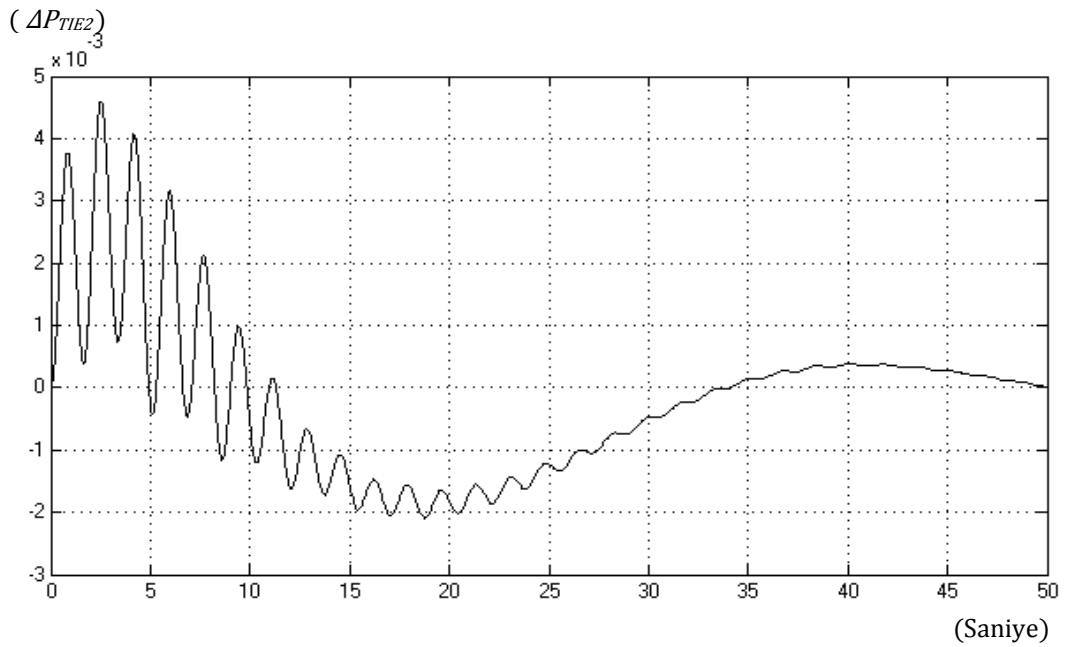
Şekil 4.45. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta f_3$ )



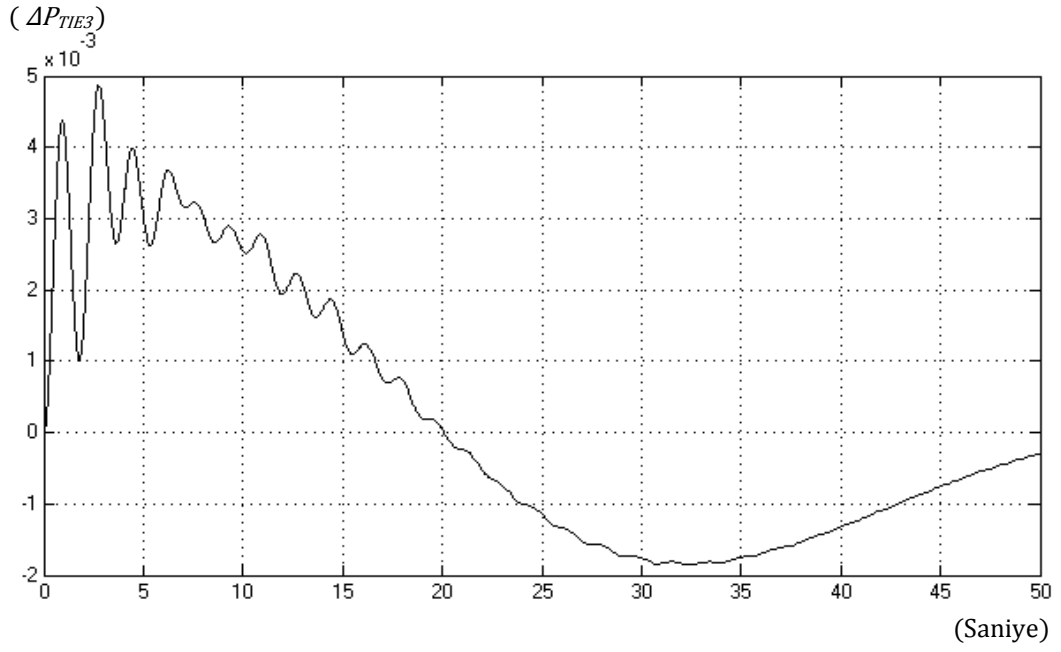
Şekil 4.46. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta f_4$ )



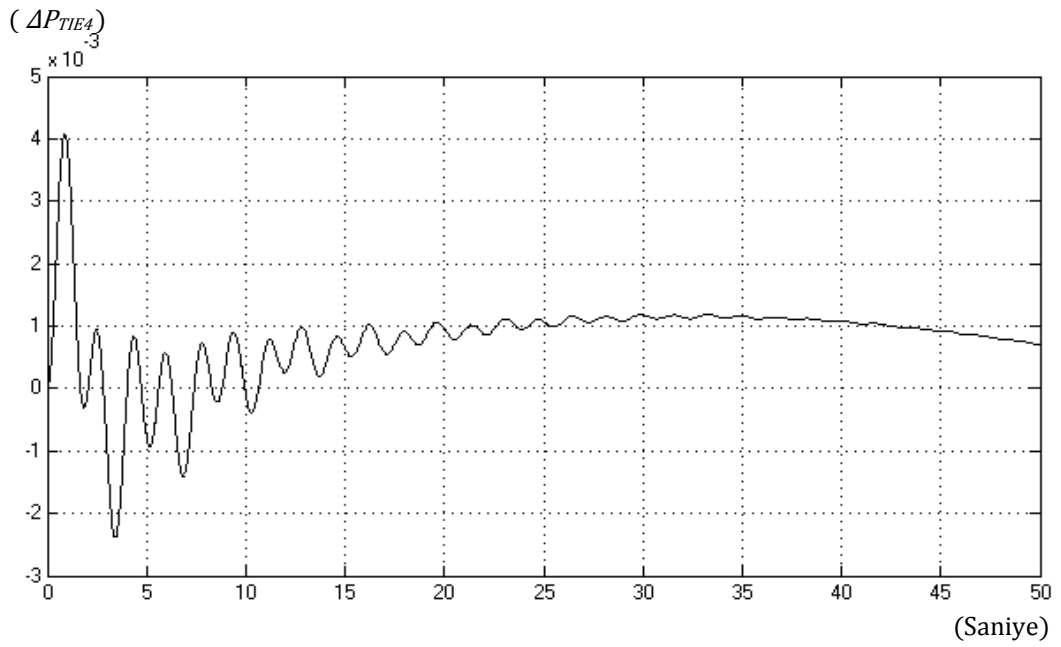
Şekil 4.47. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE1}$ )



Şekil 4.48. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE2}$ )

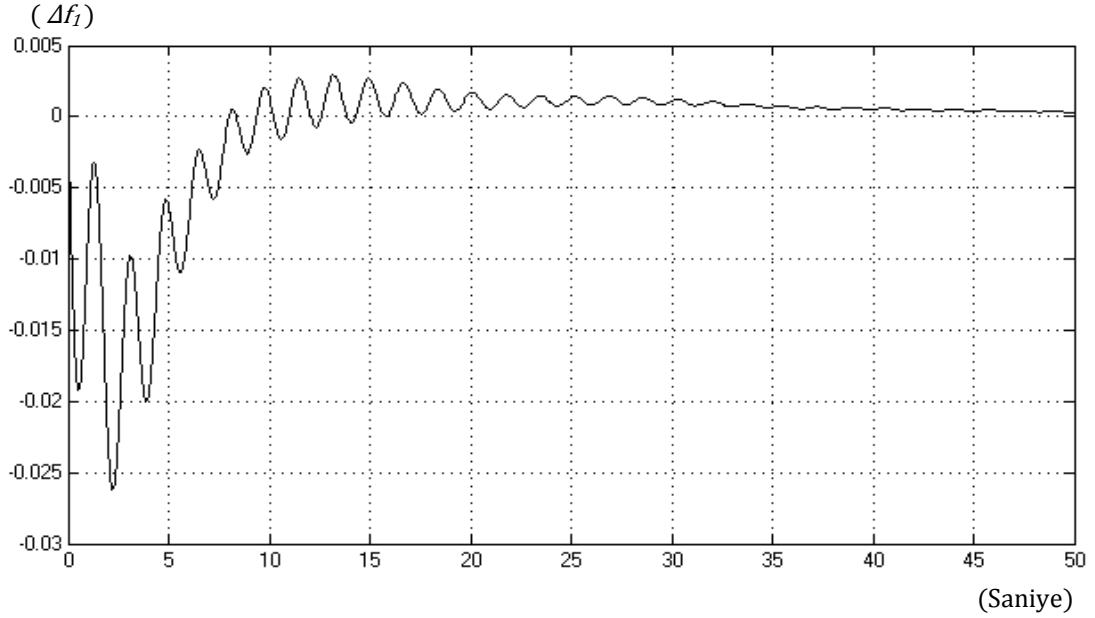


Şekil 4.49. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE3}$ )

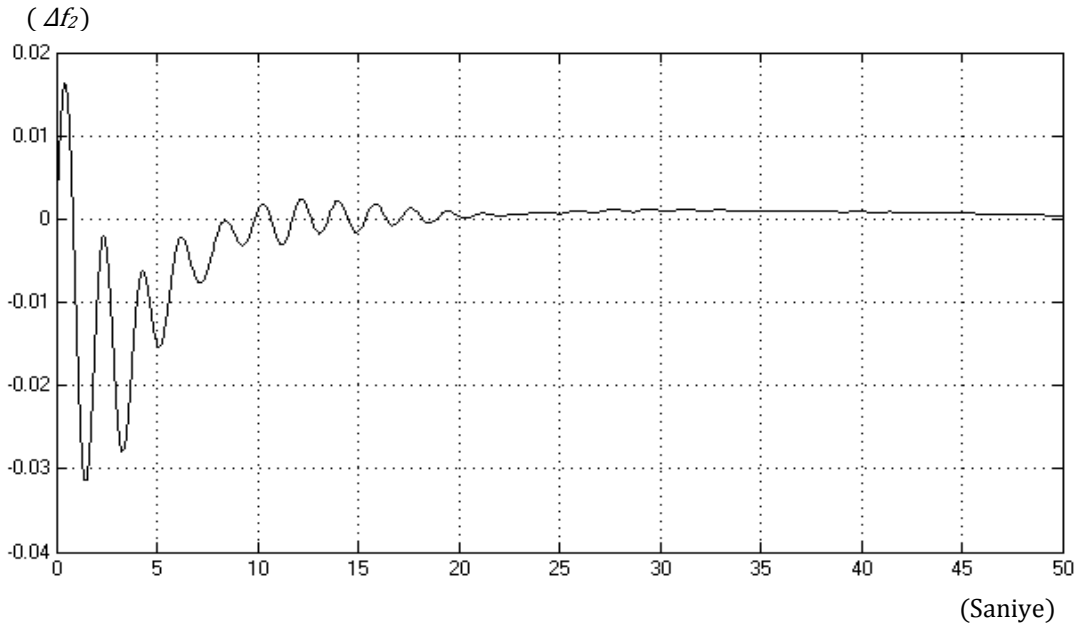


Şekil 4.50. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE4}$ )

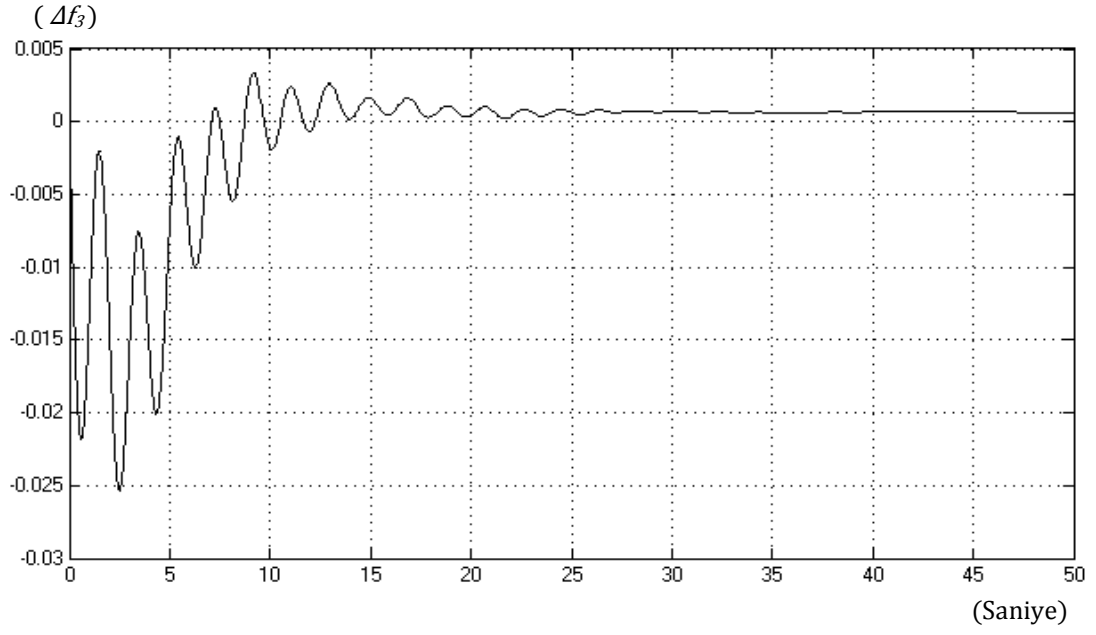
Eğer sistemde; birinci bölgede ve üçüncü bölgede 0.01 pu' lik adım yük değişimi, ikinci bölgede ise -0.01 pu' lik adım yük değişimi söz konusu olursa, önerilen bulanık mantık kontrolörüyle elde edilecek sistem cevapları ise Şekil 4.51' den, Şekil 4.58' e kadar sırasıyla verilmiştir.



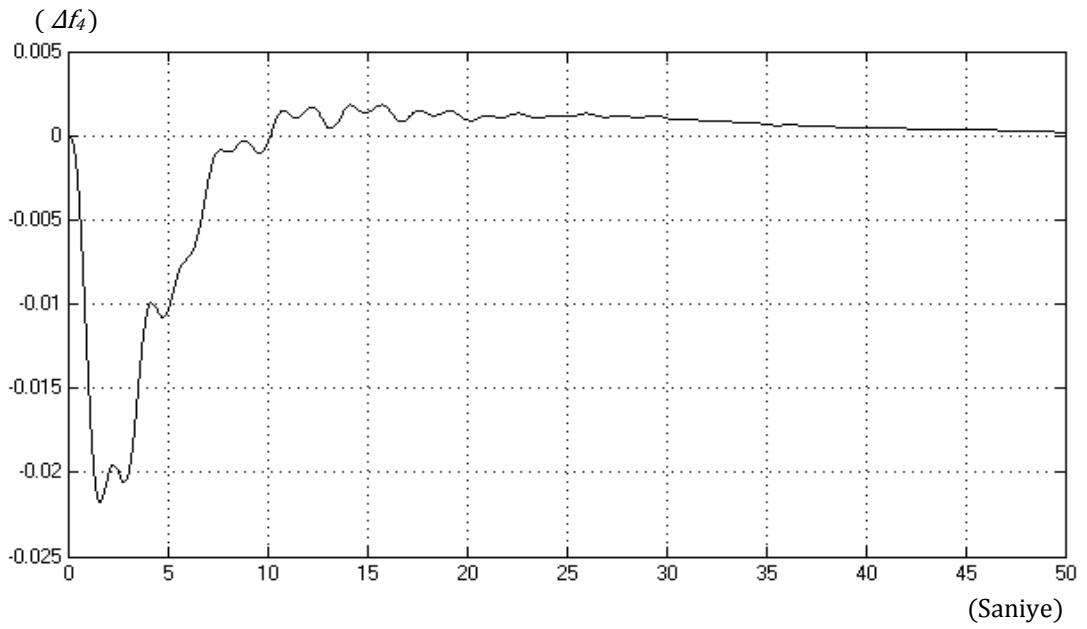
Şekil 4.51. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta f_1$ )



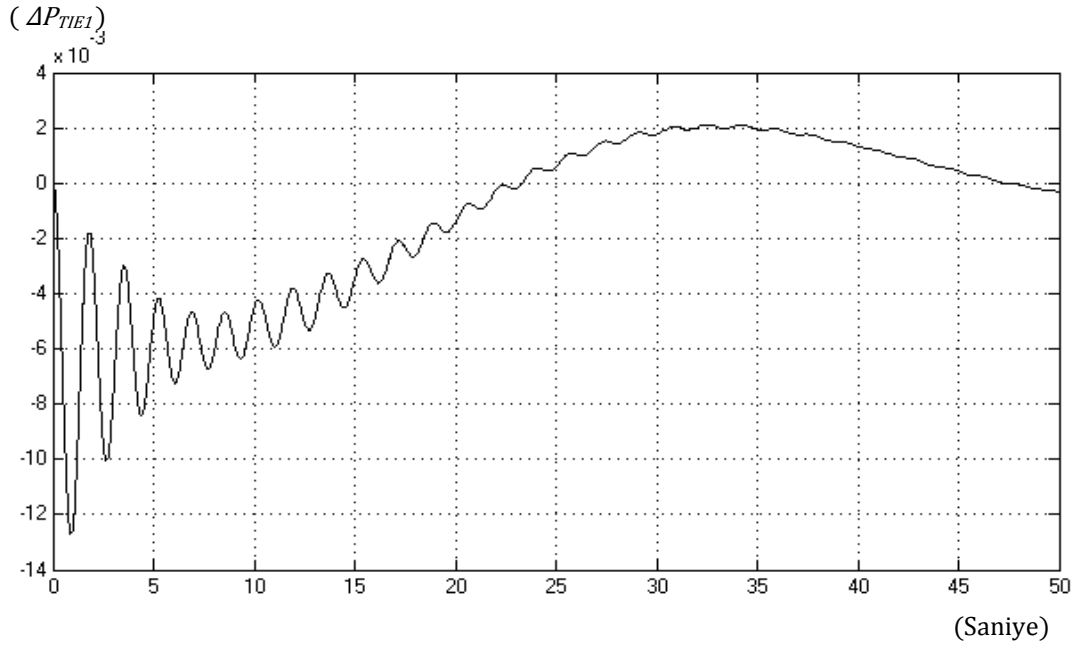
Şekil 4.52. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta f_2$ )



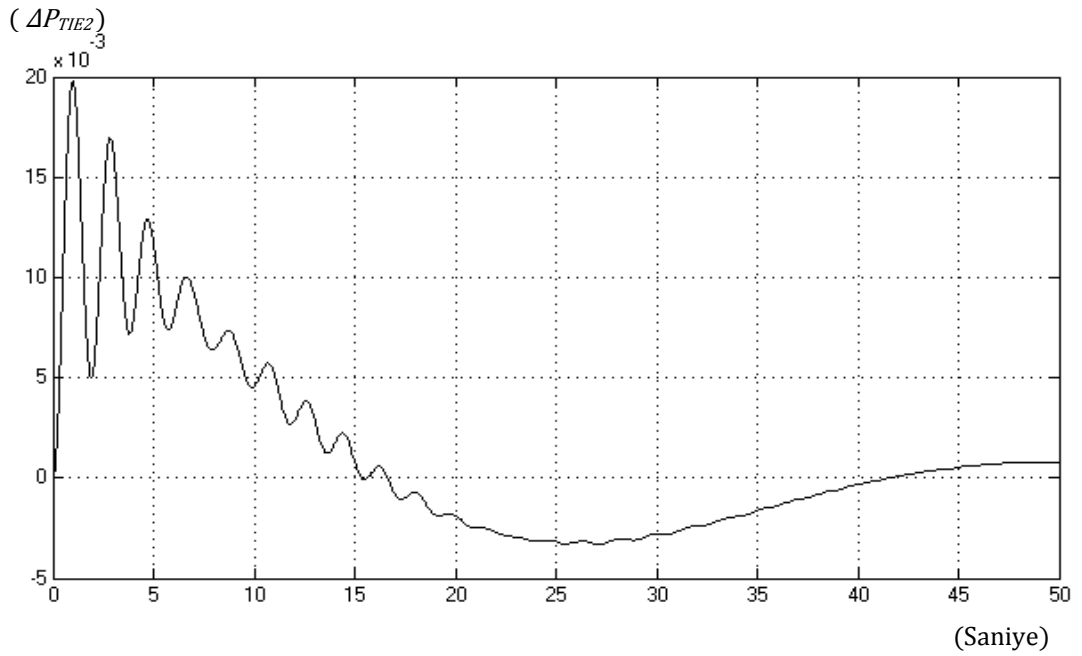
Şekil 4.53. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta f_3$ )



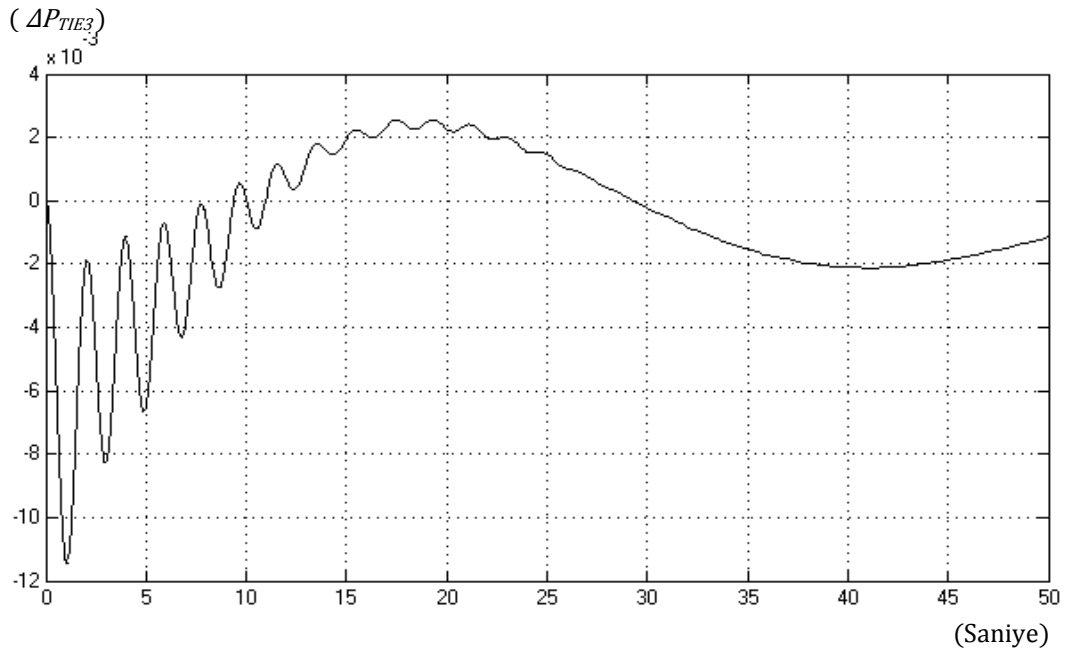
Şekil 4.54. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta f_4$ )



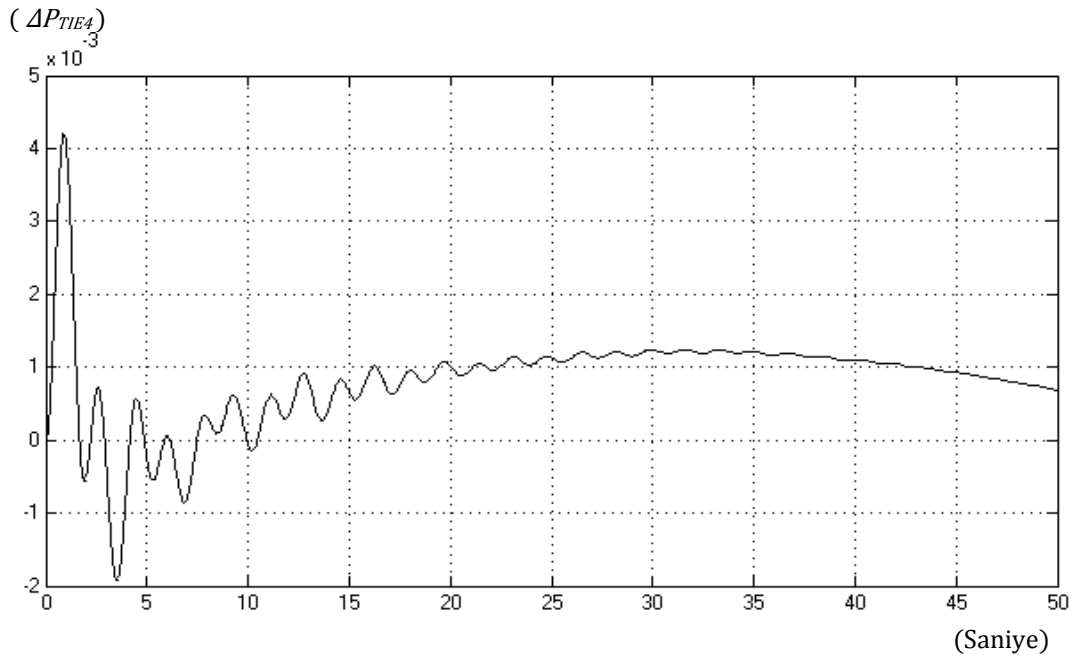
Şekil 4.55. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE1}$ )



Şekil 4.56. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE2}$ )



Şekil 4.57. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE3}$ )



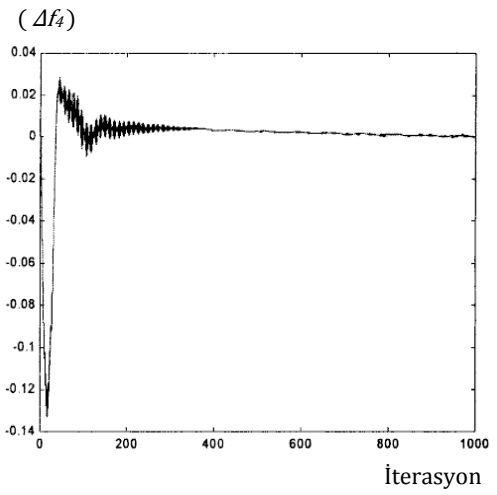
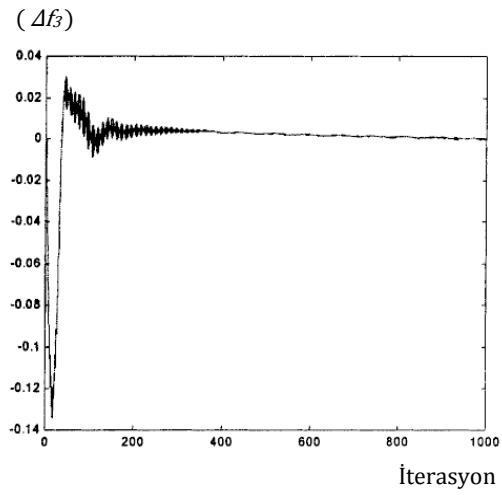
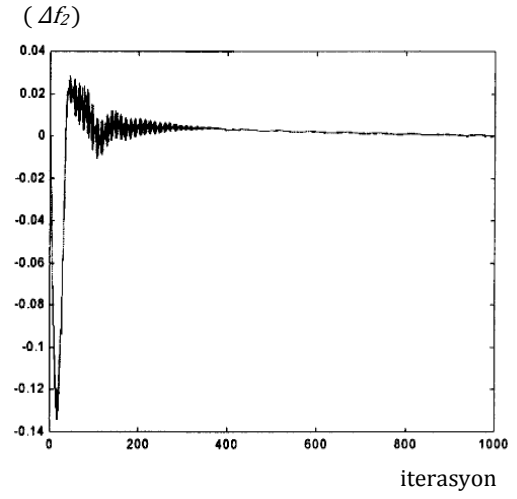
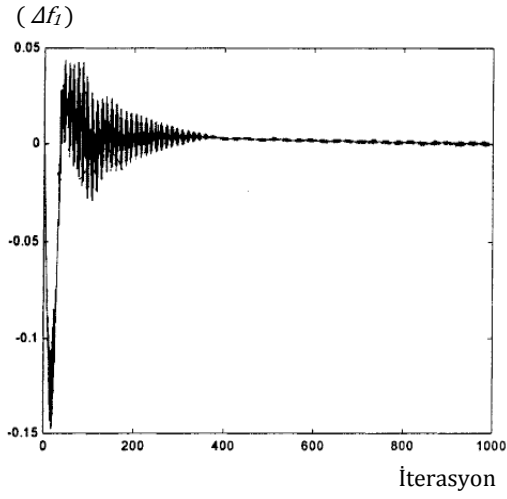
Şekil 4.58. Bulanık Mantık Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı ( $\Delta P_{TIE4}$ )

### 4.2.3. Kontrolörler arasında performans karşılaştırması

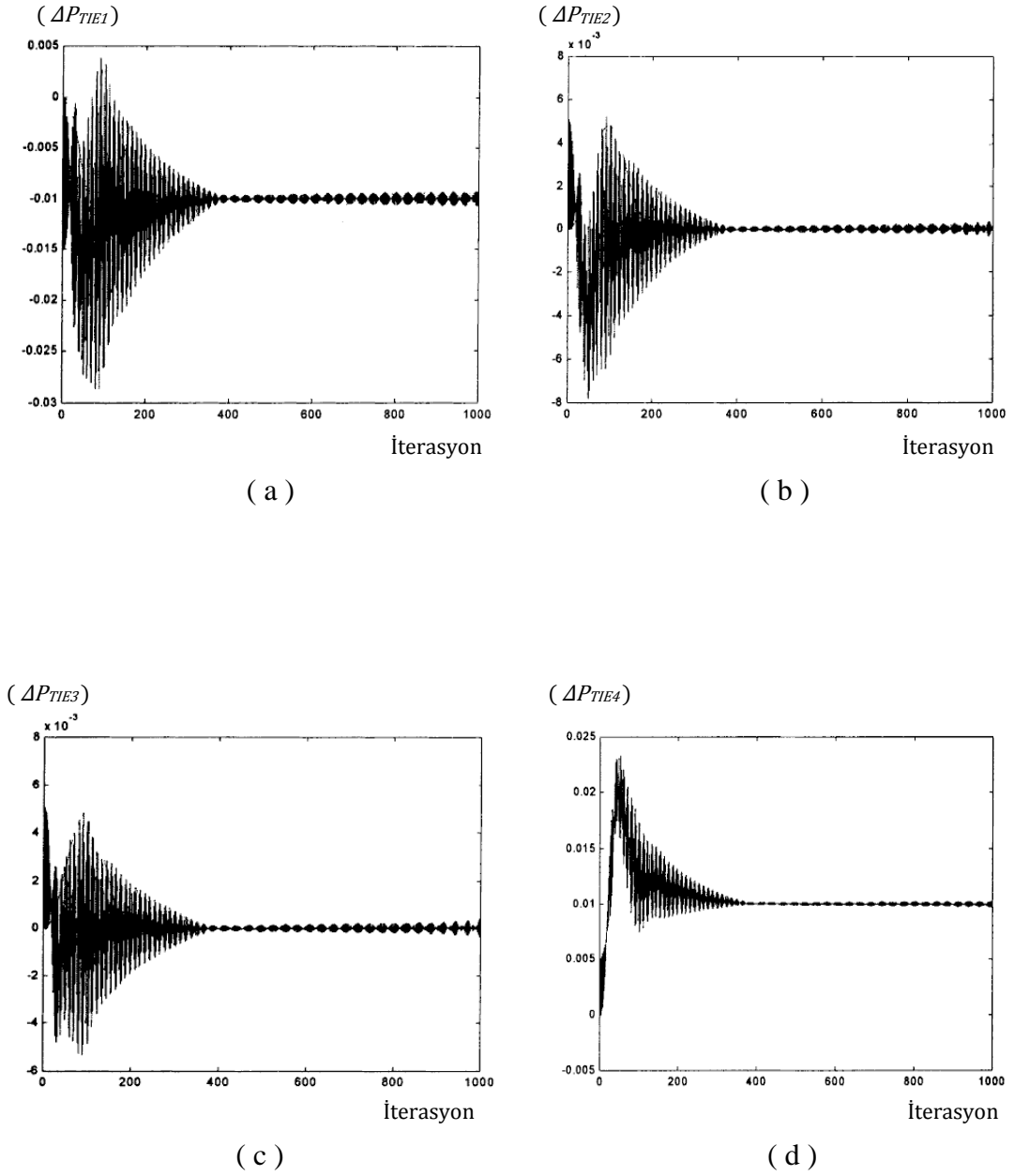
Dört kontrol bölgesi bir güç sistemi modeli için Bölüm 4.2.1.' de PI kontrolörlerle, Bölüm 4.2.2.' de ise bu çalışmada önerilen bulanık mantık kontrolörlerle uygulamalar yapılmıştır. Yapılan uygulamalara ait grafik ve sonuçlar karşılaştırıldığında, önerilen kontrolörün PI kontrolöre göre çok daha iyi bir performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Maksimum bozulma açısından karşılaştırma yapılacak olunursa, PI kontrolörlerle yapılan uygulamada oluşan maksimum bozulma seviyesi önerilen bulanık mantık kontrolörleriyle yapılan uygulamaya göre daha yüksektir. Oturma zamanı ve bozulmayı daha çabuk düzeltme açısından da önerilen bulanık mantık kontrolörü çok daha iyi bir performans sergilemiştir.

İnceleme yapılan dört bölgesi güç sistemi modeli ve bu modele ait sistem parametrelerini kullanarak 2001 yılında H. L. Zeynelgil, A. Demirören ve N. S. Sengör benzer bir yük frekans kontrolü çalışması yapmıştır (Demirören ve ark. 2002). Çalışmalarında ANN (Artificial Neural Network Controller) kontrolörü tasarlayarak yük frekans kontrolünde uygulamışlardır. ANN, yapay sinir ağı kontrolör anlamına gelmektedir. 2001 yılında yapılan bu çalışmaya ait sistem cevapları aşağıdaki şekillerde sunulmuştur.

Birinci bölgede 0.01 pu' lik adım yük değişimi söz konusu olursa, yapay sinir ağı kontrolör ile elde edilen sistem cevapları Şekil 4.59' dan, Şekil 4.66' ya kadar sırasıyla verilmiştir (Demirören ve ark. 2002). Yapılan uygulamada 1000 iterasyon kullanılmıştır. Her 100 iterasyon 1 saniyeye karşılık gelmektedir.



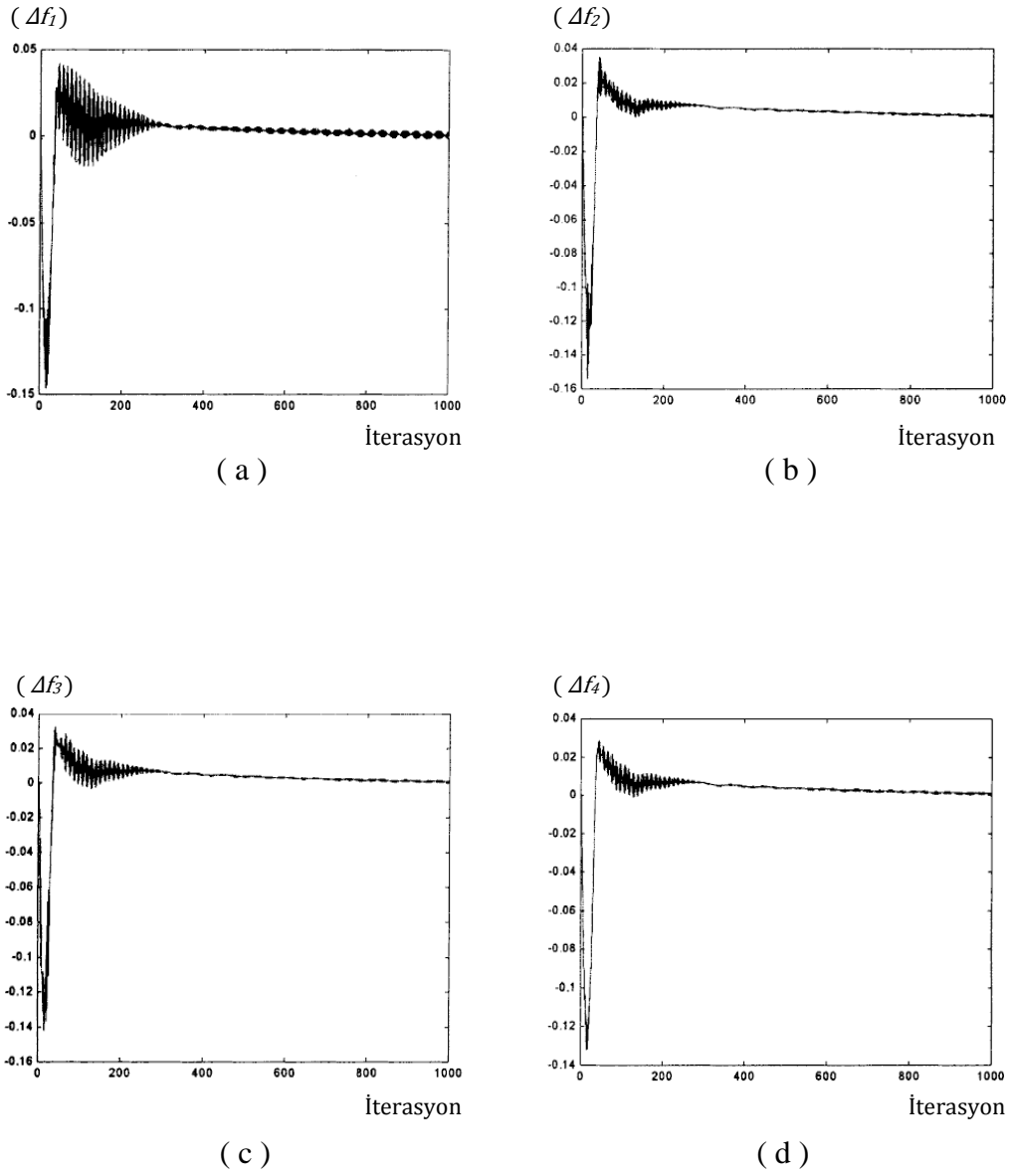
Şekil 4.59. Yapay Sinir Ağı Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı  
 a)  $(\Delta f_1)$  b)  $(\Delta f_2)$  c)  $(\Delta f_3)$  d)  $(\Delta f_4)$



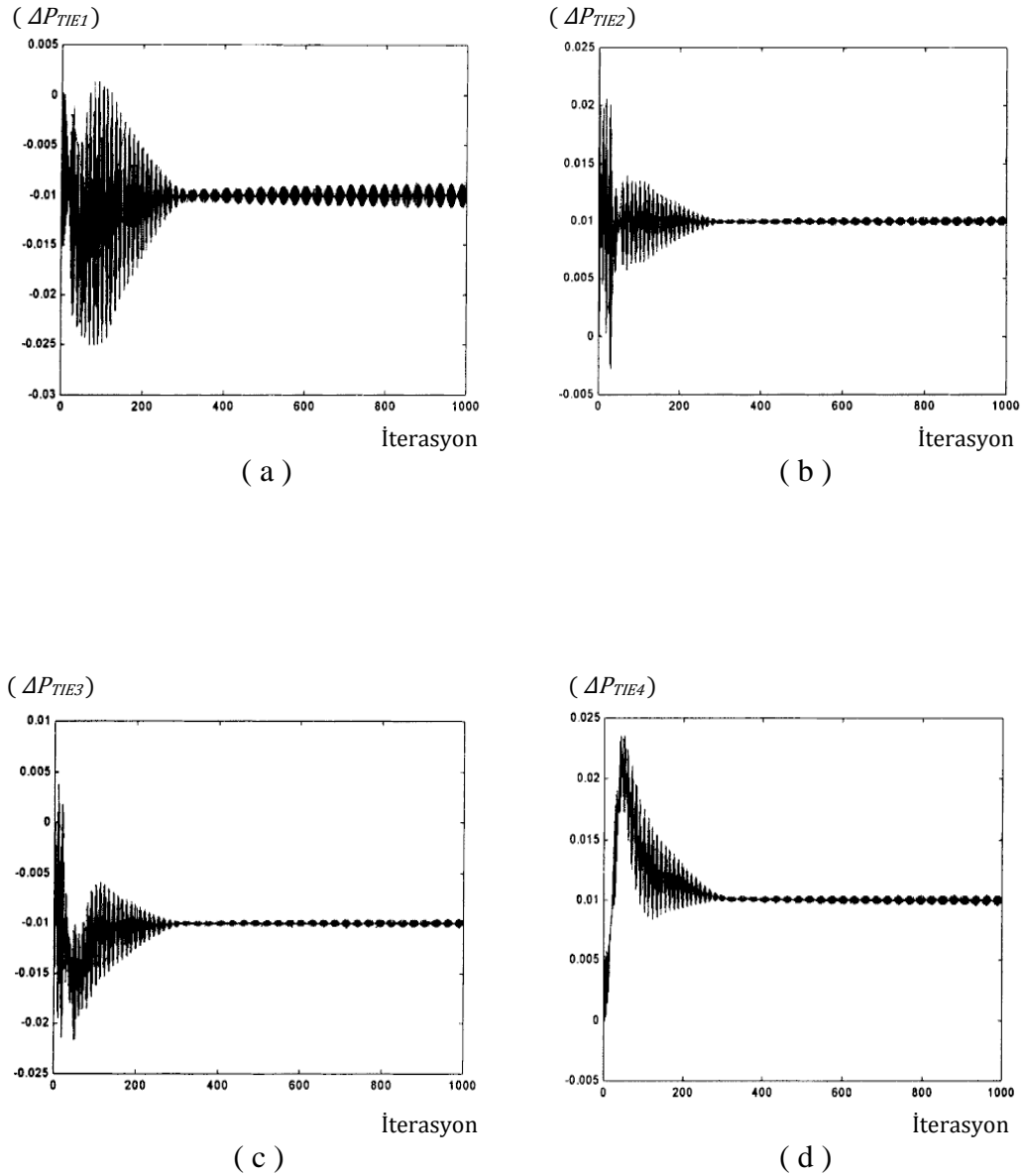
Şekil 4.60. Yapay Sinir Ağı Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı

a)  $(\Delta P_{TIE1})$  b)  $(\Delta P_{TIE2})$  c)  $(\Delta P_{TIE3})$  d)  $(\Delta P_{TIE4})$

Birinci bölgede ve üçüncü bölgede 0.01 pu' lik adım yük değişimi, ikinci bölgede ise -0.01 pu' lik adım yük değişimi söz konusu olursa, yapay sinir ağı kontrolör ile elde edilen sistem cevapları; Şekil 4.67' den, Şekil 4.74' e kadar sırasıyla verilmiştir (Demirören ve ark. 2002). Yapılan uygulamada 1000 iterasyon kullanılmıştır. Her 100 iterasyon 1 saniyeye karşılık gelmektedir.



Şekil 4.61. Yapay Sinir Ağı Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı  
a)  $(\Delta f_1)$  b)  $(\Delta f_2)$  c)  $(\Delta f_3)$  d)  $(\Delta f_4)$



Şekil 4.62. Yapay Sinir Ağı Kontrolör Kullanıldığında Sistem Cevabı  
a)  $(\Delta P_{TIE1})$  b)  $(\Delta P_{TIE2})$  c)  $(\Delta P_{TIE3})$  d)  $(\Delta P_{TIE4})$

Yapay sinir ağı kontrolörler ile yapılan uygulamalarda maksimum bozulma ( $\Delta f_i$ ), yaklaşık olarak -0.15 seviyelerindedir. Oturma zamanı ise yaklaşık olarak 400-500 iterasyon (4-5 saniye) olarak gözlemlenmektedir.

Sonuç olarak; yapılan uygulamalarda PI kontrolör ile elde edilen sonuç, yapay sinir ağı kontrolör ile elde edilen sonuç ve bu çalışmada önerilen bulanık

mantık kontrolör ile elde edilen sonuç karşılaştırılırsa; şöyle bir yargıya varılabilir. Oluşan frekans bozulmasını kısa zamanda düzeltme açısından; önerilen kontrolör, PI kontrolöre göre çok daha iyi bir sonuç vermesine rağmen yapay sinir ağı kontrolöre göre kötü bir sonuç vermiştir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yüklerin sürekli devreye girip çıkması sonucunda gün içerisinde güç sistemlerinin yükü sürekli olarak değişmelerle karşı karşıyadır. Böyle bir sorun karşısında oluşan yük frekans problemi güç sistemlerine zarar vermeden olabildiğince çabuk çözülebilmeli ayrıca güç sistemlerinin çalışma şartları ve birbirleriyle olan alışverişleri en ekonomik hale getirilebilmelidir.

Bu çalışmada, yük frekans problemi ele alınmış ve oluşabilecek yük değişimlerine karşı sistem gözlemlenmiştir. Yük frekans problemini çözebilecek kontrol işlemleri tanımlanmış ve yük frekans kontrolü yapabilecek bir kontrolör tasarlanmıştır. PI kontrol uygulamaları yük frekans kontrolünde temel bir olay olmasına rağmen artık yerini akıllı sistemler almaya başlamıştır. Akıllı sistemler sayesinde değişebilecek sistem şartlarına kolay ve hızlı adaptasyon sağlanabilmektedir. Çünkü sabit kazançlı bir PI kontrolör ile gerçekleştirilen yük frekans kontrolü değişebilecek sistem koşullarını karşılayamayabilir. Diğer taraftan sabit olan kazançlar yeni sistem koşullarına göre yeniden ayarlanmalıdır. Bu da kolay olmayan bir durumdur. Bu yüzden sabit kazançlı sistemlerin yerini akıllı sistemler almalıdır.

Tasarlanan bulanık mantık kontrolörü, önce iki kontrol bölgeci bir güç sistemi modeline uygulanmıştır ve sabit kazançlı PI kontrolöre göre çok daha iyi bir sistem performansı sergilemiş, yük frekans problemini daha çabuk çözebilmiştir. Ayrıca önerilen kontrolör, yük frekans kontrolü problemiyle ilgili aynı sistem parametrelerinin kullanıldığı, daha önceden tasarlanan, kazancı bulanık mantıkla ayarlanan kontrolörlerle karşılaştırılmıştır. Daha önceden yapılan çalışmalara nazaran sistem performansı daha da geliştirilmiştir. Bu çalışmada önerilen her kontrol bölgesinin kendi kontrolör kazançlarını kendi alan kontrol hatasına bağlı olarak elde etmesi yaklaşımı yük frekans problemine ait frekans hatasını daha kısa zamanda nominal seviyeye çekmiştir.

Bu çalışmada, çok bölgeli sistemlerde, tek ya da iki bölgeli sistemlere göre yük frekans kontrolü probleminin çözülmesinin daha uzun sürdüğü ve sistem hatasının yok edilmesinin daha zor olduğu gözlemlenmiştir. Bu yüzden çok kontrol bölgeli bir sistemi temsilen dört kontrol bölgeli bir güç sistemi modeli üzerinde de uygulamalar yapılmış ve elde edilen sonuçlar aynı sistem parametrelerinin kullanıldığı önceki bir çalışmayla da karşılaştırılmıştır. Çok bölgeli sistemde önerilen kontrolör yine PI kontrolöre göre daha iyi bir performans göstermesine rağmen yapay sinir ağı kontrolöre göre daha kötü sonuçlar vermiştir.

Bu çalışmada tasarlanan bulanık mantık kontrolöründe daha fazla üyelik fonksiyonu ve daha farklı kontrol aralıkları kullanılarak daha hassas ve etkin bir kontrol yapılmaya çalışılmış ve problemin çözümü için yeni bir bakış açısı getirilmiştir.

Sonuç olarak; sabit kazançlı PI kontrolörler ile bulanık mantık kontrolör çok bölgeli sistemler için karşılaştırıldığında akıllı sistemler ile elde edilen değerlerin sabit değerlere göre daha etkili ve verimli olduğu bir kez daha kanıtlanmıştır. Daha önceden tasarlanan bulanık mantık kontrolörleri ile elde edilen sonuçlar, önerilen kontrolör yapısıyla daha da geliştirilmiştir. Ayrıca yapay sinir ağı kontrolör yapısının da bulanık mantığa göre daha etkin işlevi olduğu gözlemlenmiştir. Bu konuya benzer alanlarda çalışma yapacak araştırmacılara, bu çalışmada elde edilen sonuçların daha da geliştirilmesi ve yük frekans kontrolü probleminin çözümü için çok daha kısa zamanda iyi sonuç alınabilecek yeni kontrol yapılarının geliştirilmesi önerilebilir. Ayrıca, gerek bulanık mantık gerekse yapay sinir ağları kullanılarak geliştirilen akıllı sistemlerle, tek bölgeli ve çok bölgeli güç sistemi modelleri için farklı yöntemlerin uygulanması ve özellikle çok bölgeli sistemlerde kontrol işleminin daha zor olduğu sonucuna dayanarak çok bölgeli sistemler üzerinde yeni uygulamalar yapılması önerilmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

AKALIN KURT G., 2000, Güç Sistemlerinde Yük-Frekans Kontrolü, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.

ALTAŞ İ. H., 1999, Bulanık Mantık:Bulanıklık Kavramı, Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e, Sayı 62, Sayfa: 80-85.

BİNGÜL Z., 2005, MATLAB ve SİMULİNK'LE Modelleme / Kontrol, Birsen Kitabevi, İstanbul.

CHANG C.S., FU W., Area load frequency control using fuzzy gain scheduling of PI controllers. Electr Power Syst Res 1997;42:145-52.

ÇAM E., KOCAARSLAN İ., Tek Bölge Güç Sistemlerinde Bulanık Mantık ile Yük Frekans Kontrolü, Teknoloji, Yıl 5, 2002, Sayı 3-4, 73-77.

ÇAM E., KOCAARSLAN İ., Load Frequency Control in Two Area Power Systems Using Fuzzy Logic Controller, Energy Conversion and Management 46, 2005, 233-243.

ÇAM E., Application of Fuzzy Logic for Load Frequency Control of Hydroelectrical Power Plants, Energy Conversion and Management 48, 2007, 1281-1288.

DARÇIN O., 2004, Güç Sistemlerinde Yük-Frekans Kontrolü ve Sinir Ağı Kontrol Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.

DEMİRÖREN A., YEŞİL E., Automatic Generation Control with Fuzzy Logic Controllers in the Power System Including SMES Units, Electrical Power and Energy Systems 26, 2004, 291-305.

EL-SHERBİNY M.K., EL-SAADY G., YOUSEF ALİ M., Efficient Fuzzy Logic Load Frequency Controller, Energy Conversion and Management 43, 2002, 1853-1863.

GHOSHAL S.P., Application of GA / GA – SA Based Fuzzy Automatic Generation Control of a Multi-area Thermal Generating System, Electrical Power System Research 70, 2004, 115-127.

KARNAVAS Y.L., PAPADOPOULOS D.P., AGC for autonomous power system using combined intelligent techniques, Electric Power Systems Research 62, 2002, 225-239.

KOCAARSLAN İ., ÇAM E., Fuzzy Logic Controller in Interconnected Electrical Power Systems for Load Frequency Control, Electrical Power and Energy Systems 27, 2005, 542-549.

LEE H.J., PARK J.B., JOO Y.H., Robust Load Frequency Control For Uncertain Nonlinear Power Systems: A Fuzzy Logic Approach, Information Science 176, 2006, 3520-3537.

MOON YOUNG-HYUN, RYU HEON-SU, LEE JONG-Gİ, KİM SEOGJOO, Power System Load Frequency Control Using Noise – Tolerable PID Feedback, 2001 IEEE, 1714-1718.

OYSAL Y., YILMAZ A.SERDAR, KÖKLÜKAYA E., Dynamic Fuzzy Networks Based Load Frequency Controller Design in Electrical Power Systems, G.U. Journal of Science 17(3):101-114,2004.

ÖZDEMİRCİ E., 2002, Bir Elektrik Güç Sisteminde Yük-Frekans Kontrolü İncelemesi ve Modellemesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.

TAN W., SUİ L., XU Z., Robust Analysis of Design of Load Frequency Controller for Power Systems, 17 th IEEE International Conference on Control Applications Part of 2008 IEEE Multi-conference on Systems and Control, San Antonio, Texas, USA, September 3-5, 2008.

UYSAL M., 2004, MATLAB ile Matematiksel Uygulamalar ve Mühendislik Uygulamaları, Beta Yayıncılık, İstanbul.

UZUNOĞLU M., KIZIL A., ONAR Ö. Ç., 2003, Her Yönü ile MATLAB, Türkmen Kitabevi, İstanbul.

WEEDY B.M., CORY B.J., 1998, Electric Power Systems, Fourth Edition.

WOOD A. J., WOLLENBERG B. F., 1996, Power Generation Operation and Control, Second Edition.

YEŞİL E., GÜZELKAYA M., EKSİN İ., Self Tuning Fuzzy PID Type Load Frequency Controller, Energy Conversion and Management 45, 2004, 377-390.

ZADEH L. A., Fuzzy Sets, Information and control, vol.8, no.3, pp.338-353, June 1965.

ZEYNELGİL H. L., DEMİRÖREN A., SENGÖR N. S., The Application of ANN Technique to Automatic Generation Control for Multi-area Power Systems, Electrical Power and Energy Systems 24, 2002, 345-354.

ZOBİ C., 1996, Yük-Frekans Kontrolünün İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.