

**BULANIK MANTIK TABANLI KONTROLÖR  
YARDIMI İLE GÜÇ SİSTEMİ KARARLI KILICISI  
TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Müh. Alphan ERDEM  
(504041004)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Mayıs 2007  
Tezin Savunulduğu Tarih : 8 Haziran 2007**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Aşen DEMİRÖREN**

**Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Adnan KAYPMAZ**

**Doç.Dr. Şeniz ERTUĞRUL**

**HAZİRAN 2007**

## **ÖNSÖZ**

Günümüzün önemli konularından biri olan bulanık mantık ile güç sistemi karalılığının iyileştirilmesi konusunda yaptığım araştırmalarda beni yönlendiren ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Hocam Prof. Dr. Ayşen DEMİRÖREN'e, aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

**Mayıs 2007**

**Alphan ERDEM**

## İÇİNDEKİLER

<b>KISALTMALAR</b>	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>vi</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>vii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b>	<b>ix</b>
<b>ÖZET</b>	<b>xi</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>xiii</b>
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1. Giriş	1
1.2. Bulanık Mantık Teorisi ve Uygulama Alanları	2
1.3. İçerik	3
<b>2. GÜÇ SİSTEMLERİNDE KARARLILIK</b>	<b>4</b>
2.1. Giriş	4
2.2. Güç Sistemlerinde Kararlılık Tanımı	4
2.3. Geçici Hal Kararlılığı	5
2.4. Dinamik Hal Kararlılığı	6
2.5. Sürekli Hal Kararlılığı	6
<b>3. GÜÇ SİSTEMİ VE SENKRON GENERATÖR MODELİ</b>	<b>7</b>
3.1. Giriş	7
3.2. Güç Sistemi Modeli	7
3.3. Senkron Generatör Modeli	8
3.3.1. Elektriksel ve Mekanik Alt Sistemler	8
3.3.2. Uyarma Sistemi	9
3.3.3. Sürekli Hal Çalışma Durumu	10
3.3.4. Otomatik Gerilim Regülatörü	11
3.3.5. Devir Sayısı Regülatörü	12
<b>4. BULANIK MANTIK TEORİSİ</b>	<b>14</b>
4.1. Giriş	14
4.2. Bulanık Mantık Teorisi	14
4.3. Bulanık Mantıkla Modelleme İlkeleri	14
4.4. Bulanık Küme Tanımı ve Üyelik Dereceleri	14
4.5. Bulanık Küme İşlemleri	16
4.6. Bulanık Kümeler ve Dilsel Değişkenler	17
4.7. Bulanıklaştırma İşlemi	18
4.8. Durulaştırma İşlemi	18
4.9. Bulanık Kontrol Kuralları	18
4.10. Bulanık Mantık Kontrolörü	20
4.11. Durulaştırma Yöntemleri	21

<b>5. GÜÇ SİSTEMİ KARARLI KILICISI</b>	<b>23</b>
5.1. Giriş	23
5.2. Geleneksel Güç Sistemi Kararlı Kılıcı	23
5.3. Bulanık Mantık Tabanlı Güç Sistemi Kararlı Kılıcı	29
<b>6. BİLGİSAYAR BENZETİMİ</b>	<b>33</b>
6.1. Giriş	33
6.2. Generatör ve Kararlı Kılıcılar Benzetimi	33
6.3. Senkron Generatör Modeli	35
6.4. Senkron Generatör Mekanik Alt Sistemleri	37
6.5. Senkron Generatör Uyarma Sistemi	38
6.6. Senkron Generatör Sürekli Hal Çalışma Durumu	39
6.7. Senkron Generatör Elektriksel Alt Kısımları	39
6.8. Bilgisayar Benzetimi Sonuçları	40
6.8.1. Endüktif Ağır Yük Koşullarında Benzetim Sonuçları	41
6.8.2. Endüktif Orta Yük Koşullarında Benzetim Sonuçları	42
6.8.3. Endüktif Hafif Yük Koşullarında Benzetim Sonuçları	43
6.8.4. Kapasitif Orta Yük Koşullarında Benzetim Sonuçları	44
6.8.5. Kapasitif Hafif Yük Koşullarında Benzetim Sonuçları	45
<b>7. SONUÇLAR</b>	<b>47</b>
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>49</b>
<b>EKLER</b>	<b>52</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	<b>59</b>

## **KISALTMALAR**

<b>OGR</b>	: Otomatik gerilim regülatörü
<b>FLC</b>	: Fuzzy logic controller
<b>DSR</b>	: Devir sayısı regülatörü
<b>GSK</b>	: Güç sistemi kararlı kılıcısı
<b>GGSK</b>	: Geleneksel güç sistemi kararlı kılıcısı
<b>BGSK</b>	: Bulanık mantık güç sistemi kararlı kılıcısı
<b>SISO</b>	: Tek giriş tek çıkış
<b>MISO</b>	: Çoklu giriş tek çıkış
<b>MIMO</b>	: Çoklu giriş çoklu çıkış

## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
<b>Tablo 5.1</b>	BGSK karar tablosu ..... 30
<b>Tablo 5.2</b>	BGSK’da kullanılan bulanık kural tablosu..... 32
<b>Tablo 6.1</b>	Benzetimlerde kullanılan şebeke aktif ve reaktif güç değerleri..... 40
<b>Tablo A.1</b>	Güç Sistemi ve Senkron Generatör Parametreleri..... 52
<b>Tablo A.2</b>	Geleneksel Güç Sistemi Kararlı Kılıcı Parametreleri..... 52
<b>Tablo B.1</b>	BGSK parametreleri..... 54

## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.1 : Sonsuz güçlü baraya bağlı generatör modeli.....	7
Şekil 3.2 : Sonsuz güçlü baraya bağlı generatör fazör diyagramı.....	9
Şekil 3.3 : Otomatik gerilim regülatörü modeli.....	12
Şekil 3.4 : Otomatik gerilim regülatörü – uyarma sistemi bağlantı şeması...	12
Şekil 3.5 : Devir sayısı regülatörü modeli.....	13
Şekil 3.6 : Generatör, OGR ve DSR bağlantı şeması.....	13
Şekil 4.1 : Üyelik fonksiyonları.....	16
Şekil 4.2 : Bulanık kontrol kurallarının üyelik fonksiyonları ile gösterimi...	19
Şekil 4.3 : Temel bulanık kontrolör yapısı.....	20
Şekil 4.4 : Bulanık mantık kontrolörü temel konfigürasyonu.....	21
Şekil 4.5 : En büyük üyelik yöntemi.....	22
Şekil 4.6 : Ortalama en büyük üyelik yöntemi.....	22
Şekil 4.7 : Ağırlık merkezi yöntemi.....	23
Şekil 5.1 : OGR ve GSK içeren uyarma blok diyagramı.....	24
Şekil 5.2 : OGR'nün senkronizasyon ve sönüm momentlerine etkisi.....	26
Şekil 5.3 : OGR ve GSK'nın birlikte senkronizasyon ve sönüm momentine etkisi.....	26
Şekil 5.4 : Geleneksel GSK modeli.....	27
Şekil 5.5 : Bilgisayar benzetiminde kullanılan GGSK MATLAB modeli....	28
Şekil 5.6 : BGSK iç yapısı.....	29
Şekil 5.7 : “d $\omega$ ” giriş işareti için kullanılan üyelik fonksiyonları.....	31
Şekil 5.8 : Bilgisayar benzetiminde kullanılan BGSK MATLAB modeli....	31
Şekil 6.1 : Bilgisayar benzetimi modeli.....	34
Şekil 6.2 : Senkron generatör modeli.....	35
Şekil 6.3 : Güç sisteminde arıza modeli.....	36
Şekil 6.4 : Arıza bloğu iç yapısı.....	37
Şekil 6.5 : Mekanik kısım bloğu iç yapısı.....	37
Şekil 6.6 : Türbin tahrik bloğu iç yapısı.....	38
Şekil 6.7 : Uyarma bloğu iç yapısı.....	38
Şekil 6.8 : Sürekli hal bloğu iç yapısı.....	39
Şekil 6.9 : Elektriksel kısım bloğu iç yapısı.....	40
Şekil 6.10 : Endüktif ağır yük koşullarında rotor açısı sınımlarının karşılaştırılması.....	41
Şekil 6.11 : Endüktif orta yük koşullarında rotor açısı sınımlarının karşılaştırılması.....	42
Şekil 6.12 : Endüktif hafif yük koşullarında rotor açısı sınımlarının karşılaştırılması.....	43
Şekil 6.13 : Kapasitif orta yük koşullarında rotor açısı sınımlarının karşılaştırılması.....	44

<b>Şekil 6.14</b> :: Kapasitif hafif yük koşullarında rotor açısı salınımlarının karşılaştırılması.....	45
<b>Şekil B.1</b> : Bulanık güç sistemi kararlı kılıcı girişler ve çıkışlar şeması.....	52
<b>Şekil B.2</b> : “dP” giriş işareti için kullanılan üyelik fonksiyonları.....	53
<b>Şekil B.3</b> : Çıkış işareti için kullanılan üyelik fonksiyonları.....	54
<b>Şekil C.1</b> : GGSK bağlantı şeması.....	55
<b>Şekil C.2</b> : BGSK bağlantı şeması.....	55
<b>Şekil D.1</b> : Endüktif ağır yük koşulları altında uç gerilimlerinin karşılaştırılması.....	56
<b>Şekil D.2</b> : Endüktif orta yük koşulları altında uç gerilimlerinin karşılaştırılması.....	56
<b>Şekil D.3</b> : Endüktif hafif yük koşulları altında uç gerilimlerinin karşılaştırılması.....	57
<b>Şekil D.4</b> : Kapasitif orta yük koşulları altında uç gerilimlerinin karşılaştırılması.....	57
<b>Şekil D.5</b> : Kapasitif hafif yük koşulları altında uç gerilimlerinin karşılaştırılması.....	58



## SEMBOL LİSTESİ

$\Delta$	: Nominal değerlere göre değişim
$P$	: Aktif güç
$Q$	: Reaktif güç
$P_e$	: Elektriksel aktif güç
$P_m$	: Mekanik güç
$f$	: Sistem frekansı
$\omega$	: Rotor açısal hızı
$V$	: Sonsuz güçlü bara gerilimi
$V_t$	: Generatör uç gerilimi
$V_{td}$	: Generatör uç gerilimi d ekseni bileşeni
$V_{tq}$	: Generatör uç gerilimi q ekseni bileşeni
$V_{supp}$	: Güç sistemi kararlı kılıcı çıkış gerilimi
$V_{max}$	: Kontrolör çıkış gerilimi maksimum değeri
$V_{min}$	: Kontrolör çıkış gerilimi minimum değeri
$I$	: Stator akımı
$I_d$	: Stator akımı d ekseni bileşeni
$I_q$	: Stator akımı q ekseni bileşeni
$E_d'$	: d ekseni geçici gerilimi
$E_q'$	: q ekseni geçici gerilimi
$E_{fd}$	: d ekseni uyarma gerilimi
$R_a$	: Stator direnci
$R_e$	: İletim hatları eşdeğer direnci
$x_e$	: İletim hatları eşdeğer reaktansı
$x_d$	: Senkron reaktans
$x_q$	: Generatör q ekseni reaktansı
$x_d'$	: Geçici hal reaktansı
$T_{d0}'$	: d ekseni açık devre zaman sabiti
$T_{q0}'$	: q ekseni açık devre zaman sabiti
$T_{SR}$	: Hız rölesi zaman sabiti
$T_{SM}$	: Servomotor zaman sabiti
$T_{CH}$	: Buhar vanası zaman sabiti
$T_{RH}$	: Ara ısıtıcı zaman sabiti
$T_1, T_2$	: Güç sistemi kararlı kılıcı faz kompanzasyonu zaman sabitleri
$T_w$	: Güç sistemi kararlı kılıcı temizleme zaman sabitleri
$T_E$	: Uyarma zaman sabiti
$T_{FE}$	: Kararlayıcı devre zaman sabiti
$K_F$	: Kararlayıcı devre kazancı
$K_E$	: Uyarma kazancı
$K_{RH}$	: Ara ısıtıcı kazancı
$K_G$	: Hız rölesi kazancı
$K_D$	: Sönüm katsayısı

$K_S$	: Senkronizasyon katsayısı
$K_{gsk}$	: Geleneksel güç sistemi kararlı kılıcı kazancı
$K_1, K_2, K_3$	: Bulanık güç sistemi kararlı kılıcı ölçeklendirme faktörleri
$D$	: Yavaşlatma katsayısı
$H$	: Senkron generatör eylemsizlik zaman sabiti
$P_r$	: Hız rölesi çıkış gücü
$P_h$	: Servomotor çıkış gücü
$P_c$	: Buhar vanası çıkış gücü
$\delta$	: Rotor açısı
$\phi$	: Güç açısı
$T_M$	: Mekanik moment
$T_{EM}$	: Elektriksel moment
$s$	: Laplace operatörü

**Alt indisler**

$0$	: Değişken başlangıç değeri
$r$	: Referans değer

## **BULANIK MANTIK TABANLI KONTROLÖR YARDIMI İLE GÜÇ SİSTEMİ KARARLI KILICISI TASARIMI**

### **ÖZET**

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

Güç sisteminde meydana gelen küçük veya büyük bozucu etki sonrasında senkron generatörlerin rotor açıları salınım yapar. Bu salınım senkron generatörün kararlılığını belirler. Rotor açısı salınımının giderek azalarak belirli bir değere oturması kararlı çalışmayı, giderek artması da kararsızlığı ifade eder.

Otomatik gerilim regülatörü gibi kontrol elemanlarının bir miktar arttırdığı senkronlayıcı moment sayesinde rotor açısı salınımı sönüm yapmaktadır. Güç sisteminde meydana gelen arızanın durumuna göre rotor açısı salınımlarının söndürülmesinde senkronlayıcı moment yetersiz kalabilir. Böyle durumların önlenmesi amacıyla, 1960'lardan itibaren senkron generatörlerde güç sistemi kararlı kılıcılar kullanılmaya başlanmıştır. Güç sistemi kararlı kılıcılar, giriş olarak hız sapması, frekans, güç farkı, ivmelendirme gücü gibi işaretleri giriş olarak alırlar ve çıkış olarak ürettikleri gerilim işareti, generatörün uyarma sistemine giriş olarak verilir. Böylece senkronlayıcı momente ek olarak sönüm momenti ilave edilerek rotor açısı salınımlarının daha kısa sürede etkili biçimde söndürülmesi sağlanır.

Bulanık mantık teorisi 1965 yılında L. A. Zadeh tarafından ortaya atılmıştır. O tarihten bugüne dek kontrol alanında pek çok uygulamada kullanılmıştır. Yapısından dolayı bulanık mantık, günlük konuşma dilindeki belirsizlik içeren kelimelerin dilsel değişkenler olarak kullanılıp bir sistemin modellenmesine olanak tanır. Sistem kesin veriler gerekmeksizin uzman veya operatörün görüş ve deneyimlerine göre kolayca modellenebilir. Bulanık mantık etkinliğinden dolayı güç sistemlerinin kontrolünde de kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında bulanık mantık tabanlı kontrolör kullanarak bir güç sistemi kararlı kılıcı modellenmiştir. Modellen bulanık güç sistemi kararlı kılıcının, tek makina-sonsuz baradan oluşan bir güç sisteminde üç fazlı bir kısa devre meydana gelmesi durumunda rotor açısı salınımlarını söndürme kabiliyeti, geleneksel yapıdaki güç sistemi kararlı kılıcı ile karşılaştırılmıştır. Geleneksel yapıdaki kararlı kılıcı parametrelerinin belirli bir şebeke çalışma noktasına göre seçilmesinden dolayı, farklı şebeke çalışma noktalarında iyi bir sönüm sağlayamamaktadır.

Bulanık güç sistemi kararlı kılıcısı ise geniş bir çalışma koşulu bölgesinde iyi bir sönüm sağlayabilmektedir.

Çalışma içerisinde kısaca güç sistemlerinde kararlılık tanımları, güç sistemi ve senkron generatör modeli, bulanık mantığın temeli, geleneksel ve bulanık güç sistemi kararlı kılıcılarının çalışma yapısı ve modelleri ile yapılan bilgisayar benzetimleri ve sonuçları yer almaktadır.

## **DESIGNING A POWER SYSTEM STABILIZER BY USING FUZZY-LOGIC BASED CONTROLLER**

### **SUMMARY**

Since the demand and consumption of energy is increased, power quality has become an important matter. The reliability of the power supply implies much more than merely being available. The voltage and frequency must be kept between close tolerances. Having a reliable power system mostly depends on system's stability.

If a little or an high disturbance occurs at the power system, rotor angles of synchronous machines start to oscillate. The oscillations determine the stability of synchronous machines. Rotor angle will reach a final value after damping, if the system is stable.

Synchronizing torque that is increased by automatic voltage regulator, provides rotor angle oscillation's damping. However, if the fault conditions become worse, synchronizing torque can be insufficient to damp the oscillations. To prevent these situations, power system stabilizers are used since 1960's. Signals like, speed deviation, frequency, power deviation and acceleration power can be chosen as an input signal of the stabilizer. The voltage as an output signal of the stabilizer is applied to the excitation system. So that a damping torque is added to the synchronizing torque to enhance the rotor angle oscillation's damping.

Fuzzy logic theory was introduced for the first time by L. A. Zadeh at 1965. Since then, fuzzy logic theory is used in many applications in control area. Any system can be modeled by using linguistic variables. Certain values are not needed for system parameters, only operator's thought and experience is sufficient to identify the system. Fuzzy logic controllers are used for controlling power systems because of their high performance.

In this study, a fuzzy logic based controller is used for modeling a power system stabilizer. In a single machine – infinite bus system that has a short circuit fault for a short time, performance of fuzzy logic power system stabilizer analyzed comparatively on damping of rotor angle oscillation according to conventional power system stabilizer. The conventional power system stabilizer works well under particular operating conditions. Its design based on the linear approximation of a power plant. Its performance is degraded whenever its operating point is shifted to another point from specific one. Fuzzy logic power system stabilizer highly improves system damping subject to disturbances when comparing with the damping achieved by the conventional power system stabilizer.

Briefly, this study includes sections on definitions of power system stability, definitions of power system and synchronous generator, fuzzy logic basics and concepts, definitions of conventional and fuzzy logic power system stabilizers, simulation results of synchronous generator's model with each of the power system stabilizers, and interpretations of simulation results.

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Giriş

Endüstri devriminden bu yana insanoğlunun enerji ihtiyaçları ve tüketimleri sürekli artmaktadır. Günümüzde modern toplumun enerji ihtiyacının büyük bir kısmı elektrik enerjisi olarak karşılanmaktadır. Endüstriyel olarak gelişmiş toplumların elektrik enerjisi ihtiyaçları her geçen on yıl ile birlikte ikiye katlanmaktadır. Bu büyük artışı karşılamak amacıyla elektrik enerjisi üretimindeki eğilim büyük ve karmaşık enterkonnekte şebekelerin kurulması yönündedir. Enterkonnekte enerji iletim şebekelerinin kurulmasıyla yüzlerce kilometre uzaktaki iki generatör paralel çalışabilmektedir [1].

Enterkonnekte şebekelerin kurulmasıyla birlikte birçok alanda yeni mühendislik sorunlarıyla karşılaşmıştır. Bu sistemlerin planlanması, kurulumu ve işletimi fazlasıyla karmaşık bir hal almaktadır. Tüm sisteminin işletimi otomatik kontrol üzerine kurmalı, yavaş tepki veren insan operatörler kullanılmamalıdır. Böyle karmaşık sistemlerin performanslarının incelenebilmesi için mühendisler daha güçlü araçlar arayışına girmişlerdir.

Güç sisteminin başarılı olarak işletilmesi mühendislerin tüketicilere güvenilir ve kesintisiz enerji sağlayabilmesine dayanır. Güç sisteminin güvenilirliği, enerjinin kesintisiz iletiminden çok daha fazlasını ifade eder. Teoride tüketiciler her zaman sabit gerilim ve frekansla beslenmelidirler. Uygulamada bu durum, gerilim ve frekansın çok küçük aralıklarda sabit tutularak tüketicilerin beslenmesi olarak ifade edilebilir.

Güvenilir bir şebeke için ilk gereklilik senkron generatörlerin yükleri yeteri kadar besleyecek kapasitede paralel çalışabilmeleridir. Herhangi bir zamanda senkron generatör sistemin geri kalanı ile senkronizmayı kaybettiğinde, sistemde belirgin gerilim ve akım dalgalanmaları oluşabilir ve iletim hatları koruyucu röleler tarafından devre dışı bırakılabilir [1]. Bu karşılaşılmak istenmeyen bir durumdur.

Güç sisteminde bir bozucu etki meydana geldiğinde rotor açısı salınım yapar. Gerilim regülatörünün de senkronlayıcı momente katkısıyla bu salınım söndürülerek makina senkronizmada kalır. Güç sistemi büyük bir bozucu etkiyle karşılaştığı zaman senkronlayıcı moment yetersiz kalabilir, bu nedenle rotor açısı salınımları giderek büyüyerek makinanın senkronizmadan çıkmasına ve devreden çıkarılmasına sebep olur.

Senkron generatörün rotor açısı salınımlarını söndürülmesine katkı sağlamak amacıyla 1960'ların ortalarından itibaren güç sistemi kararlı kılıcılar kullanılmaya başlanmıştır. Güç sistemi kararlı kılıcılar, senkronlayıcı momente ek olarak sönüm momenti sağlamak amacıyla, gerilim regülatörü girişine ek bir gerilim işareti uygulamaktadırlar [2]. Böylece herhangi bir bozucu etki karşısında yetersiz kalabilecek senkronlayıcı momente, güç sistemi kararlı kılıcının ürettiği sönüm momenti de eklenerek makinanın geçici hal kararlılığı sağlanmaya çalışılır.

Güç sistemi kararlı kılıcısına giriş olarak rotor hız sapması, rotor açısal değişimi, frekans, güç değişimi, ivmelendirme gücü gibi işaretler seçilebilir [2]. İlk kullanılmaya başladıkları günden bu zamana kadar pek çok güç sistemi kararlı kılıcı modeli geliştirilmiştir. Kullanılan geleneksel kontrolör yapısı dışında adaptif kontrolör de kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra enterkonnekte şebekelerin kontrolünde yapay sinir ağları ve bulanık mantık teorileri de kullanılmaya başlanmıştır.

## **1.2 Bulanık Mantık Teorisi ve Uygulama Alanları**

Bulanık mantık günümüzün popüler konularından biri olup ilk defa 1965 yılında L. A. Zadeh tarafından "Bulanık Kümeler" adlı makale ile ortaya atılmıştır. İlk ortaya atıldığında uygulama alanı olmadığından pek kabul görmemiştir.

Bulanık mantık teorisi için dönüm noktası 1974'de E. Mamdani tarafından bir buhar motoru kontrolü için bulanık mantığı teorisini kullanması olmuştur. İlk endüstriyel uygulama ise F.H. Smidth tarafından 1980'de Danimarka'da bir çimento ocağının kontrolünde olmuştur. Daha sonra 1980'lerde Japonya'da Fuji Elektrik tarafından su arıtma işlemi kontrolü, Hitachi tarafından otomatik tren kontrolü uygulamaları yapılmıştır. 1990'ların başından itibaren bulanık mantığın ev elektronik ürünlerinde



ve mühendislik dışında uygulamalarda kullanılmasıyla insanlar bulanık mantık kavramından haberdar olmuşlardır [3].

Klasik Aristo mantığına göre olaylar gerçekleşip gerçekleşmeme, olma olmama durumuna göre 1 veya 0 değerini alırlar. Oysa gerçek dünyada olaylar her zaman bu kadar kesin ve net değildir. İnsan beyni karar vermek için çok net verilere ihtiyaç duymamaktadır. Bulanık mantık insanların konuşma dilinde kullandıkları dilsel değişkenleri kullanarak belirsizlik içeren durumların matematiksel olarak modellenmesini sağlar. Her türlü sistem, bir uzmanın görüşlerine dayanılarak parametrelerin ve uygulanacak kuralların seçilmesiyle kolayca modellenebilir.

Geleneksel kontrol teorisinde bir sistemin modellenebilmesi için ayrıntılı ve kesin veriler gerekirken, bulanık mantık kontrolü için sistem parametrelerinin doğru seçimi ve sistemin çalışma yapısının bilinmesi yeterlidir. Sistem çıkışında istenen işaretin nasıl elde edilebileceğine ait ifadelerin, işarete etki edecek parametrelerin değiştirilme miktarına kontrol kuralı olarak yansıtılması bulanık mantık tabanlı kontrolörün temel çalışma prensibini oluşturur. Kontrol kurallarının insan düşünce ve deneyimlerine göre oluşturulmasıyla yapılan kontrol işlemine bir insanın hassasiyetini kazandırmaktadır.

Bulanık mantık tabanlı kontrolörler geleneksel yapıdaki kontrolörlere göre çok daha iyi performans gösterdiklerinden dolayı güç sistemlerinde de kullanılmaktadırlar.

### **1.3 İçerik**

Giriş bölümüyle birlikte tez çalışması yedi bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde güç sistemlerinde kararlık tanımları verilmiş olup kararlılığın sınıflandırılması yapılmıştır. Bilgisayar benzetiminde kullanılan güç sistemi modeli ile senkron generatörün durum denklemleri ve kontrol elemanları üçüncü bölümde açıklanmıştır. Dördüncü bölümde bulanık mantık teorisi ile ilgili kavramlar ve tanımlar verilmiştir. Beşinci bölümde geleneksel ve bulanık mantık tabanlı güç sistemi kararlı kılıcılar anlatılmış olup, bilgisayar benzetiminde kullanılan kararlı kılıcı modelleri verilmiştir. Bölüm 6'da benzetimde kullanılan senkron generatör yapısı anlatılmış olup geleneksel ve bulanık yapıdaki kararlı kılıcılarının performansları karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Yedinci bölüm tez çalışmasında elde edilen sonuçları içermektedir.

## **2. GÜÇ SİSTEMLERİNDE KARARLILIK**

### **2.1 Giriş**

Güç sistemlerinin sağlıklı çalışabilmesi için karşılaştıkları bozucu etkiler karşısında kararlılıklarını koruyabilmeleri gerekir. Bu bölümde kararlılık tanımı ve çeşitleri hakkında bilgiler verilecektir.

### **2.2 Güç Sistemlerinde Kararlılık Tanımı**

Güç sistemlerinde kararlılık bir bozucu etkiye sahip olan sistemin bozucu etki sonrası tekrar bozucu etki öncesi çalışma koşullarına dönebilme yeteneği olarak tanımlanabilir [4].

Sürekli çalışma koşullarında, sistemde (kayıplar ihmal edildiğinde) mekanik giriş ve elektriksel çıkış enerjileri denge halindedir. Burada mekanik giriş enerjileri, senkron generatöre ilişkin tahrik sistemlerinin enerjileridir. Elektriksel çıkış enerjileri ise elektriksel yüklerle ilgilidir. Sistemin kararlı çalışabilmesi için gerek şart bu dendedir.

Sistemde oluşan ani yük değişimleri, iletim hatlarındaki kısa devreler gibi bozucu etkiler sonucunda elektriksel ve mekaniksel enerjiler arasındaki denge bozulur. Sistemde tekrar dengeyi sağlamak amacıyla aktif güç, mekanik regülatörler kullanılarak generatöre giriş olarak verilen tahrik gücünde yapılan değişimle ayarlanır. Reaktif güç değişimi ise uyarma devresindeki elektriksel elemanlar tarafından uç geriliminin ayarlanması ile dengelenir. Enerji dengesinin bozulması sonucunda sistem generatörlerinin rotor açılarında oluşan salınımlar makinanın kararlılığını belirler. Senkronizmadan çıkan üniteler koruma sistemleri tarafından servis dışı bırakılır [4, 5] .

Mekanik enerji değişimini sağlayan devir sayısı regülatörlerinin (DSR) zaman sabiti, uyarma sistemindeki elektriksel regülatörlerin zaman sabitine göre çok büyük

olduğundan elektriksel değişime, mekanik enerji tarafından aynı hızla cevap verilemez. Bu yüzden güç sistemlerinde kararlılık müdahale zamanına göre geçici hal kararlılığı, dinamik hal kararlılığı ve sürekli hal kararlılığı olmak üzere üçe ayrılır.

### 2.3 Geçici Hal Kararlılığı

Sistemin meydana gelen bozucu etkiye, mekanik enerji değişimini sağlayan devreye girmedeği ilk birkaç saniyelik süre içinde verdiği cevaptır. Sistemin analizi yapılırken mekanik gücün sabit kaldığı kabul edilir [4,5].

Geçici hal kararlılığının analizinde rotor açısının ilk salınımı büyük öneme sahiptir. Sistemin senkronizmada kalma yeteneği, ilk salınımdan sonraki salınımların birincisinden daha küçük olması ile belirlenir. İlk salınımı etkileyen en önemli parametreler şunlardır [4]:

- Bozucu etkinin türü, yeri, süresi,
- Geçici hal sırasında enerji iletim hatlarının senkronlama sağlayabilme yeteneği,
- Türbin-generator ve iletim sistemi parametreleridir.

Geçici hal kararlılığı incelenirken sistemin matematiksel modeli doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerden oluşacağı için lineer kontrol teorisinden bilinen kararlılık analizi yöntemleri ile sistem davranışı incelenemez.

Sayısal benzetim işleminde önce sistemin sürekli halde yük akışı incelenir. Sonra sistemin tüm çalışma koşullarını kapsayacak şekilde oluşturulmuş sistemin matematiksel modelinin bilgisayar ile çözümü ile sistemin kararlılık analizi yapılır. Sistemin kararlılığı senkron makinanın rotor açısının zamana göre davranışı incelenerek belirlenir. Benzetim işleminde kullanılan sayısal analiz yöntemleri [4,5]:

- Adım adım çözüm,
- Euler yöntemi,
- Düzeltilmiş Euler yöntemi,
- Runge-Kutte yöntemidir.
- Tek makinalı sistemlerde eşit alan kriteri ile kararlılık analizi yapılabilir.

## **2.4 Dinamik Hal Kararlılığı**

Dinamik Hal kararlılığı, birkaç saniyelik geçici olay süresinden sonra, mekanik regülâtörlerin de devrede olduğu birkaç dakikalık sürede sistemin bozucu etkiye cevabı olarak tanımlanabilir [4,5].

Regülâtörler mekanik – elektrik enerji dengesini sağlayarak sistemi nominal hıza ulaştırmaya çalışırlar. Denge sağlamak amacıyla tahrik makinaları tarafından mekanik güç değiştirilir. Mekanik gücün denge noktasını geçmesiyle enerji dengesizliği oluşur. Dengesizliği gidermek amacıyla tekrar mekanik enerji değiştirilir. Bu değişimler rotor açısında salınımlar meydana getirir. Salınımların giderek büyümesi kararsız çalışmadır. Kararlı çalışma durumunda ise salınımlar giderek azalır ve sistem sürekli çalışma noktasına oturur [4].

## **2.5 Sürekli Hal Kararlılığı**

Sistemin küçük bozucu etkilere ve beklenen yük değişimlerine cevabı sürekli hal kararlılığı olarak tanımlanabilir. Eğer sistem kararlı ise, bozucu etki sonrasında başlangıç işletme koşullarında veya yeni işletme koşullarında çalışmasını sürdürür [4].

Dinamik hal ve sürekli hal kararlılığı birlikte analiz edilir. Sürekli hal kararlılığı lineer sistem modeli ele alınarak, kontrol teorisinde küçük işaret kararlılığı ile incelenir.

Bu bölümde kararlık tanımı ile birlikte açısız kararlılığın müdahale zamanına göre sınıflandırılması yapılmıştır. Bundan sonraki bölümde güç sistemi ve senkron generatör modeli incelenecektir.

### 3. GÜÇ SİSTEMİ VE SENKRON GENERATÖR MODELİ

#### 3.1 Giriş

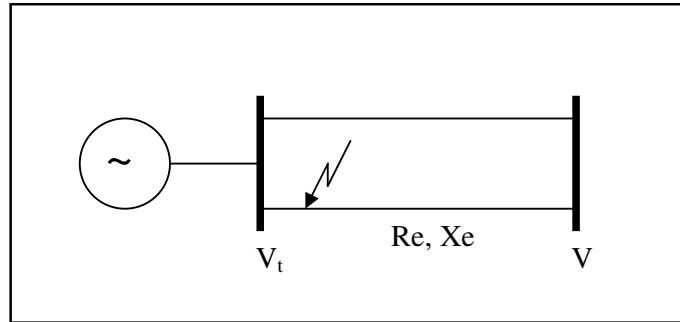
Bu bölümde tezde uygulanan bilgisayar benzetimi çalışmasında kullanılan güç sistemi, senkron generatör, otomatik gerilim regülatörü, ve devir sayısı regülatörü, modelleri açıklanacaktır. Benzetimde modellenen geleneksel güç sistemi kararlı kılıcı (GGSK) ve bulanık güç sistemi kararlı kılıcı (BGSK) modelleri ise beşinci bölümde ayrıntılı olarak incelenecektir.

#### 3.2 Güç Sistemi Modeli

Güç sistemlerinin kolay analiz edilebilmesi için tek makine-sonsuz bara modeli kullanılabilir. Bu modelde tek bir senkron generatör sonsuz güçlü şebekeye bağlanır.

Tezde uygulanan bilgisayar benzetiminde, senkron generatör sonsuz güçlü baraya paralel ve eşdeğer, üç fazlı iki iletim hattı üzerinden bağlanmıştır. Hatlardan birinde meydana gelen üç fazlı kısa devre arızası sonucu, arızalı hat devre bir süre devre dışı kalıp arıza giderildikten sonra tekrar devreye alınmaktadır. Bu süreç içerisinde generatör rotor açısındaki değişim incelenmektedir.

Şekil 3.1. de sonsuz güçlü baraya bağlı senkron generatör modeli verilmiştir. Burada  $V_t$  generatör uç gerilimini,  $V$  sonsuz güçlü bara gerilimini,  $R_e$  ve  $X_e$  hat empedansını temsil etmektedir.



Şekil 3.1: Sonsuz Güçlü Baraya Bağlı Generatör Modeli [6]

### 3.3 Senkron Generatör Modeli

Güç sistemi modelinde kullanılan senkron generatöre durum denklemleri ile tanımlanabilir. Bilgisayar benzetiminde basit olması nedeniyle 160 MVA, 15 kV nominal değerlere sahip bir senkron generatörün 4. derecen dinamik modeli kullanılmıştır.

Generatör modeli, uyarma sistemi, mekanik kısım, elektriksel kısım, sürekli hal çalışmayı ifade eden sürekli hal gibi alt sistemlerden oluşmaktadır. Alt sistemlere ait blok diyagramlar bilgisayar benzetiminin anlatıldığı altıncı bölümde verilecektir. Generatör modelinde kullanılan parametrelerin değerleri **EK-A**'da verilmiştir.

#### 3.3.1 Elektriksel ve Mekanik Alt Sistemler

Senkron generatörün elektriksel alt sistemine ait d-q eksenindeki geçici gerilim denklemleri aşağıda verilmiştir [1, 6, 7].

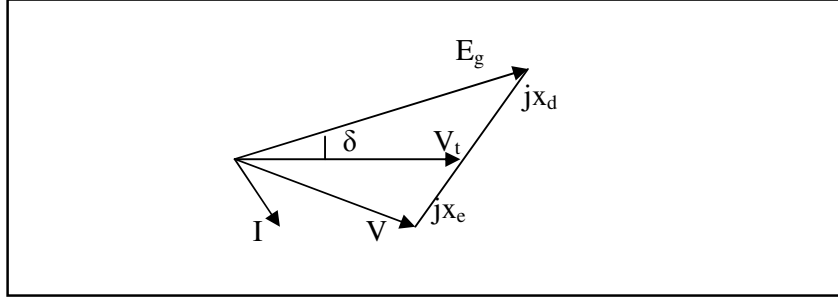
$$\frac{d}{dt} E'_d(t) = \frac{x'_d - x_q}{T'_{q0}} I_q - \frac{E'_d(t)}{T'_{q0}} \quad (3.1)$$

$$\frac{d}{dt} E'_q(t) = \frac{x'_d - x_q}{T'_{d0}} I_d - \frac{E_{fd}}{T'_{d0}} - \frac{E'_q(t)}{T'_{d0}} \quad (3.2)$$

Senkron generatörün mekanik alt sistemine ait durum denklemleri aşağıda verilmiştir [1, 6, 7].

$$\frac{d}{dt} \Delta\omega(t) = \frac{(P_m - P_e)}{M} - \frac{D}{M} \Delta\omega(t) \quad (3.3)$$

$$\frac{d}{dt} \delta = \omega_0 \Delta\omega(t) \quad (3.4)$$



**Şekil 3.2:** Sonsuz Güçlü Baraya Bağlı Generatör Fazör Diyagramı [1]

Türbin ve tahrik sistemi hız rölesi, servo motor, ara ısıtıcı ve ısıtıcıdan oluşmaktadır ve aşağıdaki denklemlerle ifade edilir [6].

$$\frac{d}{dt} P_r(t) = \frac{K_G}{T_{SR}} \Delta \omega(t) - \frac{P_r(t)}{T_{SR}} \quad (3.5)$$

$$\frac{d}{dt} P_h(t) = \frac{P_r(t) - P_h(t)}{T_{SM}} \quad (3.6)$$

$$\frac{d}{dt} P_c(t) = \frac{P_h(t) - P_c(t)}{T_{CH}} \quad (3.7)$$

$$\frac{d}{dt} P_{cl}(t) = \frac{d}{dt} P_c - \frac{P_{cl}}{K_{RH} T_{RH}} \quad (3.8)$$

Türbin ve tahrik sistemine ait denklemlerle oluşturulan transfer fonksiyonları aracılığıyla rotor hızında oluşan değişimden mekanik güç değişimi elde edilir. Bu değere başlangıç mekanik güç ( $P_{m0}$ ) eklenerek generatörün mekanik gücü elde edilir.

### 3.3.2 Uyarma Sistemi

Uyarma sistemi ikinci dereceden dinamik bir modelle ifade edilmiştir [6]. Referans uç gerilimi 1 pu olarak seçilmiştir. Uyarma gerilimi, referans uç gerilimi ile generatör uç gerilimi ve kararlayıcı devre üzerinden gelen uyarma sistemi çıkışının gerilimi geri beslemesi farkına göre ayarlanır.

Uyarma kazancı ve uyarma zaman sabiti ile kararlayıcı devre kazancı, kararlayıcı devre zaman sabitinden oluşan uyarma kontrol devresine ait denklemler aşağıda verilmiştir [1, 6, 7].

$$\frac{d}{dt} E_{fd}(t) = \frac{K_E}{T_E} (V_{ir} - V_t - V_s) - \frac{E_{fd}(t)}{T_E} \quad (3.9)$$

$$\frac{d}{dt} V_s(t) = \frac{K_F}{T_{FE}} \frac{d}{dt} E_{fd}(t) - \frac{V_s(t)}{T_{FE}} \quad (3.10)$$

Sonsuz güçlü bara ve iletim şebekesi denklemleri ile senkron generatörün denklemlerinin birleştirilmesiyle d-q eksenini üzerindeki uç gerilimi denklemleri oluşturulmuştur. Geçici gerilimler ve akımlar kullanılarak uç gerilimleri ve güç hesaplanır [6].

$$V_{td} = E'_d - R_a I_d - x'_d I_q = -V_0 \sin \delta + R_e I_d + x_e I_q \quad (3.11)$$

$$V_{tq} = E'_q - R_a I_q - x'_d I_d = V_0 \cos \delta + R_e I_q - x_e I_d \quad (3.12)$$

$$P_e = E'_d I_d + E'_q I_q \quad (3.13)$$

### 3.3.3 Sürekli Hal Çalışma Durumu

Generatör akımı başlangıç değeri, yük açısı, rotor açısı, elektromotor kuvveti, uç gerilimi, aktif güç, uyarma gerilimi ve referans uç gerilimi aşağıdaki denklemlerle hesaplanabilir [1, 6, 7].

$$I_0 = \frac{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2}}{V_0} \quad (3.14)$$

$$\varphi_0 = \arctan \frac{P_0}{Q_0} \quad (3.15)$$

$$\delta_0 = \arctan \frac{I_0 (x_q + x_e) \cos \varphi_0 - I_0 (R_a + R_e) \sin \varphi_0}{V_0 + I_0 (R_a + R_e) \cos \varphi_0 + I_0 (x_q + x_e) \sin \varphi_0} \quad (3.16)$$

$$I_{d0} = -I_0 \sin(\delta_0 + \varphi_0) \quad (3.17)$$

$$I_{q0} = I_0 \cos(\delta_0 + \varphi_0) \quad (3.18)$$

$$E_{fd0} = V_0 \cos \delta_0 + (R_a + R_e) I_{q0} - (x_d + x_e) I_{d0} \quad (3.19)$$



$$V_{t0} = \sqrt{(V_0 + R_e I_0 \cos \varphi_0 + x_e I_0 \sin \varphi_0)^2 + (x_e I_0 \cos \varphi_0 - R_e I_0 \sin \varphi_0)^2} \quad (3.20)$$

$$E'_{d0} = -(x_q + x'_d) I_{q0} \quad (3.21)$$

$$E'_{q0} = E_{fd0} + (x_d - x'_d) I_{d0} \quad (3.22)$$

$$P_{e0} = E'_{d0} I_{d0} + E'_{q0} I_{q0} \quad (3.23)$$

$$P_{m0} = P_{e0} \quad (3.24)$$

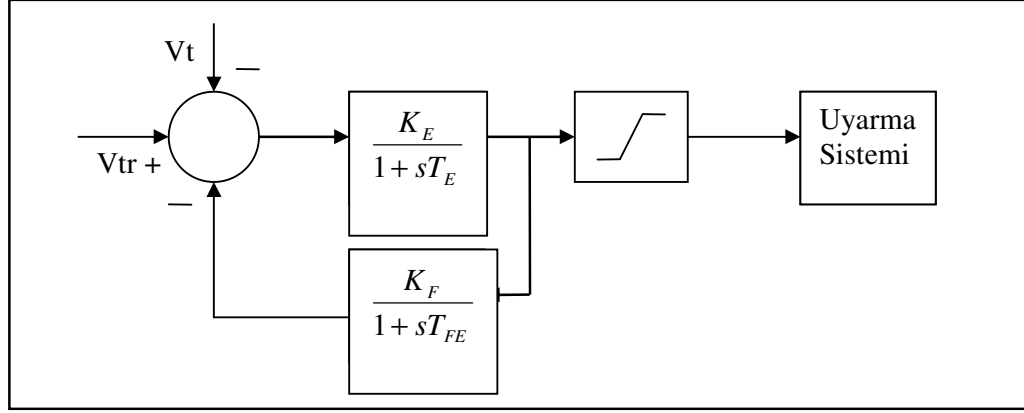
$$V_{tr} = \frac{E_{fd0}}{K_E} + V_{t0} \quad (3.25)$$

Yukarıdaki denklemlerle hesaplanan sürekli hal değerleri generetör modelinde uyarma sistemine, elektriksel ve mekanik kısımlara giriş olarak verilmektedir.

### 3.3.4 Otomatik Gerilim Regülatörü

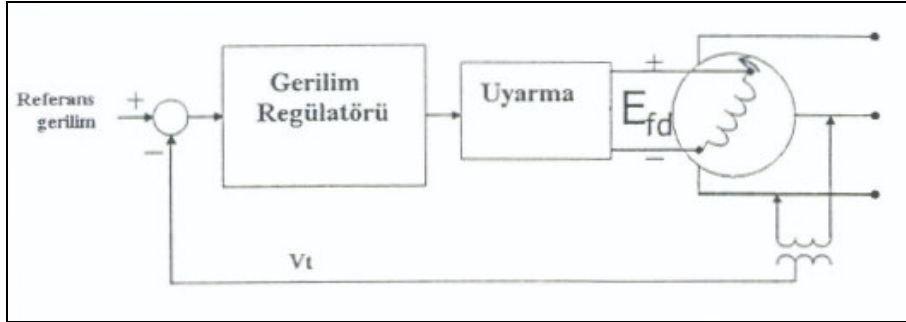
Bozucu bir etki sonrasında sistem geriliminde oluşan değişimi düzeltmek amacıyla uyarma sistemi otomatik gerilim regülatörü tarafından kumanda edilir. Otomatik gerilim regülatörü (OGR) ile uyarma sistemi kontrol edilerek generatör uç gerilimi istenilen seviyede tutulur. Böylece reaktif güç ve güç faktörü de kontrol altında tutulmuş olur [8].

Otomatik gerilim regülatörü girişleri referans uç gerilimi, generatör uç gerilimi ve uyarma devresi geri beslemesidir. Çıkış işareti uyarma sistemine sistem kapasitesi sınırlarını belirleyen bir işaret sınırlandırıcı üzerinden verilir [9]. Şekil 3.2'de otomatik gerilim regülatörü modeli gösterilmektedir.



**Şekil 3.3:** Otomatik Gerilim Regülatörü Modeli [1, 6, 7, 9]

Tez çalışmasında kullanılan bu model IEEE model 2 örnek alınarak oluşturulmuştur. Otomatik gerilim regülatörü üzerinden uyarma sistemine giriş olarak belirli bir seviyeye getirilmiş ve regülatör kapasitesi dahilinde sınırlandırılmış bir gerilim işareti verilir. Böylece arıza halinde, regülatörsüz senkron makinaya göre maksimum değeri daha düşük bir uyarma gerilimi endüklenir. Generatör uç geriliminin sisteme zarar verebilecek aşırı gerilim değerlerine yükselmesi ve salınımların engellenmesi sağlanır [10]. Şekil 3.3 'te otomatik gerilim regülatörünün uyarma sistemine bağlantısı gösterilmiştir.



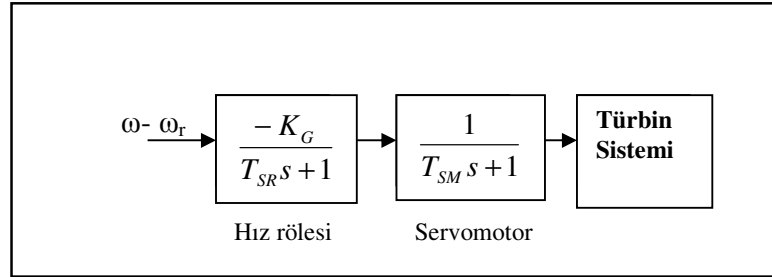
**Şekil 3.4:** Otomatik Gerilim Regülatörü – Uyarma Sistemi Bağlantı Şeması [11]

### 3.3.5 Devir Sayısı Regülatörü

Devir sayısı regülatörünün (DSR) görevi yük değişimlerinde üretilen gücü ve hızı ayarlamaktır. Sistemdeki yükün değişmesi durumunda, generatöre giriş olarak verilen mekanik güç, devir sayısı regülatörü tarafından ayarlanır. Devir sayısı regülatörü tarafından kontrol edilen mekanik elemanların zaman sabitlerinin,

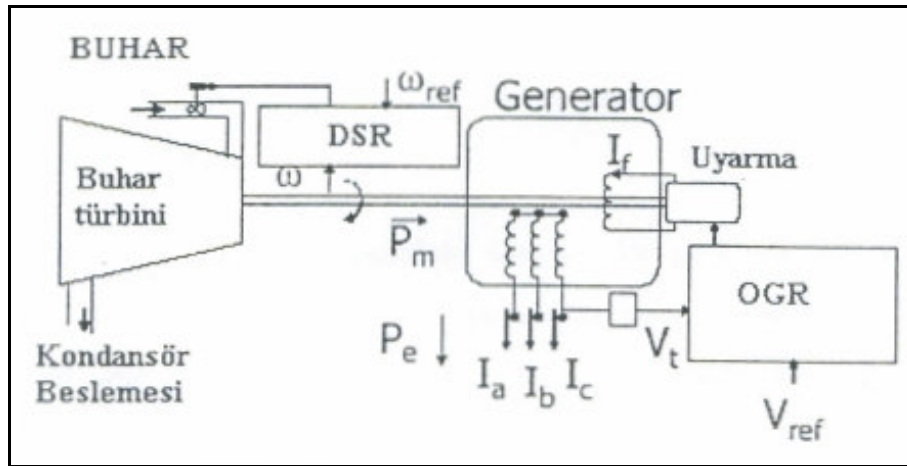
elektriksel elemanların zaman sabitine göre çok büyük olmasından dolayı devir sayısı regülatörü, gerilim regülatörüne göre daha uzun zamanda etki eder [4, 5].

Bilgisayar benzetiminde kullanılan devir sayısı regülatörü modeli servomotor, hız rölesi , ara ısıtıcı ve ısıtıcıdan oluşmaktadır. Bu model şekil 3.4'te gösterilmiştir.



**Şekil 3.5:** Devir Sayısı Regülatörü Modeli [6]

Senkron generatör modeline otomatik gerilim regülatörü ve devir sayısı regülatörü eklenmesiyle sistemin gerilimi ve hızı kontrol edilmiş olur. Otomatik gerilim regülatörü ve devir sayısı regülatörünün generatörle bağlantıları şekil 3.5'te gösterilmiştir.



**Şekil 3.6:** Generatör, OGR ve DSR Bağlantı Şeması [11]

Bu bölümde üzerine tez çalışmasında modellenen GGSK ve BGSK modeli eklenecek olan senkron generatör ve güç sistemine ilişkin matematiksel modeller verilmiştir. Ayrıca senkron generatörün uç gerilimini kontrol eden otomatik gerilim regülatörü ve rotor hızını kontrol eden devir sayısı regülatörü genel olarak anlatılmıştır. Bu modele eklenecek güç sistemi kararlı kılıcı modelleri bölüm 5'te detaylı olarak anlatılacaktır.

## **4. BULANIK MANTIK TEORİSİ**

### **4.1 Giriş**

Bulanıklık, bir düşüncenin anlamında bulunabilen belirsizliktir. Bulanık mantık teorisi ilk olarak Prof. L. A. Zadeh tarafından 1965 yılında matematiksel bir düşünce olarak geliştirilmiştir. Bulanık mantık teorisi günlük konuşmalarda geçen dilsel değişkenlerin sistem modellenmesinde kullanılmasına dayalı bir kavramdır. Bu bölümde bulanık mantığın temeli, ilgili kavramlar ve bulanık mantık tabanlı kontrolörler açıklanacaktır.

### **4.2 Bulanık Mantık Teorisi**

Klasik Aristo mantığında olaylar doğru yada yanlış, gerçekleşme veya gerçekleşmeme, durumlarına göre 1 veya 0 olarak ifade edilirler. Oysaki günlük yaşamda olaylar bu kadar net olmayabilir. Bulanık mantıkta kümeler bulanık kümeler olarak ifade edilirler ve Aristo mantığından farklı olarak elemanlar  $\{0,1\}$  arasında değişen üyelik derecelerine sahiptirler. Böylece bir eleman aynı anda farklı üyelik dereceleri ile iki farklı bulanık kümeye ait olabilir. Bulanık kümeler konuşma dilinde kullanılan “sıcak”, “ılık”, “hızlı”, “yüksek”, “orta”, “büyük” gibi dilsel değişkenlerle ifade edilebilirler [3, 12, 13, 14].

### **4.3 Bulanık Mantıkla Modelleme İlkeleri**

Günlük konuşmalarda kullanılan ve belirsizlik ifade eden sözcüklerin dilsel değişken olarak sistem modellenmesinde kullanılması bulanık mantığın temelini oluşturur. Geleneksel sistemlerde veriler, önceden belirlenen sabit referans noktalarına göre işlenirler. Ancak gerçek hayatta referans olarak alınan değerler göreceli olabilir. Örnek olarak hava sıcaklığını bir kişi sıcak olarak değerlendirirken başka bir kişi ılık yada serin olarak değerlendirebilir veya kış mevsiminde sıcak olarak değerlendirilen bir sıcaklık değeri yaz mevsiminde serin olarak değerlendirilebilir. Geleneksel

mantıkta kesin ayrımların kullanılmasından dolayı böyle bir sistem bulanık mantık kullanılarak modellenebilir [15].

Bulanık mantık olayların karmaşık olması ve yeterli bilgi olmaması sonucunda uzmanların deneyim ve görüşlerine dayanarak işlem yapılması durumunda bile her türlü sistemin modellenmesinde kullanılabilir [15]. Tüm sistemler sistemi kontrol eden operatörün deneyimlerine dayanarak bulanık mantık teorisi ile modellenebilir. Örnek olarak bir trenin hızına kumanda eden operatörün gaz kolunu ne kadar iteceği bilgisi dilsel değişkenlerle ifade edilip bulanık mantıkla kontrolü sağlayan kurallar oluşturulur ve bu şekilde sistem modellenebilir [15, 16]. Bulanık mantıkla kontrol ile sisteme kumanda insan elinin hassasiyeti, kontrolör devresine kazandırılabilir.

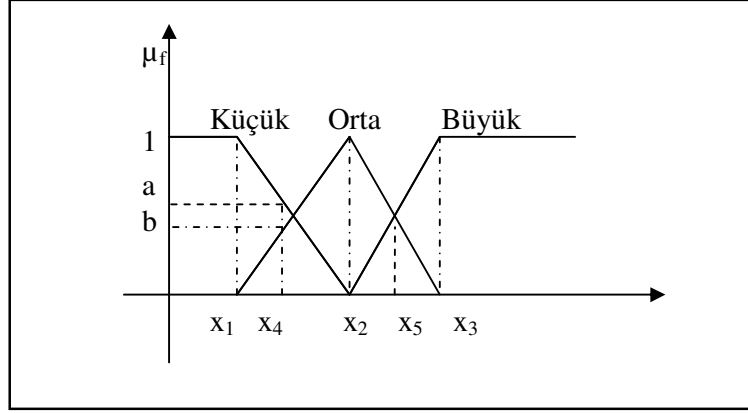
#### 4.4 Bulanık Küme Tanımı ve Üyelik Dereceleri

Klasik Aristo mantığında bir elemanın bir kümeye ait olması ve olmaması gibi kesin ayrımlar vardır. Bir eleman bir kümeye ait ise 1, değil ise 0 olarak ifade edilir. Bulanık mantıkta elemanlar  $\{0,1\}$  aralığında bir değer alan üyelik fonksiyonu  $\mu_f$  ile ifade edilirler [3, 12, 13, 14, 15]. Bulanık kümelerde bir eleman bir kümeye “a” üyelik derecesi ile ait iken aynı anda başka bir kümeye “b” üyelik derecesi ile ait olabilir [3, 12, 13, 14, 15]. Herhangi bir U evrensel kümesi altında F bulanık kümesi, eleman ve elemanın üyelik fonksiyonu derecesi çiftinden oluşur [3, 12, 13, 14, 15]. F kümesi aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$F = \{(u, \mu_f(u)) \mid u \in U\} \quad (4.1a)$$

$$F = \int_U \mu_f(u) / u \quad (4.1b)$$

Üyelik fonksiyonu küme elemanlarının üyelik derecelerini gösteren eğridir. Üçgen, sinüsoid, trapezoid, gaussian gibi çeşitli şekiller kullanılarak en yüksek üyelik derecesi 1 olabilen bulanık kümeler oluşturulur. Bulanık kümelerde üyelik fonksiyonları belirsizlik değişkenlerinin ifade edilebilmesi için iç içe geçmiş haldedirler [3, 12, 13, 14, 15]. Şekil 4.1’de üyelik fonksiyonları gösterilmiştir.



**Şekil 4.1:** Üyelik Fonksiyonları [3, 12]

Üyelik fonksiyonları ile “Küçük”, “Orta”, “Büyük”, aralıklarındaki tüm “x” değerlerine üyelik derecesi  $\mu_f(x)$  atanmış olur. Örneğin  $x_4$  elemanı “Küçük” kümesine b, “Orta” kümesine a derecesi ile bağlıdır. Üyelik dereceleri ve elemanlar denklem (4.2)’de olduğu gibi gösterilebilir [3, 12].

$$K = \left\{ \frac{1.0}{x_1} + \frac{b}{x_4} \right\} \quad (0 < a, b < 1) \quad (4.2)$$

x, A kümesinin elemanı olmak üzere bir bulanık küme aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$A = \mu_A(x_1)/x_1 + \mu_A(x_2)/x_2 + \dots + \mu_A(x_n)/x_n \quad (4.3a)$$

$$A = \left\{ \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \dots + \frac{\mu_A(x_n)}{x_n} \right\} = \sum_{i=1}^n \mu_A(x_i)/x_i \quad (4.3b)$$

$$A = \int_x \mu_A(x_i)/x_i \quad (4.3c)$$

#### 4.5 Bulanık Küme İşlemleri

A ve B, U evrensel kümesi altında, üyelik dereceleri sırasıyla  $\mu_A$  ve  $\mu_B$  ile gösterilen iki bulanık küme ise, bulanık kümeler için birleşme, kesişme ve bütünleme işlemleri üyelik fonksiyonları ile aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

Birleşim:  $A \cup B$  bileşke kümesinin üyelik fonksiyonu  $U$  evrensel kümesi altındaki elemanlar için maksimum değeri ile tanımlanabilir [3, 12].

$$\mu_{A \cup B}(u) = \max\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (4.4)$$

Kesişim:  $A \cap B$  kesişim kümesinin üyelik fonksiyonu  $U$  evrensel kümesi altındaki elemanlar için minimum değeri ile tanımlanabilir [3, 12].

$$\mu_{A \cap B}(u) = \min\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (4.5)$$

Bütünleme:  $A$  bulanık kümesinin bütünleyeni  $U$  evrensel kümesi altındaki elemanlar için kümenin üyelik derecesini maksimum değer olan 1'e tamamlayan değer olarak tanımlanabilir [3, 12].

$$\mu_{\bar{A}}(u) = 1 - \mu_A(u) \quad (4.6)$$

Kartezyen Çarpım:  $U_1, \dots, U_n$  evrensel kümeleri altında  $A_1, \dots, A_n$  bulanık kümelerinin olduğu varsayılarak  $A_1, \dots, A_n$  kümelerinin kartezyen çarpımı  $U_1 \times \dots \times U_n$  çarpım uzayı altındadır ve üyelik fonksiyonu aşağıdaki gibidir [3, 12].

$$\mu_{A_1 \times \dots \times A_n}(u_1, u_2, \dots, u_n) = \min\{\mu_{A_1}(u_1), \dots, \mu_{A_n}(u_n)\} \quad (4.7)$$

#### 4.6 Bulanık Kümeler ve Dilsel Değişkenler

Sürekli bir  $U$  uzayındaki bir bulanık küme dilsel değişkenleri kapsar. Dilsel değişken olarak bulanık bir sayı yada dilsel terimlerle tanımlanan değer ifade edilir.

$x$  bir dilsel değişken ismi,  $M(x)$   $x$ 'e ait  $U$  uzayı içindeki bulanık sayı olan dilsel değerler dizisini gösteren terim ve  $U$  evrensel küme olmak üzere bir dilsel değişken  $(x, M(x), U)$  ile karakterize edilebilir [3, 12]. Dilsel değer olarak alınırsa, sıcaklığın dilsel değerler dizisini gösteren terim  $M(\text{Sıcaklık}) = \{\text{Soğuk}, \text{Ilık}, \text{Sıcak}\}$  olarak gösterilebilir.  $M(\text{Sıcaklık})$  içindeki her terim  $U$  uzayında bir bulanık kümedir.

#### 4.7 Bulanıklaştırma İşlemi

Bulanıklaştırıcı, klasik mantık yapısındaki kümeye ait verileri bulanık hale getirmektedir.  $x_0$  sayısal giriş ve  $x$  bulanık çıkış olmak üzere bulanıklaştırıcı sembolik olarak aşağıdaki denklemle ifade edilebilir [14].

$$x = \text{bulanıklaştırıcı}(x_0) \quad (4.8)$$

#### 4.8 Durulaştırma İşlemi

Bulanık sistemden elde edilen çıkış bulanık bir sayıdır. Kontrol işleminin yapılabilmesi için, kontrol işaretinin bulanık olmayan, sayısal bir işaret olması gerekir. Bu durum için elde edilen bulanık kontrol işareti durulaştırma yöntemi kullanılarak geleneksel işaret şekline dönüştürülür [14].  $z$  bulanık çıkışı ve  $z_0$  da gerçek sayı olan kontrol çıkışı olmak üzere durulaştırıcı sembolik olarak aşağıdaki denklemle ifade edilebilir.

$$z_0 = \text{durulaştırıcı}(z) \quad (4.9)$$

#### 4.9 Bulanık Kontrol Kuralları

Bulanık kontrol kuralları, bulanık bir sistemin uzman deneyim ve görüşlerine dayanılarak dilsel değişkenler yardımıyla modellenmesini sağlar. Bulanık kontrol kuralları ile sistemin tüm bulanık davranışı belirlenir. Bu kurallar belirli koşulların oluşması durumunda belirli sonuçların meydana geleceği esasına dayanır. Kural yapısı “EĞER (oluşabilecek koşullar) İSE O ZAMAN (oluşabilecek sonuçlar)” şeklindedir [3, 12, 16].

Bulanık kontrol kuralları ile uygulamada meydana gelen koşullara karşılık sisteme verilecek kontrol işareti belirlenir. Kuralların “EĞER” kısmı uygulamada meydana gelen koşulları belirlenmesini, “ O ZAMAN ” bölümü ise uygulanacak kontrol işaretinin belirlenmesini sağlar. Temel olarak bulanık kontrol kuralları, üzerinde çalışılan istem bilgisini ve uygulanacak kontrol işaretini içerirler. Bulanık kontrol kuralları ile tek giriş – tek çıkış (SISO), çoklu giriş – çoklu çıkış (MIMO), çoklu giriş tekli çıkış (MISO) yapısındaki sistemler modellenebilir.



Çoklu girişe sahip sistemlerin modellenmesi durumunda giriş koşulları arasında “VE, VEYA” cümle birleştirme operatörleri konulur. “VE” iki küme arasında kesişimi, “VEYA” iki küme arasında birleşimi ifade eder. Giriş işaretleri  $x_1$ ,  $x_2$  ve çıkış işareti  $y$  olmak üzere MISO sisteme ait bulanık kontrol kural yapısı aşağıdaki gibi olur [3, 12, 17]:

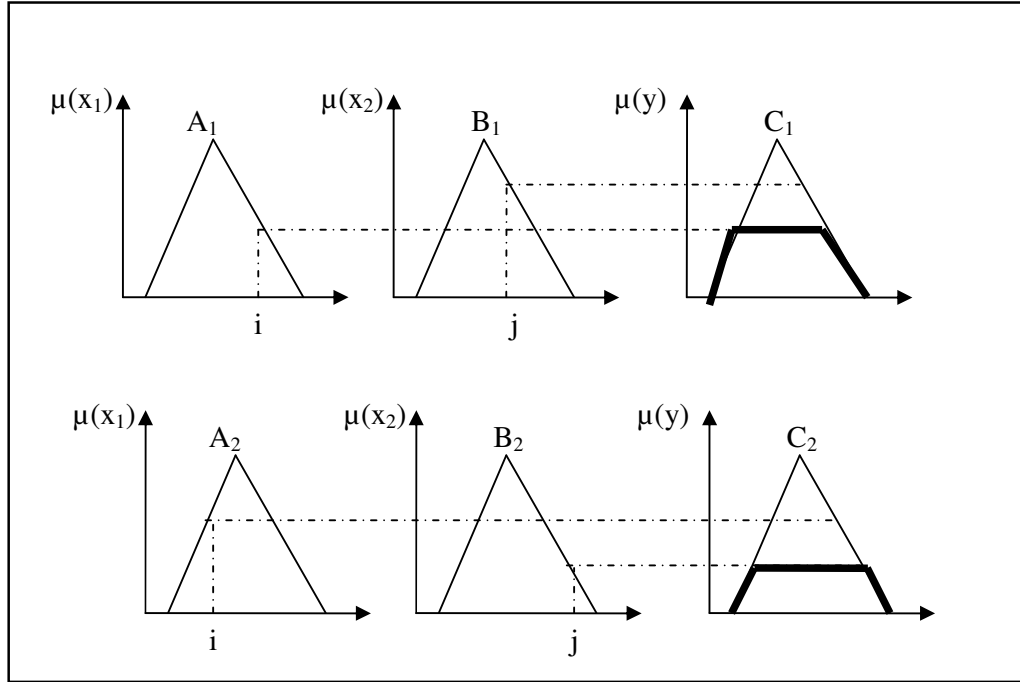
Kural<sub>1</sub>: Eğer  $x_1$   $A_1$  ve  $x_2$   $B_1$  ise o zaman  $y$   $C_1$ ,

Kural<sub>2</sub>: Eğer  $x_1$   $A_2$  ve  $x_2$   $B_2$  ise o zaman  $y$   $C_2$ ,

.....

Kural<sub>n</sub>: Eğer  $x_1$   $A_u$  ve  $x_2$   $B_v$  ise o zaman  $y$   $C_w$ ,

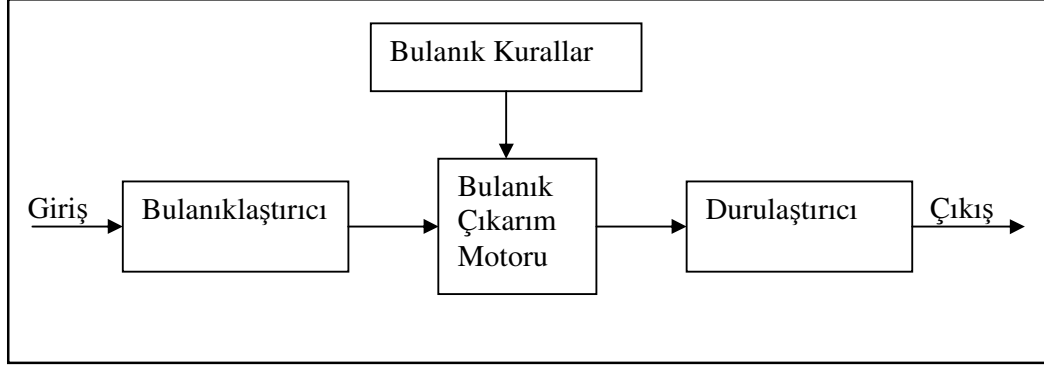
A, B, C terimleri kurallar içerisindeki dilsel değişkenlerin değerlerini ifade etmektedir. Bulanık kurallar şekil 4.2’de üyelik fonksiyonları ile gösterilmektedir [13].



**Şekil 4.2:** Bulanık Kontrol Kurallarının Üyelik Fonksiyonları ile Gösterimi

#### 4.10 Bulanık Mantık Kontrolörü

Bulanık mantık kontrolörü (FLC) bulanıklaştırıcı, bilgi kural tabanı, bulanık çıkarım motoru ve durulaştırıcı olmak üzere dört ana bileşenden oluşur. Temel FLC modeli şekil 4.3'te görülmektedir.



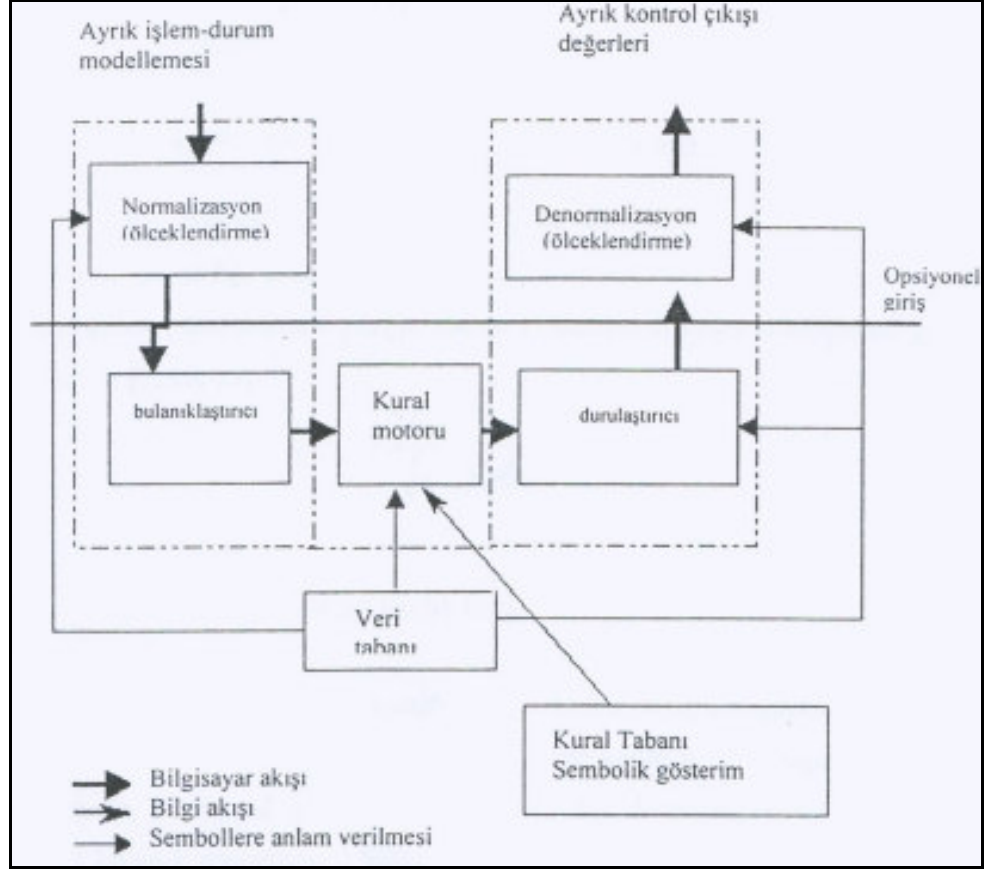
**Şekil 4.3:** Temel Bulanık Kontrolör Yapısı [18]

**Bulanıklaştırıcı:** Giriş değişkenlerinin ölçümü, normalizasyonu yapar ve üyelik fonksiyonları aracılığıyla bulanık değişkenler için üyelik derecelerini üretir [14, 15].

**Bulanık kurallar:** Sisteme ait bilgiler ve dilsel kontrol kural tabanını içerir. İstenilen kontrol işlemlerinin karşılaştırılmasını sağlar [14, 15].

**Bulanık çıkarım motoru:** Bulanık kural tabanını kullanarak bulanık giriş işaretlerine karşılık düşen bulanık çıkış işaretlerinin üretilmesini sağlar.

**Durulaştırıcı:** Üretilen bulanık çıkışın sisteme uygulanabilecek şekilde gerçek işarete dönüştürülmesi ve ölçeklendirilmesini sağlar [14, 15].



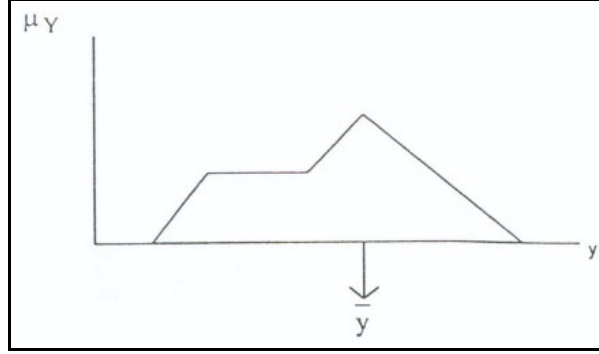
**Şekil 4.4:** Bulanık Mantık Kontrolörü Temel Konfigürasyonu [13]

#### 4.11 Durulaştırma Yöntemleri

Bulanık mantık kontrolöründen sisteme uygulanan kontrol işareti sayısal değer olmalıdır. Bulanık kontrol çıkışının durulaştırılmasında en çok kullanılan üç yöntem en büyük üyelik, ortalama en büyük üyelik ve ağırlık merkezi yöntemleridir.

En büyük üyelik: Bu yöntemde bulanık kontrol işaretinin üyelik fonksiyonundaki maksimum değeri göz önüne alınır. Kullanılması için çıkışta elde edilen bulanık kümelerin tepe değerlerinin olması gereklidir.

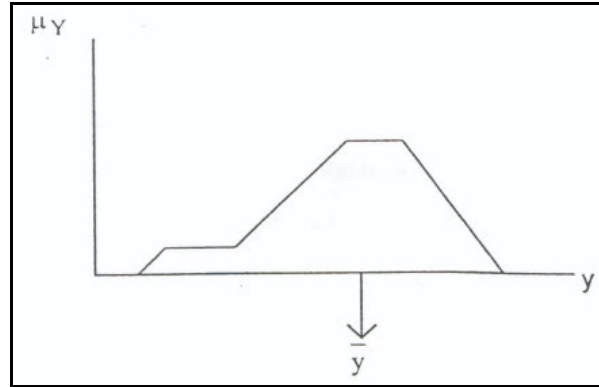
Örnek bir kontrol çıkışının maksimum değeri şekil 4.5'te gösterilmiştir [3, 12].



**Şekil 4.5:** En Büyük Üyelik Yöntemi

Ortalama en büyük üyelik: Bu yöntemde kontrol işareti tüm kural çıkışlarının ortalama değerine göre üretilir. Bu kontrol hareketinin üyelik fonksiyonu maksimum değere ulaşır. Bu yöntem denklem 3.10'daki gibi ifade edilebilir. Burada  $y_j$  üyelik fonksiyonunun maksimum değerleri,  $n$  değer sayısını temsil etmektedir [3, 12].

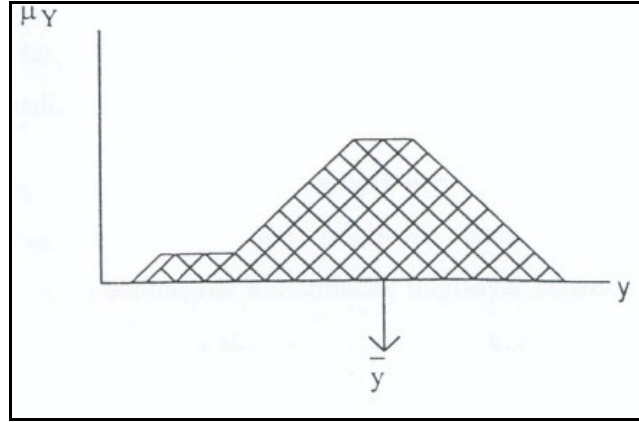
$$\bar{y} = \frac{\sum_{j=1}^n y_j}{n} \quad (4.10)$$



**Şekil 4.6:** Ortalama En Büyük Üyelik Yöntemi

Ağırlık merkezi: Bu yöntem üyelik fonksiyonu eğrisinin sınırladığı alanın ağırlık merkezinin bulunmasına dayanır. Yaygın olarak kullanılmaktadır. Ağırlık merkezi yöntemi denklem 3.11'deki gibi ifade edilebilir [3,12].

$$\bar{y} = \frac{\int \mu_Y(y) \cdot y dy}{\int \mu_Y(y) dy} \quad (4.11)$$



**Şekil 4.7:** Ağırlık Merkezi Yöntemi

Yukarıda anlatılan üç yöntemden uygulamada en çok tercih edileni ağırlık merkezi yöntemi olup tez çalışmasında yapılan bilgisayar benzetiminde durulaştırma yöntemi olarak tercih edilmiştir.

Bu bölümde bulanık mantık teorisi, ilgili kavramlar ve bulanık mantık tabanlı kontrolörün temel yapısı incelenmiştir. Bundan sonraki bölümde geleneksel ve bulanık mantık tabanlı güç sistemi kararlı kılıcıları anlatılacaktır.

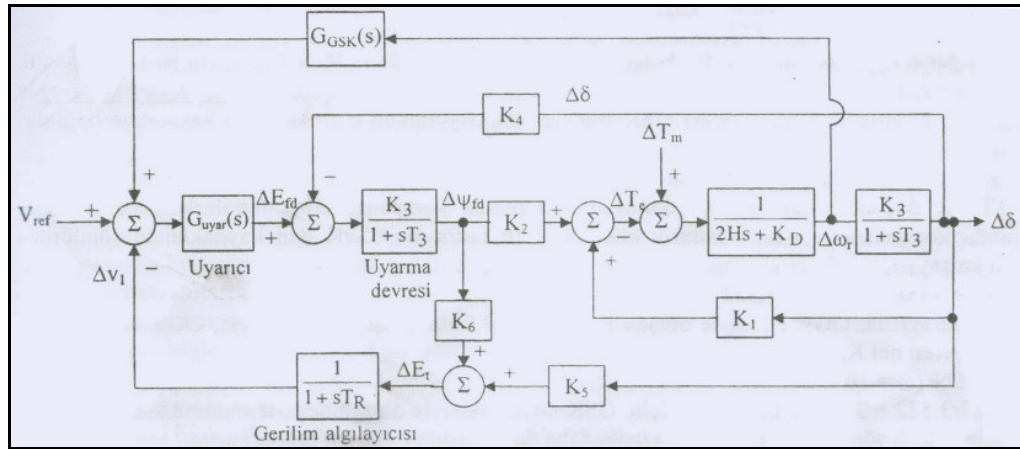
## 5. GÜÇ SİSTEMİ KARARLI KILICISI

### 5.1 Giriş

Bu bölümde senkron generatörün kararlılığını sağlamak için kullanılan güç sistemi kararlı kılıcısı anlatılacaktır. Önce geleneksel yapıdaki güç sistemi kararlı kılıcısına ait çalışma prensibi, transfer fonksiyonları ve tezdeki bilgisayar benzetiminde kullanılan geleneksel güç sistemi kararlı kılıcı modeli verilecektir. Daha sonra bulanık mantık tabanlı güç sistemi kararlı kılıcısı çalışma prensibi, modellenmesi ve bilgisayar benzetimi için oluşturulan model anlatılacaktır.

### 5.2 Geleneksel Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı

Güç sistemi kararlı kılıcısı generatörün uyarmasını yardımcı işaretler kullanarak kontrol eden ve bu şekilde generatörde oluşan elektromekanik salınımların söndürülmesine yardımcı olan bir elemandır [5, 19]. Güç sistemi kararlı kılıcılar birkaç on yıldır bir çok senkron generatörde kararlılık limitlerini iyileştirecek şekilde kullanılmaktadır [19]. Salınımların söndürülmesi için GSK rotor hız sapması ile aynı fazda olan bir elektriksel moment bileşeni üretmelidir [5]. Şekil 5.1’de GSK içeren uyarma ve OGR blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 5.1: OGR ve GSK İçeren Uyarma Blok Diyagramı [5]

Güç sisteminde normal çalışma koşullarında an bir değişim meydana gelmesiyle, generatör rotor hızı ve elektriksel gücü salınım yaparlar. Bu değişkenler arasındaki ilişki salınım denklemleriyle ifade edilebilir [19].

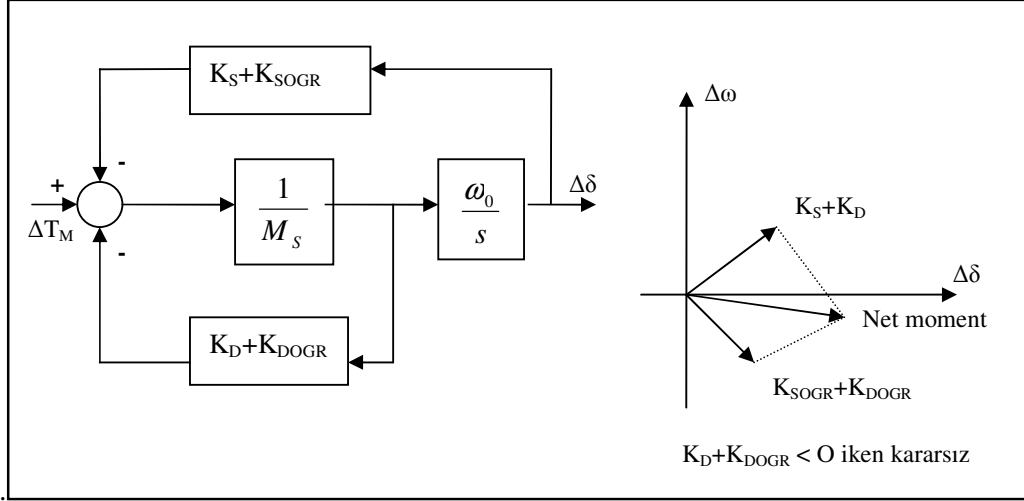
$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = T_M - T_{EM} \quad (5.1)$$

Bu denklemde  $\omega$  rotor açısal hızı,  $\delta$  rotor açısı,  $T_m$  mekanik moment,  $T_e$  elektriksel moment,  $H$  eylemsizlik sabitini ifade etmektedir. Salınım denklemi göstermektedir ki, mekanik ve elektriksel güçler arasındaki dengenin bozulması sonucunda rotor, üzerine etkiyen ve makinanın eylemsizlik sabitiyle orantılı net moment ile hızlanmaya veya yavaşlamaya başlar [19]. Salınım denkleminin çalışma noktası civarında küçük değişimler cinsinden yazılması ile denklem 5.2. elde edilir [5, 19].

$$\Delta T_{EM} = K_S \Delta \delta + K_D \Delta \omega \quad (5.2)$$

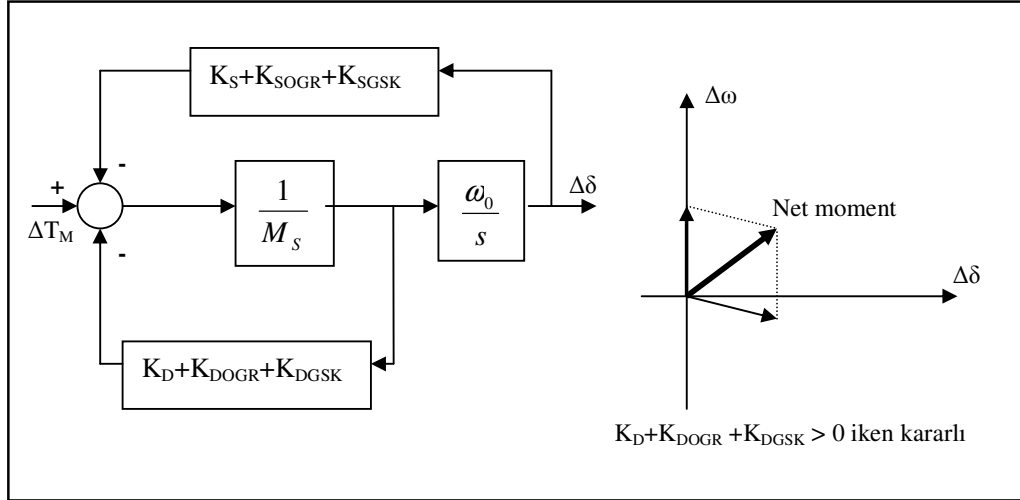
$K_S$  senkronlama katsayısı,  $K_D$  sönüm katsayısını ifade etmektedir. Bu denklemden görülebileceği gibi senkron makinanın elektriksel momentindeki değişim, senkronizasyon ve sönüm olmak üzere iki elemana ayrılabilir [5]. Senkronizasyon momenti rotor açısının değişimini, sönüm momenti de rotor açısal hızındaki değişim sonucu oluşmaktadır. Yeterli pozitif senkronizasyon ve sönüm momenti olması durumunda senkron makina bütün çalışma koşullarında kararlı kalır [5, 19].

Normal çalışma koşullarında yeterli olan sönüm katsayısı herhangi bir arıza durumunda yetersiz kalabilir ve senkron makine kararsız çalışma durumuna geçebilir. Böyle durumlarda güç sistemi kararlı kılıcısının görevi, generatörün ürettiği pozitif sönüm momentine ilave sönüm momenti üreterek generatörün açısal kararlılık limitlerini iyileştirmek ve kararlılığı sağlamaktır. Şekil 5.2. de Otomatik gerilim regülatörünün senkronizasyon ve sönüm momentlerine etkisi gösterilmektedir [20]



**Şekil 5.2:** OGR'nün Senkronizasyon ve Sönüm Momentlerine Etkisi [20]

Şekil 5.3'te otomatik gerilim regülatörü ve güç sistemi kararlı kılıcısının birlikte senkronizasyon ve sönüm momentlerine etkisi gösterilmektedir [20]



**Şekil 5.3:** OGR ve GSK'nın Birlikte Senkronizasyon ve Sönüm Momentine Etkisi

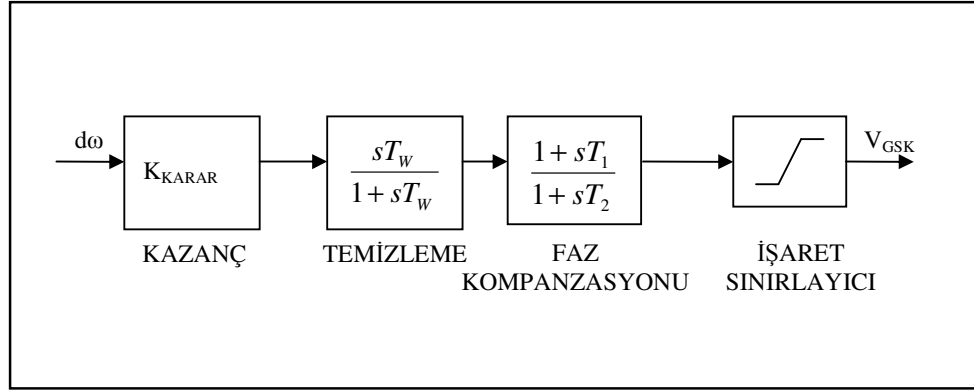
Sönümü sağlamak için GSK, rotor hız sapması ile aynı fazda olan bir elektriksel moment bileşeni üretmelidir. Bu kontrol iletim hattı kesintilerinde veya yüksek güç iletiminde yararlıdır [5, 19, 21].

Güç sistemi kararlı kılıcısı, güç sisteminin bir sürekli çalışma noktasındaki lineerleştirilmiş modeli kullanılarak tasarlanmıştır. Otomatik gerilim regülatörünün senkronizasyon momentini arttırmasından dolayı sönüm momentinin de arttırılması gerekliliği GSK tarafından sağlanır. Güç sisteminin çıkış olarak ürettiği gerilim



işareti otomatik gerilim regülatörüne giriş olarak verilir. Rotor hız sapması, frekans, ivmelendirme gücü, elektriksel güç gibi işaretler güç sistemi kararlı kılıcı için giriş işareti olarak seçilebilir. GSK'nın temel görevi rotor salınımlarını söndürmek olduğu için rotor hız sapması en çok tercih edilen giriş işaretidir. Hız değişiminin kullanıldığı kontrolörde genellikle türevsel ayarlama ve yüksek kazanç kullanılır [19, 20, 22].

Rotor hız sapmasını giriş olarak alan bir GSK modeli şekil 5.4.'te gösterilmiştir.



**Şekil 5.4:** Geleneksel GSK Modeli [4, 23]

Geleneksel güç sistemi kararlı kılıcısı kazanç, temizleme, faz kompanzasyonu ve işaret sınırlayıcı bloklarından oluşmaktadır. GSK kazancı ile üretilecek salınım miktarı belirlenir. Kazanç değeri seçilirken her türlü koşulda yeteri sönümü üretecek optimum bir değer belirlenmelidir [19, 23]. Kazanç için [1-20] arasında bir değer seçilebilir [5, 19, 20].

Temizleme bloğu: Yüksek frekanslı işaretlerin alçak frekanslı işaretlerden ayrılmasını sağlayan yüksek-geçiren bir filtre olarak görev yapar. Buradaki amaç sürekli haldeki değişimlerin uç gerilimini değiştirmesini engellemektir.  $T_w$  zaman sabitinin seçimi çok kritik olmamakla birlikte [1-20] s arasında seçilebilir. Esas amaç bu zaman sabitinin ilgilenilen frekanslarda kararlı kılıcı işaretler değişmeden geçecek kadar uzun olması, fakat sistem ayırma koşulları esnasında istenmeyen generatör gerilimi değişimlerine yol açacak kadar uzun olmamasıdır [5, 23].

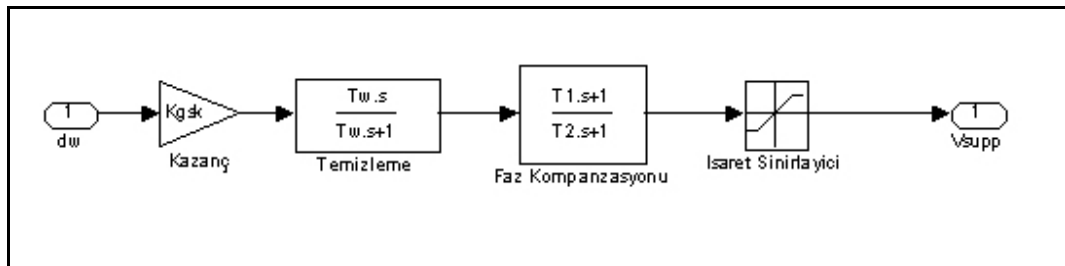
Faz kompanzasyonu bloğu: Uyarma çıkışı ile generatör hava aralığı momenti arasındaki faz gecikmesini kompanse etmek için uygun faz-ilerletici karakteristik sağlar [5, 23]. Uygulamada istenen kompanzasyonu sağlamak amacıyla birden fazla birinci dereceden blok kullanılabilir. Zaman sabitleri [0.02-2] s arasında seçilebilir

[19, 20, 23]. Kompanzasyon bloğu 0.1 ile 2.0 Hz arasındaki bölgede kompanzasyon sağlamalıdır. Genellikle güç sistemi kararlı kılıcısının büyük ölçüde artan sönüm momentine ilave olarak, senkronizasyon momentinde de hafif bir artış oluşturacak şekilde, bir miktar az kompanzasyon yapması istenebilir [5].

Geleneksel GSK çıkış işaretini üretebilmesi için önce manyetik sonda ve dişli düzenekleri ile shaft hızı ölçülür. Ölçülen hız işareti hızla orantılı doğru gerilime dönüştürülür. Yüksek geçiren filtre sürekli hal hız işaretini ayırır ve sadece hızdaki değişimi ifade eden işareti üretir. Böylece GSK'nın sadece hızda değişim meydana geldiğinde uç gerilimine etki etmesi sağlanır. Faz gecikmesi kompanze edilip kazanç ayarı ve işaret sınırlamaları yapıldıktan sonra çıkış işareti OGR girişine uygulanır [19].

Sistemden aldığı girişe göre güç sistemi kararlı kılıcıları kendi aralarında sınıflandırılabilirler. Hız değişimi ve ivmelendirme gücünü giriş olarak alan tek girişli GSK yapısına ilave olarak, hız değişimi ve ivmelendirme gücünü beraber alan çift girişli GSK yapıları da mevcuttur.

Bilgisayar benzetiminde rotor hız sapmasını giriş olarak alan tek girişli GSK modeli kullanılmış olup bu model şekil 5.5'te gösterilmiştir. Modelin, şebekenin  $P=0.8$ ,  $Q=0.6$  pu sürekli çalışma değerlerine göre belirlenen kazanç ve zaman sabitlerine ait katsayılar **EK-A**'da verilmiştir.

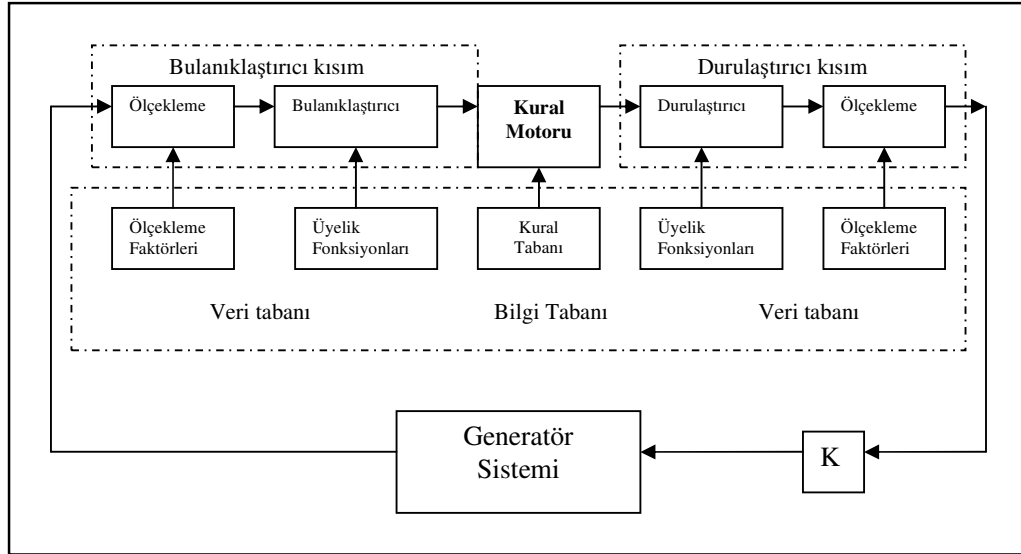


**Şekil 5.5:** Bilgisayar Benzetiminde Kullanılan GGSK MATLAB Modeli

### 5.3 Bulanık Mantık Tabanlı Güç Sistemi Kararlı Kılıcı

Geleneksel yapıdaki güç sistemi kararlı kılıcının kazanç ve zaman sabitleri şebekenin belli bir sürekli çalışma değerlerine göre optimum performans gösterecek şekilde belirlenir. GSK parametrelerinin sabit olmasından dolayı şebeke koşullarının değişmesi durumunda veya herhangi bir arıza sonucunda GSK iyi performans gösteremez. Bu durumu ortadan kaldırmak için bulanık mantık tabanlı güç sistemi kararlı kılıcı (BGSK) kullanılabilir [14].

Bulanık güç sistemi kararlı kılıcısında geleneksel yapıda kontrolü sağlayan transfer fonksiyonlarının yerini BGSK bloğu yerine getirmektedir. Oluşturulan BGSK modelinde giriş olarak güç değişimi ve rotor hız sapması alınmıştır. Sürekli çalışma durumunda sıfır olan rotor hız sapması ve güç değişiminin farklı olması durumunda uyarı sistemine pozitif gerilim işareti uygulanır ve rotor açısının salınımı söndürülür. Değişimlerin sıfır olduğu durumda geleneksel GSK'nda olduğu gibi BGSK da sisteme herhangi bir işaret vermez [24].



Şekil 5.6: BGSK İç Yapısı [14]

Şekil 5.6'da iç yapısı görülen BGSK'nın giriş işaretleri  $dP$  ve  $d\omega$  uygun ölçeklendirme faktörleriyle  $[-1, +1]$  aralığında ölçeklendirilmiştir. Giriş işaretleri bu aralıkta negatif büyük (NB), negatif küçük (NS), sıfır (ZE), pozitif küçük (PS), pozitif büyük (PB), olmak üzere beş dilsel değişkene ayrılmıştır. Dilsel değişken sayısının artırılması durumunda değişkenlerin karşılık geldiği değer aralığı

küçülmekte ve daha hassas kontrol yapılabilir. Ancak bu durumda kontrol kurallarının daha dikkatli seçilmesi gereklidir [24]. Bulanık kontrolör karar tablosunda güç ve hız değişimlerinin tanımlanan değişkenler için karşılaştırıldıklarında sisteme uygulanacak kontrol işaretleri belirlenmiştir [25].

**Tablo 5.1:** BGSK Karar Tablosu [25]

		dP				
		NB	NS	ZE	PS	PB
d $\omega$	NB	NB	NB	NS	NS	ZE
	NS	NB	NS	NS	ZE	PS
	ZE	NS	NS	ZE	PS	PS
	PS	NS	ZE	PS	PS	PB
	PB	ZE	PS	PS	PB	PB

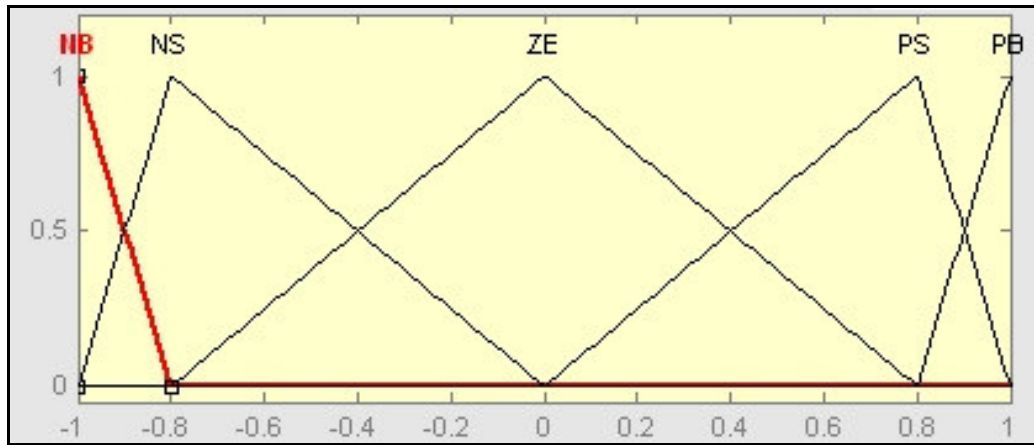
Karar tablosundan anlaşılacağı gibi hız değişimi ile mekanik güçteki değişim doğru orantılıdır ve BGSK'nın uyarma sistemine verdiği işaretle generatörün elektriksel gücü artırılıp azaltılır ve güç dengesi sağlanır. Karar tablosundan BGSK'nın bulanık mantık kurallarına ulaşılabilir.

Örnek olarak d $\omega$ 'nın NB ve dP'nin NB olması durumu “Eğer d $\omega$  NB ve dP NB ise o zaman U NB'dir.” bulanık kuralı ile ifade edilebilir. Bu kural mekanik güç ile elektriksel güç arasındaki farkın negatif yönde çok büyük olması ve rotor açılma hızının referans hız değerine göre çok küçük olması durumunda, bulanık kontrolörün çıkış olarak büyük bir negatif çıkış işareti uygulayacağını belirtir. Generatörün rotor hızı bunla orantılı olarak mekanik gücünde düşük olmasından dolayı BGSK uyarma sistemine negatif gerilim işareti uygulayarak uyarma gerilimini düşürür. Böylece generatörde endüklenen gerilim düşürülüp elektriksel güç azaltılmış olur.

Başka bir kural olarak “ Eğer  $d\omega$  PS ve  $dP$  PS ise o zaman U PS’dir.” incelenirse, rotorun açısal hızının referans hız değerine göre pozitif yönde biraz fazla olması, ve mekanik gücün elektriksel güçten biraz büyük olması durumuna karşılık düştüğü görülür. Bu durumda çıkış olarak uyarma sistemine pozitif küçük bir gerilim işareti verilerek uç gerilimi dolayısıyla elektriksel güç arttırılarak güç dengesi sağlanır.

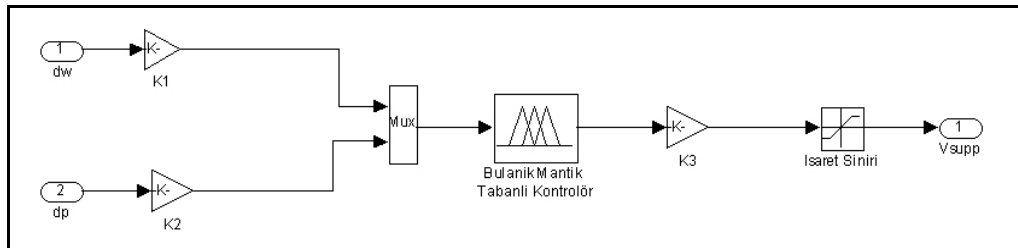
BGSK’nın sürekli halde uyarma sistemine işaret göndermemesi “ Eğer  $d\omega$  ZE ve  $dP$  ZE ise o zaman U ZE’dir.” kuralı ile sağlanır. Bu kural rotor hız sapmasının ve mekanik ve elektriksel güçler arasındaki farkın sıfır olması durumunda, çıkış işaretinin sıfır olması durumunu ifade eder.

Bulanık kontrolörün giriş işareti “ $d\omega$ ” için kullanılan üyelik fonksiyonları şekil 5.7’de gösterilmiştir. “ $dP$ ” girişi ve çıkış işareti için kullanılan üyelik fonksiyonları **EK-B**’de verilmiştir.



**Şekil 5.7:** “ $d\omega$ ” Giriş İşareti İçin Kullanılan Üyelik Fonksiyonları

Bilgisayar benzetiminde kullanılan BGSK yapısı şekil 5.8’de gösterilmektedir.



**Şekil 5.8:** Bilgisayar Benzetiminde Kullanılan BGSK MATLAB Modeli

Giriş işaretleri  $K_1$  ve  $K_2$  ölçeklendirme faktörleri kullanılarak  $[-1, +1]$  aralığına oturtulmuştur. Çıkış işareti de  $K_3$  ölçeklendirme faktörüyle aynı aralığa oturtulmuştur. BGSK'da kullanılan 25 adet kural Tablo 6.2. de verilmiştir [25]. BGSK 'ya ait detaylı şemalar **EK-B**'de verilmiştir.

**Tablo 5.2:** BGSK'da Kullanılan Bulanık Kural Tablosu

Eğer $d\omega$ NB ve $dP$ NB ise o zaman U NB'dir	Eğer $d\omega$ ZE ve $dP$ PS ise o zaman U PS'dir
Eğer $d\omega$ NB ve $dP$ NS ise o zaman U NB'dir	Eğer $d\omega$ ZE ve $dP$ PB ise o zaman U PS'dir
Eğer $d\omega$ NB ve $dP$ ZE ise o zaman U NS'dir	Eğer $d\omega$ PS ve $dP$ NB ise o zaman U NS'dir
Eğer $d\omega$ NB ve $dP$ PS ise o zaman U NS'dir	Eğer $d\omega$ PS ve $dP$ NS ise o zaman U ZE'dir
Eğer $d\omega$ NB ve $dP$ PB ise o zaman U ZE'dir	Eğer $d\omega$ PS ve $dP$ ZE ise o zaman U PS'dir
Eğer $d\omega$ NS ve $dP$ NB ise o zaman U NB'dir	Eğer $d\omega$ PS ve $dP$ PS ise o zaman U PS'dir
Eğer $d\omega$ NS ve $dP$ NS ise o zaman U NS'dir	Eğer $d\omega$ PS ve $dP$ PB ise o zaman U PB'dir
Eğer $d\omega$ NS ve $dP$ ZE ise o zaman U NS'dir	Eğer $d\omega$ PB ve $dP$ NS ise o zaman U ZE'dir
Eğer $d\omega$ NS ve $dP$ PS ise o zaman U ZE'dir	Eğer $d\omega$ PB ve $dP$ NB ise o zaman U PS'dir
Eğer $d\omega$ NS ve $dP$ PB ise o zaman U PS'dir	Eğer $d\omega$ PB ve $dP$ ZE ise o zaman U PS'dir
Eğer $d\omega$ ZE ve $dP$ NB ise o zaman U NS'dir	Eğer $d\omega$ PB ve $dP$ PS ise o zaman U PB'dir
Eğer $d\omega$ ZE ve $dP$ NS ise o zaman U NS'dir	Eğer $d\omega$ PB ve $dP$ PB ise o zaman U PB'dir
Eğer $d\omega$ ZE ve $dP$ ZE ise o zaman U ZE'dir	

Bu bölümde geleneksel GSK ve BGSK detaylı olarak anlatılmış olup, bilgisayar benzetiminde kullanılan modeller verilmiştir. Bundan sonraki bölümde yapılan bilgisayar benzetimleri detaylı olarak anlatılacaktır.

## 6. BİLGİSAYAR BENZETİMİ

### 6.1 Giriş

Bu bölümde geleneksel GSK ve BGSK modelleri ayrı ayrı senkron generatör modeline eklenerek, bu modellerin ve tek başına senkron generatörün performansları karşılaştırılmıştır. Bilgisayar benzetiminde “MATLAB 7.1. R14 SP3” programı ve bu program altında “SIMULINK” arayüzü ve “Fuzzy Logic Toolbox” kullanılmıştır. Benzetim Pentium Celeron 1.7 GHz işlemcili, 384 MB RAM, ve Windows XP SP2 işletim sistemine sahip bir bilgisayar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tüm benzetim çalışmaları için cevap süreleri 10 s olarak ayarlanmıştır.

Benzetimde, OGR içeren, sonsuz güçlü baraya eşdeğer iki iletim hattı üzerinden bağlı bir senkron generatörün, iletim hatlarından birinin kısa devre olması, arızalı hattın devreden alınması ve arıza giderildikten sonra tekrar devreye alınması durumunda rotor açısının salınımı gözlenmiştir. Daha sonra bu modele geleneksel GSK ve BGSK eklenip rotor aynı koşullar altında rotor açısı salınımları söndürülmeye çalışılmış ve bu salınımlar karşılaştırılmıştır.

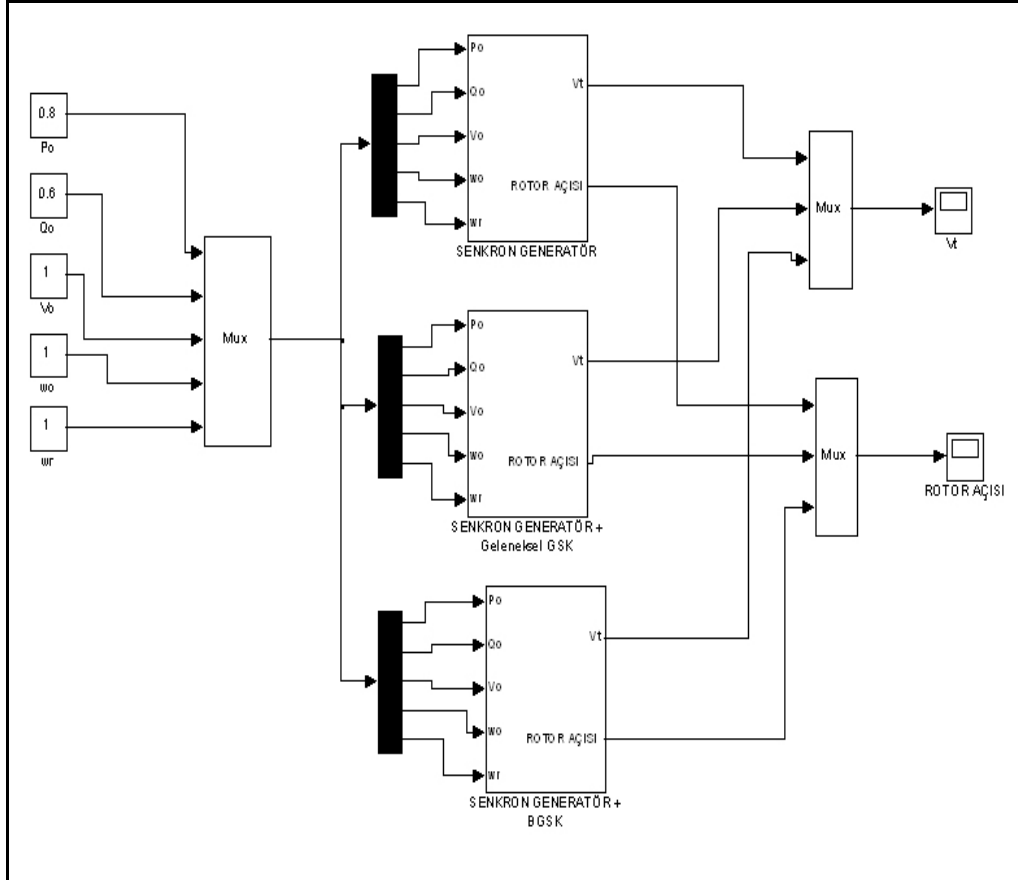
Benzetimde kullanılan güç sistemi ve senkron generatör modeli bölüm 3’de, GSK ve BGSK modeli bölüm 5’de detaylı olarak açıklandığı için bu bölümde tekrar değinilmemiştir.

### 6.2 Generatör ve Kararlı Kılıcılar Benzetimi

Öncelikle kontrol elemanı olarak sadece DSR ve OGR içeren senkron generatör modeli, oluşturulmuştur. Daha sonra şebekenin  $P=0.8$  pu,  $Q=0.6$  pu, yük durumuna göre katsayıları belirlenen bir geleneksel GSK modeli senkron generatör modeline ilave edilmiştir. Son olarak da BGSK kararlı kılıcı modeli tasarlanıp yalın senkron generatör modeline ilave edilmiştir. Oluşturulan bu üç model  $P=0.8$  pu,  $Q=0.6$  pu,  $V_0=1$  pu,  $\omega_0=1$  pu,  $\omega_r=1$  pu, sürekli çalışma koşullarında aynı arıza senaryosuna maruz bırakılarak rotor açıları gözlemlenmiştir. Bu benzetimin ardından şebekenin

aktif ve reaktif güç değerleri değiştirilerek şebekenin beş farklı çalışma koşulunda senkron generatörde tek başına, geleneksel GSK ile, ve BGSK ile meydana gelen rotor açısı salınımları karşılaştırılmıştır.

Şekil 6.1’de kullanılan üç farklı senkron generatör benzetim modeli gösterilmiştir.



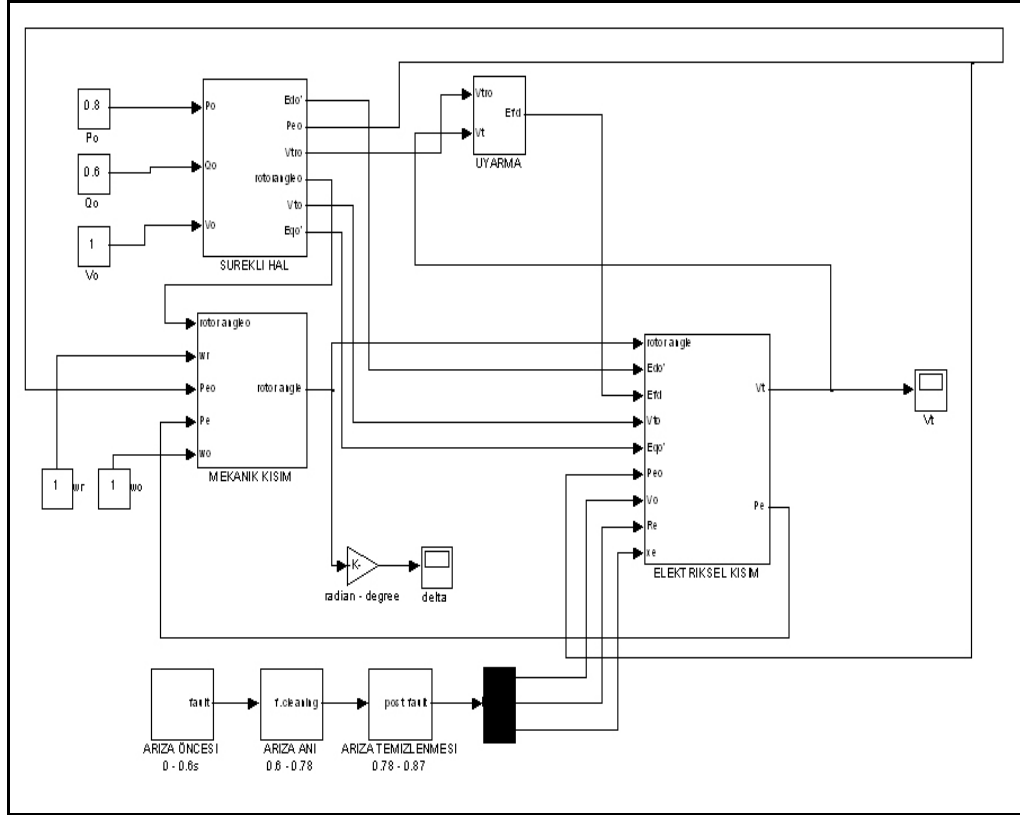
Şekil 6.1: Bilgisayar Benzetimi Modeli [6]

Şekildeki ilk blokta OGR ve DSR içeren senkron generatör modeli, ikinci blokta geleneksel GSK’ya sahip senkron generatör modeli, üçüncü blokta da BGSK’ya sahip senkron generatör modeli yer almaktadır.



### 6.3 Senkron Generatör Modeli

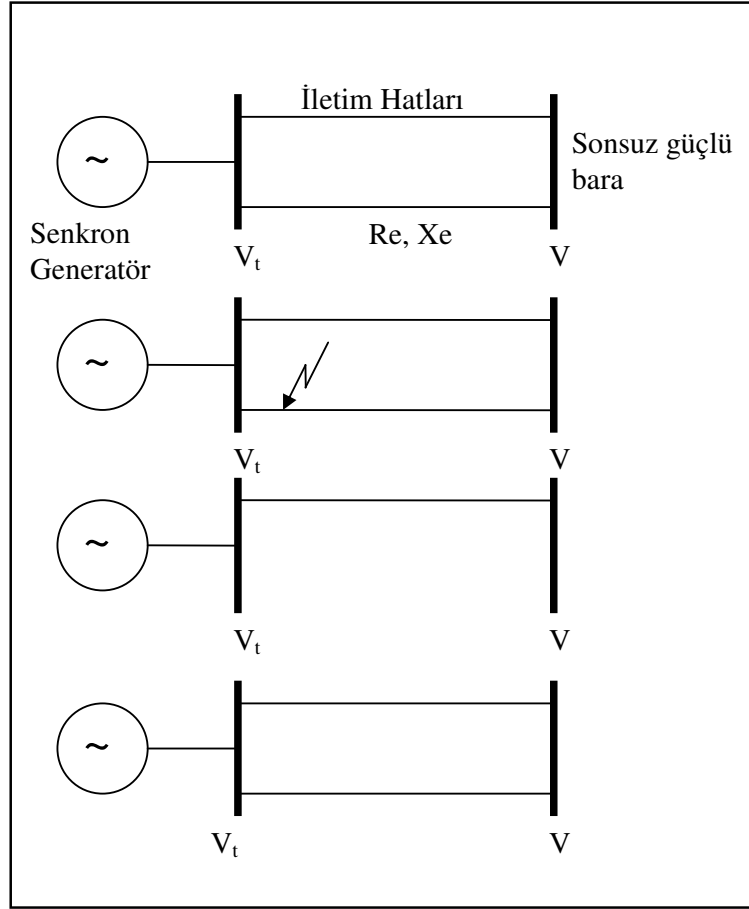
Bilgisayar benzetiminde kullanılan sonsuz güçlü baraya senkron generatör modeli elektriksel, mekanik, sürekli hal ve uyarma alt sistemleri ile arıza bloklarından oluşmuş olup şekil 6.2’de gösterilmiştir. Geleneksel GSK ve BGSK’nın senkron generatöre bağlantı şekilleri **EK-C**’de verilmiştir.



Şekil 6.2: Senkron Generatör Modeli [6]

Senkron generatör SIMULINK programı altında alt sistemlerin birleştirilmesiyle modellenmiş olup, iletim hatlarından birinde üç fazlı kısa devre olması sonucunda arızalı hattın bir süre servis dışı kaldıktan sonra tekrar devreye girmesi durumundaki davranışı incelenmiştir.

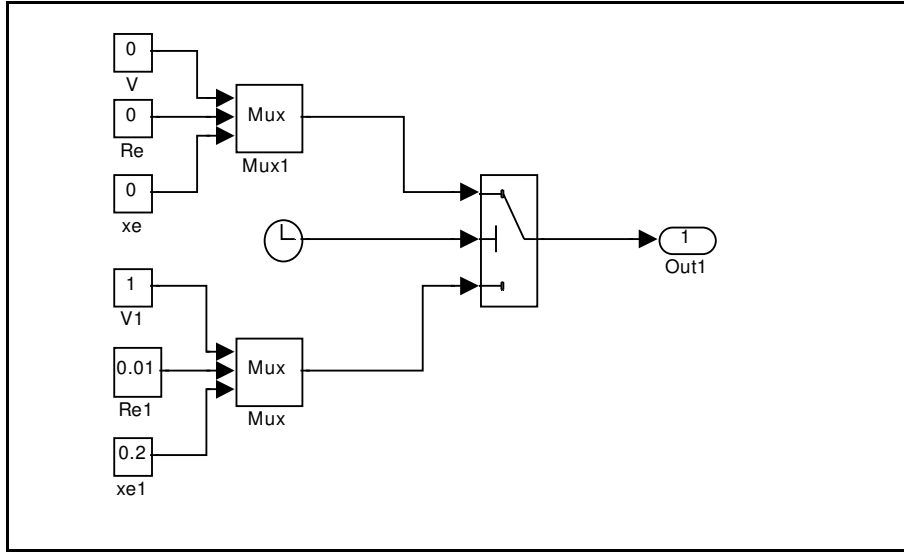
Şekil 6.3.'de iletim hatlarında arıza öncesi durum, arıza anı ve arıza sonrası durum gösterilmiştir.



Şekil 6.3: Güç sisteminde arıza modeli [6]

Bilgisayar benzetiminde arıza durumu senkron generatör modeli içindeki arıza blokları ile sağlanmıştır. Benzetimin 0.6'ncı saniyesinde iletim hatlarından birinde üç fazlı kısa devre olduğu, bu arızanın 0.78'inci saniyeye kadar sürdüğü bu nedenle hat empedansının sıfıra düştüğü, 0.78'inci saniyede arızalı hattın devreden ayrılmasıyla 0.87'inci saniyeye kadar tek iletim hattı üzerinden enerji iletimi yapıldığı, 0.87'inci saniyeden sonra arızanın temizlenip tekrar arıza öncesi koşullarda iki iletim hattı üzerinden enerji iletimi yapıldığı varsayılmıştır. Burada arıza bloklarının görevi gerekli zamanlarda iletim hattı direnç ve empedans değeri ile sonsuz bara gerilim değerini değiştirerek iletim hatlarında meydana gelen kısa devrenin benzetimini yapmaktır.

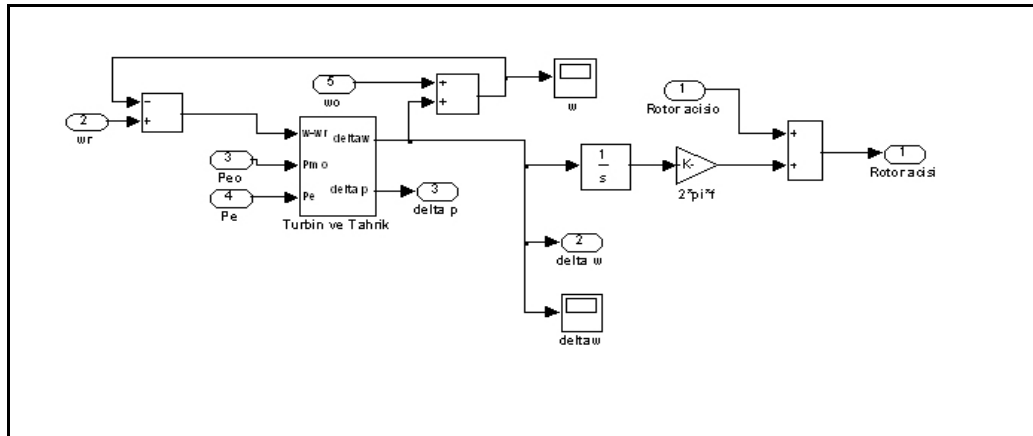
Benzetimde kullanılan üç arıza bloğunun yapısı aynı olup arıza öncesi bloğunun iç yapısı şekil 6.4.'de gösterilmiştir.



Şekil 6.4: Arıza Bloğu İç Yapısı [6]

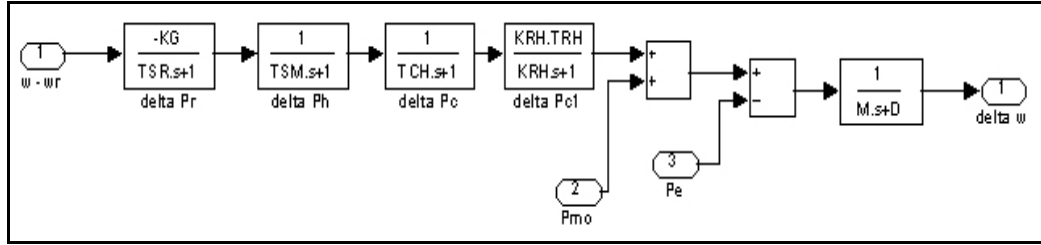
#### 6.4 Senkron Generatör Mekanik Alt Sistemleri

Senkron generatörün mekanik alt sisteminde kullanılan denklemler bölüm 3'de verilmiştir. Mekanik kısım bloğuna giriş olarak referans açısal hız, başlangıç açısal hızı, elektriksel güç, başlangıç elektriksel gücü, ve rotor açısı verilmektedir. Mekanik kısım bloğundan güç sistemi kararlı kılıcılar için giriş olarak alınan  $\omega_0$  ve güç farkı ile rotor açısı çıkış olarak alınmaktadır. Mekanik kısım iç yapısı şekil 6.5'te gösterilmiştir.



Şekil 6.5: Mekanik Kısım Bloğu İç Yapısı [6]

Türbin ve tahrik bloğu içerisinde servomotor, hız rölesi, ara ısıtıcı, ısıtıcı elemanlarına ait transfer fonksiyonlarını bulundurmaktadır. Bu sistem bir DSR ve türbin bağlantısını temsil etmektedir. Hız rölesi tarafından rotor hızında değişim algılanmasından sonra servomotor tarafından türbine mekanik gücün verilmesini sağlayan ısıtıcı vanası ayarlanır. Böylece mekanik güç ayarı ile hız kontrolü yapılmış olur. Türbin ve tahrik bloğunun iç yapısı şekil 6.6'da gösterilmiştir.

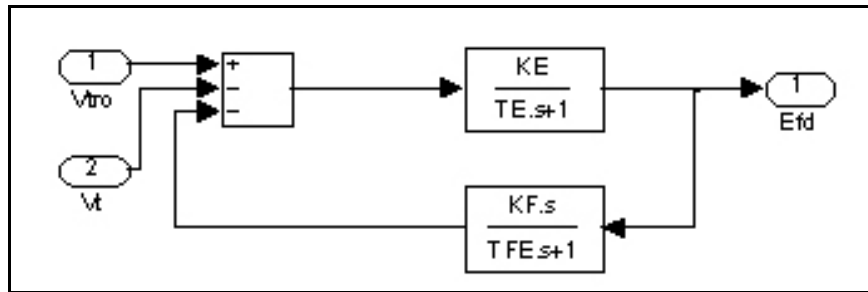


Şekil 6.6: Türbin Tahrik Bloğu İç Yapısı [6]

Türbin tahrik bloğu incelendiğinde, generatörün hızındaki değişimin mekanik ve elektriksel güçteki farktan elde edildiği görülmektedir. Sürekli hal çalışma koşullarında elektrik ve mekanik güçler birbirine eşit olduğundan dolayı hız değişimi sıfırdır.

### 6.5 Senkron Generatör Uyarma Sistemi

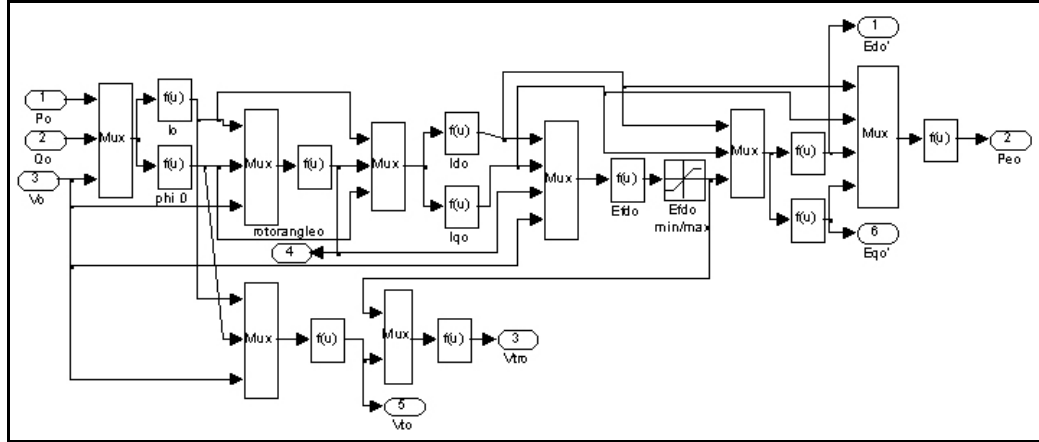
Uyarma sistemine ait matematiksel denklemler bölüm 3'te verilmiştir. Benzetimde kullanılan uyarma sistemine ait bloğun iç yapısı şekil 6.7'de gösterilmiştir. Uyarma devresinde  $K_E$  uyarma kazancını,  $T_E$  uyarma devresi zaman sabitini,  $K_F$  uyarma geri besleme kararlılık kazanç katsayısını,  $T_F$  kararlayıcı devre zaman sabitini ifade etmektedir.



Şekil 6.7: Uyarma Bloğu İç Yapısı [6]

## 6.6 Senkron Generatör Sürekli Hal Çalışma Durumu

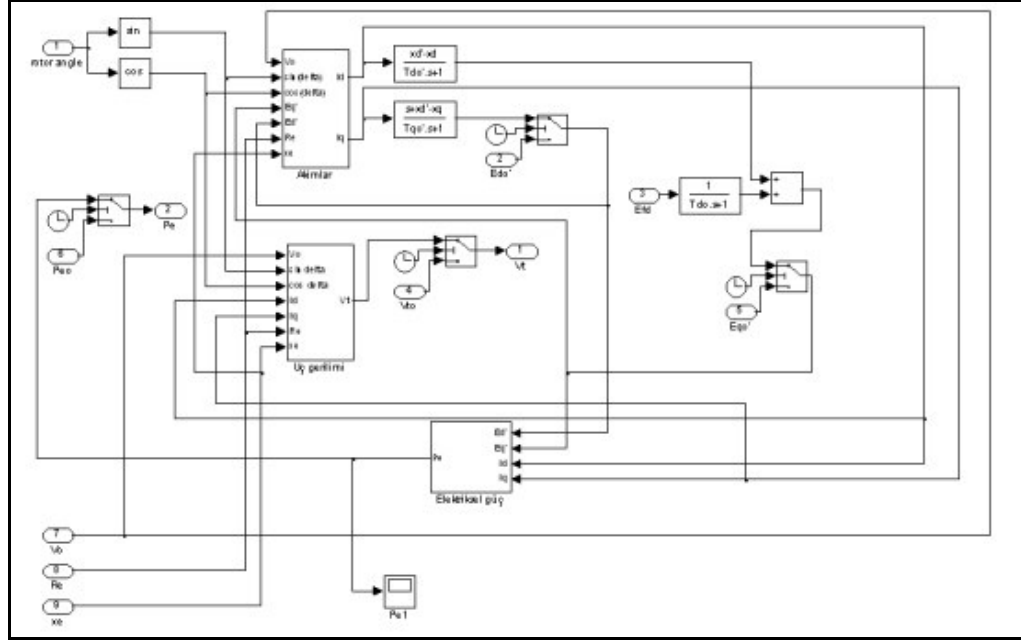
Sürekli hal bloğunda, uyarma sistemine elektriksel kısma ve mekanik kısma giriş olarak verilen sürekli hal değerleri hesaplanmaktadır. Bloğun girişleri aktif güç, reaktif güç ve uç gerilimi ilk değerlerinden oluşmaktadır. Çıkış olarak sürekli hal elektriksel gücü, iç gerilim d ve q bileşenleri, uç gerilimi ve referans uç gerilim alınmaktadır. Çıkışların hesaplanmasına ilişkin matematiksel denklemler bölüm 3’de verilmiş olup bloğun iç yapısı şekil 6.8.’de gösterilmiştir.



Şekil 6.8: Sürekli Hal Bloğu İç Yapısı [6]

## 6.7 Senkron Generatör Elektriksel Alt Kısımları

Elektriksel kısım bloğu giriş olarak rotor açısı, sürekli hal iç gerilim d ve q bileşenleri, uç gerilimi, uyarma gerilimi, sürekli hal elektriksel güç değerleri ile arıza durumunda değişen sonsuz bara gerilimi ve iletim hattı empedans değerlerini giriş olarak alır. Çıkış olarak ise generatör uç gerilimi ile elektriksel gücü üretir. Elektriksel kısım bloğunda kullanılan matematiksel denklemler bölüm 3’de verilmiş olup, bloğun iç yapısı şekil 6.9’da gösterilmiştir.



Şekil 6.9: Elektriksel Kısım Bloğu İç Yapısı [6]

## 6.8 Bilgisayar Benzetimi Sonuçları

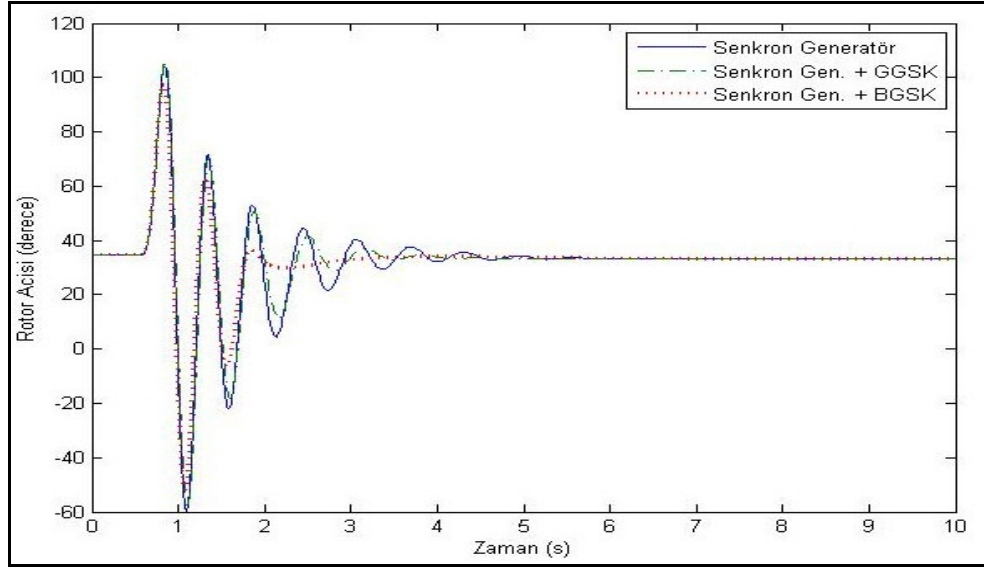
Benzetim için oluşturulan üç senkron generatör modeli şebekenin üç adet endüktif ve iki adet kapasitif olmak üzere, beş değişik farklı sürekli çalışma noktasında çalıştırılıp benzetim sonuçları incelenmiştir. Buradaki amaç parametreleri şebekenin ağır yük koşullarına göre belirlenmiş GGSK kararlı kılıcının farklı çalışma koşullarında da BGSK ile karşılaştırılmasıdır.

Tablo 6.1: Benzetimlerde Kullanılan Şebeke Aktif ve Reaktif güç değerleri

	Ağır Yük (Endüktif) pu	Orta Yük (Endüktif) pu	Hafif yük (Endüktif) pu	Orta Yük (Kapasitif) pu	Hafif Yük (Kapasitif) pu
P	0.8	0.6	0.4	0.6	0.4
Q	0.6	0.3	0.2	-0.3	-0.2

### 6.8.1 Endüktif Ağır Yük Koşullarında Benzetim Sonuçları

Şebekenin yük durumu  $P=0.8$  pu,  $Q=0.6$  pu olarak ayarlandıktan sonra oluşturulan model çalıştırılarak üç generatörün rotor açısı salınımları gözlenmiştir. Sadece DSR ve OGR içeren senkron generatörün rotor açısı salınım yaptıktan sonra sabit bir değere oturarak kararlılığını korumuştur. Bu durumda salınımın minimum ve maksimum genlikleri  $[-59.6, 105.5]$  derece olarak ölçülmüştür. Salınım  $[5-6]$  saniyeleri arasında  $33.3$  derece değerine oturmuştur. GGSK içeren senkron generatörün salınım genliğinin azaldığı gözlenmiştir. Rotor açısı salınımının minimum ve maksimum değerleri  $[-57.6, 103.9]$  derece olarak ölçülmüştür. Salınım  $[4-5]$  saniyeleri arasında  $33.3$  derece değerine oturmuştur. BGSK içeren senkron generatörün salınım genliğinin GGSK içeren senkron generatöre göre belirgin şekilde daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanında BGSK'lı sistem GGSK'lı sisteme göre daha çabuk sabit bir değere oturmuştur. BGSK'lı sistemin salınımlarının minimum ve maksimum değerleri  $[-53.0, 97.7]$  derecedir ve rotor açısı  $[3-4]$  saniyeleri arasında  $33.3$  değerine oturmuştur. Bunun yanında uç geriliminin diğer modellere göre bir miktar yükseldiği görülmüştür. Rotor açısı salınımlarının karşılaştırılması şekil 6.10'da gösterilmektedir.

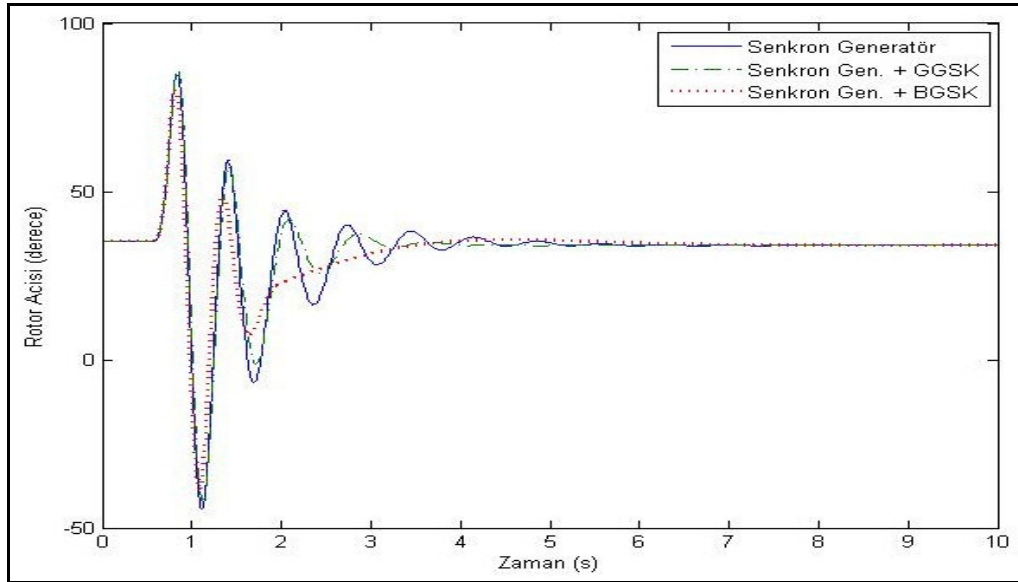


**Şekil 6.10:** Endüktif Ağır Yük Koşullarında Rotor Açısı Salınımlarının Karşılaştırılması

Şekil 6.10'dan görülebileceği gibi endüktif ağır yük koşulları altında, rotor açısı salınımlarının söndürülmesinde BGSK içeren model en iyi performansı göstermiştir.

## 6.8.2 Endüktif Orta Yük Koşullarında Benzetim Sonuçları

Şebekenin yük durumu  $P=0.6$  pu,  $Q=0.3$  pu olarak ayarlandıktan sonra oluşturulan model çalıştırılarak üç generatörün rotor açısı salınımları gözlenmiştir. Sadece DSR ve OGR içeren senkron generatörün rotor açısı salınım yaptıktan sonra sabit bir değere oturarak kararlılığını korumuştur. Bu durumda salınımın minimum ve maksimum genlikleri  $[-44.4, 86.1]$  derece olarak ölçülmüştür. Salınım [5-6] saniyeleri arasında 33.9 derece değerine oturmuştur. GGSK içeren senkron generatörün salınım genliğinin azaldığı gözlenmiştir. Rotor açısı salınımının minimum ve maksimum değerleri  $[-41.8, 84.9]$  derece olarak ölçülmüştür. Salınım [4-5] saniyeleri arasında 33.9 derece değerine oturmuştur. BGSK içeren senkron generatörün salınım genliğinin GGSK içeren senkron generatöre göre belirgin şekilde daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanında BGSK'lı sistem GGSK'lı sisteme göre daha çabuk sabit bir değere oturmuştur. BGSK'lı sistemin salınımlarının minimum ve maksimum değerleri  $[-39.1, 80.4]$  derecedir ve rotor açısı [3-4] saniyeleri arasında 33.9 değerine oturmuştur. Bunun yanında uç geriliminin diğer modellere göre bir miktar yükseldiği görülmüştür. Rotor açısı salınımlarının karşılaştırılması şekil 6.11'de gösterilmektedir.



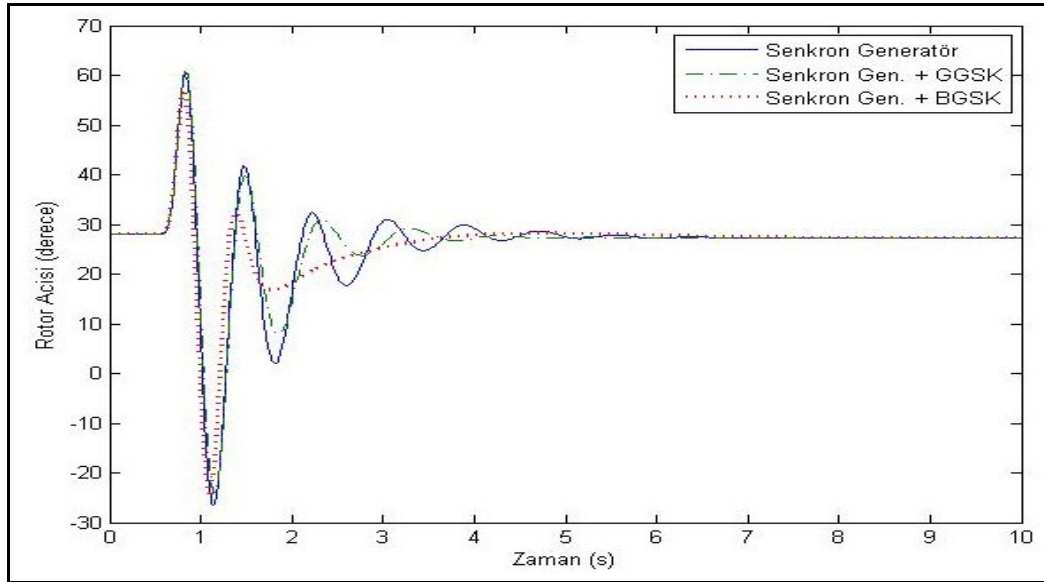
**Şekil 6.11:** Endüktif Orta Yük Koşullarında Rotor Açısı Salınımlarının Karşılaştırılması

Şekil 6.11'den görülebileceği gibi endüktif orta yük koşulları altında, rotor açısı salınımlarının söndürülmesinde BGSK içeren model en iyi performansı göstermiştir.



### 6.8.3 Endüktif Hafif Yük Koşullarında Benzetim Sonuçları

Şebekenin yük durumu  $P=0.4$  pu,  $Q=0.2$  pu olarak ayarlandıktan sonra oluşturulan model çalıştırılarak üç generatörün rotor açısı salınımları gözlenmiştir. Sadece DSR ve OGR içeren senkron generatörün rotor açısı salınım yaptıktan sonra sabit bir değere oturarak kararlılığını korumuştur. Bu durumda salınım minimum ve maksimum genlikleri  $[-26.5, 60.8]$  derece olarak ölçülmüştür. Salınım  $[5-6]$  saniyeleri arasında  $27.3$  derece değerine oturmuştur. GGSK içeren senkron generatörün salınım genliğinin azaldığı gözlenmiştir. Rotor açısı salınımlarının minimum ve maksimum değerleri  $[-24.1, 60.2]$  derece olarak ölçülmüştür. Salınım  $[4-5]$  saniyeleri arasında  $27.3$  derece değerine oturmuştur. BGSK içeren senkron generatörün salınım genliğinin GGSK içeren senkron generatöre göre belirgin şekilde daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanında BGSK'lı sistem GGSK'lı sisteme göre daha çabuk sabit bir değere oturmuştur. BGSK'lı sistemin salınımlarının minimum ve maksimum değerleri  $[-24.1, 57.0]$  derecedir ve rotor açısı  $[3-4]$  saniyeleri arasında  $27.3$  değerine oturmuştur. Bunun yanında uç geriliminin diğer modellere göre bir miktar yükseldiği görülmüştür. Rotor açısı salınımlarının karşılaştırılması şekil 6.12'de gösterilmektedir.

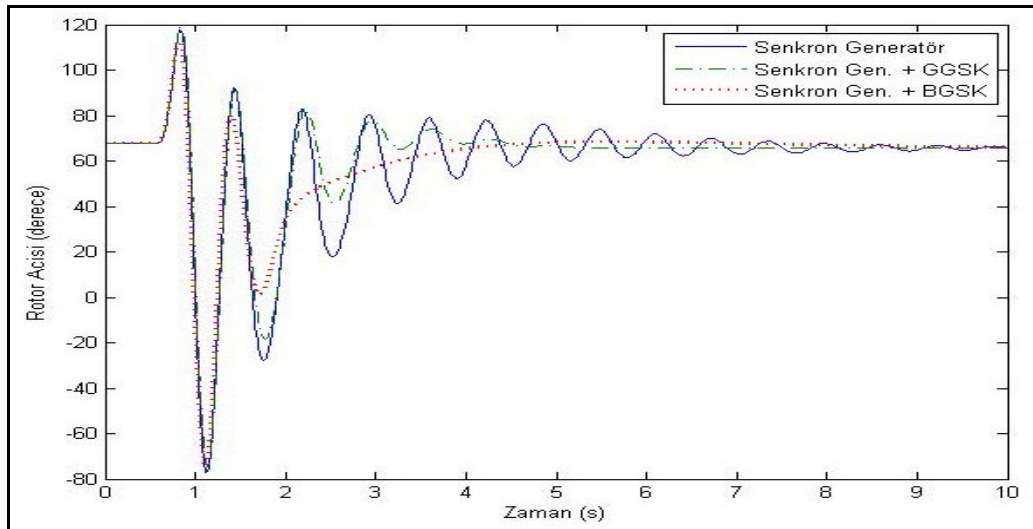


**Şekil 6.12:** Endüktif Hafif Yük Koşullarında Rotor Açısı Salınımlarının Karşılaştırılması

Şekil 6.12'den görülebileceği gibi endüktif hafif yük koşulları altında, rotor açısı salınımlarının söndürülmesinde BGSK içeren model en iyi performansı göstermiştir.

#### 6.8.4 Kapasitif Orta Yük Koşullarında Benzetim Sonuçları

Şebekenin yük durumu  $P=0.6$  pu,  $Q=-0.3$  pu olarak ayarlandıktan sonra oluşturulan model çalıştırılarak üç generatörün rotor açısı salınımları gözlenmiştir. Sadece DSR ve OGR içeren senkron generatörün rotor açısı salınımı giderek azalmasına karşın 10 s sonunda sürekli bir değere oturamamıştır [64.7, 66.7] derece aralığında salınım yapmaya devam ettiği görülmüştür. Bu durumda salınım minimum ve maksimum genlikleri [-77.3, 118.6] derece olarak ölçülmüştür. GGSK içeren senkron generatörün salınım genliğinin az bir miktar azaldığı gözlenmiştir. Rotor açısı salınımlarının minimum ve maksimum değerleri [-74.3, 117.5] derece olarak ölçülmüştür. Salınım [8-9] saniyeleri arasında 66.8 derece değerine oturmuştur. BGSK içeren senkron generatörün rotor açısı ilk salınımlarının minimum genliği, diğer modellere göre fazla olmasına karşın sonraki salınımlarının belirgin şekilde daha küçük genlikli olduğu gözlenmiştir. Bunun yanında BGSK'lı sistem GGSK'lı sisteme göre daha çabuk sabit bir değere oturmuştur. BGSK'lı sistemin salınımlarının minimum ve maksimum değerleri [-74.7, 113.0] derecedir ve rotor açısı [4-5] saniyeleri arasında 66.8 derece değerine oturmuştur. Bunun yanında uç geriliminin diğer modellere göre bir miktar yükseldiği görülmüştür. Rotor açısı salınımlarının karşılaştırılması şekil 6.13'de gösterilmektedir.

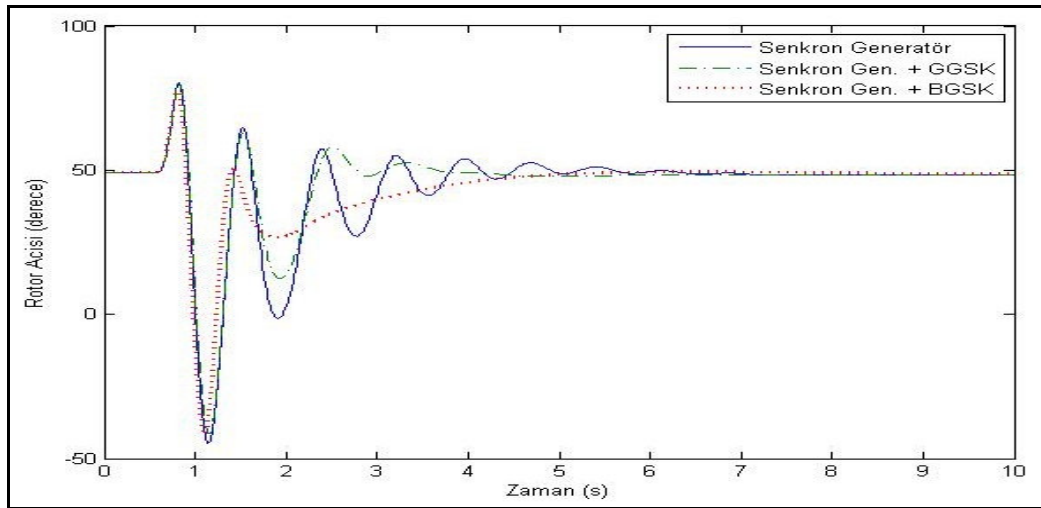


**Şekil 6.13:** Kapasitif Orta Yük Koşullarında Rotor Açısı Salınımlarının Karşılaştırılması

Şekil 6.13'den görülebileceği gibi kapasitif orta yük koşulları altında, rotor açısı salınımlarının söndürülmesinde BGSK içeren model en iyi performansı göstermiştir.

### 6.8.5 Kapasitif Hafif Yük Koşullarında Benzetim Sonuçları

Şebekenin yük durumu  $P=0.4$  pu,  $Q=-0.2$  pu olarak ayarlandıktan sonra oluşturulan model çalıştırılarak üç generatörün rotor açısı salınımları gözlenmiştir. Sadece DSR ve OGR içeren senkron generatörün rotor açısı salınım yaptıktan sonra sabit bir değere oturarak kararlılığını korumuştur. Bu durumda salınım minimum ve maksimum genlikleri  $[-44.7, 80.6]$  derece olarak ölçülmüştür. Salınım [8-9] saniyeleri arasında 48.4 derece değerine oturmuştur. GGSK içeren senkron generatörün salınım genliğinin az bir miktar azaldığı gözlenmiştir. Rotor açısı salınımlarının minimum ve maksimum değerleri  $[-41.5, 80.2]$  derece olarak ölçülmüştür. Salınım [7-8] saniyeleri arasında 48.4 derece değerine oturmuştur. BGSK içeren senkron generatörün rotor açısı ilk salınımlarının minimum genliği, diğer modellere göre bir miktar fazla olmasına karşın sonraki salınımlarının belirgin şekilde daha küçük genlikli olduğu gözlenmiştir. Bunun yanında BGSK'lı sistem GGSK'lı sisteme göre daha çabuk sabit bir değere oturmuştur. BGSK'lı sistemin salınımlarının minimum ve maksimum değerleri  $[-41.7, 77.4]$  derecedir ve rotor açısı yaklaşık olarak [5-6] saniyeleri arasında 48.4 derece değerine oturmuştur. Bunun yanında uç geriliminin diğer modellere göre bir miktar yükseldiği görülmüştür. Rotor açısı salınımlarının karşılaştırılması şekil 6.14'de gösterilmektedir.



**Şekil 6.14:** Kapasitif Hafif Yük Koşullarında Rotor Açısı Salınımlarının Karşılaştırılması

Şekil 6.14'den görülebileceği gibi kapasitif hafif yük koşulları altında, rotor açısı salınımlarının söndürülmesinde BGSK içeren model en iyi performansı göstermiştir.

Bu bölümde bilgisayar benzetiminde kullanılan “MATLAB SIMULINK” programı altında modellenen senkron generatör, GGSK, BGSK, modelleri açıklanmış olup farklı şebeke koşullarında yapılmış benzetimler anlatılmış ve bu benzetimlerin sonuçları yorumlanmıştır. Benzetimlerde üç farklı generatör modelinin rotor açısı salınımları incelenmiştir. Tüm benzetimlerde rotor açısı salınımlarının söndürülmesinde dolayısıyla sistemin geçici hal kararlılığın korunmasında en iyi sonuçları BGSK içeren modelin verdiği görülmüştür. Bunların yanında BGSK içeren sistemin uç gerilimi salınım genliklerinde, diğer modellere göre bir miktar artış görülmüştür. Modellerin uç gerilimleri karşılaştırılmaları **EK-D**'de verilmiştir.

## 7. SONUÇLAR

### 7.1 Çalışma Özeti

Özetle, bu tez çalışmasının amacı sonsuz güçlü baraya paralel iki iletim hattı üzerinden bağlı tek makinalı sistem olarak ele alınan güç sisteminde, üç fazlı kısa devre arızası olması durumunda, bulanık mantık teorisinden faydalanarak modellenen güç sistemi kararlı kılıcısının, rotor açısı salınımlarını söndürmede dolayısıyla sistemin geçici hal kararlılığının korunmasında geleneksel yapıdaki güç sistemi kararlı kılıcısına göre daha iyi performans gösterdiğinin belirlenmesidir.

Tez çalışmasında yapılan benzetimler şebekenin beş farklı yük durumuna göre yapılmıştır. Şebeke yük durumları değiştirilirken, ağır endüktif yük sürekli çalışma noktasına göre parametreleri belirlenen kararlı kılıcıların bu parametrelerinde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Böylece şebeke koşullarının değişmesi durumunda kararlı kılıcıların sistemin geçici hal kararlılığını korumada gösterdikleri performanslar karşılaştırılmıştır.

### 7.2 Sonuçlar

Çalışma sonucunda, bulanık mantık tabanlı güç sistemi kararlı kılıcısının, güç sistemi geçici hal kararlılığını korumada, geleneksel yapılu güç sistemi kararlı kılıcısına göre daha başarılı olduğu görülmüştür. BGSK'nın bu başarısı modellendiği şebeke ağır yük çalışma koşullarında sınırlı kalmayıp, farklı şebeke çalışma koşullarında da devam etmektedir. Oysa güç şebeke parametrelerinin değişmesiyle GGSK'nın geçici hal kararlılığını korumadaki performansının azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni parametrelerinin sabit olması, ve bağlı olduğu geleneksel mantık teorisinin bulanık mantığa göre zayıf kalmasıdır. BGSK'nın farklı şebeke koşullarında da iyi performans göstermesi, bulanık kontrol elemanın kullandığı dilsel değişkenler sayesinde daha geniş kontrol aralıklarına sahip olmasına bağlanabilir.

Gelecekte, bilgisayar benzetiminde yapılan çalışma gerekli fiziksel elemanlar oluşturularak gerçek sisteme uygulanabilir. BGSK'nın uç gerilimi salınımlarının genliğinde meydana getirdiği bir miktar artış, daha iyi performans gösterebilecek bir bulanık gerilim regülatörü kullanılmasıyla kompanze edilebilir. Bunun yanında BGSK'nın ölçeklendirme faktörleri genetik algoritma ile belirlenebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Anderson, P. M. and Fouad, A. A.**, 1994. Power System Control and Stability, IEEE Pres, New Jersey.
- [2] **Berube, G.R., Hajagos, L.M. and Beaulieu, R.**, 1999. Practical utility experience with application of power system stabilizers, *Power Engineering Society Meeting*, Edmonton, Canada, July 1999, 104-109 vol.1.
- [3] **Tanaka, K.**, 1996. An Introduction to Fuzzy Logic for Practical Applications, Springer, New York.
- [4] **Tacer, M. E.**, 1990. Enerji Sistemlerinde Kararlılık, İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi, İstanbul.
- [5] **Demirören, A. ve Zeynelgil, H. L.**, 2004. Elektrik Enerji Sistemlerinin Kararlılığı Kontrolü ve Çalışması, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [6] **Demirören, A. and Zeynelgil, H. L.**, 2002. Modelling and simulation of synchronous machine transient analysis using simulink, *International Journal of Electrical Engineering*, **39/4**, October, 337-346.
- [7] **Ong, C. M.**, 1998. Dynamic Simulation of Electric Machinery Using: MATLAB / SIMULINK, Prentice Hall, New Jersey.
- [8] **Tomsovic, K. and Chow, M. Y.**, 2000. IEEE Power engineering society tutorial: fuzzy set applications to power systems, *IEEE PES TP-140-0*, Jan. 2000.
- [9] **Ribbens-Pavella, M. and Murthy, P. G.**, 1994. Transient Stability of Power Systems: Theory and Practice, Wiley, Chichester.

- [10] **Costa, A. B. R., Valle, A. C. M., Moraes, A. J. and Azevedo H. R.**, 2001. A simple fuzzy excitation control system in power system stability analysis, *The Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Perth, Australia, September 23-26.
- [11] **Güzelbeyoğlu, N.**, 1998. Elektrik Makinaları I, II, İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi , İstanbul.
- [12] **Klir, G. J. and Folger, T. A.**, 1988. Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information, Prentice Hall, New Jersey.
- [13] **Toliyat, H. A., Sadeh, J. and Ghazi, R.**, 1996. Design of augmented fuzzy logic power system stabilizer to enhance power systems stability, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol **11**, no. **1**, 97-103.
- [14] **Shi, J., Herron L. H. and Kalam A.**, 1992. A fuzzy logic controller applied to power system stabilizer for a synchronous machine power system, *IEEE Region 10 Conference Tencon 92*, Melbourne, Australia, November 11-13, 347-350.
- [15] **Şen, Z.**, 2001. Bulanık Mantık ve Modelleme İlkeleri, Bilge Kültür Sanat, İstanbul.
- [16] **Jantzen J.**, 1998. Tutorial on fuzzy logic, *Technical University of Denmark, Department of Automation, Technical Report, 98-E 868*, Lyngby, Denmark.
- [17] **Hoang P. and Tomsovic K.**, 1996. Design and analysis of an adaptive fuzzy power system stabilizer, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol **11**, no. **2**, 455-461.
- [18] **Elshafei, A. L., El-Metwally, K. and Shaltout, A.**, 2000. Design and analysis of a variable structure adaptive fuzzy-logic power system stabilizer, *Proceedings of the American Control Conference*, Chicago, USA, June 28-30, 3959-3963.
- [19] **Basler, M. J. and Schaefer, R. C.**, 2005. Understanding power system stability, *58<sup>th</sup> Annual Conference For Protective Relay Engineers*, IL, USA, April 5-7, 46-67.



- [20] <http://www.meppi.com/mepssd/npdfs2/PSS.pdf> , Mitsubishi Power System Stabilizer An Optimal Adaptive Power System Stabilizer.
- [21] **Jahromi, A. N., Lesani, H. and Raei, S.**, 2002. An optimal adaptive power system stabilizer, *The Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Melbourne, Australia, September 29 – October 2.
- [22] **Synder, A. F.**, 1997. Inter-area oscillation damping with power system stabilizers and synchronized phasor measurements, *MSc. Thesis*, The Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.
- [23] **Kundur, P., Klein, M. and Rogers, G. J.**, 1989. Application of power system stabilizers for enhancement of overall system stability, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol **4**, no. **2**, 614-621.
- [24] **Zadeh N. H. and Kalam A.**, 2002. Performance of a self-tuned fuzzy-logic power system stabilizer in a multi-machine system, *The Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Melbourne, Australia, September 29 – October 2.
- [25] **Voropai, N. I., Efimov, D. N., Popov, D. B. and Etingov, P. V.**, 2000. Advanced information technologies in power system stability studies, *International Workshop*, Irkutsk, Russia, August 2-4.

**EK A: GÜÇ SİSTEMİ VE GELENEKSEL GÜÇ SİSTEMİ KARARLI KILICI PARAMETRELERİ**

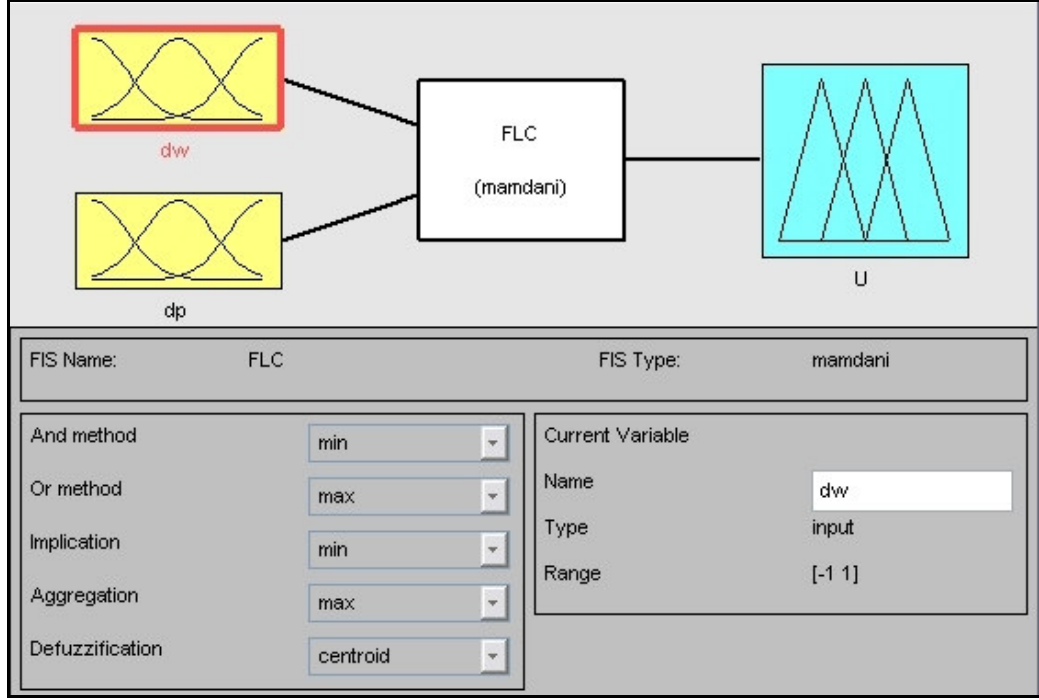
**Tablo A.1:** Güç Sistemi ve Senkron Generatör Parametreleri

$V_0$ : 1 pu	$K_E$ : 400	$T_{RH}$ : 8 s
$R_a$ : 0.001096 pu	$E_{fdmin}$ : -4.5 pu	$T_{CH}$ : 0.05 s
$R_e$ : 0.01 pu	$E_{fdmax}$ : 4.5 pu	$T_{SR}$ : 0.1 s
$x_d$ : 1.7 pu	$T_E$ : 0.05 s	$K_G$ : 3.5
$x_q$ : 1.64 pu	$K_F$ : 0.025	$T_{SM}$ : 0.2 s
$x_d'$ : 0.245 pu	$T_{FE}$ : 1 s	$\omega_r$ : 1 pu
$x_e$ : 0.2 pu	$D$ : 0	$\omega_0$ : 1 pu
$T_{d0}'$ : 5.9 s	$M$ : 4.74	
$T_{q0}'$ : 0.07 s	$K_{RH}$ : 0.3	

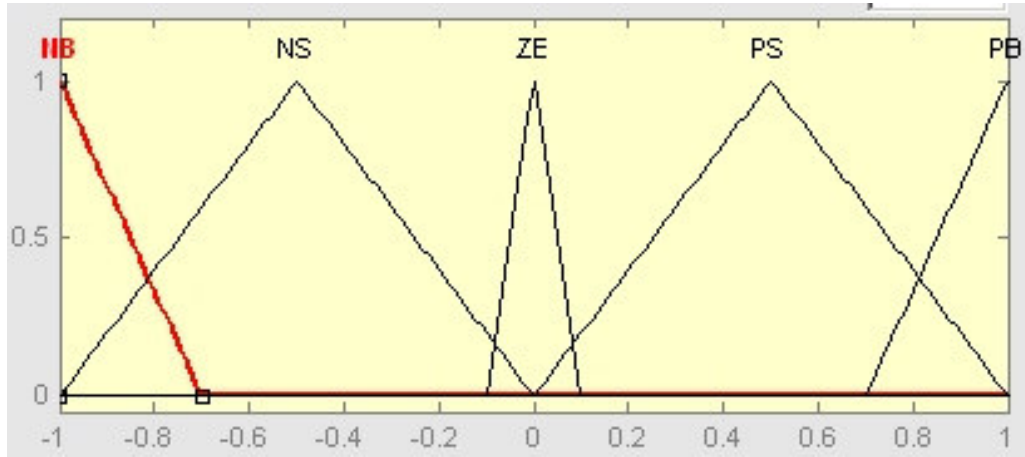
**Tablo A.2:** Geleneksel Güç Sistemi Kararlı Kılıcı Parametreleri

$K_{gsk}$ : 20	$T_1$ : 0.024 s	$V_{max}$ : 0.1 pu
$T_w$ : 1 s	$T_2$ : 0.24 s	$V_{min}$ : -0.1 pu

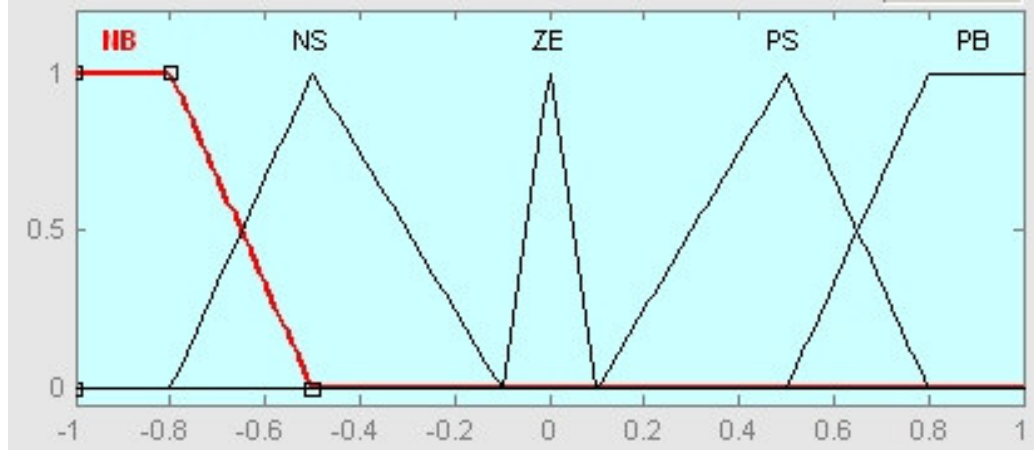
**EK B: BULANIK MANTIK GÜÇ SİSTEMİ KARARLI KILICI ŞEMA VE PAREMETLERİ**



**Şekil B.1:** Bulanık Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı Girişler ve Çıktılar Şeması



**Şekil B.2:** “dP” Giriş İşareti İçin Kullanılan Üyelik Fonksiyonları



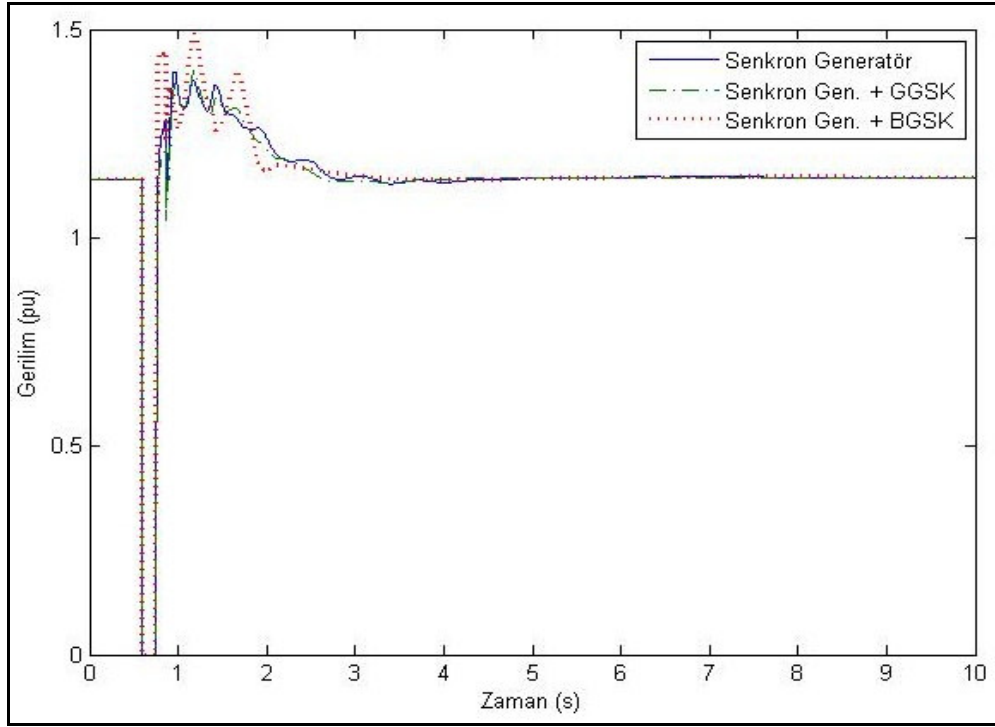
**Şekil B.3:** Çıkış İşareti İçin Kullanılan Üyelik Fonksiyonları

**Tablo B.1:** BGSK Parametreleri

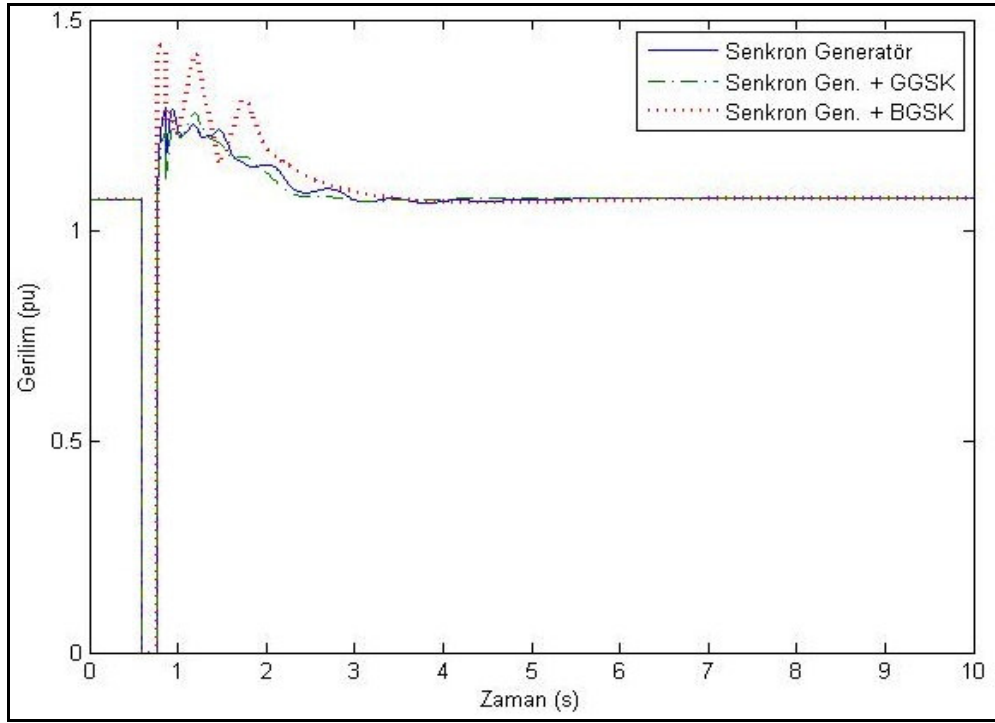
$K_1: 18$	$K_2: 0.70$	$K_3: 0.8$	$V_{\max}: 1 \text{ pu}$	$V_{\min}: -1 \text{ pu}$
-----------	-------------	------------	--------------------------	---------------------------



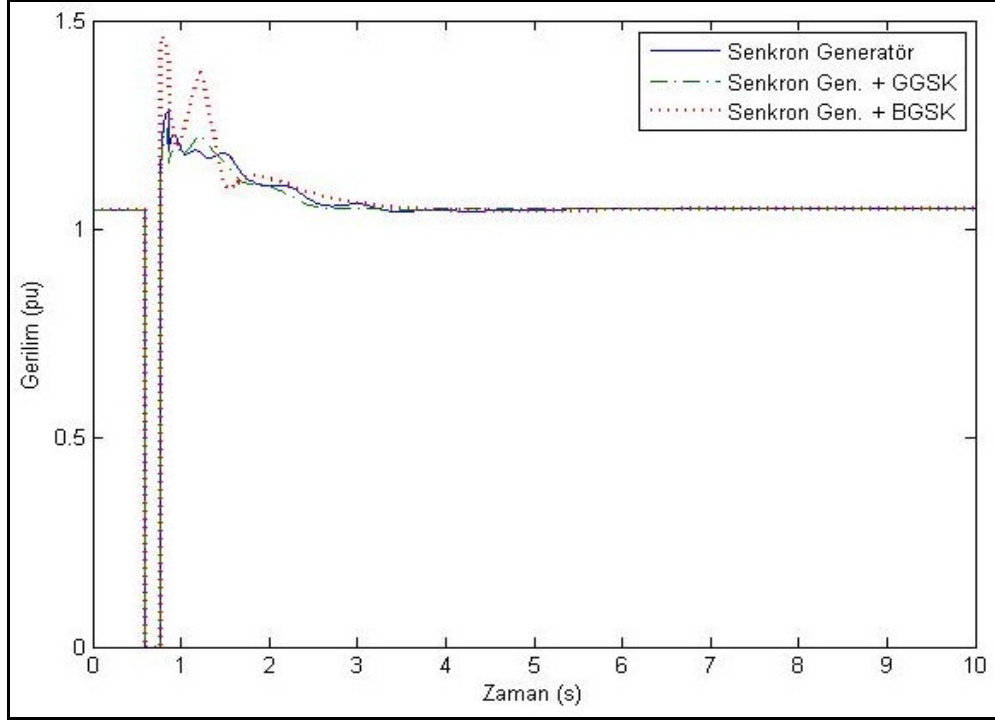
## EK D: UÇ GERİLİMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI



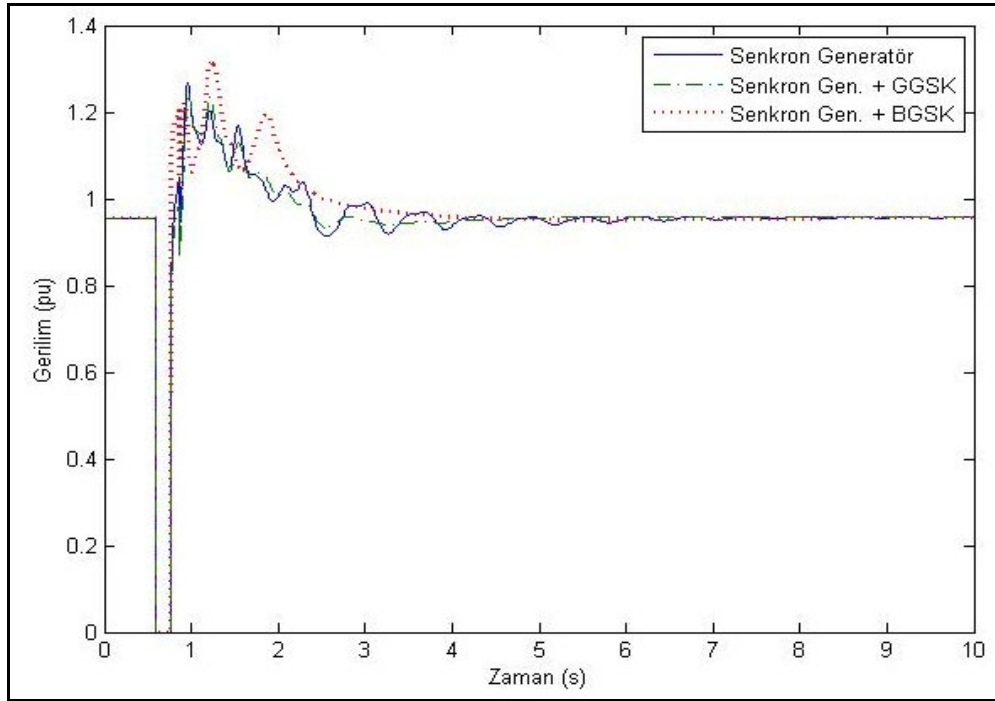
Şekil D.1: Endüktif Ağır Yük Koşulları Altında Uç Gerilimlerinin Karşılaştırılması



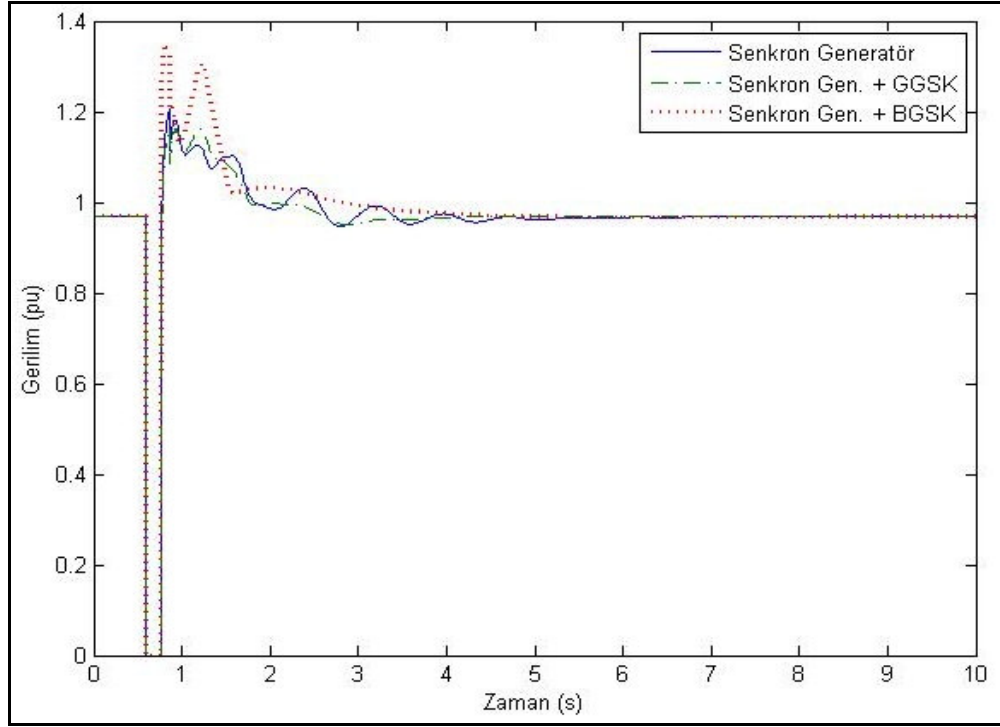
Şekil D.2: Endüktif Orta Yük Koşulları Altında Uç Gerilimlerinin Karşılaştırılması



**Şekil D.3:** Endüktif Hafif Yük Koşulları Altında Uç Gerilimlerinin Karşılaştırılması



**Şekil D.4:** Kapasitif Orta Yük Koşulları Altında Uç Gerilimlerinin Karşılaştırılması



Şekil D.5: Kapasitif Hafif Yük Koşulları Altında Uç Gerilimlerinin Karşılaştırılması



## **ÖZGEÇMİŞ**

Alphan Erdem, 1982'de İzmir'de doğdu. İlkokul eğitimini İzmir Özel Fatih İlkokulu'nda tamamladıktan sonra, ortaokul ve lise eğitimini İzmir Bornova Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2000 – 2004 yılları arasında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik – Elektronik Fakültesi'nde Elektrik Mühendisliği Bölümü'nü bitirerek Elektrik Mühendisi unvanını aldı. 2005 yılından beri Elektrik Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi'nde topraklama ölçümü yapmaktadır.