

T.C.  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE GÜÇ BÖLGELERİ  
ARASINDAKİ SALINIMLARIN KONTROLÜ

CEMAL KELEŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

MALATYA

Ocak 2012

**Tezin Başlığı:** Elektrik Güç Sistemlerinde Güç Bölgeleri Arasındaki Salınımınların Kontrolü

**Tezi Hazırlayan:** Cemal KELEŞ

**Sınav Tarihi:** 04 Ocak 2012

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

**Sınav Jürisi yeleri**

Prof. Dr. M. Salih MAMIŐ (Jüri BaŐkanı)

Yrd. Doç. Dr. Asım KAYGUSUZ (Danışman)

Doç. Dr. Serdar E. HAMAMCI

İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. Asım KÜNKÜL

Enstitü Müdürü

## **ONUR SÖZÜ**

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Elektrik Güç Sistemlerinde Güç Bölgeleri Arasındaki Salınımların Kontrolü” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Cemal KELEŞ

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE GÜÇ BÖLGELERİ ARASINDAKİ SALINIMLARIN KONTROLÜ

Cemal Keleş

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

60+vii sayfa

2012

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Asım Kaygusuz

Bu tez çalışmasında güç sistemlerinde güç bölgeleri arasında yük dengesizlikleri, uzun iletim hatları ve yüksek değerde güç iletimi nedeniyle meydana gelen küçük genlikli ve düşük frekanslı elektro-mekaniksel salınımların sönümlenmesi için Katsayı Diyagram Metodu (KDM) olarak adlandırılan bir polinomsal yaklaşım kullanılarak kontrolör tasarlanmıştır.

Literatürde, birbirine bağlı sistemlerde bu tür salınımların kontrolü için birçok kontrol yöntemi tasarlanıp uygulanmıştır. Bu kontrolörlerden pratikte en çok kullanılan PID ve kesirli dereceli PID kontrolörleri ile önerilen KDM kullanılarak tasarlanan kontrolörün MATLAB’da benzetimleri ile basamak cevapları elde edilmiş ve sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır.

Birbirine bağlı sistemler için KDM kullanılarak tasarlanan kontrolörün kısa yerleşme süresine ve kapalı çevrimli sistemin zaman cevabının PID ve kesirli dereceli PID kontrolörlere oranla aşırımsız özelliğe sahip olduğu sonuçlardan görülmüştür. Bu sonuçlar gösteriyor ki, güç sistemlerinde meydana gelen alanlar arası salınımların kontrol edilmesinde KDM uygundur.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Alanlar arası salınımlar, Katsayı Diyagram Metodu, PID kontrolör, kesirli dereceli PID kontrolör, birbirine bağlı sistemler

## **ABSTRACT**

Master Thesis

### **CONTROL OF OSCILLATIONS IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS BETWEEN POWER REGIONS**

Cemal Keleş

İnönü University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Electrical and Electronics Engineering

60+vii pages

2012

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Asım Kaygusuz

In this thesis, to damp small amplitude and low frequency electromechanical oscillations occurring as a result of load imbalance, long transmission line and power transmission with high value between power regions in power systems, a controller was designed by using a polynomial approach called Coefficient Diagram Method (CDM).

In the literature, many control methods have been designed and applied for interconnected power systems to control these oscillations. Step response performances of PID and fractional order PID controller, which are the most commonly used controllers in power systems, and the designed controller by using the CDM have been obtained from Matlab/Simulink and then results were compared.

For interconnected systems, it has been seen from results that, designed controller using CDM has short settling time and step response without overshoot of close loop system rather than PID and fractional order PID controller. These in turn show that, the CDM is feasible in controlling modes emerged as inter-area oscillations in interconnected power systems.

**KEYWORDS:** Inter-area oscillations, Coefficient Diagram Method, PID controller, Fractional Order PID controller, Interconnected systems

## TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının her aőamasında yardım, öneri ve desteklerini esirgemeden beni yönlendiren danışman hocam Sayın Yrd. Do. Dr. Asım KAYGUSUZ'a;

Katsayı diyagram metodu konusunda yayınlarından faydalandığım ve bu konuda her türlü yardımlarını gördüğüm hocam Doç. Dr. Serdar E. HAMAMCI'ya;

Bu tezi yazdığım süre boyunca manevi desteğini gördüğüm çalışma arkadaşım Arő. Grv. Fatih Selman AVŐAR'a,

Bu tez çalışmasını "Elektrik güç sistemlerinde güç bölgeleri arasındaki salınımların incelenmesi" başlıklı ve 2011/28 nolu proje ile destekleyen İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne;

Ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi yüksek lisans çalıőmalarım süresince debenden her türlü desteklerini esirgemeyen değerli AİLEM'e ve ablam Emine AKDAĞ'a

teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Bölgeler Arası Düşük Frekanslı Salınımlar.....	2
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	7
<b>2. KAYNAK ÖZETLERİ VE KURAMSAL TEMELLER.....</b>	<b>9</b>
2.1. Kaynak Özetleri.....	9
2.1.1. Elektrik Güç Sistemlerinin Tarihi Gelişimi.....	9
2.1.2. Klasik GSK'nın Tarihi ve Uyartım Kontrol Çalışmalarında Kullanılması.....	10
2.1.3. PID GSK Kullanılarak Yapılan Uyartım Kontrol Çalışmaları.....	13
2.1.4. Bulanık GSK (B-GSK) Kullanılarak Yapılan Uyartım Kontrol Çalışmaları.....	13
2.1.5. Hibrit Algoritmalar ve GSK Kullanılarak Yapılan Uyartım Kontrol Çalışmaları.....	15
2.1.6. Kaynak Özetlerinin Değerlendirilmesi.....	16
2.2. Kuramsal Temeller.....	18
2.2.1. Güç Sistemlerinin Yapısı.....	18
2.2.2. Türkiye'deki Güç Sisteminin Yapısı.....	21
2.2.3. Güç Sistemi Üretim Birimi Kontrolleri.....	21
2.2.4. Uyartım Kontrol Sistemi.....	22
2.2.5. Güç Sistem Kararlılığı.....	24
2.2.5.1. Güç sistemlerinde kararlılık problemlerinin kısa tarihçesi.....	24
2.2.5.2. Genel olarak güç sistemi kararlılığı.....	25
2.2.5.3. Güç sistemi kararlılığının sınıflandırılması.....	27
2.2.5.3.1. Rotor açısı kararlılığı.....	28
2.2.5.3.2. Gerilim kararlılığı.....	29
2.2.5.3.3. Frekans kararlılığı.....	31
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>33</b>
3.1. Materyal.....	23
3.1.1. MATLAB Programının Kullanım Alanları.....	33
3.2. Yöntem.....	33
3.2.1. PID Kontrol.....	34
3.2.2. $PI^{\lambda}D^{\mu}$ Kontrol.....	36
3.2.2.1. Kesirli hesaplama.....	36
3.2.2.2. Tamsayı derece yaklaşımı.....	37
3.2.3. Katsayı Diyagram Metodu (KDM).....	38
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....</b>	<b>42</b>
4.1. KDM ile Alanlar Arası Salınımların Kontrolü.....	42
4.2. Güç Sistemine KDM ve FOPID Kontrolörlerin Uygulanması.....	43
4.3. Güç Sistemine KDM ve PID Kontrolörlerin Uygulanması.....	49
<b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....</b>	<b>54</b>
<b>6. KAYNAKLAR.....</b>	<b>55</b>
<b>7. EKLER.....</b>	<b>61</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	İki alanlı dört makineli güç sistem modeli.....	3
Şekil 1.2.	İki alanlı sistemin mekanik benzetimi.....	4
Şekil 1.3.	UCTE sisteminde meydana gelen salınımlar.....	5
Şekil 1.4.	Bölgeler arası salınımların sönümlenmesinde izlenecek yollar.....	6
Şekil 1.5.	Birbirine bağlı sistemlerde kendinden uyarılan salınım.....	6
Şekil 1.6.	Sistemlerin zayıf ve iyi sönüm ölçütü.....	7
Şekil 2.1.	Güç sisteminin temel elemanları.....	19
Şekil 2.2.	Güç sistem kararlılığının sınıflandırılması.....	28
Şekil 3.1.	PID denetleyicinin blok şeması.....	34
Şekil 3.2.	KDM sisteminin blok şeması.....	38
Şekil 3.3.	KDM sisteminin pratikte kullanılan blok şeması.....	39
Şekil 4.1.	New England 39 bara sistemi.....	44
Şekil 4.2.	New England 39 bara sistemindeki alanlar arası mod salınım şekli.....	45
Şekil 4.3.	KDM ve FOPID kontrol sistemlerine ait birim basamak fonksiyonu cevapları.	46
Şekil 4.4.	KDM ile tasarlanan kontrolörün ürettiği kontrol işareti.....	47
Şekil 4.5.	FOPID kontrol sisteminin ürettiği kontrol işareti.....	47
Şekil 4.6.	Sistemin çalışma noktası parametrelerinde meydana gelen $\pm\%15$ 'lik değişim için kontrol sistemlerinin birim basamak fonksiyonu cevapları.....	49
Şekil 4.7.	İki alanlı dört makineli güç sistemi.....	50
Şekil 4.8.	İki alanlı dört makineli güç sistemindeki alanlar arası mod salınım şekli.....	50
Şekil 4.9.	KDM ve PID kontrol sistemlerine ait birim basamak fonksiyonu cevapları.....	52
Şekil 4.10.	KDM ve PID kontrol sistemlerinin ürettikleri kontrol işaretleri.....	52
Şekil 4.11.	Sistemin çalışma noktası parametrelerinde meydana gelen $\pm\%15$ 'lik değişim için kontrol sistemlerinin birim basamak fonksiyonu cevapları.....	53



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1.	Değişik bozucu türleri göz önüne alınarak A(s) ve B(s) kontrolörlerinin Seçimi.....	40
Çizelge 4.1.	Şekil 4.3-4.4-4.5'te verilen zaman yanıtı eğrilerine ve kontrol işaretlerine ait davranış değerleri.....	48
Çizelge 4.2.	Şekil 4.8-4.9'da verilen zaman yanıtı eğrilerine ve kontrol işaretlerine ait davranış değerleri.....	51

## SİMGELER VE KISALTMALAR

<i>GSK</i>	Güç Sistem Kararlaştırıcı
<i>KDM</i>	Katsayı Diyagram Metodu
<i>PID</i>	Oransal-İntegral-Türev (Proportional-Integral-Derivative) kontrolör
<i>OGR</i>	Otomatik Gerilim Regülatörü
<i>SVC</i>	Statik Reaktif Güç Kompansatörü (Static VAR Compensator)
<i>STATCOM</i>	Statik Senkron Kompansatör (Static Synchronous Compensator)
<i>YG</i>	Yüksek Gerilim
<i>EYG</i>	Ekstra Yüksek Gerilim
<i>NETS</i>	New England test sistemi
<i>PC</i>	Kişisel bilgisayar
<i>B-GSK</i>	Bulanık güç sistem kararlaştırıcı
<i>BM</i>	Bulanık mantık
<i>GGSK</i>	Geleneksel güç sistem kararlaştırıcı
<i>SMIB</i>	Tek makine sonsuz baralı sistem (single machine infinite bus)
<i>MMPS</i>	Çok makineli güç sistemi (multi-machine power system)
<i>YSA</i>	Yapay sinir ağları
<i>HVDC</i>	Yüksek gerilim doğru akım (high voltage direct current)
<i>PID<sup>μ</sup></i>	Kesirli dereceli PID kontrolör
<i>e(t)</i>	Hata sinyali
<i>u(t)</i>	Kontrol çıkış sinyali
<i>k<sub>p</sub></i>	Oransal sabit
<i>k<sub>i</sub></i>	İntegral sabiti
<i>k<sub>d</sub></i>	Türev sabiti
<i>c(t)</i>	Toplam kontrol etkisi
<i>p(t)</i>	Oransal etki
<i>i(t)</i>	İntegral etki
<i>d(t)</i>	Türev etki
<i>ω</i>	Frekans
<i>λ</i>	İntegral sabitinin derecesi
<i>μ</i>	Türev sabitinin derecesi
<i>τ</i>	Eşdeğer zaman sabiti
<i>γ</i>	Kararlılık indeksi
<i>γ*</i>	Kararlılık sınır indeksi
<i>N(s)</i>	Transfer fonksiyonunun pay polinomu
<i>D(s)</i>	Transfer fonksiyonunun payda polinomu
<i>A(s)</i>	Kontrolör transfer fonksiyonunun payda polinomu
<i>B(s)</i>	Geri besleme pay polinomu
<i>F(s)</i>	Referans pay polinomu
<i>P(s)</i>	Karakteristik polinom
<i>a<sub>i</sub></i>	Karakteristik polinomun katsayıları
<i>l<sub>i</sub></i>	Kontrolör pay polinomunun katsayıları
<i>k<sub>i</sub></i>	Geri besleme pay polinomunun katsayıları
<i>λ<sub>1i</sub>, λ<sub>2i</sub></i>	Eşlenik özdeğer çifti
<i>ζ<sub>i</sub></i>	Sönümlenme oranı
<i>G(s)</i>	Sistemin transfer fonksiyonu
<i>C(s)</i>	Kontrolör polinomu

## 1. GİRİŞ

Güç sistemlerinde, yapısından kaynaklanan küçük değerli yük değişimleri devamlı ve rastgele meydana gelir. Bir güç sisteminin normal çalışma anında sisteme ek yük girmesi veya sistemden yük çıkması durumunda küçük genlikli ve 0.2-1.0 Hz aralığında düşük frekanslı salınımlar oluşur. Gerekli sönümlenme önlemleri alınmadığı takdirde, güç sisteminin kararsızlığa gidebileceği, bu durumun sistemlerin birbirinden ayrılmasıyla sonuçlanacak yük akışı dalgalanmalarına sebep olabileceği ve sonuçta geniş bir bölgede enerji kesintilerinin meydana gelebileceği açıktır. Bu durumun önüne geçilmesi için bir takım önlemlerin alınması gerekmektedir [1].

Günümüzde artan enerji ihtiyacıyla beraber, enerji kalitesi önemli bir konu haline gelmiştir. Enerji kalitesi sadece kesintisiz elektrik enerjisi anlamına gelmez. Tüketicilere sunulan elektrik enerjisi kesintisiz olmakla birlikte, şebeke gerilim ve frekans değerlerine ait değişimler belirli sınırlar içinde tutulmalıdır. Bunu sağlamanın temeli güvenilir bir güç sistemine sahip olmaktır. Güvenilirliğin sağlanmasında güç sistemi kararlılığı çok önemli bir konudur.

Güç sistemlerinde görülen salınımların sönümlenmesi ve böylece güç sisteminin etkin kararlılığının iyileştirilmesi amacı ile senkron jeneratör uyartım sistemine destekleyici bir kontrol işaretinin uygulanması uzun yıllardır kullanılan etkili bir yöntemdir [2]. Bu destekleyici kontrol işaretinin elde edildiği kontrol sistemleri literatürde güç sistem kararlaştırıcısı (GSK) olarak adlandırılır. Uyartım sistemine eklenen GSK'lar güç sistemlerinde görülen salınımların sönümlenmesinde etkili bir araç olarak kabul edilirler. Güç sistemlerinde GSK'nın temel fonksiyonu, sisteme etkileyen küçük bozucular sonrasında senkron jeneratörün rotorunda oluşan düşük genlikli ve düşük frekanslı salınımların sönümlenmesi ve güç sisteminin kararlılığının iyileştirilmesi amacı ile senkron jeneratörün uyartım sistemi üzerinden destekleyici sönümlenme momenti üretmektir.

Uzun yıllar aktif bir araştırma konusu olan GSK tasarımına yönelik çok sayıda çalışma yapılmıştır [3-14]. Bu çalışmaların birçoğunda güç sisteminin seçilen bir çalışma noktası için elde edilen doğrusallaştırılmış modeli kullanılmıştır [8-14]. Doğrusallaştırılmış model kullanılarak tasarlanan klasik GSK'lar seçilen çalışma noktasında beklenen performansı sağlarlar. Ancak güç sistemlerinde çalışma noktasının

değişmesi güç sisteminin tabiatı gereği devamlı ve rastgele oluşan elzem bir durumdur. Çalışma noktasının değiştiği durumlarda klasik GSK yapıları önemli derecede performans kaybına uğrar. Bu nedenle güç sistemlerinde çalışma noktasının veya hat empedansı gibi diğer bazı sistem parametrelerinin değişmesi durumunda performans kaybına uğramayan, dayanıklı yapıya sahip GSK tasarımı, üzerinde araştırmaların devam ettiği etkin bir çalışma alanıdır [15-17].

Katsayı Diyagram Metodu (KDM), 1991'de Shunji Manabe tarafından doğrusal ve zamanla değişmeyen tek-girişli tek-çıkışlı sistemlerin kontrolü için geliştirilmiş bir yöntemdir [18]. Yöntemin en önemli özellikleri sistem ve kontrolör için polinomsal gösterimin kullanılması, iki serbestlik dereceli kontrol sistem yapısının kullanılması, kapalı çevrim sistemine ait birim basamak cevabının genellikle aşısız olması, istenen yerleşme süresinin başlangıçta belirlenip ona göre tasarımın yapılması, sistem değişkenlerinde meydana gelebilecek değişimlere karşı kontrol sisteminin dayanıklılığının iyi olması şeklinde sayılabilir [19]. Özellikle KDM'nin dayanıklı kontrol sistemi sağlaması, metodun güç bölgeleri arasındaki salınımların kontrolü için kullanılabilmesi fikrini doğurmuştur.

Bu tez çalışmasında KDM kullanılarak güç sistemlerinde güç bölgeleri arasında meydana gelen küçük genlikli, düşük frekanslı elektromekaniksel salınımların sönümlenmesi için kontrolör tasarlanmıştır. Bugüne kadar bu tür sistemlere uygulanan birçok kontrol yöntemlerinden PID ve kesirli dereceli PID kontrol sistemlerinin performansı ile KDM kontrol sisteminin performansı ayrıntılı olarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca çalışma içerisinde güç sistemlerinin genel yapısı, güç sistemlerinde kararlılık tanımları, güç sisteminde uyarım kontrol sistemleri yer almıştır.

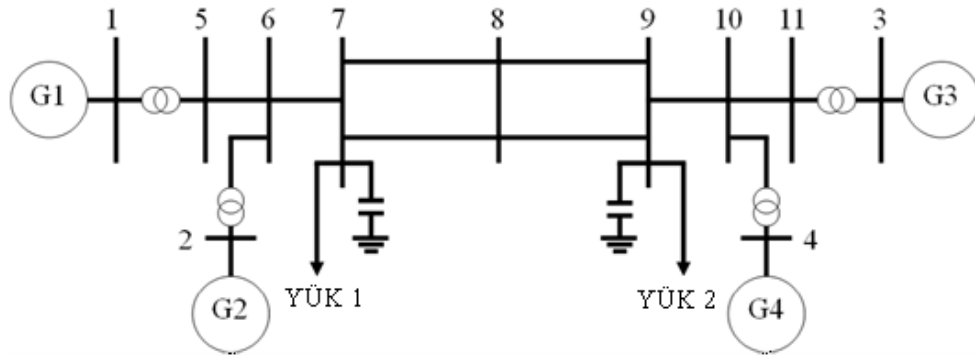
### **1.1. Bölgeler Arası Düşük Frekanslı Salınımlar**

Güç sistemine bağlı her jeneratör, sistemin geri kalanına göre salınmaktadır. Bu salınımların sebebi hat açması, gerilim ayar değeri değişiklikleri, yüksek gerilim transformatör kademe değiştirmesi, uzun iletim hatları, güç bölgeleri arasında yük dengesizlikleri ve yüksek değerlerde güç iletimi gibi olağan güç sistemi olaylarıdır. Genellikle, jeneratörlerin bu salınımları sönümlendirme performansını analiz etmek amacıyla, otomatik gerilim regülatörü (OGR) çevriminin girişine gerilim ayar değerinin yaklaşık % 2'sine karşılık gelen birim basamak cevabı testi uygulanır. Bu test GSK'nın

aktif olduğu ve aktif olmadığı durumlar için tekrarlanır ve iletim sistemine bağlı bir makine için yerel salınım frekans etrafında aktif güç salınımlarının GSK devrede iken daha iyi sönümlenmesi beklenir [20].

Grup jeneratörler veya grup tesislerdeki salınımlar, alanlar arası (inter-area) mod olarak adlandırılır. Birbirine bağlı senkron jeneratörler arasındaki elektro-mekanik salınımların dengelenmesi, sistem etkisinin güvenliğinin sağlanması için gereklidir. Birbirine bağlı sistemlerde alanlar arası salınımları etkileyen birçok etken vardır: Düğüm devrelerinin sayısı ve düğüm hattındaki güç akışının farklı değerlerine göre, düğüm hat empedansı ile güç akışı artarken alanlar arası modunun frekans ve sönüm oranı düşer. Uyarıcı sistemlerin alanlar arası mod frekans ve sönümlenme oranı üzerindeki etkisi, kullanılan uyarıcının tipine göre değişiklik gösterir. Uyarıcı sistemlerin sönümü dikkate alındığında en iyi sönüm elle kontrol edilebilen uyarıcı sistemde ve en kötü sönüm ise hızlı uyarıcı sistemde gözlenir. Ayrıca yük özellikleri de alanlar arası mod frekans ve sönümlenme oranını etkiler. Doğrusal olmayan yükler, sönümlenme oranı üzerinde azaltıcı etkiye sahiptir [21].

Şekil 1.1’de simetrik bir sistem görülmektedir. İki özdeş alanın bağlantısı, nispeten zayıf bir düğüm hattı sayesinde gerçekleştirilmiştir.



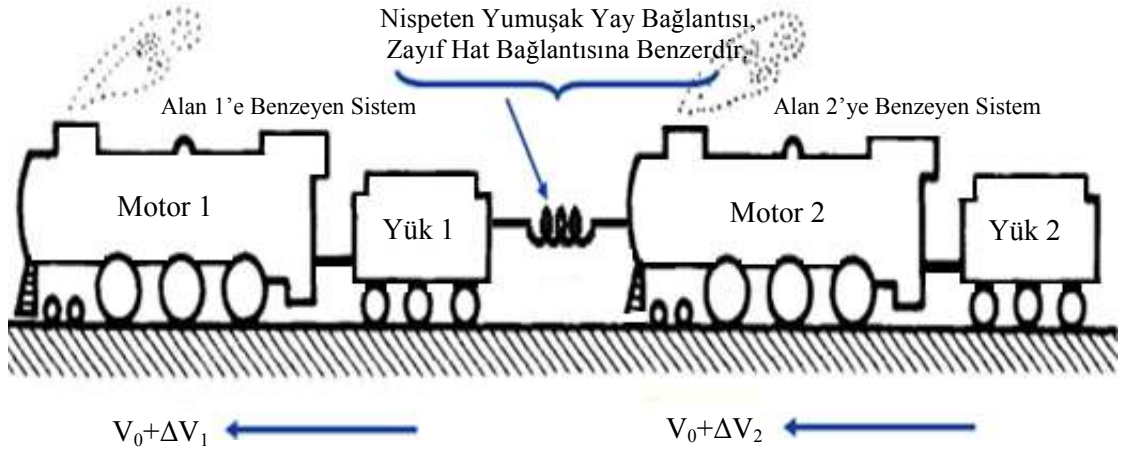
Şekil 1.1. İki alanlı dört makineli güç sistem modeli [22]

Burada her alan iki özdeş jeneratör içermektedir. Bu sistemde meydana gelebilecek güç akışları aşağıdaki gibidir:

- İki alan arasında güç transferi olmayan simetrik sistemde bir alandaki üretim birimi, ikinci alandaki üretim birimine zıt fazlı olarak salınır. Alan yükünü her bir alandaki üretim sağlar. Zıt fazlı salınan birimler aynı genliğe sahiptir.

- Asimetrik bir sistemde alanların ürettiği güçler farklıdır ancak alan yükünü, her bir alandaki üretim sağlayabilir. Bu durumda da düğüm hattı üzerinde akım akmaz.
- Düğüm hattı üzerinde güç akışı olan asimetrik bir sistemde iki alandaki üretim birimleri tarafından üretilen güçler farklıdır ve yük dengesizliği de bulunmaktadır. Alıcı alanda üretim birimleri, gönderen alandakine göre farklı genlikte salınır [21].

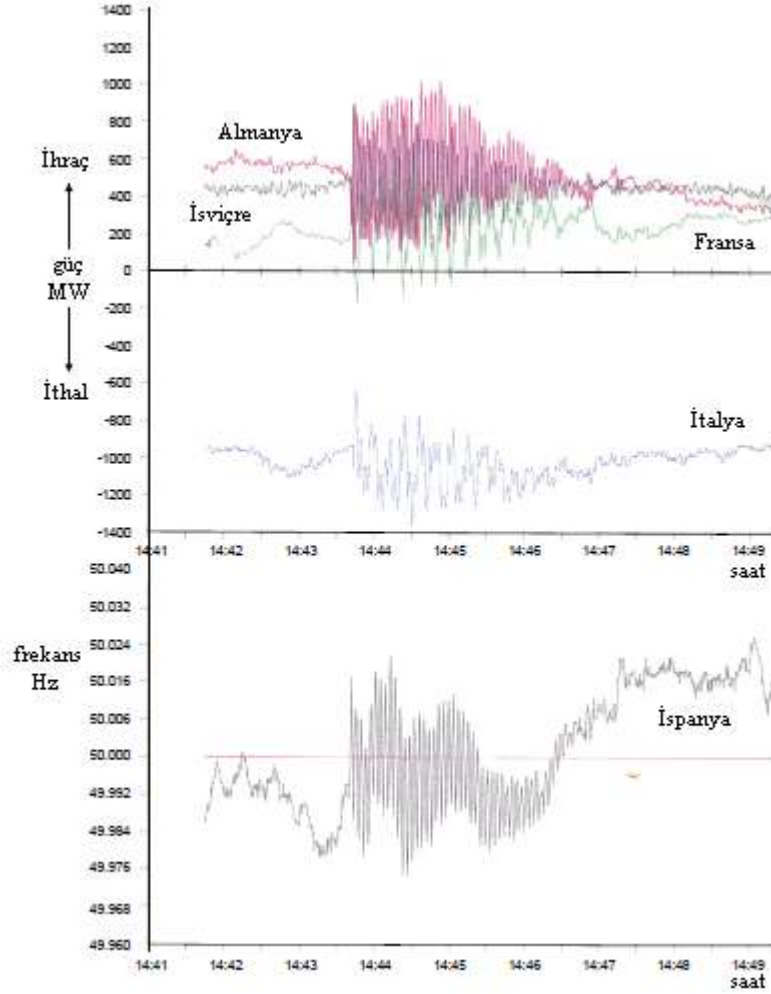
Şekil 1.2’de iki alanlı sistemin mekanik benzetimi görülmektedir. Bu benzetimden de görüldüğü üzere ilk hızları aynı olan sistemlerin hız değişimindeki farktan kaynaklı yayda meydana gelen gerilme, iki alanlı güç sisteminde özdeş üretim birimlerinin farklı yüklenmesinden ve yüksek değerlerde güç akışından kaynaklanan düşük genlikli, küçük frekanslı salınımlara benzetilmiştir.



Şekil 1.2. İki alanlı sistemin mekanik benzetimi [23]

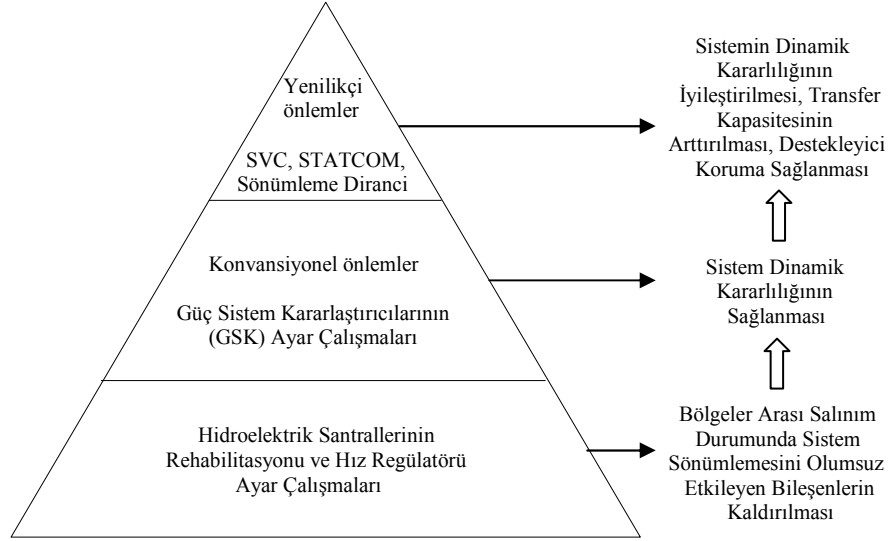
Alanlar arası güç salınımlarına bir örnek olarak 30 Aralık 1981 tarihinde batı Avrupa şebekesinin senkron paralel bağlantısında meydana gelen salınım Şekil 1.3’te gösterilmiştir.

Sistemdeki salınımlar bazen sistem gerilimi çökmesine bazen de sistemde gerilim çökmesi olmadan dakikalarca sürebilen güvenli olmayan bir enerji akışına neden olmaktadır. Buradaki duruma bakıldığında gerilim çökmesinin olmadığı ancak sistemde güvenli olmayan bir güç akışının yaklaşık dört dakika süreyle meydana geldiği görülmektedir.



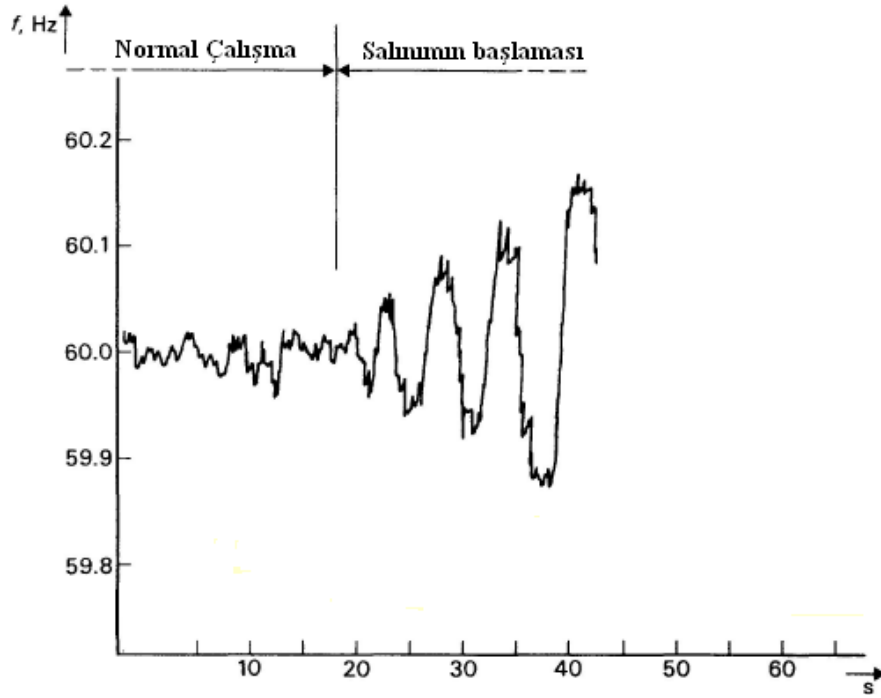
Şekil 1.3. UCTE sisteminde meydana gelen salınımlar [23]

Gerekli sönümlenme önlemleri alınmadığı takdirde, bu durumun iki sistemin birbirinden ayrılmasıyla sonuçlanacak yük akışı dalgalanmalarına sebep olabileceği açıktır. Bu durumun önüne geçilmesi için bir takım önlemlerin alınması gerekmektedir. Bu önlemler, Şekil 1.4'te öncelik sırasına göre verilmiştir. Bir başka deyişle şekilde, alanlar arası bağlantı sonrası şebekenin dinamik kararlılığını iyileştirmek amacıyla yapılması gereken çalışmalar ve takip edilen yol haritasını özetlemektedir. Şekilde görüldüğü gibi, ilk önlem büyük ve uzun cebri borulu hidrolik santrallerin hız regülatörü kontrol sistemlerinin rehabilitasyonu ve kontrolör parametrelerinin iyileştirilmesidir [25]. Bir sonraki konvansiyonel çözüm; düşük frekans salınımlarının GSK ile uyarım sisteminin OGR üzerinden, sönümlendirilmesidir [26,27]. Bunları daha yeni çözümler olan SVC, STATCOM ve sönümlendirici direnç uygulamaları izler [26].



Şekil 1.4. Bölgeler arası salınımların sönümlenmesinde izlenecek yollar [24]

Şekil 1.5'te ise birbirine bağlı sistemlerde üretim grupları arasında normal çalışma durumu ile bu tür sistemlerde meydana gelebilecek salınımın başlaması birlikte görülmektedir.



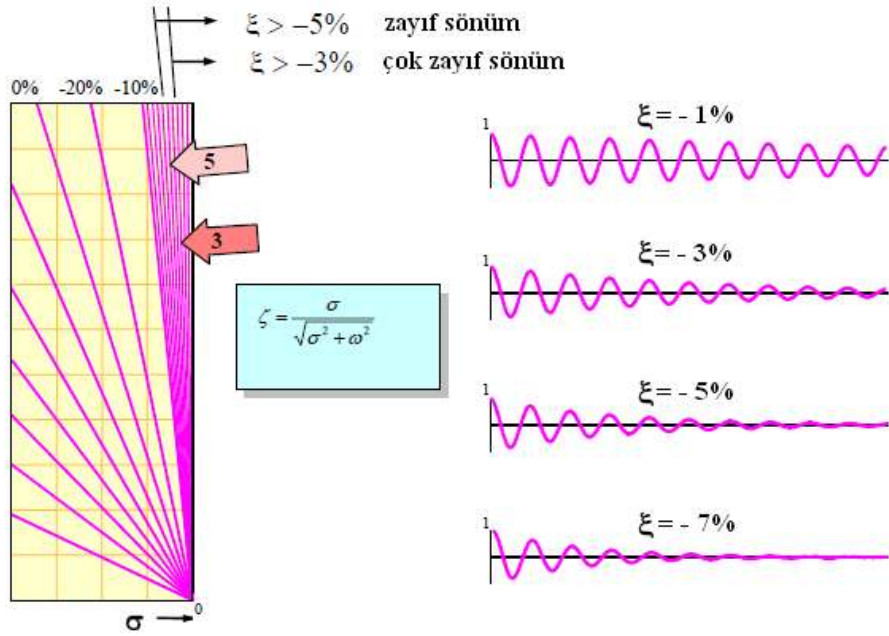
Şekil 1.5. Birbirine bağlı sistemde kendinden uyarılan salınım [23]

Özdeğer veya modal analiz, sistemin küçük sinyal analizini tanımlar. Bu analiz, bir çalışma noktası civarının doğrusallaştırılması ve geniş sistem karmaşıklığında tasarlanan kontrolörün doğrusal olmayan davranışının hesaba katılmamasını içerir.



Özdeğer analizi, “mod” olarak adlandırılan farklı özellikteki frekanslarda güç sisteminin dinamik davranışını inceler. Güç sistemlerinde tüm modların kararlı olması gereklidir. Ayrıca tüm elektro-mekanik salınımların mümkün olduğunca hızlı sönümlenmesi arzu edilir. Daha iyi anlaşılabilmesi için özdeğer analizi sonuçları frekans ve her bir salınım modu ile ilgili sönümleme olarak verilir.

Şekil 1.6’da sistem sönümlemesinin analizi gösterilmiştir. Burada sönümleme oranının % 5 olması, üç salınım periyodunun genliğinin ilk değerine oranla % 32 oranında sönümlendirilmesi anlamına gelir. Kabul edilebilir en düşük sönümleme seviyesi tam olarak bilinmemesine rağmen sönümleme oranının % 3’ten küçük olması, sistem için bir uyarı anlamı taşır. Sönümlemenin yeterli olduğunun kabul edilmesi için tüm elektro-mekanik modların sahip olduğu sönümleme oranının en az % 5 olması gerekir.



Şekil 1.6. Sistemlerin zayıf ve iyi sönüm ölçütü [28]

## 1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Enerji üretim sistemlerinde kullanılan senkron jeneratörlerin kararlılığını ve dinamik performansını arttırarak etkili bir gerilim kontrolü sağlamak suretiyle üretilen gücün kalitesi arttırılabilir. Bunun için de senkron jeneratörlerin uyarım kontrolü için literatürde kullanılan yöntemlerden farklı bir kontrol yönteminin kullanılabilirliği üzerinde çalışılmıştır. Bu tez çalışmasında, birbirine bağlı güç bölgeleri arasında meydana gelen elektro-mekanik salınımlar incelenmiştir. Güç sistemlerinde görülen

düşük frekanslı küçük genlikli salınımlar, gerektiği gibi sönümlenmediği zaman, sistemin güç iletim kapasitesini sınırlayarak güç sisteminin kararsızlığa gitmesine neden olabilirler. Yine bu çalışmada bu salınımların sönümlendirilmesi için KDM olarak adlandırılan bir polinomsal yaklaşım kullanılarak kontrolör tasarlanmıştır. Bugüne kadar birbirine bağlı sistemlere birçok kontrol yöntemi uygulanmıştır. Önerilen KDM kullanılarak tasarlanan kontrolör ile PID ve kesirli dereceli PID ile tasarlanan kontrolörlerin bilgisayar ortamında benzetimi ile basamak cevapları elde edilmiş ve sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır.

Yapılan bu çalışma ile aynı zamanda aşağıda belirtilen iyileştirmeler de dolaylı olarak ortaya çıkmaktadır:

- Senkron jeneratörlerde güç sistem kararlaştırıcısı yoluyla uyartım kontrolünün iyileştirilmesi,
- Güç açısı ve açısal hız gibi güç parametrelerindeki düşük frekanslı salınımların sönümlenmesi,
- Güç sisteminin etkin performansının ve güvenliğinin artırılması,
- Güç sistem kararlılığının artırılması,
- Üretilen elektriksel gücün kalitesinin artırılması.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ VE KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Kaynak Özetleri

#### 2.1.1. Elektrik Güç Sistemlerinin Tarihi Gelişimi

1878'de Thomas A. Edison elektrik lambası üzerine çalışmaya başlamış ve güç istasyonu kavramını merkezi olarak kurulmuş çevresindeki alanı aydınlatan merkez olarak tanımlamıştır. Ekim 1879'da çalışmalarını geliştirmiş ve 4 Eylül 1882'de New York'ta tarihi Pearl Caddesi istasyonunu açarak elektrik şirketi sanayisini başlatmıştır. Sonradan dinamo denen DC jeneratörler, Pearl caddesinde bir milikarelik alandaki 59 tüketiciye 110V akkor aydınlatma sağlamak amacıyla 30kW'lık ilk yüklerini beslemek için buhar türbinleri tarafından sürülmüştür [29].

1884'te Frank Sprague'nun motorları geliştirmesi ile güç sistemlerine motor yükleri de eklenmiştir. 1886'da DC sistemlerin sınırlılıkları iyice ortaya çıkmıştır. L. Gaulard ve J.D. Gibbs tarafından AC iletimin ve transformatörün geliştirilmesi, AC güç sistemlerini ortaya çıkarmıştır. George Westinghouse Amerika'da bu gelişmeleri tamamen sağlamlaştırmıştır. 1886'da Westinghouse'ın ortağı William Stanley Massachusetts Great Barrington'da 150 lamba için AC dağıtım sistemi ve transformatör uygulaması gerçekleştirmiştir [1].

1888'de Tesla AC motorlarda, jeneratörlerde, transformatörlerde ve iletim sistemlerinde çeşitli patentler almıştır. Transformatörlerle daha düşük akım ve daha düşük hat gerilim düşümleri ile yüksek gerilimde güç iletimi yeteneği AC'yi DC'den daha çekici yapmıştır. İlk tek fazlı AC hat Amerika Birleşik Devletleri'nde Oregon şehri ve Portland arasında 4 kV, 21 km olarak 1889'da çalıştırılmıştır [29].

Nikola Tesla tarafından çok fazlı sistemlerin geliştirilmesi ile AC sistemler daha çekici olmuştur. 1890'larda elektrik şirketi sanayisinde DC ve AC sistemler arasında önemli bir çekişme oluşmuştur. Edison'un DC sistemleri, Westinghouse'un AC sistemleri tavsiye etmesi aralarında münakaşalara neden olmuştur. Yüzyılın sonunda aşağıdaki sebeplerden dolayı AC sistemler DC sistemlerden üstün gelmiştir.

- AC sistemlerde gerilim seviyeleri kolayca dönüştürülebilir, bu da üretim, iletim ve tüketimde farklı gerilim seviyelerinin kullanımı için esneklik sağlar.
- AC jeneratörler DC jeneratörlerden daha basittir.

- AC motorlar DC motorlardan basit ve ucuzdur.

Almanya’da ilk üç fazlı hat 179 km’ye 12 kV güç iletmek için 1891’de kurulmuştur. Amerika Birleşik Devletleri’nde ilk üç fazlı hat 12 km’ye 2.3 kV iletmek için 1893’te kurulmuştur [5]. Aynı dönemlerde Niagara Şelalesi’nde AC sistemler kullanılmaya başlanmıştır. Bu karar AC ve DC çekişmesini sonlandırmış ve AC sistemler kazanmıştır [30].

Edison’un buharla sürülen jeneratörleri çalıştırılmış, suyla sürülen jeneratör Appleton’da kurulmuştur. O günden sonra elektrik enerjisinin çoğu buhar güçlü ve su güçlü türbin şebekelerinde üretilmiştir. Buhar şebekeleri başlangıçta kömür, gaz, yağ ve uranyum ile beslenmiştir. Kömür beslemeli şebekeler 1970’lerin başında yağa dönüştürülmelerine rağmen, 1973/74 yağ ambargosundan dolayı bu eğilim tersine dönmüştür. 1957’de uranyumla beslenen 90 MW buhar türbini kapasiteli nükleer birimler açılmıştır. Fakat nükleer kapasitenin gelişimi artan yapı maliyetleri, lisanslama gecikmeleri ve kamuoyu tepkisinden dolayı yavaşlamıştır [5].

Başlangıçta AC iletimde frekans standartlaştırılmadığı için 25, 50, 60, 125 ve 133 Hz gibi birçok farklı frekans kullanılmıştır. Bu enterkonnekte bağlantı için büyük bir sorun oluşturmuştur. Sonra birçok ülkede 50 Hz standart olarak kabul edilmiş fakat Kuzey Amerika’da 60 Hz kabul edilmiştir. Daha uzak mesafelere daha büyük miktarlarda güç iletimi ihtiyacının artması daha yüksek gerilim seviyeleri kullanma isteği oluşturmuştur. İlk AC sistemlerde 12, 44 ve 60 kV (faz-faz rms) kullanılmıştır. Bu 1922’de 165 kV’a, 1923’te 220 kV’a, 1935’te 287 kV’a, 1953’te 330 kV’a ve 1965’te 500 kV’a çıkmıştır. Sınırsız gerilim seviyesi sayısından kurtulmak için, gerilim seviyeleri standartlaştırılmıştır. Yüksek Gerilim (YG) sınıfı için standartlar 115, 138, 161 ve 230 kV ve Ekstra Yüksek Gerilim (EYG) sınıfı için 345, 500 ve 765 kV’tur.

### **2.1.2. Klasik GSK’nın Tarihi ve Uyarım Kontrol Çalışmalarında Kullanılması**

Güç sistemlerinde kararlılık problemi mühendislerin üzerinde yıllardır uğraştığı karmaşık bir konudur. Bu problem ilk kez ciddi olarak 1920’de Steinmetz tarafından ele alınmıştır. Evans ve Bergvall tarafından 1924’te yapılan deneysel sonuçlar ilk olarak laboratuarda kurulan minyatür sistemler üzerinden alınmıştır. Pratik olarak güç sistemleri üzerinde kararlılık için ilk alan testleri ise 1926’da Wilkins ile Evans ve Wagner tarafından yapılmıştır. İlk kararlılık problemleri uzun iletim hatları üzerinden

şehirdeki yük merkezlerini besleyen hidroelektrik üretim istasyonları ile ilgilidir. Ekonomik nedenlerle bu tip sistemler kararlı-hal limitlerine çok yakın bir şekilde işletilmektedir. Bu yüzden kararlı hal işletiminde nadiren kararsızlık meydana gelmektedir. Buna karşın kısa devre ve diğer sistem bozucu etkileri nedeniyle sık sık kararsızlıklar oluşmaktadır. Kararlılık, iletim sistemi gücünden oldukça fazla etkilenmektedir. Genellikle yetersiz senkronlama momenti nedeniyle kararsızlık oluşmaktadır. Hata temizleme süresi de oldukça uzundur [1].

Senkron makinelerle ilişkin uyarım sistemlerinin, elektrik sistemleri içerisinde oluşan geçici olaylar üzerinde belirgin etkileri vardır. Bu nedenle literatürde güç sistemlerinin kararlılığının iyileştirilmesinde uyarım sistemlerine büyük önem verilmiştir. Başlangıçtaki uygulama ve incelemelerde güç sistemlerinin sürekli hal kararlılık sınırlarının arttırılmasında yüksek kazançlı ve sürekli çalışan gerilim regülatörlerinin uygun olduğu görülmüştür. Daha sonraları, gerilim regülatör kazanç gereksinimlerinin, yüklü ve yüksüz çalışma durumları için farklı olduğu ortaya çıkmıştır. 1950'li yıllarda konu ile ilgili mühendisler, modern gerilim regülatörlerinin oluşturduğu kararsızlıkların farkına varıp, kararlı kılıcı geri besleme devrelerini uygun bir şekilde kullanmaya başlamışlardır [31].

Rotor hız salınımlarında sönümleme sağlamak için gerilim kontrol döngüsünün kullanılması düşüncesi ilk olarak 1968'de Dandeno vd. ve Schleif vd. tarafından düşünülmüştür. Bu çalışmada elde edilen başarılı sonuçlar, çeşitli güç sistem kararlaştırıcılarının geliştirilmesine öncülük etmiştir. Heffron ve Phillips tarafından 1952'de harici bir empedans üzerinden sonsuz baraya bağlı bir senkron jeneratörü temsil eden bir model geliştirilmiştir. Bu doğrusallaştırılmış basit bir modeldir. Bu modelin düşük frekans salınımlarının analizi için uygun olduğu Mello ve Concordia tarafından 1969'da yapılan çalışma sonucunda anlaşılmıştır [32].

Mello ve Concordia tarafından 1969'da uyarım kontrolü üzerine yapılan çalışmada senkron makinelerin küçük bozucu etkiler karşısındaki kararlılığı incelenmiştir. Burada sistem modeli olarak harici bir reaktans üzerinden sonsuz baraya bağlı tek makineli sistem göz önüne alınmıştır. Bu sistem üzerinde frekans cevap analizi yoluyla yapılan analizlerde, kararlılığı arttırmak için hızdan türetilen ve otomatik gerilim regülatörü (OGR) girişine ilave edilen yardımcı sinyallerin etkileri incelenmiştir. Ayrıca bu çalışmada uyarım sisteminden kaynaklanan negatif sönümleme etkisinin nasıl meydana

geldiği ve dinamik salınımların sönümlenmesinde kararlaştırıcı işaret tasarımı konusu açıklanmıştır. Yapılan analizler tristör tipli uyarım sistemlerinin etkilerinin ve bu tip sistemlerinin kararlılık ihtiyaçlarının anlaşılması bakımından yararlı olmuştur. Farklı durumlarda ortaya çıkan ve birçok çeşidi olan salınımların yükleme koşullarına göre kısa süreli, güç sistemi yapılandırılmalarına göre de uzun süreli değişimler gösterdiği belirtilmiştir. Salınımların sönümlenmesi için her koşulda geçerli olacak genel bir kararlılık fonksiyonunun araştırılarak bulunmasının önemli olduğu ifade edilmiştir. Zaman sabiti 0.05 civarı veya daha küçük olan bir tristörlü uyarıcı olması durumunda sistem kararlılığı açısından bazı öneriler yapılmıştır. Mello ve Concordia'nın yaptığı bu çalışma daha sonra jeneratörlerde uyarım sistemi yoluyla daha iyi bir geçici hal performansı elde etmeyi amaçlayan güç sistem stabilizatör çalışmalarına öncülük etmiştir.

Abdel-Magid vd. [33] tarafından yapılan çalışmada çok makineli güç sistemlerinde eş evreli kararlılık sağlayabilmek için parametreleri genetik algoritma ile optimize edilen kural tabanlı bir GSK tanıtılmıştır. Buradaki optimizasyon problemi için özdeğer tabanlı bir fonksiyon kullanılmıştır. Genetik algoritma GSK tasarımına zeki bir yön kazandırmış ve harcanan zamanı önemli ölçüde azaltmıştır. Kontrolörün performansı SMIB sistemi ve iki makineli güç sistemi üzerinde farklı bozucu etki ve yük koşulları altında test edilmiştir. Önerilen tekniğin yerel ve alanlararası salınım modlarının sönümlenmesindeki performansı, yapılan özdeğer analizi ve benzetimlerle test edilmiştir. Benzetim sonuçları geleneksel (faz kaydırmalı) ve kural tabanlı GSK ile karşılaştırılmıştır. Ve sonuç olarak önerilen yöntemle GSK parametre seçiminin geniş bir yükleme aralığı için kararlılığı sağladığı belirtilmiştir.

Doraraju ve Nondy [34] tarafından yapılan çalışmada güç sistemlerinin dinamik kararlılığının artırılması amacıyla yeni bir uyarlanabilir kontrol yaklaşımı tanıtılmıştır. Buradaki uyarlanabilir kontrol yapısı, 'hiperstabilite' (yüksek seviyeli kararlılık) teorisi temeline dayanmaktadır.

Gan vd. [35] tarafından yapılan çalışmada, geri besleme doğrusallaştırma ve nonlineer dayanıklı kontrol teorilerini kullanarak çok makineli güç sistemi için uyarım kontrolörü tasarlanmıştır. Kontrolörler jeneratör uyarım sisteminin bir parçası olarak tasarlanmıştır. Önerilen kontrolörün performansı, 10 makine ve 39 baradan oluşan New England test sistemi (NETS) üzerinde yapılan simülasyon çalışmalarıyla test edilmiştir.

Sonuç olarak diğer kontrol stratejilerine göre bağımlılık yönünden birkaç avantajı olduğu belirtilmiştir.

Hu vd. [36] çalışmalarında, bilinmeyen parametrelerle nonlinear bir uyarlanabilir kontrol sistemi tasarlamışlar ve bunu da güç sistemleri uyarım kontrolüne uygulamışlardır. Bu kontrolör tüm geri besleme değişkenleri lokal ölçümler sonucu elde edildiğinden merkezi bir yapıya sahiptir. Çok makineli sistem için doğrusal olmayan, uyarlanabilir ve merkezi uyarım kontrol stratejisinin genel ifadesi çıkarılmıştır. 6 makineli 22 baralı sistem üzerinde yapılan benzetimler, doğrusal olmayan uyarlanabilir kontrolörlerin etkinliğini ortaya koymuştur.

### **2.1.3. PID GSK Kullanılarak Yapılan Uyartım Kontrol Çalışması**

Schaefer vd. [37] tarafından yapılan çalışmada iki adet PID kontrolör içeren bir gerilim regülatörü tanıtılmıştır. Biri yavaş ve küçük genlikli diğeri hızlı ve büyük genlikli olan iki kontrolörün parametreleri optimal olarak ayarlanmıştır. Bu iki kontrolör arasında geçiş işlemi ise bir darbeye meydan verilmeden GSK'nın durumu belirten bir sinyal değişikliği ile yapılmaktadır. Küçük genlikli kontrolör, GSK devre dışında kalınca devreye girmekte ve jeneratörün kararlı olarak çalışmasını sağlamaktadır. Büyük genlikli kontrolör ise GSK ile birlikte devreye girerek, bir bozucu etki sonrası jeneratörün dinamik ve geçici hal performansını arttırmaktadır. Elde edilen test sonuçları, GSK pasif durumda iken bile performanstan ödün verilmediğini göstermiştir.

### **2.1.4. Bulanık GSK (B-GSK) Kullanılarak Yapılan Uyartım Kontrol Çalışmaları**

Hasan vd. [38] tarafından yapılan çalışmada bulanık mantık tabanlı kontrolörler tanıtılarak senkron jeneratör uyarım sistemine pratik olarak uygulanması gösterilmiştir. Bulanık kontrolör jeneratör çıkışında sabit bir gerilim sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Kontrolör giriş değişkenleri olarak çıkış gerilimi ve türevi kullanılmıştır. Bulanık kontrolörün performansını test etmek amacıyla test sistemi kurularak deneysel bir çalışma yapılmıştır. Kişisel bilgisayar (PC) içerisinde çalıştırılan C programlama diliyle yazılan bulanık kontrol yazılımı kullanılmıştır. Endüstriyel büyüklükteki 5 kVA'lık bir jeneratör çıkışından alınan analog gerilim sinyali bir A/D dönüştürücü ile dijital işarete dönüştürülmüş ve PC içerisindeki algoritma yardımıyla işlenerek çıkış kontrol sinyaline dönüştürülmüştür. Bu kontrol sinyali D/A dönüştürücü ile analog işarete dönüştürülerek uyarım devresinde kontrol sinyali olarak kullanılmıştır. Bulanık kontrolörün

performansı, PC’de assembly dilinde yazılmış klasik PID tipi bir kontrol sağlayan kontrolör yazılımı ile karşılaştırılarak test edilmiştir. Sonuç olarak daha hızlı ve daha az bir taşma sağlayarak üstün bir performans sağladığı gösterilmiştir.

Hiyama [39] tarafından yapılan çalışmada tasarlanan bir bulanık GSK (B-GSK) deneysel ve benzetim çalışmalarında kullanılmıştır. Önerilen GSK bir mikrobilgisayar bir A/D ve bir D/A dönüştürücü karttan oluşmaktadır. Ölçülen aktif güç ve/veya hız bilgisi bulanık kuralları ile değerlendirilerek kararlılaştırıcı çıkış sinyalinin üretimi gerçekleştirilmektedir. Kontrol kuralları oldukça basit olduğundan mikrobilgisayar için ağır hesaplamalar içermemektedir. Bu şekilde adeta bir gerçek zamanlı kontrol işlemi gerçekleştirilmiştir. Geniş bir aralıktaki yüklemeler altında yapılan benzetim çalışmalarında çok makineli sistem modeli olarak Japonya Kyusu elektrik güç sisteminin bir bölümü temsil eden 5 makineli sonsuz baraya bağlı güç sistemi modeli kullanılmıştır. Aynı benzetim modeli üzerinde geleneksel GSK ve önerilen B-GSK kullanılarak yapılan karşılaştırmalar sonucu B-GSK’nın avantajlı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca mikro makine sistemi üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda önerilen B-GSK’nın etkinliği ve uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Hiyama vd. [40] tarafından yapılan çalışmada, güç sistemlerinin genel kararlılığının artırılması amacıyla Bulanık mantık (BM) tabanlı bir uyarım sisteminin kullanılması önerilmiştir. Önerilen uyarım sistemi iki adet kontrol çevrimine sahiptir. Birisi OGR fonksiyonunu icra eden gerilim kontrol çevrimi diğeri de GSK fonksiyonunu uygulayan sönüm kontrol çevrimidir. Her iki çevrime de basit BM kuralları uygulanmıştır. Gerilim kontrol çevriminin giriş sinyali olarak jeneratör çıkış gerilimi, sönüm kontrol çevriminin giriş sinyali olarak da aktif güç çıkışı kullanılmıştır. Yapılan benzetim çalışmaları BM uyarım sisteminin avantajlarını göstermektedir. Sonuç olarak hem gerilim hem de sönüm kontrolü açısından iyi bir performans göstermiştir. Önerilen kontrolörün çok ağır hesaplamalara gerek duymadığı ve kolayca gerçekleştirilmesinin mümkün olduğu belirtilmiştir.

Chang vd. [41] yaptıkları çalışmada güç sistemlerinde düşük frekans salınımlarının sönümlenmesi amacıyla önerilen çok seviyeli bir B-GSK tanıtılmıştır. Tüm çalışma durumlarında optimal performansı sağlamak amaçlanmıştır. Ayrıca önerilen GSK için çevrim dışı çalışan öğrenme algoritması da tanıtılmıştır. Bir çalışma durumunda optimize edilmiş parametrelere sahip olan GGSK’in dinamik cevabı kullanılarak eğitim



seti elde edilmiştir. Matlab/Simulink programında SMIB sistem modeli üzerinde benzetimler yapılarak önerilen kontrolörün performansı test edilmiştir. Benzetim sonuçları GSK sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve bu sonuçlar ITSE ve IECE performans değerlendirme ölçütlerine göre değerlendirilmiştir. Bu sonuçlara göre önerilen GSK'in çok daha iyi performansa sahip olduğu görülmüştür.

Lu vd. [42] yılında yaptıkları çalışmada çok makineli güç sistemleri için tasarlanan bir B-GSK tanıtılmıştır. Takagi-Sugeno tipi bulanık modeli kullanılarak tasarlanan iki lineer stabilizatör için, ağır ve hafif yükleme koşulu olmak üzere iki uç çalışma durumu göz önüne alınmıştır. BM mekanizması doğrusal kararlılaştırıcılardan gelen sinyalleri birleştirerek tek bir kontrol sinyali üretmektedir. Bulanık kontrolörün optimize edilmesinde küçük kareler metodu ile hata minimize edilmesi yöntemi kullanılmıştır. Yapılan benzetim çalışmalarında SMIB sistemi ve iki MMPS modeli ('2 bölgeli 4 makineli 13 baralı', '16 makineli 68 baralı') kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, farklı yük koşulları altında düşük frekans salınımları üzerinde yeterli bir sönümlenme sağlanmıştır.

Al-Osaimi vd. [43] tarafından yapılan çalışmada B-GSK uygulaması tanıtılmıştır. Önerilen yöntemin hem benzetim uygulaması yapılmış hem de laboratuarda mikromakine modeli üzerinde donanım olarak da uygulanmıştır. Performans testi açısından önerilen kontrolörün sonuçları PID GSK ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon çalışmalarında MATLAB/Real-Time Windows Target Toolbox yazılımı, pratik uygulamada ise sonsuz bara yoluyla iletim hattın bağlanan 1 kVA'lık makine içeren basit bir güç sistemi kullanılmıştır. Mekanik giriş momenti ve jeneratör alan gerilimine farklı bozucu etkiler uygulanarak yapılan benzetim çalışmalarında güç açısı, pratik çalışmada ise açısal hız gözlenen parametre olarak kullanılmıştır.

### **2.1.5. Hibrit Algoritmalar ve GSK Kullanılarak Yapılan Uyarım Kontrol Çalışmaları**

Dash vd. [44] tarafından güç sistemlerinde geçici hal kararlılığın artırılması için bulanık tekniği kullanan PID tabanlı bir uyarım kontrol çalışması yapılmıştır. Hız ve hızın türevini giriş değişkenleri olarak kullanan bulanık çıkarım tekniği kullanılarak PID kontrol parametreleri gerçek zamanlı olarak optimize edilmiştir. Bulanık tekniği ile PID birleştirilerek doğrusal olmayan bir PID kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tek makineli ve çok makineli sistem üzerinde farklı geçici bozucu etkiler uygulanmıştır.

Önerilen kontrolör yaklaşımının etkinliği sabit katsayılı klasik PID kontrolör ile karşılaştırılarak test edilmiştir.

Hosseinzadeh ve Kalam [45] tarafından yapılan çalışmada, bulanık teorisinin temel fonksiyonlarını kullanan bir B-GSK geliştirilmiştir. Öncelikle kontrol edilen sistem çıkışı ve dilsel kurallara bağlı olarak bir B-GSK tasarlanmıştır. Daha sonra çalışma şartlarındaki değişimlere karşı B-GSK'nın uyarlanabilir olabilmesi için Lyapunov'un dolaysız metodunu temel alan bir uyarlanabilir kural geliştirilmiştir. SMIB sistemi üzerinde yapılan benzetim çalışmalarına göre, önerilen uyarlanabilir B-GSK'nın, geleneksel GSK ve B-GSK'ya göre geniş bir işletim aralığında daha iyi bir performans sağladığı gösterilmiştir.

Atanasova ve Zaprianov [46] yaptıkları çalışmada, güç sistemlerinde geçici hal kararlılığını arttırmak için radyal tabanlı fonksiyon ile yapay sinir ağları (YSA) algoritmasını birleştiren bir kontrol yöntemini önermişlerdir. Bu kontrol yönteminin bulanık kontrolöre çok benzediği ifade edilmiştir. SMIB sistemi üzerinde Matlab Simulink programından yararlanarak benzetim yapılmış ve önerilen yöntemin performansı değerlendirilmiştir.

You vd. [47] tarafından yapılan çalışmada, bulanık tabanlı bir uyarlanabilir GSK tanımlanmıştır. GSK'nın parametreleri gerçek zamanlı YSA algoritması kullanılarak ayarlanmıştır. Kontrol sistemi iki alt sisteme ayrılmıştır. Bunlardan birincisi jeneratörün değişken parametrelerini tanımlayan yinelemeli en küçük kareler algoritması, ikincisi de salınımları sönümleyen BM tabanlı uyarlanabilir kontrolördür. Yapılan benzetimlerle SMIB sistemi, iki bölge 4 makine ve 13 baradan oluşan sistem ve bir de 16 makine ve 68 baralı sistem modeli kullanılmıştır. Önerilen GSK'nın etkinliği GSK'sız ve geleneksel GSK içeren sistemle karşılaştırılarak test edilmiştir. Sonuç olarak, bölgesel ve alanlar arası salınımların sönümlemesinde artış sağlandığı gözlenmiştir.

#### **2.1.6. Kaynak Özetlerinin Değerlendirilmesi**

Güç sistemlerinde ilk kararlılık çalışmaları 1920'li yıllarda yapılmaya başlanmıştır. Günümüze kadar yapılan bu çalışmalar küçük sinyal kararlılığı ve geçici hal kararlılık çalışmaları başlıkları altında incelenmiştir. Zamanla modern güç sistemlerini oluşturan büyük güç kapasiteli makineler ve yüksek hızlı uyartım sistemleri kullanılmaya başlanmıştır. Bu nedenle güç sistemlerinin de ilave kontrolörlere ihtiyacı olmuştur. 50'li

yıllardan sonra senkron jeneratörün hız bilgisinin kararlılık ve güç sistem salınımlarına olan olumlu etkisi keşfedilmiştir. Bu şekilde yardımcı kontrolör olarak otomatik gerilim regülatörüne (OGR) ilave edilen GSK ile ilgili çalışmalar başlamıştır. Zamanla GSK kullanımının önemi artarak OGR+GSK yapısı artık uyarım kontrol sisteminin bir parçası haline gelmiştir. Yardımcı kontrol sinyalleri kullanmadan sadece uyarım kontrolüyle en uygun sonuç elde etmenin oldukça zor olduğu görülmüştür.

Öncelikle jeneratörün hız bilgisini kullanan geri besleme üzerinde tasarlanmış faz ileri-faz geri tipi bir kontrolör olan klasik GSK üzerine çalışmalar yapılmıştır. Daha sonra ise klasik GSK yerine birçok farklı kontrol yöntemi uygulanmış ve güç sistemlerinde dinamik kararlılığın artırılması ve salınımların sönümlenmesi açısından performansları test edilmiştir. Bu yöntemler arasında PID, Bulanık mantık ve YSA sayılabilir. Son yıllarda ise geleneksel GSK yerine uygulanan kontrol yöntemlerinin olumlu etkilerini birleştiren hibrid kontrol yöntemleri uygulanmaya başlamıştır. YSA ve genetik algoritmalar genellikle diğer kontrol yöntemlerinin parametre iyileştirilmesinde kullanılmıştır.

Uyarım kontrolü veya gerilim kontrolü çalışmalarında kullanılan bazı yöntemlerin güç sisteminde negatif anlamda elektromekanik salınımlara yol açan yan etkileri de olmaktadır. Yapılan çalışmalar arasında sadece deneysel çalışmalar olduğu gibi sadece teorik yani benzetime dayalı çalışmalar da bulunmaktadır. Bunun yanında hem benzetim hem de pratik uygulama içeren çalışmalar da bulunmaktadır. Bilgisayar ve yazılım teknolojisindeki gelişmeler çok etkili ve karmaşık kontrol teorilerinin hızlı bir şekilde benzetimlerinin yapılmasına olanak sağlamıştır.

Benzetim çalışmalarında güç sistem modeli olarak tek makineli ve çok makineli modeller kullanılmıştır. Tek makineli model olarak en çok Heffron-Phillips tarafından blok diyagram şeklinde geliştirilen SMIB sistem modeli kullanılmıştır. Kullanılan çok makineli modeller de 3 makineli 5 baralı, 3 makineli 9 baralı, 2 bölge 4 makineli 13 baralı, 10 makineli 39 baralı “New England” ve 16 makineli 68 baralı sistemlerdir.

Yazılım ve elektronik sektöründeki gelişmelerle birlikte, algoritmaların yazılım haline dönüştürülerek bir mikroişlemci içerisine kaydedilmesi mümkün hale gelmiş ve bu da yeni geliştirilen kontrol yöntemlerinin pratik olarak gerçekleşmesine imkân sağlamıştır.

## 2.2. Kuramsal Temeller

### 2.2.1. Güç Sisteminin Yapısı

Güç sistemlerinin boyutu ve yapısı değişmesine rağmen hepsi aynı temel karakteristiklere sahiptir. Güç sistemlerinin yapısı, sabit gerilimde çalışan üç fazlı AC sistemlerden oluşmakta ve üretimde, iletimde üç fazlı cihazlar kullanılmaktadır. Endüstriyel yükler her zaman üç fazlıdır; tek fazlı olan mesken ve ticari yükler ise fazlar arasında eşit dağıtılarak dengeli üç fazlı sistem oluşturulmaktadır [1].

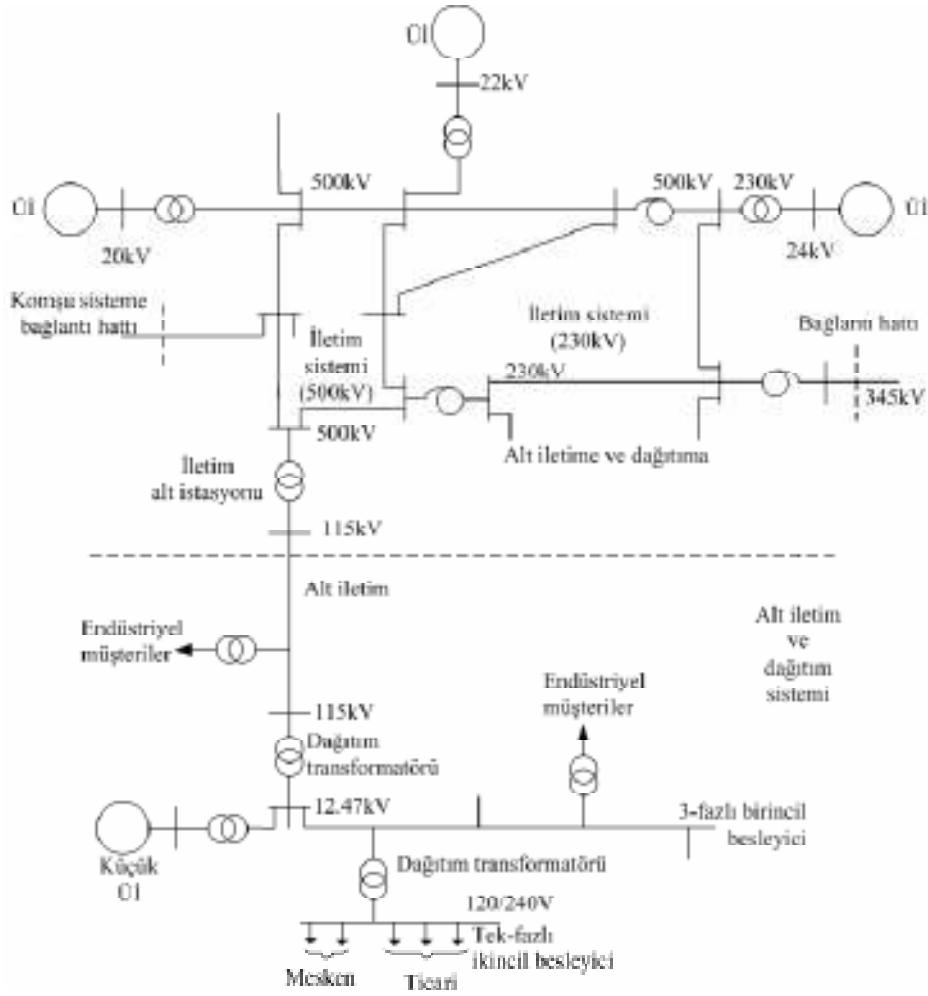
Elektriksel yükler ideal olarak sabit bir gerilim ve sabit bir frekansla beslenmelidir. Başka bir deyişle hem gerilim hem de frekans elektriksel yükün gerektirdiği değerde olmalıdır. Öyle ki bunlardaki değişim belli bir tolerans içinde kalmalıdır [48].

Güç sistemini oluşturan elemanlar özelliklerine göre güç ve denetleme elemanları olarak iki grupta toplanabilmektedir. Güç elemanları; mekanik enerji sağlayan tahrik sistemleri örneğin türbinler, üreteçler, transformatörler, enerji iletim ve dağıtım hatları ile elektriksel yüklerdir. Denetleme elemanları; tahrik sistemlerine ilişkin mekanik regülatörler (hız regülatörleri), senkron jeneratörlere ilişkin uyarım sistemleri, röleler ve açma-kapama elemanları gibi elemanlardır. Bu ayırmadan da anlaşılacağı gibi enerji sistemi elektromekanik bir sistemdir [48].

Güvenilirlik ve kalite, bir güç sisteminden istenilen en önemli özellikler olduğundan senkron jeneratörler bu yüzden güç sistemlerinin en önemli elemanıdır. Sistemin güvenilir bir şekilde işleyişi, sistemde bulunan senkron jeneratörlerin birbirleriyle paralel çalışmalarına bağlıdır. Bir senkron jeneratörün senkronizmadan ayrılmasıyla sistemin gerilim ve akımında salınımlar oluşmakta ve sonucunda enerji iletim hattı otomatik olarak röleler vasıtasıyla devre dışı kalmaktadır. Böyle bir durumda bu jeneratör devreden çıkartılıp tekrar senkron çalışma haline dönüştürüldükten sonra devreye alınıp yeniden yüklenmektedir. Yüklenme gereği bir senkron makine hızlanmaya ya da yavaşlamaya başlarsa, makinede oluşan senkronlayıcı kuvvetler makineyi senkronizmada tutmaktadır [48].

Şekil 2.1'de modern güç sisteminin temel elemanları gösterilmektedir. Üretim biriminde elektrik, makine çıkış şaftına genellikle türbinden sağlanan mekanik enerjinin dönüştürülmesi ile üretilmektedir [49]. Elektrik enerjisi Üretim İstasyonlarında (Üİ)

üretildikten sonra iletim hatları, transformatörler ve anahtarlama aygıtlarından oluşan karmaşık şebekelerle tüketicilere iletilmektedir [1].



Şekil 2.1. Güç sisteminin temel elemanları [1]

Elektrik şebekesi tüm güç istasyonlarını bir sisteme bağlamakta ve gücü yük merkezlerine en uygun yolla iletmekte ve dağıtmaktadır. Jeneratörlerden elektriksel tüketicilere güç akışını sağlamada birçok yol olasılığı sunmak; böylece sistem esnekliğini ve güvenilirliğini sağlamak için genellikle iletim şebekesi gözlü yapıda bağlanmaktadır. İletim şebekelerinde kullanılan ekstra yüksek gerilimler ise 300 kV'un üzerindedir [49]. İletim şebekesi genel olarak iletim sistemi, alt iletim sistemi ve dağıtım sistemi olarak sınıflandırılmaktadır. İletim sistemi, sistemdeki tüm temel üretim istasyonlarını ve temel yük merkezlerini birbirine bağladığından birleştirilmiş enerji sisteminin omurgasını oluşturmakta ve en yüksek gerilim seviyelerinde çalışmaktadır [1].

Yüksek gerilim alt istasyonunu düşürücü transformatörlerle dağıtım alt istasyonuna bağlayan iletim sistemi kısmına alt iletim şebekesi denir [50]. Alt iletim şebekelerinde kullanılan yüksek gerilimler 100 kV ve 300 kV aralığındadır [49]. Bazı büyük endüstriyel tüketiciler alt iletim sistemine bağlanabilmektedir. Kapasitör ve reaktör grupları iletim hattı gerilimini sürdürmek için genellikle alt istasyonlarda kurulmaktadır [50]. Bazı sistemlerde, alt iletim ve iletim devreleri arasında açık bir ayırım yoktur. Sistem genişlediğinden ve iletim için daha yüksek gerilim seviyesi gerektiğinden, eski iletim hatları genellikle alt iletim görevine indirilmektedir [1].

Elektrik enerjisinin çoğu, tüketiciye doğrudan enerji götürmek için iletim ya da alt iletim şebekesinden dağıtım yüksek gerilim ya da orta gerilim şebekelerine iletilmektedir. Dağıtım sistemlerinde kullanılan orta gerilimler 1 kV ve 100 kV arasındadır. İletim sisteminde kullanılan gözlü yapının tersine dağıtım şebekesi genellikle radyal yapıdadır [49]. Temel dağıtım gerilimi genellikle 40 kV ve 34,5 kV'tur. Küçük endüstriyel tüketiciler temel besleyicilerle bu gerilim seviyesinde beslenmektedir. İkincil dağıtım besleyicileri konut ve ticari tüketicileri 120/240 V'da beslemektedir. Yük yakınına yerleştirilen küçük üretim şebekeleri genellikle alt iletim ve dağıtım sistemine doğrudan bağlanmaktadır [1].

Güç sisteminin farklı kısımları farklı gerilimlerde çalışmaktadır. Genellikle 1 kV'un altındaki gerilimler düşük gerilim olarak incelenebilmektedir. Düşük gerilim, orta gerilim, yüksek gerilim ve ekstra yüksek gerilim sınıflandırması kesin sınırları olan bir sınıflandırma değildir [49].

Bir güç sisteminin etkin çalışması tüketicilerin güvenilir elektrik enerjisi ile beslenmelerine bağlıdır. Güç sisteminin güvenilirliği üretilen elektrik enerjisinin sürekli erişilebilir olması ile ilgilidir. Günümüzde elektrik enerjisinin uzun süreli kesintiye uğraması hem tüketici isteklerine hem de ekonomiye ciddi zararlar verebilir. Güç sistemlerinde gerilim ve frekansın nominal değerlerinde sabit tutulması güvenilirlik açısından sağlanması gereken bir diğer kriterdir. Güç sistemi gerilimindeki %10-15'lik bir artma/azalma veya sistem frekansının nominal değerinden birkaç Hz'lik sapması sistemden beslenen yüklerin durmasına, sistemdeki cihazların zarar görmesine neden olabilir [48, 52].

Bugün dünyada tüketilen elektrik enerjisinin büyük bir çoğunluğu senkron jeneratörler tarafından üretilmektedir. Senkron jeneratörler rotor miline bağlı olan tahrik makinesinden aldıkları mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren elektromekanik sistemlerdir. Güvenilir bir güç sisteminin sağlaması gereken temel kriterler; sistemdeki bütün senkron jeneratörlerin senkronizmada kalmalarını sağlamak ve sürekli değişen güç tüketimini karşılayacak miktarda güç üretmektir. Sistemdeki senkron jeneratörlerden birinin senkronizmadan ayrılması iletim hattında önemli derecede gerilim ve akım dalgalanmalarına neden olur. Ayrıca senkronizmadan ayrılan jeneratör, gerekli önlemler alınmadığı takdirde, yüksek hızlara ulaşarak ciddi zarar görebilir. Normal çalışma koşulları altında bir senkron jeneratörün senkronizmadan ayrılması zordur. Senkron jeneratörün rotoru hızlanmaya veya yavaşlamaya başladığında, senkronlayıcı kuvvetler senkron jeneratörü nominal hızında tutmaya çalışır. Ancak senkronlayıcı momentin yetersiz olduğu durumlarda veya bozucu etkiler sonucunda senkronizma bozulabilir [1, 50, 52].

### **2.2.2. Türkiye'deki Güç Sisteminin Yapısı**

Ülkemizde uzun mesafelerde iletim için 380 kV, orta mesafelerde ise 66 kV ve 154 kV gerilim değerleri kullanılmaktadır. Bu gerilim seviyelerinin sağlamasında güç transformatörleri kullanılmaktadır. Böylece üretilen enerjinin binlerce kilometre uzağa taşınması sağlanmaktadır. Son varış noktasında ise tekrar güç transformatörleri ile yüksek gerilim seviyesi daha düşük seviyelere indirilerek dağıtım yapılmaktadır. Ülkemizdeki dağıtım sistemi 34.5 kV seviyesinin altındaki trafo, hat ve şebeke tesislerini kapsamaktadır. Bunlar genellikle 30-35 kV, 15 kV, 10.5 kV, 6.3 kV ve 3.3 kV gerilimlerden alt gerilimlere enerji aktaran trafolardır. Alçak gerilim tesisleri 0.4 kV üzerinden enerji vermektedir. 380 kV'luk Türkiye'nin birbirine bağlı sistemi 28 makine, 95 bara ve 123 hat içeren bir model ile temsil edilebilmektedir [54].

### **2.2.3. Güç Sistemi Üretim Birimi Kontrolleri**

Senkron jeneratörü doğrudan etkileyen kazan, hız regülatörü ve uyarım kontrolü olmak üzere üç temel sistem vardır. Toplam türbin ve jeneratör kayıplarının toplamı, toplam çıkışla karşılaştırıldığında oldukça az küçüktür. Bu da kabul edilebilir bir toleranstır. Yani enerji üretim ünitesinin kayıpları ihmal edilirse buhar olarak gelen toplam güç, jeneratör çıkışlarından elektriksel güç olarak alınır. Otomatik hız regülatörü türbine iletilen buhar miktarını kontrol eder. Uyarım sistemi jeneratörün ürettiği

elektromotor kuvvetini kontrol eder. Bu şekilde sadece çıkış gerilimi değil, aynı zamanda güç faktörü ve akımın genliği de kontrol edilmiş olur [55].

Güç üretim sistemlerinde üretimle ilgili kontroller temel olarak hız kontrolü ve gerilim kontrolü olarak sınıflandırılabilir. Hız kontrolü literatürde yük frekans kontrolü veya otomatik üretim kontrolü olarak, gerilim kontrolü ise uyartım kontrolü veya reaktif güç kontrolü olarak isimlendirilmektedir. Bunlardan ikincisi yani gerilim, uyartım ve reaktif güç kontrolünü gerçekleştiren sistem OGR'dir. Otomatik gerilim ve frekans kontrolleri jeneratör çıkış gerilim ve frekansını kontrol ederek bunları önceden belirlenmiş değerlerinde sabit tutar. Türbin ve buhar vanaları gibi mekanik sistemlerle bağlantılı olan çalışma şekli ve iş döngüsü nedeniyle frekans kontrolörü gerilim regülatöründen daha yavaştır. Gerilim ve frekans kontrol kalitesinin artırılması yöntemiyle güç sistemlerinde kararlılığın artırılması için yapılan çalışmalar halen sürdürülmektedir. Güç sistem kontrol tasarımındaki en önemli iş, elektrik güç sisteminin büyük ve ani bir hata karşısında senkronizasyonunu kaybetmemesi ve hata sonrasında jeneratör çıkış geriliminde çok iyi bir regülasyonun sağlanmasıdır.

#### **2.2.4. Uyartım Kontrol Sistemi**

Günümüzdeki sistemlerin çoğunda uyarıcı olarak ya jeneratörle aynı mil üzerindeki buhar türbini tarafından ya da indüksiyon motoru tarafından sürülen bir DC jeneratör kullanılır. Doğrultucu veya tristör içeren ve AC bara veya bir alternatörden beslenen yarı iletken uyartım sistemlerinin sayısı da giderek artmaktadır [55].

Güç sistemleri açısından uyartım sistemi, etkin bir gerilim kontrolü sağlanmasına ve sistem kararlılığının artırılmasına katkıda bulunmalıdır. Ani bir bozucu etkiye olan hızlı cevap verme kapasitesi geçici hal ve küçük sinyal kararlılığının artırılmasının bir göstergesidir [56].

Gerilim regülatörü gerilim seviyesini hem geçici hal süresi boyunca hem de kararlı hal işletiminde etkili bir şekilde kontrol eder ve tüm sistemin kararlılığını etkiler. Kararlılık çalışmalarında gerilim regülatörünün hızı büyük önem arz eder. Jeneratör alan sargısının yüksek endüktansı nedeniyle alan sargısının akımında hızlı bir değişim meydana getirmek zordur. Bu kontrol işlevinde önemli bir gecikme oluşturur. Gecikme problemi regülatör tasarımında üstesinden gelinmesi gereken en önemli sorunlardan biridir. Gerilim regülatörü sistemin bilgi merkezidir. Gerilim regülatörü modern



sistemlerin çoğunda bir kontrolör olarak kullanılır ve jeneratör çıkış gerilimini ve/veya akımını algılayarak uyarım kontrolünde hatanın azaltılması yönünde değişim sağlar. Gerilim regülatörünün esas amacı jeneratörün uyarım gerilimini ayarlayarak çıkış geriliminin kontrol edilmesidir. Gerilim regülatörü tüm yük koşullarında jeneratör çıkış gerilimini izler ve önceden belirlenmiş limitler içinde kalmasını sağlar. Buna göre gerilim regülatörünün aynı zamanda jeneratör uyarım seviyesine bağlı değişkenler olan üretilen reaktif güç kontrolü ve makine güç faktörü kontrolünü yaptığı da söylenebilir [57].

Senkron jeneratör uyarım kontrolü, güç sistem kararlılığı ve elektriksel güç kalitesinin sağlanmasında çok önemli rol oynar. Uyarım sistemleri normalde, yüksek kazanç ve küçük zaman sabitine sahip sistemlerdir. Yani farklı işletme koşullarında sistemde çok çabuk kompanzasyon ve sönümlenme yapabilecek kapasiteye sahiptirler. Yüksek kazançlı uyarım kontrolü genellikle geçici hal kararlılığı sağlar fakat kontrolörün ani cevabında kalıcı düşük frekans salınımları oluşur. Bu da diğer makinelerle arasında dinamik kararsızlık oluşmasına yol açar. Bu problemde geleneksel çözüm yaklaşımı, kontrol sinyalinin yumuşatılması için uyarım kontrol sistemine GSK'nın ilave edilmesidir. GSK tasarımı güç sisteminin nominal çalışma noktası civarında doğrusallaştırılmış matematiksel modeline bağlıdır. Böylece elde edilecek kompanzatorün çalışma noktası civarında salınımlarda iyi bir sönümlenme sağlayacağı düşünülür [58].

GSK tasarımı için birçok yaklaşım mümkündür. Bunların çoğu ya klasik kontrol metodlarını yada akıllı kontrol stratejilerini içerirler. Belirli bir çalışma durumu için tasarlanan kontrolörler diğer çalışma durumlarında aynı performansı gösteremeyebilirler. Bununla beraber bir uyarlanabilir (adaptif) stabilizatör işletme koşullarının değişmesine karşın daha iyi bir performans sergileyebilir [59].

Bir güç sistemi normal yük koşullarında işletilirken bir bozucu etkiye maruz kalırsa senkron jeneratör gerilim açısı yeniden ayarlanır. Bu bozucu etki, sistemde üretilen güç ile yük arasında bir dengesizlik oluşturursa, gerilim açılarının da ayarlanmasıyla dengenin kurulduğu yeni bir çalışma durumu oluşur. Sistemin bu yeni işletim koşullarına ayarlanması için geçen süre geçici hal süresi olarak adlandırılır. Bu süre sırasındaki sistem davranışı da sistemin dinamik performansı olarak isimlendirilir.

Kararlılık için ana kriter geçici hal süresi sonunda senkron jeneratörün senkronizmada kalmasının devam etmesidir [57].

Kabaca bir tanımla bir bozucu etki sonrası sistemin salınımlı zaman cevabı, geçici hal süresi içerisinde sönümleniyor ve belirli bir zaman sonra sistem yeni çalışma durumuna ulaşıyorsa bu sistem kararlıdır denir. Bu da sistemin salınımları sönümleme eğilimi gösteren içsel enstrümanlara sahip olduğunu gösterir [56].

## **2.2.5. Güç Sistem Kararlılığı**

### **2.2.5.1. Güç sistemlerinde kararlılık problemlerinin kısa tarihçesi**

Güç sistemi kararlılığı güç sistemi mühendisleri tarafından oldukça karmaşık bir konu olarak göz önüne alınmıştır. Güç sistemi kararlılığı ilk olarak 1920’de önemli bir problem olarak düşünölmeye başlanmıştır. 1924’te ilk kez minyatür bir güç sisteminin laboratuvar test sonuçları rapor edilmiştir. Yine 1925’te ilk kez gerçek güç sistemi kararlılık testleri üzerinde çalışılmıştır. İlk kararlılık problemleri birbirinden uzakta bulunan hidroelektrik santralleri ile şehirdeki yük merkezleri arasındaki kararlılık problemleri ile ilgili idi. Bu kararlılık problemlerinde genellikle uzun iletim hatları ve yeterli senkronlayıcı momentin olmayışı bir sorun oluşturuyordu. Ayrıca arızaların temizlenme süreleri ise 0.5 sn ile 2 sn arasında değişmekteydi.

Güç sistemleri büyüdükçe kararlılık problemleri daha da karmaşık olmaya başladı. 1930’lu yıllarda kararlılık hesaplamalarının geliştirilmesinde önemli olacak bir adım atılarak şebeke analizörü geliştirildi. Söz konusu şebeke analizörü güç sisteminin laboratuvar ortamında hazırlanmış minyatür bir yapısı idi. Bu analizör ile çoklu jeneratörlü sistemlerin güç akışı analizlerinin geliştirilmesi sağlanmıştır. Fakat salınım eşitlikleri el ile adım adım sayısal iterasyonlar kullanılarak çözülmekteydi. Bu durum analizlerde güç sistemi elemanlarının çok detaylı olmayan modellerinin kullanılmasına neden oluyordu.

1950’li yıllarda elektronik analog bilgisayarlarla detaylı modeller kullanılarak özel problemlerin analizleri ilk kez yapılmıştır. 1956 yılında ilk kez bir dijital bilgisayarda kullanılmak üzere bir güç sistemi kararlılık programı geliştirilmiştir. 1967 yılında Amerika’da sistem güvenilirliğini arttırmak amacıyla güç sisteminin 2 farklı bölgesi arasında düşük kapasiteli de olsa bir yüksek gerilim doğru akım (HVDC) ile iletim bağlantı kurulmuştur. 1960’lı yıllarda sistem kararlılığı ile alakalı gayretler geçici

kararlılık problemleri üzerine yoğunlaşmıştı. Güç sistemleri, geçici kararlılık göz önünde bulundurularak tasarlanıyor ve buna göre çalıştırılıyordu. Yüksek hızlı arıza temizlemenin, etkili cevaplı uyarım devrelerinin, seri kapasitelerin ve özel kararlılık araçlarının geliştirilmesi ile birlikte güç sistemlerinin geçici kararlılığının geliştirilmesinde oldukça önemli adımlar atılmıştır. Ayrıca oldukça hızlı cevap veren uyarım devrelerinin geliştirilmesi yerel santral modu salınımlarının ortaya çıkmasına neden olmuştur.

Günümüz kararlılık problemlerinde, geçici kararlılık sınırlarına yakın değerlerde çalışan ve ekonomik olan şebeke koşullarının göz önüne alındığını görmekteyiz. Ayrıca çok uçlu HVDC ve şönt kompanzasyonun geliştirilmesi nedeniyle güç sistemi dinamik karakteristikleri önemli ölçüde değişime uğramıştır. Günümüz gerilim kararsızlığı ve düşük frekanslı bölgelerarası salınım problemlerinden dolayı bu iki konu eskisine göre daha fazla ilgiyi üzerinde toplamıştır [4].

#### **2.2.5.2. Genel olarak güç sistemi kararlılığı**

Güç sistemlerinin bağlantılarının büyüüp çeşitlenmesi, yeni teknolojilerin ve denetim sistemlerinin kullanılması ve aşırı yüklü koşullarda çalışmasının artması ile birlikte sistem kararsızlığının değişik şekilleri ortaya çıkmıştır. Örneğin, gerilim kararlılığı, frekans kararlılığı ve bölgeler arası salınımlar geçmişten daha fazla ilgiyi üzerine almaya başlamıştır. Bu durum güç sistemi kararlılığının tanımlanması ve sınıflandırılması ihtiyacını ortaya koymuştur. Kararsızlığın farklı tiplerinin kolay anlaşılması ve aralarındaki ilişkilerin nasıl olduğu, güç sistemlerinin uygun bir şekilde tasarımı ve çalışması açısından oldukça önemlidir. Ayrıca, terminolojinin uygun bir şekilde kullanımı sistem tasarımının geliştirilmesi, çalışma kriterleri, standart analitik araçlar ve çalışma süreci açısından gereklidir.

Güç sistemi kararlılığı, bütün dinamik sistemlerin kararlılığına benzer olup ortak temel matematik yapılarına sahiptirler. Kararlılığın tam tanımları dinamik sistemlerin kararlılığının matematiksel kuramı ile yapılmaktadır. Güç sistem kararlılığı, bir elektrik güç sisteminin belli bir çalışma koşulunda bir fiziksel bozunuma maruz kalması ile birlikte bir çalışma dengesi kazanabilmesi yeteneği olarak tanımlanabilir.

Bu tanım bir bütün olarak bir güç sistemine uygulanmasına rağmen genellikle belli bir jeneratör veya jeneratörler göz önüne alınır. Bir şebekeye uzun bir iletim hattı üzerinden bağlı bir jeneratör genellikle sisteme zayıf bağlı sayılır. Sisteme zayıf bağlı bir jeneratör ana sistemde kararsızlığa neden olmaksızın kararlılığını veya senkronizmasını kaybedebilir. Benzer şekilde, belirli yüklerin veya yük bölgelerinin kararlılığı incelenebilir. Örneğin, motorlar yavaşlayıp durarak ana sistemden bağımsız olarak kararlılığını kaybedebilir.

Güç sistemleri oldukça yüksek derecede doğrusal olmayan sistemlerdir. Öyle ki bu sistemlerin çalışması yüklerin, jeneratör çıkışlarının ve anahtar çalışma parametrelerinin sürekli değişimi etkisi altındadır. Sistemin bir bozunum sonrası kararlılığı, bozunum başlangıcındaki çalışma koşullarına bağlı olduğu gibi bozunumun doğasına da bağlıdır. Bu yüzden bir elektrik güç sisteminin kararlılığı bir denge noktası civarındaki davranışına ve başlangıç koşullarına bağlıdır. Bir denge koşulunda, sistemde çeşitli zıt kuvvetler var olup bu kuvvetler bir denge noktası durumunda anlık olarak eşittir.

Güç sistemleri, küçük ve büyük oldukça geniş bir aralıktaki bozunumlara maruz kalırlar. Yük değişimleri şeklindeki küçük bozunumlar sürekli olur. Güç sistemi değişen koşullara göre kendini ayarlayabilir yetenekte olmalıdır. Sistem ayrıca zararlı yapıdaki pek çok bozunumda ayakta kalabilmelidir. Örneğin, bir iletim hattındaki bir kısa devre veya büyük bir jeneratörün devre dışı kalması gibi. Büyük bozunumlar arızalı elemanların devre dışı bırakılmasından dolayı sistemde yapısal değişimlere neden olabilirler.

Denge durumunda bulunan bir güç sistemi bir büyük fiziksel bozunum ile beraber kararlı kalabilirken başka bir bozunum için kararsızlığa düşebilir. Güç sisteminin olası her bozunum sonrası kararlı kalacak şekilde tasarlanması hem pratik değildir hem de ekonomik değildir. Güç sisteminin tasarımı, sistemin kabul edilebilir yüksek güvenilirlikte olmasına göre yapılır. Burada büyük sistem bozunum senaryoları daima göz önüne alınır.

Güç sisteminin bir bozunuma verdiği cevap sistemin büyük bir kısmını etkileyebilir. Örneğin kritik bir elemanda oluşan bir arızayı takiben koruma röleleri ile bu elemanın devre dışı bırakılması sistemdeki güç akışları, şebeke bara gerilimleri ve makine rotor hızlarında değişimlere neden olur. Gerilim değişimleri hem jeneratör hem de iletim

şebekesi gerilim regülatörleri aracılığı ile yapılır. Gerilim ve frekans değişimleri sistem yüklerini karakteristiklerine bağlı olarak etkileyecektir. Ayrıca, özel cihazları korumak için kullanılan cihazlar sistem değişkenlerinde değişimlere neden olurlar. Bu cihazlar jeneratörleri devre dışı bırakarak sistemin zayıflamasına ve olası sistem kararsızlığına neden olurlar.

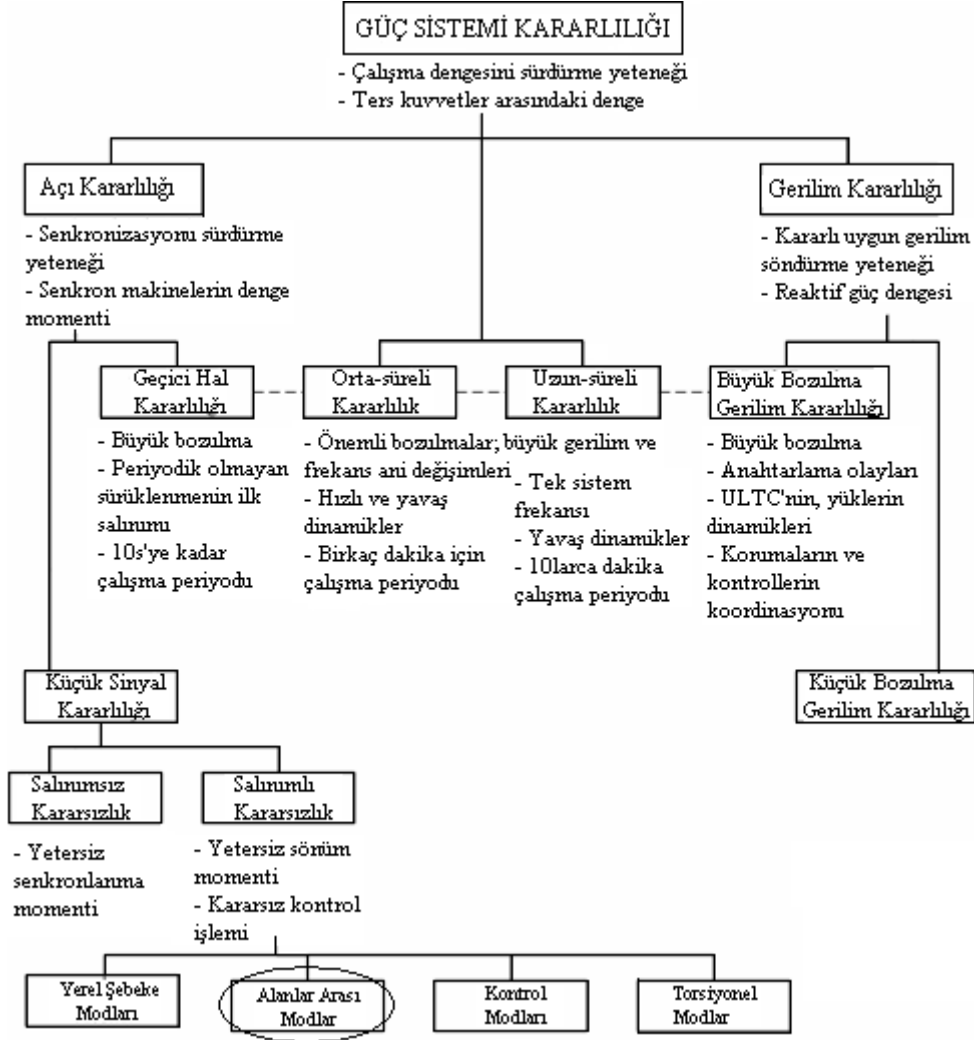
Eğer bir güç sistemi bir bozunum sonrası kararlı kalıyorsa, sistem bir yeni denge durumuna erişecektir. Bazı jeneratör ve yükler arızalı elemanların devre dışı bırakılması ile beraber, birbirleriyle bağlantıları kesilebilir veya sistemin bütününe çalışmasının sürekliliğinin korunması amacıyla devre dışı bırakılma ile bu gerçekleşebilir. Birbirine bağlı sistemler, bazı belli ciddi bozunumlardan dolayı kasıtlı olarak mümkün olduğunca çok üretim ve yükün korunması amacıyla iki veya daha fazla parçaya ayrılabilir. Otomatik denetimler ve insanların müdahalesi sistemi yeniden düzenleyip nihayetinde normal koşullara getirecektir. Öte yandan, eğer sistem kararsız ise bu müdahaleler sistemi daha da kötüye götürebilir.

Jeneratör rotorlarının açılma konumları arasındaki farkların sürekli artışı veya bara gerilimindeki sürekli düşüş buna örnektir. Kararsız bir sistem koşulu ard arda gelecek kesintilere ve güç sisteminin önemli bir kısmının çökmesine neden olabilir. Güç sistemleri sürekli olarak küçük genlikli dalgalanmaların etkisi altındadır. Fakat, bir belirli bozunum durumunda kararlılığın belirlenmesi amacıyla genellikle sistemin bir gerçek sürekli hal çalışma koşullarında bulunduğu kabul edilir [1].

### **2.2.5.3. Güç sistemi kararlılığının sınıflandırılması**

Tipik bir modern güç sistemi çok değişkenli bir süreci ifade eder. Öyle ki sistemin dinamik cevabı farklı karakteristik ve cevap oranlarına sahip oldukça geniş bir cihazlar dizisi tarafından etkilenir. Kararlılık, zıt güçler arasındaki dengenin durumudur. Şebeke topolojisine, sistem çalışma koşullarına ve bozunumun şekline bağlı olarak, zıt kuvvetlerin farklı şekilleri kararsızlığın farklı şekillerine yol açar. Kararlılık problemlerinin oldukça yüksek boyutluluğu ve karmaşıklığından dolayı, güç sisteminin karşılaştığı çeşitli şekillerdeki kararsızlıklar kolayca analiz edilemezler. Bu yüzden, kararlılık problemlerinin özel türlerinin analizi için sistemi temsil eden detayların uygun bir derecesi ve uygun analitik teknikler kullanılarak basitleştirmeler göz önüne alınır.

Şekil 2.2’de güç sistem kararlılığı sınıflandırılmasının blok şeması görülmektedir. Bu tez çalışmasında kontrol edilmesi hedeflenen alanlar arası salınımın dahil olduğu alanlar arası modlar, açılı kararlılığı sınıfının küçük sinyal kararlılığı başlığı altında salınımlı kararsızlık yapısında incelenir.



Şekil 2.2. Güç sistem kararlılığının sınıflandırılması [1]

Şekil 2.2’de ilgilendiğimiz alanlar arası modlar giriş bölümünde anlatılmıştır. Diğer önemli ifadeler olan rotor açısı kararlılığı, gerilim kararlılığı ve frekans kararlılığı ifadelerin tanımı aşağıdaki başlıklar altında özetlenebilir:

### 2.2.5.3.1. Rotor açısı kararlılığı

Rotor açısı kararlılığı, bir bozunuma maruz kalan birbirine bağlı güç sisteminin senkron makinelerinin bozunum sonrası senkronizmada kalabilmesi yeteneği olarak tanımlanır. Bu yetenek sistemdeki her bir senkron makinenin elektromanyetik momenti

ile mekanik momentleri arasındaki dengenin sürdürülebilmesi veya yeniden kazanılması yeteneğine bağlıdır.

Rotor açısı kararlılığı problemi güç sisteminin yapısında var olan elektro-mekanik salınımları içerir. Bu problemdeki temel faktör, senkron makinelerin rotor açısı değiştiğinde güç çıkışının değişmesi ile ilgilidir. Sürekli hal durumu koşullarında, her bir jeneratörün mekanik moment girişi ile elektro-manyetik moment çıkışı arasında bir denge var olup rotor hızı sabittir. Eğer sistem bozunuma uğrarsa bu denge kaybolur ve sonuçta dönen yapıların hareketi kanunlarına uygun bir biçimde makine rotorlarında bir hızlanma veya yavaşlanma meydana gelir. Eğer jeneratörlerden biri geçici olarak diğerinden daha hızlı çalışırsa, bu durumda bu jeneratörlerin rotorlarının birbirlerine göre açısal konumlarında değişim olacaktır. Bu durum jeneratörler üzerindeki yükün güç-açı ilişkisine bağlı olarak yavaş makineden hızlı makineye geçişine neden olur. Bu da açısal farkın azalmasına neden olan bir etki olarak ortaya çıkar. Güç sisteminde güç-açı ilişkisi oldukça doğrusal olmayan bir yapıdadır. Belli bir sınırdan sonra, açısal farktaki artış güç taşınmasında bir azalma ve açısal farkın daha da artmasını meydana getirir.

Eğer sistem, rotor hız farkından kaynaklanan kinetik enerjiyi absorbe edemezse bu durumda kararsızlık meydana gelir. Verilen herhangi bir durum için, sistemin kararlılığı rotorların açısal pozisyonlarındaki sapmaları toparlayacak yeterli momentin olup olmamasına bağlıdır. Senkronizmanın kaybı bir makine ile sistemin kalan diğer kısmı arasında veya makine grupları arasında oluşur. Bir bozunum sonrası bir senkron makinenin elektro-mekanik momentindeki değişim iki bileşene ayrılabilir:

- Senkronlayıcı moment bileşeni: Bu bileşen rotor açısal sapması ile aynı fazdadır.
- Bastırıcı moment bileşeni: Bu bileşen hız sapması ile aynı fazdadır.

Sistem kararlılığı her bir senkron makine için bu her iki bileşenin mevcudiyetine bağlıdır. Yeterli senkronlayıcı momentin olmayışı periyodik olmayan veya salınımlı olmayan kararsızlığa neden olurken, bastırıcı moment eksikliği salınımlı kararsızlığın ortaya çıkmasına neden olur [1].

#### **2.2.5.3.2. Gerilim kararlılığı**

Gerilim kararlılığı, bir güç sisteminin verilen bir başlangıç koşulu durumundayken bir bozunuma maruz kalmasından sonra güç sisteminin bütün baralarında kabul edilebilir

sürekli gerilimi devam ettirebilme yeteneği olarak tanımlanır. Gerilim kararlılığı, yük talebi ile talebin karşılanması arasındaki dengenin sürdürülebilmesi veya bu dengenin yeniden oluşturulabilmesi yeteneğine bağlıdır. Bazı baraların gerilimlerinin sürekli düşüşü veya yükselişi kararsızlıkla sonuçlanabilir. Gerilim kararsızlığının olası bir sonucu bir bölgedeki yükün kaybı veya iletim hatları ve diğer elemanların koruma sistemleri tarafından devre dışı bırakılması sonucu ard arda gelen kesintilerdir. Bu kesintiler veya çalışma koşullarının uyarma akımı sınırlarını zorlaması bazı jeneratörlerin senkronizmalarının kaybolması sonucunu doğurabilir. Bara gerilimlerindeki kademeli düşüş ayrıca rotor açısı kararsızlığı ile ilişkili olabilir. Örneğin, makine grupları arasındaki rotor açısı farkları 180 dereceye yaklaşırken oluşan makine senkronizmalarının kaybı şebekenin ara bölgesindeki noktalarda hızlı bir gerilim düşüşüne neden olur. Koruma sistemleri normal bir biçimde iki makine gruplarını bu durumda birbirinden ayıracak şekilde çalışacak ve gerilimler ayrılma sonrası koşullarına bağlı olarak tekrar geri kazanılacaktır. Eğer sistem birbirinden ayrılmazsa bu iki makine grupları arasında tekrarlanan kutup kaymalarının bir sonucu olarak ara bölgedeki gerilim hızlı bir biçimde yüksek ve düşük değerler arasında salınım yapacaktır. Buna karşın, gerilimin sürekli düşüşü şeklindeki kararsızlık yüklerle alakalı olup rotor açısı kararsızlığı bu durumda söz konusu değildir. Gerilim çökmesi terimi de sık sık kullanılır. Gerilim çökmesi, güç sisteminin oldukça büyük bir kısmında kesintiye veya anormal derecede düşük gerilimlere yol açan olaylar dizisi süreci olup düşük gerilimde sürekli kararlı çalışma durumu bazı yüklerin kasıtlı veya kasıtsız bir biçimde devre dışı bırakılması ve trafo kademe değiştiricilerin en son sınırlarına ulaşması sonrası da devam eder. Kalan yükler ise gerilim duyarlılığına sahip olabilir ve normal gerilimdeki güç talebi karşılanamaz.

Gerilim kararsızlığının itici gücü genellikle yüklerdir. Bir bozunuma cevap olarak yükler tarafından tüketilen güç, motorların kayma ayarı, dağıtım gerilim regülatörleri tarafından yeniden yapılanma eğilimindedir. Yeniden yapılanan yükler artan reaktif güç tüketimleri ve gerilimde düşüşe neden olduklarından dolayı yüksek gerilim şebekesindeki baskıyı daha da artırırlar. Yük dinamikleri güç tüketimini iletim şebekesinin kapasitesi ve mevcut üretim üzerindeki bir değerde yeniden yapılandırmaya çalıştığı zaman gerilim kararsızlığına neden olan daha kötü bir durum oluşur. Gerilim kararsızlığını yaratan en önemli faktör iletim şebekelerinin endüktif reaktansı üzerinden yapılan etkin ve reaktif güç akışlarının meydana getirdiği gerilim düşümleridir. Bu



yüzden iletim şebekesinin güç taşıma ve gerilim sağlama kapasitesi sınırlıdır. Jeneratörlerin bazılarının uyartım veya stator akımlarının sınırlara erişmesi durumunda güç taşıma ve gerilim sağlama kapasitesi sınırlanır.

Gerilim kararsızlığının en yaygın şekli bara gerilimlerinin sürekli devam eden düşüşü olmasına rağmen aşırı gerilim kararsızlığı riski de mevcut olup geçmişte böyle kararsızlıklarla karşılaşmıştır. Bu kararsızlığa (çok yüksek gerilim hatları çok düşük yüklemelerdeyken) senkron jeneratör ve/veya denkleştiricilerin düşük uyartım sınırlayıcıları şebekeden fazla reaktif güç çekilmesini önlemesi durumunda ortaya çıkan şebeke kapasitif davranışı neden olur. Bu durumdaki kararsızlık jeneratör ile düşük yük altında çalışan iletim hatlarının birlikte oluşturdukları bir kararsızlıktır. Kademe değiştiricili trafoların yükü yeniden düzenleme davranışları uzun dönemli gerilim kararsızlığına neden olur. Gerilim kararlılık problemlerine yüksek doğru gerilim hatlarının her iki tarafında da karşılaşılabilir. Bu kararsızlıklar HVDC hattının hem doğrultucu hem de evirici istasyonlarında meydana gelebilir. Bunun en önemli nedeni evirici ve doğrultucuların kötü reaktif güç-yük karakteristikleridir.

Gerilim kararlılığı probleminin bir şekli de denetlenemeyen aşırı gerilimlerle sonuçlanan senkron makinelerinin kendinden uyartımlarıdır. Bu kararsızlık durumu eğer senkron makinenin kapasitif yükü oldukça fazla ise ortaya çıkar. Aşırı kapasitif yük durumuna örnek olarak sonu açık devre olmuş yüksek gerilim hatları, şönt kapasiteler ve HVDC istasyonlarındaki süzgeç yapıları verilebilir. Jeneratör yükünün kapasitif yüke dönüşmesi ile ortaya çıkan aşırı gerilimler yavaş yavaş bir artışı takiben ani bir yükseliş ile temsil edilirler. Son durumdaki artış, kapasitif yük bileşeni ile senkron makinenin uyartım sistemi ve makine reaktansı arasındaki ilişkiye bağlıdır. Uyartım devresinin negatif alan akımı kapasitesi, kendinden uyartım sınırları üzerinde olumlu etkiye sahip bir özelliktir [1].

#### **2.2.5.3.3. Frekans kararlılığı**

Frekans kararlılığı, bir güç sisteminin yük ile üretim arasında önemli bir dengesizlik oluşturan bir zararlı sistem bozunumunu takiben sürekli frekansını devam ettirebilme yeteneğidir. Frekans kararsızlığı, sistemin en az yük kaybı ile bozunum sonrasında üretimleri ile yükleri arasındaki dengenin yeniden kurulması ya da sürdürülebilmesi yeteneğine bağlıdır. Frekans kararsızlığı jeneratör ünitelerinin veya yüklerin devre dışı

kalmasına neden olan frekans salınımları şeklinde ortaya çıkar. Zararlı sistem bozunumları genel olarak frekans, güç akışı, gerilim ve diğer sistem değişkenlerinde büyük oynamalarla sonuçlanır.

Genel olarak frekans kararlılığı problemleri cihaz cevaplarının yetersizliğine, denetim ve koruma araçları arasındaki zayıf koordinasyona veya yetersiz üretim rezervine bağlıdır. Birbirinden ayrılmış parçalı sistemlerde frekans kararlılığı büyük çapta üretim veya yük kaybına yol açan herhangi bir bozunum ile ilgili olabilir. Frekans salınımları esnasında, düşük frekansta devre dışı bırakılan yükler, jeneratör denetimleri ve koruma sistemleri gibi cihazların cevabına uygun olarak süreç saniyenin küçük bir parçası kadar olabildiği gibi enerji sağlama sistemleri ve yük gerilim düzenleyicileri gibi cihazların cevaplarına uygun bir biçimde bu süreç dakikaları alabilir. Bu yüzden frekans kararlılığı bir kısa dönem olayı olabildiği gibi bir uzun dönem olayı şeklinde de olabilir. Kısa dönem gerilim kararsızlığına örnek olarak frekans bozunumu nedeniyle birkaç saniye içinde şebeke parçalarında kesintiye neden olan yükün devre dışı bırakılması ile ortaya çıkan oluşumdur. Diğer yandan bakılırsa, buhar türbinlerinin aşırı hız denetimleri veya kazan/reaktör koruma ve denetim sistemlerinin neden olduğu daha karmaşık durumlu frekans kararsızlıkları onlarca saniyeden birkaç dakikaya kadar süren uzun dönem olaylardır.

Frekans değişimleri esnasında, gerilim genlikleri özellikle parçalanmış şebekelerde sistemi yüksüz bırakan düşük frekans yük kayıplarından dolayı büyük miktarda değişebilir. Frekans değişim oranından daha yüksek orandaki gerilim genliği değişimleri yük-üretim dengesizliğine neden olur. Yüksek gerilimler, yeterli düzeyde tasarlanmamış yada koordine olmamış uyarım röleleri veya Volt/Hertz röleleri tarafından jeneratörlerin istenmeyen devre dışı bırakılma olaylarına neden olabilir. Aşırı yüklü sistemlerde düşük gerilim, empedans rölelerinin istenmeyen çalışmalarına sebebiyet verir [5].

### **3. MATERYAL VE YÖNTEM**

#### **3.1. Materyal**

Bu tez çalışmasında güç sistemlerinde meydana gelen alanlar arası salınımların incelenmesi için MATLAB/Simulink kullanılmıştır. MATLAB; hesaplama, ileri seviyeli grafik ve görüntüleme işlemlerini birleştiren teknik hesaplama dili ve ortamıdır. Daha önce kullanılan Fortran, C ve C++ gibi yüksek seviyeli programlama dilleri ile yapılan programların pek çoğunu MATLAB ile artık daha kolay yoldan ve daha kısa zamanda hazırlama imkanı vardır. Maliyetli bir ürün olmakla birlikte, endüstriyel alanda, gerçek zamanda test edilmesi ve kontrol prototiplerinin hazırlanmasındaki kullanım kolaylığı ve önemi inkâr edilemez bir gerçek olmuştur.

Simulink, MATLAB programının grafiksel tasarım, benzetim ve dinamik sistemlerin analizini yapan bir uzantısıdır. Simulink, sürekli zamanda, ayrık zamanda veya her ikisinin kombinasyonunda modellenmiş doğrusal ve doğrusal olmayan karmaşık sistemleri destekler. Mühendislik sistemlerinde benzetimin önemi gün geçtikçe artmaktadır. Sistemlerin tasarımında büyük oranda bilgisayar benzetimlerinden faydalanılmakta, mümkün olduğunda tasarımın test aşamaları da bilgisayarlar yardımıyla yapılmaktadır. Bu da prototiplere olan ihtiyacı azaltarak maliyetlerin büyük oranda düşmesini sağlamaktadır.

##### **3.1.1. MATLAB Programının Kullanım Alanları**

- Matematik ve hesaplama işlemleri
- Algoritma geliştirme
- Modelleme, benzetim ve prototip üretme
- Verilerin değerlendirilmesi, analizi ve görüntülenmesi
- Farklı bilim ve mühendislik dallarındaki grafik işlemleri
- Uygulama geliştirme ve test etme
- Toolboxlarla farklı mühendislik alt dallarına özel işlemler yapabilme (bulanık, kontrol vs...)

#### **3.2. Yöntem**

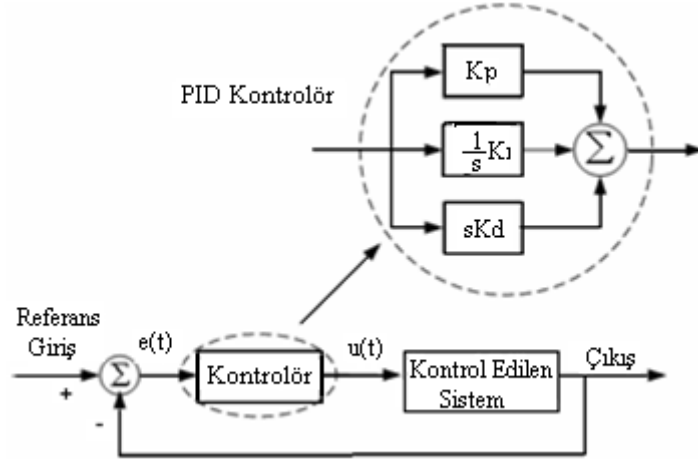
Giriş bölümünde bahsedildiği gibi bugüne kadar yapılan çalışmalarda birbirine bağlı güç sistemlerinde alanlar arası salınımların sönümlendirilmesi için birçok kontrol

yöntemi kullanılmıştır. Bunlardan bazıları klasik PID, kesirli dereceli PID ( $PI^\lambda D^\mu$ ), genetik algoritma kullanılarak tasarlanan  $PI^\lambda D^\mu$  [60], UPFC (Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü) temelli uyarlanabilir kontrolör [61], IPFC (Hatlar arası Güç Akış Kontrolörü) [62] şeklinde sıralanabilir. Şüphesiz bu yöntemlerin kullanılması ile literatürün genişlemesine katkı sağlanmış, pratik ve/veya teorik olarak her bir tasarımın güç sistemlerine uygulanarak bu tür sistemlerde meydana gelen küçük genlikli, düşük frekanslı elektromekaniksel salınımların sönümlenmesi amaçlanmıştır. Bu tez çalışmasında güç sistemlerinde güç bölgeleri arasında meydana gelen bu tür salınımların kontrolünde diğer yöntemlere oranla hatırı sayılır şekilde sönümleme sağlayan KDM kullanılmıştır.

### 3.2.1. PID Kontrol

PID kontrol günümüzde en yaygın kullanılan kontrol yöntemidir. 2006 yılında verilen rakamlara göre endüstrideki kontrol çevrimlerinin % 90'ından fazlasının PID kontrol kullandığı tahmin edilmektedir [63]. PID, oransal-integral-türev kelimelerinin kısaltılmasıdır [64]. PID kontrolör; temel kontrol etkileri olan orantı, integral ve türev (P,I ve D) etkilerini birleştiren bir sürekli kontrol yöntemidir. Yani bu denetleyicide sürekli olarak hata mevcut olduğu sürece kontrol komutu da mevcuttur [65]. Referans değeri, ölçülen değer ile karşılaştırılarak farkı alınmakta ve  $e(t)$  hata sinyali elde edilmektedir. Kontrolör hata sinyaline göre  $u(t)$  kontrol çıkış sinyali üretmekte ve hatayı en aza indirmeye çalışmaktadır. PID kontrolör çıkışındaki kontrol sinyali, hatanın çarpanı, integrali ve türevi alınarak hesaplanmaktadır [66].

PID kontrolör genelde en basit yapıya sahip denetleyici olarak bilinmektedir ve pek çok endüstriyel uygulama alanında yeterli ve uygun bir kontrol sağlamaktadır. Diğer taraftan bu basitlik ve kullanılabilirlik özelliklerinin yanında zayıf yanları da vardır. PID kontrolör günümüzde karmaşık yapıda her çeşit sisteme uygulanmamaktadır. PID kontrolör daha çok doğrusal ve basit yapıda tek döngülü sistemlerde kolaylıkla uygulanabilmektedir. Buna karşılık doğrusal olmayan ve özellikle ölü zaman gecikmesinin sistem zaman gecikmesinden çok büyük yüksek olan sistemlerde uygulanması zordur [65]. Şekil 3.1'de PID kontrolörün blok şeması görülmektedir.



Şekil 3.1. PID kontrolörün blok şeması

PID kontrolörün kontrol etki sinyali üç bileşenden oluşur [64]. Bunlardan  $p(t)$  ile ifade edilen oransal etki, o andaki sinyalin hata sinyaline orantılı olduğu durumdur ve aşağıdaki gibi belirlenir [56]:

$$p(t) = k_p e(t) \quad (3.1)$$

Oransal kontrol hatayı giderici bir etki sağlamaktadır. Oransal katsayı  $k_p$  denetleyicinin oransal kazancı olarak bilinmektedir. Kazanç arttıkça sistem cevabı, değişen referansa göre daha hızlı hale gelmekte ve kalıcı durum hatası küçülmekte, ancak sistem kararlılığı azalmakta, aşma ve salınımlar oluşmaktadır [66].  $i(t)$  ile ifade edilen integral etki, o ana kadarki hata sinyalinin değişen değerlerine orantılı olduğu duruma karşılık gelir ve aşağıdaki gibi belirlenir [64]:

$$i(t) = k_i \int_0^t e(t) dt \quad (3.2)$$

Oransal kontrolün hatayı yeterli derecede azaltmasına rağmen tek başına hatanın sıfır olmasını sağlayamamaktadır. Ancak hatanın sıfıra düşürülmesi kontrol sistemine integral teriminin eklenmesiyle sağlanabilmektedir. Uygun integral kazanç sabiti  $k_i$  ile hata sıfıra inerken,  $k_i$  arttıkça salınımlar ve kararsızlık oluşacaktır [66]. Bunu önlemek için kontrolöre çoğu zaman türev etkisinin eklenmesi gerekir.  $d(t)$  ile ifade edilen türev etki, o andaki hata sinyalinin değişim hızı ile orantılı olup aşağıdaki gibi belirlenir:

$$d(t) = k_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (3.3)$$

Türev teriminin eklenmesiyle, kararlılık artmaktadır, yüksek kazançlı oransal ve/veya integral terimleri sonucu oluşan aşmayı azaltmaktadır ve sistemin yanıt hızı

artmaktadır. Türevsel kazanç sabiti ya da sönüm sabiti  $k_d$  eğer küçük seçilmişse gidermesi gereken aşma devam edebilirken, yüksek seçilmesi sonucu sistem cevabının yavaş olmasına neden olabilmektedir.

Toplam kontrol etkisi  $c(t)$ , (3.4) denklemi ile gösterilebilmektedir [64]:

$$c(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (3.4)$$

$c(t)$ 'nin Laplace dönüşümü alınır, PID kontrolörün en genel şekli elde edilir:

$$C(s) = k_p + k_i \frac{1}{s} + k_d s \quad (3.5)$$

### 3.2.2. $PI^\lambda D^\mu$ Kontrol

#### 3.2.2.1. Kesirli hesaplama

Kesirli hesaplama, tamsayı hesapların genelleştirilmiş hali olarak ele alınabilir [60]. Ana fikir,  $\nu$  derecesi ile ilişkili tamsayı ile sınırlı olmayan  $D$  fonksiyonel operatörünü ayarlamaktır.  $D$  operatörü türev ( $\nu$  pozitif) ve integral ( $\nu$  negatif) olarak genelleştirilebilir.

Bir  $f(x)$  fonksiyonunun kesirli integral veya türevini doğrudan hesaplamak güçtür. Hesaplama için bazı yaklaşımlardan faydalanılır. Yaygın tamsayı integralleri için birkaç farklı tanımdan en çok kullanılanı Riemann ve Louville tarafından önerilmiştir ve tamsayı derecelere karşılık gelen tanımlaması aşağıdaki gibi verilmiştir [60]:

$${}_c D_x^{-n} f(x) = \int_c^x \frac{(x-t)^{n-1}}{(n-1)!} f(t) dt, \quad n \in N \quad (3.6)$$

Genelleştirilmiş kesirli integral tanımı ise aşağıdaki gibidir:

$${}_c D_x^\nu f(x) = \begin{cases} \int_c^x \frac{(x-t)^{-\nu-1}}{\Gamma(-\nu)} f(t) dt, & \text{eğer } \nu < 0; \\ f(x) & , \text{ eğer } \nu = 0; \\ D^n [{}_c D_x^{\nu-n} f(x)] & , \text{ eğer } \nu > 0; \\ n = \min\{K \in N: k > \nu\} \end{cases} \quad (3.7)$$

Burada  $\Gamma(\cdot)$ , gamma fonksiyonudur.  $D$ 'nin Laplace dönüşümü ise aşağıdaki gibi yazılır:

$$L[{}_0D_x^\nu] = \begin{cases} s^\nu F(s) & , \text{ eğer } \nu \leq 0; \\ s^\nu F(s) - \sum_{k=0}^{n-1} s^k {}_0D_x^{\nu-k-1} f(0) , & \\ eğer } n - 1 < \nu < n \in N \end{cases} \quad (3.8)$$

Bu ifadenin anlamı, eğer baştaki sıfır koşulları varsayılırsa, dinamik davranışlı sistemler diferansiyel eşitliklerle tanımlanır ve kesirli türevler, kesirli dereceli  $s$ 'lere sahip transfer fonksiyonlara neden olur. Bu konu ile ilgili daha fazla ayrıntıya [68] ve [69]'dan ulaşılabilir.

### 3.2.2.2. Tamsayı derece yaklaşımı

Kesirli dereceli transfer fonksiyonuna en iyi yaklaşım tamsayı dereceli transfer fonksiyonu yaklaşımı olup, bu fonksiyon sonsuz sayıda sıfır ve kutup içerir. Bununla birlikte sınırlı sayıdaki kutup ve sıfırı olan transfer fonksiyonu yaklaşımı yapmak da mümkündür [60].

Bilinen en iyi yaklaşımlardan biri, Oustaloup [70] tarafından önerilen transfer fonksiyonu yaklaşımı olup aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$s^\nu \approx k \prod_{n=1}^N \frac{1 + (s/w_{z,n})}{1 + (s/w_{p,n})} \quad (3.9)$$

Bu yaklaşım,  $[w_l, w_h]$  frekans domeni aralığında uygundur. Burada  $k$  kazanç ayarlandığında, 1 rad/s'de 3.9 eşitliğinin her iki tarafı da birim kazançta sahip olur. Öncelikle kutup ve sıfırların sayısı seçilir. Yaklaşımın istenen performansı  $N$  derecesine bağlıdır. Düşük dereceli  $N$ , basit yaklaşımı oluşturur ancak kazanç ve faz davranışlarında dalgalanmalara neden olur. Bu tür dalgalanmalar,  $N$  derecesi artırılarak önlenbilir ancak bu yaklaşım, hesaplamayı zorlaştıracaktır. 3.9 eşitliğindeki frekanslar aşağıda verilmiştir:

$$w_{z,1} = w_l \sqrt{\eta} , \quad (3.10)$$

$$w_{p,n} = w_{z,n} \varepsilon \quad n = 1, \dots, N , \quad (3.11)$$

$$w_{z,n+1} = w_{p,n} \eta \quad n = 1, \dots, N - 1 , \quad (3.12)$$

$$\varepsilon = (w_h/w_l)^{\nu/N} , \quad (3.13)$$

$$\eta = (w_h/w_l)^{(1-\nu)/N} . \quad (3.14)$$

Eğer  $\nu < 0$  ise yaklaşımın çözümü 3.9 eşitliğine karşılık gelir.  $|\nu| > 1$  ise yaklaşım yeterli değildir. Normal yöntem, kesirli dereceli  $\nu$ 'nin aşağıdaki gibi ayrıştırılmasıdır [60]:

$$s^\nu = s^n s^\mu, \quad \nu = n + \mu, \quad n \in Z, \quad \mu \in [0,1] \quad (3.15)$$

$PI^\lambda D^\mu$  kontrolörün diferansiyel eşitliği aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i D_t^{-\lambda} e(t) + k_d D_t^\mu e(t) \quad (3.16)$$

Kesirli dereceli PID kontrolörün sürekli transfer fonksiyonu Laplace dönüşümü sayesinde bulunur ve 3.17 eşitliği ile verilir:

$$C(s) = k_p + k_i s^{-\lambda} + k_d s^\mu \quad (3.17)$$

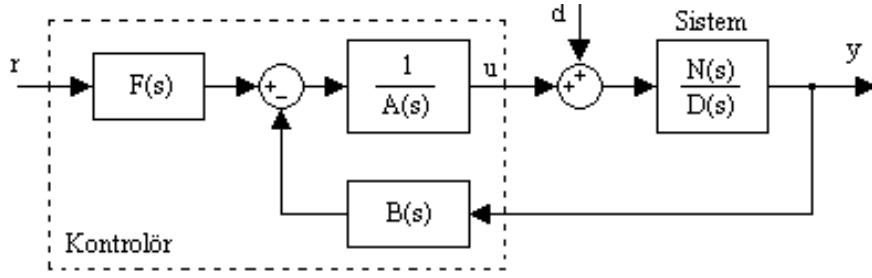
Kesirli dereceli PID kontrolörün tasarlanması için buradaki  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$ ,  $\lambda$  ve  $\mu$  parametrelerinin belirlenmesi gerekir.

### 3.2.3. Katsayı Diyagram Metodu (KDM)

KDM ile kontrolör tasarımı; eşdeğer zaman sabiti, kararlılık indeksi ve kararlılık sınır indeksi gibi tasarım parametrelerine karşı kapalı döngü sisteminin karakteristik polinomunun katsayılarını belirlemekle olur. Yöntemin en önemli özellikleri sistem ve kontrolör için polinomsal gösterimin kullanılması, kapalı döngü sistemine ait birim basamak cevabının genellikle aşısız olması, istenilen yerleşme süresinin başlangıçta belirlendikten sonra tasarımın yapılması, sistem parametrelerinde meydana gelebilecek olan değişimlere karşı kontrol sisteminin dayanıklılığının iyi olması, kontrolörün yeterli kazanç ve faz paylarına sahip olması şeklinde sıralanabilir [71]. Literatürde yapılan çalışmalar, uygulanabilir sınırlar içerisinde çeşitli sistemlerin kontrolü için en dayanıklı ve en basit kontrolörün KDM ile tasarlanabildiğini göstermektedir [72]. KDM ile tasarlanan kontrolör; en düşük mertebeden, en uygun band genişliğine sahip ve kapalı döngülü sistemin zaman cevabı aşısız özelliğe sahiptir. Bu özellikler ise dayanıklılık ve düşük maliyet özelliklerini sağlar.

Şekil 3.2'de KDM sistemine ait blok şema görülmektedir [73].

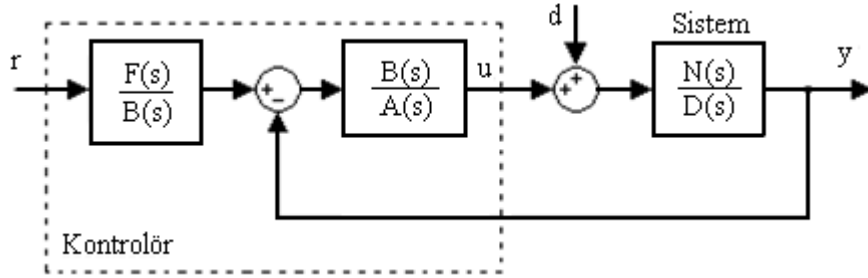




Şekil 3.2. KDM sisteminin blok şeması

Burada  $r$  referans girişini,  $y$  çıkışı,  $d$  sisteme etkiyen bozucu işareti gösterir. Kontrol edilmesi istenen sistemin transfer fonksiyonu için  $N(s)$  pay polinomu ve  $D(s)$  ise payda polinomu olarak gösterilmiştir. Aynı şekilde kontrolör transfer fonksiyonu için  $A(s)$  payda polinomu,  $F(s)$  referans pay polinomu ve  $B(s)$  ise geri besleme pay polinomu olarak verilmiştir.

Geri beslemede bir polinomun olması pratikte sakıncalıdır. Bu olumsuz durumu önlemek için kontrol sisteminin yeni blok diyagramı aşağıdaki şekle dönüştürülebilir:



Şekil 3.2. KDM sisteminin pratikte kullanılan blok şeması

Kapalı döngülü sistemin çıkış ifadesi aşağıdaki gibi yazılır:

$$y = \frac{N(s)F(s)}{P(s)} \cdot r + \frac{A(s)N(s)}{P(s)} \cdot d \quad (3.18)$$

$P(s)$  karakteristik polinomu ise 3.19 denklemi ile belirlenir:

$$P(s) = D(s)A(s) + N(s)B(s) = \sum_{i=0}^n a_i s^i \quad (3.19)$$

KDM'de tasarım parametreleri eşdeğer zaman sabiti  $\tau$ , kararlılık indeksi  $\gamma_i$  ve kararlılık sınır indeksi  $\gamma_i^*$  olup, karakteristik polinomun katsayıları cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\gamma_i = \frac{a_i^2}{a_{i+1}a_{i+2}} \quad i = 1 \sim (n-1), \gamma_0 = \gamma_n = \infty \quad (3.20)$$

$$\gamma_i^* = \frac{1}{\gamma_{i-1}} + \frac{1}{\gamma_{i+1}} \quad (3.21)$$

$$\tau = \frac{a_1}{a_2} \quad (3.22)$$

$a_i$  katsayıları ise,

$$a_i = \frac{a_0 \tau^i}{\gamma_{i-1} \gamma_{i-2}^2 \dots \gamma_1^{i-1}} \quad (3.23)$$

ifadesi ile belirlenir. Tasarım parametreleri cinsinden karakteristik polinom,

$$P(s) = a_0 \left[ \left\{ \sum_{i=2}^n \left( \prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{\gamma_{i-j}^j} \right) (\tau s)^i \right\} + \tau s + 1 \right] \quad (3.24)$$

denkleminde bulunur. Bu denklem hedef transfer fonksiyonu olarak kullanılacak olup, belirlenen tasarım parametreleri kullanılarak oluşturulmuştur.

KDM'de karakteristik polinomun seçilmesi işlemi için Lipatov-Sokolov kriteri göz önünde bulundurularak elde edilen Standart Manabe yapısı [74] kullanılır. Bu yapıda kararlılık indeksleri;

$$\gamma_1 = 2.5 \quad \gamma_i = 2 \quad i = 2 \sim (n-1), \quad \gamma_0 = \gamma_n = \infty \quad (3.25)$$

olarak seçilir. Kararlılık indeksi değerleri istenilen davranış özelliğine göre  $\gamma_i > 1.5$   $\gamma_i^*$  koşulu dikkate alınarak değiştirilebilir. Eşdeğer zaman sabiti  $\tau = t_s / 2.5$  olarak belirlenir.

KDM polinomsal gösterime sahip bir yöntem olduğundan, sistemin transfer fonksiyonu birbirinden bağımsız iki ayrı polinom olarak düşünülür. Bu polinomlar, derecesi  $m$  olan  $N(s)$  pay polinomu ve derecesi  $n$  olan  $D(s)$  payda polinomudur. Buna göre sırası ile dereceleri  $p$  ve  $q$  olan  $A(s)$  ve  $B(s)$  kontrolör polinomları aşağıdaki gibi yazılır:

$$A(s) = \sum_{i=0}^p l_i s^i \quad \text{ve} \quad B(s) = \sum_{i=0}^q k_i s^i \quad (3.26)$$

Bu polinomların dereceleri, sisteme etkiyen bozucunun olup olmamasına ve var ise türüne göre değişiklik gösterir. Aşağıdaki çizelgeden bu polinomların dereceleri belirlenir.

Çizelge 3.1 Değişik bozucu türleri göz önüne alınarak A(s) ve B(s) kontrolörlerinin seçimi

	Bozucu Yok	Basamak Tipi	Rampa Tipi	Darbe/Sinüs Tipi
der{A}	n-1	n	n+1	n-1
der{B}	n-1	n	n+1	n-1
Koşul	-	$l_0=0$	$l_0=l_1=0$	-
der{P}	2n-1	2n	2n+1	2n-1

$F(s)$  polinomu ise sabit bir değer olup,

$$F(s) = (P(s)/N(s))|_{s=0} \quad (3.27)$$

ifadesi ile belirlenir. Böylece kapalı döngülü sistemin kalıcı hal cevabında meydana gelebilecek olan kalıcı hal hatası giderilmiş olur.

Karakteristik polinom ile hedef transfer fonksiyon birbirine eşitlenerek Diophantine eşitliği elde edilir:

$$D(s)A(s) + N(s)B(s) = a_0 \left[ \left\{ \sum_{i=2}^n \left( \prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{\gamma_{i-j}^j} \right) (\tau s)^i \right\} + \tau s + 1 \right] \quad (3.28)$$

Bu denklem:

$$[C]_{s \times s} \begin{bmatrix} l_i \\ k_i \end{bmatrix}_{s \times s} = [a_i]_{s \times 1} \quad (3.29)$$

şeklinde Sylvester matris formuna dönüştürülür ( $s=p+r$ ). Burada  $l_i$  ve  $k_i$ 'lerden oluşan vektör, bilinmeyen kontrol parametrelerini,  $C$  matrisi kontrol parametrelerinin katsayılarını ve  $a_i$ 'lerden oluşan vektör ise istenilen hedef polinomun katsayılarını ifade eder. Bu şekilde  $s$  bilinmeyenli denklem sistemi, basit bir matris işlemi ile kolayca çözümlenerek kontrolör parametreleri elde edilmiş olur [71].

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Tezin bu bölümünde tasarlanan kontrolörlerin güç sistemine uygulanması Matlab/Simulink'te benzetim yapılarak gerçekleştirilmiştir. Literatürde alanlar arası salınım çalışmaları için daha çok New England 10 makineli 39 baralı güç sistemi ve iki alanlı dört makineli 13 baralı güç sistemlerinin kullanıldığı görülmüştür. Bu sistemlerin yaygın olarak kullanılmasının nedenleri arasında iki alanlı sistemin her iki alanının özdeş olması, sistem parametreleri ve yapısının küçük olması, parametrik çalışma için kullanışlı ve yararlı olması sayılabilir. Bu nedenlerden dolayı bu tez çalışmasında da sözkonusu sistemler ele alınmıştır.

##### 4.1. KDM ile Alanlar Arası Salınımların Kontrol Edilmesi

Güç sistemlerinde alanlar arası salınımı ifade eden matematiksel model doğrusal değildir. Ancak kolay kontrol işlemi için belirli çalışma noktalarında doğrusallaştırma işlemi yapılabilir. Doğrusallaştırma işlemi sonucunda ikinci dereceden minimum fazlı bir transfer fonksiyonu elde edilir:

$$G(s) = \frac{n_0}{s^2 + d_1s + d_0} = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (4.1)$$

Burada  $N(s)$  ve  $D(s)$  polinomları, sırasıyla sistemin transfer fonksiyonunun pay ve payda polinomlarıdır. KDM kontrolör polinomları

$$A(s) = l_1s + l_0 \quad \text{ve} \quad B(s) = k_1s + k_0 \quad (4.2)$$

şeklinde seçilir.

$P(s)$  karakteristik polinomu ise denklem 3.19'dan

$$P(s) = l_1s^3 + (l_1d_1 + l_0)s^2 + (l_1d_0 + l_0d_1 + n_0k_1)s + (l_0d_0 + n_0k_0) \quad (4.3)$$

olarak bulunur. Tasarıma başlarken belirlenen tasarım parametreleri göz önüne alınarak oluşturulan hedef transfer fonksiyonu ise şu şekilde belirlenir:

$$P_{hedef}(s) = \frac{\tau^3 s^3}{\gamma_1^2 \gamma_2} + \frac{\tau^2 s^2}{\gamma_1} + \tau s + 1 \quad (4.4)$$

$P(s) = P_{hedef}(s)$  eşitliğinden  $s$ 'in dereceleri göz önüne alınırsa aşağıdaki denklem takımları elde edilir:

$$l_1 = \frac{\tau^3}{\gamma_1^2 \gamma_2} , \quad (4.5)$$

$$l_1 d_1 + l_0 = \frac{\tau^2}{\gamma_1} , \quad (4.6)$$

$$l_1 d_0 + l_0 d_1 + n_0 k_1 = \tau , \quad (4.7)$$

$$l_0 d_0 + n_0 k_0 = 1 . \quad (4.8)$$

Bu denklem takımının çözümünden kontrolör polinomlarının katsayıları aşağıdaki gibi belirlenir:

$$l_1 = \frac{\tau^3}{\gamma_1^2 \gamma_2} , \quad (4.9)$$

$$l_0 = \frac{\tau^2}{\gamma_1} - l_1 d_1 , \quad (4.10)$$

$$k_1 = \frac{\tau - l_1 d_0 - l_0 d_1}{n_0} , \quad (4.11)$$

$$k_0 = \frac{1}{n_0} (1 - l_0 d_0) . \quad (4.12)$$

$F(s)$  referans pay polinomu ise 3.27 denkleminde,

$$F(s) = \frac{l_0 d_0 + n_0 k_0}{n_0} \quad (4.13)$$

olarak elde edilir.

## 4.2. Güç Sistemine KDM ve FOPID Kontrolörlerin Uygulanması

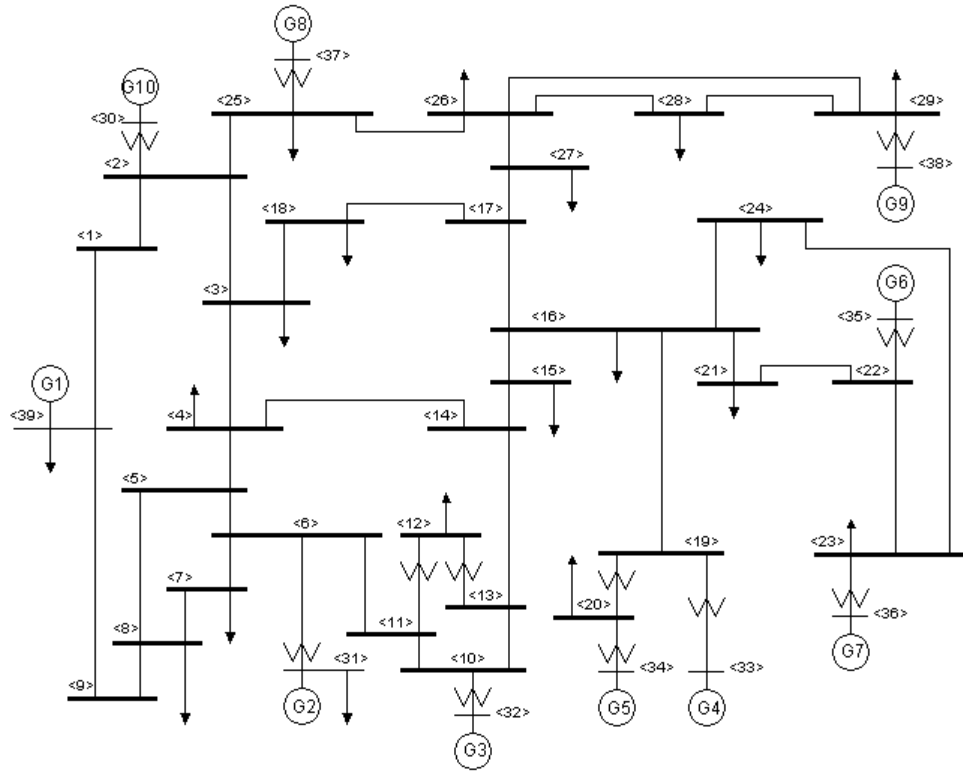
Alanlar arası salınımların özdeğer analizinden alanlar arası salınımların aralarındaki uzaklıkta özdeğerlerin sayısının değiştiği görülür. Sistemin transfer fonksiyonunun yeni şekli aşağıdaki ifade ile verilir:

$$G(s) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{1 - \zeta_i}{(s - \lambda_{1i})(s - \lambda_{2i})} \quad (4.14)$$

Burada  $\lambda_{1i}$  ve  $\lambda_{2i}$ , eşlenik özdeğer çiftidir.  $\zeta_i$  eşlenik özdeğerlere karşılık gelen sönümlenme oranlarıdır.  $k$  ise alanlar arası salınımların sayısıdır. Denklem 4.14 ile verilen sistemin transfer fonksiyonunun derecesini ikinci dereceli transfer fonksiyonuna

azaltmak için Routh metodu [75] uygulanır. Yani sönümleme oranları ve salınım frekansları, ikinci derece transfer fonksiyonlarının hesaplanmasından elde edilebilir. Routh metodunun uygulanmasıyla azaltılmış sistemde sadece bir tane sönümleme oranı elde edilmiş ve gerçek sistemin sönümleme oranından farklı olduğu görülmüştür. İndirgenmiş sistemin sönümleme oranına eşdeğer sönümleme oranı adı verilir [60].

Şekil 4.1’de New England 39 bara sistemi görülmektedir. Bu güç sisteminde 10 adet senkron jeneratör ve 39 adet bara mevcuttur. Bu sistemde sadece bir tane alanlar arası salınım modu vardır [60].

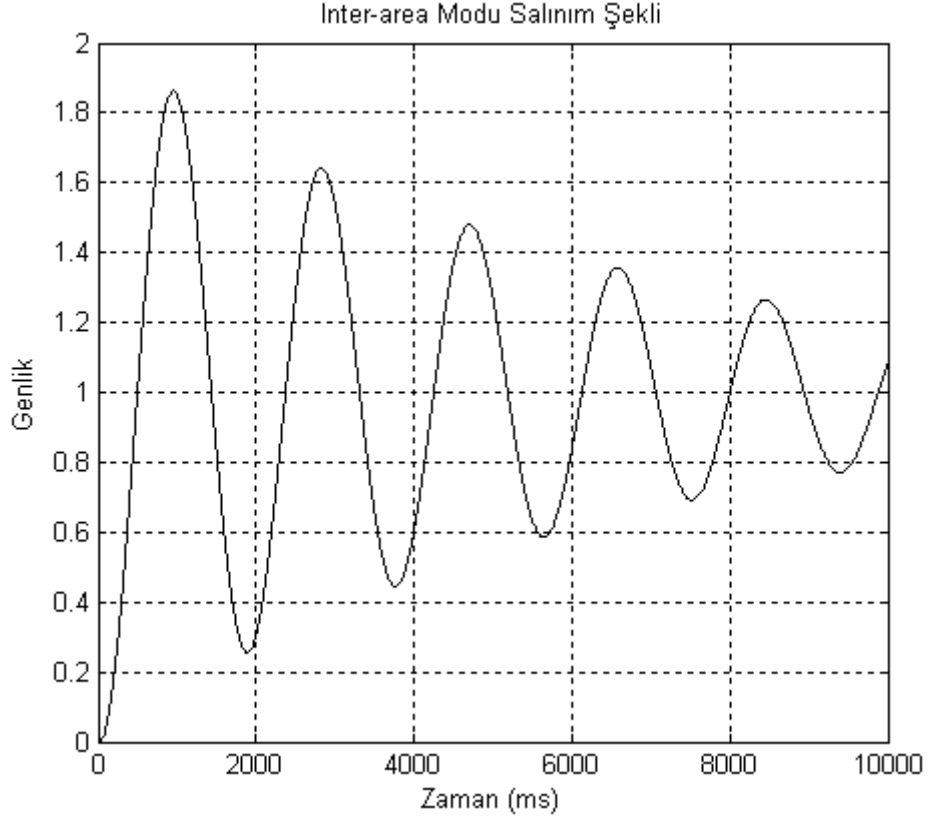


Şekil 4.1. New England 39 bara sistemi

Bu sistemdeki alanlar arası salınım Şekil 4.2’de verilmiştir. Burada alanlar arası salınım modunun frekansı 0.5376 Hz’dir. Sistemin transfer fonksiyonu (4.14) eşitliği ile,

$$G(s) = \frac{0.9532}{s^2 + 0.3311s + 12.52} \quad (4.15)$$

olarak elde edilir [60].



Şekil 4.2. New England 39 bara sistemindeki alanlar arası mod salınım şekli

4.15 denklemindeki sistem için KDM ile kontrolör tasarlanacağından öncelikle  $N(s)$  ve  $D(s)$  polinomlarının belirlenmesi gerekir.  $N(s)=0.9532$  ve  $D(s)=s^2+0.3311s+12.52$  olur. KDM ile kontrolör tasarımında ilk olarak, sistemin derecesi 2 olduğundan ve sisteme etkileyen bozucu etki bulunmadığından, Çizelge 3.1’de verilen bilgiler dikkate alındığında kontrolör polinomlarının dereceleri belirlenir. Buna göre  $A(s)$  ve  $B(s)$  polinomlarının derecesi 1 olarak seçilir.

KDM’de eşdeğer zaman sabiti  $\tau$  ile kontrol işareti arasında bir ilişki vardır. Eğer  $\tau$  büyürse zaman cevabı yavaşlamakta ve buna bağlı olarak kontrol işaretinin genliği küçülmektedir. Tam tersine  $\tau$  küçülürse zaman cevabı hızlanmakta ve kontrol işaretinin genliği büyümektedir. Buna göre, eğer kontrol işareti doyuma gidiyorsa  $\tau$  yeterince artırılır. Aynı şekilde  $|u(t)|$  çok küçükse  $\tau$  arzu edilen miktarda küçültülerek sistem cevabı hızlandırılabilir. Tüm bu durumlar göz önüne alınarak  $\tau=0.1s$  seçilmiştir.  $\gamma_1=2.5$ ,  $\gamma_2=2$  olarak belirlendikten sonra  $A(s)$  ve  $B(s)$  polinomlarının katsayıları Matlab’da yazılan program yardımıyla,

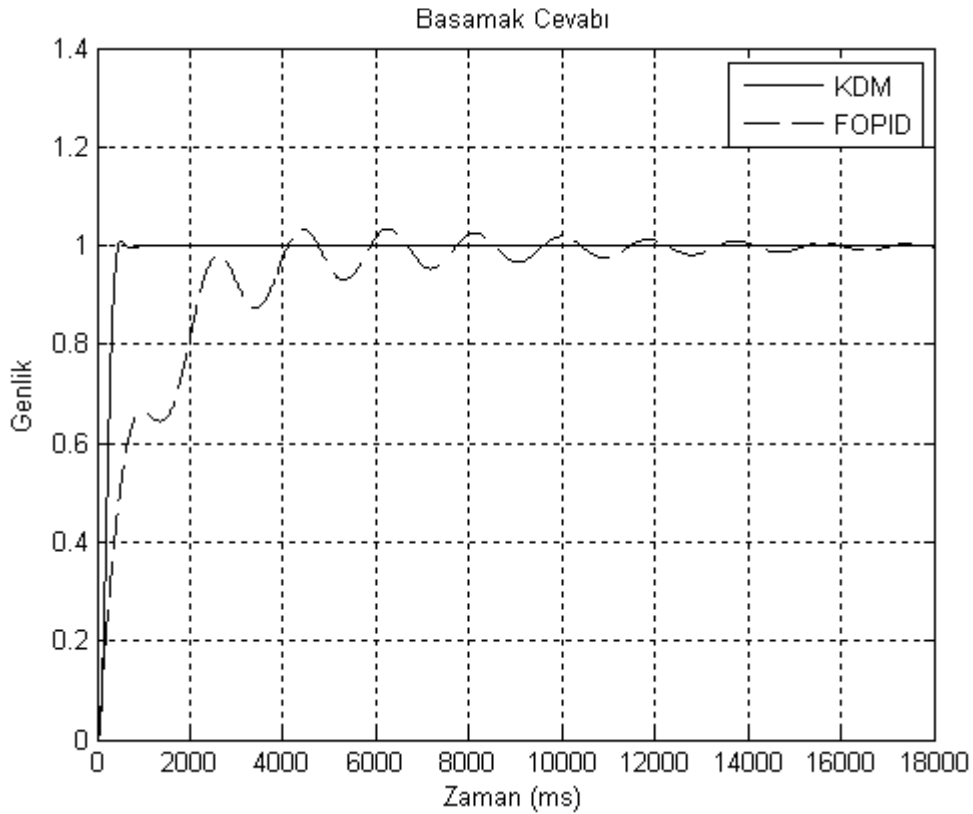
$$l_1=8.10^{-5}, l_0=4.10^{-3}, k_1=0.1025, k_0=0.9969 \quad (4.16)$$

olarak bulunmuştur. Yine sabit bir değer olan  $F(s)$  polinomu da 1.0491 olarak elde edilmiştir. Böylece bu katsayıların elde edilmesiyle KDM ile kontrolör tasarlanmış olur.

Burada KDM ile tasarlanan kontrolör ile kesirli dereceli PID kontrolörün alanlar arası salınımı söndürmedeki performansları Matlab-Simulink'te birim basamak tepkileri ve ürettikleri kontrol işaretleri incelenerek karşılaştırılacaktır. [60] nolu referansta bu sistem için kesirli dereceli PID kontrolör tasarlanmıştır. Burada tamsayı transfer fonksiyonu yaklaşımı ile tasarlanan kontrolör polinomu,

$$C(s) = \frac{196.7s^5 + 1.497 \cdot 10^5 s^4 + 4.235 \cdot 10^5 s^3 + 1.714 \cdot 10^6 s^2 + 2.117 \cdot 10^6 s + 3436}{0.2328s^5 + 1233s^4 + 1.463 \cdot 10^6 s^3 + 3.589 \cdot 10^6 s^2 + 1.976 \cdot 10^6 s + 2249} \quad (4.17)$$

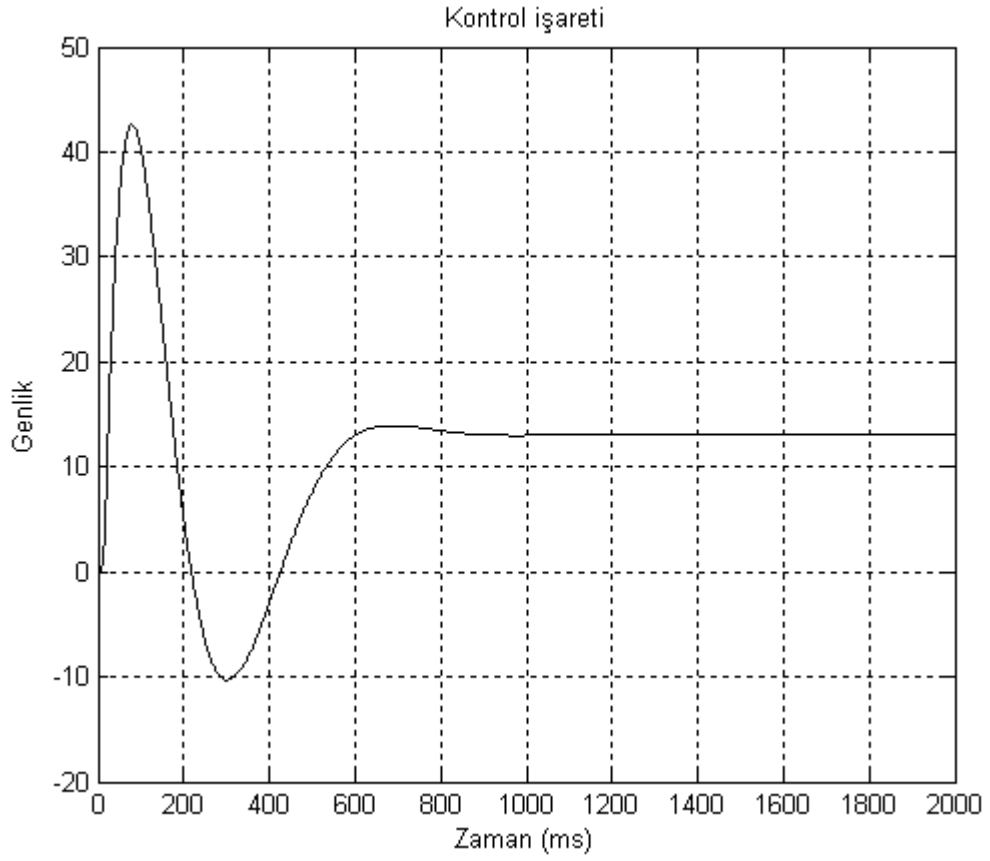
olarak verilmiştir. Şekil 4.3'te kesirli dereceli PID kontrol ile KDM kullanılarak tasarlanan kontrol sistemine ait birim basamak fonksiyonu cevapları verilmiştir.



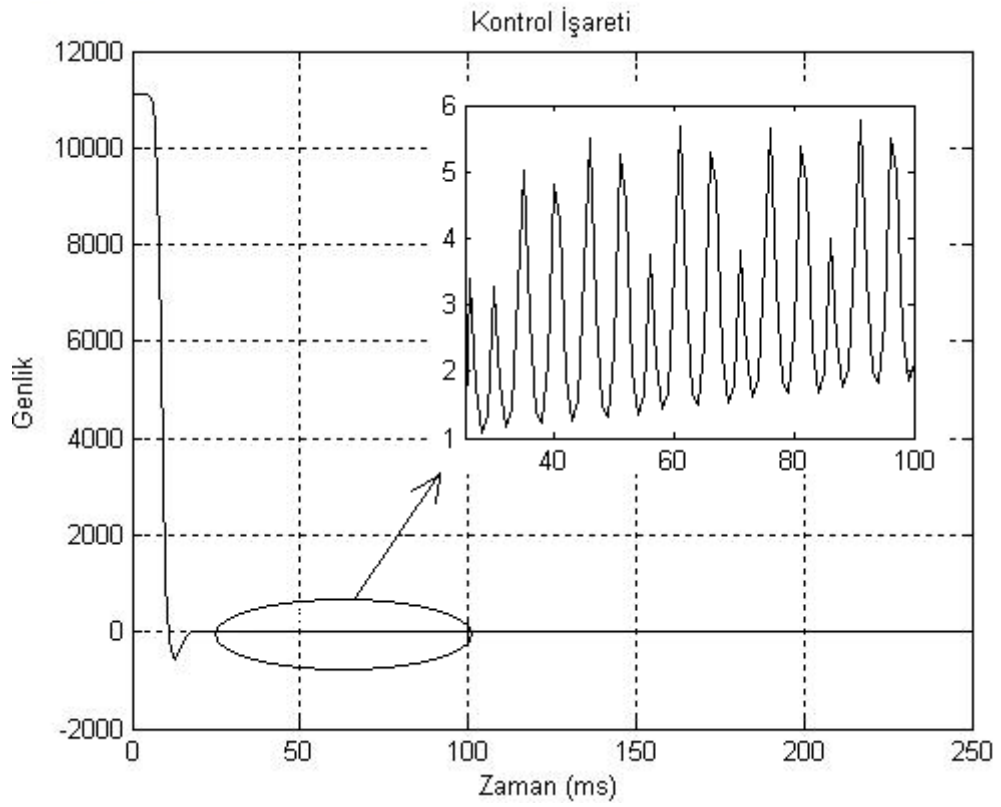
Şekil 4.3. KDM ve FOPID kontrol sistemlerine ait birim basamak fonksiyonu cevapları

KDM ve FOPID kontrol sistemlerinin ürettiği kontrol işareti eğrileri Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te sırasıyla verilmiştir.





Şekil 4.4. KDM ile tasarlanan kontrolörün ürettiği kontrol işareti



Şekil 4.5. FOPID kontrol sisteminin ürettiği kontrol işareti

FOPID ile elde edilen basamak cevabında KDM'ye göre yüzde aşmanın büyük olduğu görülmüştür. % 5'lik tolerans bandı dikkate alınıp yerleşme süreleri incelendiğinde FOPID'in yerleşme süresinin 6 sn ve KDM'nin yerleşme süresinin ise 0.5 sn olduğu görülmüştür. Yine bu şekilde kesirli dereceli PID ile tasarlanan kontrolörün basamak fonksiyonu cevabı 150. sn'de bozulmaya uğradığı görülmüştür. Basamak cevabı ilk 18 sn incelendiğinden bu bozulma görülmemektedir.

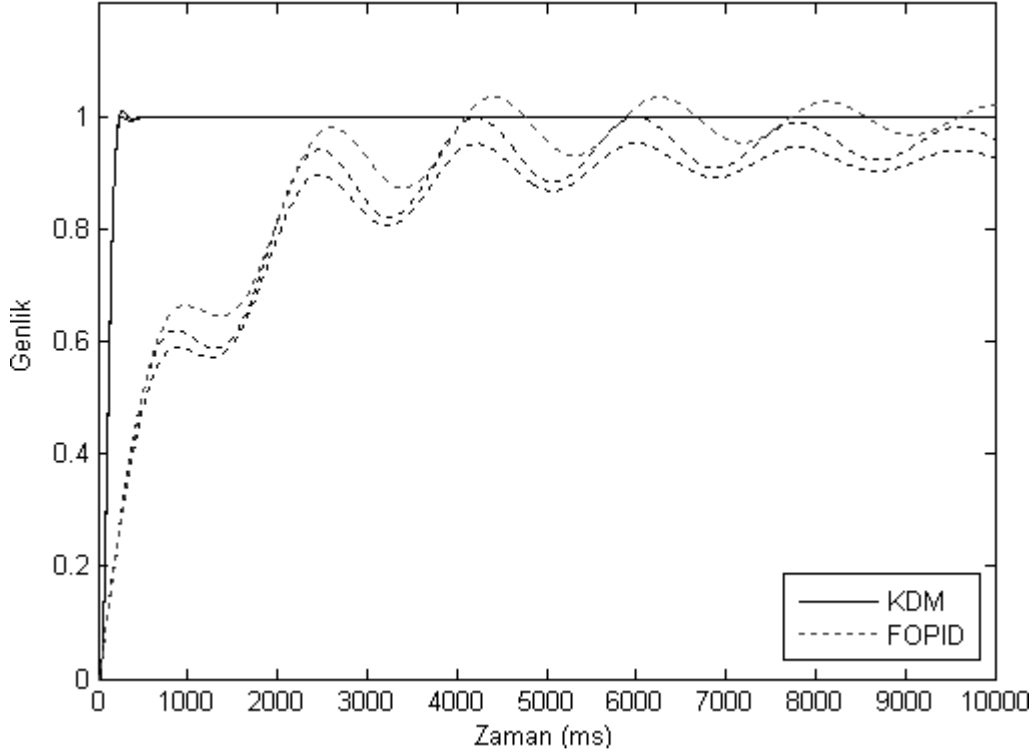
Şekil 4.4'te KDM kullanılarak tasarlanan kontrolörün ürettiği kontrol işareti incelendiğinde en yüksek genliğin 43 olduğu görülmüştür. Şekil 4.5 incelendiğinde FOPID'in ürettiği kontrol işaretinin genliği ise 11150 olduğu gözlemlenmiştir. Kontrol işaretlerinin yerleşme süreleri incelendiğinde kesirli dereceli PID kontrolörün ürettiği kontrol işaretinin yerleşme durumunda da dalgalanmalar görülmüştür. Bu da istenmeyen bir durumdur. Bu değerler Çizelge 4.1'de gösterilmiştir:

Çizelge 4.1. Şekil 4.3-4.4-4.5'te verilen zaman yanıtı eğrilerine ve kontrol işaretlerine ait davranış değerleri

Kontrolör	Yerleşme Süresi (s)	% Maksimum Aşım	Kontrol İşareti Genliği
KDM	0.5	1	43
FOPID	6	5	11150

Yukarıda da bahsedildiği gibi sistemlerin transfer fonksiyonları, çalışma noktası civarının doğrusallaştırılması ile elde edilmiştir. Ancak bu çalışma noktasının işletme sırasında meydana gelebilecek parametre değişimlerine karşı birim basamak fonksiyonu cevapları dikkate alınarak tasarlanan kontrolörlerin dayanıklılığı incelenir.

Şekil 4.6'da 4.15 denkleminde verilen sistemin çalışma sırasında meydana gelebilecek  $\pm\%$  15'lik parametre değişimlerine karşı elde edilen birim basamak cevapları verilmiştir. Şekilden KDM kontrol sisteminin, parametre değişimlerine karşı daha dayanıklı olduğu görülmektedir. Çünkü KDM'ye ait eğriler genel olarak yerleşme süresi için izin verilen bölge içinde kalmıştır.



Şekil 4.6. Sistemin çalışma noktası parametrelerinde meydana gelen  $\pm\%15$ 'lik değişim için kontrol sistemlerinin birim basamak fonksiyonu cevapları

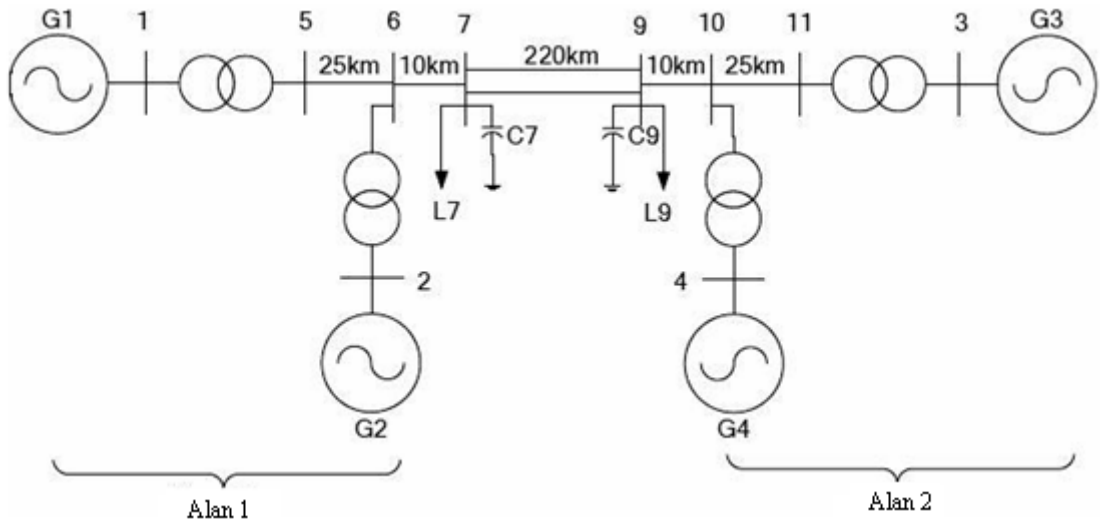
### 4.3. Güç Sistemine KDM ve PID Kontrolörlerin Uygulanması

Bu uygulama örneğinde tipik bir güç sistemi olan iki alanlı dört makineli bir sistem ele alınmıştır. Bu sistem Şekil 4.7'de görülmektedir.

Bu güç sisteminde bir çift tipik inter-area salınım modu vardır:  $-0.501 \pm j3.77$  [76]. Bu eşlenik özdeğer çifti 4.14 eşitliğinde yerine konulursa, sistemin transfer fonksiyonu,

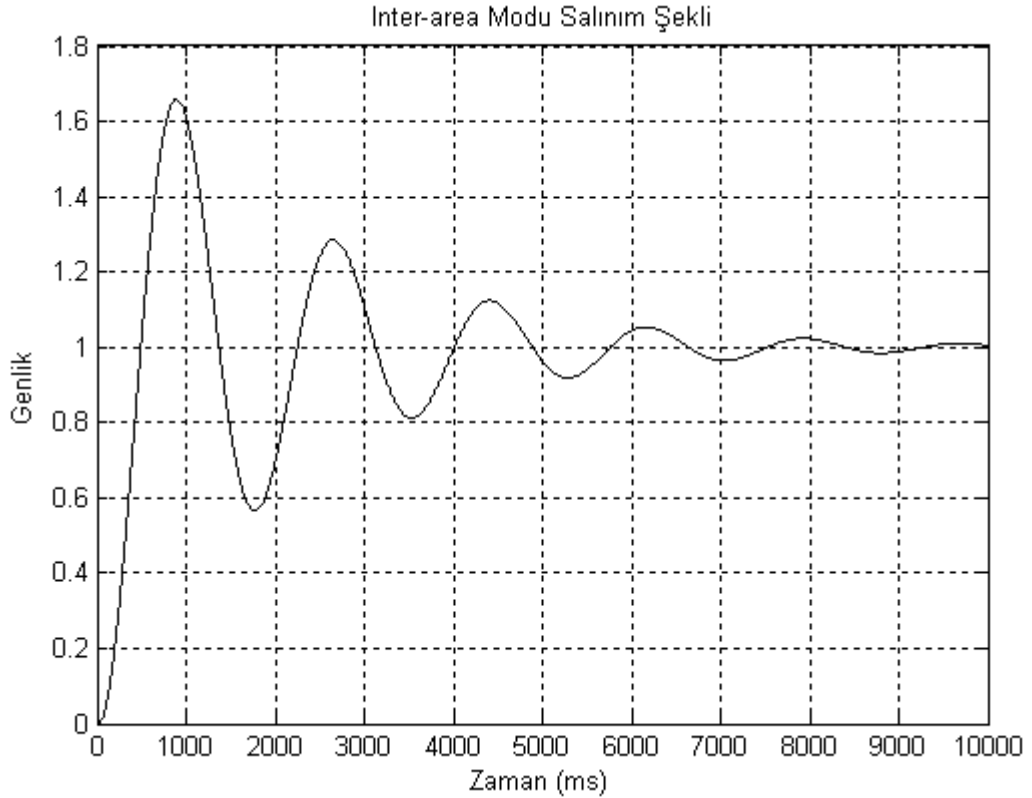
$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 1.002s + 14.4639} \quad (4.18)$$

olarak bulunur. 4.18 denklemindeki sistem için KDM ile kontrolör tasarlanacağından öncelikle  $N(s)$  ve  $D(s)$  polinomlarının belirlenmesi gerekir.  $N(s)=1$  ve  $D(s)=s^2+1.002s+14.4639$  olur. KDM ile kontrolör tasarımında ilk olarak, sistemin derecesi 2 olduğundan ve sisteme etkiyen bozucu etki bulunmadığından, Çizelge 3.1'de verilen bilgiler dikkate alındığında kontrolör polinomlarının dereceleri belirlenir. Buna göre  $A(s)$  ve  $B(s)$  polinomlarının derecesi 1 olarak seçilir.



Şekil 4.7. İki alanlı-dört makineli güç sistemi

Şekil 4.8'de ise bu sisteme ait alanlar arası salınım modunun şekli görülmektedir.



Şekil 4.8. İki alanlı dört makineli güç sistemindeki alanlar arası mod salınım şekli

Yine yukarıda bahsettiğimiz gibi  $\tau$  ile yerleşme süresi ve kontrol işareti genliği arasındaki ilişkiden dolayı bu sistem için en uygun değer olarak  $\tau=0.1s$  seçilmiştir.  $\gamma_1=2.5$ ,  $\gamma_2=2$  olarak belirlendikten sonra  $A(s)$  ve  $B(s)$  polinomlarının katsayıları Matlab'da,

$$l_1=8.10^{-5}, l_0=0.0039, k_I=0.0949, k_0=0.9433 \quad (4.19)$$

olarak bulunmuştur. Yine sabit bir değer olan  $F(s)$  polinomu da 1 olarak elde edilir. Böylece KDM ile kontrolör parametrelerinin hepsi bulunmuş olur.

Burada KDM ile tasarlanan kontrolör ile PID kontrolörün alanlar arası salınımı söndürmedeki performansları Matlab/Simulink'te birim basamak tepkileri ve ürettikleri kontrol işaretleri incelenerek karşılaştırılacaktır. PID kontrolörün parametreleri ise Matlab programı ile aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

$$k_p=73.9175, k_i=77.4011, k_d=10.3848 \quad (4.20)$$

Elde edilen PID katsayıları kontrolör polinomunda yerine konulduğunda,

$$C(s) = 73.9175 + 77.4011 \frac{1}{s} + 10.3848s \quad (4.21)$$

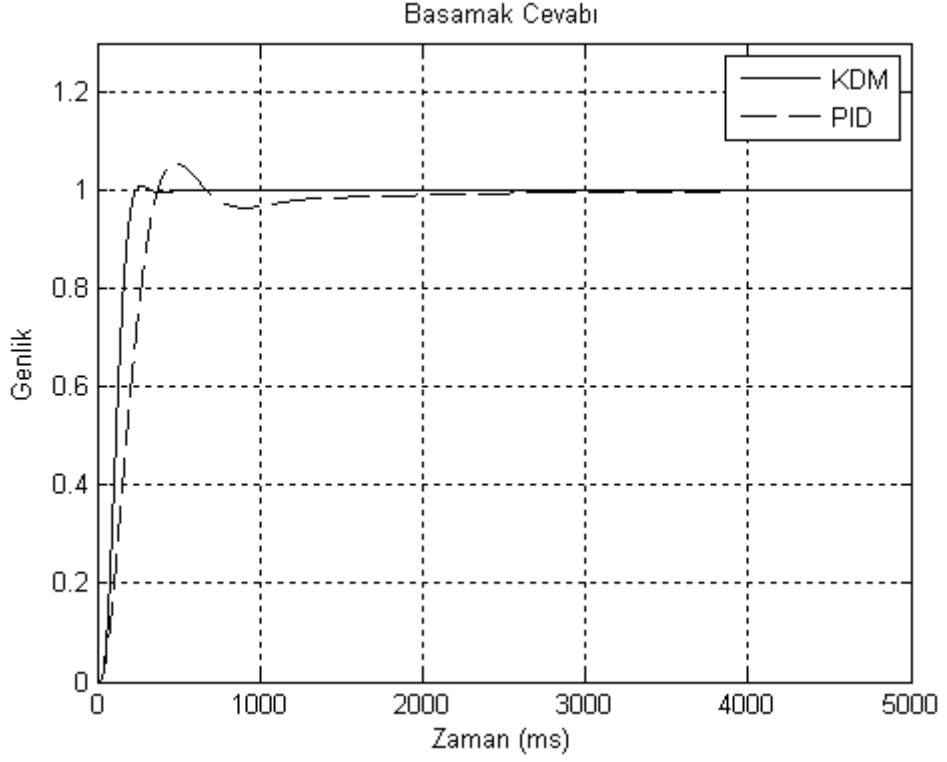
olarak elde edilir.

Şekil 4.9'da PID kontrol ile KDM kullanılarak tasarlanan kontrol sistemine ait birim basamak fonksiyonu cevapları verilmiştir. KDM ile elde edilen basamak cevabında PID'ye göre yüzde aşmanın çok küçük olduğu görülmüştür. % 5'lik tolerans bandı dikkate alındığında KDM ve PID'nin yerleşme süreleri sırasıyla 0.2 sn ve 0.5 sn olarak ölçülmüştür. Kontrol sisteminin ürettiği kontrol işareti eğrileri Şekil 4.9'da verilmiştir.

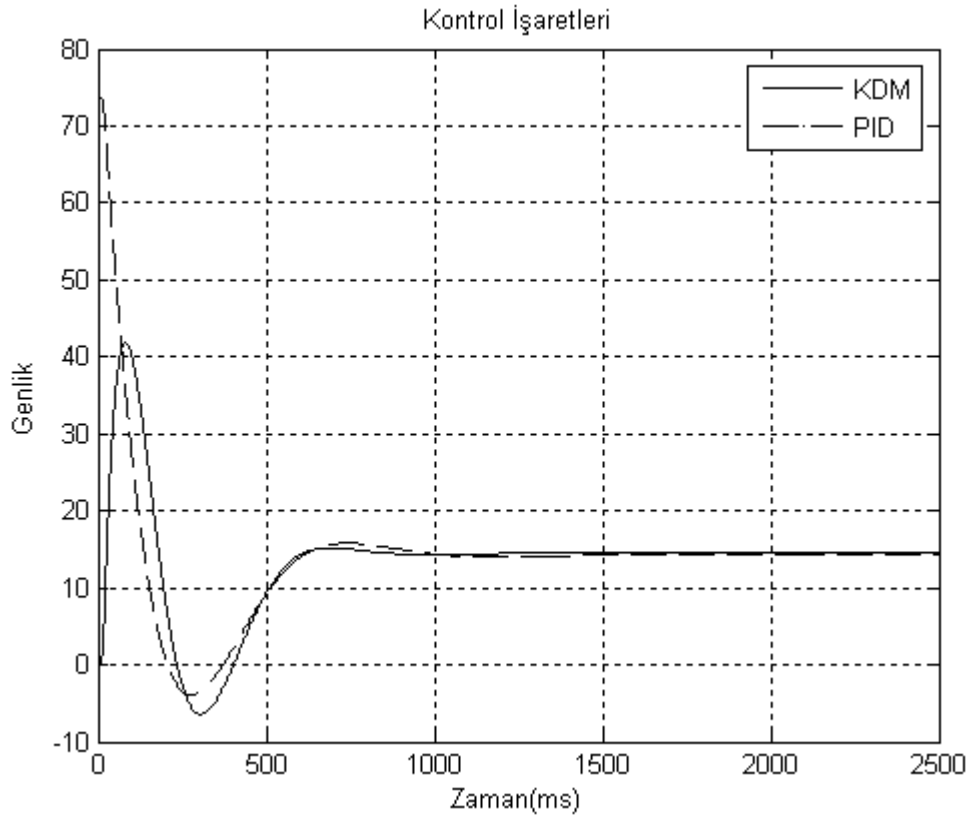
Şekil incelendiğinde PID'nin ürettiği kontrol işaretinin en büyük genliğinin 74 olduğu görülmüştür. Yine bu şekilden KDM'ye ait kontrol işaretinin genliğinin en büyük değeri 42 olduğu gözlemlenmiştir. Bu değerler Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Şekil 4.9-4.10'da verilen zaman yanıtı eğrilerine ve kontrol işaretlerine ait davranış değerleri

Kontrolör	Yerleşme Süresi (s)	% Maksimum Aşım	Kontrol İşareti Genliği
KDM	0.2	1.6	42
PID	0.5	6	74

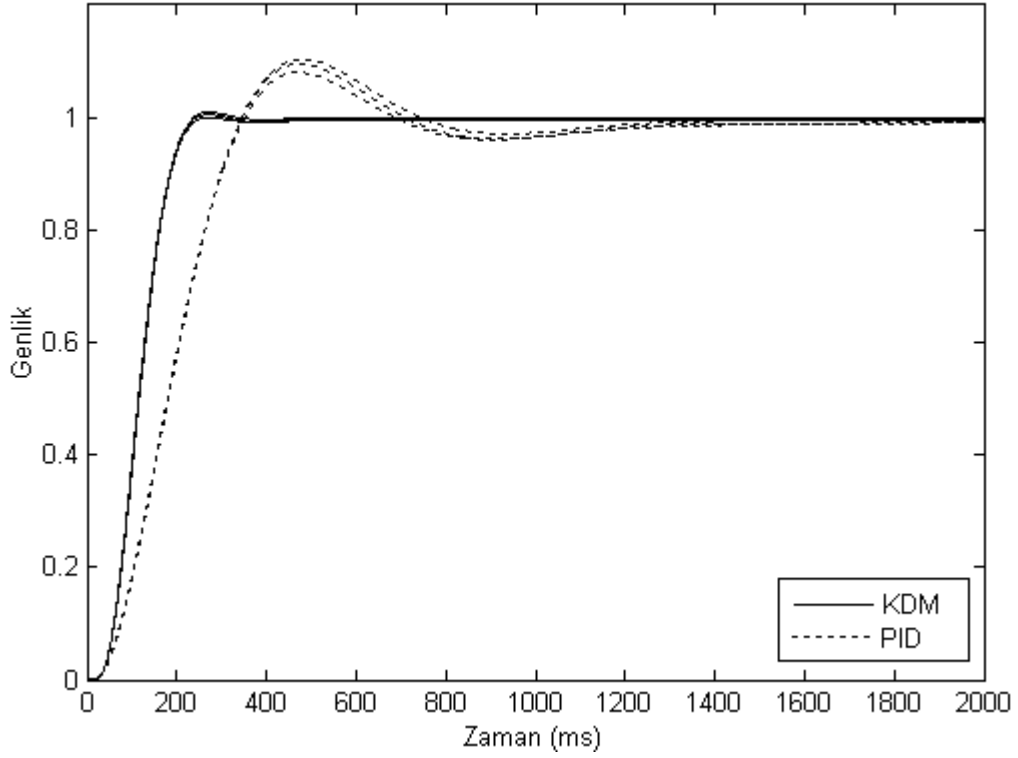


Şekil 4.9. Kontrol sistemlerine ait birim basamak fonksiyonu cevapları



Şekil 4.10. KDM ve PID kontrol sistemlerinin ürettikleri kontrol işaretleri

Şekil 4.11’de 4.18 denkleminde verilen sistemin çalışma sırasında meydana gelebilecek  $\pm\% 15$ ’lik parametre değişimlerine karşı elde edilen birim basamak cevapları verilmiştir. Şekilden KDM kontrol sisteminin, parametre değişimlerine karşı daha dayanıklı olduğu görülmektedir. Çünkü KDM’ye ait eğriler genel olarak yerleşme süresi için izin verilen bölge içinde kalmıştır.



Şekil 4.11. Sistemin çalışma noktası parametrelerinde meydana gelen  $\pm\%15$ ’lik değişim için kontrol sistemlerinin birim basamak fonksiyonu cevapları

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında elektrik güç sistemlerinde güç bölgeleri arasında meydana gelen salınımlarının, Katsayı Diyagram Metodu kullanılarak tasarlanan kontrol yöntemi ile sönümlenmesi incelenmiştir. Elde edilen performans sonuçları PID ve kesirli dereceli PID kontrol metotları ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve ayrıntılı analizler sunulmuştur.

Yapılan benzetim çalışmaları sonucunda KDM kullanılarak tasarlanan kontrol yönteminin büyük ölçüde arzu edilen kısa yerleşme süresine ve kapalı çevrimli sistemin zaman cevabının aşısız özelliğe sahip olduğu görülmüştür. Bu sonuçlardan bu tür güç sistemlerinde meydana gelen salınımlarının kontrolünde uygulanabilirliğini, doğruluğunu ve güvenilirliğini; güç sistemlerinde meydana gelen bu tür elektromekanik salınımların sönümlenmesinde incelenen PID ve kesirli dereceli PID kontrolörlere daha iyi sonuç verdiğini göstererek ispatlamaktadır. İncelediğimiz sistemlerde bozucu etkinin olmadığı varsayılmıştır. Ancak önerilen KDM ile tasarlanan kontrolörün en düşük mertebeden, en uygun band genişliğine sahip ve kapalı döngülü sistemin zaman cevabı aşısız özelliğe sahip olması, diğer sistemlerde olduğu gibi incelediğimiz güç sistemlerinde de dayanıklılık ve bozucu etkinin yeterince söndürülmesi özelliklerini içerebileceğini göstermektedir.

Türkiye elektrik güç sistemi ENTSO-E CESA (Avrupa Elektrik İletim Sistemi İşletmecileri Ağı- Eski adı UCTE) sisteminden izole iken böyle bir problem görülmesi de, senkron paralel bağlantı sonrası şebeke frekansında yaklaşık 5-7 sn periyotlu bölgeler arası düşük frekanslı salınımların meydana gelmesi beklenmektedir. Bu salınımları sönümleyici tedbirler alınmazsa, salınımlar Türkiye şebekesinin Avrupa'nın birbirine bağlı sisteminden kopmasına yol açabilecek boyutlara ulaşabilir. Güç sistemlerindeki salınımların, frekansın ve gücün modern tekniklerle en iyi bir şekilde kontrolü sayesinde Türkiye'nin içinde bulunmak istediği ENTSO-E CESA üyesi olabilecektir.

Doğrusallaştırılmış transfer fonksiyonu ikinci dereceden olan güç sistemleri için tasarlanan türev filtreli PID kontrolör ile KDM'nin kontrol polinomları aynıdır. Daha sonraki çalışmalarda incelenen güç sistemleri için KDM tabanlı türev filtreli PID kontrol tasarlanacak ve tasarlanan kontrolörün deneysel kullanımı sağlanacaktır.



## 6. KAYNAKLAR

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, New York, 1993.
- [2] G. R. Berube, L.M. Hajagos, and R. Beaulieu, Practical utility experience with application of power system stabilizers, Power Engineering Society Meeting, Edmonton, Canada, July 1999, 104-109 vol.1, 1999.
- [3] R. You, “*Controller design for PSS and FACTS devices to enhance damping of low-frequency power oscillations in power systems*”, Doctor of Philosophy, Montana State University, 2006.
- [4] M. Tavahodi, “*Mixed model predictive control with energy function design for power system*”, Master of Engineering, Queensland University of Technology, 2007.
- [5] J. He, “*Adaptive power system stabilizer based on recurrent neural network*”, Doctor of Philosophy, The University of Calgary, Alberta, 1998.
- [6] R. Gupta, “*Robust nondynamic multirate output feedback technique based power system stabilizers*”, Doctor of Philosophy, Indian Institute Of Technology, Bombay, 2003.
- [7] R. G. Kavasseri, “*A new methodology for the design of power system stabilizers*”, Doctor of Philosophy, Washington State University, 2002.
- [8] V. S. Bandal, “*Power System Stabilizer Design based on Multirate Output Feedback Sliding Mode Control Strategies*”, Doctor of Philosophy, Indian Institute Of Technology, Bombay, 2006.
- [9] F. P. Demello, , C. Concordia, *Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control*, **IEEE Trans. Power App. Syst.**, 88, pp. 316-329, 1969.
- [10] E. V. Larsen, D. A. Swann, *Applying power system stabilizers part 1,2,3*, **IEEE Trans. on Power App. Syst.**, 100, 6, pp. 3017–3046, 1981.
- [11] K. Bollinger, A. Laha, R. Hamilton, T. Harras , *Power stabilizer design using root locus methods*, **IEEE Trans. Power Apparatus and Systems**, 94, 5, pp. 1484-1488, 1975.
- [12] T. C. Yang, N. Munro, *Power system stabilizer based on the pole placement technique for simo systems*, **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, 13, 6, 1991.
- [13] Y. Yu, Q. LI, *Pole placement power system stabilizer desig of an unstable machine system*, **IEEE Trans. Power Systems**, 5, 2, pp. 353-358, 1990.

- [14] M. K. Sherbiny, M.M. Hasan, G. Saady, A.M. Yousef, Optimal pole shifting for power system stabilization, *Elect. Power System Research*, 66, pp. 253-258, 2003.
- [15] A. A. Rahim, D.H. Kelly, *Optimal excitation control for power system stability*, **IEEE Trans. Auto. Control**, pp. 379-381, 1971.
- [16] R. Gupta, B. Bandyopadhyay, A. M. Kulkarni, *Design of power system stabilizer for single-machine system using robust periodic output feedback controller*, **IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.**, 150, 2, pp. 211-216, 2003.
- [17] V. Bandal, B. Bandyopadhyay, *Robust decentralized output feedback sliding mode control technique-based power system stabilizer (PSS) for multimachine power system*, **IET Control Theory Appl.**, 1, 5, pp. 1512-1522, 2007.
- [18] S. E. Hamamci, *Simple polynomial controller design by the coefficient diagram method*, **WSEAS Trans. on Circuits and Systems**, v.3, no.4, pp.951-956, 2004.
- [19] S. E. Hamamcı, *Zaman Gecikmeli Kararsız Sistemler için Katsayı Diyagram Metodu ile Kontrolör Tasarımı*, **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, v.6, no.3, 2002.
- [20] J. Taborda, *Elbistan B AVR & PSS Settings Analysis*, **JT Systems**, Nussbaumen, Switzerland, December 2008.
- [21] M. Klein, G.J. Rogers, P. Kundur, *A Fundamental Study of Inter-Area Oscillations in Power Systems*, Toronto, Ontario. *Transactions on Power Systems*, Vol. 6, No. 3, August 1991.
- [22] J. C. H Peng, N. K. C. Nair, A. L. Maryani, A. Ahmad, *Adaptive power system stabilizer tuning technique for damping inter-area oscillations*, *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, 25-29 July 2010.
- [23] K. Kleinekorte, E. Grebe, *The effect of inter-area oscillations*, **RWE Transportnetz Strom**, November 2005.
- [24] C. Gençoğlu, O. B. Tör, N. Güven, *Bölgeler Arası Düşük Frekanslı Generatör Salınımlarını Sönümleyici Faktörler ve Türkiye ENTSO-E CESA Enterkonneksiyonu için Çözümler*, **EMO Bilimsel Dergi**, Cilt 1, Sayı 1, Syf 39-43, Haziran 2011.
- [25] C. Gençoğlu, *“Assessment of the Effect of Hydroelectric Power Plants’ Governor Settings on Low Frequency Inter Area Oscillations”*, Ms Thesis, Middle East Technical University, Tem. 2010.

- [26] O. B. Tor, C. Gençoğlu, O. Yilmaz, E. Cebeci, A. N. Güven, Damping Measures against Prospective Inter Area Oscillations between Turkish Grid and ENTSO-E CESA System, IEEE PowerCON, 2010.
- [27] IEEE Tutorial Course, Power System Stabilization via Excitation Control, in IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007.
- [28] O. Ruhle, *Eigenvalue Analysis – All information on power system oscillation behavior rapidly analyzed*, **Siemens Power Technology**, September 2006.
- [29] J. D. Glover, M. Sarma, *Power System Analysis and Design*, **PWS-Kent Publishing Company**, Boston, 1986.
- [30] P. Kundur, M. Klein, G. J. Rogers, M. S. Zywno, *Application of power system stabilisers for enhancement of overall system stability*, **IEEE Transactions on Power Systems**, 4, 614-626, 1989.
- [31] M. E. Tacer, *Enerji Sistemlerinde Kararlılık*, İ.T.Ü., İstanbul, 1990.
- [32] M. Sanaye-Pasand, O.P. Malik, A Fuzy Logic PSS Using a Standardized Rule Table, Taylor&Francis, *Electric Machines and Power Systems*, 27:295-310, 1999.
- [33] Y. L. Abdel-Magid, M. A. Abido, S. Al-Baiyet, A. H. Mantawy, *Simultaneous Stabilization of Multimachine Power Systems via Genetic Algorithms*, **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol.14, No.4, November 1999.
- [34] P. Doraraju, R. K. Nondy, An Adaptive Controller for Improving Dynamic Stability of Synchronous Power System, Taylor & Francis, *Electric Machines and Power Systems*, 28:1–11, 2000.
- [35] D. Gan, Z. Qu, H. Cai, *Multi machine power system excitation control design via theories of feedback linearization control and nonlinear robust control*, Taylor&Francis, **International Journal of Systems Science**, vol.31, no.4, 519-527, 2000.
- [36] W. Hu, S. Mei, Q. Lu, T. Shen, ve A. Yokoyama, Nonlinear adaptive decentralized stabilizing control of multimachine systems, Elsevier, *Applied Mathematics and Computation* 133 519–532, 2002.
- [37] R. C. Schaefer, K. Kim, M. J. Basler, Voltage Regulator with Dual PID Controllers Enhances Power System Stability, presented at the HydroVision Conf., Portland, OR, Jul./Aug., 2002.
- [38] A. R. Hasan, T. S. Martis, A. H. M. S Ula, *Design and Implementation of a Fuzzy Controller Based Automatic Voltage Regulator for a Synchronous Generator*,

- IEEE Transactions of Energy Conversion**, Vol.9, No.3, pp. 550-557, September 1994.
- [39] T. Hiyama, *Robustness of Fuzzy Logic Power System Stabilizers Applied to Multi Machine Power System*, **IEEE Trans. on Energy Conversion**, Vol.9, No.3, pp. 451-459, September, 1994.
- [40] T. Hiyama, K. Miyazaki, H. Satoh, *A Fuzzy Logic Excitation System for Stability Enhancement of Power Systems with Multi-mode Oscillations*, **IEEE Trans. on Energy Conversion**, Vol.11, No.2, pp. 449-454, June, 1996.
- [41] C. S. Chang, H. B. Quek, J. B. X. Devotta, *Power System Excitation Control Using Master-Slave Fuzzy Logic Power System Stabilizers*, Elsevier, *Fuzzy Set and Systems*, 102, 85-94, 1999.
- [42] J. Lu, M. H. Nahrir, D. A. Pierre, *A fuzzy logic-based adaptive power system stabilizer for multi-machine systems*, *Electric Power Systems Research* 60, 77–83, 2001.
- [43] S. A. Al-Osaimi, A. Abdennour, A. A. Al-Sulaiman, *Hardware implementation of a fuzzy logic stabilizer on a laboratory scale power system*, Elsevier, *Electric Power Systems Research* 74 (2005) 9–15, 2005.
- [44] P. K. Dash, A. C. Liew, B. R. Mishra, *An adaptive PID stabilizer for power systems using fuzzy logic*, Elsevier, *Electric Power Systems Research* 44 213–222, 1998.
- [45] N. Hosseinzadeh, A. Kalam, *A Direct Adaptive Fuzzy Power System Stabilizer*, **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol.14, No.4, December, 1999.
- [46] T. Atanasova, J. Zaprianov, *Performance of the RBF neural controller for transient stability enhancement of the power system*, *International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems*, Trieste, Italy, 1999.
- [47] R. You, H. J. Eghbali, M. H. Nehrir, *An Online Adaptive Neuro-Fuzzy Power System Stabilizer for Multimachine Systems*, **IEEE Trans. on Power Sys.**, Vol. 18, No. 1, February, 2003.
- [48] P. Sauer, M. Pai, *Power system dynamics and stability*, Pren. Hall, pp.1-277,1998.
- [49] F. Saccomanno, *Electric power system analysis and control*, **Wiley-Interscience**, pp.1-25, 2003.
- [50] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, *Power generation operation and control*, **Wiley-Sons**, pp. 1-85, 1984.

- [51] P. M. Anderson, A. A. Fouad, *Power system control and stability*, **Wiley-Intersence**, pp. 1-370, 2003.
- [52] J. Machowski, J. W. Bialek, J. R. Bumby, *Power system dynamics and stability*, **John Wiley&Sons**, pp. 1-265, 1997.
- [53] J. Machowski, J. Bialek, J. R. Bumby, *Power Systems Dynamics and Stability*, **John Wiley & Sons**; 1 edition, September 2, 1997.
- [54] H. W. Kabisama, *Electrical Power Engineering*, **McGraw-Hill**, pp.1-78, 1993.
- [55] A. Borges, A. C. M. do Valle, A. J. de Mores, H. R. de Azevedo, A simple fuzzy excitation control system (AVR) in power system stability analysis, Proceedings of the Australasian Universities Power Engineering Conference, (AUPEC), 23-26 September, 2001.
- [56] P. M. Anderson, A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, IEEE Press, New York, 1994.
- [57] H. Saadat, *Power System Analysis*, McGraw Hill, 2.edition, Boston, 2002.
- [58] S. M. Deckman, V. F.da Costa, *A power sensitivity model for electromechanical oscillation studies*, **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. 9, No. 2, May 1994.
- [59] M. Caner, “*Hiyerarşik Fuzzy Yöntemiyle Senkron Jeneratörlerde Uyarım Kontrolü*”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
- [60] Y. Zhao, Y. Gao, Z. Hu, Y. Yang, J. Zhan, Y. Zhang, Damping Inter Area Oscillations of Power Systems by a Fractional Order PID Controller, International Conference on Energy and Environment Technology, 2009.
- [61] P. Kumkratug, *Application of UPFC to Increase Transient Stability of Inter-Area Power System*, **Journal of Computers**, vol. 4, no. 4, April 2009.
- [62] A. Kazemi, E. Karimi, The Effect of Interline Power Flow Controller (IPFC) on Damping Inter-area Oscillations in the Interconnected Power Systems, IEEE ISIE, Montreal, Quebec, Canada, July 9-12, 2006.
- [63] C. Knospe, *PID Control*, **IEEE Control System Magazine**, Vol. 26, pp. 30-31, 2006.
- [64] A. M. İbrahim, *Fuzzy Logic for Embedded Systems Applications*, Amsterdam, Boston, Mass, 2004.
- [65] İ. Yüksel, *Otomatik Kontrol Sistem Dinamiği ve Denetim Sistemleri*, Nobel, 5. baskı, Ankara, 2006.

- [66] S. Kizir, H. M. Ertunç, Mikro Kontrolör Tabanlı PID Kontrol Sistemi Eğitim Seti, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, pp.474-479, 6-8 Kasım, 2006.
- [67] K. H. Ang, G. Chong, Y. Li, *PID Control System Analysis, Design and Technology*, **IEEE Transactions on Control System Technology**, vol.13, pp. 559-576, 2005.
- [68] K. S. Miller, B. Ross, *An introduction to the fractional calculus and fractional differential equations*, Wiley, New York, 1993.
- [69] S. G. Samko, A. A. Kilbas, O. I. Marichev, *Fractional integrals and derivatives*, Yverdon, Switzerland: Gordon and Breach, 1993.
- [70] A. Oustaloup, *La commande CRONE: Commande robuste d'ordre nonentier*, Herme, Paris, 1991.
- [71] S. E. Hamamcı, *İntegratörlü Sistemler İçin Katsayı Diyagram Metodu İle Kontrolör Tasarımı itüdergisi/d, mühendislik*, Cilt:3, Sayı:6, 3-12, Aralık 2004.
- [72] S. Manabe, The Application of Coefficient Diagram Method to ACC Benchmark problem, 2<sup>nd</sup> Asian Control Conference, Seoul, 1998.
- [73] S. Manabe, Y. C. Kim, Recent Development of Coefficient Diagram Method, ASSC'2000 3rd Asian Control Conference, Shanghai, 2000.
- [74] S. Manabe, Coefficient Diagram Method, 14th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, Seoul, 1994.
- [75] M. Hutton, B. Friedland, *Routh approximations for reducing order of linear, time-invariant system*, **IEEE Trans. Auto. Control**, vol. AC-20, no.3, pp. 329- 337, June, 1975.
- [76] K. Lou, Y. Liu, Wide-Area Damping Controller Based on Model Prediction and Sliding Mode Control, Proceedings of the 8th Congress on Intelligent Control and Automation, Jinan, China, July 6-9 2010.

## **7. EKLER**

### **Özgeçmiş**

Cemal Keleş, 1985 yılında Malatya'nın Yeşilyurt ilçesinde doğdu. İlkokulu Yeşilyurt Atatürk İlkokulu'nda, ortaokul ve lise eğitimini Yeşilyurt Kolukısa Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2008 yılında İnönü Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2009 yılında, mezun olduğu bölümde yüksek lisans eğitimine başladı. 2010-2011 yılları arasında Diyarbakır İl Emniyet Müdürlüğü'nde Elektrik-Elektronik Mühendisi olarak görev yaptı. 2011 yılında İnönü Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı ve bu görevi halen yürütmektedir.