

**GÜÇ SİSTEMLERİNİN KARARLILIĞINDA
SENKRON GENERATÖRÜN
UYARTIM KONTROLÜ**

Gürkan KAVURAN

Yüksek Lisans Tezi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ahmet ORHAN

ARALIK-2011

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇ SİSTEMLERİNİN KARARLILIĞINDA
SENKRON GENERATÖRÜN UYARTIM KONTROLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gürkan KAVURAN

(08113104)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12 Eylül 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Aralık 2011

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Ahmet ORHAN (F.Ü)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Mehmet CEBECİ (F.Ü)
Prof. Dr. Z. Hakan AKPOLAT (F.Ü)

ARALIK-2011

ÖNSÖZ

Çalışmalarım süresince yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Ahmet ORHAN'a ve kıymetli tecrübelerinden faydalandığım Prof. Dr. Mehmet CEBECİ ve Arş. Gör. Mahmut Temel ÖZDEMİR'e teşekkür ederim.

Çalışma arkadaşlarıma ve maddi-manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme kalbi teşekkürlerimi sunarım.

Gürkan KAVURAN

ELAZIĞ - 2011

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLOLAR LİSTESİ	X
SEMBOLLER LİSTESİ	XI
KISALTMALAR LİSTESİ	XIII
EKLER LİSTESİ.....	XIV
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bilgi.....	1
1.2. Tezin Amacı ve Organizasyonu.....	2
2. GÜÇ SİSTEMLERİNDE KARARLILIK.....	3
2.1. Güç Sistemlerinin Yapısı	3
2.2. Kararlılık Kavramı	5
2.3. Rotor Açısı Kararlılığı	6
2.3.1. Küçük İşaret Kararlılığı	6
2.3.2. Geçici Durum Kararlılığı	7
2.4. Gerilim Kararlılığı	8
3. SENKRON GENERATÖRLER	9
3.1. Genel Bilgi.....	9
3.2. Senkron Generatör Modeli	10
3.3. Kararlılık Çalışmalarında Kullanılan Senkron Generatör Modeli	16
3.4. Sonsuz Baraya Bağlı Senkron Generatörün Basitleştirilmiş Doğrusal Modeli	17
4. UYARTIM SİSTEMLERİ VE KONTROLÜ	20
4.1. Uyartım Sisteminin Yapısı	20

4.2.	Uyartım Sisteminin Kontrolü	23
4.2.1.	Uyarıcı	24
4.2.2.	Otomatik Gerilim Regülatörü	25
4.2.3.	Güç Sistem Kararlayıcısı (GSK)	25
4.2.4.	Sınırlayıcı ve Koruyucu Devreler	26
5.	GÜÇ SİSTEMLERİNDE KONTROL YÖNTEMLERİ	27
5.1.	Bulanık Mantık	27
5.1.1.	Bulanık Kümeler	28
5.1.2.	Üyelik Fonksiyonları	28
5.2.	Bulanık Mantık Kontrol	28
5.2.1.	Bulanıklaştırma	29
5.2.2.	Bilgi Tabanı	29
5.2.3.	Karar Verme Birimi	30
5.2.4.	Durulama	30
5.3.	Bulanık Modelleme Çeşitleri	31
5.3.1.	Mamdani Tipi Bulanık Modelleme	31
5.3.2.	Sugeno Tipi Bulanık Modelleme	32
5.4.	Kayma Kipli Kontrol	32
6.	GÜÇ SİSTEM KARARLAYICISI TASARIMI	37
6.1.	Sonsuz Baraya Bağlı Senkron Generatör Modeli ve Simülasyon Parametreleri ...	38
6.2.	Klasik Güç Sistem Kararlayıcısı Tasarımı (KGSK)	39
6.3.	Önerilen Dayanıklı Güç Sistem Kararlayıcısı Tasarımı	41
6.4.	Kullanıcı Arayüzü Tabanlı Uygulama Tasarımı	43
7.	BULGULAR	46
7.1.	Ek Kontrolör İçermeyen Sistem ile KGSK'lı Sistem Simülasyonları	46
7.2.	KGSK'lı Sistem ile Önerilen Dayanıklı GSK İçeren Sistem Simülasyonları	49
7.3.	Diğer Literatür Sonuçları ile Karşılaştırma	53
7.4.	Gradyan Düşüm Optimizasyon Yöntemi ile Termik Türbin Kontrolünün Performans İncelemesi	55
7.4.1.	Sistem Modeli	56
7.4.2.	Gradyan Düşüm Optimizasyon Yöntemi	57

7.4.3. Simulasyon Çalışması	58
8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	63
9. ÖNERİLER	64
KAYNAKLAR	65
EKLER	68
ÖZGEÇMİŞ	78

ÖZET

Bu tez, değişken şartlar altındaki tek makinalı sonsuz bara sisteminin dinamik cevabını iyileştirmek için dayanıklı ve basit güç sistem kararlayıcısı (GSK) tasarımına pratik bir yaklaşım sunmaktadır. Öncelikle senkron generatörün (SG) güç sistem kararlılık çalışmalarında kullanılan doğrusallaştırılmış modeli çıkarılmıştır. Daha sonra bu model ile birlikte kullanılmak için faz ilerletici-geriletici GSK ve dayanıklı GSK tasarımları yapılmıştır. Tezin temel amacı, sistemin farklı çalışma şartları altında kararlı ve yüksek performanslı çalışmasını sağlayacak dayanıklı bir GSK tasarlamaktır. Bu amaçla bulanık mantık denetleyici (BMD) tabanlı ve kayma kipli kontrol (KKK) prensibine göre bir GSK oluşturulmuştur. Klasik GSK'lı (KGSK) yapının sistem cevabı, önerilen kontrolörle kıyaslanmıştır. Benzetim sonuçları, önerilen GSK'nın maksimum aşma ve kısa yerleşme zamanı ile iyi bir dinamik performansa sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Güç Sistem Kararlılığı, Bulanık Mantık Denetleyici, Dayanıklı Güç Sistem Kararlayıcısı, Windup, Matlab/GUI, Gradyan Düşüm Yöntemi.

SUMMARY

Excitation Control of Synchronous Generator in Power Systems Stability

This thesis presents a practical approach to design the robust and simpler power system stabiliser (PSS) for improving the dynamic response of a single-machine infinite-bus (SMIB) system under variable conditions. First of all, the linearized model of synchronous generator is derived for power system stability studies. Then phase lead-lag PSS and proposed robust PSS are designed for use with this model. The main objective of the thesis is to design a robust PSS that provides stable and high performance for the system under different conditions. For this aim, the proposed approach is based on fuzzy logic controller (FLC) and established on the principle of sliding mode control (SMC). The responses of system with the conventional PSS (CPSS) are compared with the proposed controller. Simulation results show that the proposed PSS has a good dynamic performance with overshoot and shorter settling time.

Keywords: Power System Stability, Fuzzy Logic Controller, Robust Power System Stabiliser, Windup, Matlab/GUI, Method of Gradient Descent.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1.	Güç sisteminin temel yapısı	4
Şekil 2.2.	Güç sistemlerinde kararlılığın sınıflandırılması	5
Şekil 2.3.	Rotor açısının farklı davranışları	7
Şekil 3.1.	Üç fazlı senkron makinanın şematik gösterimi.....	9
Şekil 3.2.	Üç fazlı senkron makinanın stator ve rotor devreleri	11
Şekil 3.3.	SBSG'ün blok diyagramı	18
Şekil 3.4.	SBSG'ün OGR+GSK yapıları blok diyagramı	18
Şekil 4.1.	SG'ün faz eşdeğer devresi.....	20
Şekil 4.2.	Endüvi direnci ihmal edilen SG'ün basitleştirilmiş fazör diyagramı.....	21
Şekil 4.3.	Uyartım akımı artışının fazör diyagramına etkisi	22
Şekil 4.4.	Senkron generatörün güç-yük açısı karakteristiği	22
Şekil 4.5.	SG uyartım sisteminin blok diyagramı	23
Şekil 4.6.	IEEE ST1A uyarma sisteminin basitleştirilmiş blok diyagramı	24
Şekil 4.7.	Klasik GSK blok diyagramı	26
Şekil 5.1.	BMK'ün genel yapısı	29
Şekil 5.2.	İkinci derece bir sistem için ulaşma ve kayma modları	35
Şekil 6.1.	Doğrusallaştırılmış SBSG'ün MATLAB/simulink modeli	38
Şekil 6.2.	Ek bir kontrolün olmadığı OGR+ SBSG'ün MATLAB/simulink modeli	38
Şekil 6.3.	KGSK modeli (faz ilerletici-geriletici)	39
Şekil 6.4.	KGSK ve SBSG sisteminin MATLAB/simulink modeli	40
Şekil 6.5.	Önerilen GSK blok diyagramı	41
Şekil 6.6.	Girişe ait üyelik fonksiyonları	42
Şekil 6.7.	Çıkışa ait üyelik fonksiyonları	42
Şekil 6.8.	Giriş ve çıkışa ait kontrol yüzeyi	43
Şekil 6.9.	GUI blok diyagramı	44
Şekil 6.10.	Grafiksel kullanıcı ara yüzü	44
Şekil 6.11.	Tüm sistemin Matlab/simulink modeli	45
Şekil 7.1.	$S=1+0.03j$ pu ve $x_e=0.2$ pu için açısal hız değişimi	47
Şekil 7.2.	$S=1+0.03j$ pu ve $x_e=0.2$ pu için yük açısı değişimi	47

Şekil 7.3.	$S=0.5+0.2j$ pu ve $x_e = 0.2$ pu için açısız hız değişimi	47
Şekil 7.4.	$S=0.5+0.2j$ pu ve $x_e = 0.2$ pu için yük açısı değişimi	48
Şekil 7.5.	$S=0.5+0.2j$ pu ve $x_e = 0.4$ pu için açısız hız değişimi	48
Şekil 7.6.	$S=0.5+0.2j$ pu ve $x_e = 0.4$ pu için yük açısı değişimi	48
Şekil 7.7.	Sisteme etki eden bozucu işaret ($M_{boz} = 0.1$ pu)	49
Şekil 7.8.	1. çalışma noktası için sistem cevabı ($S=1+0.03j$, $x_e = 0.2$, $M_{boz}=0.08$ pu) ...	49
Şekil 7.9.	2. çalışma noktası için sistem cevabı ($S=1+0.03j$, $x_e = 0.4$, $M_{boz}=0.08$ pu) ...	50
Şekil 7.10.	3. çalışma noktası için sistem cevabı ($S=1+0.03j$, $x_e = 0.2$, $M_{boz}=0.09$ pu) ...	50
Şekil 7.11.	4. çalışma noktası için sistem cevabı ($S=1+0.03j$, $x_e = 0.2$, $M_{boz}=0.1$ pu)	50
Şekil 7.12.	5. çalışma noktası için sistem cevabı ($S=0.5+0.2j$, $x_e = 0.2$, $M_{boz}=0.1$ pu) ...	51
Şekil 7.13.	6. çalışma noktası için sistem cevabı ($S=0.5+0.4j$, $x_e = 0.2$, $M_{boz}=0.1$ pu)	51
Şekil 7.14.	KGSK'lı sistem cevabı ($x_e = 0.2, 0.4, 0.6$ için)	51
Şekil 7.15.	Önerilen GSK'lı sistem cevabı ($x_e = 0.2, 0.4, 0.6$ için)	52
Şekil 7.16.	$P=0.75$, $Q=0.06$, $x_e=0.2$ için açısız hız sapması değişimi	53
Şekil 7.17.	$P=0.75$, $Q=0.04$, $x_e=0.4$ için açısız hız sapması değişimi	53
Şekil 7.18.	$P=1$, $Q=0.2$, $x_e=0.2$ için açısız hız sapması değişimi	54
Şekil 7.19.	$P=1.4$, $Q=0.3$, $x_e=0.8$ için açısız hız sapması değişimi	54
Şekil 7.20.	Termik türbinli tek alanlı güç üretim ünitesi blok diyagramı	56
Şekil 7.21.	(a) Hız ve momente ait transfer fonksiyonunu (b) Güç ve momente ait transfer fonksiyonu	56
Şekil 7.22.	Hızda azalma özelliğine sahip hız regülatörünün transfer fonksiyonu	57
Şekil 7.23.	Termik türbinli güç sistemi için tasarlanan kontrolör yapısı	57
Şekil 7.24.	Tek alanlı termik türbin yapısının simulink blok diyagramı	59
Şekil 7.25.	Optimizasyon süresince hız sapmasındaki hata değişimi	59
Şekil 7.26.	Yük değişim grafiği	60
Şekil 7.27.	Hız sapma grafiği (- Önerilen Kontrolör, - - Kontrolsüz Durum)	60
Şekil 7.28.	Hız sapma grafiği (Önerilen Kontrolör)	61
Şekil 7.29.	Hız sapma grafiği (- - Önerilen Kontrolör, - PID Kontrolör)	61
Şekil 7.30.	Kontrol sinyali (- Önerilen Kontrolör, - - PID Kontrolör)	61
Şekil EK-B.1.	Kısa devre ve boşa çalışma karakteristiği	74

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1. IEEE ST1A uyarma sisteminin varsayılan parametre değerleri	25
Tablo 6.1. Seçilen çalışma noktaları	37
Tablo 6.2. Benzetim için sistem parametreleri	39
Tablo 6.3. KGSK parametreleri	40
Tablo 7.1. Maksimum Aşma (pu)	52
Tablo 7.2. Yerleşme Zamanı (sn)	52
Tablo 7.3. Maksimum Aşma (pu)	54
Tablo 7.4. Yerleşme Zamanı (sn)	55
Tablo 7.5. Ön ısıtmalı termik türbin parametreleri	59
Tablo 7.6. Optimizasyona sonucunda elde edilen parametre değerleri	60
Tablo 7.7 Maksimum Aşma (pu)	62
Tablo 7.8. Yerleşme Zamanı (sn)	62

SEMBOLLER LİSTESİ

Δw	: Açısal hız sapma değeri
w_0	: Elektriksel senkron açısal hız
$\Delta \delta$	: Yük açısı sapma değeri
$\Delta E'_q$	: Geçici hal reaktans gerisindeki EMK sapma değeri
T'_{d0}	: Senkron generatör geçici durum açık devre zaman sabiti
ΔE_{fd}	: Uyarma gerilimi sapma değeri
T_A	: Uyarma devresi zaman sabiti
K_A	: Uyarma devresi kazanç katsayısı
u_k	: Ek kontrol işareti
$K_1 \dots K_6$	: SBSG doğrusallaştırılmış dinamik model katsayıları
H	: Senkron generatör atalet sabiti
x_e	: İletim hattı empedansı
K_s	: Kararlayıcı kazancı (GSK)
T_w	: Yüksek geçiren filtre zaman sabiti (GSK)
$T_1 \dots T_4$	: Frekans karakteristiği zaman sabitleri (GSK)
T_s	: Örnekleme periyodu
r_s	: Stator sargı direnci
r_f	: Uyarma sargı direnci
r_{kd}	: d - ekseni sönüm sargı direnci
r_{kq}	: q - ekseni sönüm sargı direnci
L_{ls}	: Stator sargı kaçak indüktansı
L_{lf}	: Uyarma sargısı kaçak indüktansı
L_{lkd}	: d - ekseni sönüm sargı indüktansı
L_{lkq}	: q - ekseni sönüm sargı indüktansı
L_{md}	: d - ekseni stator sargı mıknatıslanma indüktansı
L_{mq}	: q - ekseni stator sargı mıknatıslanma indüktansı
L_{mfd}	: Uyarma sargısı mıknatıslanma indüktansı
L_{mkd}	: d - ekseni sönüm sargısı mıknatıslanma indüktansı

L_{mkq}	: q - ekseni sönüm sargısı mıknatıslanma indüktansı
T_{qd0}	: Dönüşüm matrisi
I_t	: Hat akımı
x'_d	: d - ekseni geçici reaktansı
r_e	: İletim hattı direnci
V_t	: Generatör uç gerilimi
V_∞	: Sonsuz bara gerilimi
T_m	: Tahrik momenti
T_e	: Elektriksel moment
$w(k)$	: Ağırlık vektörü
$J(w)$	: Kriter fonksiyonu
$\eta(k)$	: Öğrenme oranı

KISALTMALAR LİSTESİ

AA	: Alternatif akım
BM	: Bulanık mantık
BMD	: Bulanık mantık denetleyici
BMK	: Bulanık mantık kontrolör
CPSS	: Conventional power system stabiliser
DA	: Doğru akım
FLC	: Fuzzy logic controller
GA	: Genetik algoritma
GSK	: Güç sistem kararlayıcısı
KGSK	: Klasik güç sistem kararlayıcısı
KKK	: Kayma kipli kontrol
OGR	: Otomatik gerilim regülatörü
PSS	: Power system stabiliser
SBSG	: Sonsuz baraya bağlı senkron generatör
SG	: Senkron generatör
SMC	: Sliding mode control
SMIB	: Single-machine infinite-bus
YSA	: Yapay sinir ağları

EKLER LİSTESİ

EK-A Başlangıç değerlerini hesaplayan ve grafiksel kullanıcı arayüzü oluşturan program

EK-B Senkron makina parametrelerinin belirlenmesi

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bilgi

Bir güç sistemi, tüketiciye elektrik enerjisi sağlamak amacıyla kurulmuş; üretim, iletim, dağıtım ve koruma elemanlarını içeren büyük bir ağıdır. Gerek fiziki gerekse mali anlamda elektrik üretiminin uygun olmadığı bir bölgenin, elektrik enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla; üretim ile tüketim merkezleri arasındaki enerji alış verişini sağlayan taşıma sistemleri geliştirilmiştir. Enterkonnekte sistem adı verilen bu yapıların gelişmesiyle birlikte güç sistemlerinin de karmaşıklığı gün geçtikçe artmaktadır.

Güç talebindeki artış ve farklı üretim tesislerinin kurulması, sürekli ve kararlı enerji akışını sağlama konusunda problemler ortaya çıkarmaktadır. Özellikle sistemden, aniden yük çıkması veya yükün devreye girmesi kararlılık sorunu oluşturmaktadır. Oluşan salınımlar düşük genlikli ve frekanslı olmalarına rağmen, sistemi çok büyük kararsızlığa götürmekte ve güç sisteminin çökmesine neden olmaktadır [1,2]. Kaliteli güç akışını sağlamak amacıyla güç sistemlerinin kontrolü yoluna gidilmiştir [1].

Güç sistemlerinde kullanılan SG'lerin terminal gerilimi, uyarım kontrolü ile regüle edilmektedir. Otomatik gerilim regülatörleri (OGR) ile yapılan bu kontrol, oluşan salınımların sönümlemesinde etkin rol oynamamaktadır. Bu nedenle, uyarım sistemine ek olarak bir kontrol işareti üreten GSK'lar oluşturulmuştur [3]. GSK'lar temelde, sisteme zarar veren küçük bozucular sonrasında, generatörde oluşan düşük genlikli ve frekanslı salınımları yok etmek amacıyla destekleyici sönümleme momentini üretmektedir [3]. Uzun yıllar çalışma konusu olan güç sistemlerinin kontrolü, günümüzde de popüleritesini sürdürmektedir.

Bu çalışmada, sonsuz baraya bağlı senkron generatörün (SBSG) basitleştirilmiş doğrusal modeli kullanılmıştır. Sistem kararlılığını iyileştirmek için öncelikle KGSK tasarlanmış ve değişik çalışma şartları altında sistemin performansı incelenmiştir. Daha sonra önerilen GSK ile birlikte sistemin kararlılığı iyileştirme yoluna gidilerek, KGSK yapısıyla karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Önerilen bu yöntemle özellikle yapısı tam olarak bilinmeyen veya doğrusal olmayan sistemlerin kontrolüne pratik ve tasarım olarak basit bir yaklaşım getirilmiştir.

1.2. Tezin Amacı ve Organizasyonu

Bu tezin amacı, çeşitli bozucu etkiler sonrasında bir güç sisteminde ortaya çıkan salınımları kısa süre içerisinde kompanze etmek için dayanıklı ve basit bir güç sistem kararlayıcısı tasarlamaktır. Sistemin kararlılığını iyileştirmek için uyarma sistemine ek bir kontrol işareti üretilerek sönümleme momenti değiştirilmiştir. Bu amaçla yapılan çalışmaları kapsayan tezin organizasyonu aşağıdaki şekilde açıklanabilir.

2. Bölüm’de güç sistemlerinin yapısı ve kararlılık kavramı ele alınmıştır.

3. Bölüm’de senkron generatörler ve kararlılık çalışmalarında kullanılan senkron generatör modeli anlatılmıştır. Ardından sonsuz baraya bağlı senkron generatörün basitleştirilmiş modeli ortaya konulmuştur.

4. Bölüm’de uyarım sisteminin yapısı incelenmiş ve daha sonra uyarım sisteminin kontrolünde kullanılan uyarıcı, klasik güç sistem kararlayıcısı ve otomatik gerilim regülatörü gibi birimler tanıtılmıştır.

5. Bölüm’de önerilen dayanıklı kontrolör yapısının dayandığı bulanık mantık kontrol ve kayma kipli kontrol yöntemleri ele alınmıştır.

6. Bölüm’de simulasyon çalışmalarında kullanılacak olan sonsuz baraya bağlı senkron generatör modeli, KGSK ve önerilen dayanıklı güç sistem kararlayıcısı modeli oluşturulmuştur. Ayrıca çalışma kolaylığı sağlamak amacıyla kullanıcı arayüzü tabanlı bir uygulama geliştirilmiştir.

7. Bölüm’de oluşturulan modeller farklı çalışma şartları altında incelenmiş ve grafiksel olarak ele alınmıştır. Önerilen GSK ile KGSK yapıları kıyaslamalı olarak incelenmiştir. Aynı parametre değerlerinin kullanıldığı diğer literatür çalışmaları ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Ayrıca gradyan düşüm optimizasyon tekniği ile termik türbin kontrolünün performans incelemesi yapılmıştır.

8. Bölüm’de elde edilen değerler maksimum aşma ve yerleşme zamanı kriterleri göz önüne alınarak incelenmiştir.

9. Bölüm’de bulgular ve sonuçlar değerlendirilerek daha sonra yapılacak çalışmalara önerilerde bulunulmuştur.

2. GÜÇ SİSTEMLERİNDE KARARLILIK

2.1. Güç Sistemlerinin Yapısı

Üretim, iletim, dağıtım ve koruma elemanlarından oluşan bir güç sistemi; boyut ve yapı olarak farklılıklar gösterse de temelde benzer özelliklere sahiptirler. Güç sistemleri; sabit gerilimde çalışan üç fazlı alternatif akım (AA) sistemlerinden oluşmakta, üretim ve iletim aşamasında üç fazlı cihazlar kullanılmaktadır. Yük karakteristiği olarak bir güç sistemi; üç fazlı endüstriyel yüklerle birlikte, tek fazlı mesken ve ticari yüklerden oluşmaktadır. Üç fazlı gerilim, fazlar arasında eşit dağıtılarak dengeli üç fazlı sistem oluşturulmuştur [1].

Dünyada tüketilen elektrik enerjisinin çoğunluğu SG'ler tarafından üretilmektedir. SG'ler veya alternatörler rotor miline bağlı olan türbinden aldıkları mekanik gücü belirli bir gerilim ve frekans aralığındaki AA elektrik gücüne dönüştüren elektromekanik sistemlerdir [4]. Farklı gerilim seviyelerindeki alt sistemlerden oluşan bir güç sistemi, önemli uzaklıklarda bulunan ve geniş bir alana yayılmış tüketicilere elektrik enerjisini iletmektedir. Bir güç sistemindeki iletim ağını aşağıdaki şekilde sınıflandırmak mümkündür.

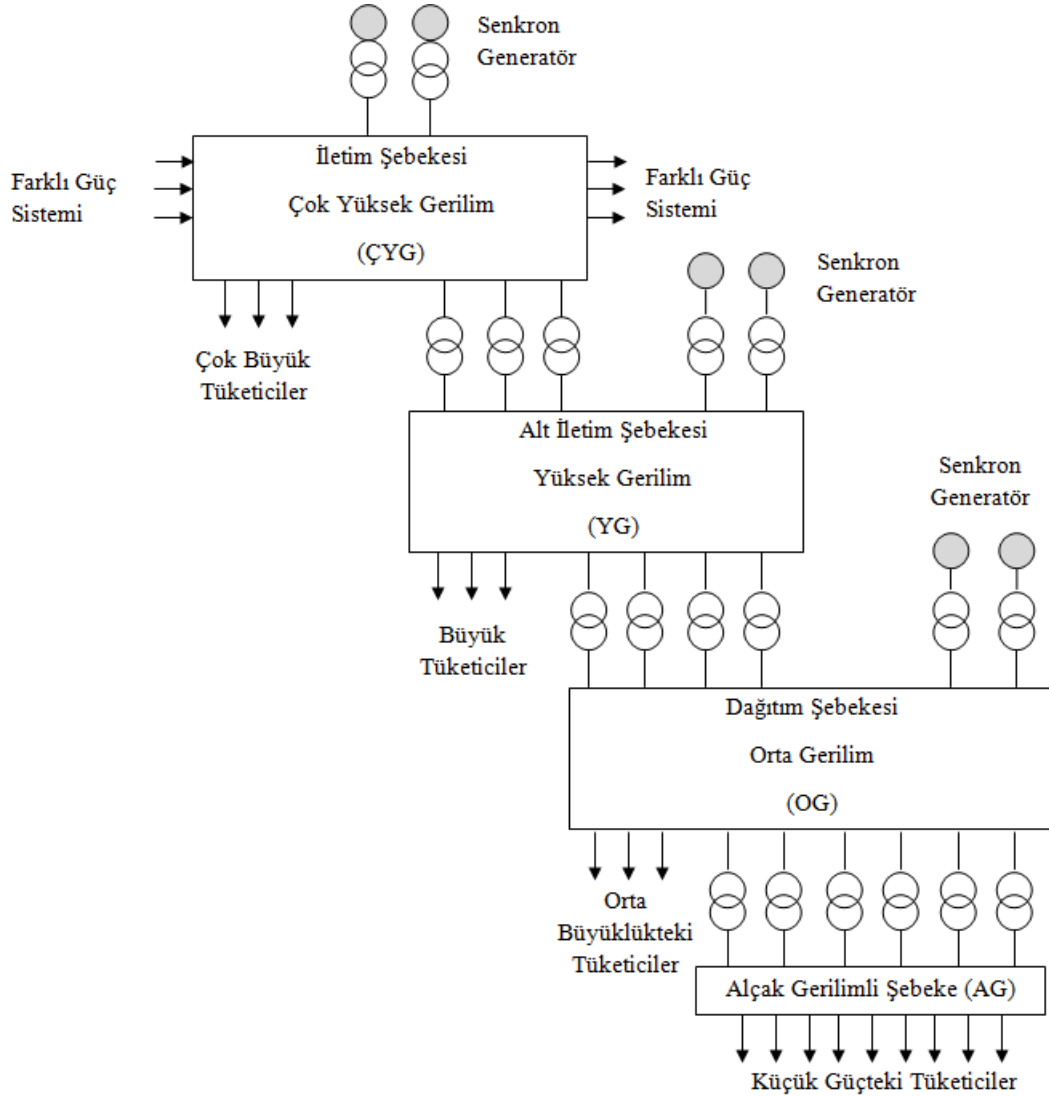
- İletim şebekesi
- Alt iletim şebekesi
- Dağıtım şebekesi

Bir iletim şebekesi, tüm önemli üretim istasyonlarını ve ana yük merkezlerini birbirine bağlar, entegre güç sisteminin omurgasını oluşturur ve en yüksek güç seviyesinde (genellikle, 230 kV ve üzeri) çalışır. Generatörler genellikle 11-35 kV aralığındaki gerilim seviyelerindedir.

Alt iletim şebekesi, iletim trafosuyla dağıtım trafosu arasındaki güç transferini sağlar. Büyük sanayi müşterilerine enerji doğrudan alt iletim şebekesinden sağlanmaktadır. Bazı sistemlerde, iletim devreleri ve alt iletim ağları arasında kesin bir sınır yoktur. Sistem genişleyip daha yüksek gerilim seviyelerine ihtiyaç duyulunca eski iletim hatları alt iletim ağlarının seviyesine düşürülür.

Dağıtım şebekeleri ise münferit müşterilere enerji iletimi konusunda son aşamayı temsil etmektedir. Temel dağıtım gerilimi genellikle 4 kV – 34.5 kV aralığındadır. Küçük

sanayi müşterileri bu gerilim seviyesinde birincil dağıtım besleyicileri tarafından beslenmektedir. İkincil dağıtım besleyicileri konut ve ticari tüketicileri 120/240 V'da beslemektedir. Yük yakınına yerleştirilen küçük üretim şebekeleri genellikle alt iletim ve dağıtım sistemine doğrudan bağlanmaktadır [1]. Bir güç sisteminin yapısı Şekil 2.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Güç sisteminin temel yapısı

Kaliteli ve güvenilir bir güç sisteminde elektrik enerjisi üretim ve iletiminin kesintisiz, istenilen frekans-gerilim aralıklarında ve maliyet olarak uygun olması gerekmektedir. Güç talebindeki artış ve farklı üretim tesislerinin kurulması, sürekli ve kararlı enerji akışını sağlama konusunda problemler ortaya çıkarmaktadır.

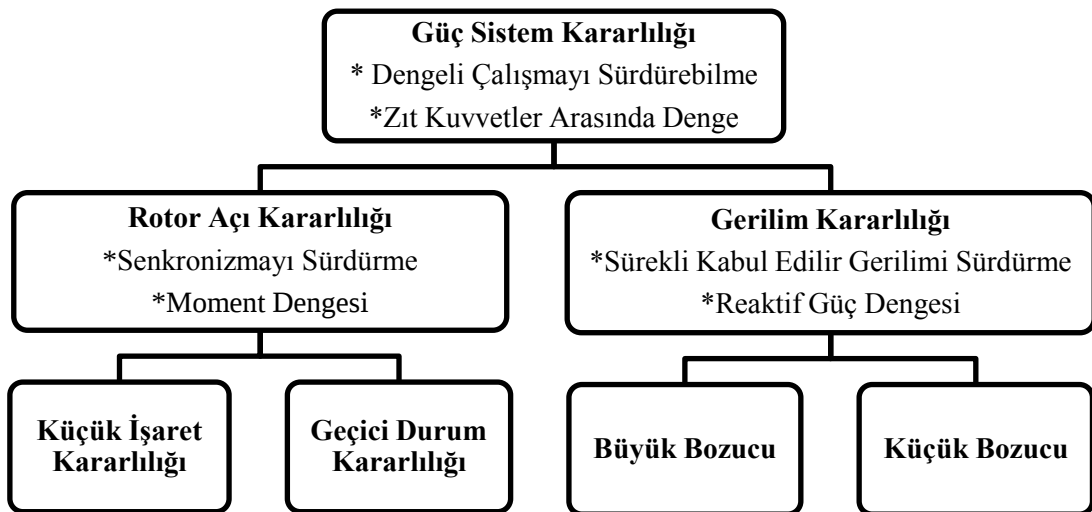
Günümüzde kısa süreli elektrik kesintilerinin çok büyük problemlere neden olduğu bilinmektedir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için SG'ler üzerinde kontrol ve koruma yöntemleri geliştirilmiştir.

2.2. Kararlılık Kavramı

Güç sistemlerinde kararlılık kavramı; sistemin, nominal çalışma koşullarında dengeli çalışma durumunda kalması ve bir bozucu etki sonrası dengeli bir çalışma noktasına tekrar geri dönmesi olarak tanımlanabilir [1].

Güç sistemi, sisteme ait mekaniksel giriş ve elektriksel çıkış değerleri arasında sürekli bir denge sağlanması şartıyla kararlı olmaktadır. Bir güç sisteminde kararlılığın bozulmasına yol açan etkenler geçici küçük ve geçici büyük bozucular olarak sınıflandırılmaktadır. Özellikle sistemden, aniden yük çıkması veya yükün devreye girmesi, uyarma akımının değişmesi ve oluşan kısa devreler kararlılık sorununu doğurmaktadır. Bozucu etki olarak adlandırılan bu olaylar sistemin mekanik ve elektriksel güç dengesini bozar. Bu durumda SG'lerin rotor açısında salınımlar meydana gelir. Eğer oluşan senkronizasyon momenti generatörlerin açısal farkını azaltıcı yönde olmazsa generatör senkronizasyondan çıkabilir.

Kararsızlık, bozucunun türüne, etkilediği sistem dinamiğine veya etki ettiği zaman aralığına göre Şekil 2.2 'deki gibi sınıflandırılabilir.



Şekil 2.2. Güç sistemlerinde kararlılığın sınıflandırılması

2.3. Rotor Açısı Kararlılığı

Rotor açısı kararlılığı güç sistemindeki birden çok senkron makinanın senkronizmayı sürdürme yeteneğidir. Bu kararlılık analizinde senkron makinanın rotor salınımları incelenmekte ve güç çıkışlarının değişimi gözlemlenmektedir. Senkron makinaların paralel çalışma şartı olan, stator gerilimleri ve akımlarının aynı frekansa sahip ve rotor mekanik hızının bu frekansla uyumlu olmasıyla, çalışan tüm senkron makinalar senkronizmada kalmaktadır.

Senkron motor, SG, bu makinalara ait reaktanslar (x_g ve x_m) ve hat reaktansından (x_h) oluşan ihmal edilmiş bir sistem göz önünde bulundurulursa, generatörden motora iletilen güç değeri, iki makinanın rotorları arasındaki δ açısal farka bağlı olarak değişmektedir. Bu güç ifadesi eşitlik (2.1)'de verilmiştir.

$$P_e = \frac{E_g E_m}{(x_m + x_g + x_h)} \sin \delta \quad (2.1)$$

Güç aktarımının büyüklüğü rotorlar arasındaki açının büyüklüğüne bağlı olarak değişmektedir. Açının sıfır olduğu durumda güç minimumken, açının en büyük değerinde güç transferi maksimuma ulaşmaktadır. Açının değişimi sinüsoidal olduğundan, 90° 'den sonra, açığı daha çok arttırmak güç iletiminde azalmaya sebep olmaktadır. Bu yüzden iki makina arasında iletilebilecek maksimum sürekli durum gücü vardır. Sistemde ikiden fazla makina olması durumunda da her makinanın açısal yer değiştirmeleri de güç akışını etkilemektedir. Rotor açısı kararlılığı küçük işaret kararlılığı ve geçici durum kararlılığı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

2.3.1. Küçük İşaret Kararlılığı

Güç sisteminin küçük bozulmalar altında senkronizasyonu koruyabilme yeteneğine küçük işaret kararlılığı denilmektedir. Bu bozulmanın temel sebepleri, senkronizasyon momentinin eksikliğinden dolayı rotor açısındaki sürekli artış veya sönüm momenti eksikliğinden dolayı rotor açısı salınımlarının genliğinin artmasıdır.

Küçük işaret kararlılığını dinamik hal ve sürekli hal kararlılığı olarak ayırabiliriz. Dinamik hal kararlılığı, kısa süreli geçici olay sonrasında sistemin bozucu etkiye cevabıdır.

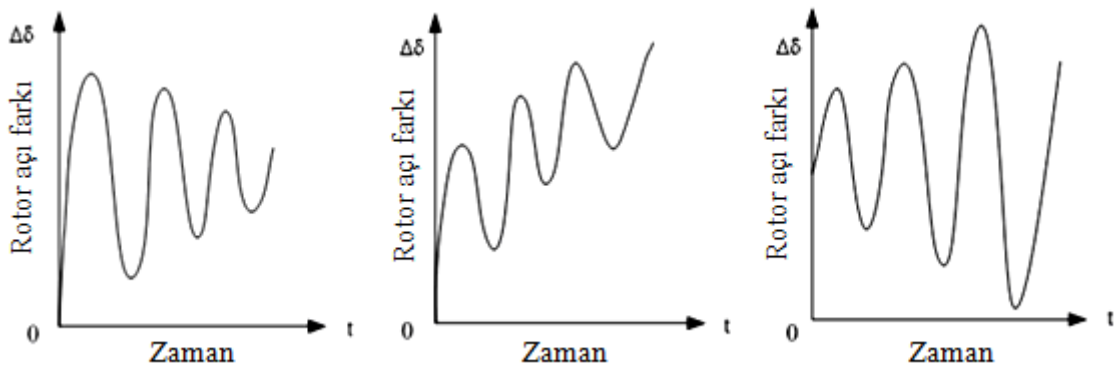
Geçici olay sonrası devreye giren hız regülatörleri mekanik giriş enerjisini artırarak veya azaltarak, mekanik güç ile elektriksel güç dengesini sağlamaktadırlar. Sürekli hal kararlılığı da yük değişimleri ve küçük bozucu etkilere sistemin daha uzun sürede verdiği cevaptır.

Kararlılığın temel şartı, bozucular geçici veya kalıcı olsa da sistemin bir süre sonra tekrar işletme koşullarında çalışmayı sürdürmesidir. Bozucu sonrası çalışma noktası başlangıç çalışma noktası yakınlarında olduğundan doğrusal olmayan sistem doğrusallaştırılarak sistem modeli oluşturulur.

2.3.2. Geçici Durum Kararlılığı

Güç sisteminin büyük bir bozucu etki sonrası senkronizasyonu koruma yeteneğine geçici durum kararlılığı denilmektedir. Enerji iletim hatlarındaki kısa devreler, ani yük değişimleri gibi bozucu etkiler ile senkronizasyon kaybı söz konusu olabilir. Faz-toprak, iki faz-toprak ve üç faz toprak kısa devrelerinin incelendiği geçici durum kararlılığı analizinde bozucu etkiden sonraki birkaç saniyelik süre önemlidir. Bu süre boyunca, zaman sabiti yüksek mekanik regülatörlerin devreye girmediği kabul edilir [5].

Durum değişkenlerinde oluşan farklar büyük olduklarından dolayı sistem modeli doğrusallaştırılamaz. Bozucu sonrası yeni çalışma durumunun kararlılığı, rotor açısının zamana göre değişimine bakılarak oluşturulur ve generatörlerin rotor açılarının ilk salınımları oldukça önemlidir. Rotor açısının farklı davranışları Şekil 2.3’de verilmiştir [1].



Şekil 2.3. Rotor açısının farklı davranışları

2.4. Gerilim Kararlılığı

Sistemin normal çalışma şartları altında veya bir bozucu sonrasında tüm bara gerilimlerinin kabul edilebilir limitler içinde kalma yeteneğine gerilim kararlılığı denilmektedir. Sistemdeki bir barada, aynı baraya giren reaktif güç artarken, bara gerilim genliği azalırsa sistem gerilim olarak kararsızdır. Gerilim düşüşü basit bir gerilim kararsızlığından daha karmaşıktır ve genellikle güç sisteminin belli bir kısmında düşük gerilim profiline yol açan gerilim kararsızlığına eşlik eden olaylar sırasının sonuçlarıdır.

Sistemdeki bozulma, yük talebindeki artış ya da değişim, artan ve kontrol edilemeyen gerilim düşüşüne neden olursa, sistemde gerilim kararsızlığı meydana gelmektedir. Kararsızlığa neden olan temel faktör güç sisteminin reaktif güç talebini karşılamadaki yetersizliğidir. Problemin asıl nedeni genellikle aktif ve reaktif gücün iletim şebekesi endüktif reaktanslarından akarken meydana gelen gerilim düşüşüdür [1].

Gerilim kararsızlığı genellikle aç ve gerilim kararsızlıkları ile birlikte meydana gelmektedir. Ayrıca aç kararlılığı ve gerilim kararlılığı arasındaki fark uygun tasarım ve çalışma şartlarını geliştirmek için problemlerin altındaki nedenleri anlamak için önemlidir. Bara gerilimindeki sürekli düşme, rotor açılarının nominal çalışma durumuna getirilmesi ile ilgilidir. Örneğin iki makina grubu arasındaki rotor açıları 180° 'ye yaklaşırken veya bunu aştığında makinalardaki kademeli senkronizma kaybı, şebekenin ortalarında çok düşük gerilimlere neden olacaktır. Tersine, rotor açısı kararlılığının konu olmadığı yerde oluşan devamlı düşen gerilim durumu gerilim kararsızlığı ile ilgilidir [6].

Gerilim kararlılığını büyük bozulma gerilim kararlılığı ve küçük bozulma gerilim kararlılığı olarak iki alt sınıfa ayırmak faydalıdır. Büyük bozulma gerilim kararlılığı, sistemin sistem arızası, yük kaybı ya da üretim kaybı gibi büyük bozulmalardan sonra gerilimi kontrol edebilme yeteneğidir. Küçük bozulma (ya da küçük işaret) gerilim kararlılığı yükteki değişimler gibi küçük bozulmalardan sonra sistem gerilimini kontrol edebilme yeteneğidir [6].

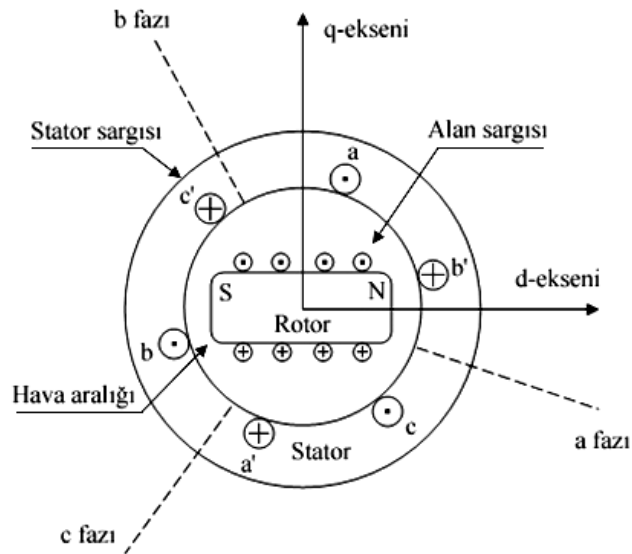
3. SENKRON GENERATÖRLER

3.1. Genel Bilgi

SG'ler milinden aldığı mekanik enerjiyi AA elektrik enerjisine dönüştüren elektrik makinalarıdır. İmalat maliyeti olarak asenkron makinalardan daha yüksek olan SG'ler, yüksek verimleri ve reaktif güç üretiminden dolayı büyük güç değerlerinde önemli avantajlara sahiptirler.

Temel olarak rotor (alan) ve stator (endüvi) sargılarını içeren SG'lerde; rotor sargısına DA uygulanıp, herhangi bir hareket kaynağı ile döndürülerek rotor manyetik alanı oluşturulur. Bu alan, aralarında 120° 'lik fark olan stator sargılarını keserek üç fazlı gerilimlerin indüklenmesini sağlar. SG'lerin ihtiyacı olan mekanik enerji, rotor miline bağlı buhar türbini, su türbini veya dizel motorla sağlanır.

SG'ün stator sargılarında indüklenen gerilimin frekansı olan elektriksel frekans, mekanik dönme hızıyla (rotor hızı) senkron şekilde değişmektedir. Senkron makinanın enerji dönüşümü yapabilmesi için uyarma sargısının oluşturduğu rotor manyetik alanı stator akımlarının oluşturduğu stator manyetik alanı ile aynı hızda dönmelidir. Manyetik alanın mekanik hızı veya rotor hızı, elektriksel frekansla doğru orantılı olup kutup sayısı ile ters orantılıdır. Üç fazlı senkron makinanın şematik gösterimi Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Üç fazlı senkron makinanın şematik gösterimi

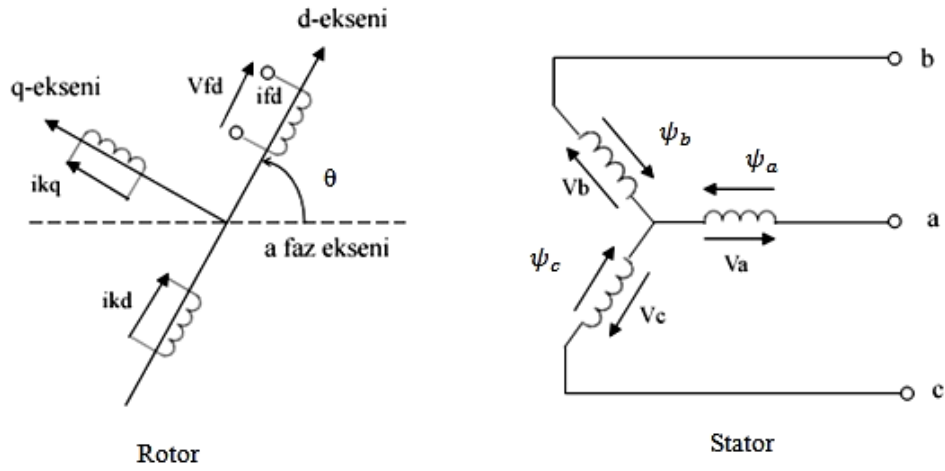
Rotoru büyük bir elektromıknatıs olan SG'ler, yuvarlak veya çıkık kutuplu olmak üzere iki şekilde üretilmektedir. Çıkık kutuplu rotorlar dört veya daha fazla sayıda imal edilirken, yuvarlak kutuplu rotorlar ise iki ve dört kutuplu olarak imal edilirler. Rotor, girdap akımı kayıplarını düşürmek için ince laminasyonlardan oluşmuştur. Yüksek hızlara sahip olan turbo generatörler, yuvarlak kutuplu olup rotor çapı küçük ve eksenel boyu uzun olarak imal edilir. Buhar türbinleri tarafından tahrik edilen turbo generatörler yaklaşık olarak 3600 d/d hızlara çıkarken, hidroelektrik santrallerinde kullanılan ve su türbinleri tarafından tahrik edilen çıkık kutuplu generatörler ise 300-500 d/d hızlara ulaşmaktadır.

Senkron makinanın rotorunda uyarma sargılarına ilave olarak güç sistemi salınımlarının sönümlemesinde yardımcı olması amacı ile kendi üzerine kısa devre edilmiş sönüm sargıları bulunur. Sürekli sinüsoidal çalışmada, SG rotor ve stator döner alanı aynı hızla döndüğünden dolayı, sönüm sargılarının etkisi yoktur. Ancak bozucu etki sonrasında senkron makinada iki döner alan arasında hız farkı oluşur. Bu durumda sönüm sargıları senkronizasyonu koruyacak yönde iki döner alan arasındaki hız farkı ile orantılı senkronlayıcı elektriki moment üretir [9-12].

3.2. Senkron Generatör Modeli

Bu bölümde SG'ün matematiksel modeli elde edilerek, durum uzay denklemleri çıkarılmıştır. Güç sistemlerinin kararlılık analizi yapılırken, SG'ün matematiksel modelinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda SG modellenirken, rotorunda uyarma sargısına ek olarak d - q eksenlerinde sönüm (amortisör) sargısını içerdiği kabul edilmektedir.

Oluşturulan modelde, aralarında 120° 'lık fark olan 3 adet stator sargısı, 1 adet uyarma sargısı ve 2 adet sönüm sargısı bulunmaktadır. Bir SG'de sargılar arası manyetik ilişki rotorun konumuna bağlıdır. Senkron makinanın stator ve rotor devrelerini gösteren matematiksel model Şekil 3.2'de gösterilmiştir [1].



Şekil 3.2. Üç fazlı senkron makinanın stator ve rotor devreleri

Senkron makinanın stator ve rotor gerilimleriyle akı, akım ve sargı direnci arasındaki bağıntı eşitlik (3.1)'deki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} V_s \\ V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_s & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Burada pozitif olan stator akım yönü generatör uçlarından dışarı doğrudur. (3.1) eşitliğinde,

$$V_s = [V_a \quad V_b \quad V_c]^t \quad (3.2)$$

$$V_r = [V_{fd} \quad V_{kd} \quad V_{kq}]^t \quad (3.3)$$

$$i_s = [i_a \quad i_b \quad i_c]^t \quad (3.4)$$

$$i_r = [i_{fd} \quad i_{kd} \quad i_{kq}]^t \quad (3.5)$$

$$r_s = \text{diag}[r_a \quad r_b \quad r_c] \quad (3.6)$$

$$r_r = \text{diag}[r_{fd} \quad r_{kd} \quad r_{kq}] \quad (3.7)$$

$$\psi_s = [\psi_a \quad \psi_b \quad \psi_c]^t \quad (3.8)$$

$$\psi_r = [\psi_{fd} \quad \psi_{kd} \quad \psi_{kq}]^t \quad (3.9)$$

Sargı akıları ψ_s ve ψ_r eşitlik (3.10)'daki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ [L_{sr}]^t & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Burada L_{ss} matrisi stator sargılarının öz indüktansları ve stator sargıları arasındaki ortak indüktanslardan oluşmaktadır.

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_0 - L_{ms} \cos 2\theta_r & -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2\left(\theta_r - \frac{\pi}{3}\right) & -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2\left(\theta_r + \frac{\pi}{3}\right) \\ -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2\left(\theta_r - \frac{\pi}{3}\right) & L_{ls} + L_0 - L_{ms} \cos 2\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2\left(\theta_r - \frac{\pi}{3}\right) \\ -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2\left(\theta_r + \frac{\pi}{3}\right) & -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2\left(\theta_r + \frac{\pi}{3}\right) & L_{ls} + L_0 - L_{ms} \cos 2\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Aynı şekilde L_{rr} matrisi rotor sargılarının öz indüktansları ve alan sargısı ile d-ekseni sönüm sargısı arasındaki ortak indüktansı gösteren katsayılarından oluşur. Alan sargısı ile q-ekseni ve d-q eksenleri birbirine dik olduğundan bu sargılar arasındaki ortak indüktans sıfırdır.

$$L_{rr} = \begin{bmatrix} L_{lf} + L_{mfd} & L_{fdkd} & 0 \\ L_{kd fd} & L_{lkd} + L_{mkd} & 0 \\ 0 & 0 & L_{lkq} + L_{mkq} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

L_{sr} matrisi ise stator-rotor sargıları arasındaki ortak indüktanslardan oluşur.

$$L_{sr} = \begin{bmatrix} L_{sfd} \sin \theta_r & L_{skd} \sin \theta_r & L_{skq} \cos \theta_r \\ L_{sfd} \sin \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{skd} \sin \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{skq} \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{sfd} \sin \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{skd} \sin \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{skq} \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

İndüktans matrislerini oluşturan katsayılar, rotor açısı θ_r 'ye bağlı olduğu için denklem (3.13) ile verilen stator ve rotor gerilim değerlerinin hesaplanmasını zorlaştırmaktadır. Zamana bağlı olarak değişen değerlerin olması her hesaplama için matrisi oluşturan katsayıların tekrar bulunması demektir. Bu sorunları ortadan kaldırmak ve elektrik makinalarının analizini kolaylaştırmak için park dönüşümü olarak adlandırılan bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda stator sargı gerilim, akım ve akı değişkenleri

rotora kilitli kabul edilen d ve q eksenleri olarak adlandırılan hayali 2 eksen üzerindeki izdüşümlerinin hesaplanması ile gerçekleştirilir. Değişken katsayılı indüktans matrislerinin sabit katsayılı matrislere dönüşmesini sağlar. Senkron makinalarda zamanla değişen katsayılarla sahip indüktans matrislerinin sabit katsayılı matrislere dönüştürülebilmesi için rotora kilitli referans eksenin kullanılması gerekmektedir [11]. R.H.Park tarafından önerilen dönüşüm matrisi (3.14) ifadesinde verilmiştir.

$$T_{qd0}(\theta_r) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta_r) & \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$[T_{qd0}(\theta_r)]^{-1} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin(\theta_r) & 1 \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$d - q$ bileşenleri cinsinden SG için toplam anlık güç;

$$P_{dq0} = P_{abc} = \frac{3}{2} (v_q i_q + v_d i_d + 2v_0 i_0) \quad (3.16)$$

olarak yazılabilir. (3.16) ifadesinde $3/2$ katsayısı güç sakınımını sağlamak için kullanılmıştır. Park dönüşümündeki bazı katsayılar değiştirilerek güç sakınımını sağlayan dönüşüm matrisi ve tersi aşağıda verilmiştir.

$$T_{qd0}(\theta_r) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta_r) & \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$[T_{qd0}(\theta_r)]^{-1} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r & \sqrt{1/2} \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \sqrt{1/2} \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \sqrt{1/2} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Bu iki matrisin ortogonal olması, güç sakınımını sağladığını gösterir. Stator gerilim, akım ve akı denklemleri için d - q dönüşümü aşağıdaki gibi elde edilir [9-11].

$$V_{qd0} = T_{qd0\theta(r)} V_s \quad (3.19)$$

$$V_{qd0} = [V_q \quad V_d \quad V_0]^t \quad (3.20)$$

$$i_{qd0} = T_{qd0\theta(r)} i_s \quad (3.21)$$

$$i_{qd0} = [i_q \quad i_d \quad i_0]^t \quad (3.22)$$

$$\psi_{qd0} = T_{qd0\theta(r)} \psi_s \quad (3.23)$$

$$\psi_{qd0} = [\psi_q \quad \psi_d \quad \psi_0]^t \quad (3.24)$$

$$V_{qd0} = -T_{qd0} r_s T_{qd0}^{-1} i_{qd0} + T_{qd0} \left[\frac{d}{dt} \quad T_{qd0}^{-1} \right] \psi_{qd0} \quad (3.25)$$

Stator sargı dirençleri eşit kabul edilirse, (3.25) ifadesinin ilk terimi aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$T_{qd0} r_s T_{qd0}^{-1} i_{qd0} = r_s i_{qd0} \quad (3.26)$$

(3.25) ifadesinin ikinci terimi ise aşağıdaki gibi yazılır.

$$T_{qd0} \left[\frac{d}{dt} \quad T_{qd0}^{-1} \right] \psi_{qd0} = T_{qd0} \left[\left(\frac{d}{dt} \quad T_{qd0}^{-1} \right) \psi_{qd0} + T_{qd0}^{-1} \frac{d}{dt} \psi_{qd0} \right] \quad (3.27)$$

(3.27) ifadesinin ilk terimi aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$\left[\frac{d}{dt} \quad T_{qd0}^{-1} \right] \psi_{qd0} = w_r \begin{bmatrix} -\sin \theta_r & \cos(\theta_r) & 0 \\ -\sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \\ -\sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \end{bmatrix} \psi_{qd0} \quad (3.28)$$

$w_r = d\theta_r/dt$ olmak üzere,

$$T_{qd0} \left[\frac{d}{dt} \quad T_{qd0}^{-1} \right] \psi_{qd0} = w_r \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \psi_{qd0} = \begin{bmatrix} w_r \lambda_d \\ -w_r \lambda_q \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

olarak elde edilir. Eşitlik (3.27)'nin son terimi aşağıdaki gibi düzenlenir.

$$T_{qd0} T_{qd0}^{-1} \frac{d}{dt} \psi_{qd0} = \frac{d}{dt} \psi_{qd0} \quad (3.30)$$

(3.26), (3.29) ve (3.30) ifadelerinden rotor referans çevresine dönüştürülen SG stator gerilim ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$V_{qd0} = -r_s i_{qd0} + \begin{bmatrix} w_r \lambda_d \\ -w_r \lambda_q \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \psi_{qd0} \quad (3.31)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{qd0} \\ \psi_{qdr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{qd0} L_{ss} T_{qd0}^{-1} & T_{qd0}^{-1} L_{sr} \\ [L_{sr}]^t T_{qd0}^{-1} & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{qd0} \\ i_{qdr} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Buna göre senkron makinanın rotor referans çevresine indirgenmiş sargı denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$V_q = -r_s i_q + w_r \lambda_d + \frac{d\lambda_q}{dt} \quad (3.33)$$

$$V_d = -r_s i_d - w_r \lambda_q + \frac{d\lambda_d}{dt} \quad (3.34)$$

$$V_0 = -r_s i_0 + \frac{d\lambda_0}{dt} \quad (3.35)$$

$$V'_{fd} = r'_{fd} i'_{fd} + \frac{d\lambda'_{fd}}{dt} \quad (3.36)$$

$$V'_{kd} = r'_{kd} i'_{kd} + \frac{d\lambda'_{kd}}{dt} \quad (3.37)$$

$$V'_{kq} = r'_{kq} i'_{kq} + \frac{d\lambda'_{kq}}{dt} \quad (3.38)$$

$$\lambda_q = -(L_{ls} + L_{mq})i_q + i'_{kq} \quad (3.39)$$

$$\lambda_d = -(L_{ls} + L_{md})i_d + L_{md}i'_{fd} + L_{md}i'_{kd} \quad (3.40)$$

$$\lambda_0 = -L_{ls} i_0 \quad (3.41)$$

$$\lambda'_{fd} = L_{md}i_d + (L'_{lfd} + L_{md})i'_{fd} + L_{md}i'_{kd} \quad (3.42)$$

$$\lambda'_{kd} = -L_{md}i_d + L_{md}i'_{fd} + (L'_{lkd} + L_{md})i'_{kd} \quad (3.43)$$

$$\lambda'_{kq} = -L_{mq}i_q + (L'_{lkq} + L_{md})i'_{kq} \quad (3.44)$$

$$L_d = L_{md} + L_{ls}, L_q = L_{mq} + L_{ls} \quad (3.45)$$

Senkron generatör parametrelerinin belirlenmesinde yapılması gereken deneyler EK-B'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

3.3. Kararlılık Çalışmalarında Kullanılan Senkron Generatör Modeli

Bir güç sisteminde, kararlılık çalışmalarında kullanılan SG'ün matematiksel modelinin iyi bilinmesi gerekir. Bu tür çalışmalarda, generatör gücünün 10 katı veya daha büyük güçte olan ve gerilimi sabit kabul edilen güç sisteminin beslendiği varsayılır ve SG'ün bağlandığı baraya da sonsuz güçlü bara denir [13]. Yapılan çalışmalarda birçok farklı SG modeli kullanılmıştır. Ancak güç sistem kararlılık çalışmalarında en yaygın olarak kullanılan SG modeli uyarma sargılarının da dikkate alındığı 3. derece modeldir. Burada bazı kabuller yapılarak SG için bölüm 3.2'de verilen detaylı denklemler aracılığıyla 3. derece model oluşturulacaktır [1,2,9].

1. Stator sargı dirençleri ihmal edilir.
2. Sönüm sargılarının etkisi ihmal edilir.

3. Bozucu durumunda generatörün açısal hızının değişmediği kabul edilir.
4. Stator akı değişimleri ihmal edilir.

Bölüm 3.2’de verilen denklemler yardımıyla, SG için 3. dereceden basitleştirilmiş modele ait denklemler aşağıdaki gibi elde edilir.

$$T_e = E'_q i_q + (x_q - x'_d) i_d i_q \quad (3.46)$$

$$i_q = \frac{V_\infty \sin \delta}{x_e + x_q} \quad (3.47)$$

$$i_d = \frac{E'_q - V_\infty \sin \delta}{x_e + x'_d} \quad (3.48)$$

$$\Delta E'_q = \frac{K_3 \Delta E_{fd} - K_3 K_4 \Delta \delta}{1 + s K_3 T'_{d0}} \quad (3.49)$$

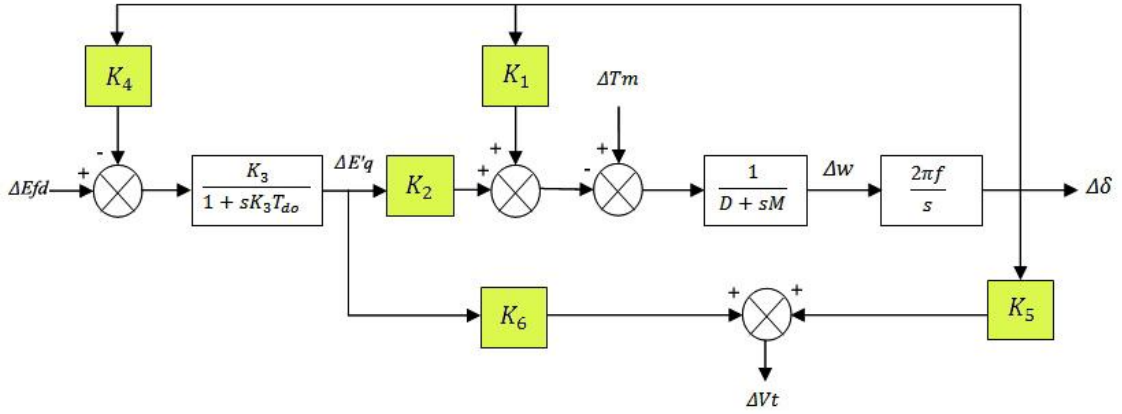
$$\Delta w = \frac{1}{2Hs} (\Delta T_m - \Delta T_e - D_w \Delta w) \quad (3.50)$$

$$\Delta \delta = \frac{w_b}{s} \Delta w \quad (3.51)$$

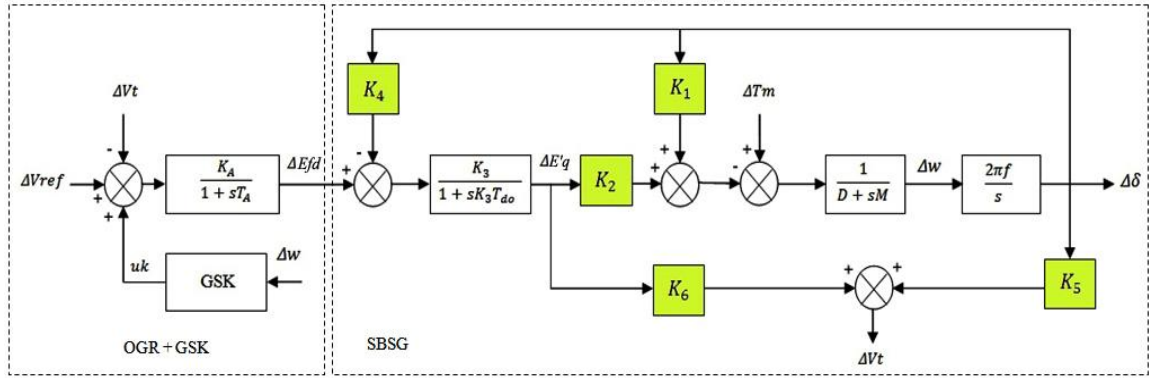
3.4. Sonsuz Baraya Bağlı Senkron Generatörün Basitleştirilmiş Doğrusal Modeli

Büyük güçlü sistemlerde hesaplama karmaşıklığının yaşanmaması için SG’ün modellenmesinde basitleştirilmeye gidilmiştir [1,14]. Güç sistemlerinin kararlılık çalışmalarında genellikle SBSG’ün basitleştirilmiş doğrusal modeli kullanılmaktadır [1,2,7]. Şekil 3.3’de sonsuz barayı besleyen SG’ün blok diyagramı, Şekil 3.4’de ise sistemin OGR ve GSK eklenmiş hali verilmiştir [1,2,7].

Güç sistemlerinin dinamik kararlılık incelemelerini kolaylaştıran blok diyagramı yaklaşımı ilk olarak Heffron ve Phillips [27] tarafından oluşturulmuş, ardından De Mello ve Concordia [7] tarafından geliştirilmiştir.



Şekil 3.3. SBSG'nin blok diyagramı



Şekil 3.4. SBSG'nin OGR+GSK yapılı blok diyagramı

Şekil 3.3 kullanılarak sisteme ait doğrusallaştırılmış denklemler aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta \dot{w} = -\frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_2}{2H} \Delta E'_q \quad (3.52)$$

$$\Delta \dot{\delta} = w_0 \Delta w \quad (3.53)$$

$$\Delta E'_q = -\frac{K_4}{T'_{d0}} \Delta \delta - \frac{1}{T'_{d0} K_3} \Delta E'_q + \frac{1}{T'_{d0}} \Delta E_{fd} \quad (3.54)$$

$$\Delta E_{fd} = -\frac{K_A K_5}{T_A} \Delta \delta - \frac{K_A K_6}{T_A} \Delta E'_q - \frac{1}{T_A} \Delta E_{fd} + \frac{K_A}{T_A} u_k \quad (3.55)$$

Bu denklemlerin durum uzay formunda düzenlenmiş halleri aşağıda verilmiştir.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.56)$$

$$x(t) = [\Delta w \quad \Delta \delta \quad \Delta E'_q \quad \Delta E_{fd}]^T \quad (3.57)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-K_1}{2H} & \frac{K_2}{2H} & 0 \\ 2\pi f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-K_4}{T'_{d0}} & \frac{-1}{T'_{d0}K_3} & \frac{1}{T'_{d0}} \\ 0 & \frac{-K_A K_5}{T_A} & \frac{-K_A K_6}{T_A} & \frac{-1}{T_A} \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{K_A}{T_A} \end{bmatrix}^T \quad (3.59)$$

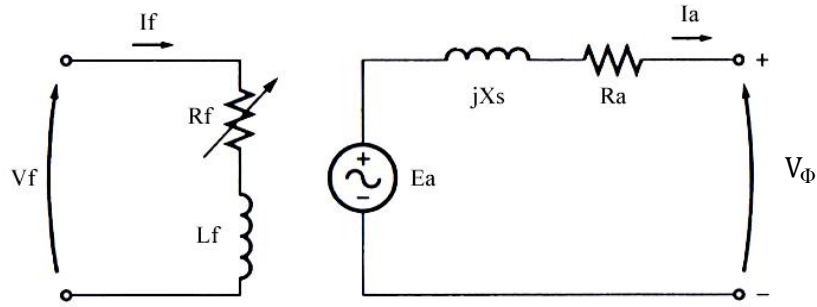
Doğrusallaştırılmış olan bu modele ek olarak OGR yapısı da eklenmiştir. Bloklarda bulunan $K_1 - K_6$ katsayılarının, çalışma şartlarına ait olan sonsuz bara gerilimi, yük açısı, senkron indüktans gerisindeki gerilim ve rotora indirgenmiş stator akımlarının $d - q$ bileşenlerinin hesaplanması gerekmektedir. Başlangıç şartları ve K katsayıları, yazılan MATLAB/mfile ve oluşturulan MATLAB/GUI aracılığıyla hesaplanmaktadır.

Doğrusallaştırılmış modelde kullanılan K katsayıları, başlangıç şartları ve çalışma noktasıyla değişmektedir. Farklı çalışma noktaları için K katsayılarındaki değişim sistemin performansını da etkileyeceğinden, tasarlanacak olan uyarma kontrolörünün veya GSK'nın sistem şartlarına uyumlu ve bozuculara karşı dayanıklı olması gerekmektedir.

4. UYARTIM SİSTEMLERİ VE KONTROLÜ

4.1. Uyartım Sisteminin Yapısı

Uyartım sistemleri SG'ün mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilmesi için uyarma sargılarından akması gereken akımı üreten sistemlerdir. Bu sistemlerde, alan gerilimi ve akımının kontrolüyle, uç gerilimi, reaktif güç değişimi ve kararlılık kontrolü yapılmaktadır. Uyartım akımının değişimiyle, hangi büyüklüklerin değiştiğini incelemek için SG'ün Şekil 4.1'de verilen faz eşdeğer devresi ve basitleştirilmiş fazör diyagramı üzerinde çalışmak uygun olacaktır.



Şekil 4.1. SG'ün faz eşdeğer devresi

SG'ün gerçek elektriksel çıkış gücü, hat büyüklükleri cinsinden eşitlik (4.1)'de, faz büyüklüklerin bağlı olarak da eşitlik (4.2)'de verilmiştir. Aynı şekilde reaktif çıkış gücünün hat büyüklükleri ve faz büyüklükleri cinsinden değerleri eşitlik (4.3) ve (4.4)'te verilmiştir [4].

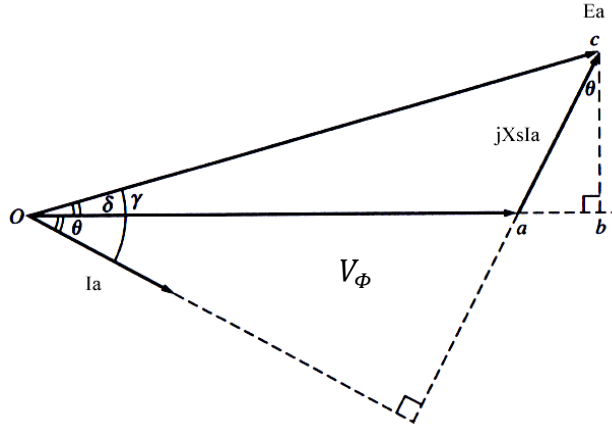
$$P_{\text{çıkış}} = \sqrt{3}V_T I_L \cos\theta \quad (4.1)$$

$$P_{\text{çıkış}} = 3V_\phi I_a \cos\theta \quad (4.2)$$

$$Q_{\text{çıkış}} = \sqrt{3}V_T I_L \sin\theta \quad (4.3)$$

$$Q_{\text{çıkış}} = 3V_\phi I_a \sin\theta \quad (4.4)$$

Endüvi direncinin ihmal edilmesiyle oluşturulan SG'ün basitleştirilmiş fazör diyagramı (Şekil 4.2) kullanılarak, çıkış gücünü yaklaşık olarak veren güç denklemi çıkarılmaktadır.



Şekil 4.2. Endüvi direnci ihmal edilen SG'ün basitleştirilmiş fazör diyagramı

$$I_a \cos \theta = \frac{E_a \sin \theta}{X_s} \quad (4.5)$$

$$P = \frac{3V_\phi E_a \sin \delta}{X_s} \quad (4.6)$$

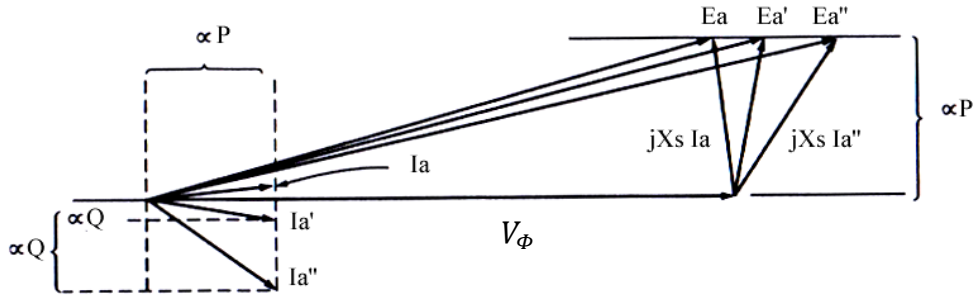
Eşitlik (4.6), SG tarafından üretilen gücün V_ϕ ile E_a arasındaki δ açısına bağlı olduğunu gösterir. δ açısı makinanın moment açısı olarak bilinir. Maksimum güç, generatörün $\delta = 90^\circ$ lik çalışma açısında üretilmektedir. $\delta = 90^\circ$ de, $\sin \delta = 1$ ve

$$P_{max} = \frac{3V_\phi E_a}{X_s} \quad (4.7)$$

dir. Bu denklem ile verilen maksimum güç değeri aynı zamanda generatörün statik kararlılık limitidir.

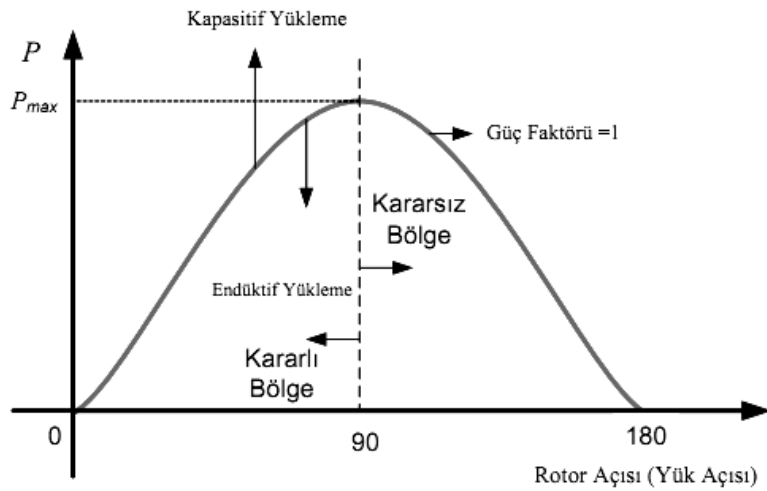
SG'ün sisteme Q reaktif gücünü sağlaması uyarma akımının ayarlanmasıyla yapılmaktadır. Uyarma akımı ayarıyla reaktif güç üretiminde gücün sabit kalma gerekliliği vardır. Bir SG'ün tahrik kaynağı verilen herhangi bir regülatör sistemi için sabit bir moment-hız karakteristiğine sahiptir. Generatör sonsuz güçlü şebekeye bağlandığından hızı değiştirilemez. Generatörün hızı değişmez ve regülatörün ayar noktası değiştirilmezse generatörden sağlanan güç sabit kalmak zorundadır [4].

Uyarma akımı değiştirilirken, sağlanan güç sabit olursa, fazör diyagramında güçle orantılı olan büyüklükler $I_a \cos \theta$ ve $E_a \sin \delta$ değişmez. Uyarma akımı arttırıldığında, ϕ akısı artar ve dolayısıyla E_a artar. E_a artarsa, $E_a \sin \delta$ sabit kalmak zorunda olduğundan bu durumda E_a fazörü Şekil 4.3'de gösterildiği gibi sabit güç hattı boyunca kayar. V_ϕ sabit olduğundan $jX_s I_a$ açısı gösterildiği gibi değişir ve dolayısıyla I_a 'nın genliği ve açısı da değişmiş olur. Sonuç olarak Q ile orantılı mesafe $I_a \sin \theta$ artmaktadır. Diğer bir değişle, sonsuz güçlü bir şebekeyle paralel olarak çalışan bir SG'de uyarma akımı artışı generatörün reaktif güç çıkışını artırır [4].



Şekil 4.3. Uyarım akımı artışının fazör diyagramına etkisi

Kısacası bir generatör, sonsuz güçlü bir şebeke ile paralel çalıştığında; generatördeki uyarma akımı sisteme generatör tarafından sağlanan reaktif gücü kontrol eder. Senkron generatörün güç-yük açısı karakteristiği Şekil 4.4'de verilmiştir.

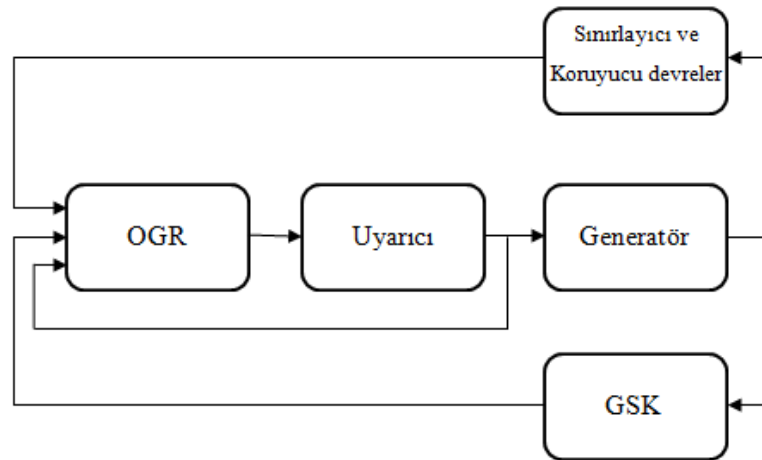


Şekil 4.4. Senkron generatörün güç-yük açısı karakteristiği

OGR olmayan senkron generatörlerde çalışma noktası yavaş değiştiğinden dolayı E_a sabit kabul edilirse, aktif güç sadece moment (yük) açısı ile değişim gösterir. Senkron makinelerde δ ; sıfırdan $\pi/2$ 'ye kadar değişik değerleri alabilir. Yük açısı δ 'nın $\pi/2$ 'den büyük değerler alması halinde senkron makine kararlı olarak çalışmaz. Buradan $\sin\delta$ 'nın sıfır ile bir arasında değişeceği anlaşılır. Sonuç olarak; bir senkron makinenin moment ve gücü, yük açısının sinüsü ile orantılıdır ve δ 'nın ayarlanması ile kontrol edilirler. Kararlılık çalışmalarında generatörün statik kararlılık limitine göre baz değer olarak aktif gücün değeri 1 alınırken, reaktif güç de buna bağlı olarak değişir.

4.2. Uyarım Sisteminin Kontrolü

Uyarım sisteminin kontrolü uzun yıllar çalışma konusu olmuş ve yeni yöntemlerle gelişerek günümüze kadar gelmiştir. Uyarım kontrol sistemi senkron makina ve uyarım sistemini içeren geri beslemeli kontrol sistemidir. İlk yapılan çalışmalarda kontrol sisteminde süreklilik ve hız konusunda sıkıntılar yaşanırken, günümüz modern kontrol teknikleriyle bu sorun ortadan kaldırılmıştır. Özellikle küçük işaret ve geçici durum kararlılığı için hızlı çalışan regülatörler tasarlanmıştır. Daha sonraki yıllarda bozucu sonrası sistemde oluşan salınımları bastırmak için terminal gerilimi hata sinyaline ek olarak yardımcı kontrol sinyalinin üretildiği kontrolörler kullanılmaya başlanmıştır. Böylece ani cevap verme özelliğine sahip modern uyarma sistemleri geliştirilmiş ve tüm sistemin dinamik performansı arttırılmıştır.



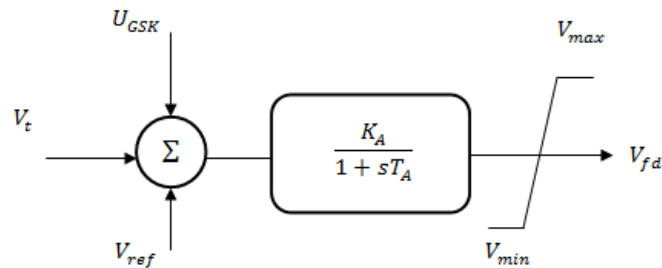
Şekil 4.5. SG uyarım sisteminin blok diyagramı

Bir uyarım sistemini oluşturan temel birimler Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Burada uyarıcı elemanı SG alan sargısına doğru akım (DA) sağlamaktadır. OGR giriş kontrol sinyallerini uyarıcının kontrolü için uygun seviyeye yükseltmektedir. GSK bozucu sonrası oluşan salınımları bastırmak için regülatöre ek bir kontrol sinyali sağlamaktadır. Sınırlayıcı ve koruma devreleri geniş kontrol aralığında, uyarıcı ve generatörün kapasite sınırlarının aşılmasını sağlayan koruma fonksiyonları içermektedir. Bu fonksiyonlar alan akımı sınırlayıcısı, maksimum uyarım sınırlayıcısı, terminal gerilimi sınırlayıcısı, V/Hz regülatörü ve koruması, aşırı uyarım sınırlayıcısıdır. Farklı devreler olan bu sınırlayıcılar ve çıkış sinyalleri kapalı bir giriş olarak uyarım sistemine uygulanabilmektedir [1].

4.2.1. Uyarıcı

Kararlılık çalışmalarında kullanılmak üzere oluşturulan farklı tipteki uyarım sistemlerinin standartlaştırılması için IEEE tarafından yapılan çalışmalar sonucunda IEEE Std., 421.5- 2005 standardı oluşturulmuştur. AA, DA ve Statik Tip olmak üzere üç değişik kategoride tanımlanan 19 adet uyarım sistem modeli belirlenmiştir [29]. STIA olarak adlandırılan, beslemesini SG uçlarından alan ve Şekil 4.6’da basitleştirilmiş devre şeması gösterilen kontrollü-doğrultucu statik uyarım sistemleri basit yapıları, yüksek güvenilirlikleri ve düşük maliyetlerinden dolayı günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada tasarlanan GSK yapılarının SBSG sistemindeki performansını incelemek amacı ile STIA tipi uyarım sistemi için literatürde yaygın olarak tercih edilen ve Şekil 4.6’da gösterilen basitleştirilmiş model kullanılmıştır [26].



Şekil 4.6. IEEE ST1A uyarım sisteminin basitleştirilmiş blok diyagramı

Kontrol işaretinin kuvvetlendirilmesi manyetik kuvvetlendirici, dönen kuvvetlendirici veya modern elektronik kuvvetlendirici ile gerçekleştirilmektedir. Bu kuvvetlendirici bir K_A kazancı ve T_A zaman sabiti ile temsil edilmektedir. IEEE ST1A uyarma sisteminin varsayılan parametre değerleri Tablo 4.1’de verilmiştir [26].

Tablo 4.1. IEEE ST1A uyarma sisteminin varsayılan parametre değerleri

Parametre	Varsayılan Değer	Birim	Maksimum Değer	Minimum Değer
K_A	10.0	pu	1000.0	1.0
T_A	0.004	sn	10.0	0.001
V_{max}	6.0	pu	20.0	0.0
V_{min}	-5.1	pu	0.0	-20.0

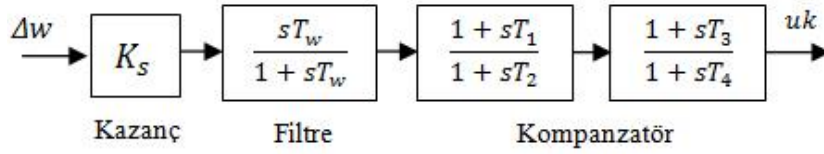
4.2.2. Otomatik Gerilim Regülatörü

Otomatik gerilim regülatörü giriş kontrol sinyallerini uyarıcının kontrolü için uygun seviyeye yükseltmektedir. OGR’ler uyarma akımını ve uyarma gerilimini kontrol ederek SG uç geriliminin ve reaktif gücün istenilen değerlerde kalmasını sağlamaktadır. Ancak yüksek kazanç ve küçük zaman sabitine sahip modern OGR sistemleri güç sisteminin kararlılığı üzerine birbirine zıt iki etkiye de sahiptir. OGR’ler yüksek çalışma hızları sayesinde bir yandan senkronlayıcı moment değerini artırarak güç sisteminin senkronizasyonda kalmasına destek olurken diğer yandan sönümleyici momenti azaltıcı etkilerinden dolayı güç sisteminin dinamik kararlılığının bozulmasına neden olurlar. OGR’lerin güç sisteminin dinamik kararlılığına olan negatif etkilerini gidermek amacı ile uyarma sistemlerine güç sistem kararlılaştırıcıları olarak adlandırılan destekleyici kontrol işareti üreten kontrol sistemleri eklenmiştir [1,2].

4.2.3. Güç Sistem Kararlayıcısı

GSK’lar, bozucu sonrası sistemde oluşan küçük genlikli ve frekanslı salınımları sönümlemek amacıyla uyarım sistemine ek olarak kontrol işareti üretirler. GSK’ın temel amacı, SG’ün rotorunda görülen 0.2-3 Hz frekans aralığındaki salınımları sönümleyerek güç sisteminin kararlılığını artırmaktır. KGSK’larda salınımla aynı fazda olacak şekilde ve

bastırıcı yönde sönümlleme momenti üretilmektedir. Bu salınımları sönümllemek için generatör çıkış büyüklüklerinin (hız sapması, güç sapması) biri veya birkaçı, gerilim kontrol çevrimine ek kontrol işareti üretmek için kullanılabilir. Bu çalışmada önerilen GSK için giriş olarak Δw hız sapması kullanılmıştır. Uyguluma olarak basit ve yaygın olan KGSK, temelde yüksek geçiren filtre, faz kompanzatörü ve kazanç katsayısına sahiptir. Bu yapının blok diyagramı Şekil 4.7’de gösterilmiştir [1-7].



Şekil 4.7. Klasik GSK blok diyagramı

Burada; kazanç bloğu, üretilecek olan sönüm momentinin genliğini belirler. Filtre bloğu, yüksek geçiren filtre özelliği göstermektedir. Bozucu sonrası hızda oluşan salınım frekansının belirli bir değere ulaştıktan sonra KGSK’nın devreye girmesini sağlar. Kompanzatör bloğu, hava aralığı momenti ile uyarma gerilimi arasındaki faz gecikmesini önlemek için gerekli olan faz ilerletici-geriletici frekans karakteristiğini sağlamaktadır. Bu blok diyagramda; K_S , kararlayıcı kazancı; T_w , yüksek geçiren filtre zaman sabiti; T_1 , T_2 , T_3 , T_4 ise faz ilerletici-geriletici frekans karakteristiği zaman sabitleridir. Filtre zaman sabiti 1-10 saniye arasında bir değer seçilirken, faz ilerletici-geriletici frekans karakteristiği zaman sabitleri ise 0.02-2 saniye arasında seçilebilir [1,6].

4.2.4. Sınırlayıcı ve Koruyucu Devreler

Uyarma sistemlerinde, uyarma sistemini, generatörü ve sistemdeki diğer elemanları korumak için koruyucu elemanların bulunması gerekmektedir. Bu koruyucu elemanlar alan akımı sınırlayıcısı, maksimum uyartım sınırlayıcısı, terminal gerilimi sınırlayıcısı, V/Hz regülatörü ve koruması, aşırı uyartım sınırlayıcısıdır. Farklı devreler olan bu sınırlayıcılar ve çıkış sinyalleri kapalı bir giriş olarak uyartım sistemine uygulanabilmektedir [1].

5. GÜÇ SİSTEMLERİNDE KONTROL YÖNTEMLERİ

Kapalı döngü kontrol sistemlerinde kontrolörün görevi, ölçme elemanı üzerinden geri beslenen çıkış büyüklüğünü, referans büyüklüğü ile karşılaştırmak ve buradan çıkacak hata değerine ve kendi özelliğine bağlı olarak uygun denetim sinyali üretmektir [15].

Klasik kontrol sistemlerinin çalışması, denetlenecek sistemin matematiksel olarak modellenmesine dayanır. Ancak, teknolojik gelişme ve mikroişlemcilerin yaygın olarak kullanılmaya başlaması ile matematiksel modellenmesi zor olan doğrusal olmayan sistemler için bilgiye dayanan bulanık mantık (BM), genetik algoritmalar (GA) ve yapay sinir ağları (YSA) gibi yaklaşımlar da geliştirilmiştir [15].

BM ve KKK tabanlı kontrol uygulamaları doğrusal olmayan ve zamana bağlı olarak değişen sistemler için etkili kontrolörlerin gelişmesine imkan vermesiyle büyük önem kazanmıştır. Güç sistemleri gibi doğrusal olmayan sistemlerde doğrusal denetleyiciler yerine doğrusal olmayan ve dayanıklı denetime ihtiyaç duyulur.

Bu çalışmada değişken şartlar altındaki tek makinalı sonsuz bara sisteminin dinamik cevabını iyileştirmek için dayanıklı ve basit GSK tasarımına pratik bir yaklaşım getirilmiştir. Önerilen yaklaşım, BMD tabanlı olup, KKK prensibine göre oluşturulmuştur.

5.1. Bulanık Mantık

Sayısal ifadeler yerine sembolik ifadeler kullanan BM yaklaşımı, makinalara insanların deneyimlerinden ve önsezilerinden yararlanarak çalışabilme yeteneği verir. Bu sembolik ifadelerin makinalara uyarlanması matematiksel temele dayanan BM kümeler kuramına bağlıdır. BM bilinen klasik mantık gibi (0,1) olmak üzere iki seviyeli değil, (0-1) aralığında çok seviyeli işlemleri ifade etmektedir.

Bulanık mantık kontrolün (BMK) temeli ise bu tür sözlü ifadeler ve bunlar arasındaki mantıksal ilişkiler üzerine kurulmuştur. BMK uygulanırken sistemin matematiksel modellenmesi şart değildir [15]. BM yaklaşım Lotfi A. Zadeh tarafından yayınlanan bir makalede BM veya bulanık küme kuramı adı altında ortaya konulmuştur [28]. Zadeh bu çalışmada insan düşüncesinin büyük çoğunluğunun bulanık olduğunu, kesin

olmadığını belirtmiştir. Bu yüzden 0 ve 1 ile temsil edilen boolean mantık bu düşünce işlemini yeterli bir şekilde ifade edememektedir. İnsan mantığı, açık, kapalı, sıcak, soğuk, 0 ve 1 gibi değişkenlerden oluşan kesin ifadelerin yanı sıra, az açık, az kapalı, serin, ılık gibi ara değerleri de göz önüne almaktadır. BM klasik mantığın aksine iki seviyeli değil, çok seviyeli işlemleri kullanmaktadır. Ayrıca Zadeh insanların denetim alanında, mevcut makinalardan daha iyi olduğunu ve kesin olmayan dilsel bilgilere bağlı olarak etkili kararlar alabildiklerini savunmuştur. Klasik denetim uygulamalarında karşılaşılan zorluklar nedeniyle, BM denetimi alternatif yöntem olarak çok hızlı gelişmiş ve modern denetim alanında geniş uygulama alanı bulmuştur.

5.1.1. Bulanık Kümeler

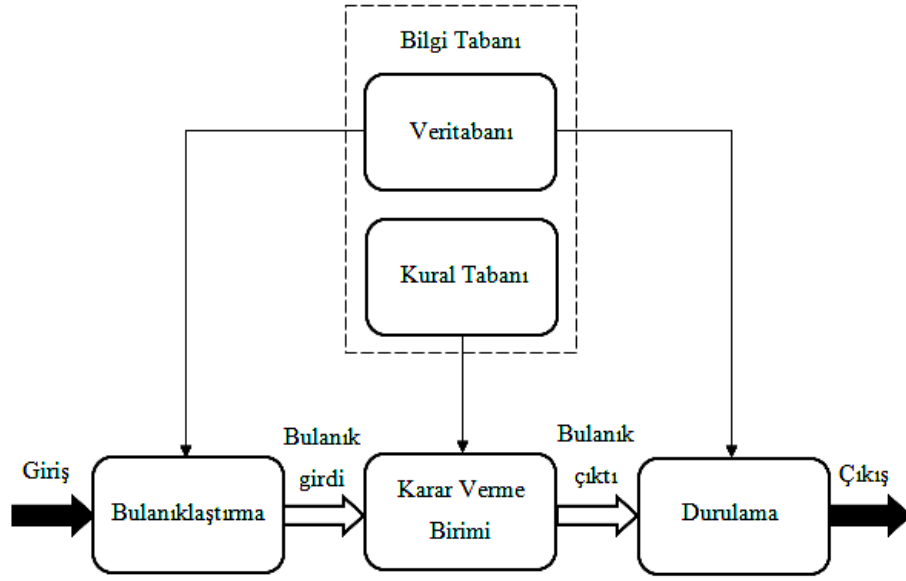
Kısmi üyeliğin olmadığı klasik küme kuramında bir eleman o kümenin ya elemanıdır ya da değildir. Nesnenin üyelik değeri 1 ise kümenin tam elemanı, 0 ise elemanı değildir. Başka bir deyişle klasik veya yeni ürün kümelerinde elemanların üyelikleri (0,1) değerlerini alır. BM, insanın günlük yaşantısında nesnelere verdiği üyelik değerlerini, dolayısıyla insan davranışlarını taklit eder [16].

5.1.2. Üyelik Fonksiyonları

BM teorisine göre, bir elemanın kümeye üye olup olmadığının eğer üye ise hangi oranda üyesi olduğunun belirlenmesi için üyelik fonksiyonları tanımlanır. Üyelik fonksiyonları üçgen, yamuk, çan şeklinde gibi çeşitli türlerde olabilir. Ancak uygulamalarda en sık kullanılan fonksiyon tipleri üçgen ve yamuktur.

5.2. Bulanık Mantık Kontrol

BMK uygulamaları doğrusal olmayan ve zamana bağlı olarak değişen sistemler için etkili yapıların gelişmesine imkan vermesiyle büyük önem kazanmıştır. İnsan düşünme tarzını kullanan BMK yapısı Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. BMK'nın genel yapısı

Şekil 5.1'e göre; gerekli parametre ölçümü yapıldıktan sonra, bu değerler bulanıklaştırma ara birimi ile bulanık sonuçlandırma işleminin yapılacağı bulanık çıkarıma hazır hale getirilir. Karar verme biriminde, bulanık girdiler (üyelik dereceleri) ve kural tabanı kullanılarak bulanık bir küme oluşturulur. Son olarak durulama yöntemiyle bulanık sonuç değeri elde edilir.

5.2.1. Bulanıklaştırma

Bulanıklaştırma, sistemden alınan denetim giriş bilgilerini dilsel niteleyiciler olan sembolik değerlere dönüştürme işlemidir. Üyelik işlevinden faydalanılarak giriş bilgilerinin ait olduğu bulanık kümeyi ve üyelik derecesini tespit edip, girilen sayısal değere küçük, en küçük gibi dilsel değişkenler atar [16].

5.2.2. Bilgi Tabanı

Bilgi tabanı, uygulama alanı hedeflerinin bilgisini içerir, kural ve üyelik fonksiyonlarını tanımlar. Bilgi tabanı bir veri tabanı ve sözel kural tabanından oluşur. Veritabanı denetim kuralları ve veri işlemede kullanılan gerekli tanımları içerir. Sözel kural tabanı stratejiyi ve kuralları sözel ifadeler aracılığı ile tanımlamaktadır. Kural tabanı, sözel olarak ilgili

sistemin modellenmiş hali olarak görülebilir [15]. Denetimi yapılan sistemle ilgili bulandırma, bulanık çıkarım, durulama işlemleri sırasında gerek duyulan üyelik işlevi ve kural tablosu bilgileri veri tabanından kullanıma sunulmaktadır. Girişler ve çıkışlar arasındaki bağlantılar, kural tabanındaki kurallar kullanılarak sağlanır. A ve B girişler, C çıkış değişkeni olan bir sistem için, EĞER A = x ve B = y ise O HALDE C = z şeklinde bir kural A ve B'nin aldığı değerlere göre C çıkışının bulanık değerini belirlemektedir [16].

5.2.3. Karar Verme Birimi

Bulanık çıkarım motoru bulanık kural tabanında giriş ve çıkış bulanık kümeleri arasında kurulmuş olan ilişkilerin hepsini bir araya toplayarak sistemin bir çıkışlı davranmasını temin eden işlemler topluluğunu içeren bir mekanizmadır [18]. Bulanık çıkarım işlemlerinin yapılabilmesi için kural tabanının belirlenmesi gerekir. Kural tablosu sistem hakkında uzman kişilerin sözel ifadelerinden elde edilen EĞER - O HALDE kurallarından oluşur. Karar verme birimi çıkarım motoru olarak da adlandırılmaktadır. BM kontrolün çekirdek kısmıdır [16]. Bu kısım insanın karar verme ve çıkarım yapma yeteneğinin benzeri bir yolla bulanık kavramları işlemekte ve çıkarım yaparak gerekli kontrol denetimi belirlemektedir.

5.2.4. Durulama

Durulama ara yüzü bulanık çıktı değerlerini, klasik değerlere çevirmekten sorumludur [15]. Bu kısımda uygulanacak kontrol işaretinin normalize edilmiş değerleri saptanmaktadır. Durulama, bulanıklaştırıcının aksine bulanık değeri kesin bir değere dönüştürme işlemidir. En popüler durulama yöntemi ağırlık merkezi yöntemidir. Bu yöntemde bulanık çıkış kümesinin ağırlık merkezi eşitlik (5.1) ile hesaplanır.

$$u^* = \frac{\int u \mu_{out}(u) du}{\int \mu_{out}(u) du} \quad (5.1)$$

Denklemdaki integrali hesaplamamanın zor ve zaman alıcı olduğu durumlarda ağırlık merkezi yöntemi yerine merkezlerin ağırlıklı ortalaması yöntemini kullanmak daha iyi

sonuç vermektedir. Bu yöntemle göre kontrol işaretinin normalize değeri eşitlik (5.2) kullanılarak hesaplanır. Bu yöntem direk ima edilen bulanık çıkış kümelerini kullandığı için toplama işlemine ihtiyaç duymamaktadır.

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{ui} u_i}{\sum_{i=1}^n \mu_{ui}} \quad (5.2)$$

5.3. Bulanık Modelleme Çeşitleri

Yaygın olarak kullanılan bulanık modelleme çeşitleri; Mamdani ve Takagi - Sugeno tipi bulanık modellemelerdir.

5.3.1. Mamdani Tipi Bulanık Modelleme

Mamdani tipi bulanık modelleme insan davranışlarına uygun olması nedeniyle yaygın kullanım alanına sahiptir. Diğer BM modellerin temelini oluşturan Mamdani tipi bulanık modelleme, ilk defa 1974 yılında buhar makinasının bulanık denetiminde kullanılmıştır. Mamdani tipi bulanık modelin oluşturulması için aşağıdaki adımlar izlenmektedir [19].

- Girdilerin bulanıklaştırılması: öncül kısımdaki bütün bulanık ifadeleri kullanarak girdi değişkenlerine ait 0 ile 1 arasında değişen üyelik derecelerinin belirlenmesi.
- BM işlemlerini kullanarak kural ağırlıklarının belirlenmesi
- Bulanık küme mantıksal işlemcilerin (ve, veya) uygulanması
- Sonuçların toplanması: her bir kuralın çıktısını temsil eden bulanık kümelerin birleştirilmesi
- Durulaştırma: tek bir sayıya dönüştürülmüş toplam bulanık küme sonuçlarının durulaştırılması.

Sayısal iki değişkeni içeren iki kurallı bir Mamdani tipi bulanık modelde z çıkış değerinin bulanık küme fonksiyonlarından nasıl hesaplandığı gösterilmektedir.

Kural 1: Eğer x = A1 VE y = B1 ise z = C1

Kural 2: Eğer x = A2 VE y = B2 ise z = C2

Mamdani tipi bulanık modelin avantajlarını özetlemek gerekirse,

- Modelin oluşturulması basittir.
- Diğer BM modellemenin temelini oluşturur.
- İnsan davranış ve duyularına uygundur.

5.3.2. Sugeno Tipi Bulanık Modelleme

Çok sık kullanılan başka bir bulanık denetleyici türünde Sugeno tipi denetleyicidir [20], Sugeno tipi bulanık denetleyicilerin çıkışları, şimdiye kadar anlatılan standart bulanık denetleyicilerde olduğu gibi bulanık kümelerle değil de giriş değişkenlerinin fonksiyonlar türünden ifade edilir [20], Sugeno tipi bir denetleyicide kurallar, EĞER ($x_1=A$ ve $x_2=B$) ise O HALDE $y = f(x_1, x_2)$ şeklinde ifade edilir. Bu denetleyicilerde durultucu birimine ihtiyaç duyulmaz. Çünkü çıkış doğrudan bir fonksiyonla hesaplanır. Denetleyici çıkışı ise genellikle çıkışların ağırlıklı ortalaması bulunarak hesaplanır. Sugeno tipi bulanık modelin avantajları:

- Hesaplama için daha uygundur.
- Lineer tekniklerle daha iyi çalışmaktadır (Örn, PID kontrol).
- Optimizasyon ve uyarlama teknikleri ile iyi çalışmaktadır.
- Çıkış yüzeyinin devamlılığını garantilemektedir.
- Matematiksel analiz için uygundur.

5.4. Kayma Kipli Kontrol

KKK değişen parametrelere sahip veya lineer olmayan sistemlerin kontrolü için kullanılan dayanıklı kontrol yöntemlerinden biridir [21]. Bu yöntem, bozucu girişler ve modellenmemiş parametrelerin etkisinin görüldüğü durumlarda belirsizliklerin ve bozucuların sınırları bilindiği sürece dayanıklı bir kontrol sağlar. KKK değişken yapılı kontrol olarak da adlandırılmaktadır. Bu metodun en büyük dezavantajı kontrol sinyalinin bir değerden başka bir değere sonsuz hızda anahtarlanması varsayımdır. Pratik sistemlerde mikroişlemciler sonlu bir örnekleme zamanına sahip olduğundan kontrol girişinin sonsuz hızda anahtarlanması imkansızdır. Sonlu örnekleme periyodundan dolayı, pratik KKK

uygulamalarında kayma ve kalıcı durum modlarında çatırdama problemi oluşur. Çatırdama, kalıcı durumda ulaşılmak istenilen nokta etrafında yüksek frekans osilasyonlar olarak ortaya çıkar. Son yıllarda yapılan çalışmalarda bu çatırdamaları azaltma veya yok etmeye yönelik yöntemler önerilmiştir [22].

KKK'de amaç sistemin davranışını birinci dereceye indirgeyecek kontrol girişini belirleyerek sistemi birinci derece gibi davranmaya zorlamaktır. Böylece bozucu girişler ve modellenmemiş parametrelerin etkisinin görüldüğü durumlarda bile kararlı ve dayanıklı bir kontrolün elde edilmesi sağlanır. İkinci derece tek girişli kanonik formdaki bir sistemi göz önüne alalım:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + bu(t) + df(t) \quad (5.3)$$

Burada $x(t) = [x_1(t), \dot{x}_1(t)]^T$ şeklinde ifade edilen durum vektörü, $u(t)$ kontrol sinyali, A, b ve d sabit matrisler ve $f(t)$ bozucu girişidir. Parametre belirsizlikleri dikkate alınarak denklem (5.3),

$$\dot{x}(t) = (A_n + \Delta A)x(t) + (b_n + \Delta b)u(t) + (d_n + \Delta d)f(t) \quad (5.4)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Denklem (5.4)'deki A_n , b_n ve d_n nominal sistem parametrelerinden oluşan matris ve vektörleri, ΔA , Δb ve Δd bilinmeyen sistem parametrelerinin belirsizliğini gösteren matris ve vektörleri temsil etmektedir. Belirsizliklerin toplamını $L(x, t)$ ile ifade edersek;

$$L(x, t) = B_p(\Delta Ax(t) + \Delta bu(t) + df(t)) \quad (5.5)$$

olur. Buna göre denklem (5.4),

$$\dot{x}(t) = A_n x(t) + b_n(u(t) + L(x, t)) \quad (5.6)$$

olarak ifade edilir. Denklem (5.5)'deki B_p , b_n 'in sözde (pseudo) tersidir. Aslında b_n kare matris olmadığı için gerçek anlamda tersi mevcut değildir. Ancak tersi $B_p = (b_n^T b_n)^{-1} b_n^T$, şeklinde hesaplanabilir. Burada kontrol problemi, model belirsizlikleri ve harici bozucular

olsa bile x durum vektörünün ulaşılacak istenilen durum vektörü x_d 'yi izlemesinin sağlanmasıdır. İzleme hatasını,

$$e = x - x_d = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_d \\ \dot{x}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} = [e \quad \dot{e}]^T \quad (5.7)$$

ve anahtarlama fonksiyonunu ise,

$$S = \lambda e + \dot{e} = Ce \quad (5.8)$$

şeklinde ifade edebiliriz. Burada $S = 0$ 'ın sağlanması durumunda, x 'in x_d 'yi izlemesi ve hatanın $1/\lambda$ zaman sabiti ile azalması garanti altına alınmış olmaktadır. Şekil 5.2 'de ikinci derece bir sistem için kayma ve ulaşma modları gösterilmektedir. Denklem (5.8)'de, $S = \lambda e + \dot{e} = 0$ olarak alınırsa $\dot{e} = -\lambda e$ doğrusu üzerindeki her noktada $S = 0$ şartı sağlanır. Orijine doğru kaymayı sağlayacak yani e ve $\dot{e}$ 'ı sıfır yapacak kontrol girişi u 'yu belirlemek için bir Lyapunov fonksiyonu kullanılır [23]. Uygun bir Lyapunov fonksiyonu,

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (5.9)$$

olarak tanımlanabilir. V 'nin başlangıç değeri sıfırdır. Lyapunov fonksiyonunun sürekli azalan olması ve kontrolün gerçekleşmesi için gerekli şart,

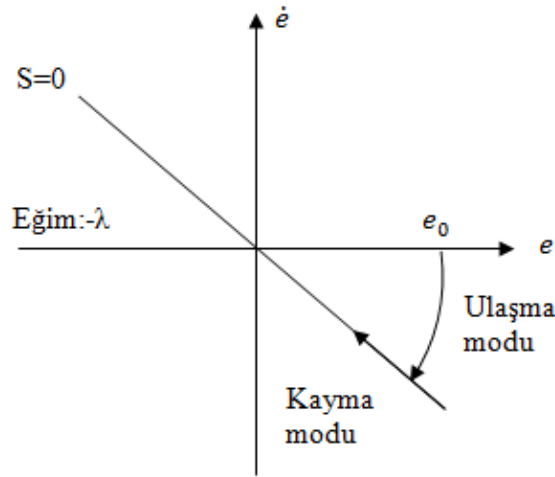
$$\dot{V} = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} (S^2) \leq -\eta |S| \quad (5.10)$$

dır [23]. η pozitif bir sayı olmak üzere ulaşma şartı,

$$\dot{S} \operatorname{sgn}(S) \leq -\eta \quad (5.11)$$

olarak elde edilir. Burada,

$$\operatorname{sgn}(S) = \begin{cases} +1, & S > 0 \\ -1, & S < 0 \end{cases} \quad (5.12)$$



Şekil 5.2. İkinci derece bir sistem için ulaşma ve kayma modları

Şekil 5.2'de görüldüğü gibi, ulaşma modu $S = 0$ doğrusuna ulaşma olarak tanımlanır. Kayma modu ise e 'nin $S = 0$ doğrusuna ulaştıktan sonra bozucu girişler ve parametre değişiklikleri altında bile, bu doğru üzerinden orijine kaymasıdır. $S = 0$ ve $\dot{S} = 0$ olursa bu bize $S = 0$ doğrusu üzerinde hareket edildiğini gösterir. Sonsuz hızda anahtarlama için ortalama değer $S = 0$ doğrusu üzerinde olur. Eğer parametre değişiklikleri ve bozucu girişlerin olmadığını varsayarsak denklem (5.3)

$$\dot{x}(t) = A_n x(t) + b_n u(t) \quad (5.13)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklem (5.8)'de eşitliğin her iki tarafının türevi alınıp sıfıra eşitlenirse;

$$\dot{S} = \lambda \dot{e} + \ddot{e} = 0 \quad (5.14)$$

ifadesi elde edilir. Bu denklemde, denklem (5.7) ve (5.12) yerine yazılırsa, eşdeğer kontrol kuralı [23];

$$u_{eq} = (C b_n)^{-1} C (\dot{x}_d - A_n x) \quad (5.15)$$

olarak elde edilir.

$\dot{S} = 0$, kayma modundaki dinamik olarak tanımlanır. $\dot{S} = 0$ eşitliği kullanılarak elde edilen u_{eq} tam olarak bilinen parametreler için eşdeğer kontrol kuralını temsil etmektedir. KKK'de kontrol kuralı iki kısımdan oluşur. Birincisi u_{eq} , ikincisi ise parametre değişiklikleri ve bozucu giriş etkisini bastıracak olan $u_{max} \operatorname{sgn}(S)$ terimidir. Bu yaklaşıma göre kontrol kuralı,

$$u = u_{eq} + u_{max} \operatorname{sgn}(S) \quad (5.16)$$

olarak ifade edilir. Denklem (5.7) ve (5.8) kullanılarak, denklem (5.15), (5.6)'da yerine yazılırsa,

$$\dot{S} = Cb_n(-u_{max} \operatorname{sgn}(S) + L) \quad (5.17)$$

elde edilir. Bu eşitlik S 'in dinamiğini belirler. Denklem (5.11), (5.16)'da yerine yazılırsa,

$$Cb_n u_{max} \geq Cb_n L \operatorname{sgn}(S) + \eta \quad (5.18)$$

olur. Dayanıklı bir kontrolün sağlanması için,

$$Cb_n > 0 \quad \text{için} \quad u_{max} \geq L_{max}(Cb_n)^{-1} \eta \quad (5.19)$$

$$Cb_n < 0 \quad \text{için} \quad u_{max} \leq -L_{max}(Cb_n)^{-1} \eta \quad (5.20)$$

olması gerekir. Böylece denklem (5.4) ve (5.11) ile ifade edilen sistem için dayanıklı bir kontrolör tasarlanmış olur [30].

6. GÜÇ SİSTEM KARARLAYICISI TASARIMI

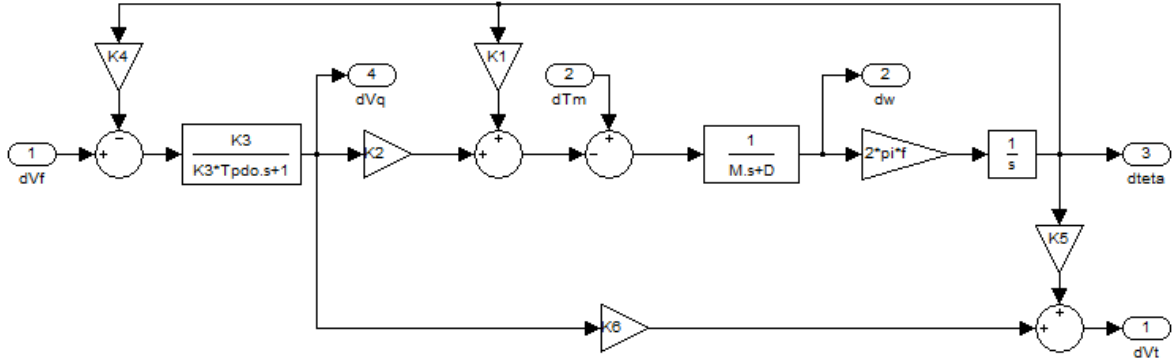
Güç sistemlerinde oluşan yük değişimleri ve hat empedansında meydana gelen değişimlerin kararlılık sorunu doğurduğu önceki bölümlerde bahsedilmişti. Özellikle sistemden, aniden yük çıkması veya yükün devreye girmesi, uyarma akımının değişmesi ve oluşan kısa devreler kararlılık sorununu doğurmaktadır. Bozucu etki olarak adlandırılan bu olaylar sistemin mekanik ve elektriksel güç dengesini bozmaktadır. Bu durumda SG'lerin rotor açısında salınımlar meydana gelir. Eğer oluşan senkronizasyon momenti generatörlerin açısız farkını azaltıcı yönde olmazsa generatör senkronizmadan çıkabilir. Bölüm 3.4'de oluşturulan SG'ün doğrusallaştırılmış modelindeki K katsayıları, başlangıç şartları ve çalışma noktasıyla değişmektedir. Farklı çalışma noktaları için K katsayılarındaki değişim sistemin performansını da etkileyeceğinden, tasarlanacak olan uyarma kontrolörünün veya GSK'nın sistem şartlarına uyumlu ve bozuculara karşı dayanıklı olması gerekmektedir. Bu bölümde, tasarlanan GSK yapılarının performansı aynı SBSG sistemi üzerinde altı farklı çalışma noktası için MATLAB/simulink ortamında yapılan benzetim çalışmaları ile kıyaslamalı olarak incelenmiştir. Yapılan benzetim çalışmaları ile önerilen bulanık-kayan kipli kontrolör tabanlı GSK yapısının seçilen tüm çalışma noktalarında aşım ve yerleşme zamanı kriterleri açısından iyi bir performansa sahip olduğu gösterilmiştir. Benzetimde kullanılan 6 farklı çalışma noktası ve hesaplanan doğrusallaştırılmış modeldeki K katsayıları Tablo 6.1'de verilmiştir. Bu katsayıların hesaplanmasında kullanılan yazılım Ek-A'da ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 6.1. Seçilen çalışma noktaları

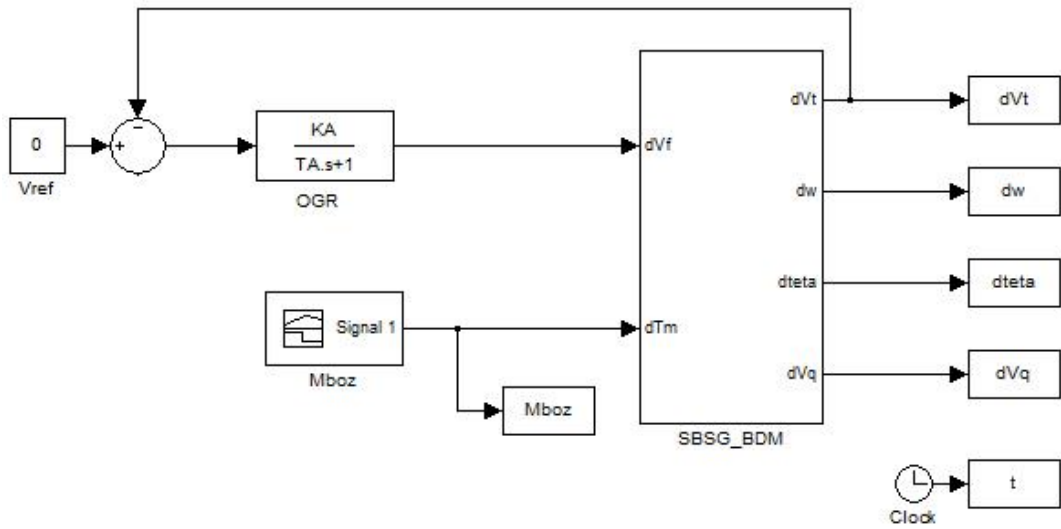
Çalışma Noktası	P (pu)	Q (pu)	x_e (pu)	Mboz (pu)	K1	K2	K3	K4	K5	K6
1	1	0.03	0.2	0.08	1.61	1.79	0.28	2.3	-0.035	0.21
2	1	0.03	0.4	0.08	1.16	1.44	0.36	1.85	-0.113	0.31
3	1	0.03	0.2	0.09	1.61	1.79	0.28	2.3	-0.035	0.21
4	1	0.03	0.2	0.1	1.61	1.79	0.28	2.3	-0.035	0.21
5	0.5	0.2	0.2	0.1	1.12	1.10	0.28	1.41	0.045	0.33
6	0.5	0.4	0.2	0.1	1.12	0.93	0.28	1.19	0.0302	0.34

6.1. Sonsuz Baraya Bağlı SG Modeli ve Simülasyon Parametreleri

Bu çalışmada kullanılan SBSG'ün doğrusallaştırılmış modeli Şekil 6.1'de ve sisteme ek bir kontrolörün eklenmediği durumdaki yapı ise Şekil 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Doğrusallaştırılmış SBSG'ün MATLAB/simulink modeli



Şekil 6.2. Ek bir kontrolün olmadığı OGR+ SBSG'ün MATLAB/simulink modeli

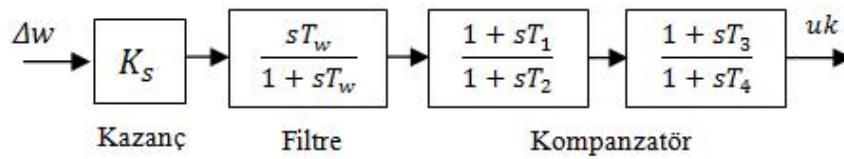
Bu tezde yapılacak benzetim çalışmalarında SBSG sistemi için kullanılacak olan parametreler Tablo 6.2'de verilmiştir [24]. Sistem için nominal çalışma noktası $S=1+j0.03$ olarak seçilmiştir. Sistemde kullanılan KGSK ve önerilen GSK bu çalışma şartları için tasarlanmıştır.

Tablo 6.2. Benzetim için sistem parametreleri

Generatör	IEEE ST1A Tipi Uyarıcı	İletim Hattı	Çalışma Noktası
$T'_{do} = 6$ sn	$K_A = 100$	$r_e = 0$ pu	$P_n = 1$ pu
$H = 5$ sn	$T_A = 0.02$ sn	$x_e = 0.2$ pu	$Q_n = 0.03$ pu
$x_d = 1.6$ pu			$V_t = 1$ pu
$x_q = 1.55$ pu			$f = 50$ Hz
$x'_d = 0.32$ pu			

6.2. Klasik Güç Sistem Kararlayıcısı Tasarımı

GSK'lar, bozucu sonrası sistemde oluşan küçük genlikli ve frekanslı salınımları sönmölemek amacıyla uyarım sistemine ek olarak kontrol işareti üretirler. Bölüm 4.2.3 'de incelenen KGSK, bu kontrol işaretini elde etmek için hız sapmasını, frekans sapmasını veya elektriksel güç sapmasını giriş olarak kullanabilir [6,8]. Bu çalışmada uygulamaya olarak basit ve yaygın olarak kullanılan KGSK yapısı, giriş olarak hız sapmasını kullanılmıştır. Hız sapması, anlık elektriksel hız ile senkron hız farkına eşittir. Uygulamaya olarak basit ve yaygın olan KGSK, temelde yüksek geçiren filtre, faz kompanzatorü ve kazanç katsayısına sahiptir. Bu yapının blok diyagramı Şekil 6.3'de gösterilmiştir [1,2,7].

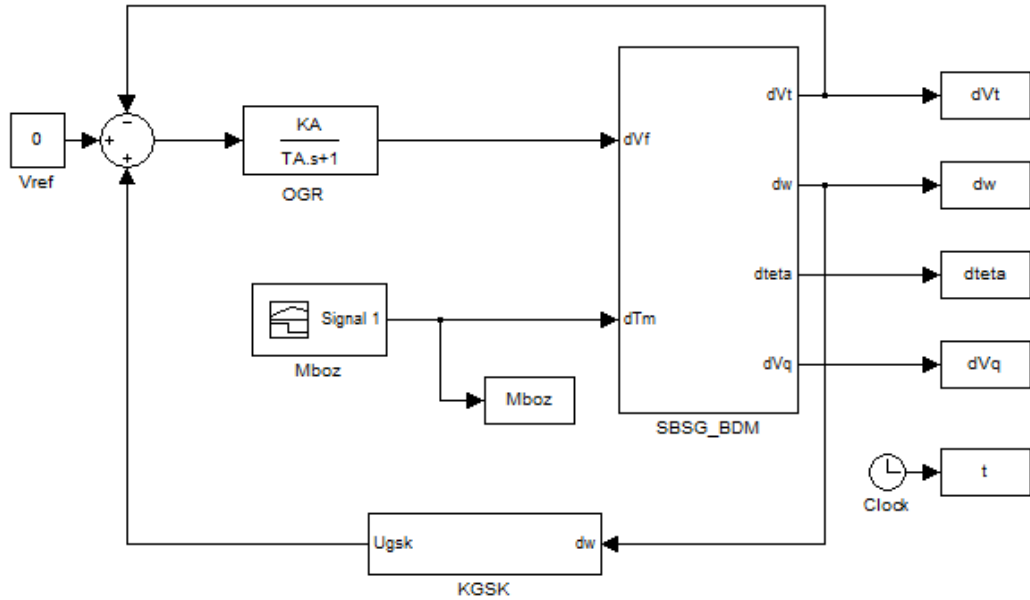
**Şekil 6.3.** KGSK modeli (faz ilerletici-geriletici)

Gerekli olan kontrol işaretinin maksimum aşma miktarı ve yerleşme zamanı göz önünde tutularak seçilen çalışma noktası için bu yapıda kullanılan KGSK katsayıları ve değerleri Tablo 6.3'deki gibi seçilmiştir. Yapılan tüm benzetim çalışmaları için bu değer sabit tutulmuştur.

Tablo 6.3. KGSK parametreleri

Katsayı	Açıklama	Değer
K_S	Kararlayıcı kazancı	25
T_w	Yüksek geçiren filtre zaman sabiti	2.5
T_1, T_2, T_3, T_4	Frekans karakteristiği zaman sabitleri (faz ilerletici-geriletici)	0.1, 0.026, 0.1, 0.026

Tasarlanan KGSK yapısının SBSG sistemi üzerindeki performansını incelemek için Şekil 6.4'deki model oluşturulmuştur. Bu yapıda KGSK giriş olarak hız sapmasını kullanmış, çıkış olarak da kontrol işaretini üretmiştir. Kontrol işareti kapalı bir döngü içerisinde sisteme eklenmiştir. Bozucu işaret olarak 1. saniyede ortaya çıkan ve çalışma şartlarının kıyaslanması için farklı genliklerdeki basamak fonksiyonu kullanılmıştır. Bu işaret sisteme mekanik tork olarak etki etmektedir. Bu yapı ile birlikte GSK'sız sistem ve bir sonraki bölümde tasarlanacak olan dayanıklı GSK yapısı karşılaştırmalı olarak incelenecektir.

**Şekil 6.4.** KGSK ve SBSG sisteminin MATLAB/simulink modeli

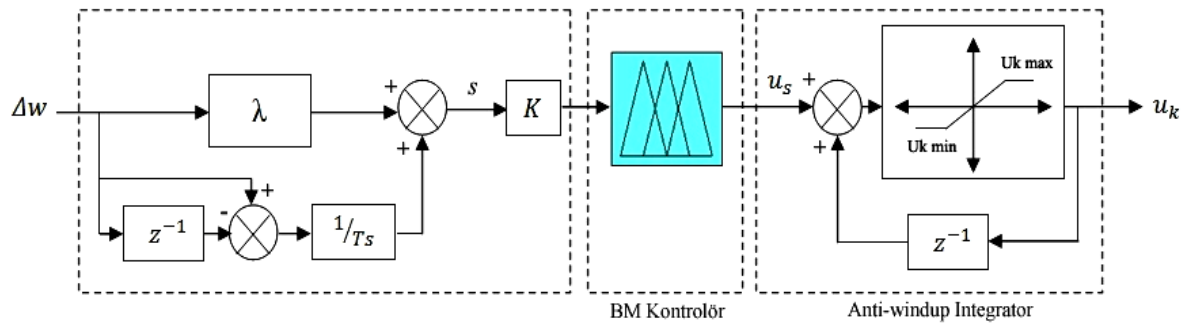
6.3. Önerilen Dayanıklı Güç Sistem Kararlayıcısı Tasarımı

Önerilen bu yöntemle özellikle yapısı tam olarak bilinmeyen veya doğrusal olmayan sistemlerin kontrolüne pratik ve tasarım olarak basit bir yaklaşım getirilmiştir. Klasik KKK' de kontrol kuralı iki kısımdan oluşur. Birincisi u_{eq} , ikincisi ise parametre değişiklikleri ve bozucu giriş etkisini bastıracak olan $u_{max} sgn(S)$ terimidir. Bu yaklaşıma göre kontrol kuralı,

$$u = u_{eq} + u_{max} sgn(S) \quad (6.1)$$

$$u = u_{eq} + u_{max} sat(S/\varphi), \quad sat(x) = \begin{cases} x, & |x| \leq 1 \\ sgn(x), & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (6.2)$$

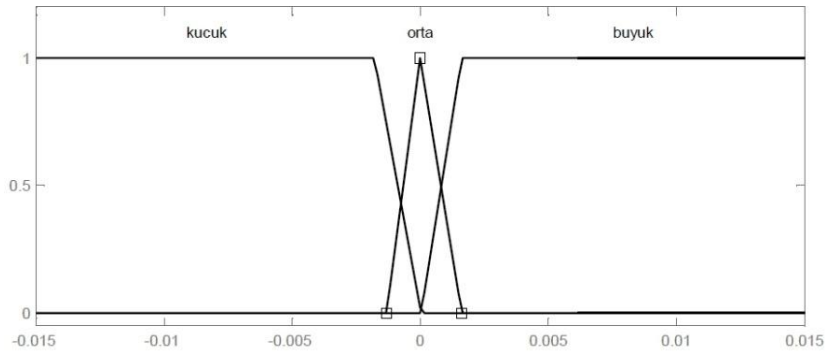
şeklinde ifade edilir [23]. Bu çalışmada KKK prensibine göre oluşturulan kontrol tekniğinde, u_{eq} kısmı eklenmemiştir. İntegral kompanzator ile kullanılan bu yöntemde kayma yüzeyi s , BMD'nin girişini oluşturduğu için önerilen kontrol yapısı basit bir kural tablosu ve üyelik fonksiyonu içermektedir. Filtre olarak kullanılan BMD'nin çıkışı ise anti-windup integratörün girişini oluşturmaktadır. Anti-windup integratör aşırı integrasyonu engellemekte ve sistem için gerekli olan kapalı çevrim kontrol işaretini üretmektedir [25]. Önerilen dayanıklı GSK için ayrıklı zamanlı kontrolör yapısı Şekil 6.5'te gösterilmiştir.



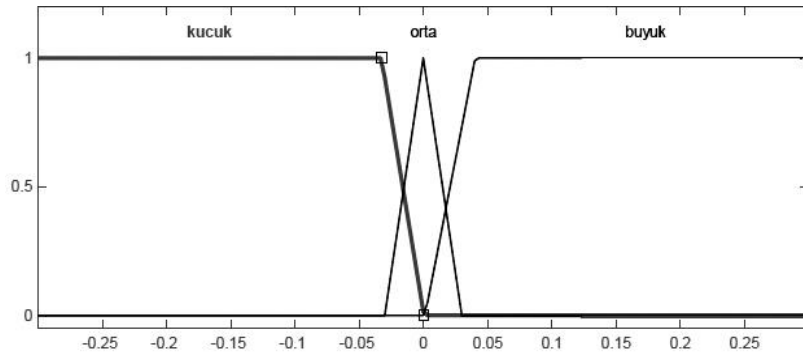
Şekil 6.5. Önerilen GSK blok diyagramı

BMD için geniş kabule sahip ve insan davranışlarına daha uygun olan Mamdani tipi bulanık mantık yapısı kullanılmıştır. Kayma yüzeyi s 'i giriş sinyali olarak kullanan BMD

çıkış olarak u_s işaretini üretmektedir. Bu giriş ve çıkış değişkenleri; küçük, orta ve büyük olmak üzere üç adet dilsel etiketle tanımlanmıştır. Şekil 6.6 girişe ait üyelik fonksiyonlarını, Şekil 6.7 ise çıkışa ait üyelik fonksiyonlarını göstermektedir. Sistemin yapısı gereği tüm üyelik fonksiyonları için üçgen ve yamuk eğrileri, durulama yöntemi olarak ise bisection (yarılama-ikiye bölme) metodu kullanılmıştır. Bu yöntemde açıortay, tüm bölgeyi eşit iki alt bölgeye bölmektedir. Kullanılan bulanık mantık yapıda, üyelik fonksiyonlarının azlığı ve kural tablosunun karmaşık olmayışı sistemin daha hızlı ve esnek çalışmasına olanak sağlamaktadır. Kural sayısı az olduğundan dolayı sonuca ulaşmak kısa sürede gerçekleşmiştir.

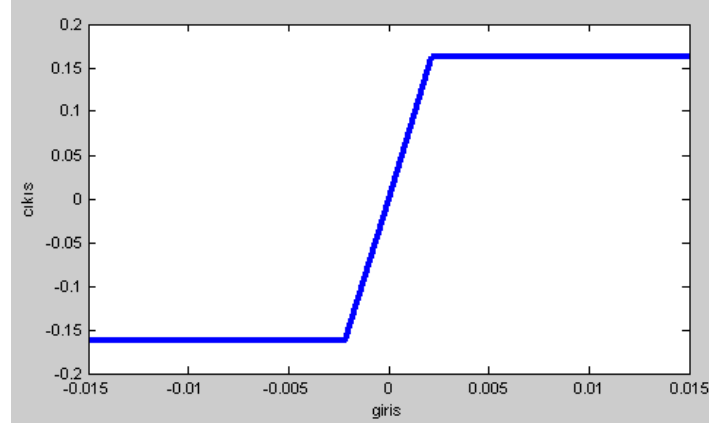


Şekil 6.6. Girişe ait üyelik fonksiyonları



Şekil 6.7. Çıkışa ait üyelik fonksiyonları

Sistem yapısı ve gerekli olan kontrol işaretinin en büyük ve en küçük değerleri göz önünde bulundurulursa, oluşturulan üyelik fonksiyonlarında giriş değeri -0.015 ile 0.015 aralığında çıkış değeri ise -0.3 ile 0.3 aralığında değişmektedir. Oluşturulan kurallar sonucu giriş ve çıkışa ait kontrol yüzeyi Şekil 6.8'de gösterilmiştir.



Şekil 6.8. Giriş ve çıkışa ait kontrol yüzeyi

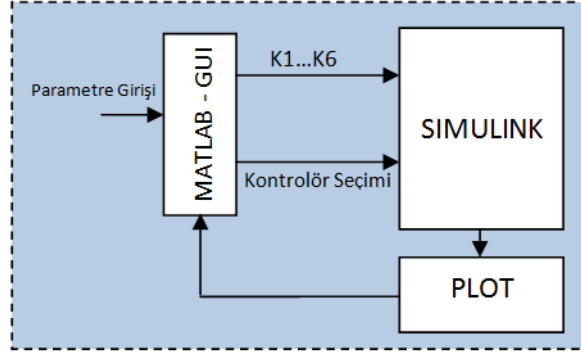
6.4. Kullanıcı Arayüzü Tabanlı Uygulama Tasarımı

Benzetim çalışması, sistemin MATLAB/simulink ortamında modellenmesiyle oluşturulmuştur. Simulink modeliyle senkron şekilde çalışan kullanıcı ara yüzü geliştirilerek, sistem parametrelerinin girişi ve simülasyon çıktıları kolay bir şekilde elde edilmektedir. MATLAB/GUI (graphical user interface) içeriğindeki nesnelerin kullanımıyla, alt rutin programlama parçaları oluşturulmaktadır. Bu çalışmada simulink modeliyle bağlantı kurularak her defasında m-file dosyasının içe aktarılması ve farklı çalışma şartları için çizim yaptırılması zorluğu giderilmiştir. Sonraki çalışmalarda programın geliştirilmesiyle birlikte son kullanıcı için daha kullanışlı bir toolbox oluşturulabilir.

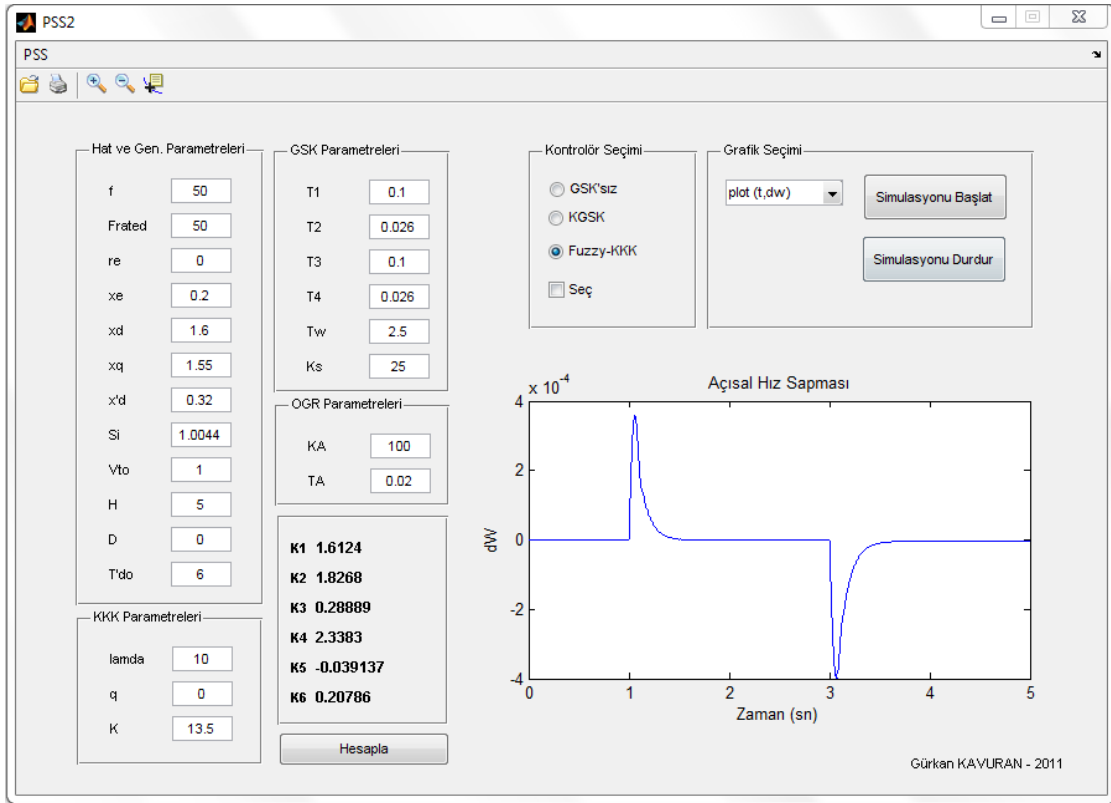
Program temelde sekiz aşamadan oluşmaktadır.

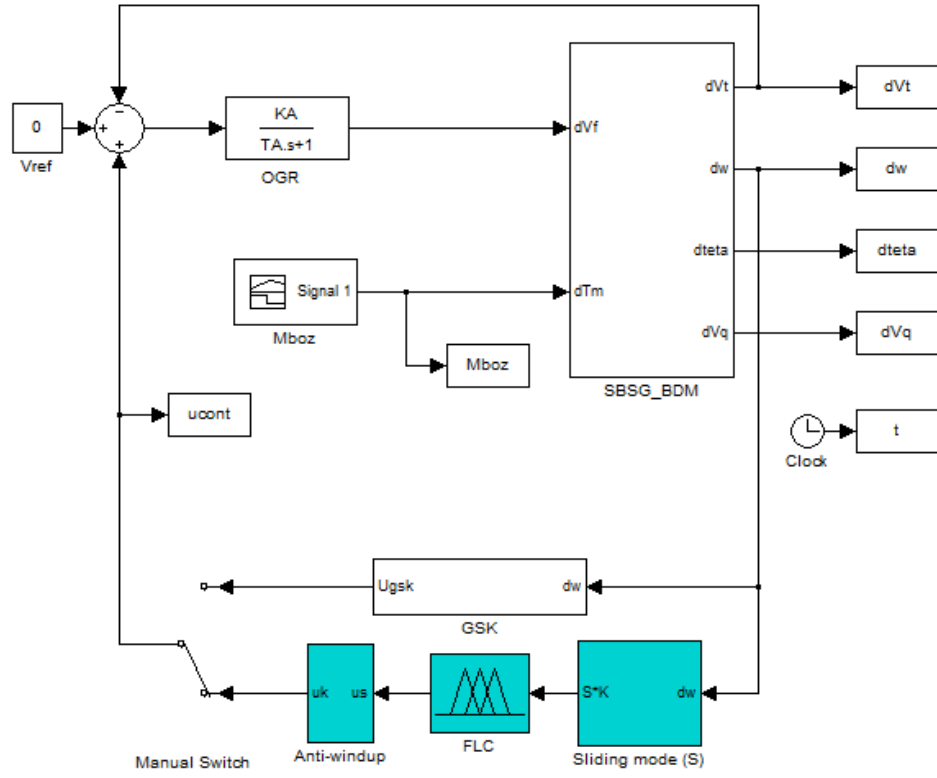
1. Hat ve generatöre ait parametre girişi
2. KKK yapısına ait parametre girişi
3. GSK yapısına ait parametre girişi
4. OGR yapısına ait parametre girişi
5. Doğrusallaştırılmış modele ait K katsayılarının hesaplanması ve simulink ortamına yüklenmesi
6. Kontrolör seçimi
7. Çizdirilmek istenen değişken seçimi
8. Simülasyonun başlatılması ve durdurulması

Gerçekleştirilen kullanıcı ara yüzü programının blok diyagramı Şekil 6.9.'da, ekran görüntüsü ise Şekil 6.10.'da gösterilmiştir. Sistem çözümü ode4 Runge-Kutta metodu kullanılarak, $T_s = 0.0001$ sn örnekleme periyoduyla yapılmıştır. Sisteme ait benzetim modeli Şekil 6.11'de gösterilmektedir.



Şekil 6.9. GUI blok diyagramı





Şekil 6.11. Tüm sistemin Matlab/simulink modeli

7. BULGULAR

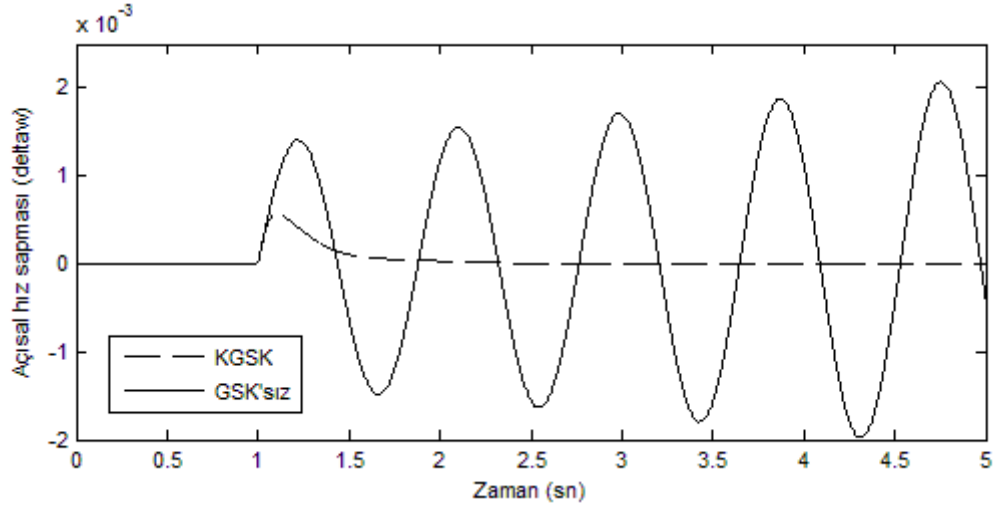
Bu kısımda seçilen çalışma noktalarına göre, ek kontrolörün olmadığı durum ile KGSK'lı yapı ve önerilen dayanıklı GSK yapısı karşılaştırmalı olarak kıyaslanmıştır. Bir önceki bölümde tablo halinde verilen çalışma noktaları aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır. 1.ve 2. çalışma noktalarında; görünür güç $S=1+0.03j$ pu ve sisteme etkiyen mekanik bozucu işaretin genliği 0.08 pu olarak seçilmiştir. *Hat empedansı (harici empedans)* değiştirilerek, sistem performansı kıyaslanmıştır. Bozucu işaret, bu çalışma noktalarında 1. saniyede ortaya çıkmış olup diğer çalışma noktalarında da aynıdır. 3.ve 4. çalışma noktalarında; görünür güç $S=1+0.03j$ pu ve hat empedans 0.2 pu olarak seçilmiştir. Sisteme etkiyen mekanik *bozucu işaretin genliği* değiştirilerek, sistem performansı kıyaslanmıştır. 5.ve 6. çalışma noktalarında ise; hat empedans 0.2 pu ve sisteme etkiyen mekanik bozucu işaretin genliği 0.1 pu olarak seçilmiştir. *Sistemin görünür gücü* değiştirilerek, sistem performansı kıyaslanmıştır.

7.1. Ek Kontrolör İçermeyen Sistem ile KGSK'lı Sistem Simülasyonları

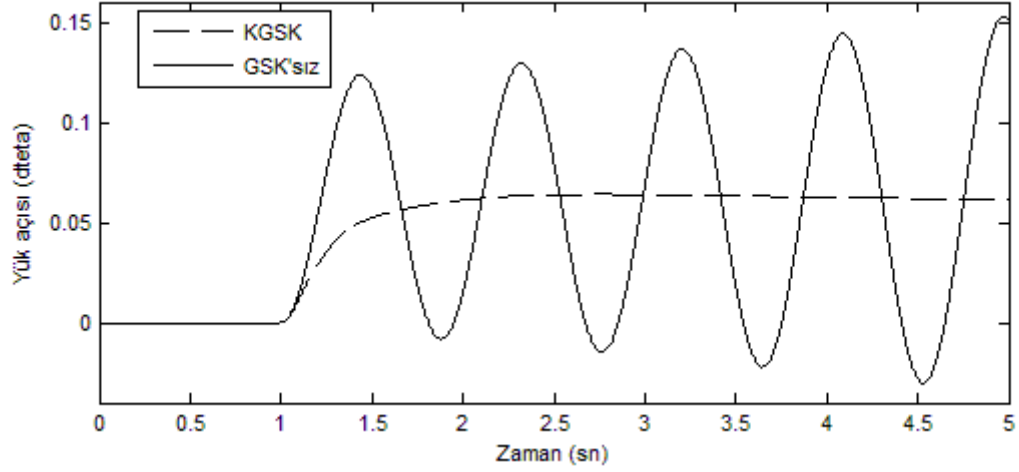
Sistemin kontrolsüz ve KGSK kullanılarak oluşturulan kontrollü çalışmasında , SG'ün $S=1+0.03j$ pu ve $x_e = 0.2$ pu ile $S = 0.5+0.2j$ pu ve $x_e = 0.2 - 0.4$ pu değerindeyken, sistemde 1. saniyede ortaya çıkan bozucu mekanik tork sonucu hız sapmasındaki ve yük açısındaki değişim incelenmiştir.

- Şekil 7.1'de $S=1+0.03j$ pu ve $x_e = 0.2$ için generatörün açısal hız sapması,
- Şekil 7.2'de $S=1+0.03j$ pu ve $x_e = 0.2$ için rotor açısı değişimi,
- Şekil 7.3'de $S=0.5+0.2j$ pu ve $x_e = 0.2$ için generatörün açısal hız sapması,
- Şekil 7.4'de $S=0.5+0.2j$ pu ve $x_e = 0.2$ için rotor açısı değişimi,
- Şekil 7.5'de $S=0.5+0.2j$ pu ve $x_e = 0.4$ için generatörün açısal hız sapması,
- Şekil 7.6'da $S=0.5+0.2j$ pu ve $x_e = 0.4$ için rotor açısı değişimi,
- Şekil 7.7'de ise sisteme etki eden bozucu işaret görülmektedir.

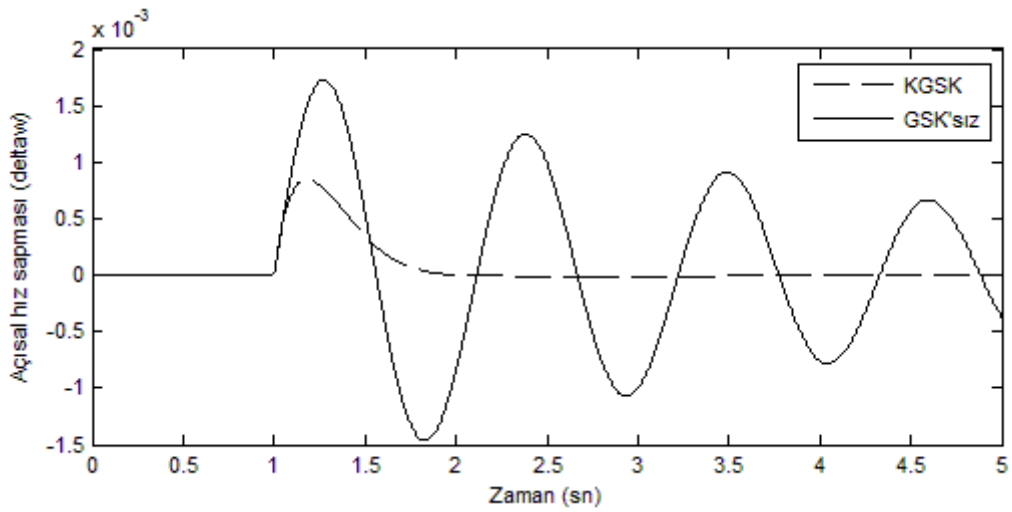
Bu grafiklerde görüldüğü gibi OGR'ye ek bir kontrol işareti sağlayan GSK olmadığı durumda SG'ün rotorundaki salınımlar artarak devam etmektedir. KGSK bulunduğu durumda ise rotorda meydana gelen salınımlar kısa süre içerisinde bastırılmaktadır.



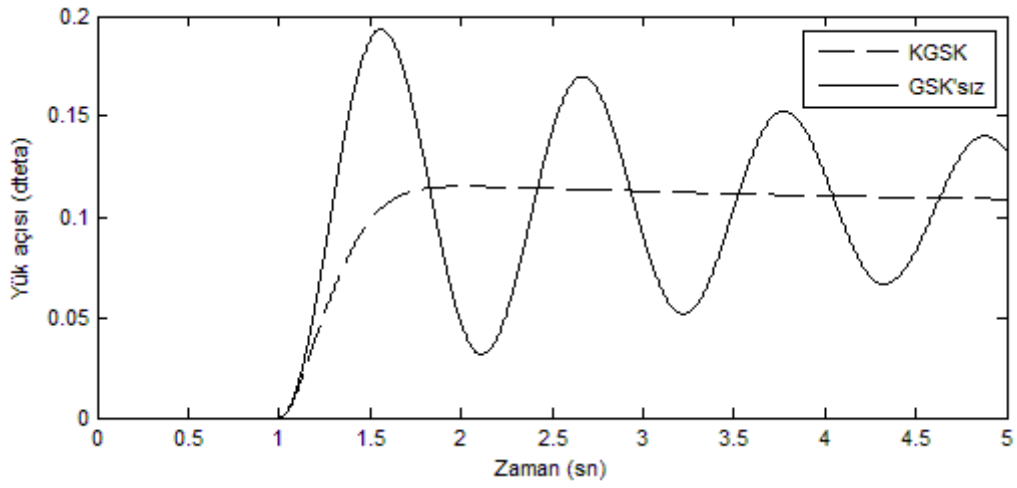
Şekil 7.1. $S=1+0.03j$ pu ve $x_e = 0.2$ pu için açısal hız değişimi



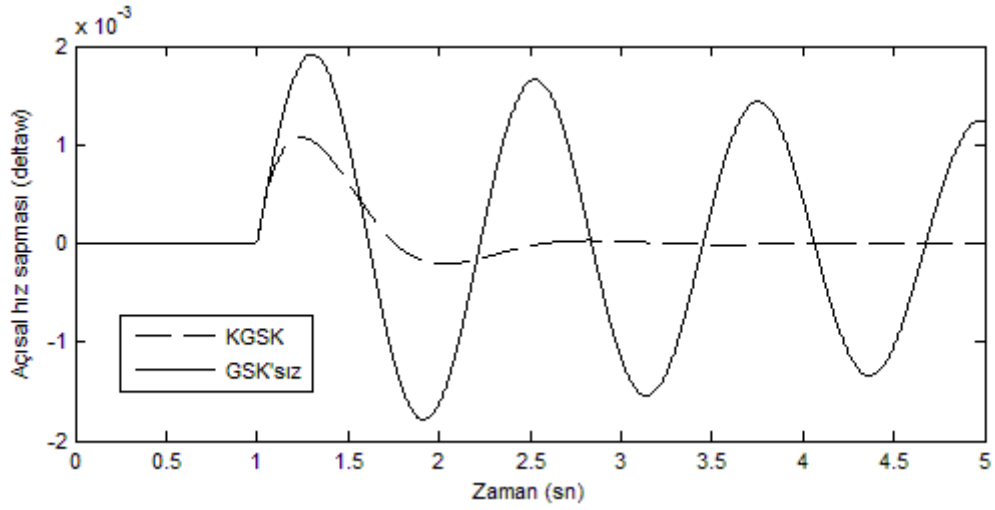
Şekil 7.2. $S=1+0.03j$ pu ve $x_e = 0.2$ pu için yük açısı değişimi



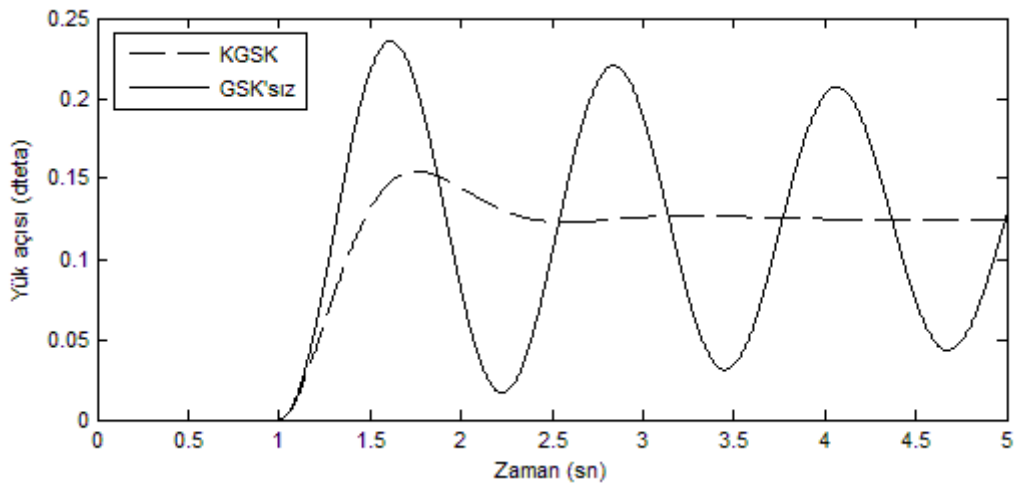
Şekil 7.3. $S=0.5+0.2j$ pu ve $x_e = 0.2$ pu için açısal hız değişimi



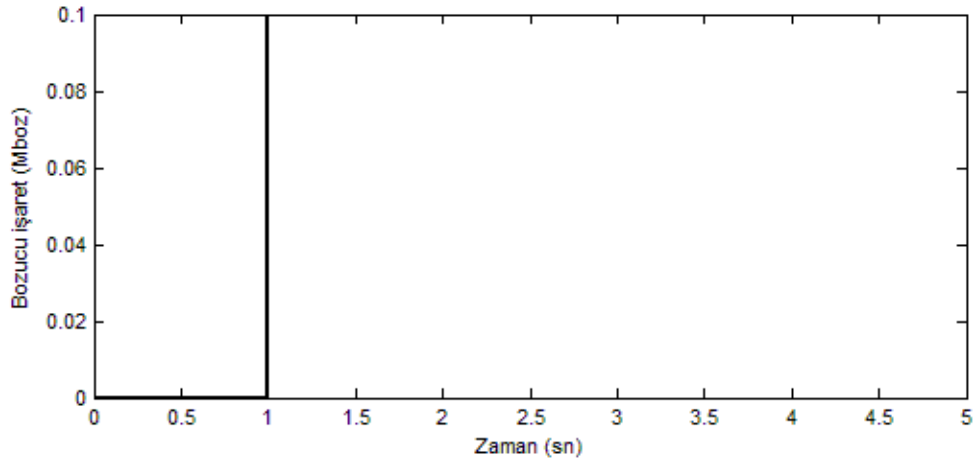
Şekil 7.4. $S=0.5+0.2j$ pu ve $x_e=0.2$ pu için yük açısı değişimi



Şekil 7.5. $S=0.5+0.2j$ pu ve $x_e=0.4$ pu için açısal hız değişimi



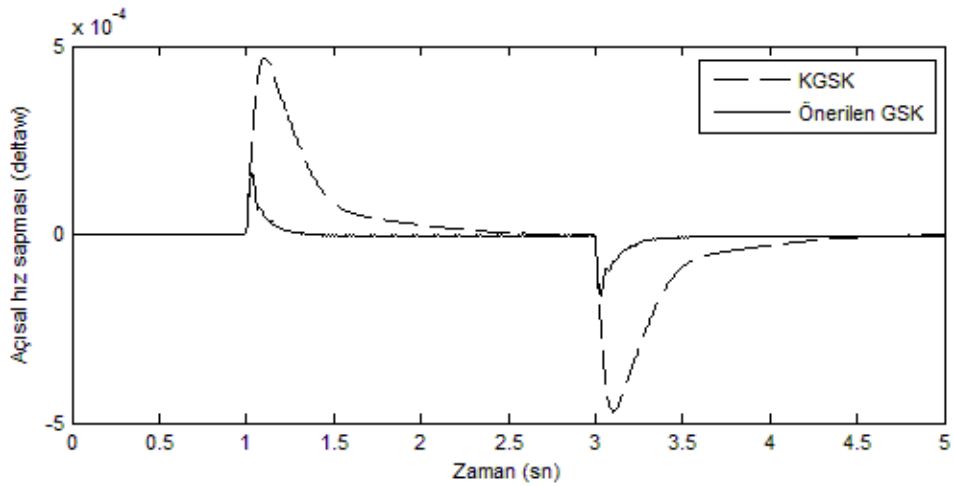
Şekil 7.6. $S=0.5+0.2j$ pu ve $x_e=0.4$ pu için yük açısı değişimi



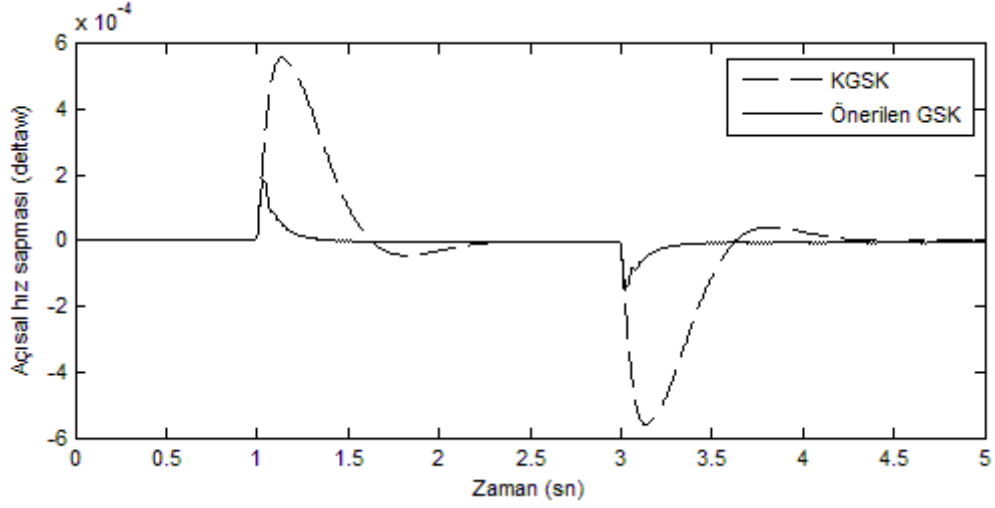
Şekil 7.7. Sisteme etki eden bozucu işaret (Mboz = 0.1 pu)

7.2. KGSK'lı Sistem ile Önerilen Dayanıklı GSK İçeren Sistem Simülasyonları

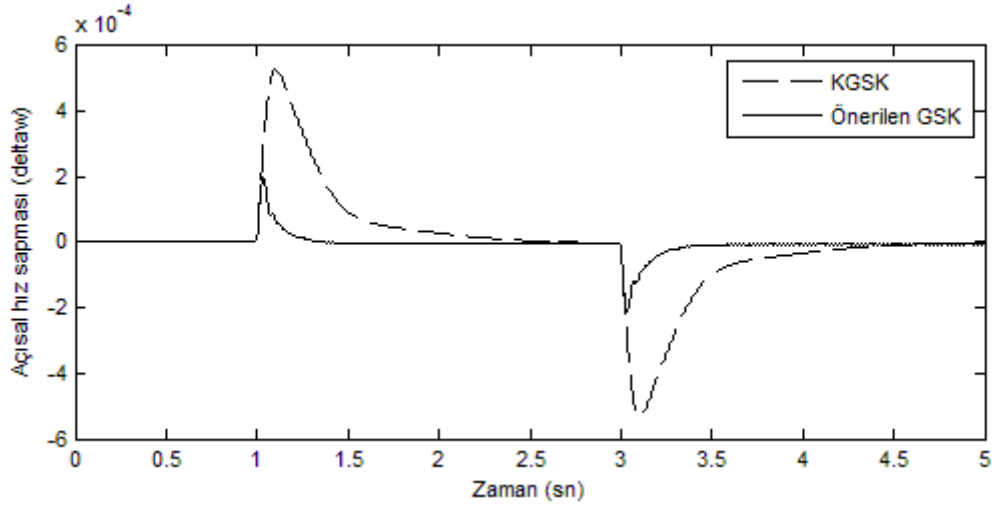
Bu kısımda tasarlanan KGSK'lı yapı ile önerilen dayanıklı GSK yapısının sistem performansı üzerindeki etkisi altı farklı çalışma noktası için karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Şekil 7.8 ile Şekil 7.13 arasında verilen grafikler bu çalışma noktalarına göre sisteme ait açısal hız sapmalarını göstermektedir. Ayrıca her iki yapı arasındaki farkı daha iyi gözlemlemek için, 3 farklı hat empedansı ile sistem çalışması gözlemlenmiştir. Şekil 7.14'de KGSK'nın, Şekil 7.15'de ise önerilen GSK'nın 3 değişik hat empedansı altındaki sistem cevabı gösterilmiştir. Tek bir değişken üzerinden yapılan bu incelemede, her bir kararlayıcı kendi arasında kıyaslanmıştır. Önerilen GSK'nın diğer yapıya göre daha doğru ve sağlam performans sağladığı açıkça görülmektedir.



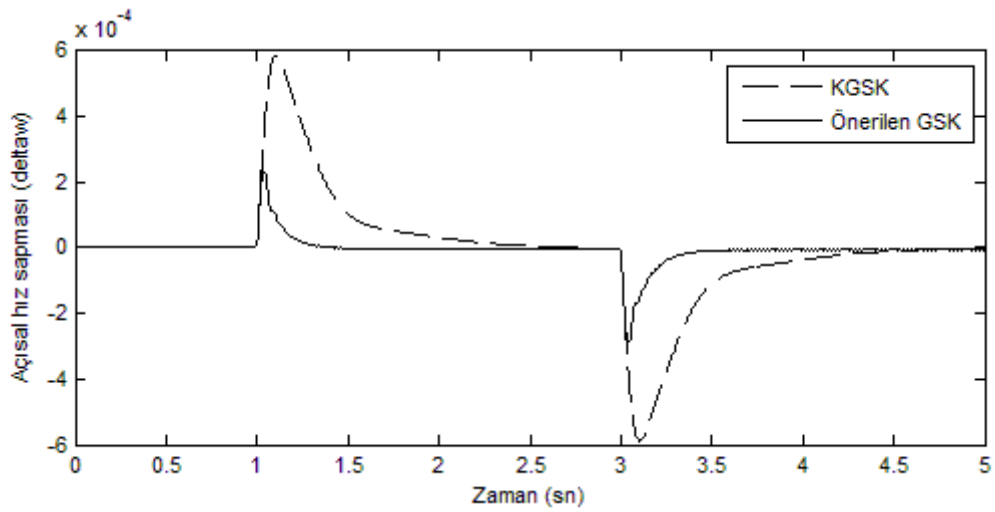
Şekil 7.8. 1. çalışma noktası için sistem cevabı ($S=1+0.03j$, $x_e=0.2$, $M_{boz}=0.08$ pu)



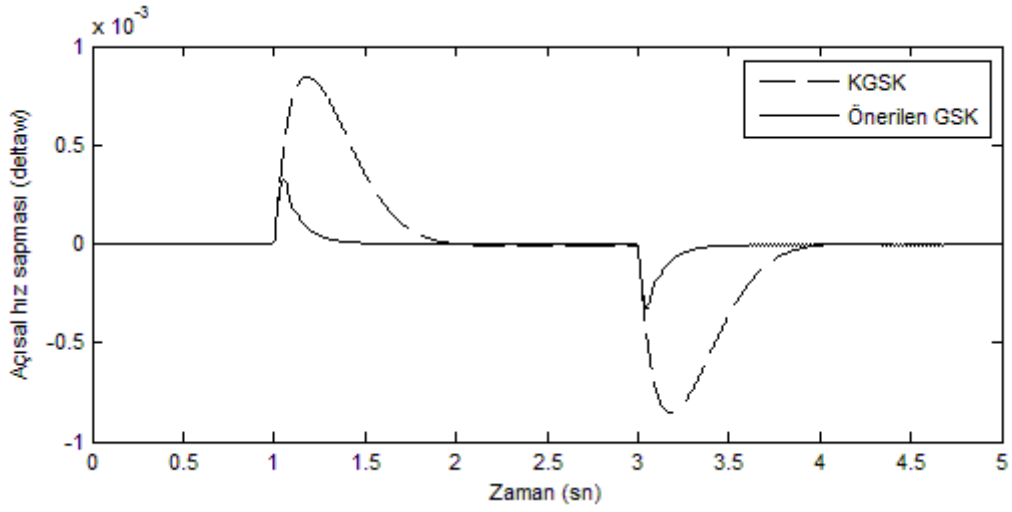
Şekil 7.9. 2. çalışma noktası için sistem cevabı ($S=1+0.03j$, $x_e = 0.4$, $M_{boz}=0.08$ pu)



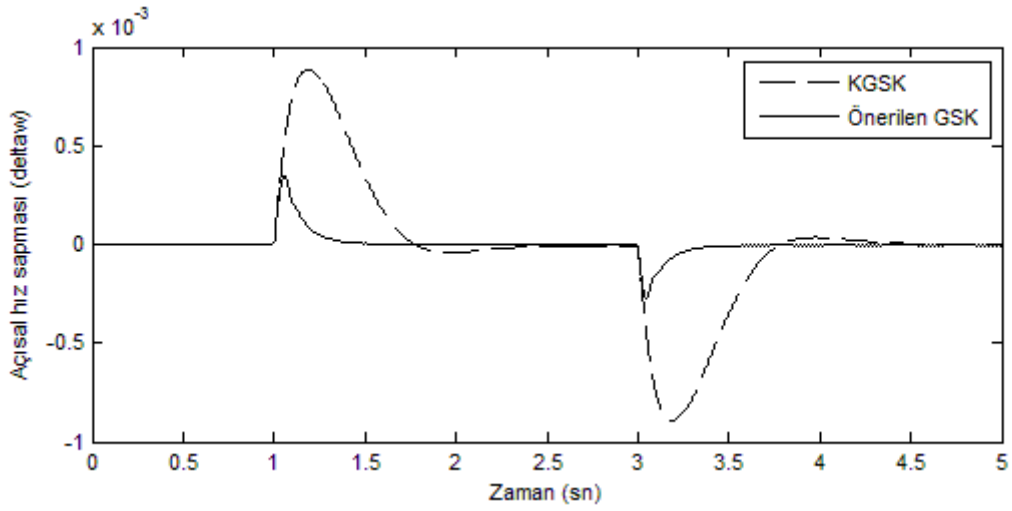
Şekil 7.10. 3. çalışma noktası için sistem cevabı ($S=1+0.03j$, $x_e = 0.2$, $M_{boz}=0.09$ pu)



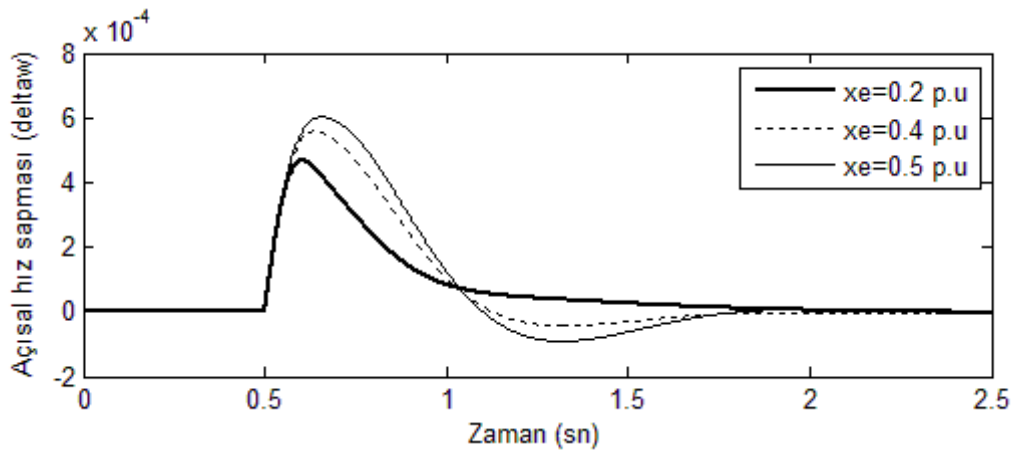
Şekil 7.11. 4. çalışma noktası için sistem cevabı ($S=1+0.03j$, $x_e = 0.2$, $M_{boz}=0.1$ pu)



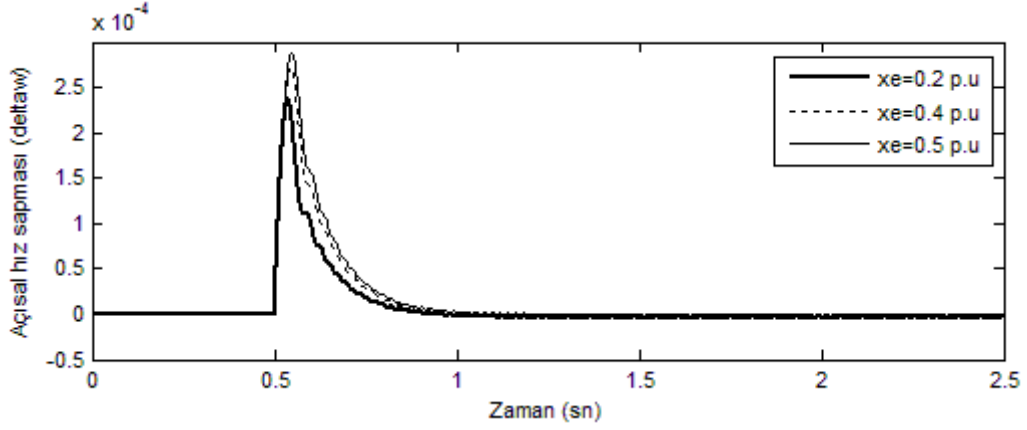
Şekil 7.12. 5. çalışma noktası için sistem cevabı ($S=0.5+0.2j$, $x_e=0.2$, $M_{boz}=0.1$ pu)



Şekil 7.13. 6. çalışma noktası için sistem cevabı ($S=0.5+0.3j$, $x_e=0.2$, $M_{boz}=0.1$ pu)



Şekil 7.14. KGSK'lı sistem cevabı ($x_e = 0.2, 0.4, 0.6$ için)



Şekil 7.15. Önerilen GSK'lı sistem cevabı ($x_e = 0.2, 0.4, 0.6$ için)

Elde edilen benzetim sonuçlarında; KGSK'nın tasarlandığı çalışma noktası için istenilen performansı sağladığı, ancak çalışma noktasının değişmesi durumunda performans kaybına uğradığı gözlemlenmiştir. Önerilen GSK'nın maksimum aşma ve kısa yerleşme zamanı ile iyi bir dinamik performansa sahip olduğu altı farklı çalışma noktası için gösterilmiştir. Yukarıdaki grafiklere göre sistemin dinamik performansını ve iyileşme oranlarını gösteren değerler Tablo 7.1. ve Tablo 7.2.'de verilmiştir.

Tablo 7.1. Maksimum Aşma (pu)

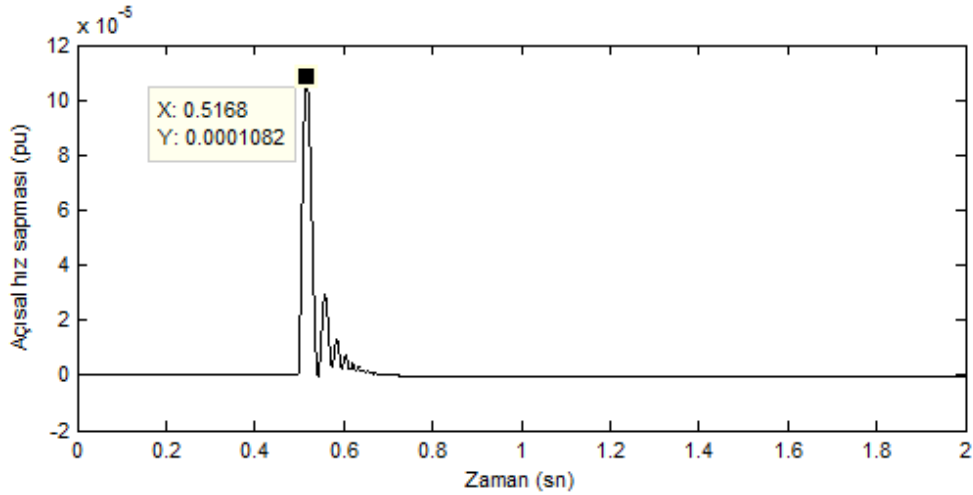
	1	2	3	4	5	6
Klasik GSK	4.68×10^{-4}	5.58×10^{-4}	5.27×10^{-4}	5.86×10^{-4}	8.43×10^{-4}	9.21×10^{-4}
Önerilen GSK	1.62×10^{-4}	1.86×10^{-4}	1.96×10^{-4}	2.37×10^{-4}	3.24×10^{-4}	3.43×10^{-4}
Fark	3.06×10^{-4}	3.72×10^{-4}	3.31×10^{-4}	3.5×10^{-4}	5.19×10^{-4}	5.78×10^{-4}
İyileşme %	65	66	63	60	62	63

Tablo 7.2. Yerleşme Zamanı (sn)

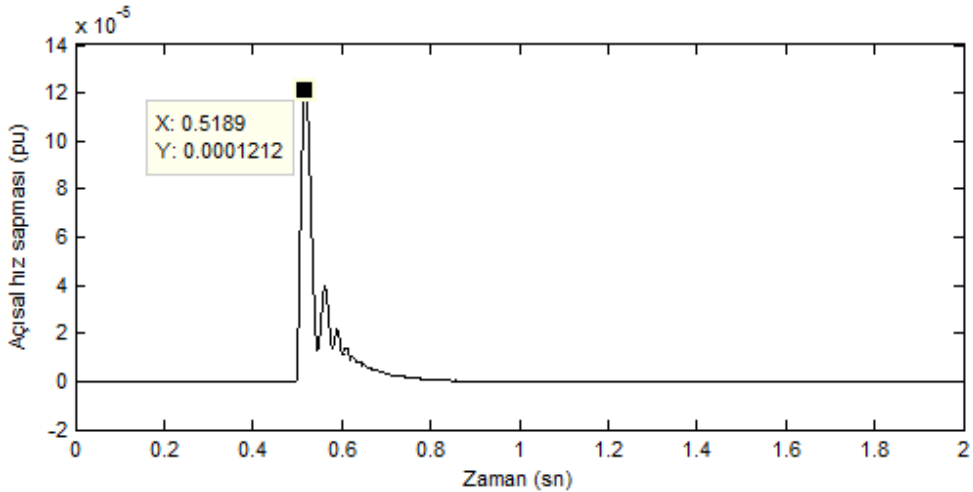
	1	2	3	4	5	6
Klasik GSK	2,85	2,36	2,75	2,78	2,03	2,53
Önerilen GSK	1,34	1,40	1,45	1,45	1,41	1,47
Fark	1.51	0.96	1.3	1.33	0.62	1.06
İyileşme %	53	40	47	48	30	42

7.3. Diğer Literatür Sonuçları ile Karşılaştırma

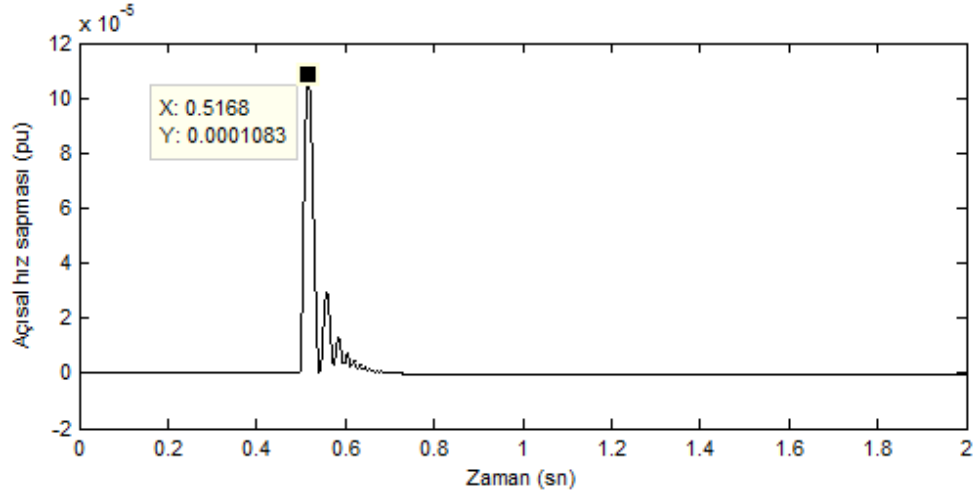
Bu bölümde, SBSG sistemi için kullanılan generatör, uyarıcı ve hat parametreleriyle aynı verilere sahip bir tez çalışmasının sonuçları kıyaslamalı olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmada GSK tasarımına yeni bir yaklaşım olarak sunulan ayırık-zaman model referans kayan kipli kontrolör (MR-KKK) tabanlı GSK yapısının performansı farklı çalışma noktaları ve hat empedansı değerleri için literatürde mevcut olan 3 farklı GSK yapısı (klasik, LQR tabanlı ve KKK tabanlı) ile, benzetim sonuçları üzerinden kıyaslamalı olarak incelenmiş ve en iyi sonucu veren yapının MR-KKK olduğu ortaya konulmuştur [31]. Aynı çalışma şartları altında önerilen dayanıklı kayan kipli kontrolörle yapılan simülasyon sonuçlarına göre maksimum aşma ve yerleşme zamanında (2. ve 4. çalışma noktaları hariç) MR-KKK'ya oranla daha iyi performans sağlandığı grafiksel olarak gösterilmiştir.



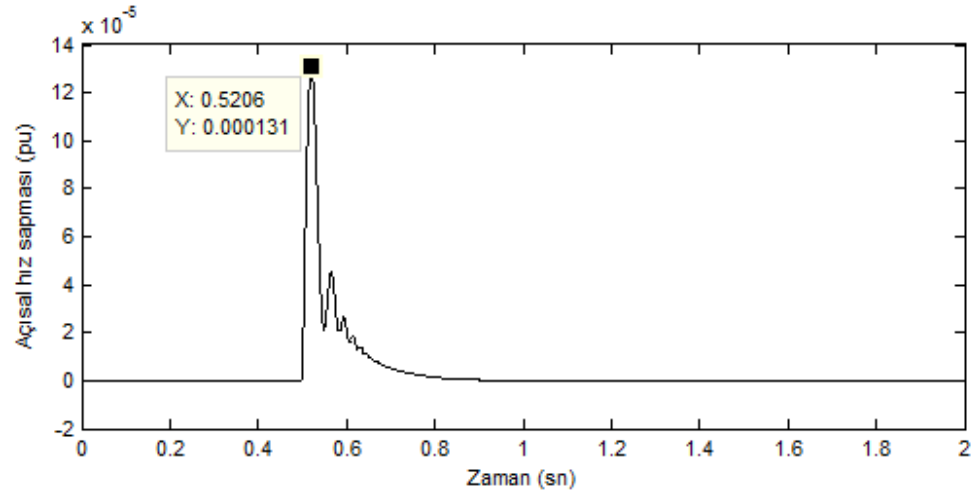
Şekil 7.16. P=0.75, Q=0.06, xe=0.2 için açılmal hız sapması değişimi



Şekil 7.17. P=0.75, Q=0.04, xe=0.4 için açılmal hız sapması değişimi



Şekil 7.18. P=1, Q=0.2, xe=0.2 için açısal hız sapması değişimi



Şekil 7.19. P=1.4, Q=0.3, xe=0.8 için açısal hız sapması değişimi

Şekil 7.16 ile Şekil 7.19 arasındaki grafiklerde farklı çalışma şartlarına göre sistemin hız sapma değişimleri verilmiştir. Önerilen dayanıklı GSK yapısı ile MR-KKK tabanlı GSK yapısının performansı maksimum aşma ve yerleşme zamanı için Tablo 7.3 ve Tablo 7.4 'de verilen değerler kullanılarak kıyaslama yapılabilir.

Tablo 7.3. Maksimum aşma (pu)

	P=0.75, Q=0.06, xe=0.2	P=0.75, Q=0.04 xe=0.4	P=1.0, Q=0.3 xe=0.2	P=1.4, Q=0.3 xe=0.8
MR-KKK	1.4×10^{-4}	1.5×10^{-4}	1.5×10^{-4}	3.1×10^{-4}
Önerilen GSK	1.08×10^{-4}	1.21×10^{-4}	1.08×10^{-4}	1.31×10^{-4}
Fark	0.32×10^{-4}	0.29×10^{-4}	0.42×10^{-4}	1.79×10^{-4}
İyileşme %	22	20	28	57

Tablo 7.4. Yerleşme zamanı (sn)

	P=0.75,Q=0.06, xe=0.2	P=0.75,Q=0.04 xe=0.4	P=1.0, Q=0.3 xe=0.2	P=1.4, Q=0.3 xe=0.8
MR-KKK	0.22	0.30	0.25	0.30
Önerilen GSK	0.21	0.33	0.22	0.37
Fark	0.01	-0.03	0.03	-0.07
İyileşme %	4.5	-10	12	-23

Tablo 7.3 incelenirse MR-KKK yapısına oranla %57'lere varan bir iyileşme olduğu görülmüştür. Tablo 7.4'de verilen yerleşme zamanlarına göre, ikinci ve dördüncü çalışma noktalarında MR-KKK yapısına oranla önerilen kontrolörün performans kaybına uğradığı gözlemlenebilir.

7.4. Gradyan Düşüm Optimizasyon Yöntemi ile Termik Türbin Kontrolünün Performans İncelemesi

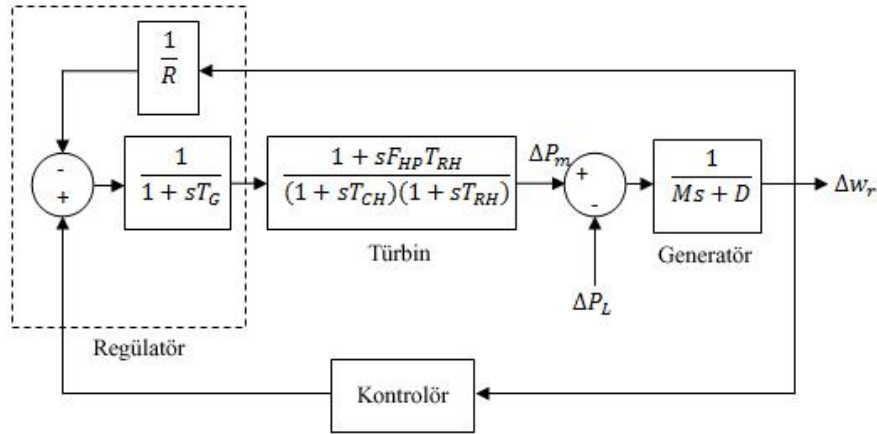
Bu kısımda termik türbin ve hız regülatör ünitesinin dinamik performansını iyileştirmek için dayanıklı türbin kontrol sistemi yapısı üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bölüm 6.3'de oluşturulan dayanıklı kontrolör yapısı, termik türbinle birlikte kullanılmıştır. Ancak bu yapıda bulunan BMK bloğu kontrolöre dahil edilmemiştir. Bu yapı geleneksel PID kontrolör ile kıyaslanmıştır. Ayrıca her iki kontrolöre parametreler gradyan düşüm algoritmasıyla kısıtlanmalı optimizasyon tekniği kullanılarak elde edilmiştir.

Bir termik türbin, yüksek basınç ve yüksek sıcaklığa sahip buharda depolanan enerjiyi, mekanik enerjiye dönüştürerek generatöre giriş mekanik enerjisini sağlar [1]. Günümüzde, termik türbin-jeneratör sistemleri daha verimli türbinlere ihtiyaç duyar. Hız regülatör sistemi senkronizasyonu sağlamakta ve dayanıklı regülatör kontrolörü güç sistem kararlılığını iyileştirmektedir.

Yük-frekans kontrolü, güç sistemlerinde sıfır kararlı durum hatalarını devam ettirmek için çok önemlidir [32]. Bunlardan en çok bilinen yük-frekans kontrol tekniği basit yapıları nedeniyle PID kontrolörlerdir [33]. Ancak güç sistemleri doğrusal olmadıklarından, PID kontrolörler her çalışma şartı için tatmin edici sonuçlar vermemektedir.

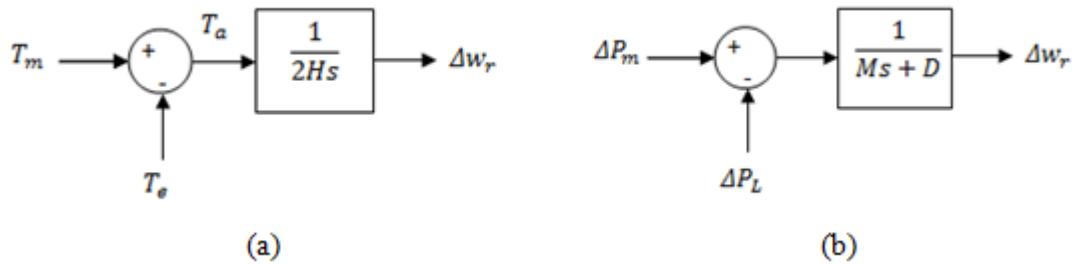
7.4.1. Sistem Modeli

Çalışmada ön ısıtmalı buhar türbin modeli kullanılmıştır. Şekil 7.20’de termik türbinli tek alanlı güç üretim ünitesinin blok diyagramı gösterilmiştir. Bu yapı, hız regülatörü, ön ısıtmalı türbin, generator (rotor ataleti ve yük) modeli ve destekleyici kontrol bloğunu içermektedir. Türbin transfer fonksiyonu basitleştirilmiştir ve sabit kazan basıncı kabulü yapılmıştır.



Şekil 7.20. Termik türbinli tek alanlı güç üretim ünitesi blok diyagramı

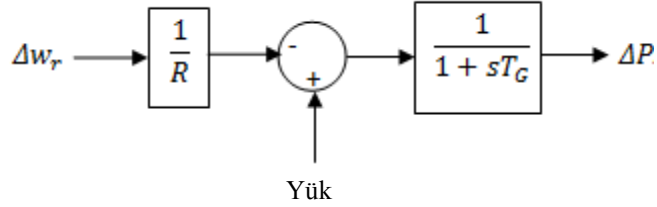
Generatör birinci dereceden transfer fonksiyonu kullanılarak modellenmiştir. Generatör çıkışı olan rotor hız farkı (Δw_r), destekleyici kontrolörün girişini oluşturmaktadır. Şekil 7.21’de güç, hız ve momente ait transfer fonksiyonu verilmiştir [1].



Şekil 7.21. (a) Hız ve momente ait transfer fonksiyonunu (b) Güç ve momente ait transfer fonksiyonu

Hız regülatör sistemi, yükte meydana gelen değişiklikleri kompanze etmek için giriş valfini ayarlayarak mekanik güç çıkışını değiştirir. Böylece frekans nominal değerine

ulaşmış olur. Net kazanç $1/R$ ve zaman sabiti T_G 'ye sahip bir hız regülatörüne ait blok diyagramı Şekil 7.22'de verilmiştir [34].

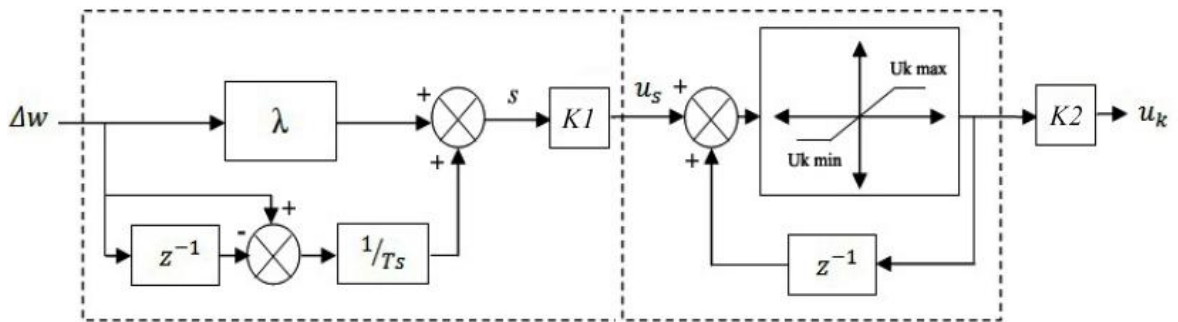


Şekil 7.22. Hızda azalma özelliğine sahip hız regülatörünün transfer fonksiyonu

Moment ve valf pozisyon kontrolüne ait türbin transfer fonksiyonu eşitlik (7.1)'deki gibi yazılabilir.

$$\frac{\Delta T_m}{\Delta V_{CV}} = \frac{1 + sF_{HP}T_{RH}}{(1 + sT_{CH})(1 + sT_{RH})} \quad (7.1)$$

Kontrolör olarak önceki bölümlerde kullanılan bulanık mantık yapısı sisteme dahil edilmemiştir. Ayırık zamanlı dayanıklı kontrolöre ait blok şeması Şekil 7.23'de gösterilmiştir.



Şekil 7.23. Termik türbinli güç sistemi için tasarlanan kontrolör yapısı

7.4.2. Gradyan Düşüm Optimizasyon Yöntemi

Gerekli olan kontrol işaretini üretmek için kullanılan kontrolör parametreleri gradyan düşüm algoritmasıyla optimize edilmiştir. Bu algoritma optimize edilmiş sonuç için

yakınsak değerler sunmaktadır. Birinci dereceden bir optimizasyon algoritması olan gradyan düşüm kullanılarak bir fonksiyonun yerel minimum noktası bulunabilir. Gradyan düşüm algoritması kavramsal olarak basit bir optimizasyon yöntemidir ve genellikle hızlı yakınsar. Temel gradyan düşüm formülasyonu eşitlik (7.2)'deki gibi yazılabilir.

$$w(k+1) = w(k) - \eta(k)\nabla J(w(k)) \quad (7.2)$$

Öncelikle ağırlık vektörü $w(1)$ keyfi olarak seçilir ve gradyan vektörü $\nabla J(w(1))$ hesaplanır. Sonraki değer olan $w(2)$, negatif eğim boyunca dik iniş yönünde $w(1)$ 'den itibaren belli bir mesafede hareket ettirerek elde edilir. Öğrenme oranı $\eta(k)$ adım aralığını ayarlar. Kriter fonksiyonu $J(w)$ eşitlik (7.3)'deki gibi ifade edilir.

$$J(w) \simeq J(w(k)) + \nabla J^t(w - w(k)) + \frac{1}{2}(w - w(k))^t H(w - w(k)) \quad (7.3)$$

İkinci dereceden kısmi türev Hessian matrisi olarak tanımlanmaktadır. Eşitlik (7.4)'deki gibi ifade edilir.

$$H = \frac{\partial^2 J}{\partial w_i \partial w_j} \quad (7.4)$$

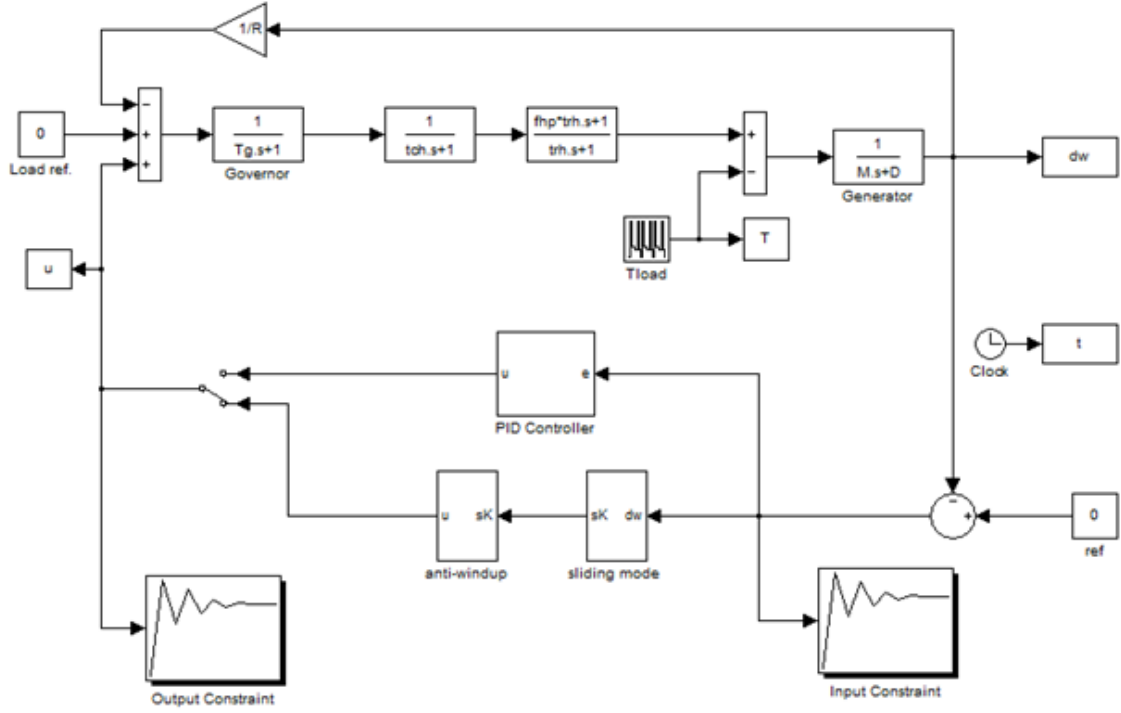
$$J(w(k+1)) \simeq J(w(k)) - \eta(k)\|\nabla J\|^2 + \frac{1}{2}\eta^2(k)\nabla J^t H \nabla J \quad (7.5)$$

$$\eta(k) = \frac{\|\nabla J\|^2}{\nabla J^t H \nabla J} \quad (7.6)$$

Eşitlik (7.6)'nın seçimiyle eşitlik (7.5) minimize edilebilir. Eğer minimum uzunluktaki ağırlık vektörü w çözüm vektörü ise, kriter fonksiyonu $J(w)$ minimize edilmiştir [35].

7.4.3. Simulasyon Çalışması

Simulasyon sonuçları, Matlab/Simulink ortamında 0.01 sn örnekleme periyoduyla elde edilmiştir. Sisteme ait Simulink blok diyagramı Şekil 7.24'de verilmiştir. Tablo 7.5'de verilen nominal parametreler tüm çalışma şartları ve kontrolörler için aynı alınmıştır.

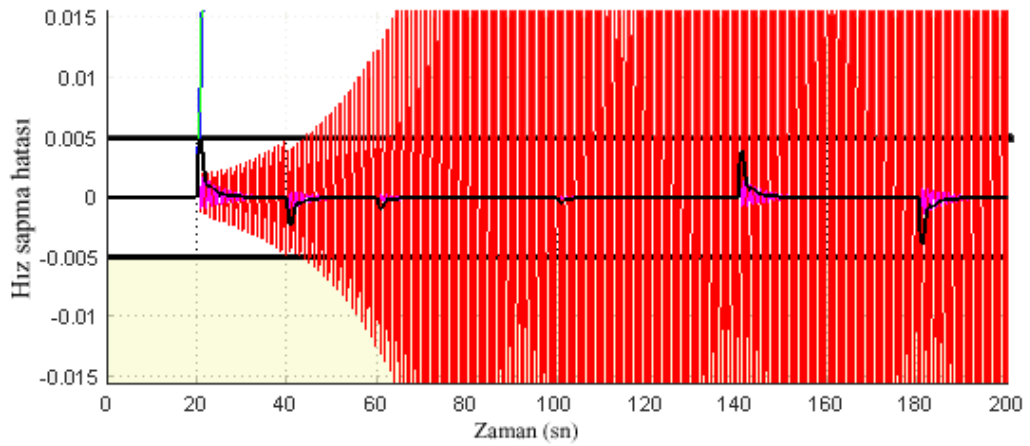


Şekil 7.24. Tek alanlı termik türbin yapısının simulink blok diyagramı

Tablo 7.5. Ön ısıtmalı termik türbin parametreleri

R	0.05 pu	F_{HP}	0.3 pu
T_G	0.08 sn	F_{LP}	0.7 pu
T_{RH}	7 sn	M	10 sn
T_{CH}	0.3 sn	D	1 pu

Optimizasyon süresince hız sapmasındaki hata miktarına ait değişim grafiği ise Şekil 7.25’de, elde edilen yeni parametre değerleri ise Tablo 7.6’da verilmiştir.

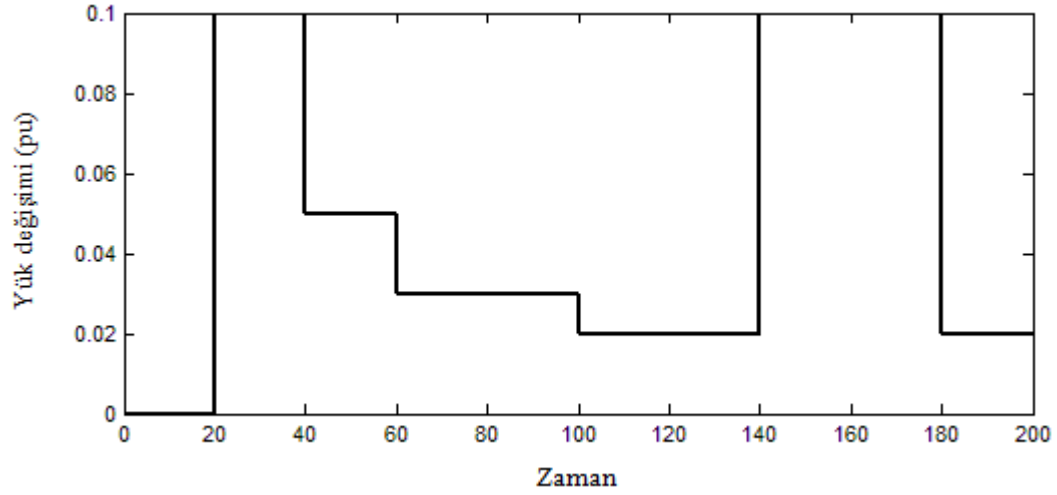


Şekil 7.25. Optimizasyon süresince hız sapmasındaki hata değişimi

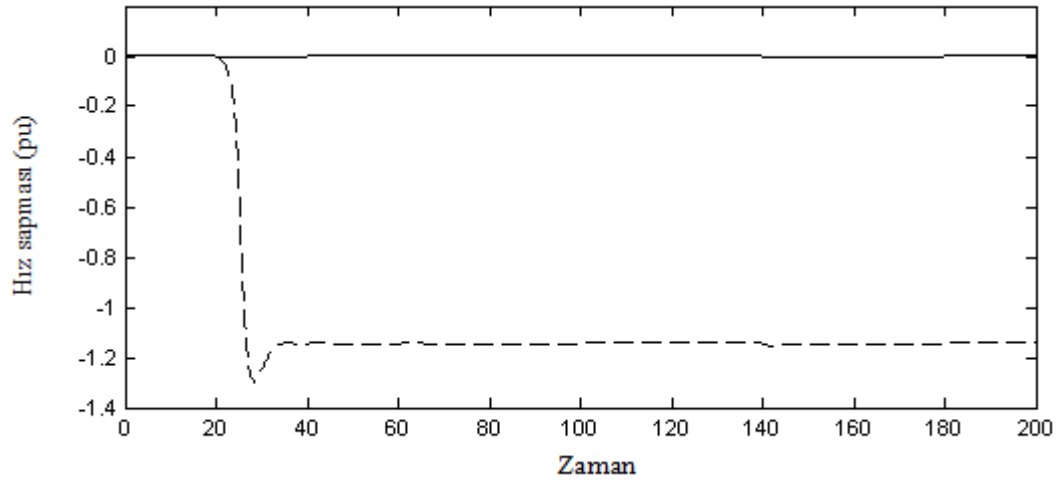
Tablo 7.6. Optimizasyona sonucunda elde edilen parametre değerleri

İterasyon Sayısı	Maksimum Kısıtlama	Adım boyutu	Renk
0	1531	-	Mavi
1	1105	6.64	Yeşil
2	983.8	6.47	Kırmızı
3	1.247	0.899	Pembe
4	0	3.25	Siyah
Başlangıç Değerleri : $K1= 0.05$ $K2= -8$ $\lambda = 0.35$			
Son Değerler : $K1= 0.3$ $K2= 2.55$ $\lambda = 0.1846$			

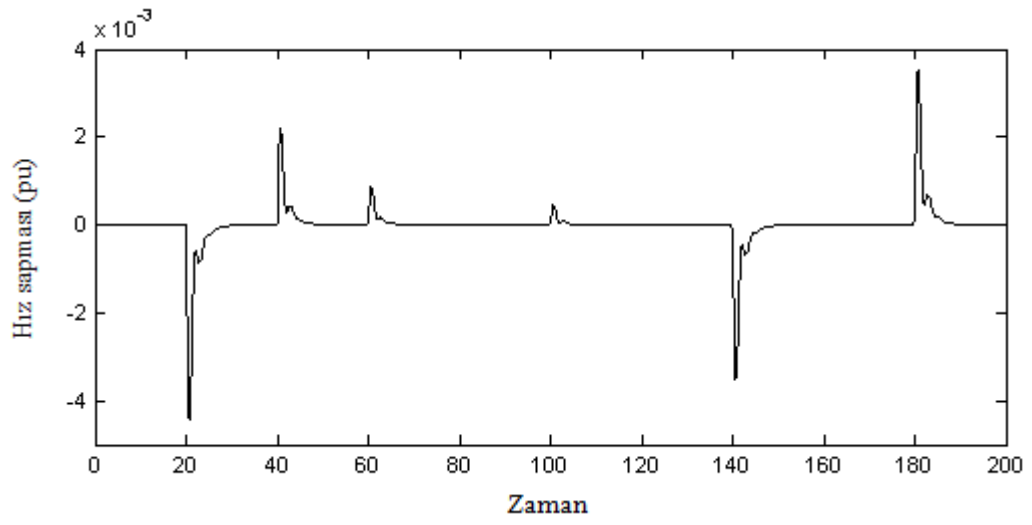
Simulasyon çalışmasında kullanılan ve sisteme etki eden yük değişimi Şekil 7.26’da gösterilmiştir.



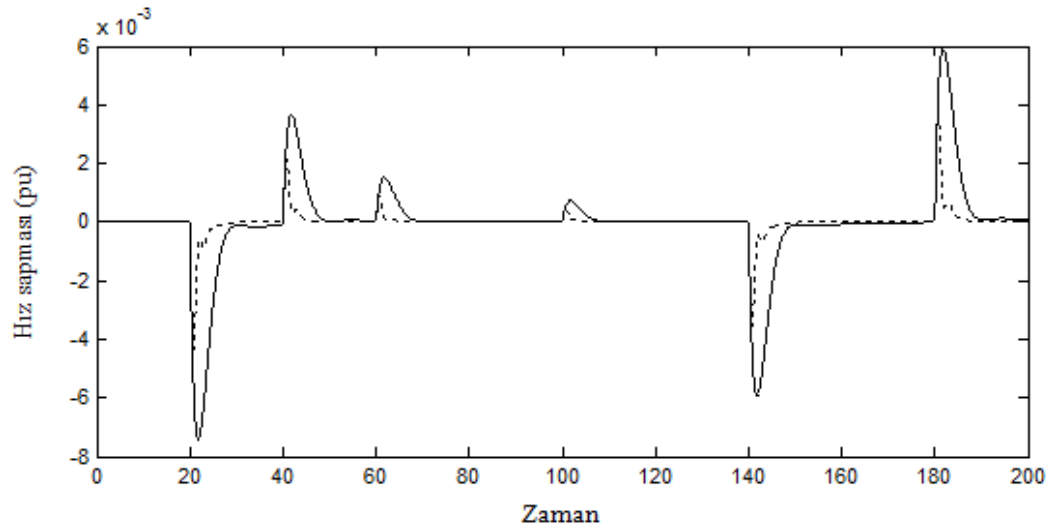
Şekil 7.26. Yük değişim grafiği



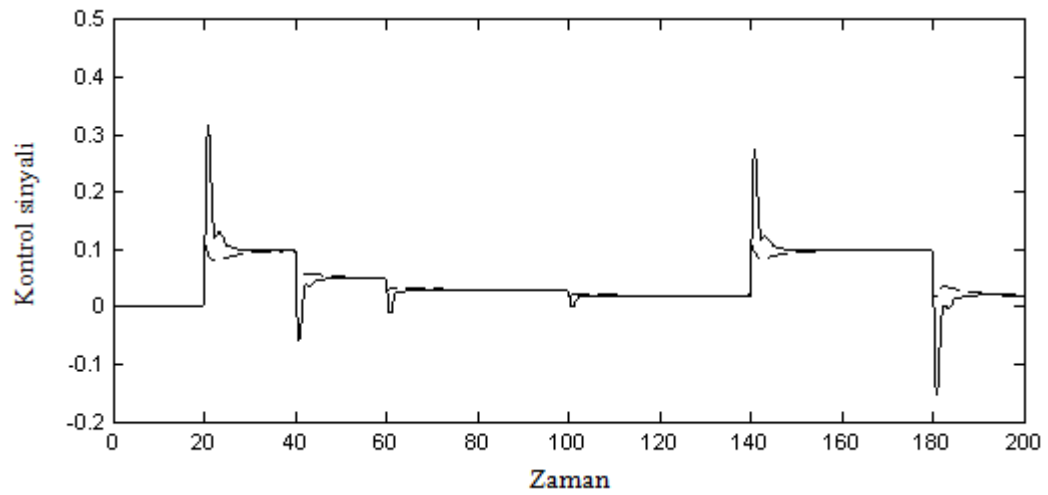
Şekil 7.27. Hız sapma grafiği (- Önerilen Kontrolör, - - Kontrolsüz Durum)



Şekil 7.28. Hız sapma grafiği (Önerilen Kontrolör)



Şekil 7.29. Hız sapma grafiği (- - Önerilen Kontrolör, - PID Kontrolör)



Şekil 7.30. Kontrol sinyali (- Önerilen Kontrolör, - - PID Kontrolör)

Tablo 7.7. Maksimum aşma (pu)

Yük değişimi (pu)	+ 0.1	- 0.05	-0.02	-0.01	+0.08	-0.08
PID Kontrolör	-0.0074	0.0036	0.0015	0.00070	-0.0059	0.0059
Önerilen Kontrolör	-0.0044	0.0022	0.0008	0.00044	-0.0035	0.0035
İyileşme (%)	40	39	46	38	40	40

Tablo 7.8. Yerleşme zamanı (sn)

Yük değişim zamanı (sn)	20	40	60	100	140	180
PID Kontrolör	33	52	74	109	152	192
<i>Değişim</i>	13	12	14	9	12	12
Önerilen Kontrolör	30.9	50.12	68.3	106.6	151.3	190.8
<i>Değişim</i>	10.9	10.12	8.3	6.6	11.3	10.8
İyileşme (%)	16	15.8	42	27	8	10

Şekil 7.27’de, önerilen kontrolör ve sisteme herhangi bir kontrolörün etki etmediği durum aynı grafikte ele alınmıştır. Sistem dinamiği yükteki değişime bağlı olarak kontrolsüz durumda kararsız bir yapı sergilemektedir. Ancak önerilen kontrolörle birlikte kararlılık, her değişim sonucunda sağlanmıştır.

Şekil 7.29’da PID ve önerilen kontrolör yapısı kıyaslamalı olarak incelenmiştir. Bu değişime göre maksimum aşma ve yerleşme zamanı değerleri tablo halinde sırasıyla Tablo 7.7 ve Tablo 7.8’de ayrıntılı olarak verilmiştir. Maksimum aşma miktarında %46’lara varan iyileşme sağlanırken yerleşme zamanında bu değer %42’dir. Şekil 7.30’da ise her iki kontrolöre ait denetim sinyali verilmiştir.

Sonuç olarak önerilen kontrolör, tek alanlı termik türbinli güç sisteminde yerleşme zamanı ve maksimum aşma kriterleriyle PID kontrolöre göre üstünlük sağlamıştır.

8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Günümüzde sürekli, kaliteli ve güvenli elektrik enerjisi akışının sağlanması gerekliliği nedeniyle, doğrusal olmayan güç sistemlerinde bozucu sonrası oluşan düşük frekanslı salınımların yok edilmesi yönündeki çalışmalar artarak devam etmektedir. Düzensiz yük değişimleri ve hat empedansındaki farklılıklar nedeniyle oluşan bu salınımların bastırılmasında GSK sıkça kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında klasik faz iletici- geriletici GSK ile birlikte bulanık mantık tabanlı KKK kullanıldığı dayanıklı güç sistem kararlayıcısı farklı çalışma şartları için karşılaştırmalı olarak kıyaslanmıştır. Bu amaçla öncelikle sonsuz güçlü barayı besleyen doğrusallaştırılmış SG modeli oluşturularak sistemin ek bir kontrolör içermeyen performansı incelenmiştir. Sistem parametreleri de göz önünde bulundurularak klasik faz iletici-geriletici GSK tasarlanarak kapalı döngü çevrime eklenmiştir. Bu yapının ek kontrolör içermeyen sisteme göre daha iyi performans sağladığı ve bozucu sonrası oluşan salınımları generatör zaman sabiti de göz önünde bulundurularak istenilen süre içerisinde bastırdığı gözlemlenmiştir. Daha sonra önerilen dayanıklı GSK tasarlanmış ve KGSK ile kıyaslanmıştır. Oluşturulan SBSG modelinde doğrusallaştırma sonucu oluşan katsayılar farklı çalışma şartlarıyla değiştiği için sistem performansında önerilen GSK yapısının KGSK yapısına göre daha üstün olduğu gösterilmiştir. Böylece parametre değişimlerine fazla duyarlı olmayan dayanıklı (robust) bir yapı oluşturulmuştur. İntegral kompanzatör ile birlikte kullanılan KKK yapısı klasik kuralları içermediği için tasarım olarak daha basit hale getirilmiştir. Kontrolör ayrık zaman tabanlı olduğundan gerçek zamanlı GSK uygulamalarında sayısal tabanlı işlemcilerin kullanılması kolay hale gelmektedir. Ayrıca oluşturulan GUI yazılımı ile kullanışlı bir toolbox oluşturulmuştur.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında değişken şartlar altındaki güç sisteminin dinamik cevabını iyileştirmek amacıyla dayanıklı ve basit GSK tasarımına pratik bir yaklaşım sunulmuştur. Ayrıca farklı literatür çalışmalarıyla kıyaslamalı olarak incelenmiştir. Elde edilen grafiklere göre sistemin dinamik performansını ve iyileşme oranlarını gösteren tablolar incelendiğinde, önerilen GSK'nın maksimum aşma ve kısa yerleşme zamanında yaklaşık olarak %67'lere varan iyileşme sağladığı altı farklı çalışma noktası için gösterilmiştir. Bu oran, katsayılardaki değişiklikler ve *örnekleme periyodunun artırılmasıyla* %76'lara çıkarılabilmektedir.

9. ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında önerilen dayanıklı GSK yapısı sonsuz barayı besleyen SG'ün doğrusallaştırılmış modeli üzerinden incelenmiştir. Oluşturulan bu yapının çok makinalı güç sisteminde incelenmesi uygun olabilir. Sistemin gerçek zamanlı uygulaması alan programlanabilir kapı dizileri (FPGA) kullanılarak daha verimli çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Kundur, P.**, 1994. Power System Stability and Control, McGraw-Hill, Inc.
- [2] **Anderson, P.M. Fouad and A.A.**, 1994. Power System Control and Stability, IEEE Press.
- [3] **Ramdan, G. ve Smaili, Y.**, 1988. Performance Evaluation of PID Power System Stabilizer for Synchronous Generator, *Southeastcon '88, IEEE Conference*, pp.597-601., 11-13.
- [4] **Chapman, J. S.**, 2007. Elektrik Makinalarının Temelleri, (Çev: Akın, E., Orhan, A.), Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
- [5] **Tacer, E.**, 1990. Enerji Sistemlerinde Kararlılık, İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi, İstanbul.
- [6] **Demirören, A. Ve Zeynelgil, L.**, 2004. Elektrik Enerji Sistemlerinin Kararlılığı Kontrolü ve Çalışması, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- [7] **De Mello, F. Concordia, P. and C.**, 1969. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control, *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-88, pp. 316–329.
- [8] **F.P. de Mello, L.N. Hannett and J.M. Undrill**, 1978. Practical approach to supplementary stabilizing from accelerating power, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* PAS-97 pp. 1515–1522.
- [9] **Ong, C.H.**, 1985. Dynamic Simulation of Electric Machinery , Pren. Hall, pp.1-560.
- [10] **Fitzgerald, A.E., Kingsley C., Umans, S.D.**, 1985. Electric machinery McGraw Hill, pp. 1-280.
- [11] **Krause, P.C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S.D.**, 2002. Analysis of electric machinery and drive systems, John Wiley and Sons, pp.1-120.
- [12] **Mergen A.F., Zorlu, S.**, 2006. Elektrik makineleri III, Senkron makineler, Birsan Yayınevi, pp.1-120.

- [13] **Venikov, V.A.**, 1978. Transient process in electrical power systems., UAAR, Mir, Moscow.
- [14] **J. Machowski, J.W. Bialek, and J.R. Bumby**, 2008. Power System Dynamics: Stability and Control, second edition, Wiley.
- [15] **Baykal, N., Beyhan, T.**, 2004. Bulanık Mantık Uzman Sistemler ve Denetleyiciler, Bıçaklar, Ankara.
- [16] **Elmas, Ç.**, 2003. Bulanık Mantık Denetleyiciler, Seçkin, Ankara.
- [17] **Nabiyev, V. V.**, 2003. Yapay Zeka, Seçkin, Ankara, pp. 639-652.
- [18] **Şen, Z.**, 2001. Bulanık Mantık ve Modelleme İlkeleri, Bilge Kültür Sanat, İstanbul.
- [19] **Yılmaz, M. ve Arslan, E.**, 2005. Bulanık Mantığın Jeodezik Problemlerin Çözümünde Kullanılması, *Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu, 2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu*, 23-25 Kasım, pp.512-522.
- [20] **Akpolat, Z.H.**, 2000. Bulanık Mantık Ders Notları
- [21] **Utkin, V. I.**, 1993. Sliding Mode Control Design Principles and Applications to Electric Drives, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.40, No.1, pp. 23-35.
- [22] **Hung, J. Y., Gao, W., Hung, J. C.**, 1993. Variable Structure Control: A Survey, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 40, No.1, pp.2-21.
- [23] **Slotine, J.J.E., Li, W.**, 1991. Applied Nonlinear Control, Prentice-Hall.
- [24] **Kothari, M.L., Nanda, J., Bhattacharya, K.**, 1993. Design of variable structure power system stabilizers with desired eigenvalues in the sliding mode , *IEEE Proceedings-C*, 140, 4, pp. 263-268.
- [25] **Akpolat, Z.H., Asher, G.M., Clare, J.C.**, 2000. A practical approach to the design of robust speed controllers for machine drives, *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, 47 (2), 315-324.
- [26] <http://community.interpss.org>

- [27] **Heffron, W.G., Phillips, R.A.,** 1952. Effect of Modem Amplidyne Voltage Regulators on Underexcited Operation of Large Turbine Generators, *AIEE Trans. PAS*, 71, pp. 692-697.
- [28] **L.A. Zadeh,** 1965. Fuzzy sets, *Information and Control* 8, 338-353.
- [29] **IEEE Power Eng. Soc.,** 2005, Recommended practice for excitation system models for power system stability studies, IEEE Std 421.5
- [30] **Koca, Ö.G.,**2005. Kayma Kipli Kontrol ve Bulanık Mantık Kullanarak Elektrikli Araçların Hız Kontrolü, *Yüksek Lisans Tezi*, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [31] **Yazıcı, İ.,** 2008. Model Referans kayan Kipli Kontrolör Tabanlı Güç Sistem Kararlayıcı Tasarımı, *Doktora Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [32] **Çam, E. and Kocaarslan, İ.,** 2005. Load frequency control in two area power systems using fuzzy logic controller , *Energy Conversion and Management, Elsevier* 46 (2005) 233–243.
- [33] **Nademi, H. and Tahami, F.,** 2009. Robust controller design for governing steam turbine power generators, *International Conference on Electrical Machines and Systems ICEMS*.
- [34] **Wood, A.J. and Wollenberg, B.F.,** 1996. Power Generation, Operation, and Control, John Wiley & Sons, Inc.
- [35] **Duda, R.O., Hart, P.E., Stork, D.G.,** 2000. Pattern Classification, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc.

EKLER

EK-A Başlangıç Değerlerini Hesaplayan ve Grafikselle Kullancı Arayüzü Oluşturan Program

Aşağıdaki program parçasında temel hesaplamaların yapıldığı kısım verilmiştir. Matlab'da GUI oluşturmak için çağırılan fonksiyonların tamamı ekte yer almamaktadır.

format short e

```
f= str2double(get(handles.F1,'String'));
Frated =str2double(get(handles.Frated1,'String'));
re=str2double(get(handles.re1,'String'));
xe=str2double(get(handles.xe1,'String'));
xd =str2double(get(handles.xd1,'String'));
xq =str2double(get(handles.xq1,'String'));
xpd =str2double(get(handles.xpd1,'String'));
Si=str2double(get(handles.Si1,'String'));
Vto=str2double(get(handles.Vto1,'String'));
H =str2double(get(handles.H1,'String'));
D=str2double(get(handles.D1,'String'));
KA =str2double(get(handles.KA1,'String'));
TA =str2double(get(handles.TA1,'String'));
Tpdo=str2double(get(handles.Tpdo1,'String'));

% -----

I=Si/Vto;
It=abs(I);
fi=angle(I);
wb=2*pi*Frated;
IQo=It*sin(fi);
IPo=It*cos(fi);
Eqo=sqrt((Vto+IQo*xq)^2+(IPo*xq)^2);
Vo=sqrt((Vto-IPo*re-IQo*xe)^2+(IPo*xe-IQo*re)^2);
delto=asin((Vto*IPo*(xq+xe)-Vto*IQo*re)/(Eqo*Vo));
delo=delto*180/pi;
Ido=(IPo^2*xq+IQo*(Vto+IQo*xq))/Eqo;
Vqo=((Vto+IQo*xq)/Eqo)*Vto;
IQo=IPo*Vto/Eqo;
Iqo=IQo;
Vdo=Iqo*xq;
Epqo=Vqo+xpd*Ido;
```

```

% -----
K12=((xq-xpd)/(xe+xpd))*Iqo*Vo*sin(delto)+(Eqo*Vo*cos(delto)/(xe+xq));
K22=Vo*sin(delto)/(xpd+xe);
K32=(xpd+xe)/(xd+xe);
K42=((xd-xpd)/(xpd+xe))*Vo*sin(delto);
K52=xq/(xq+xe)*(Vdo/Vto)*Vo*cos(delto)-xpd/(xpd+xe)*(Vqo/Vto)*Vo*sin(delto);
K62=(Vqo/Vto)*xe/(xe+xpd);

% -----
K11 = num2str(K12);
K21 = num2str(K22);
K31 = num2str(K32);
K41 = num2str(K42);
K51 = num2str(K52);
K61 = num2str(K62);
% -----

set(handles.K1,'String',K11);
set(handles.K2,'String',K21);
set(handles.K3,'String',K31);
set(handles.K4,'String',K41);
set(handles.K5,'String',K51);
set(handles.K6,'String',K61);
string = 'K11';
Value = 'K11';
assignin('base', K11, K11);
guidata(hObject, handles);
function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
function popupmenu1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function pushbutton_baslat_Callback(hObject, eventdata, handles)
axes(handles.axes1);
options = simset('SrcWorkspace','base');
sim('SBSGBDM2',[],options);
cla;
popup_sel_index = get(handles.popupmenu1, 'Value');
switch popup_sel_index

case 1

    plot(t,dw);
    xlabel('Zaman (sn)')
    ylabel('dW')
    Title('Açısal Hız Sapması')

```

```

case 2
    plot(t,dteta);
    xlabel('Zaman (sn)')
    ylabel('dteta')
    Title('Rotor Açık Sapması')

case 3

    plot(t,ucont);
    xlabel('Zaman (sn)')
    ylabel('Ucont')
    Title('Kontrol İşareti')

case 4

    plot(t,Mboz);
    xlabel('Zaman (sn)')
    ylabel('Mboz')
    Title('Bozucu İşaret')
end
function pushbutton_durdur_Callback(hObject, eventdata, handles)
mystring = get(hObject,'String');
status = get_param(bdroot,'simulationstatus');
if strcmp(mystring,'Simulasyonu Durdur')
    if strcmp(status,'running')
        set_param(bdroot, 'SimulationCommand', 'Stop')
    end
    warning('Unrecognized string for pushbutton_durdur') %#ok<WNTAG>
end
assignin('base','PSS2_handles',handles)
assignin('base','startstop_hObject',handles.pushbutton_durdur)

function sec_Callback(hObject, eventdata, handles)
value = get(hObject,'Value');

if value == 0
    set_param([bdroot '/Manual Switch'],'sw','0')
else
    set_param([bdroot '/Manual Switch'],'sw','1')
end

assignin('base','PSS2_handles',handles)
assignin('base','switch_hObject',handles.sec)

```

EK-B Senkron Makina Parametrelerinin Belirlenmesi

Hem analiz hem de kontrol açısından gerekli sonuçların elde edilebilmesi için makina parametrelerinin yeterli doğrulukta belirlenmesi gerekir. Bu parametrelerin belirlenmesi için genellikle deneysel yöntemler kullanılır. Tasarım uygulamalarında analitik hesaplama yöntemleriyle parametreler belirlenir. Çıkık kutuplu senkron makinelerin d-q eksenleri için yazılan diferansiyel denklemleri yükün dengeli olma halinde ve üç fazlı kısıadevrede zamanla değişmeyen türdendir. Bundan dolayı bu modelde analitik çözümler kolayca yapılabilir. Ancak simetrik olmayan kısa devrelerde ve dengesiz yüklenmelerde doğrudan üç faz model üzerinden inceleme yapılması kolaylık sağlar.

Matematiksel modellerin doğru sonuç vermeleri ancak parametrelerin duyarlı bir şekilde belirlenmesi ile mümkündür. Çıkık kutuplu makinada, doğrudan yazılan denklemler ile elde edilen faz model parametrelerini ölçme olanağı olsa da bu yöntemle parametre belirlenmesi uzun zaman gerektirir. Bu nedenle senkron makina faz parametrelerini doğrudan ölçmek yerine, d-q model parametrelerini ölçmek zaman açısından daha uygun olacaktır.

Güç sistem kararlık çalışmalarında kullanılan doğrusal modelde belirlenmesi gereken parametreler şunlardır; x_d , x_q , x_d' , T_{do}' .

EK-B.1. Boyuna senkron reaktans (X_d)

Makina anma hızında çalışırken boyuna endüvi akımının oluşturduğu endüvi akısının ürettiği endüvi geriliminin, temel frekanslı alternatif akım sürekli değerinin; boyuna endüvi akımı temel frekans alternatif akım bileşenine oranıdır (IEC).

Nominal hızıyla dönen makinada boyuna yöndeki endüvi akımı tarafından meydana getirilmiş olan boyuna yöndeki toplam magnetik akının oluşturduğu gerilimin 1. harmoniği ile bu akımın alternatif bileşeninin 1. harmoniği değeri arasındaki orana eşittir. Doymamış duruma karşılık olan x_d , boşa çalışma (boşa doyma), kısa devre ve üç faz sürekli kısa devre karakteristiklerinden belirlenir. Genel olarak enine yöndeki senkron reaktans boyuna yöndeki senkron reaktansın %70-75 arasındadır.

EK-B.2. Enine senkron reaktans (X_q)

Nominal hızıyla dönen makinada enine yöndeki endüvi akımı tarafından meydana getirilmiş olan enine yöndeki toplam magnetik akının oluşturduğu gerilimin 1. harmoniği ile bu akımın alternatif bileşeninin 1. harmoniği değeri arasındaki orana eşittir.

Enine senkron reaktans, negatif uyarma (en büyük endüktif akım), düşük kayma, yük açısının yükte ölçülmesi yöntemleriyle belirlenir. Ayrıca ampirik yöntemle bilinen bir x_d değerinden x_q belirlenebilir. İlk iki yöntem tercih edilendir.

EK-B.3. Boyuna geçici reaktans (X_d')

Nominal hızıyla dönen makinada boyuna yöndeki toplam magnetik akı tarafından meydana getirilen ve ani değişikliğe uğrayan endüvi geriliminin 1. harmoniği ile bu akımın alternatif bileşeninin 1. harmoniği değeri arasındaki orana eşittir.

Boyuna geçici reaktans; ani üç faz kısa devre, gerilim toparlanması (gerilimin tekrar gelmesi), x_d nin bulunmasıyla ilgili deney değerlerinden faydalanılarak yapılan hesapla bulunur. Üç faz kısa devre deneyi tercih edilen deneydir.

EK-B.4. Boyuna geçici açık devre zaman sabiti (T_{do}')

Makina anma hızında çalışırken çalışma koşullarındaki ani değişiklikten sonra boyuna katının neden olduğu açık devre endüvi geriliminin yavaş değişimli bileşeninin başlangıç değerinin $1/\epsilon=0,368$ katına düşmesi için geçen zamandır.

Boyuna geçici açık devre zaman sabiti, endüvi sargısı açık devre edildiğinde uyarma akımı azalma deneyi ve gerilim toparlama deneylerinin yanı sıra x_d , x_d' ve T_d' değerlerinden $x_d \cdot T_d' = x_d' \cdot T_{do}'$ ifadesiyle bulunur. Uyarma akımı azalma yöntemi tercih edilmelidir.

EK-B.5. Boşta Çalışma Deneyi ve Karakteristiği

Yüksüz (boşta) sabit nominal devir sayısı ile tahrik edilen makinanın endüvisinde endüklenen gerilim (E) ile uyarma akımı I_m arasındaki değişimi veren eğridir. Senkron

makinanın doymamış durumdaki senkron reaktansı boşta çalışma karakteristiği ile bulunur. Karakteristiğin elde ediliş işlem basamakları aşağıdadır.

- Makina başka bir tahrik vasıtasıyla nominal hızına çıkarılır. $n=n_n=\text{sabit}$
- Uyarma akımı kademeli olarak sıfırdan başlanarak artırılır ve mümkün olan uyarma sınırına çıkarılır. Her kademe için uyarma akımı ve statorda indüklenen gerilim iç direnci büyük bir voltmetreyle ölçülür.
- Uyarma akımı en büyük değerinden yine aynı kademelerle geri getirilir ve uyarmasız durum artık gerilimi ölçülür.
- Tüm faz gerilimlerinin ölçülmesi makinanın simetrisi kontrol amacıyla önemlidir. Boşta alışma karakteristiği yüksek artık gerilim nedeniyle koordinat ekseninin başlangıç noktası üzerinde bir noktada keşiştiğinde boşta çalışma eğrisinin doğrusal bölümü absis eksenine keşişme noktasına kadar uzatılır. Absis eksenindeki bu noktanın başlangıç noktasına olan uzaklığı ölçülen tüm uyarma akımlarına eklenir.

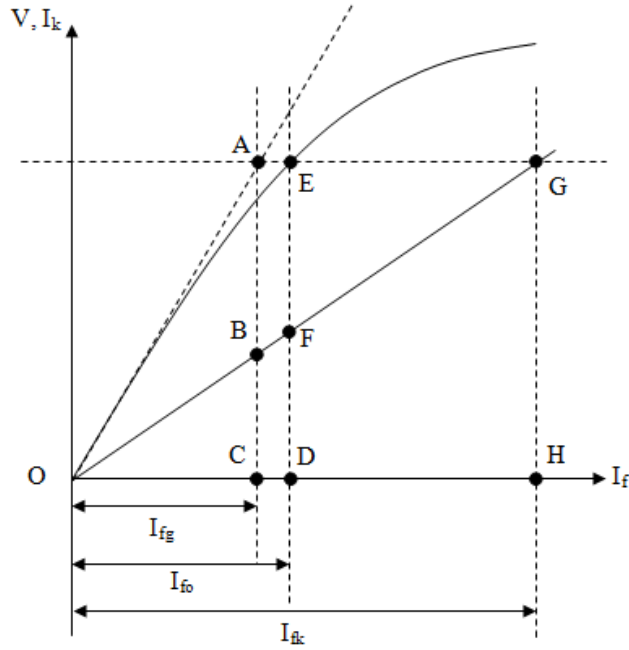
EK-B.6. Kısa Devre Deneyi ve Karakteristiği

Uyarma akımı sıfır iken başka bir tahrikle senkron devirde döndürülen makinanın  fazının kısa devre edilmesiyle elde edilen uyarma akımı kısa devre stator akımı değişim karakteristiğine denir. Aşağıdaki bağlantı yapıldıktan sonra uyarma akımı sıfır iken devir sayısı senkron hızı çıkarılır. Uyarma kısa devreden sonra uygulanmalıdır.

- Uyarma akımı yavaş yavaş artırılır, hem endüvi hem de uyarma akımları ampermetre ile ölçülür.
- Endüvi akımı anma değerinin 1,2 ile 2 katına kadar çıkarılabilir.
- SM yıldız bağlı olduğundan okunan I akımları faz akımlarıdır. I_k (kısa devre akımı) frekansla değişmez.
- Dönme hızı anma hızının 0,2 katından daha küçük bir değere düşmemelidir.

EK-B.7. X_d 'nin Boşta Çalışma ve Kısa Devre Deneyleriyle Belirlenmesi

Senkron reaktansın boyuna bileşeni, boşta çalışma karakteristiğinin doğrusal kısmında herhangi bir uyarma akım değeri için saptanan boşta çalışma geriliminin, aynı uyarma akımının kısa devrede statordan akıtacağı akıma oranından belirlenir. Kısa devre ve boşta çalışma karakteristiği Şekil EK-B.1'de verilmiştir.



Şekil EK-B.1. Kısa devre ve boşta çalışma karakteristiği

$$X_d = \frac{Un}{I_k \cdot \sqrt{3}} , \quad X_d = \frac{Un}{I_{abc} \cdot \sqrt{3}} , \quad X_d = \frac{AC}{BC} = \frac{OH}{OC} = \frac{Ifk}{Ifg} \quad \text{EK-B.1}$$

Bu durumda elde edilen X_d değeri makinanın doymamış durumuna karşılık gelir. Boşta çalışma eğrisinde anma gerilimine karşılık gelen uyarma akımının, kısa devre değişiminde anma akımına karşılık olan uyarma akımına oranı kısa devre oranını (KDO) verir.

$$KDO = \frac{OD}{OH} = \frac{Ifo}{Ifk} \quad \text{EK-B.2}$$

KDO'nun tersi doymuş senkron reaktansı verir. Boyuna eksen yönündeki reaktansların tümü kısa devre deneyiyle bulunabilir.

EK-B.8. Negatif Uyarma Deneyi ve Enine Senkron Reaktansın (X_q) Belirlenmesi

Deneyde senkron makina uçlarına normal dengeli 3 fazlı gerilim uygulanan ve boşta çalışan senkron makina gibidir. Deneyde önce makina şebeke ile paralel çalışma durumuna getirilmelidir. Şebekeyle paralel ve boşta çalışan senkron makinanın uyarma gerilimi önce sıfıra düşürülür, makina relüktans motor gibi çalıştırılır. Sonra uyarma sargı uçları ters çevrilir ve önceki uyarma ters yönde küçük aralıklarla uyarma akımı artırılarak kararlı endüvi akımının en büyük değere ulaşması sağlanır. Uyarma akımı artırılırken kutuplar döner alana göre kayar ve motor tekrar senkron hıza çıkar. Bu aradaki endüvi akımı kararlı en büyük endüktif akım olarak anılır.

Kararlı en büyük endüktif akımını çeken bir senkron makinada enine eksen göre senkron reaktans

$$X_q = \frac{V_t}{I_{a(po)}} \quad \text{EK-B.3}$$

Burada, V_t ; faz başına makinaya uygulanan gerilim, $I_{a(po)}$; kararlı ve endüktif en büyük akım veya diğer bir deyimle kutup kayması meydana gelmeden önceki endüvi akımıdır. Bu deneyin üstünlüğü, deneyin makina anma uç geriliminde yapılması nedeniyle X_q 'nun doymuş enine eksen senkron reaktansına eşit olmasıdır. Bu deneyden elde edilen verilerden yararlanarak X_q 'yu, boşta çalışma karakteristiğinden elde edilen boyuna senkron reaktans yardımıyla da hesaplamak mümkündür. Buna göre,

$$X_q = X_d \frac{Ur}{Ur+e} \quad \text{EK-B.4}$$

Burada Ur ; kutup adımı kadar kaymanın olduğu andaki gerilim, e ; makinanın bir kutup adımı kadar kaydığı andaki uyarma akımına karşılık olan boştaki emk'dır. Bir kutup adımı kadar kaymanın olduğu andaki gerilime karşılık olan nokta ile orjini birleştiren doğru ile gösterilen boşta çalışma karakteristiğinden elde edilir.

EK-B.9. Üç Fazlı Ani Kısa Devre Deneyi ve Boyuna Eksen Geçici Reaktansı ile Alt Geçici Reaktansın Bu Deneylerden Belirlenmesi.

Deney; nominal hızında dönen uyarma gerilimiyle endüvi (uç) gerilimi nominal değerinin 0.1 ile 0.4 arasında bir değere ayarlanmış olan boştaki senkron makinanın endüvi uçları kısa devre edilerek yapılır. Deneyde her üç faz pratik olarak aynı anda kısa devre edilmelidir. Faz kontakları birbirine göre en çok 15 elektriksel derecelik bir açıyla kapanmalıdır. Endüvi akımı DA bileşeni önemli olmadığından bu açı değeri aşılabılır. Kısa devre akımları endüktif olmayan şöntler, hava aralıklı trafolar veya uygun akım trafolarıyla ölçülür. Akım trafoları yalnız AA bileşenlerinin ölçümünde kullanılır. Kısa devre akımının periyodik en büyük ve aperiodyk en büyük bileşenleri gerektiğinde itegralli osilografik galvanometre kullanılabilir. Ölçü aletlerinin ve bunları akım trafolarının sekonderlerine bağlayan iletkenlerin toplam direnci belirtilen tipteki trafolar için kabul edilen anma değerini aşmamalıdır. Doymamış durumdaki değerlerin elde edilmesi için deney endüvi gerilimi anma değerinin 0.1-0.4 katındaki birkaç endüvi gerilimi için yapılır.

Makina büyüklüklerinin belirlenmesi için her fazdaki endüvi akımlarının ve uyarma devresindeki akımın osiloskop çıktıları kayıt edilir. Osiloskop kayıtları kısa devre sonrasında geçici zaman sabiti 0.2 sn kadar süreyle devam ettirilmelidir. Kararlı koşullara ulaşıldıktan sonra tekrar akımlar osiloskoba kaydedilmelidir. Denetleme amacıyla son değerler kontrol edilmelidir. Üç faz ani kısa devre deneyinden hareketle enine eksen geçici ve alt geçici bileşenlerini hesaplamak için önce endüvi akımı periyodik bileşeni hesaplanmalıdır. Çünkü boyuna geçici reaktans ani kısa devre deneyinden kısa devrenin uygulanmasından hemen önce ölçülen boşta çalışma geriliminin ($U(0)$) alt geçici bileşen ihmal edilmek üzere, kısa devre akımının dönemli bileşeninin, başlangıç değerine oranından belirlenir.

$$X_d' = \frac{U(0)}{\sqrt{3} [I(\infty) + \Delta I_k'(0)]}$$

EK-B.5

Boyuna alt geçici reaktans X_d'' yine aynı deneyden $U(0)$ gerilimin kısa devre akımının periyodik bileşeninin başlangıç değerine oranı olarak belirlenir.

$$X_d'' = \frac{U(0)}{\sqrt{3}[I(\infty) + \Delta I_k'(0) + \Delta I_k''(0)]}$$

EK-B.6

- Önce her bir fazın üst zarfından alt zarfı çıkarılır (Sonuç A-(-B) olduğundan daha büyük bir sonuçtur)
- Üst zarf- alt zarf ikiye bölünür (her bir faz için). Böylece her bir fazın periyodik bileşeni elde edilir.
- Endüvi akımı periyodik bileşeni üç faz akımının periyodik bileşeninin aritmetik ortalamasıdır. Bundan dolayı bulunan periyodik bileşenler toplanmalı ve üçe bölünmelidir.
- Bundan sonraki aşama geçici ve alt geçici akım değişimlerinin çizdirilmesi ve bunların ordinat eksenini kestikleri noktaların bulunmasıdır.
- Geçici ve alt geçici bileşenleri bulmak için akımın sürekli durum değeri 3 faz periyodik bileşenlerden çıkarılır. Böylece geçici ve alt geçici bileşen toplamı elde edilmiş olur. $(\Delta I_k' + \Delta I_k'')$. Bu değişim toplam bir doğru veya eğri olabilir.
- Bu değişimin son bölümü bir doğru olursa, bu doğrunun $t=0$ anına kadar ekstrapolasyonu ile kısa devre akımının geçici bileşeninin başlangıç değeri $\Delta I_k'(0)$ elde edilir.
- Bu değişimin son bölümü bir eğri olursa, $t=0.2$ sn'ye karşılık gelen akım değeri grafik üzerinde işaretlenir (0.2 sn alt geçici etkilerin ihmal edilebilecek düzeylere indiği an). $I_B = 1/\varepsilon I_A$ 'dan I_B değeri belirlenir. T_d' zaman sabiti (OB' - OA') olarak alınır. I_B ve I_A 'dan geçen bir doğru çizilir. Bu doğrunun ordinatı kestiği nokta $\Delta I_k'(0)$ yani geçici bileşenin $t=0$ anındaki değerini verir.
- Kısa devre akımının altgeçici bileşeni $(\Delta I_k' + \Delta I_k'')$ eğrisi ile $\Delta I_k'$ doğrusal değişimi arasındaki fark olarak tanımlanır.
- Geçici ve altgeçici kısa devre akım değişimlerinin yarı logaritmik eksenlerde gösterilmesi inceleme kolaylığı sağlar.
- Kısa devre akımı geçici bileşeni $\Delta I_k'(0)$ ve altgeçici bileşeni $\Delta I_k''(0)$ 'nin başlangıç değerleri, geçici ve altgeçici reaktansların hesabı için gereklidir. Burada $I(\infty)$; sürekli kısa devre akımı, $U(0)$; kısa devre önce ölçülen boşa çalışma gerilimidir (makina uç gerilimi).

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Gürkan KAVURAN

Doğum Yeri : ELAZIĞ

Doğum Tarihi : 19.03.1986

Medeni Hali : Bekâr

Yabancı Dil : İngilizce - Almanca

Lise : Elazığ Anadolu Lisesi (ortaokul+lise), 1997 - 2004.

Lisans : Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 2004 – 2008.

Yüksek Lisans : Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilimdalı, 2008 – 2011.

- Deneyimler**
- Kasım 2010-.....: Araştırma Görevlisi, Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fak., Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ, TÜRKİYE
 - Şubat 2009 - Kasım 2010 : Araştırma Görevlisi, Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fak., Elektrik-Elektronik Müh., Yozgat, TÜRKİYE
 - 2008 - Şubat 2009 : Ekin Teknoloji Sanayi ve A.Ş., Kent Güvenlik Sistemi, Proje Koor., Elazığ, TÜRKİYE

İletişim Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 23119 – ELAZIĞ

Tel : +90 424 237 00 00 – 4292

Faks : +90 424 236 70 64

e-posta : gkavuran@firat.edu.tr , gurkan kavuran@gmail.com

web : <http://web.firat.edu.tr/gkavuran/>