



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**GÜÇ SİSTEMLERİNDE KÜÇÜK SİNYAL KARARLILIĞININ
UPFC-POD İLE İNCELENMESİ**

MUHAMMET DEMİRBAŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. MEHMET KENAN DÖŞOĞLU**

DÜZCE, 2021

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

GÜÇ SİSTEMLERİNDE KÜÇÜK SİNYAL KARARLILIĞININ
UPFC-POD İLE İNCELENMESİ

Muhammet DEMİRBAŞ tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Mehmet Kenan DÖŞOĞLU

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Mehmet Kenan DÖŞOĞLU

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Uğur GÜVENÇ

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Serhat DUMAN

Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 09/12/2021

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

9 Aralık 2021

Muhammet DEMİRBAŞ

TEŞEKKÜR

Lisans eğitimim sürecinde, beni, tahta önünde ders anlatacağım günler için teşvik eden ve yüreklendiren, iyi bir akademisyen olacağıma olan inancını ve desteğini esirgemeyen, bu yolda her ihtiyaç duyduğumda yanımda olmaya devam eden, bu tezin yazımında da her türlü destek ve yardımını gösteren çizdiğim yolun mimarı değerli hocam Doç. Dr. Mehmet Kenan DÖŞOğLU'na;

Beykent Üniversitesinde göreve başladığım ilk andan itibaren, bilgi birikimi ve tecrübesiyle bana destek olan, birlikte çalışmaktan onur duyduğum ve akademik olarak bana çok şey katan değerli hocam Prof. Dr. Adnan KAYPMUZ'a; dertlendiğimde dertlenen, yardıma ihtiyaç duyduğumda yardımına koŐan değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Dilek KUZALİÇ BÜRÜCÜ ve ekip çalışması ruhunu bana öğreten, her daim neŐeli çalışma arkadaşlarıma; zamanımın çoğunu geçirdiğim Elektrik Elektronik Laboratuvarlarına; Fizik Laboratuvarına; Erdal Bakkal ve kahve makinesine;

Dünyaya geldiğim andan itibaren maddi, manevi desteklerini ve sevgilerini hiçbir zaman esirgemeyen, beni bu günlere alın teri ile taşıyan, emek vermenin değerini öğreten ve benim ailem oldukları için minnet duyduğum canım annem Emine DEMİRBAŞ ve canım babam Uğur DEMİRBAŞ'a; öğrenim hayatım boyunca, ayak izlerini takip ettiğim ve bu izlerin beni bu günlere taşımasına vesile olan ablam Banu DEMİRBAŞ'a; benden önce doğduğu için kendisinin hep çok şanslı olduğuna inandığım ağabeyim Mehmet DEMİRBAŞ'a ve varlığını sürekli ensemde hissetmekten keyif aldığım kardeŐim İrem Selin DEMİRBAŞ'a sonsuz teşekkür ederim.

9 Aralık 2021

Muhammet DEMİRBAŞ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
KISALTMALAR.....	x
SİMGELER	xi
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ	16
2. KÜÇÜK SİNYAL KARARLILIĞI	20
2.1. DİNAMİK SİSTEMLERİN KARARLILIĞININ TEMEL KAVRAMI	20
2.1.1. Durum Uzay Dönüşümü	20
2.1.2. Doğrusallaştırma	21
2.1.3. Kararlılığın Analizi	24
2.2. DURUM MATRİSİNİN ÖZÖZELLİKLERİ	24
2.2.1. Özdeğerler.....	24
2.2.2. Özvektörler	25
2.2.3. Özdeğerler ve Kararlılık.....	26
2.2.4. Katılım Faktörü.....	26
3. GELİŞTİRİLMİŞ ESNEK AC İLETİM SİSTEMİ (FACTS) CİHAZLARI.....	28
3.1. STATİK KOMPANZATÖR (STATCOM)	28
3.2. STATİK VAR KOMPANZATÖR (SVC)	29
3.3. TRİSTÖR KONTROLLÜ SERİ KOMPANZATÖR (TCSC)	30
3.4. STATİK SENKRON SERİ KOMPANZATÖR (SSSC)	31
3.5. BİRLEŞTİRİLMİŞ GÜÇ AKIŞ KONTROLÜ (UPFC)	32
4. DENETLEYİCİ MODELLERİ	35
4.1. GÜÇ SALINIM SÖNÜMLEMESİ (POD).....	35
4.2. GÜÇ SİSTEMİ KARARLI KILICISI (PSS)	36
4.3. OTOMATİK GERİLİM REGÜLATÖRÜ (AVR).....	38
4.4. TÜRBİN YÖNETİCİSİ (TG).....	41
5. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖR (ÇBAG)	43
6. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ (EDS).....	46
6.1. YAKIT HÜCRESİ	46
7. BENZETİM ÇALIŞMASI.....	49
8. BENZETİM ÇALIŞMASI SONUÇLARI.....	52
8.1. PSS, AVR VE TG'NİN KÜÇÜK SİNYAL KARARLILIĞINA ETKİSİ.....	54

8.1.1. PSS Tip-2, AVR Tip-1 ve Farklı TG Tiplerinin Birinci Senkron Generatör Üzerindeki Etkisi	73
8.2. ÇBAG VE EDS'NİN KÜÇÜK SİNYAL KARARLILIĞINA ETKİSİ.....	77
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	80
10. KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ.....	86



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Durum uzay dönüşümünün blok diyagramı	23
Şekil 3.1. STATCOM devre yapısı [43].	29
Şekil 3.2. SVC devre yapısı [43].	30
Şekil 3.3. TCSC devre yapısı [43].	30
Şekil 3.4. SSSC devre yapısı [43].	31
Şekil 3.5. UPFC devre yapısı [46].	32
Şekil 3.6. UPFC'nin geliştirilmiş modeli.	33
Şekil 4.1. POD kontrol devresi	35
Şekil 4.2. PSS Tip-1 kontrol devresi.	36
Şekil 4.3. PSS Tip-2 kontrol devresi.	36
Şekil 4.4. PSS Tip-3 kontrol devresi.	37
Şekil 4.5. AVR Tip-1 kontrol devresi.	38
Şekil 4.6. AVR Tip-2 kontrol devresi.	39
Şekil 4.7. AVR Tip-3 kontrol devresi.	40
Şekil 4.8. TG Tip-1 kontrol devresi.	41
Şekil 4.9. TG Tip-2 kontrol devresi.	42
Şekil 5.1. ÇBAG devre yapısı.	43
Şekil 7.1. 2 Alanlı - 4 Generatörlü güç sistemi [1].	49
Şekil 8.1. Denetleyici olmadığı durum - Senkron generatör açısal hız değişimleri.	52
Şekil 8.2. Denetleyici olmadığı durum - Senkron generatör bara gerilimleri.	53
Şekil 8.3. Denetleyici olmadığı durum - Senkron generatör aktif güç değerleri.	53
Şekil 8.4. Denetleyici olmadığı durum - Senkron generatör reaktif güç değerleri.	54
Şekil 8.5. PSS Tip-1 - Özdeğerler grafiği.	55
Şekil 8.6. PSS Tip-1 - Senkron generatör açısal hız değişimleri.	55
Şekil 8.7. PSS Tip-1 - Senkron generatör bara gerilimleri.	56
Şekil 8.8. PSS Tip-1 - Senkron generatör aktif güç değerleri.	56
Şekil 8.9. PSS Tip-1 - Senkron generatör reaktif güç değerleri.	57
Şekil 8.10. PSS Tip-2 - Özdeğerler grafiği.	58
Şekil 8.11. PSS Tip-2 - Senkron generatör açısal hız değişimleri.	58
Şekil 8.12. PSS Tip-2 - Senkron generatör bara gerilimleri.	59
Şekil 8.13. PSS Tip-2 - Senkron generatör aktif güç değerleri.	59
Şekil 8.14. PSS Tip-2 - Senkron generatör reaktif güç değerleri.	60
Şekil 8.15. PSS Tip-3 - Özdeğerler grafiği.	61
Şekil 8.16. PSS Tip-3 - Senkron generatör açısal hız değişimleri.	61
Şekil 8.17. PSS Tip-3 - Senkron generatör bara gerilimleri.	62
Şekil 8.18. PSS Tip-3 - Senkron generatör aktif güç değerleri.	62
Şekil 8.19. PSS Tip-3 - Senkron generatör reaktif güç değerleri.	63
Şekil 8.20. AVR Tip-2 - Özdeğerler grafiği.	64
Şekil 8.21. AVR Tip-2 - Senkron generatör açısal hız değişimleri.	65
Şekil 8.22. AVR Tip-2 - Senkron generatör bara gerilimleri.	65
Şekil 8.23. AVR Tip-2 - Senkron generatör aktif güç değerleri.	66
Şekil 8.24. AVR Tip-2 - Senkron generatör reaktif güç değerleri.	66
Şekil 8.25. AVR Tip-3 - Özdeğerler grafiği.	67
Şekil 8.26. AVR Tip-3 - Senkron generatör açısal hız değişimleri.	68
Şekil 8.27. AVR Tip-3 - Senkron generatör bara gerilimleri.	68
Şekil 8.28. AVR Tip-3 - Senkron generatör aktif güç değerleri.	69

Şekil 8.29. AVR Tip-3 - Senkron generatör reaktif güç değerleri.....	69
Şekil 8.30. TG Tip-1 - Özdeğerler grafiği.	71
Şekil 8.31. TG Tip-1 - Senkron generatör açısal hız değişimleri.	71
Şekil 8.32. TG Tip-1 - Senkron generatör bara gerilimleri.	72
Şekil 8.33. TG Tip-1 - Senkron generatör aktif güç değerleri.	72
Şekil 8.34. TG Tip-1 - Senkron generatör reaktif güç değerleri.	73
Şekil 8.35. Farklı TG tipleri ile birinci senkron generatör açısal hız değişimi.	74
Şekil 8.36. Farklı TG tipleri ile birinci senkron generatör bara gerilim değişimi.	74
Şekil 8.37. Farklı TG tipleri ile birinci senkron generatör aktif güç değişimi.....	75
Şekil 8.38. Farklı TG tipleri ile birinci senkron generatör reaktif güç değişimi.....	76



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 7.1. Generatör parametre değerleri.	49
Çizelge 7.2. İletim hattı parametreleri.	50
Çizelge 7.3. Generatör yüklenme değerleri.	50
Çizelge 7.4. 7 ve 9 numaralı baralardaki yük ve reaktif güç değerleri.	50
Çizelge 8.1. Sistemde herhangi bir denetleyicinin bulunmadığı durum.	52
Çizelge 8.2. PSS Tip-1'in kullanıldığı durum.	54
Çizelge 8.3. PSS Tip-2'nin kullanıldığı durum.	57
Çizelge 8.4. PSS Tip-3'ün kullanıldığı durum.	60
Çizelge 8.5. AVR Tip-2'nin kullanıldığı durum.	64
Çizelge 8.6. AVR Tip-3'ün kullanıldığı durum.	67
Çizelge 8.7. TG Tip-1'in kullanıldığı durum.	70
Çizelge 8.8. Farklı TG tiplerinin birinci senkron generatörün açısai hızı, bara gerilimi, aktif ve reaktif gücü üzerindeki etkisi.	77
Çizelge 8.9. ÇBAG'ın küçük sinyal kararlılığına olan etkisi.	77
Çizelge 8.10. Yakıt hücresinin küçük sinyal kararlılığına etkisi.	78

KISALTMALAR

AVR	Otomatik Gerilim Regülatörü
ÇBAG	Çift Beslemeli Asenkron Generatör
EDS	Enerji Depolama Sistemi
FACTS	Esnek AC İletim Sistemi
PI	Oransal İntegral Denetleyici
PID	Oransal İntegral Türevsel Denetleyici
PSAT	Güç Sistemi Analizi Araç Kutusu
POD	Güç Salınım Sönümlemesi
PSS	Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı
SSSC	Statik Senkron Seri Kompanzatör
STATCOM	Statik Senkron Kompanzatör
SVR	Statik Var Kompanzatör
TCSC	Tristör Kontrollü Seri Kompanzatör
TG	Türbin Yöneticisi
UPFC	Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolü

SİMGELER

A	$n \times n$ boyutlu durum matrisi
A_r	Rotorun dönmesi sonucu taranan alan
B	$n \times r$ boyutlu giriş veya kontrol matrisi
b_s	UPFC’de kullanılan kaynağın süseptansı
C	$m \times n$ boyutlu çıkış matrisi
c_p	Performans ve güç katsayısı
D	$m \times r$ boyutlu doğrudan çıkışta gözükken ve girdi oranını tanımlayan ileri besleme matrisi
H_m	Atalet sabiti
H_2	Hidrojen oranı
I_k	Yakıt hücresinin akımı
i_k	Yakıt hücresinin başlangıç akımı
$i_{ds} - i_{qs}$	d-q eksenli stator akımları
$i_{dr} - i_{qr}$	d-q eksenli rotor akımları
K_v	Gerilim kazancı
K_m	Modülasyon katsayısı
K_r	DC katsayısı
m	Modülasyon genliği
n	Gecikmeli şebekelerin sayısı
P_g	PSS’nin bağlı olduğu durumdaki aktif güç
P	Katılım faktörü
P_w	Rüzgârdan elde edilen mekanik güç
p^{\max}	En yüksek türbin çıkış gücü
p^{\min}	En düşük türbin çıkış gücü
P_g	PV generatörün aktif gücü
R_s	Stator direnci
R_R	Rotor direnci
S_e	Uyarıcının doygunluk fonksiyonu
S	Görünür güç
T_1	AVR zaman sabiti
T_2	AVR zaman sabiti
T_3	AVR zaman sabiti
T_4	AVR zaman sabiti
T_5	Reheat zaman sabiti
T_e	Alan devresi sabiti
T_r	Ölçüm süresi sabiti
T_s	Servo zaman sabiti
T_ω	Arındırma sabiti
T_e	Elektromekanik tork

T_e	Küçük zaman sabiti
T_m	Mekanik tork
T_m	Modülasyon zaman sabiti
I_s	UPFC'de kullanılan akım kaynağının akımı
u	Bağlantı durumu (0,1)
U_{lim}	En yüksek veya en düşük yakıt tüketimi
v_1	Arındırma sinyali
v_s	PSS'nin çıkış sinyali
v_{ref}	AVR referans gerilimi
v_f	Geri besleme gerilimi
$v_{r,min}$	AVR geriliminin alt sınırı
$v_{r,max}$	AVR geriliminin üst sınırı
v_{r1}	Yükseltici durum değişkeni
v_{r2}	Dengeleyici durum değişkeni
v_f	Geri besleme gerilimi
V_g	Generatör gerilimi
V_{f0}	İlk alan gerilimi
V_0	Bara offset gerilimi
$v_{ds} v_{qs}$	d-q eksenli stator gerilimleri
$v_{dr} v_{qr}$	d-q eksenli rotor gerilimleri
v_w	Rüzgârın hızı
V_{ref}	Referans gerilimi
V_s	Şebeke gerilimi
V_t	Yakıt hücresinin terminal gerilimi
V_{k0}	Yakıt hücresinin başlangıçtaki DC gerilimi
Δy	m boyutlu çıkış vektörü
Δu	r boyutlu giriş vektörü
λ	A matrisinin özdeğeri
ϕ	Salınım frekansı
ζ	Sönümlenme oranı
ϕ_{ki}	Sağ özvektör matrisinin k. satır ve i. sütunundaki eleman
Ψ_{ik}	Sol özvektör matrisinin i. satır ve k. sütunundaki eleman
X_s	UPFC'de kullanılan kaynağın reaktansı
ω_n	Sönümlenme frekansı
φ	Kompanse edilecek faz açısı
μ_0	Regülatör kazancı

ω_{ref}	Açısal hızın referans değeri
X_r	Rotor reaktansı
X_m	Mıknatıslanma reaktansı
X_s	Stator reaktansı
ω_m	Rotor hızı
ω_b	Sistemin frekans oranı
ρ	Havanın yoğunluğu
θ_p	Eğim açısı
q	Soğutma katsayısı
θ_t	Yakıt hücresinin terminal gerilim açısı
θ_s	Kaynak geriliminin açısı
X_t	Transformatör reaktansı
Q_g	PV generatörün reaktif gücü

ÖZET

GÜÇ SİSTEMLERİNDE KÜÇÜK SİNYAL KARARLILIĞININ UPFC-POD İLE İNCELENMESİ

Muhammet DEMİRBAŞ

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Kenan DÖŞOĞLU

Aralık 2021, 85 sayfa

Teknolojinin gelişmesi ve nüfusun hızla artmasıyla birlikte enerji talebinde büyük artışlar gözlenmektedir. Bu durum güç sistemlerini doğrusal olmayan bölgelerde çalışmaya zorlamakta ve kararsızlıkların oluşmasına neden olmaktadır. En sık gözlemlenen kararlılık problemlerinden birisi de küçük sinyal kararlılığıdır. Bu çalışmada küçük sinyal kararlılığı analizi incelenmiştir. Benzetim çalışması Güç Sistemi Analizi Programı (PSAT) kullanılarak yapılmıştır. Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolü (UPFC)- Güç Salınım Sönümlenmesi (POD) ile birlikte kullanılan senkron generatörlere bağlı Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı (PSS), Otomatik Gerilim Regülatörü (AVR) ve Türbin Yöneticisinin (TG'nin) farklı tipleri kullanılarak küçük sinyal kararlılığı incelemesi yapılmıştır. Dahası güç sistemine Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) tabanlı bir rüzgâr türbini ve Enerji Depolama Sistemi (EDS) ilave edilerek küçük sinyal kararlılığı analizi incelenmiştir. İncelemelerde senkron generatör açısız hız değişimleri, aktif-reaktif güç değişimleri, bara gerilimleri detaylı olarak gösterilmiştir. Ayrıca sistemin özdeğerleri, salınım frekansları, sönümlenme oranları ve çalışma bölgeleri tablolar halinde gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, güç sistemlerinde PSS, AVR, TG, ÇBAG tabanlı rüzgâr türbinleri ve yakıt hücresinin kullanılmasının küçük sinyal kararlılığı açısından etkili olduğunu göstermektedir.

Anahtar sözcükler: Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolü (UPFC), Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG), Güç Salınım Sönümlenmesi (POD), Küçük sinyal kararlılığı, Yakıt hücresi.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF SMALL SIGNAL STABILITY IN POWER SYSTEMS WITH UPFC-POD

Muhammet DEMİRBAŞ

Düzce University

Institute of Graduate Studies, Department of Electrical Electronics Engineering
Master's Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet Kenan DÖŞOĞLU

December 2021, 85 pages

With the development of technology and the rapid increase in the population, large increases are observed in energy demand, forcing power systems to work in non-linear regions and causing instabilities. One of the most frequently observed stability problems is small signal stability. In this study, small signal stability analysis was investigated. The simulation study was carried out using the Power System Analysis Toolbox. (PSAT). Small-signal stability analysis was carried out using different types of Power System Stabilizer (PSS), Automatic Voltage Regulator (AVR) and Turbine Governor (TG) connected to synchronous generators used in conjunction with Unified Power Flow Controller (UPFC)- Power Oscillation Damping (POD). Moreover, small signal stability analysis was investigated by adding a Double Fed Induction Generator (DFIG) based wind turbine and Energy Storage System (ESS) to the power system. In the examinations, synchronous generator angular velocity changes, active-reactive power changes, bus voltages are shown in detail. In addition, the eigenvalues, oscillation frequencies, damping ratios and operating regions of the system are shown in tables. The results show that the use of PSS, AVR, TG, DFIG based wind turbines and fuel cell in power systems is effective in terms of small signal stability.

Keywords: Double Fed Induction Generator (DFIG), Fuel cell, Power Oscillation Damping (POD), Small Signal Stability, Unified Power Flow Controller (UPFC).

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesi, nüfusun ve şehirleşmenin hızla artması gibi nedenler enerji talebinde büyük artışlara yol açmaktadır. Bu enerji talebini karşılamak için güç sistemlerine yeni üretim üniteleri dâhil edilmektedir. Ayrıca enerji talebinin artması güç sistemlerini, doğrusal olmayan bölgelerde çalışmaya zorlamakta ve kararsızlıklara neden olmaktadır. Genel olarak güç sistemi kararlılığı, bir güç sisteminin normal koşullar altında çalışma dengesini sürdürmesi, bozucu bir etkiye maruz kalması durumunda ise kabul edilebilir bir denge durumuna geri dönmesi olarak tanımlanırken, küçük sinyal kararlılığı, güç sisteminin küçük bozunumlara maruz kalması durumunda senkron generatörlerin senkronizasyonunu koruyabilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır [1]. Güç sistemi birden fazla generatör içeriyorsa, bu generatörlerin tümünün küçük bozunumlar sonrası kararlı yapıya ulaşması gerekir. Eğer ulaşmazsa, baralar arasında dengesizlikler ve sistemde çökmeler meydana gelebilir. Güç sistemlerini kontrol etmek ve kararlılık sınırlarını arttırmak amacıyla sisteme denetleyiciler ilave edilmektedir. Yarı iletken teknolojisinin de gelişmesiyle birlikte FACTS (Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi) cihazları adı verilen güç elektroniği aygıtlarıyla, güç sistemlerinin iletim kapasitesi kontrol edilebilmekte, yeni hatlara olan ihtiyaç azaltılmakta ve güç sistemlerinin kararlılığı sağlanmaktadır. FACTS cihazları genel olarak seri kontrolörler, şönt kontrolörler, seri-şönt kontrolörler ve seri-seri kontrolörler olarak sınıflandırılırlar [2]. Bu denetleyici çeşitleri arasında günümüzde en yaygın olarak kullanılanları; Statik Kompanzatör (STATCOM), Static Var Kompanzatör (SVC), Tristör Kontrollü Seri Kompanzatör (TCSC), Static Senkron Seri Kompanzatör (SSSC) ve Birleşik Güç Akış Kontrolörü (UPFC)'dir. Daha gelişmiş model olan UPFC bozucu bir etki sonrası sistemde oluşan salınımları daha hızlı biçimde söndürmekte ve kararlı yapıya ulaştırmaktadır [3], [4]. Güç sistemleri kararlılık çalışmalarına olumlu etkilerinden dolayı UPFC sıkça kullanılmaktadır. Seri kompanzasyondan kaynaklı elektrik şebekesi ile senkron generatör arasında oluşan salınım, senkron altı rezonans olarak açıklanmaktadır. İlgili çalışmalarda, sisteme UPFC eklenmesi ile senkron altı rezonans etkileri incelenmiştir. Geliştirilen yöntemler sayesinde salınımların sönümlendiği ve sistemin kararlı hale geldiği gözlemlenmiştir [5]–[7]. Güç sistemlerinde meydana gelen elektromekanik salınımları

yeterli düzeyde sönümlenmek için UPFC'nin kontrol parametresini iyileştirme çalışmaları yapılmış ve UPFC'nin POD ile kullanılma durumunda sistem salınımları konusunda olumlu etkisi gözlemlenmiştir [8]. İlgili çalışmada, UPFC'nin güç sistemi kararlılığı üzerindeki etkilerini özdeğer analizi yöntemiyle incelemiş ve olumlu etkileri gözlemlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada UPFC'nin PSS ve POD ile kullanılma durumu üzerine inceleme de yapılmış ve POD ve PSS ile kullanılma durumunda daha iyi sonuçlar elde edilmiştir [9]. Senkron generatörler, anma veya nominal gerilim değerlerine göre çalışmaktadırlar. Ani yük değişimi gibi durumlar senkron generatörlerin gerilimlerinde salınımlara yol açar, sistem kararsızlığına neden olur ve güç kalitesini düşürür. Bu sorunların üstesinden AVR (Otomatik Gerilim Regülatörü) kullanılarak gelinebilir [10]. AVR'nin güç sistemlerine olan etkisi ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Alt senkron rezonans ve çatalanma eğrilerinin incelenmesinde kullanılmakta ve etkili olduğu görülmektedir [11]. Senkron generatörleri kontrol etmek için sistem yüklenmesi ve kayıplara karşı AVR kullanılmaktadır. Tek ve çok alanlı sistemlerde belirli sınırlar içerisinde AVR'nin yüklenme durumlarını kontrol edebileceği ilgili çalışmalarda gösterilmiştir [12], [13]. Geçici kararlılık durumlarında AVR kontrol şeması içerisinde bulunan PI ve PID denetleyicilerinin parametre değerleri çeşitli algoritmalar ile sistem performansına göre ilgili çalışmalarda belirlenmektedir [14]–[16]. AVR, PSS ile birlikte küçük sinyal kararlılığı çalışmalarında da kullanılır. Küçük sinyal kararlılığı analizinde salınımların azalması ve özdeğerlerin uygun seviyelerde olması önemlidir [17]. PSS modelleri yerel alan ve bölgeler arası salınımları ortadan kaldırmak için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Çok makinalı güç sisteminde farklı denetleyiciler ile birlikte kullanılan PSS modellerinin UPFC-POD ile kullanılma durumundaki salınımlar incelenmiş ve küçük sinyal kararlılığı özdeğer analizi sonuçları karşılaştırılmıştır [18]. UPFC-POD ikilisine ilave bir denetleyici modeli eklenmesi için yapılan çalışmalarda PSS modeli üzerinde geliştirmeler yapılmıştır. Bu modellerin salınım sönümlemede daha etkili sonuçlar verdiği görülmüştür [19]. Güç sistemlerinde salınımların sönümlenmesi için PSS, UPFC-POD modelleri koordineli olarak kullanılmış ve salınımlar kısa süre içerisinde sönümlenmiştir [20], [21]. Yerel ve bölgeler arası salınım modlarını sönümlenmek için kullanılan yöntemlerden bir diğeri de AVR ve PSS'in birlikte kullanılma durumudur. AVR ve PSS'in çok makinalı güç sistemlerinde birlikte kullanıldığı durumda küçük sinyal kararlılığı açısından iyileşme görülmektedir [22]–[24]. Artan çevresel kaygılar ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmaya yönelik yapılan girişimlerin sonucu olarak, yakın gelecekte yenilenebilir enerji kaynaklarının güç

sistemlerindeki ağırlığının artması beklenmektedir. Rüzgâr enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında en popüler olanlarından. Generatörler kullanılarak rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi elde edilmektedir. Şebeke ile bağlantısı bulunan rüzgâr çiftlikleri küçük bozunumlardan olumsuz etkilenir. Rüzgâr santrallerinde kullanılan generatörler bu tür bozunumları telafi edebilecek şekilde seçilmelidir. Aktif güç ve moment kontrolü nedeniyle ÇBAG (Çift Beslemeli Asenkron Generatör) rüzgâr çiftliklerinde tercih edilmektedir [25]. ÇBAG tabanlı rüzgâr türbinleri ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Farklı konumlardaki ÇBAG'ın dönüştürücü parametreleri, rüzgâr hızı ve seri kompanzasyon dereceleri değiştirildiğinde senkron altı rezonans üzerindeki etkisi incelenmiştir. Değişkenlerden herhangi biri değiştiğinde ortak bağlantı noktasına yakın olan ÇBAG'lerin, ortak bağlantı noktasına uzak olan ÇBAG'lere göre daha büyük etkiye sahip olduğu görülmüştür [26]. ÇBAG'lerin simetrik ve asimetrik şebeke gerilimi düşümleri sırasında LVRT (Düşük Gerilim İyileştirme) yetenekleri üzerinde çalışmalar yapılmış, LVRT yeteneğini geliştirmek için yeni bir rotor tarafı kontrol şeması sunulmuş ve performansın iyileştiği görülmüştür [27], [28]. ÇBAG tabanlı rüzgâr türbinlerinin güç sistemlerine dâhil olmasıyla birlikte konumlarına da bağlı olarak sistemin küçük sinyal kararlılığı ve geçici kararlılığı üzerinde hem yararlı hem de zararlı etkileri olabileceği gösterilmiştir [29]. 2 alanlı - 4 generatörlü güç sisteminde herhangi bir denetleyici bulunmadan yapılan çalışmada ÇBAG tabanlı rüzgâr türbini sisteme eklenmesi durumunda sistemin kararsız hale geldiği gözlemlenmiştir [30]. Yine 2 alanlı - 4 generatörlü güç sistemi üzerinde yapılan çalışmada referans generatör dışında her bir generatör ayrı ayrı çıkartılarak yerine ÇBAG tabanlı rüzgâr türbini eklenmiş, sonuçlar küçük sinyal kararlılığı açısından yorumlanmıştır. Çalışma sonucuna göre ÇBAG tabanlı rüzgâr türbininin, G1 generatörü yerine bağlandığı durumda en iyi sonucun elde edildiği, G4 generatörü yerine bağlandığı durumda ise sistemin kararsız hale geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca sisteme bağlanan PSS yerine FACTS cihazları kullanılarak da sistemin küçük sinyal kararlılığının iyileştirilebileceği ifade edilerek yeni çalışmalara zemin hazırlanmıştır [31]. Çok makinalı güç sistemlerine ÇBAG tabanlı rüzgâr türbininin ilave edilmesi, elektromanyetik salınım mod şekillerini değiştirebilir. Senkron generatörlerde AVR ve PSS'den sağlanan ilave sönümleme torkları mevcut olmadığında, sistem kararsız davranış gösterir. AVR ve PSS ile birlikte ÇBAG tabanlı rüzgâr türbini yerel ve bölgeler arası salınım modlarının sönümleme oranını iyileştirir [32]. Çeşitli Enerji Depolama Sistemleri (EDS'ler) güç sistemi kararlılık çalışmalarında kullanılmış ve etkili sonuçlar verdiği görülmüştür [33]–[35]. ÇBAG tabanlı rüzgâr türbini ile birlikte

Enerji Depolama Sistemi de kullanılmıştır. Süperkapasitör enerji depolama sistemi ile birlikte kullanılan şebekeye bağlı ÇBAG tabanlı rüzgâr türbininin sistemin geçici durum kararlılığı üzerinde olumlu etkilerinin olduğu gözlemlenmiştir [36]. Çeşitli enerji depolama sistemlerinin FACTS cihazı ile kullanıldığı durumda küçük sinyal kararlılığına etkisi incelenmiş ve olumlu etkilerinin olduğu gözlemlenmiştir [37], [38].

Yapılan bu tez çalışmasında 2 alanlı – 4 generatörlü güç sisteminin çalışma koşullarının iyileştirilmesini ve herhangi bir arıza durumunda sistemin kararlı bölgede kalmasını sağlamak için UPFC-POD ile birlikte PSS, AVR, TG'nin farklı tipleri kullanılmıştır. Dahası küçük sinyal kararlılığına etkisini gözlemlemek açısından ÇBAG ve EDS sisteme eklenmiş ve incelemeler yapılarak yorumlanmıştır. Bu tez çalışmasında, Bölüm 8'de detaylı olarak incelenen durumlardan, UPFC-POD ile birlikte kullanılan PSS Tip-2, AVR Tip-1 ve TG Tip-2'nin küçük sinyal kararlılığı açısından en iyi sonucu verdiği gözlemlenmiştir. Sisteme eklenen ÇBAG tabanlı rüzgar türbininin küçük sinyal kararlılığına olumsuz bir etkisi gözlemlenmemiştir. Dahası ÇBAG tabanlı rüzgar türbini ile birlikte sisteme eklenen EDS'nin küçük sinyal kararlılığına olumlu etkisinin olduğu görülmüştür.



2. KÜÇÜK SİNYAL KARARLILIĞI

Küçük sinyal kararlılığı, güç sisteminin küçük bozunumlara maruz kaldığı durumlarda senkron generatörlerin senkronizasyonunu sürdürebilme yeteneği olarak tanımlanır. Oluşabilecek kararsızlıklar iki şekilde ifade edilebilir:

- a) Tork senkronizasyonunda oluşan bozulma nedeniyle generatör rotor açısında sürekli artış,
- b) Yeterli sönümleme torku oluşmaması nedeniyle artan genlikteki rotor salınımları.

Günümüzde küçük sinyal kararlılığı problemleri genellikle sistem salınımlarının yetersiz sönümlenmesinden kaynaklanır.

Bölüm 2.1 ve Bölüm 2.2, Prabha KUNDUR'un "Power System Stability and Control" isimli kitabından derlenmiştir [1].

2.1. DİNAMİK SİSTEMLERİN KARARLILIĞININ TEMEL KAVRAMI

2.1.1. Durum Uzay Dönüşümü

Dinamik bir sistemin davranışı aşağıdaki gibi n elemanlı adi diferansiyel denklem ile tanımlanabilir:

$$\dot{x}_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.1)$$

$\dot{x} = f(x, u, t)$ Burada, n sistemin sırasını, r girdi sayısını ifade eder. Vektör matris olarak aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (2.2)$$

Burada,

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_r \end{bmatrix} \quad f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}$$

Sütun vektörü olan x durum vektörü olarak adlandırılırken, x_i girişleri durum değişkenleri

olarak adlandırılır. Sütun vektörü olan \mathbf{u} ise sistem girdilerinin vektörüdür. Bunlar sistem performansını etkileyen dış sinyallerdir. Zaman t ile gösterilirken x durum değişkeninin zamana göre türevi \dot{x} ile gösterilir. Eğer durum değişkenlerinin türevi zamanın açık fonksiyonu değilse sistemin otonom olduğu söylenir. Bu durumda Denklem 2.2 aşağıdaki gibi sadeleştirilir:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (2.3)$$

Sistemde genellikle gözlemlenebilen çıktı değişkenleri ile ilgileniriz. Bunlar da durum ve giriş değişkenleri cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$y = g(x, u) \quad (2.4)$$

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} \quad g = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_m \end{bmatrix}$$

Burada; y çıktıların vektörü iken, g girdi ve durum değişkenlerini çıktı değişkenleriyle ilişkilendiren doğrusal olmayan fonksiyonların vektörüdür.

2.1.2. Doğrusallaştırma

Denklem 2.3'ün doğrusallaştırma işlemini tanımlamak için başlangıç durum vektörü \mathbf{x}_0 ve küçük sinyal performansının inceleneceği denge noktasına karşılık gelen giriş vektörü \mathbf{u}_0 olsun. x_0 ve u_0 Denklem 2.3'ü sağladığından,

$$\dot{x}_0 = f(x_0, u_0) = 0 \quad (2.5)$$

olduğunu biliyoruz.

$$x = x_0 + \Delta x, \quad u = u_0 + \Delta u$$

Burada Δ ufak sapmayı ifade eder ve bu durum Denklem 2.3'ü sağlamalıdır.

$$\dot{x} = \dot{x}_0 + \Delta \dot{x} = f \left[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u) \right] \quad (2.6)$$

Doğrusal olmayan $f(x, u)$ fonksiyonları Taylor seri açılımını cinsinden ifade edilebilir. Δx ve Δu 'nun ikinci ve daha yüksek dereceli mertebelerini içeren terimler ihmal edildiğinde;

$$\dot{x}_i = \dot{x}_{i0} + \Delta \dot{x}_i = f_i \left[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u) \right]$$

$$= f_i(x_0, u_0) + \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r$$

$\dot{x}_{i0} = f_i(x_0, u_0)$ olduğundan;

$$\Delta \dot{x}_i = \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \Delta u_r \quad (i=1,2,\dots,n), \text{ elde edilir.}$$

Benzer şekilde Denklem 2.4'ten

$$\Delta y_j = \frac{\partial g_j}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial g_j}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial u_r} \Delta u_r \quad (j=1,2,\dots,m) \text{ elde edilir.}$$

Bu nedenle; denklem 2.3 ve 2.4'ün doğrusallaştırılmış modelleri Denklem 2.7 ve 2.8'de belirtildiği gibi olur.

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (2.7)$$

$$\Delta y = C \Delta x + D \Delta u \quad (2.8)$$

Burada,

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_r} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_r} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial g_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial u_r} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial g_m}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial u_r} \end{bmatrix}$$

Yukarıda bulunan kısmi türevler, küçük bozunumun analiz edildiği denge noktasında değerlendirilir.

Denklem 2.7 ve 2.8'de,

Δx n boyutlu durum vektörü,

Δy m boyutlu çıkış vektörü,

Δu r boyutlu giriş vektörü,

A (n x n) boyutlu durum matrisi

B (n x r) boyutlu giriş veya kontrol matrisi

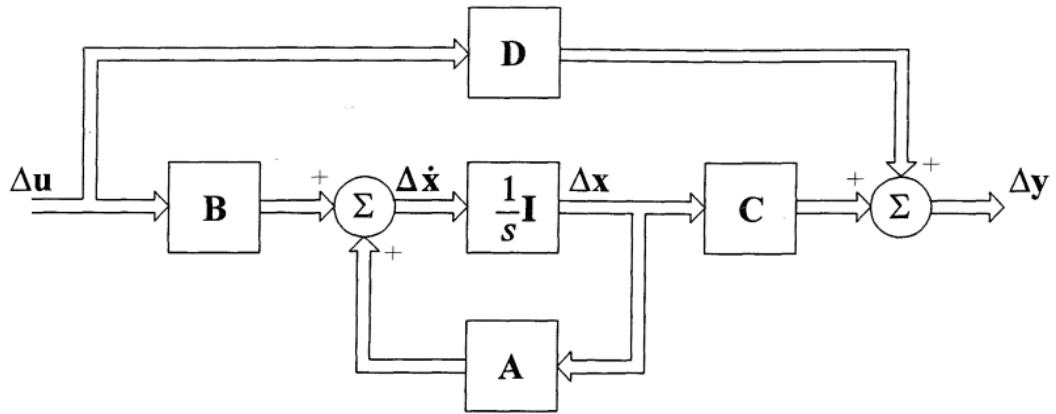
C (m x n) boyutlu çıkış matrisi

D (m x r) boyutlu doğrudan çıkışta gözükken ve girdi oranını tanımlayan ileri besleme matrisi olarak tanımlanmıştır.

Yukarıda bulunan denklemlerin Laplace dönüşümü alınırsa frekans alanındaki durum denklemleri elde edilir:

$$s\Delta x(s) - \Delta x(0) = A\Delta x(s) + B\Delta u(s) \quad (2.10)$$

$$\Delta y(s) = C\Delta x(s) + D\Delta u(s) \quad (2.11)$$



Şekil 2.1. Durum uzay dönüşümünün blok diyagramı

Şekil 2.1 durum uzay dönüşümünün blok diyagramını göstermektedir. Sistemin transfer fonksiyonu temsil edildiği için $\Delta x(0)$ başlangıç koşullarının sıfır olduğu var sayılmaktadır.

Durum denklemlerinin bir çözümü $\Delta x(s)$ için çözümlenerek ve $\Delta y(s)$ 'i aşağıdaki gibi değerlendirilerek elde edilebilir.

Denklem 2.10 yeniden düzenlenirse,

$$(sI - A)\Delta x(s) = \Delta x(0) + B\Delta u(s)$$

elde edilir. Bu nedenle,

$$\Delta x(s) = (sI - A)^{-1} [\Delta x(0) + B\Delta u(s)] = \frac{\text{adj}(sI - A)}{\det(sI - A)} [\Delta x(0) + B\Delta u(s)] \quad (2.12)$$

ve buna uygun olarak,

$$\Delta y(s) = C \frac{\text{adj}(sI - A)}{\det(sI - A)} [\Delta x(0) + B\Delta u(s)] + D\Delta u(s) \quad (2.13)$$

Burada, Δx ve Δy Laplace dönüşümünün iki bileşeni olmakla birlikte, durum ve çıktı vektörlerinin sıfır durum ve serbest bileşenlerinin Laplace dönüşümleridir. Bu bileşenler sırasıyla başlangıç koşullarına ve girdilere bağlıdır. $\Delta x(s)$ ve $\Delta y(s)$ kutupları denklemin kökleridir.

$$\det(sI - A) = 0 \quad (2.14)$$

Yukarıdaki eşitliği sağlayan s değerleri A matrisinin özdeğerleri olarak adlandırılır ve Denklem 2.14, A matrisinin karakteristik denklemi olarak adlandırılır.

2.1.3. Kararlılığın Analizi

Bu çalışmada LYAPUNOV'un birinci yöntemi kullanılarak analiz yapılmıştır. Bu yöntemde doğrusal olmayan bir sistemin küçük sinyal kararlılığı A matrisinin karakteristik denklemiyle yani özdeğerleriyle incelenmektedir.

- a) Özdeğerlerin gerçekte (reel) kısımları negatif olduğunda sistem asimptotik olarak kararlıdır.
- b) Özdeğerlerin en az biri pozitif gerçekte kısma sahip olduğunda sistem kararsızdır.
- c) Özdeğerlerin gerçekte kısımları sıfıra eşit olduğunda bu yaklaşım ile yorum yapmak mümkün değildir.

Küçük sinyal kararlılığında salınım modları, yerel alan ve bölgeler arası olmak üzere ikiye ayrılır. Yerel alan salınım modu 0.7 ila 2.0 Hz arasında değişir ve üretim tesisindeki tek bir generatörle veya yakından bağlantılı olan generatör gruplarıyla ilişkilendirilir. Bölgeler arası salınım modu ise 0.1 ila 0.7 Hz arasında değişir ve birbirine uzaktan bağlanmış olan generatör gruplarıyla ilişkilidir [39].

2.2. DURUM MATRİSİNİN ÖZÖZELLİKLERİ

2.2.1. Özdeğerler

Bir matrisin özdeğerleri Eşitlik 2.15'te $A=0$ dışında elde edilen λ 'nın değerleri ile bulunur.

$$A\phi = \lambda\phi \quad (2.15)$$

Burada,

A (n x n) boyutunda bir matris,

ϕ ise (n x 1) boyutlu bir vektör'dür.

Özdeğerleri bulmak için Denklem 2.15, Denklem 2.16'da olduğu gibi düzenlenebilir.

$$(A - \lambda I)\phi = 0 \quad (2.16)$$

Denklem 2.16'da $\phi = 0$ olamayacağına göre $|A - \lambda I| = 0$ olmalıdır.

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (2.17)$$

λ 'nın n çözümü ($\lambda = \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$) A'nın özdeğerleridir. Özdeğerler gerçekte sayı veya karmaşık sayı olabilir. Eğer A gerçekte sayılardan oluşan bir matris ise karmaşık özdeğerler her zaman eşlenik çiftlerde oluşur.

2.2.2. Özvektörler

Herhangi bir λ_i özdeğeri için Denklem 2.15'i sağlayan n boyutlu ϕ_i sütun vektörü, λ_i ile ilişkili A'nın sağ özvektörü olarak adlandırılır.

$$A\phi_i = \lambda_i\phi_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2.18)$$

Denklem 2.16 homojen olduğundan, $k\phi_i$ de (burada k skaler) bir çözümdür. Bu nedenle, özvektörler sadece skaler çarpan için de belirlenir.

Benzer şekilde, Denklem 2.19'u sağlayan n boyutlu satır vektörü ψ_i , özdeğer λ_i ile ilişkili sol özvektör olarak adlandırılır.

$$\psi_i A = \lambda_i \psi_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2.19)$$

Farklı özdeğerlere karşılık gelen sağ ve sol özvektörler ortogondur. Diğer bir ifade ile eğer λ_i ve λ_j eşit değil ise özvektörler için Denklem 2.20 sağlanır.

$$\psi_i \phi_j = 0 \quad (2.20)$$

Ancak, aynı özdeğere karşılık gelen özvektörler için Denklem 2.21 sağlanmış olur.

$$\psi_i \phi_i = X_i \quad (2.21)$$

Yukarıda da belirtildiği gibi, özvektörler yalnızca skaler çarpan için de belirlendiğinden, bu vektörleri Denklem 2.22’de ifade edildiği biçimde normalleştirmek yaygın bir uygulamadır.

$$\psi_i \phi_i = 1 \quad (2.22)$$

2.2.3. Özdeğerler ve Kararlılık

Özdeğer λ_i zamana bağlı olarak $e^{\lambda_i t}$ şeklinde ifade edilir. Buna bağlı olarak sistem kararlılığı özdeğerler ile aşağıdaki gibi belirlenir:

- a) Gerçek kısımdan oluşan özdeğer salınımsız duruma karşılık gelir. Negatif gerçek kısım azalan durumu, pozitif gerçek kısım ise kararsızlık durumunu ifade eder.
- b) Gerçek (reel) ve sanal (imajiner) kısımdan oluşan karmaşık özdeğerler her biri bir salınım moduna karşılık gelen eşlenik çiftlerde meydana gelir.

Özdeğerlerin gerçek kısmı sönümlenme durumunu, sanal kısmı ise salınım frekansını belirtir. Negatif bir gerçek kısım sönümlenen bir salınımı ifade ederken, pozitif gerçek kısım artan genlikte salınımı ifade eder. Böylece Denklem 2.23’te ifade edilen bir özdeğer çiftinin,

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad (2.23)$$

Salınım frekansısı (Hz) Denklem 2.24’te olduğu gibi ifade edilir.

$$\phi = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.24)$$

Sönümlenme oranı ise Denklem 2.25’te olduğu gibi ifade edilir.

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (2.25)$$

Sönümlenme oranını ifade eden ζ , salınım genliğindeki azalma oranını ifade etmektedir.

2.2.4. Katılım Faktörü

Durum ve salınım modlarını tanımlamak için sağ ve sol özvektörleri ayrı ayrı kullanmak, özvektör elemanlarının durum değişkenleriyle ilişkili birimlere bağlı olmasından dolayı sorun oluşturmaktadır. Bu sorunun çözümü için sağ ve sol özvektörleri aşağıdaki gibi birleştiren katılım matrisi (P) adı verilen bir matris kullanılmaktadır.

$$P = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_n] \quad (2.26)$$

$$p_i = \begin{bmatrix} p_{i1} \\ p_{i2} \\ \vdots \\ p_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_i \psi_{i1} \\ \phi_i \psi_{i2} \\ \vdots \\ \phi_i \psi_{in} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Burada,

ϕ_{ki} = sağ özvektör matrisinin k. Satır ve i. Sütunundaki eleman

ψ_{ik} = sol özvektör matrisinin i. Satır ve k. Sütunundaki eleman

$p_{ki} = \phi_{ki} \psi_{ik}$ katılım faktörü olarak adlandırılmaktadır [40]. Bu k. durum değişkeninin i. moda katılımının bir ölçüsü olarak ifade edilebilir. Bunun tersi de geçerlidir. Herhangi bir mod $(\sum_{i=1}^n p_{ki})$ veya herhangi bir durum değişkeni $(\sum_{k=1}^n p_{ki})$ ile ilişkili katılım faktörlerinin toplamı 1'e eşittir.

$$p_{ki} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kk}} \quad (2.28)$$

Katılım faktörleri genellikle ilgili modlarda ki ilgili durumların katılımlarının göstergesi olarak ifade edilebilir.

3. GELİŞTİRİLMİŞ ESNEK AC İLETİM SİSTEMİ (FACTS) CİHAZLARI

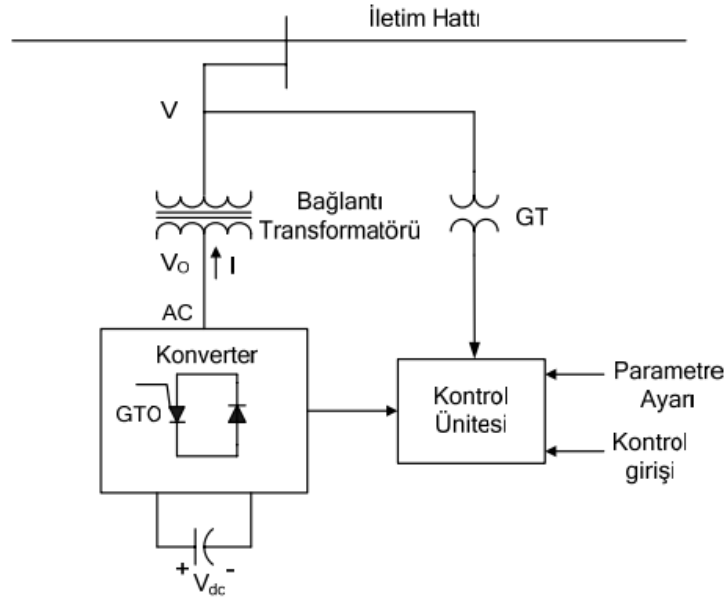
Geliştirilmiş Esnek AC İletim Sistemi (FACTS) cihazları 1980'li yılların sonunda Elektrik Gücü Araştırma Enstitüsü (EPRI) tarafından tanıtılmıştır. Güç elektroniği tabanlı bir cihaz olduğu için FACTS kontrolörleri geleneksel kontrolörlere (şönt kapasitör, seri kapasitör, faz kaydırıcı vb.) göre daha hızlıdır. FACTS cihazlarının temel olarak iki amacı vardır. Bunlar;

- 1) İletim sisteminin güç transfer kapasitesini ve güç kalitesini arttırmak.
- 2) Güç akış kontrolünü sağlamak.

Bu iki amacın başarılı olması iletim sistemleri verimliliğini artırarak yeni sistemlere olan ihtiyacı en düşük seviyede tutmaya yarayacaktır. Güç elektroniği teknolojisinin gelişmesiyle birlikte FACTS cihazlarının kullanım oranları artmıştır. FACTS cihazlarının güç sistemlerinde ani yük değişimlerinden veya arızalardan kaynaklı oluşan salınımları sönmülemeye ve güç sistemlerinin kararlılığını arttırmada kullanımı literatürde ciddi araştırma konusu olarak yer bulmuştur [41], [42]. FACTS cihazlarından günümüzde en çok kullanılanları STATCOM, SVC, TCSC, SSSC ve UPFC'dir. Bu çalışmada FACTS cihazlarından UPFC kullanılmıştır.

3.1. STATİK KOMPANZATÖR (STATCOM)

İletim hattına şönt olarak bağlanan STATCOM'un devre yapısı Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

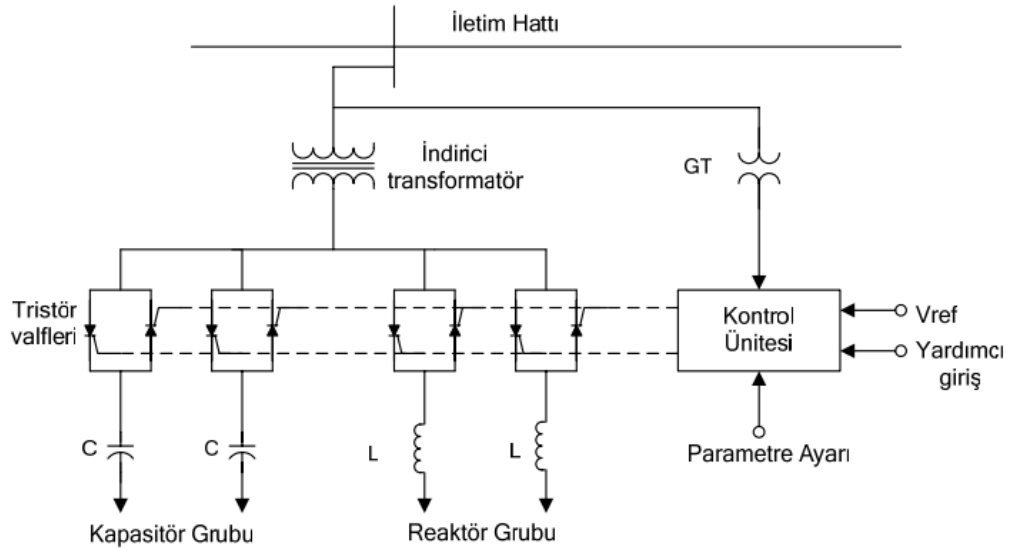


Şekil 3.1. STATCOM devre yapısı [43].

Temel olarak STATCOM, bağlantı transformatörü, konverter, DC kapasitör ve kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Şekil 3.1’de V , AC gerilimi, V_0 ise STATCOM’un çıkış gerilimini ifade eder. STATCOM bağlı olduğu baranın gerilimini düzenlemek için iletim hattına reaktif güç enjekte edebilir veya reaktif güç tüketebilir. STATCOM’un çıkış gerilimi AC sistem geriliminden büyük olursa ($V_0 > V$) iletim hattına reaktif güç enjekte eder. STATCOM’un çıkış gerilimi AC sistem geriliminden küçük olursa ($V_0 < V$) reaktif güç tüketir.

3.2. STATİK VAR KOMPANZATÖR (SVC)

STATCOM gibi iletim hattına şönt olarak SVC’nin devre yapısı Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

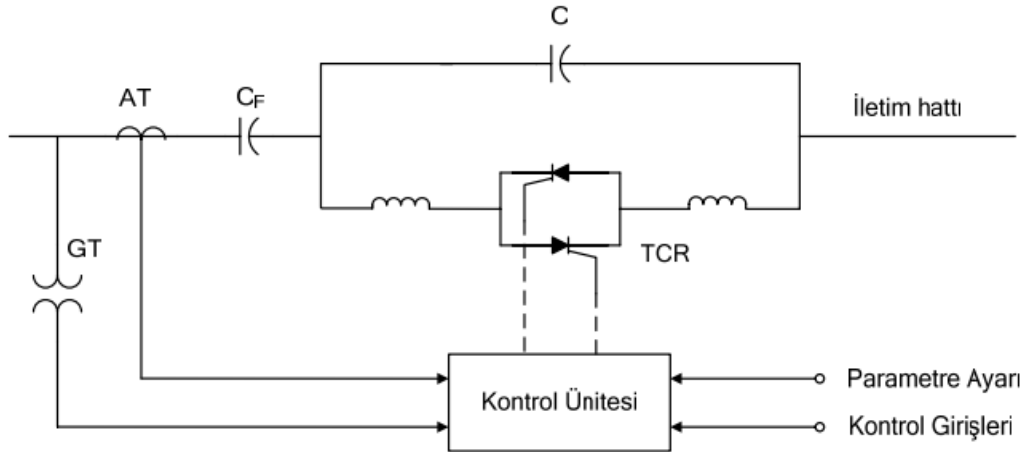


Şekil 3.2. SVC devre yapısı [43].

Temel olarak SVC, bağlantı transformatörü, Tristör Kontrollü Reaktör (TCR), Tristör Anahtarlamalı Kapasitör (TSC) ve kontrol ünitesinden oluşmaktadır. SVC’de ölçülen bara gerilimi ile referans gerilim arasındaki fark PI denetleyişine girmekte ve PI denetleyicisinde tetikleme açısının en düşük ve en yüksek değerlerine de bağlı olarak yeni tetikleme açısı belirlenmektedir [2], [44].

3.3. TRİSTÖR KONTROLLÜ SERİ KOMPANZATÖR (TCSC)

İletim hattına seri olarak bağlanan TCSC’nin devre yapısı Şekil 3.3’te gösterilmiştir.



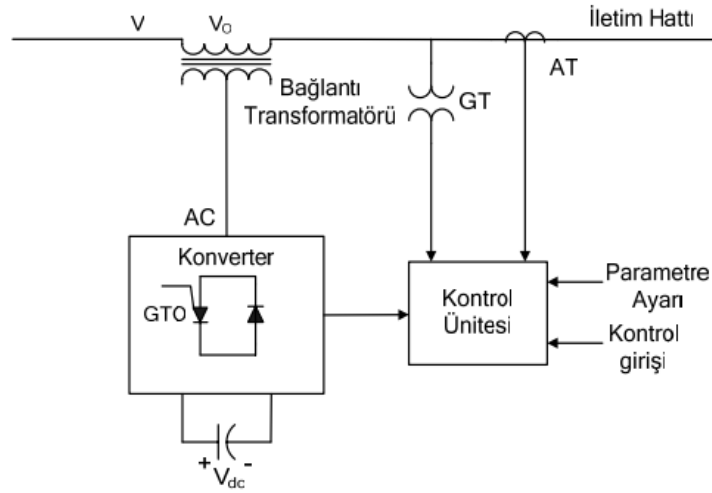
Şekil 3.3. TCSC devre yapısı [43].

TCSC’nin devre yapısında sabit kapasitörün (C_F) yanında Tristör Kontrollü Reaktörler (TCR’ler) ve bunlara paralel olarak bağlanan bir kapasitör (C) kullanılmaktadır.

TCSC'nin, tristörlerin tam iletimde olduğu, iletimde olmadığı ve kısmi olarak iletimde olduğu durumlar olmak üzere üç tip çalışma durumu vardır. Genel olarak TCSC ile sisteme bağlanan kondansatörler, hattın empedansını kontrol etmek ve iletim hattının kapasitesini arttırmak için kullanılmaktadır.

3.4. STATİK SENKRON SERİ KOMPANZATÖR (SSSC)

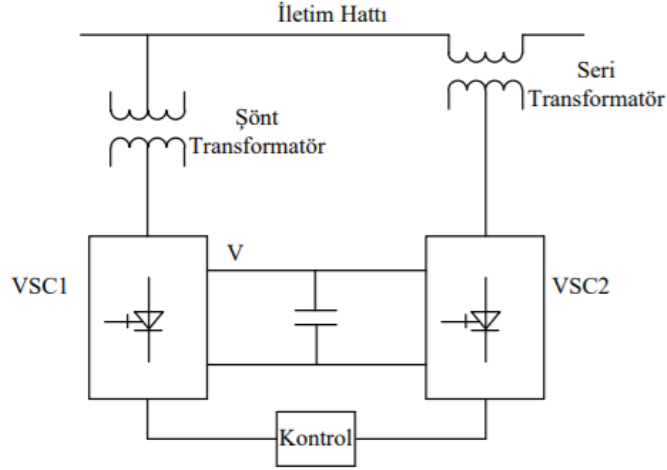
Devre özelliği STATCOM ile aynı olan SSSC iletim hattına seri olarak bağlanmaktadır. SSSC'nin devre yapısı Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. SSSC devre yapısı [43].

SSSC, hat akımından bağımsız olarak istenilen düzeyde gerilim üretmek için tasarlanmıştır. Bağlantı transformatörü, konverter, DC kapasitör ve kontrol ünitesinden oluşmaktadır. SSSC, büyüklüğü ve faz açısı hızlı bir şekilde ayarlanabilen, hat akımına dik olan üç fazlı gerilim üretmekte ve seri olarak sisteme enjekte etmektedir. SSSC aktif ve reaktif güç kontrolü yapabilmektedir. Aynı görevi yapabilen TCSC'ye göre geniş kontrol aralığına sahip olması nedeniyle daha avantajlı olduğu söylenebilmektedir [45].

3.5. BİRLEŞTİRİLMİŞ GÜÇ AKIŞ KONTROLÜ (UPFC)



Şekil 3.5. UPFC devre yapısı [46].

UPFC'nin devre yapısı Şekil 3.5'te gösterilmiştir. UPFC; şönt transformatör, seri transformatör, şönt kompanzator (VSC1), seri kompanzator (VSC2), bu iki transformatör arasında güç alışverişine olanak sağlayan DC bağlantı kapasitörü ve kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Seri transformatörün bulunduğu kısım SSSC, şönt transformatörün bulunduğu kısım STATCOM olarak tanımlanır ise UPFC'nin, ortak bir DC kapasitör ile çalışan STATCOM ve SSSC'nin birleşiminden oluştuğu söylenilebilir. UPFC'de kullanılan akım kaynağı ve süseptansın ifadeleri Denklem 3.1 ve Denklem 3.2'de gösterilmiştir.

$$I_s = -jb_s V_s \quad (3.1)$$

$$b_s = \frac{1}{X_s} \quad (3.2)$$

Burada; I_s akım kaynağının akımını, b_s kaynak süseptansını ve X_s kaynak reaktansını ifade etmektedir. Baralar arasındaki görünür güçlerin ifadesi Denklem 3.3'te ve Denklem 3.4'te gösterilmiştir.

$$S_{is} = -V_i(-I_s)^* \quad (3.3)$$

$$S_{js} = -V_j(I_s)^* \quad (3.4)$$

UPFC, çift yönlü aktif ve reaktif güç kontrolünü seri tarafta bulunan evirici ile sağlamaktadır. Seri taraftaki eviricinin görünür güç ifadesi Denklem 3.5'te gösterilmiştir.

$$S_{evirici2} = v_s I_{ij}^* = r e^{j\gamma} V_i \left(\frac{\bar{V}_i - V_j}{jX_s} \right)^* \quad (3.5)$$

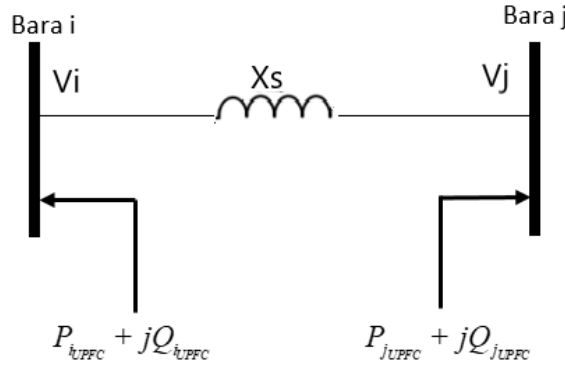
Kayıplar ihmal edilir ise evirici devrelerindeki aktif güç eşitlikleri Denklem 3.6'teki gibi olacaktır. Eviricilerin görünür, aktif ve reaktif ifadeleri Denklem 3.7 ile Denklem 3.8'de gösterilmiştir.

$$P_{evirici1} = P_{evirici2} \quad (3.6)$$

$$P_{evirici2} = r b_s V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) - r b_s V_i^2 \sin \gamma \quad (3.7)$$

$$Q_{evirici2} = -r b_s V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma) - r b_s V_i^2 \cos \gamma + r^2 b_s V_i^2 \quad (3.8)$$

Reaktif gücün sistemden çekilmesi veya sisteme enjekte edilmesi UPFC tarafından kontrol edilebilir. Sonuç olarak bara i ve bara j'ye seri ve şönt güç enjeksiyonlarının birleştirilmesiyle Şekil 3.6'da görülen UPFC'nin geliştirilmiş matematiksel modeli oluşturulabilir.



Şekil 3.6. UPFC'nin geliştirilmiş modeli.

UPFC'nin güç eşitlikleri Denklem 3.9 ile Denklem 3.12 arasında gösterilmiştir.

$$P_{iUPFC} = r b_s V_i^2 \sin \gamma - r b_s V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) \quad (3.9)$$

$$P_{jUPFC} = r b_s V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) \quad (3.10)$$

$$Q_{iUPFC} = r b_s V_i^2 \cos \gamma \quad (3.11)$$

$$Q_{jUPFC} = r b_s V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma) \quad (3.12)$$

Yukarıdaki eşitliklerde; r ve γ ifadelerinden r, $0 \leq r \leq r^{\text{maks}}$ ve γ , $0 \leq \gamma \leq 2\pi$ aralığında

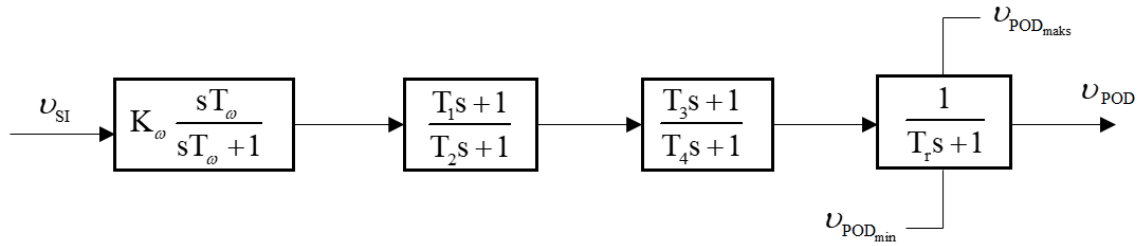
yer almaktadır. v_s kaynak gerilimini, I_{ij}^* i barasından j barasına akan akımın eşleniğini, V_i i. bara gerilimini, V_j j. bara gerilimini ve X_s hattın reaktansını, θ_i i barasının gerilim açısını, θ_j j barasının gerilim açısını ifade etmektedir.



4. DENETLEYİCİ MODELLERİ

4.1. GÜÇ SALINIM SÖNÜMLEMESİ (POD).

Güç salınım sönümlemesi (POD) modelini güç sistemi kararlı kılıcısı (PSS)'e benzetmek mümkündür. POD; arındırma filtresi, faz kompanzator ve dengeleyici bloklarından oluşmaktadır. Sabit durumda arındırma sinyali POD'un çıkışını sıfır yapmaktadır.



Şekil 4.1. POD kontrol devresi

POD kontrol devresinin çıkış sinyali olan (v_{POD}) anti-windup sınırlayıcısına tabi tutulur. Dinamiğini ise küçük zaman sabiti olan (T_r)'den alır. K_{ω} kazancı sönümlenme oranını belirler. Giriş sinyalindeki faz gecikmelerinin telafisini ise faz kompanzator blokları sağlar [47].

POD'un parametrelerinin ayarlanması için kullanılan tasarım yöntemlerinden en popüler olanları özdeğer hassasiyetine, frekans tepkisine ve bunların birleşimine dayanmaktadır. İki aşamadan oluşan tasarımlar için ilk aşama telafi edilecek faz gecikmesinin belirlenmesi ikinci aşama ise sönümlenme oranını tespit etmen amacıyla denetleyici kazancının hesaplanmasıdır. Faz kontrol bloğunun parametre hesabı için kullanılan denklemler Denklem 4.1 ve Denklem 4.2'de gösterilmiştir.

$$T = \frac{1}{\omega_v \sqrt{\alpha}} \quad (4.1)$$

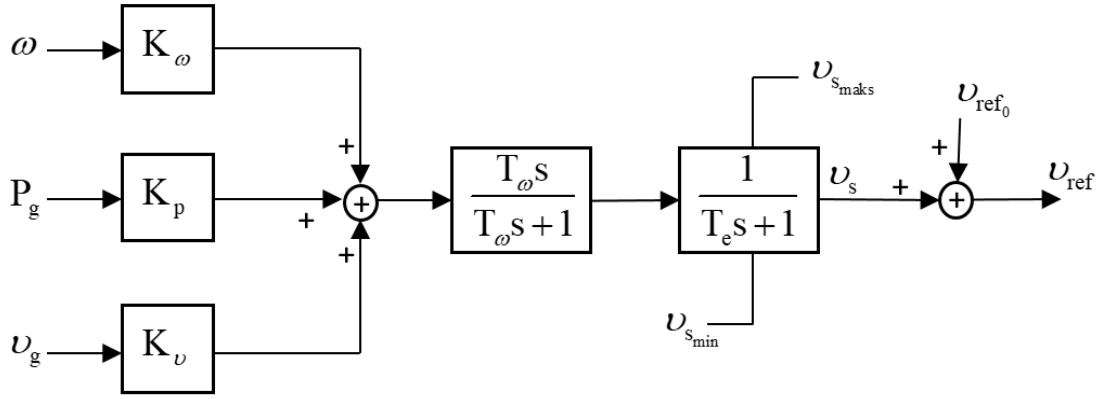
$$\alpha = \frac{1 - \sin(\varphi/n)}{1 + \sin(\varphi/n)} \quad (4.2)$$

Burada; ω_n sönümlenme frekansını, n gecikmeli şebekelerin sayısını, φ ise kompanse edilecek faz açısını ifade etmektedir. Sönümlenme oranı genellikle %10 olarak kabul

edilmektedir [48].

4.2. GÜÇ SİSTEMİ KARARLI KILICISI (PSS)

Güç sistemi kontrol mekanizmalarından olan güç sistemi kararlı kılıcısının (PSS'nin) asıl kullanım amacı geçici durumlarda güç sisteminde oluşan salınımları sönümleyerek sistemi kısa süre içerisinde kararlı hale getirmektir [49]. Bu çalışmada üç tip PSS kullanılmıştır.

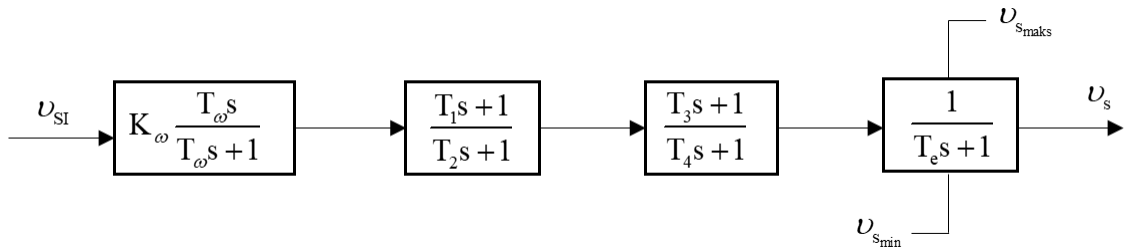


Şekil 4.2. PSS Tip-1 kontrol devresi.

PSS Tip-1'in kontrol devresi Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Kontrol devresinde açılmal hız, giriş gücü ve bara gerilimleri toplanarak kaskat bağlı bir transfer fonksiyonu bloğuna girmekte, blok çıkışında gerilim seviyesinin en düşük ve en yüksek aralıklarının ayarlanmasıyla referans gerilimiyle toplanmakta ve çıkış gerilimi elde edilmektedir. Bu kontrol yapısının matematiksel ifadesi Denklem 4.3 ve Denklem 4.4'te belirtilmiştir.

$$\dot{v}_1 = -(K_\omega \omega + K_p P_g + K_v V_g + v_1) / T_\omega \quad (4.3)$$

$$\dot{v}_s = (K_\omega \omega + K_p P_g + K_v V_g + v_1 + v_s) / T_e \quad (4.4)$$



Şekil 4.3. PSS Tip-2 kontrol devresi.

PSS Tip 2'nin kontrol devresi Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Bu kontrol devresi giriş sinyalinin dört farklı transfer fonksiyonuna arka arkaya girmesine ve çıkışında gerilimin

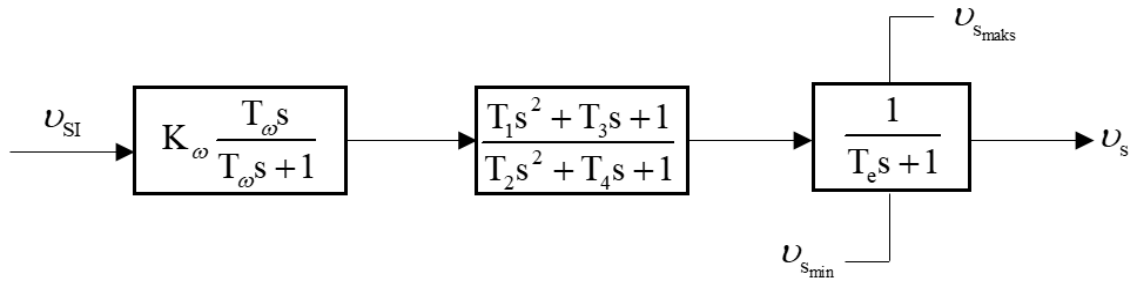
en düşük ve en yüksek değerlerinin ayarlanmasıyla generatör kaynak geriliminin elde edilmesine dayanmaktadır. Bu kontrol yapısının matematiksel ifadesi Denklem 4.5 ile Denklem 4.8 arasında belirtilmiştir.

$$\dot{v}_1 = -\frac{K\omega V_{SI} + v_1}{T\omega} \quad (4.5)$$

$$\dot{v}_2 = \frac{1}{T_2} \left[\left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) (K\omega V_{SI} + v_1) - v_2 \right] \quad (4.6)$$

$$\dot{v}_3 = \frac{1}{T_4} \left\{ \left(1 - \frac{T_3}{T_4} \right) \left[v_2 + \frac{T_1}{T_2} (K\omega V_{SI} + v_1) \right] - v_3 \right\} \quad (4.7)$$

$$\dot{v}_s = \frac{1}{T_e} \left\{ v_3 + \frac{T_3}{T_4} \left[v_2 + \frac{T_1}{T_2} (K\omega V_{SI} + v_1) \right] - v_s \right\} \quad (4.8)$$



Şekil 4.4. PSS Tip-3 kontrol devresi.

PSS Tip-3'ün kontrol devresi Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Bu kontrol devresinde giriş sinyali iki transfer fonksiyonu bloğuna arka arkaya girmekte ve çıkışında gerilimin en düşük ve en yüksek değerlerinin ayarlanmasıyla kaynak gerilimini oluşturmaktadır. Bu kontrol yapısının matematiksel ifadesi Denklem 4.9 ile Denklem 4.12 arasında belirtilmiştir.

$$\dot{v}_1 = -\frac{K\omega V_{SI} + v_1}{T\omega} \quad (4.9)$$

$$\dot{v}_2 = \frac{1}{T_4} v_3 + \frac{1}{T_4} \left(T_1 - T_2 \frac{T_3}{T_4} \right) (K\omega V_{SI} + v_1) \quad (4.10)$$

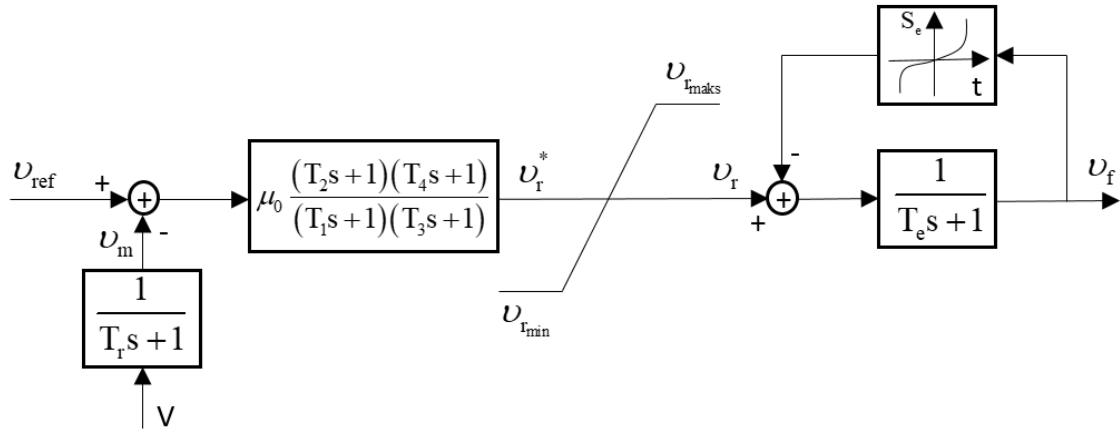
$$\dot{v}_3 = -v_2 - \frac{T_2}{T_4} v_3 + \left[1 - \frac{T_3}{T_4} - \frac{T_2}{T_4} \left(T_1 - T_2 \frac{T_3}{T_4} \right) \right] (K\omega V_{SI} + v_1) \quad (4.11)$$

$$\dot{v}_s = \frac{1}{T_e} \left[v_2 + \frac{T_3}{T_4} (K\omega V_{SI} + v_1) - v_s \right] \quad (4.12)$$

Bu matematiksel ifadelerde; v_1 , v_2 ve v_3 durum değişkeni ifadeleri, v_s PSS'nin çıkış sinyali, P_g PSS'nin bağlı olduğu durumdaki aktif güç, V_g generatör gerilimi, K_v gerilim kazancı, K_p aktif güç kazancı, K_ω PSS kazancı, T_1 birinci zaman sabiti, T_2 ikinci zaman sabiti, T_3 üçüncü zaman sabiti, T_4 dördüncü zaman sabiti, T_e Anti-windup zaman sabiti ve T_ω arındırma sabitidir [50].

4.3. OTOMATİK GERİLİM REGÜLATÖRÜ (AVR)

Otomatik Gerilim Regülatörünün (AVR'nin) asıl kullanım amacı senkron generatörü referans geriliminde tutmaktır. Bir gerilim sensörü kullanarak çıkışını günceller ve referans gerilim ile karşılaştırır. Karşılaştırma sonucunda bir hata sinyali oluşturarak gerilimi değiştirir. Bu çalışmada üç tip AVR kullanılmıştır.



Şekil 4.5. AVR Tip-1 kontrol devresi.

AVR Tip-1'in kontrol devresi Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Bu kontrol devresinde ölçülen gerilim değeri ile referans gerilim değeri farkları alınarak bir transfer fonksiyonuna girmektedir. Transfer fonksiyonunun çıkışında rotor referans gerilimi elde edilmekte ve rotor referans geriliminin en düşük ve en yüksek değeri ayarlanıp doyum oranı ile farkı alınarak da uyarım gerilimi elde edilmektedir. Bu kontrol yapısının matematiksel ifadesi Denklem 4.13 ile Denklem 4.17 arasında gösterilmiştir.

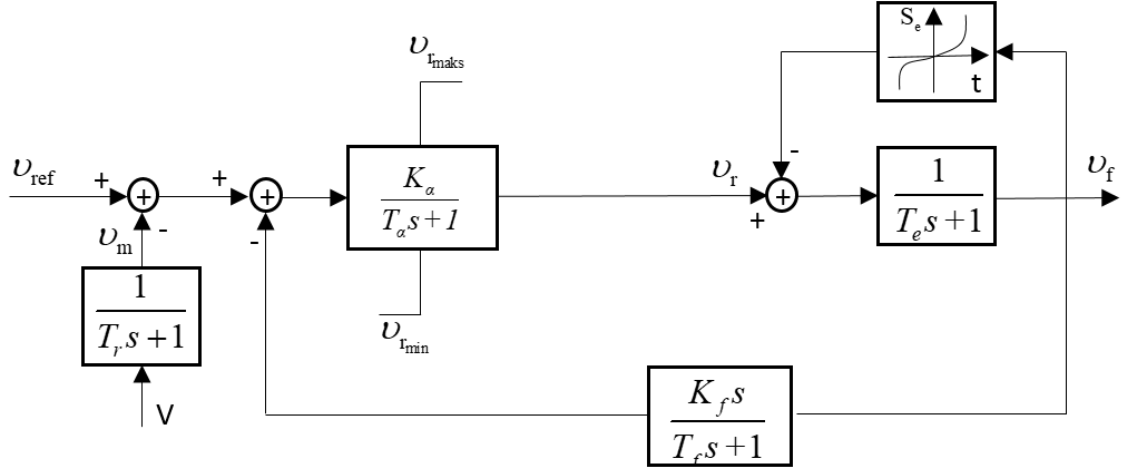
$$\dot{v}_m = \frac{V - v_m}{T_r} \quad (4.13)$$

$$\dot{v}_{r1} = \frac{1}{T_1} \left[\mu_0 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) (v_{ref} - v_m) - v_{r1} \right] \quad (4.14)$$

$$\dot{v}_{r2} = \frac{1}{T_4} \left[\left(1 - \frac{T_3}{T_4} \right) (v_{r1} + \mu_0 \frac{T_2}{T_1} (v_{ref} - v_m)) - v_{r2} \right] \quad (4.15)$$

$$v_r^* = v_{r2} + \frac{T_3}{T_4} \left[v_{r1} + \mu_0 \frac{T_2}{T_1} (v_{ref} - v_m) - v_{r1} \right] \quad (4.16)$$

$$\dot{v}_f = -\frac{1}{T_e} \left[v_f (1 + S_e(v_f)) - v_r \right] \quad (4.17)$$



Şekil 4.6. AVR Tip-2 kontrol devresi.

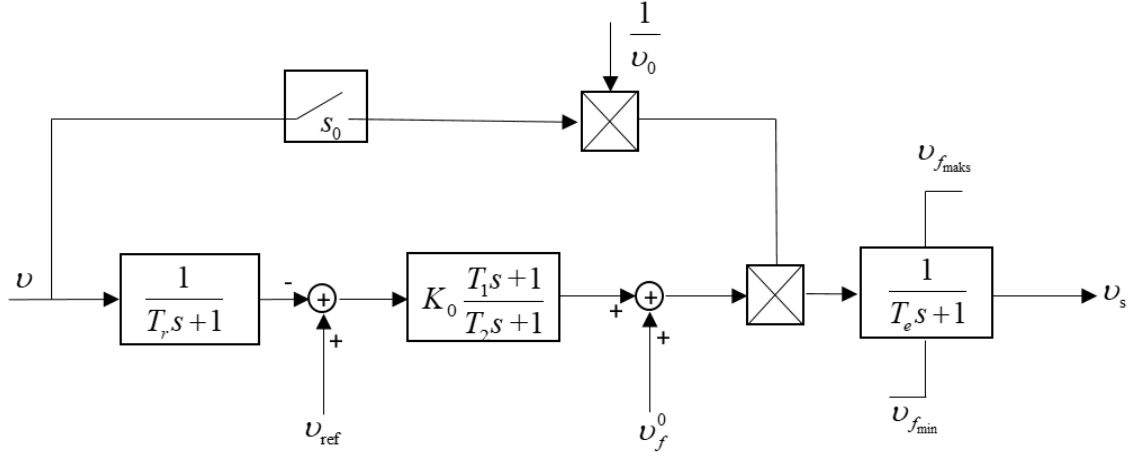
AVR Tip-2'nin kontrol devresi Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Bu kontrol devresinde referans gerilim ile ölçülen gerilim arasındaki farkın uyarım gerilimi ile farkı bir kontrol bloğuna girmekte ve bu kontrol bloğunda en düşük ve en yüksek değerleri ayarlanarak rotor gerilimi elde edilmektedir. Rotor gerilimi ile doyum oranı arasındaki farkın bir elektriksel transfer fonksiyonu bloğuna girmesiyle uyarım gerilimi elde edilmektedir. Bu kontrol yapısının matematiksel ifadesi Denklem 4.18 ile Denklem 4.21 arasında gösterilmiştir.

$$\frac{dv_{r1}}{dt} = \frac{1}{T_a} \left[K_a \left(v_{ref} - v_m - v_{r2} - \frac{K_f}{T_f} v_f \right) - v_{r1} \right] \quad (4.18)$$

$$\frac{dv_m}{dt} = \frac{V - v_m}{T_r} \quad (4.19)$$

$$\frac{dv_f}{dt} = -\frac{1}{T_e} \left[v_f (1 + S_e(v_f)) - v_r \right] \quad (4.20)$$

$$\frac{dv_{r2}}{dt} = -\frac{1}{T_f} \left(\frac{K_f}{T_f} v_f + v_{r2} \right) \quad (4.21)$$



Şekil 4.7. AVR Tip-3 kontrol devresi.

AVR Tip-3'ün kontrol devresi Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Bu kontrol devresi diğer kontrol devrelerine göre daha basit bir yapıdadır. Güç sistemi kararlı kılıcısı (PSS) giriş sinyali ifadesi transfer fonksiyonu bloklarına girmekte ve gerilimin en düşük ve en yüksek değerlerinin ayarlanmasıyla kaynak gerilimi elde edilmektedir. Bu kontrol yapısının matematiksel ifadesi Denklem 4.22 ile Denklem 4.24 arasında gösterilmiştir.

$$\dot{v}_m = \frac{v - v_m}{T_r} \quad (4.22)$$

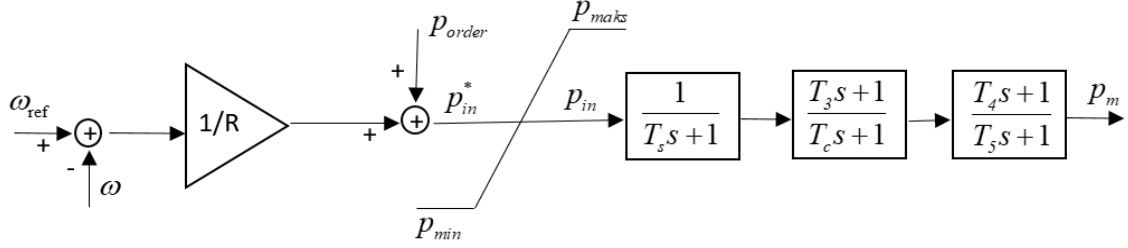
$$\dot{v}_r = \frac{1}{T_2} \left[\mu_0 \left(1 - \frac{T_1}{T_2} (v_{ref} - v_m) - v_r \right) \right] \quad (4.23)$$

$$\dot{v}_f = \frac{1}{T_e} \left[\left(v_r + \mu_0 \frac{T_1}{T_2} (v_{ref} - v_m) + v_{f0} \right) \frac{v}{v_0} - v_f \right] \quad (4.24)$$

AVR ifadelerinde; v_{ref} AVR referans gerilimi, v_f geri besleme gerilimi, v_m ölçülen gerilim, v_r AVR gerilimi, $v_{r,\min}$ v_r 'nin alt sınırı, $v_{r,\max}$ v_r 'nin üst sınırı, v_{r1} yükseltici durum değişkeni, v_{r2} dengeleyici durum değişkeni, v_f geri besleme gerilimi, μ_0 regülatör kazancı, T_1 - T_2 - T_3 ve T_4 AVR zaman sabitleri, T_e alan devresi sabiti, T_r ölçüm süresi sabiti, S_e uyarıcının doygunluk fonksiyonu, v_{f0} ilk alan gerilimi ve v_0 bara offset gerilimidir [49].

4.4. TÜRBİN YÖNETİCİSİ (TG)

Türbin yöneticilerinin (TG'lerin) asıl kullanım amacı senkron generatörlerin frekans kontrolünü sağlamaktır. Düşme oranı ve mekanik moment sınırına göre generatörün çalışma güç oranını belirlemektedir. Bağlı olduğu senkron generatörün çalışma adımını kontrol ederek her durumda sistem kontrolünü sağlamaktadır. Bu çalışmada iki tip TG kullanılmıştır.



Şekil 4.8. TG Tip-1 kontrol devresi.

TG Tip-1'in kontrol devresi Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Bu kontrol devresinde açılmal hızın gerçek değeri ve referans değeri arasındaki fark $1/R$ kazanç oranı ile çarpılmakta, elde edilen aktif güç değeri ile harici bir aktif güç değeri ile toplanarak giriş gücü elde edilmektedir. Giriş gücünün en düşük ve en yüksek değeri ayarlandıktan sonra üç farklı transfer fonksiyonu yoluyla mekanik güç elde edilmektedir. Bu kontrol yapısının matematiksel ifadesi Denklem 4.25 ile Denklem 4.30 arasında gösterilmiştir.

$$p_{in}^* = p_{order} + \frac{1}{R}(\omega_{ref} - \omega) \quad (4.25)$$

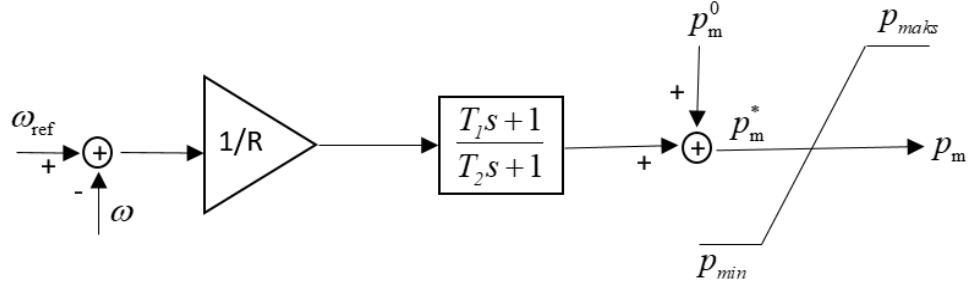
$$p_{in} = \begin{cases} p_{in}^* & \text{if } p^{\min} \leq p_{in}^* \leq p^{\max} \\ p^{\max} & \text{if } p_{in}^* > p^{\max} \\ p^{\min} & \text{if } p_{in}^* < p^{\min} \end{cases} \quad (4.26)$$

$$\dot{x}_{g1} = (p_{in} - x_{g1}) / T_s \quad (4.27)$$

$$\dot{x}_{g2} = \left(\left(1 - \frac{T_3}{T_c} \right) x_{g1} - x_{g2} \right) / T_c \quad (4.28)$$

$$\dot{x}_{g3} = \left(\left(1 - \frac{T_4}{T_5} \right) \left(x_{g2} + \frac{T_3}{T_c} x_{g1} \right) - x_{g3} \right) / T_5 \quad (4.29)$$

$$p_m = x_{g3} + \frac{T_4}{T_5} \left(x_{g2} + \frac{T_3}{T_c} x_{g1} \right) \quad (4.30)$$



Şekil 4.9. TG Tip-2 kontrol devresi.

TG Tip-2'nin kontrol devresi Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Bu kontrol devresinde açılal hızın gerçek değeri ile referans değeri arasındaki fark $1/R$ oranında kazanç değeri ile çarpılmakta ve transfer fonksiyonuna girmektedir. Daha sonra referans mekanik güç ile toplanmakta ve elde edilen mekanik güç ifadesinin en düşük ve en yüksek değerleri ayarlanarak mekanik gücün yeni değeri elde edilmektedir. Bu kontrol yapısının matematiksel ifadesi Denklem 4.31 ile Denklem 4.33 arasında gösterilmiştir.

$$\dot{x}_g = \left(\frac{1}{R} \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) (\omega_{ref} - \omega) - x_g \right) / T_2 \quad (4.31)$$

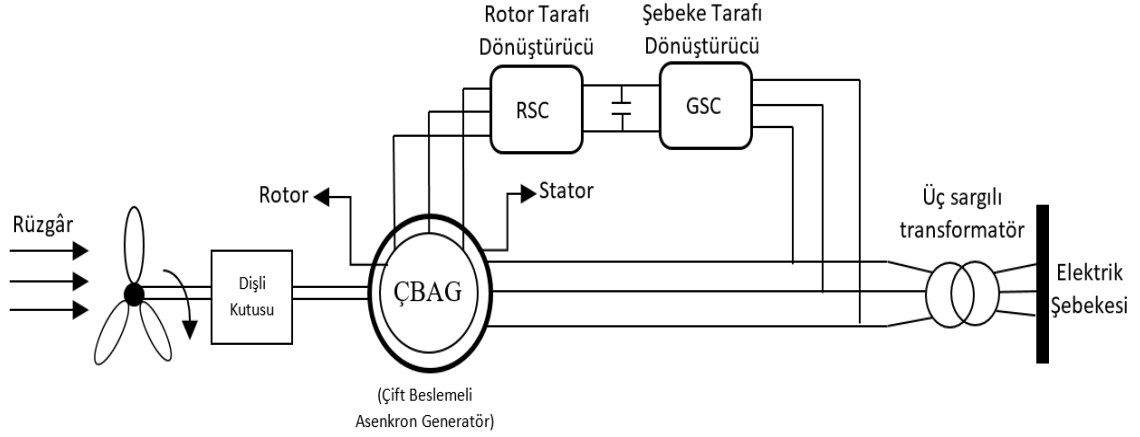
$$p_m^* = x_g + \frac{1}{R} \frac{T_1}{T_2} (\omega_{ref} - \omega) + p_m^0 \quad (4.32)$$

$$p_m = \begin{cases} p_m^* & p^{\min} \leq p_m^* \leq p^{\max} \\ p^{\max} & p_m^* > p^{\max} \\ p^{\min} & p_m^* < p^{\min} \end{cases} \quad (4.33)$$

TG ifadelerinde; ω_{ref} açılal hızın referans değeri, p^{\max} en yüksek türbin çıkış gücü, p_m cebirsel değişken dizini, p^{\min} en düşük türbin çıkış gücü, T_s yönetici zaman sabiti, T_c servo zaman sabiti, T_1 geçici kazanç zaman sabiti, T_2 yönetici zaman sabiti, T_3 geçici zaman sabiti, T_4 güç oranı zaman sabiti, T_5 reheat zaman sabiti, $x_g, x_{g1}, x_{g2}, x_{g3}$ durum değişkeni dizinleri ve u bağlantı durumunu (0,1) göstermektedir.

5. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖR (ÇBAG)

Şebekeye bağlanmış olan bir Çift Beslemeli Asenkron Generatörün (ÇBAG'nin) devre yapısı Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. ÇBAG devre yapısı.

ÇBAG'nin statoru bir transformatör aracılığıyla direkt olarak şebekeye bağlıyken rotoru dönüştürücüler aracılığıyla bağlanmaktadır. ÇBAG rüzgar hızından bağımsız olarak belirli seviyelere kadar çıkış gücünü sabit tutma özelliğine sahiptir. Rotor tarafı dönüştürücü hız sınırlarını ihlal etmesi durumunda ÇBAG'yi şebekeden ayırmaktadır. Bu tür avantajlarından dolayı sıklıkla tercih edilen ÇBAG, bu tez çalışmasında da kullanılmıştır. ÇBAG'nin kararlı durum elektriksel denklemleri Denklem 5.1 ile Denklem 5.4 arasında gösterilmiştir [51], [52].

$$v_{ds} = -R_s i_{ds} + ((X_s + X_m) i_{qs} + X_m i_{qr}) \quad (5.1)$$

$$v_{qs} = -R_s i_{qs} - ((X_s + X_m) i_{ds} + X_m i_{dr}) \quad (5.2)$$

$$v_{dr} = -R_r i_{dr} + (1 - \omega_m) ((X_r + X_m) i_{qr} + X_m i_{qs}) \quad (5.3)$$

$$v_{qr} = -R_r i_{qr} - (1 - \omega_m) ((X_r + X_m) i_{dr} + X_m i_{ds}) \quad (5.4)$$

Burada; v_{ds} ve v_{qs} d-q eksenli stator gerilimlerini, v_{dr} ve v_{qr} d-q eksenli rotor gerilimlerini, i_{ds} ve i_{qs} d-q eksenli stator akımlarını, i_{dr} ve i_{qr} d-q eksenli rotor akımlarını, R_r rotor direncini, X_r rotor reaktansını, X_m mıknatıslanma reaktansını, R_s stator

direncini, X_s stator reaktansını ve ω_m rotor hızını ifade etmektedir.

ÇBAG tarafından şebekeye enjekte edilen güç dönüştürücülerin çalışma modları ile birlikte stator ve rotor akımlarının da bir fonksiyonudur. Şebeke tarafındaki dönüştürücülerin güçleri Denklem 5.5 ve Denklem 5.6'da, rotor tarafındaki dönüştürücülerin güçleri Denklem 5.7 ve Denklem 5.8'de gösterilmiştir.

$$P_g = v_{dg}i_{dg} + v_{qg}i_{qg} \quad (5.5)$$

$$Q_g = v_{qg}i_{dq} - v_{dg}i_{qg} \quad (5.6)$$

$$P_r = v_{dr}i_{dr} + v_{qr}i_{qr} \quad (5.7)$$

$$Q_r = v_{qr}i_{dr} - v_{dr}i_{qr} \quad (5.8)$$

Burada; v_{dg} , v_{qg} , i_{dg} ve i_{qg} şebeke tarafındaki dönüştürücünün d-q eksen gerilimlerini ve akımlarını ifade ederken, v_{dr} , v_{qr} , i_{dr} ve i_{qr} rotor tarafındaki dönüştürücünün d-q eksen gerilimlerini ve akımlarını ifade etmektedir.

Rüzgâr türbininin mekanik özelliklerini matematiksel olarak temsil eden ifadeler Denklem 5.9 ve Denklem 5.10'da gösterilmiştir.

$$\dot{\omega}_m = (T_m - T_e) / 2H_m \quad (5.9)$$

$$T_e = X_m (i_{qr}i_{ds} - i_{dr}i_{qs}) \quad (5.10)$$

Burada, elektromanyetik torku ifade eden T_e 'nin yaklaşık değeri Denklem 5.11'de gösterilmiştir.

$$T_e \approx -\frac{X_m V i_{qr}}{\omega_b (X_s + X_m)} \quad (5.11)$$

Burada; ω_b sistemin frekans oranı rad/sn, H_m atalet sabiti kWs/kWA'yi ifade etmektedir.

T_m mekanik tork, rüzgâr türbininin giriş gücü olarak da ifade edilir ve matematiksel ifadesi Denklem 5.12'de gösterilmiştir.

$$T_m = \frac{P_w}{Q_m} \quad (5.12)$$

Türbinler aracılığıyla rüzgardan elde edilen mekanik güç P_w 'nin matematiksel ifadesi Denklem 5.13'de gösterilmiştir.

$$P_w = \frac{\rho}{2} c_p (\lambda, \theta_p) A_r v_w^3 \quad (5.13)$$

Burada; ρ havanın yoğunluğunu, v_w rüzgârın hızını, θ_p eğim açısını, A_r rotorun dönmesi sonucu taranan alan ve λ kanat ucunun hız oranını ifade eder.

c_p performans katsayısı veya güç katsayısı olarak tanımlanmaktadır. Matematiksel ifadeleri Denklem 5.14'te ve Denklem 5.15'te gösterilmiştir.

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda_i + 0.08\theta_p} - \frac{0.035}{\theta_p^3 + 1} \quad (5.14)$$

$$c_p = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\theta_p - 5 \right) e^{\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (5.15)$$



6. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ (EDS)

Son yıllarda, nüfusun hızla artmasından, teknolojinin hızla gelişmesinden kaynaklanan elektrik enerjisi talebinin artması, fosil yakıtların tükenmekte olması ve yeni üretim ünitelerinin enterkonnekte sisteme dahil edilmesindeki maliyetin yüksekliği gibi nedenler enerjinin daha etkin kullanılması konusunu gündeme getirmiş ve EDS kullanımının önemini oldukça arttırmıştır. EDS elemanı güç sisteminin aktif güç kontrolünü yapmaktadır. Duruma bağlı olarak güç sisteminden aktif güç çeker veya güç sistemine aktif güç verir. EDS elemanları arasında en yaygın olarak kullanılanları süperkapasitör, batarya ve bu tez çalışmasında da kullanılan yakıt hücresidir.

6.1. YAKIT HÜCRESİ

Yakıt hücresi üç temel katmandan oluşmaktadır. Bu katmanlar; yakıt hücresi devresi, yakıt işlemcisi ve güç bağlantı ünitesidir.

- a) Yakıt işlemcisi: Yakıtın dönüştürüldüğü katmandır. Örneğin; doğal gaz hidrojene bu katmanda dönüştürülür.
- b) Yakıt hücresi devresi: Elektriğin üretildiği katmandır. Bu katmanda ayrı ayrı çok sayıda elektrokimyasal yakıt hücresi vardır.
- c) Güç bağlantı ünitesi: DC gücü AC çıkış gücüne dönüştürür ve akım, gerilim ve frekans kontrolü içerir.

Güç bağlantı ünitesi kontrol edilebilir. Bu ünitenin yakıt hücresi kontrol işlevleri iki bloğa bölünmüştür. Blokların ilki şebekeye enjekte edilecek aktif ve reaktif güç miktarı hakkında gönderilecek komutu içerir. İkincisi ise uygun talimatlarla birlikte bu komutları gerçekleştirir. Yakıt hücresi akımı sabit güç ile Denklem 6.1'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$I_k = \frac{(P_{ref} / V_{k0} - i_k)}{T_e} \quad (6.1)$$

Burada; I_k yakıt hücresi akımını, i_k yakıt hücresinin başlangıç akımını, V_{k0} yakıt hücresinin başlangıçtaki DC gerilimini ve T_e küçük zaman sabitini ifade eder. Bağlandığı

sistemin giriş sinyalinin aşırı büyük olduğu durumda yakıt hücresinin akımı Denklem 6.2'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$I_k = \left(\frac{U_{lim} q H_2}{2K_r} - i_k \right) \frac{1}{T_e} \quad (6.2)$$

Burada; U_{lim} en yüksek veya en düşük yakıt tüketimini, q soğutma katsayısını, H_2 hidrojen oranını, K_r DC katsayısını ifade eder. Şebeke bağlantısının ideal bir evirici ve x_T reaktanslı bir transformatör ile gerçekleştiği varsayılarak, AC gerilim, evirici modülasyon genliği m tarafından Denklem 6.3'teki gibi düzenlenir.

$$\dot{m} = \frac{(K_m (V_{ref} - V_s) - m)}{T_m} \quad (6.3)$$

Burada; V_{ref} referans gerilimini, V_s şebeke gerilimini, m modülasyon genliğini, K_m modülasyon katsayısını, T_m modülasyon zaman sabitini ifade eder. Güç sistemine yakıt hücresinden ilave edilen aktif ve reaktif güçler Denklem 6.4 ve Denklem 6.5'te ifade edilmektedir.

$$P_s = \frac{V_t V_s}{X_t} \sin(\theta_t - \theta_s) \quad (6.4)$$

$$Q_s = \frac{V_t V_s}{X_t} \cos(\theta_t - \theta_s) \quad (6.5)$$

Burada; θ_t yakıt hücresinin terminal gerilim açısını, θ_s kaynak geriliminin açısını, V_t yakıt hücresinin terminal gerilimini, X_t ise transformatör reaktansını ifade eder. Kaynak gerilim açısı Denklem 6.6'da ifade edilmiştir.

$$\theta_t = \theta_s + \alpha \sin\left(\frac{X_t I_k}{K_m V_s}\right) \quad (6.6)$$

Denklem 5.5 ve Denklem 5.6 birleştirilirse denklem 6.7 yazılabilir.

$$Q_s = \frac{V_s^2}{X_t} + \frac{V_s V_t}{X_t} \sqrt{1 - \left(\frac{X_t I_k}{K_m V_s}\right)^2} \quad (6.7)$$

Referans gerilimi V_{ref} değeri ve evirici genliğinin m_0 başlangıç değeri güç akışı çözümüne dayalı olarak Denklem 6.8 ve Denklem 6.9'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$m_0 = -\frac{X_t}{V_s(V_t/K_m)} \sqrt{P_s^2 + \left(Q_q + \frac{V_g^2}{X_t}\right)^2} \quad (6.8)$$

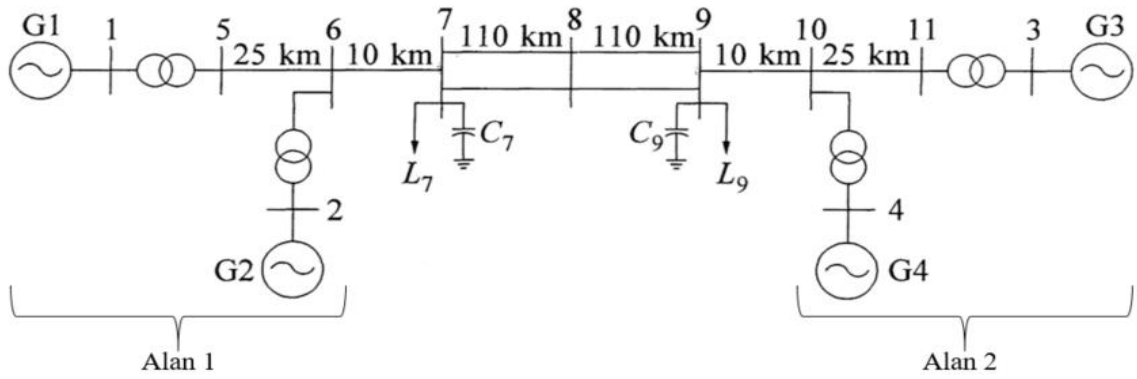
$$V_{\text{ref}} = V_g + \left(\frac{m}{K_m}\right) \quad (6.9)$$

Burada, V_g PV generatörün gerilimini, P_g aktif gücünü, Q_g reaktif gücünü ifade eder [53].



7. BENZETİM ÇALIŞMASI

Bu tez çalışması, Prabha KUNDUR'un "Power System Stability and Control" kitabında sayfa 813'te belirttiği, devre modeli Şekil 7.1'de gösterilen 2 alanlı - 4 generatörlü güç sistemi üzerinde test edilmiştir [1]. Analizler bir Matlab aracı olan Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) kullanılarak gerçekleştirilmiştir [54].



Şekil 7.1. 2 Alanlı - 4 Generatörlü güç sistemi [1].

Güç sistemi birbiri ile bağlantılı 2 adet benzer alandan oluşmaktadır. Her bir alanda 2 adet 900 MVA güce ve 20 kV gerilime sahip generatör bulunmaktadır. Bu generatörlerin nominal güç ve gerilim bazında p.u cinsinden parametre değerleri Çizelge 6.1'deki gibidir.

Çizelge 7.1. Generatör parametre değerleri.

$X_d = 1,8$	$X_q = 1,7$	$X_\ell = 0,2$	$X_d^1 = 0,3$	$X_q^1 = 0,55$
$X_d'' = 0,25$	$X_q'' = 0,25$	$R_a = 0,0025$	$T_{d0}' = 8,0s$	$T_{q0}' = 0,4s$
$T_{d0}'' = 0,03s$	$T_{q0}'' = 0,05s$	$A_{Sat} = 0,015$	$B_{Sat} = 9,6$	$\psi_{T1} = 0,9$
$H = 6,5$ (G1 ve G2 için)		$H = 6,175$ (G3 ve G4 için)		$K_D = 0$

1-5, 2-6, 3-11 ve 4-10 numaralı baralar arasında yükseltici transformatörler bulunmaktadır. Her bir transformatörün 900 MVA güç ve 20/230 kV gerilim bazında empedansı $0 + j0,15$ p.u'dur. Uzunlukları Şekil 5.1'de belirtilen iletim hatlarının nominal

gerilimi 230 kV'dur. 100 MVA güç ve 230 kV gerilim bazında hat parametreleri Çizelge 6.2'deki gibidir.

Çizelge 7.2. İletim hattı parametreleri.

$r = 0,0001$ p.u/km	$x_L = 0,001$ p.u/km	$b_C = 0,00175$ p.u/km
---------------------	----------------------	------------------------

Güç sistemi Alan 2'ye 400 MW aktif güç ileten Alan 1 ile çalışmakta ve generatörler Çizelge 6.3'deki gibi yüklenmektedir.

Çizelge 7.3. Generatör yüklenme değerleri.

G1	P = 700 MW	Q = 185 MVAr	$E_t = 1,03 \angle 20,2^\circ$
G2	P = 700 MW	Q = 235 MVAr	$E_t = 1,01 \angle 10,5^\circ$
G3	P = 719 MW	Q = 176 MVAr	$E_t = 1,03 \angle -6,8^\circ$
G4	P = 700 MW	Q = 202 MVAr	$E_t = 1,01 \angle -17,0^\circ$

7 ve 9 numaralı baralardaki yükler ve şönt kapasitörler tarafından sağlanan reaktif güç değerleri Çizelge 6.4'deki gibidir.

Çizelge 7.4. 7 ve 9 numaralı baralardaki yük ve reaktif güç değerleri.

Bara 7	$P_L = 967$ MW	$Q_L = 100$ MVAr	$Q_C = 200$ MVAr
Bara 9	$P_L = 1,767$ MW	$Q_L = 100$ MVAr	$Q_C = 350$ MVAr

Bu çalışmada özdeğer analizi yöntemiyle KUNDUR'un 2 Alanlı - 4 Generatörlü güç sistemi üzerinde küçük sinyal kararlılığı incelenmiştir. Öncelikli olarak güç sisteminde hiçbir denetleyicinin olmadığı durumda 8. Barada oluşan bir üç faz kısa devre arızası ile 8 ve 9 numaralı baralar arasındaki hattın kopması sonucu oluşan arızaların küçük sinyal kararlılığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Daha sonra bu arıza durumları sistemde mevcutken 7 ve 8 numaralı baralar arasına bir POD, 8 ile 9 numaralı baralar arasına ise bir UPFC eklenmiştir. UPFC-POD ikilisine ek olarak senkron generatörlerin her birine bağlı PSS, AVR ve TG'nin farklı modelleri üzerinde inceleme yapılmıştır. Dahası 7 numaralı baraya bağlı ÇBAG'nin küçük sinyal kararlılığı üzerindeki etkisi ile ÇBAG'ye

ilave olarak 4 numaralı baraya bağlı farklı güçlerdeki EDS'nin küçük sinyal kararlılığı üzerindeki etkisi incelenmiştir.



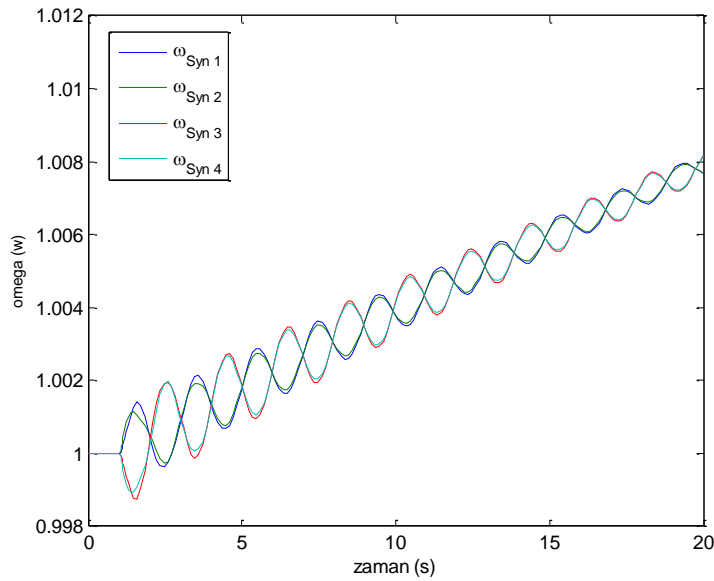
8. BENZETİM ÇALIŞMASI SONUÇLARI

KUNDUR'un 2 alanlı - 4 genaratörlü güç sistemi üzerinde yapılan çalışmanın ilk aşamasında 8. Barada 1. Saniyede oluşan üç faz kısa devre arızası ile 1,05. saniyede 8 ve 9 numaralı baralar arasındaki hattın kopması sonucu oluşan arızaların küçük sinyal kararlılığı üzerindeki etkileri özdeğer analizi yöntemiyle incelenmiş ve senkron generatörlerin geçici kararlılık analizleri yapılmıştır. Elde edilen özdeğerler, sönümlenme oranları, frekanslar ve salınım modları Çizelge 8.1'de belirtildiği gibidir.

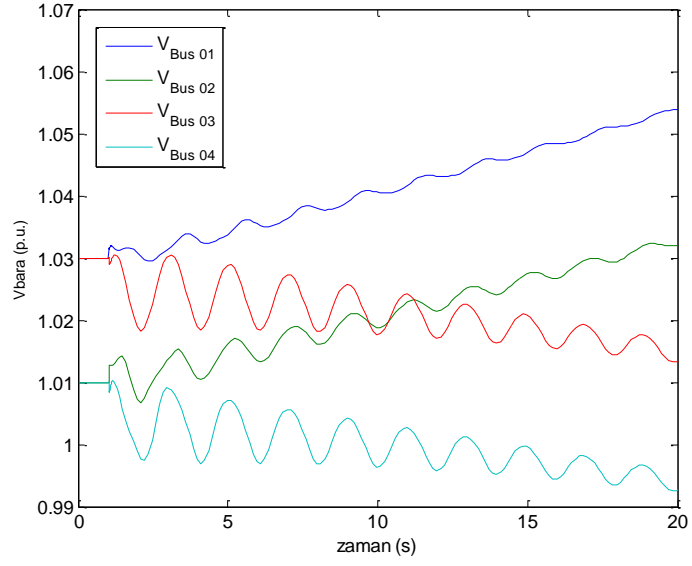
Çizelge 8.1. Sistemde herhangi bir denetleyicinin bulunmadığı durum.

Sistemde herhangi bir denetleyicinin olmadığı durum				
No	λ	ξ (%)	f	Salınım Modları
1	$-0,8013 \pm j7,2855$	10,93	1,1595	Yerel alan
2	$-0,7778 \pm j7,3015$	10,59	1,1621	Yerel alan
3	$-0,0688 \pm j3,2331$	02,13	0,5146	Bölgeler arası

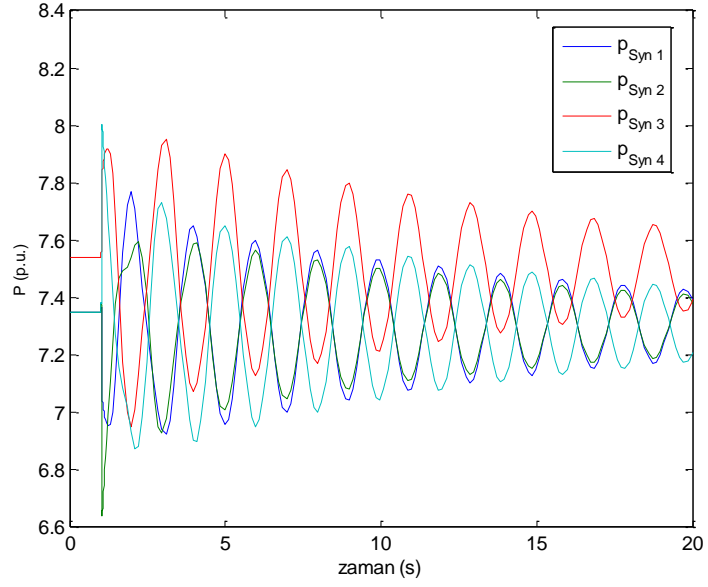
Senkron generatörlerin açısal hızları Şekil 7.1'de, bağlı oldukları bara gerilimleri Şekil 7.2'de, aktif güçleri Şekil 7.3'de ve reaktif güçleri Şekil 7.4'de gösterilmiştir.



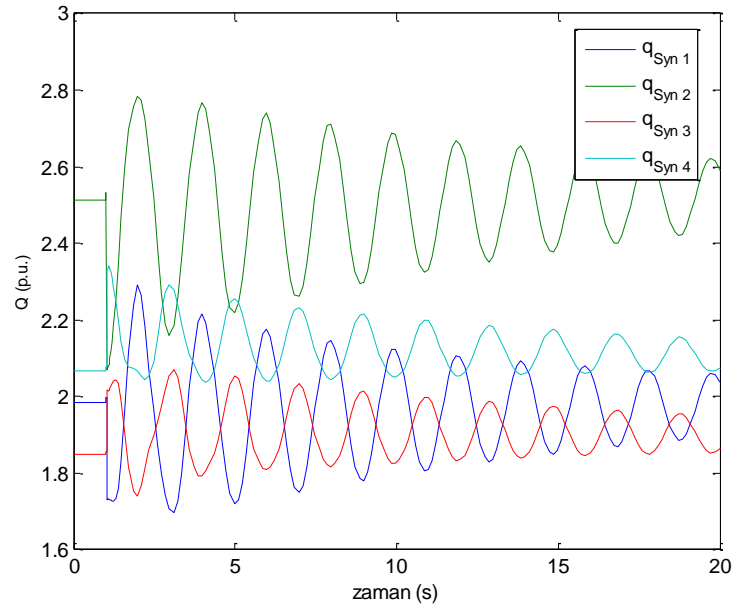
Şekil 8.1. Denetleyici olmadığı durum - Senkron generatör açısal hız değişimleri.



Şekil 8.2. Denetleyici olmadığı durum - Senkron generatör bara gerilimleri.



Şekil 8.3. Denetleyici olmadığı durum - Senkron generatör aktif güç değerleri.



Şekil 8.4. Denetleyici olmadığı durum - Senkron generatör reaktif güç değerleri.

Geçici kararlılık analizleri incelendiğinde sistemde 1. Saniyede oluşan üç faz kısa devre arızası ve 1,05. saniyede oluşan hat kopması arızasının sonucu olarak, 1. Saniyeden itibaren senkron generatör açılmalarda, bara gerilimlerinde, aktif ve reaktif güçlerinde düzensiz salınımlar gözlemlenmiştir.

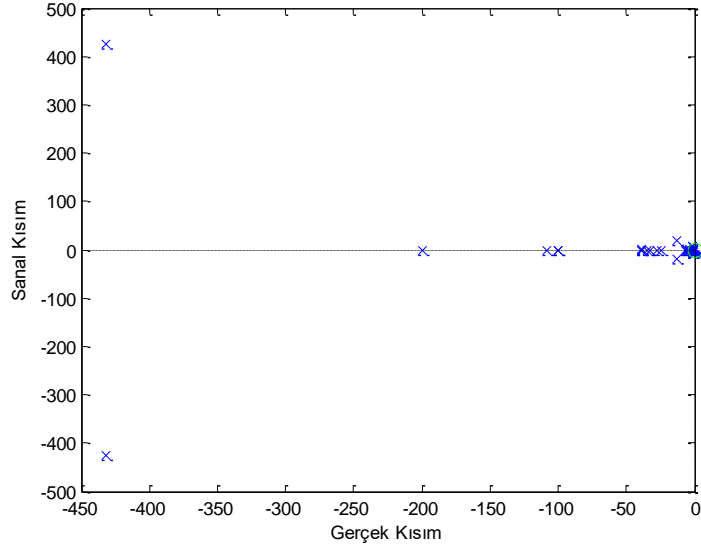
8.1. PSS, AVR VE TG'NİN KÜÇÜK SİNYAL KARARLILIĞINA ETKİSİ

İkinci olarak güç sistemine eklenen 100 MVA gücündeki UPFC'nin POD ile birlikte kullanılma durumunda; Senkron generatörlere bağlanan PSS, AVR ve TG denetleyicilerinden AVR 1. Çalışma modelinde, TG 2. Çalışma modelinde çalışırken PSS'nin 1. 2. ve 3. Çalışma modelleri incelenmiştir. PSS Tip-1'in kullanıldığı durumda elde edilen özdeğerler, sönümleme oranları, frekanslar ve salınım modları Çizelge 8.2'de belirtildiği gibidir.

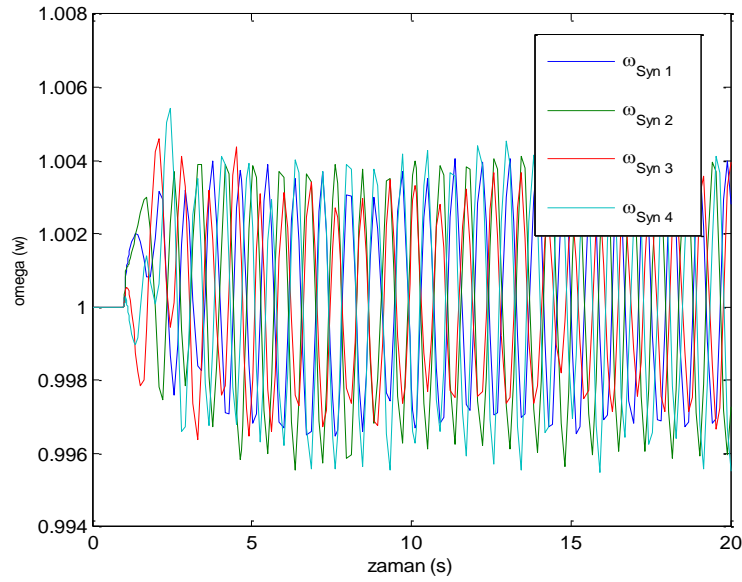
Çizelge 8.2. PSS Tip-1'in kullanıldığı durum.

PSS Tip-1				
No	λ	ξ (%)	f	Salınım Modları
1	-2,0039±j6,4784	29,55	1,0311	Yerel alan
2	-1,3168±j6,5725	19,64	1,0460	Yerel alan
3	-3,6173±j0,6393	98,47	0,1018	Bölgeler arası
4	-0,2625±j0,6107	39,49	0,1000	Bölgeler arası
5	-0,3388±j3,5477	09,51	0,5646	Bölgeler arası

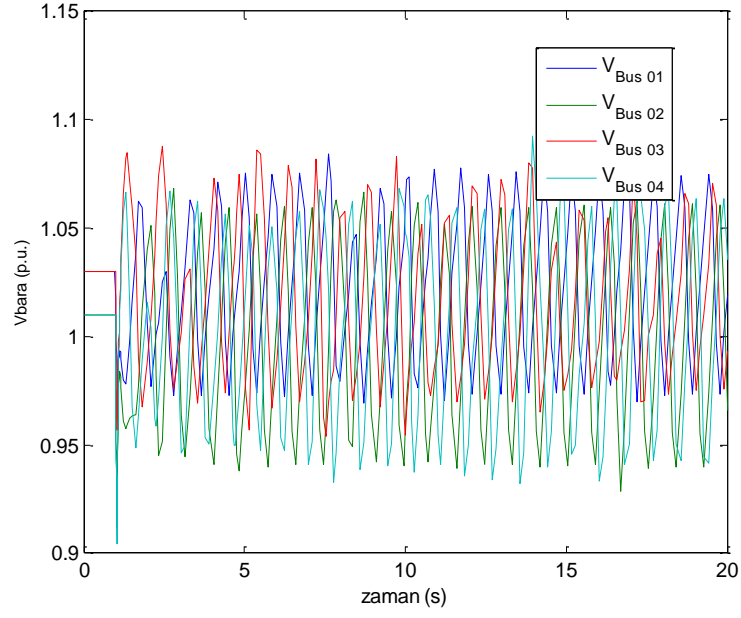
PSS Tip-1'in kullanıldığı durumda elde edilen özdeğer analizi sonuçları denetleyici olmadığı duruma göre küçük sinyal kararlılığı açısından daha iyi sonuç vermektedir. PSS Tip-1'in kullanıldığı durumda özdeğerler grafiği Şekil 8.5'de, senkron generatörlerin açısal hızları Şekil 8.6'da, bağlı oldukları bara gerilimleri Şekil 8.7'de, aktif güçleri Şekil 8.8'de ve reaktif güçleri Şekil 8.9'da gösterilmiştir.



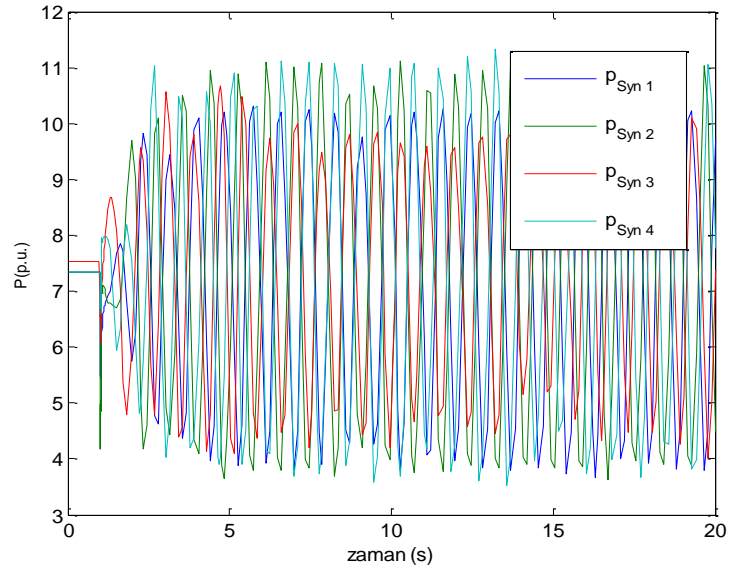
Şekil 8.5. PSS Tip-1 - Özdeğerler grafiği.



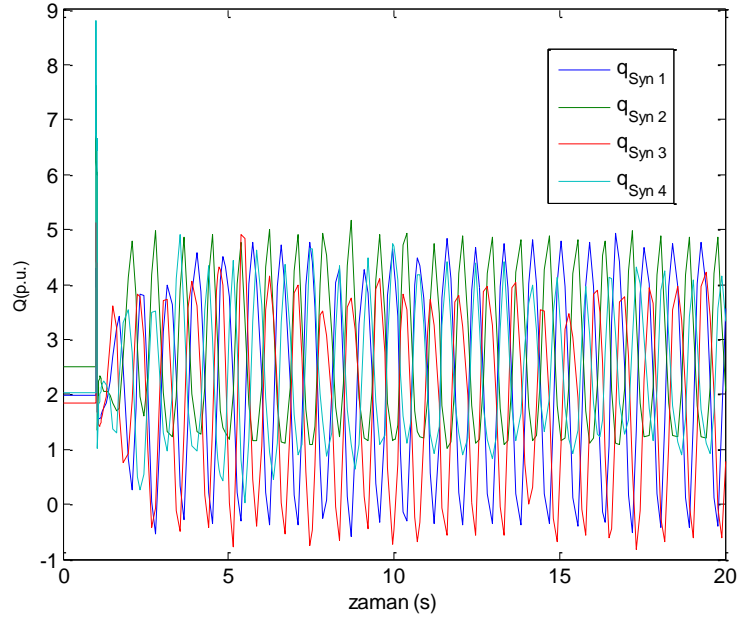
Şekil 8.6. PSS Tip-1 - Senkron generatör açısal hız değişimleri.



Şekil 8.7. PSS Tip-1 - Senkron generatör bara gerilimleri.



Şekil 8.8. PSS Tip-1 - Senkron generatör aktif güç değerleri.



Şekil 8.9. PSS Tip-1 - Senkron generatör reaktif güç değerleri.

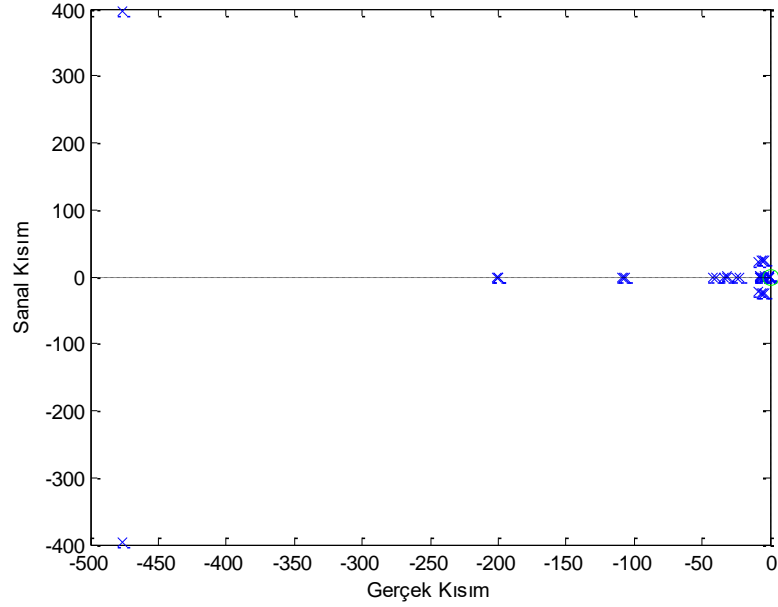
Geçici kararlılık analizi incelendiğinde; Sistem 1. Saniyeden itibaren (üç faz kısa devre arızasının olduğu saniye) salınımlara maruz kalmaktadır. Bu salınımlar; senkron generatör açısal hızları için 1,005 ile 0,995 p.u. arasında, senkron generatör bara gerilimleri için 1,08 ile 0,94 p.u. arasında, senkron generatör aktif güç değerleri için 11 ile 3,5 p.u. arasında, senkron generatör reaktif güç değerleri için 5 ile -0,5 p.u. arasında oluşmaktadır. Salınımların sıklığı ve sönümlenmemesi göz önüne alındığında PSS Tip-1'in etkili bir sonuç vermediği gözükmemektedir. PSS Tip-2'nin kullanıldığı durumda elde edilen özdeğerler, sönümlenme oranları, frekanslar ve salınım modları Çizelge 8.3'de belirtildiği gibidir.

Çizelge 8.3. PSS Tip-2'nin kullanıldığı durum.

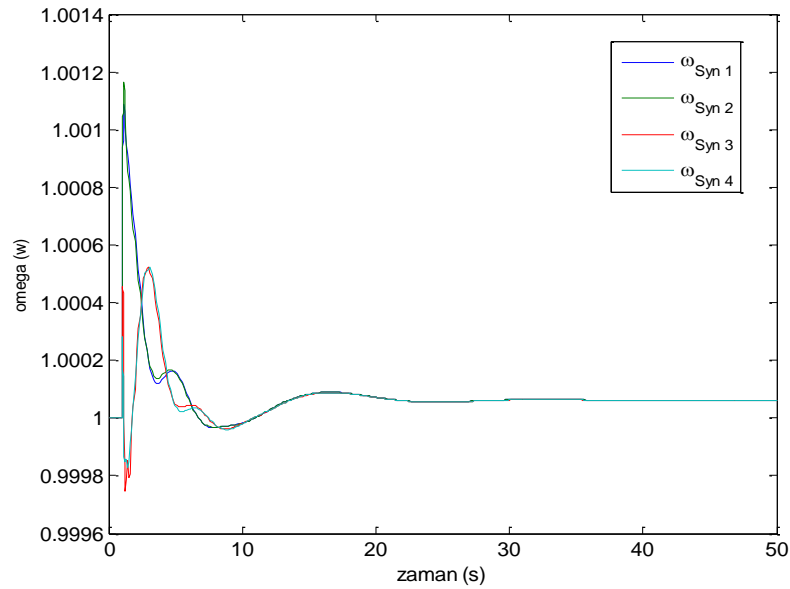
PSS Tip-2				
No	λ	ξ (%)	f	Salınım Modları
1	-7,8582±j2,0070	96,89	0,3194	Bölgeler arası
2	-7,9725±j1,9122	97,24	0,3043	Bölgeler arası
3	-3,7460±j0,6364	98,59	0,1013	Bölgeler arası
4	-0,5928±j1,6417	33,96	0,2613	Bölgeler arası
5	-0,9960±j1,5126	55,00	0,2407	Bölgeler arası

Elde edilen özdeğer analizi sonuçlarına göre UPFC-POD ile birlikte AVR Tip-1, TG Tip-2, PSS Tip-2'nin kullanıldığı durumda kararlılık sınırlarının arttığı gözlemlenmiştir. PSS Tip-2'nin kullanıldığı durumda elde edilen özdeğer analizi sonuçları güç sisteminde

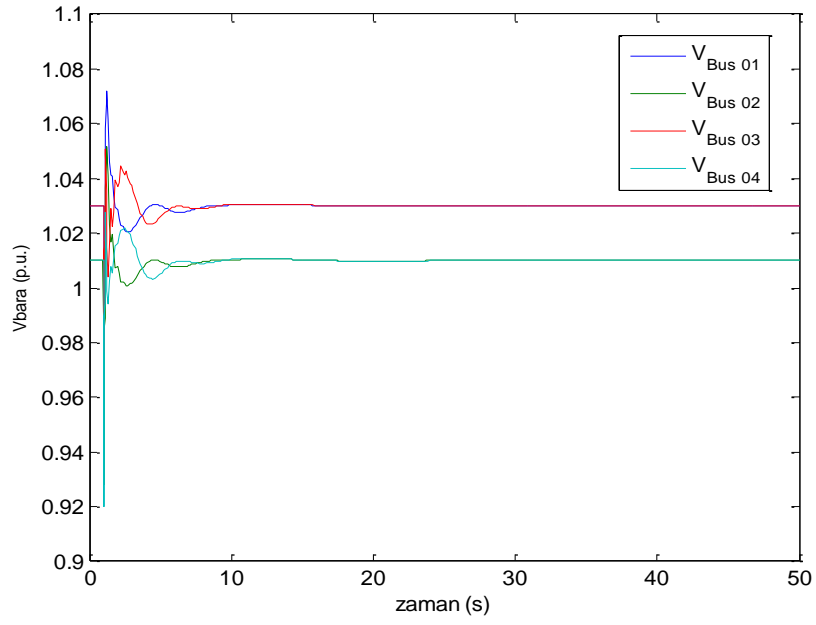
denetleyicinin bulunmadığı ve PSS Tip-1'in kullanıldığı duruma göre daha iyi gözükmetedir. PSS Tip-2'nin kullanıldığı durumda elde edilen özdeğerler grafiği Şekil 8.10'da, senkron generatörlerin açısai hızları Şekil 8.11'de, bağılı oldukları bara gerilimleri Şekil 8.12'de, aktif güçleri Şekil 8.13'de ve reaktif güçleri Şekil 8.14'de gösterilmiştir.



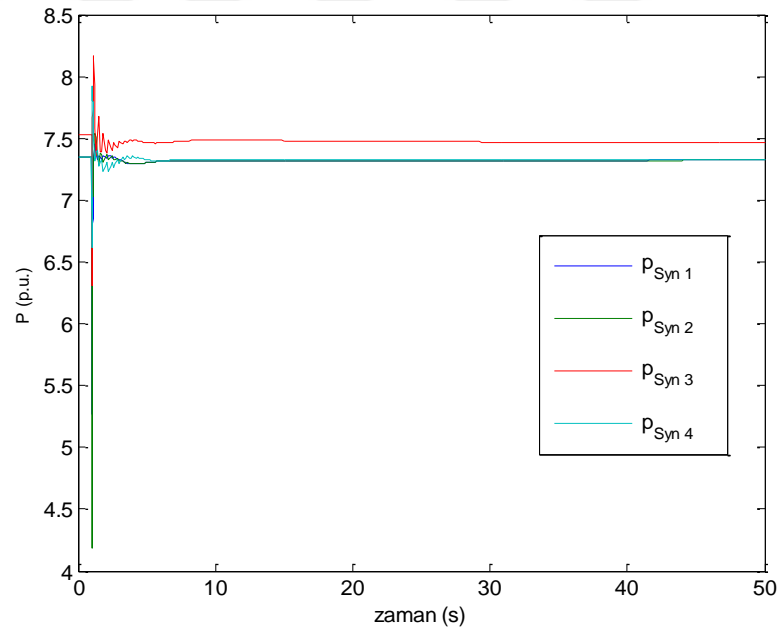
Şekil 8.10. PSS Tip-2 - Özdeğerler grafiği.



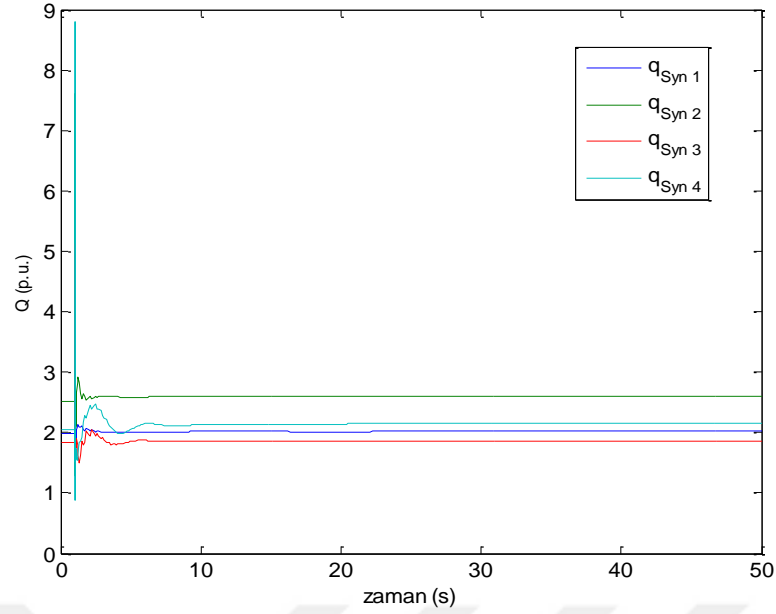
Şekil 8.11. PSS Tip-2 - Senkron generatör açısai hız değişimleri.



Şekil 8.12. PSS Tip-2 - Senkron generatör bara gerilimleri.



Şekil 8.13. PSS Tip-2 - Senkron generatör aktif güç değerleri.



Şekil 8.14. PSS Tip-2 - Senkron generatör reaktif güç değerleri.

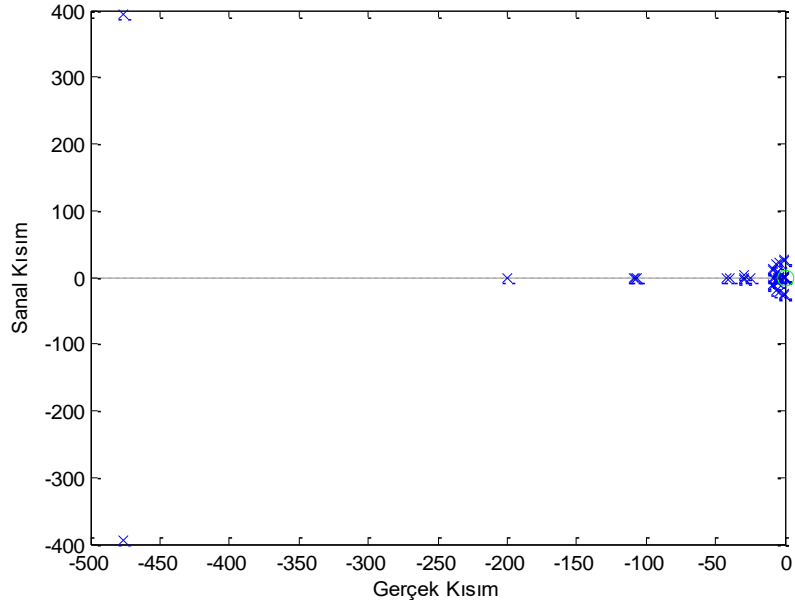
Geçici kararlılık analizi sonuçlarına göre PSS Tip-2'nin kullanıldığı durumda senkron generatör açısız hızlarında sistem üzerindeki arızaların oluşmaya başladığı 1. Saniyeden itibaren salınımlar başlamış ve 17. Saniyede bu salınımlar sönümlenmiştir. Senkron generatörlerin bağlı olduğu bara gerilimleri üzerinde oluşan salınımlar 10. Saniyede, senkron generatörlerin aktif güçleri üzerindeki salınımlar 10. saniyede ve senkron generatörlerin reaktif güçleri üzerindeki salınımlar ise 8. Saniyede sönümlenmiştir. PSS Tip-3'ün kullanıldığı durumda elde edilen özdeğerler, sönümlenme oranları, frekanslar ve salınım modları Çizelge 8.4'de belirtildiği gibidir.

Çizelge 8.4. PSS Tip-3'ün kullanıldığı durum.

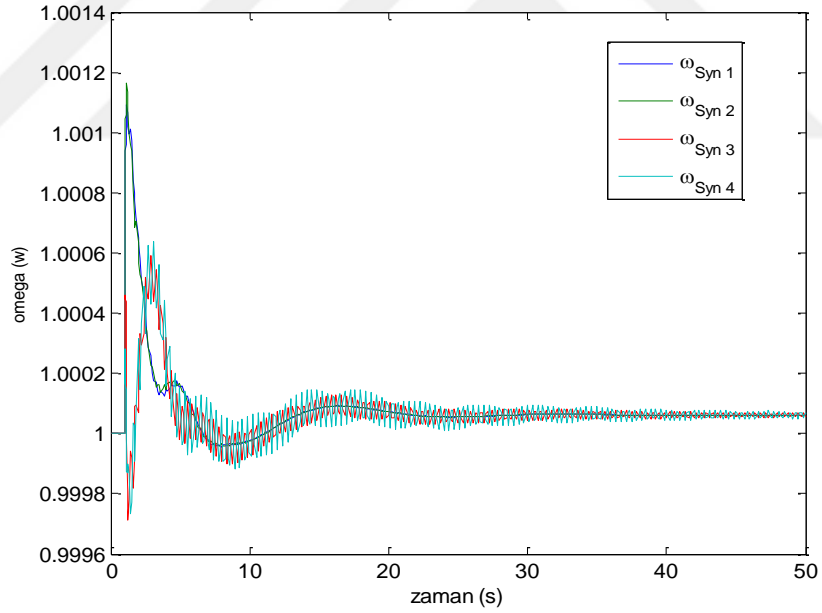
PSS Tip-3				
No	λ	ξ (%)	f	Salınım Modları
1	-5,1995±j7,9678	54,65	1,2681	Yerel alan
2	-5,1526±j8,0946	53,70	1,2883	Yerel alan
3	-3,7001±j0,6570	98,46	0,1046	Bölgeler arası
4	-0,6067±j1,6454	34,59	0,2619	Bölgeler arası
5	-1,0094±j1,4969	55,91	0,2382	Bölgeler arası

Özdeğer analizi sonuçlarına göre; PSS Tip-3'ün, UPFC-POD, AVR Tip-1 ve TG Tip-2 ile kullanıldığı durumda, küçük sinyal kararlılığı açısından PSS Tip-2'ye göre daha kötü, Tip-1'e ve sistemde herhangi bir denetleyici bulunmadığı duruma göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. PSS Tip-3'ün kullanıldığı durumda elde edilen özdeğerler grafiği Şekil 8.15'de, senkron generatörlerin açısız hızları Şekil 8.16'da, bağlı oldukları

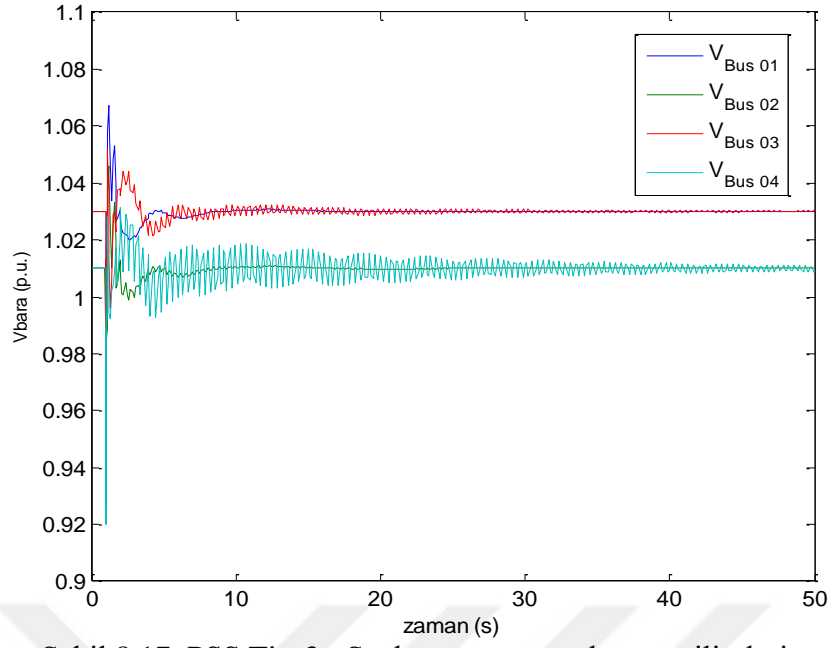
bara gerilimleri Şekil 8.17’de, aktif güçleri Şekil 8.18’de ve reaktif güçleri Şekil 8.19’da gösterilmiştir.



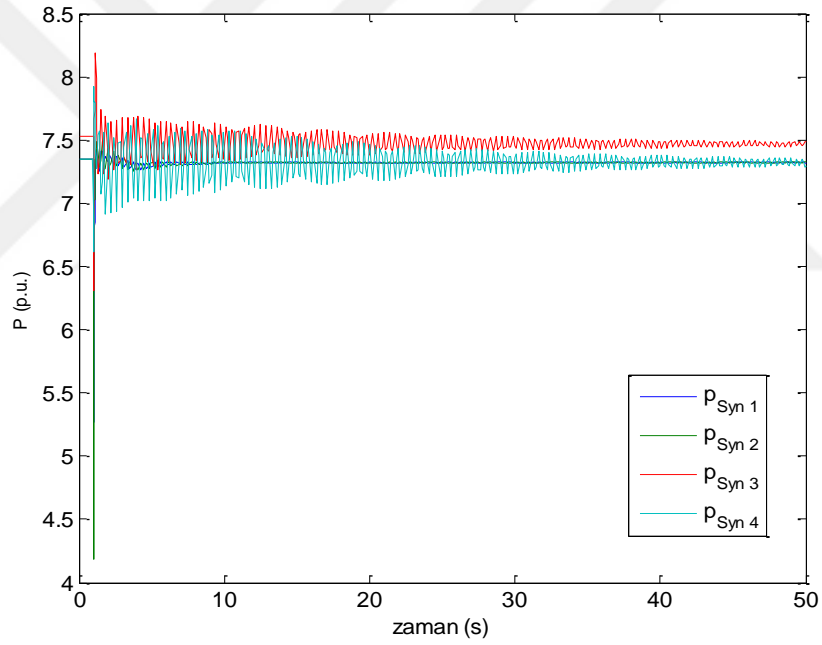
Şekil 8.15. PSS Tip-3 - Özdeğerler grafiği.



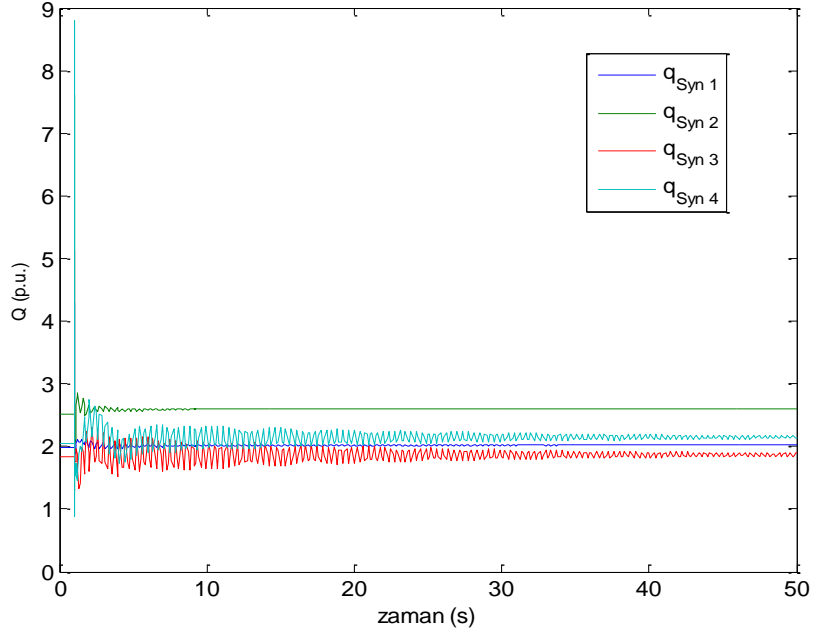
Şekil 8.16. PSS Tip-3 - Senkron generatör açısız hız değişimleri.



Şekil 8.17. PSS Tip-3 - Senkron generatör bara gerilimleri.



Şekil 8.18. PSS Tip-3 - Senkron generatör aktif güç değerleri.



Şekil 8.19. PSS Tip-3 - Senkron generatör reaktif güç değerleri.

Geçici kararlılık analizi sonuçlarına göre PSS Tip-3'ün kullanıldığı durumda senkron generatör açılma hızlarında, bara gerilimlerinde, aktif ve reaktif güç değerlerinde sistem üzerindeki arızaların oluşmaya başladığı 1. Saniyeden itibaren salınımlar başlamış ve bu salınımlar azalarak devam etmiştir. PSS Tip-3'ün kullanıldığı durumda sistemde arızalardan kaynaklı oluşan salınımlar çalışma süresi içerisinde tamamen söndürülememiştir.

PSS'nin çeşitli tiplerinin incelendiği sonuçlara göre; en iyi sonuç elde edilen modelin Tip-2 olduğu, en kötü sonucun elde edildiği modelin ise Tip-1 olduğu gözükmemektedir.

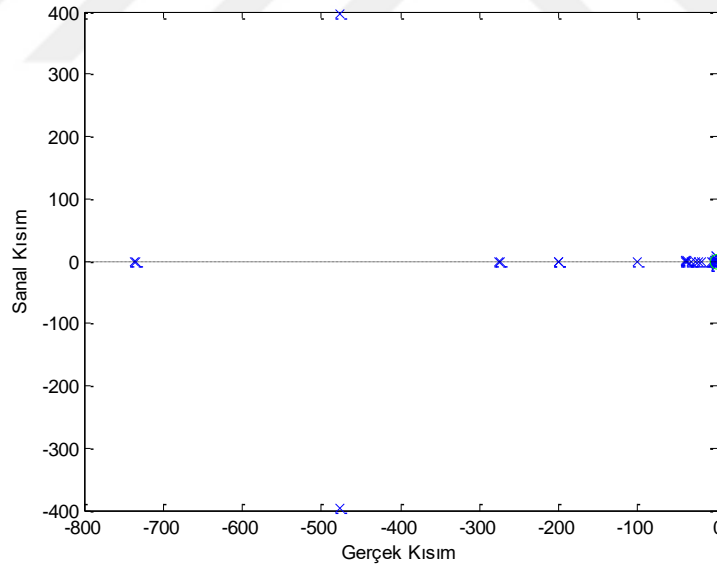
Üçüncü olarak güç sistemine eklenen 100 MVA gücündeki UPFC'nin POD ile birlikte kullanılma durumunda; Senkron generatörlere bağlanan PSS, AVR ve TG denetleyicilerinden PSS'nin Tip-2'de, TG'nin Tip-2'de çalıştığı durumda AVR'nin Tip-1, Tip-2 ve Tip-3 modelleri incelenmiştir. AVR Tip-1'de çalışırken, ikinci analizde PSS Tip-2'nin kullanıldığı durumdaki koşullar altında çalışmış olacağından ötürü elde edilen özdeğerler, sönümlenme oranları, frekanslar ve salınım modları Çizelge 8.3'de belirtildiği gibi olacaktır. Aynı nedenden ötürü AVR Tip-1'in kullanıldığı durumda elde edilen özdeğerler grafiği Şekil 8.10'da, senkron generatörlerin açılma hızları Şekil 8.11'de, bağlı oldukları bara gerilimleri Şekil 8.12'de, aktif güçleri Şekil 8.13'de ve reaktif güçleri Şekil 8.14'de gösterildiği gibi olacaktır.

AVR Tip-2'nin kullanıldığı durumda elde edilen özdeğerler, sönümleme oranları, frekanslar ve salınım modları Çizelge 8.5'de belirtildiği gibidir.

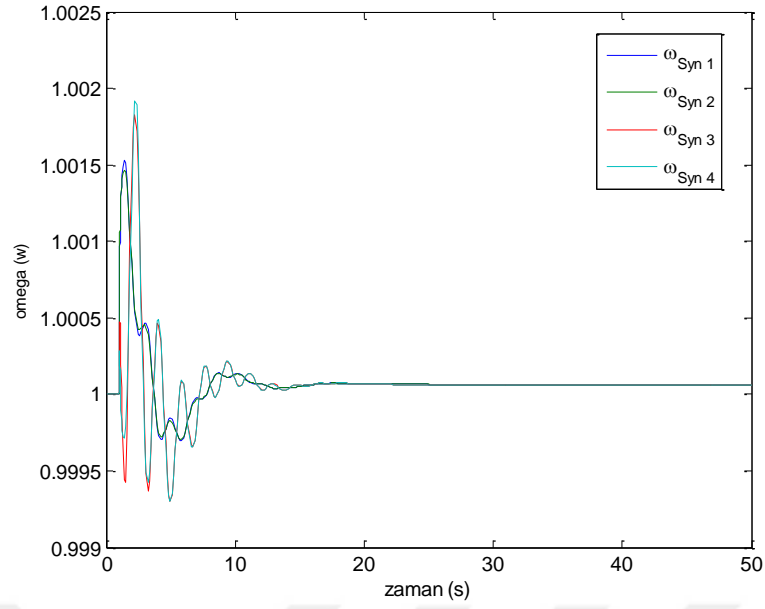
Çizelge 8.5. AVR Tip-2'nin kullanıldığı durum.

AVR Tip-2				
No	λ	ξ (%)	f	Salınım Modları
1	$-0,9968 \pm j7,2467$	13,63	1,1533	Yerel alan
2	$-1,1224 \pm j7,5194$	14,76	1,1967	Yerel alan
3	$-3,6298 \pm j0,7149$	98,11	0,1138	Bölgeler arası
4	$-0,3829 \pm j3,6105$	10,55	0,5746	Bölgeler arası
5	$-0,3228 \pm j0,7384$	40,05	0,1175	Bölgeler arası

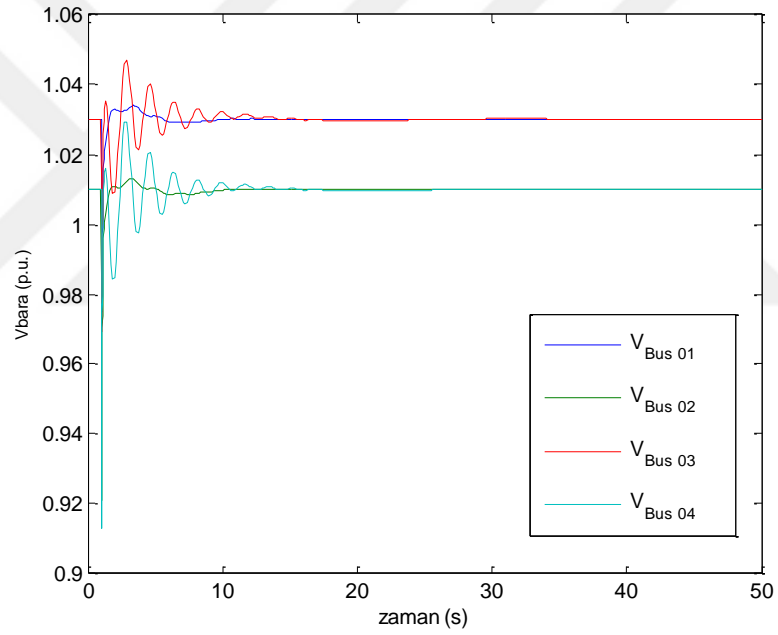
Elde edilen özdeğer analizi sonuçlarına göre; AVR Tip-2'nin kullanıldığı durumda 1. Çalışma modeline göre küçük sinyal kararlılığı açısından daha kötü sonuç verdiği gözükmektedir. AVR Tip-2'nin kullanıldığı durumda elde edilen özdeğerler grafiği Şekil 8.20'de, senkron generatörlerin açılmal hızları Şekil 8.21'de, bağlı oldukları bara gerilimleri Şekil 8.22'de, aktif güçleri Şekil 8.23'de ve reaktif güçleri Şekil 8.24'de gösterilmiştir.



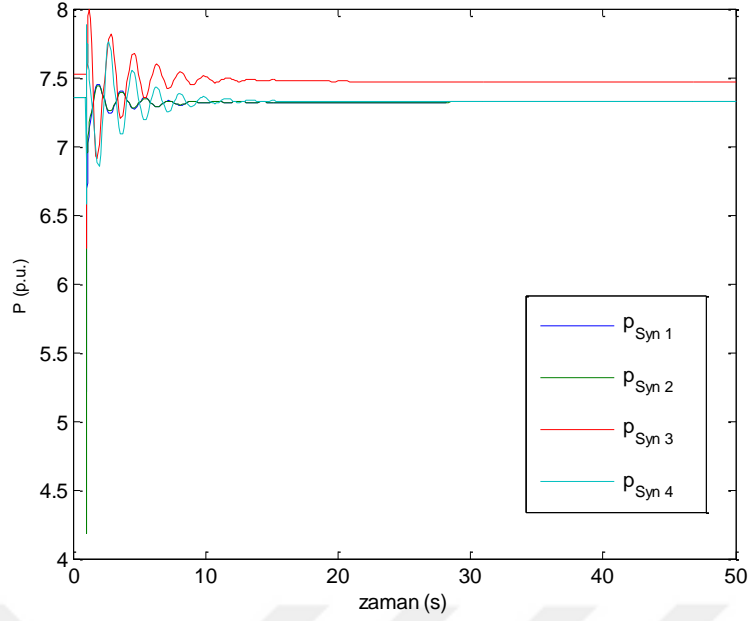
Şekil 8.20. AVR Tip-2 - Özdeğerler grafiği.



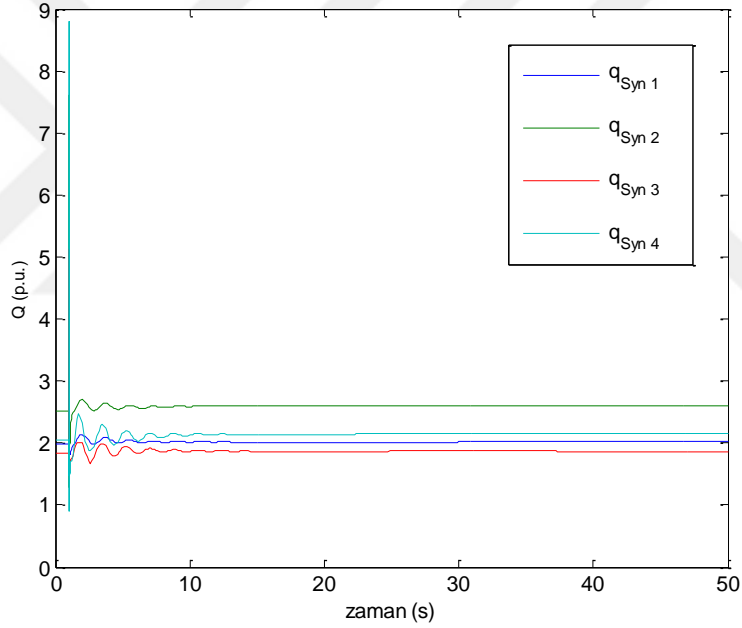
Şekil 8.21. AVR Tip-2 - Senkron generatör açısal hız değişimleri.



Şekil 8.22. AVR Tip-2 - Senkron generatör bara gerilimleri.



Şekil 8.23. AVR Tip-2 - Senkron generatör aktif güç değerleri.



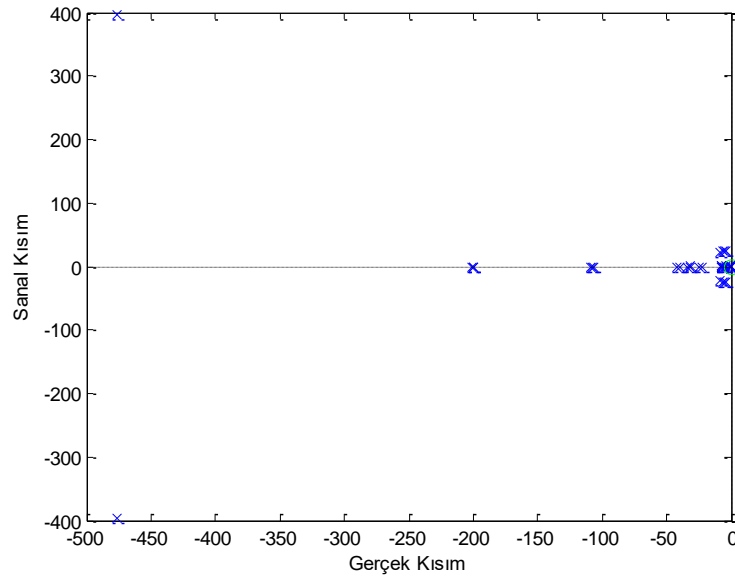
Şekil 8.24. AVR Tip-2 - Senkron generatör reaktif güç değerleri.

Geçici kararlılık analizi sonuçlarına göre AVR Tip-2'nin kullanıldığı durumda senkron generatör açılmal hızlarında sistem üzerinde arıza oluşumu ile başlayan salınımlar azalarak devam etmiş ve 17. Saniyede bu salınımlar sönümlenmiştir. Senkron generatörlerin bağlı olduğu bara gerilimleri üzerinde oluşan salınımlar 16. Saniyede, senkron generatörlerin aktif güçleri üzerindeki salınımlar 14. saniyede ve senkron generatörlerin reaktif güçleri üzerindeki salınımlar 14. Saniyede sönümlenmiştir. AVR Tip-3'ün kullanıldığı durumda elde edilen özdeğerler, sönümleme oranları, frekanslar ve salınım modları Çizelge 8.6'da belirtildiği gibidir.

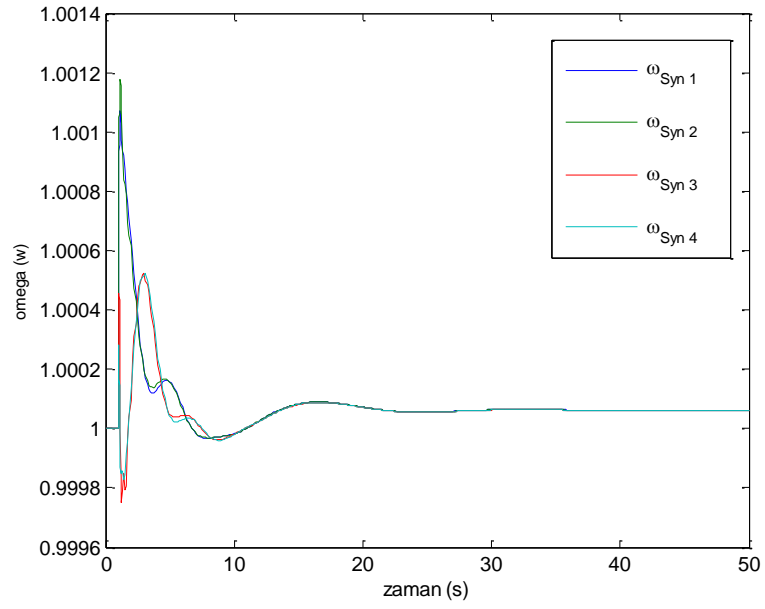
Çizelge 8.6. AVR Tip-3'ün kullanıldığı durum.

AVR Tip-3				
No	λ	ξ (%)	f	Salınım Modları
1	-7,8657±j1,9944	96,90	0,3174	Bölgeler arası
2	-7,9791±j1,8998	97,28	0,3024	Yerel alan
3	-3,7426±j0,6382	98,58	0,1016	Bölgeler arası
4	-0,5905±j1,5090	36,44	0,2402	Bölgeler arası
5	-0,9888±j1,4856	55,46	0,2364	Bölgeler arası

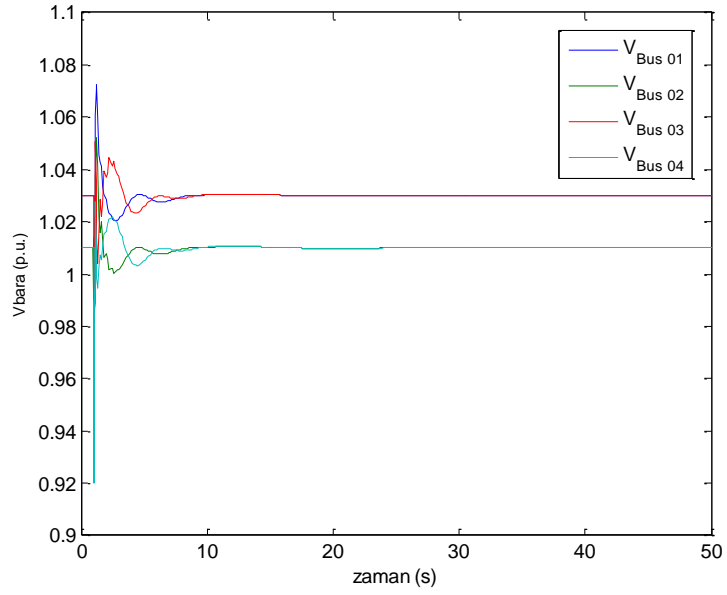
AVR'nin farklı modellerinin kullanılması ile yapılan özdeğer analizi sonuçlarına göre; AVR tipleri içerisinde küçük sinyal kararlılığı açısından en kötü sonuç Tip-2'nin kullanıldığında elde edilmiştir. 1. ve 3. tiplerin ise iyi sonuçlar verdiği gözükmektedir. AVR Tip-3'ün kullanıldığı durumda elde edilen özdeğerler grafiği Şekil 8.25'de, senkron generatörlerin açısal hızları Şekil 8.26'da, bağlı oldukları bara gerilimleri Şekil 8.27'de, aktif güçleri Şekil 8.28'de ve reaktif güçleri Şekil 8.29'de gösterilmiştir.



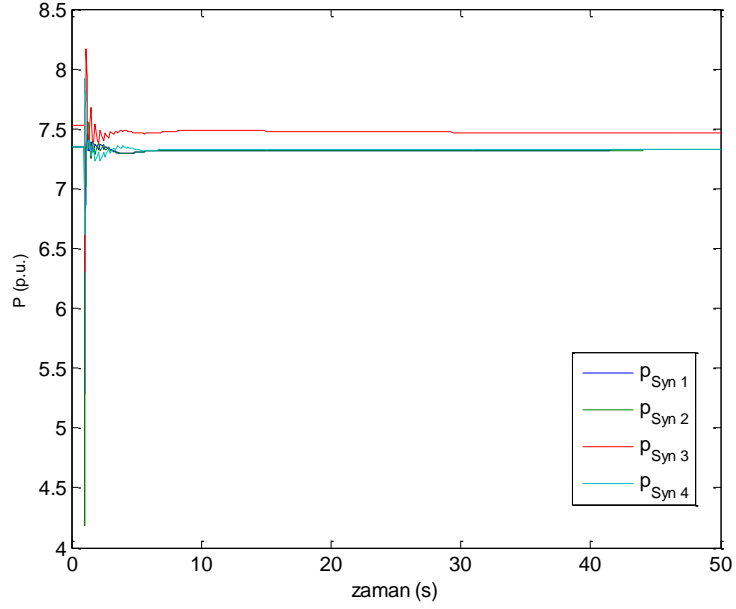
Şekil 8.25. AVR Tip-3 - Özdeğerler grafiği.



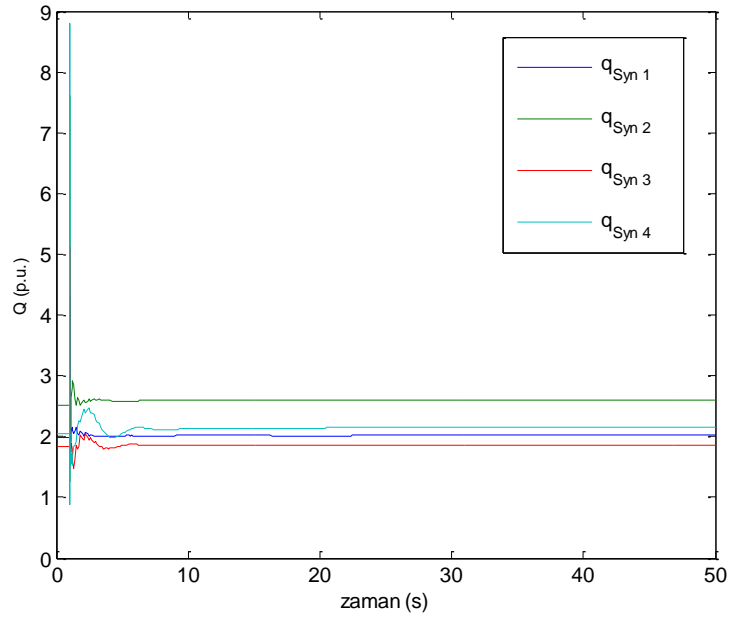
Şekil 8.26. AVR Tip-3 - Senkron generatör açısal hız değişimleri.



Şekil 8.27. AVR Tip-3 - Senkron generatör bara gerilimleri.



Şekil 8.28. AVR Tip-3 - Senkron generatör aktif güç değerleri.



Şekil 8.29. AVR Tip-3 - Senkron generatör reaktif güç değerleri.

Geçici kararlılık analizine göre, AVR Tip-3'ün kullanıldığı durumda Tip-1'in kullanıldığı durumda olduğu gibi iyi sonuçlar elde edildiği gözükmemektedir.

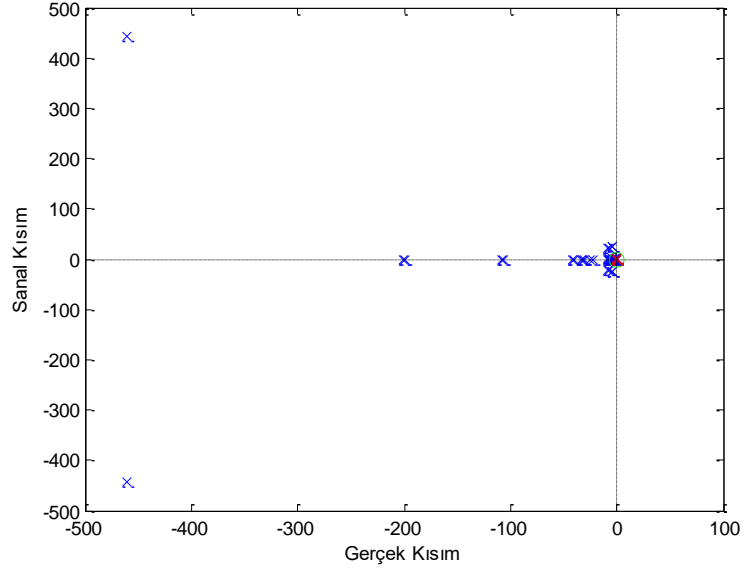
Dördüncü olarak güç sistemine eklenen 100 MVA gücündeki UPFC'nin POD ile birlikte kullanılma durumunda; Senkron generatörlere bağlanan PSS, AVR ve TG denetleyicilerinden PSS'nin Tip-2'de, AVR'nin Tip-1'de kullanıldığı durumda TG Tip-1 ve Tip-2 incelenmiştir. TG'nin Tip-1'de kullanıldığı durumda PSS'nin Tip-2'de

kullanıldığı durumdaki koşullar altında çalışmış olacağı için elde edilen özdeğerler, sönümlenme oranları, frekanslar ve salınım modları Çizelge 8.3'te belirtildiği gibi olacaktır. Aynı durum geçici kararlılık analizi için de geçerli olacağından TG Tip-2'nin kullanıldığı durumda elde edilen özdeğerler grafiği Şekil 8.10'da, senkron generatörlerin açısal hızları Şekil 8.11'de, bağlı oldukları bara gerilimleri Şekil 8.12'de, aktif güçleri Şekil 8.13'de ve reaktif güçleri Şekil 8.14'de gösterildiği gibi olacaktır. TG Tip-1'in kullanıldığı durumda elde edilen özdeğerler, sönümlenme oranları, frekanslar ve salınım modları Çizelge 8.7'de belirtildiği gibidir.

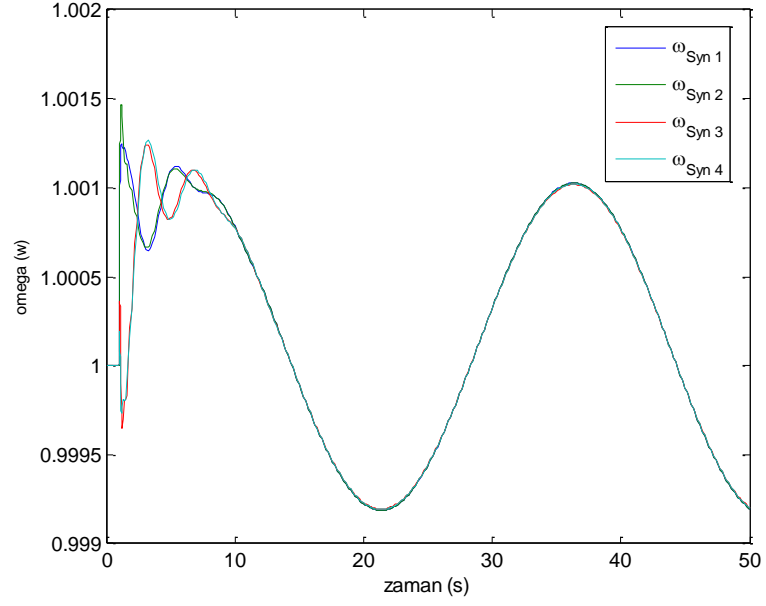
Çizelge 8.7. TG Tip-1'in kullanıldığı durum.

TG Tip-1				
No	λ	ξ (%)	f	Salınım Modları
1	-7,8184±j2,0191	96,82	0,3214	Bölgeler arası
2	-7,9214±j1,9303	97,19	0,3072	Bölgeler arası
3	-3,7284±j0,5461	98,94	0,1000	Bölgeler arası
4	-0,4537±j1,6458	26,58	0,2619	Bölgeler arası
5	-0,9367±j1,5224	52,40	0,2423	Bölgeler arası

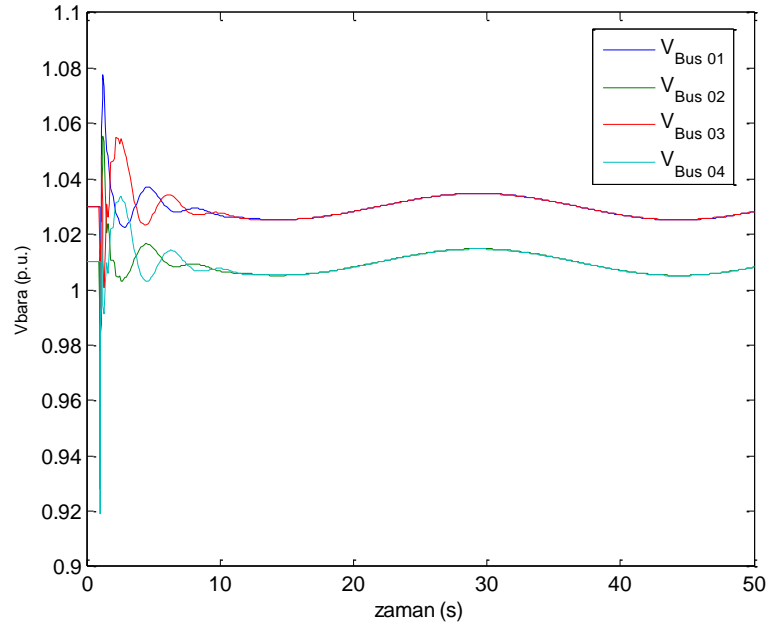
TG'nin iki farklı modellerinin kullanılması ile yapılan özdeğer analizi sonuçları incelendiğinde küçük sinyal kararlılığı açısından en iyi sonucun Tip-2'nin kullanıldığı durumda elde edildiği gözükmemektedir. TG Tip-1 kullanılırken elde edilen özdeğerler grafiği Şekil 8.30'da, senkron generatörlerin açısal hızları Şekil 8.31'de, bağlı oldukları bara gerilimleri Şekil 8.32'de, aktif güçleri Şekil 8.33'de ve reaktif güçleri Şekil 8.34'de gösterilmiştir.



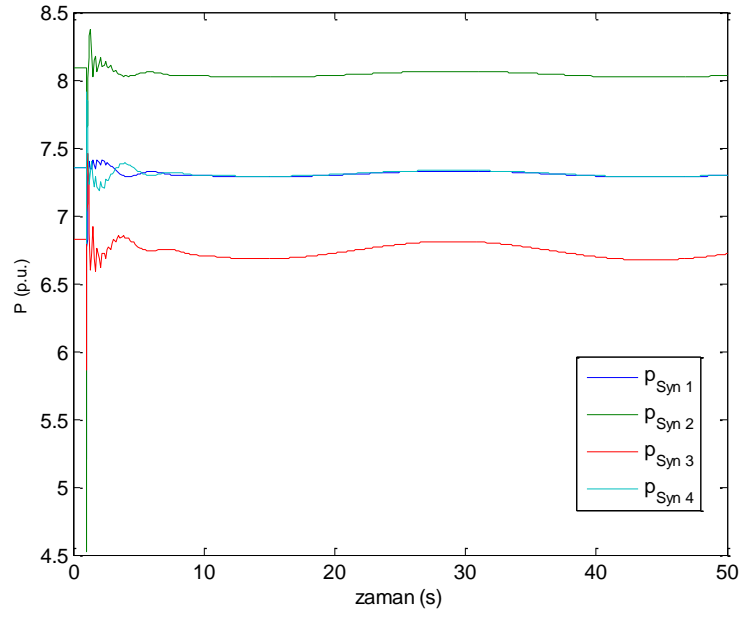
Şekil 8.30. TG Tip-1 - Özdeğerler grafiği.



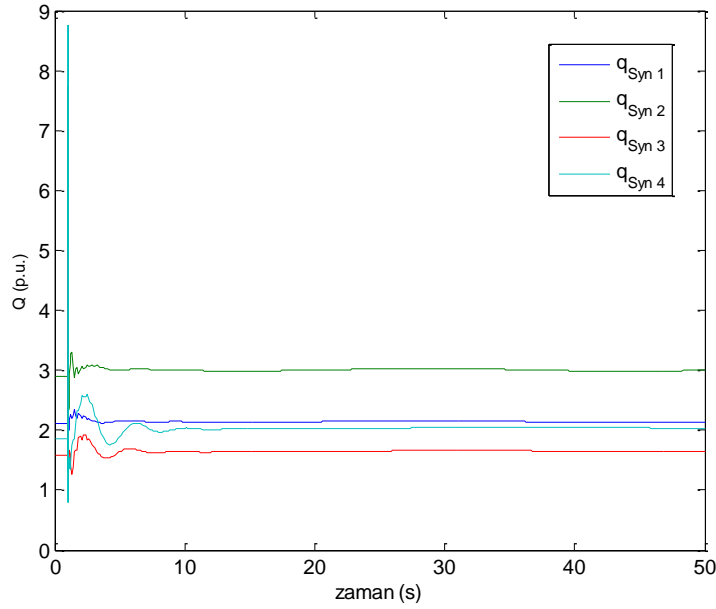
Şekil 8.31. TG Tip-1 - Senkron generatör açısal hız değişimleri.



Şekil 8.32. TG Tip-1 - Senkron generatör bara gerilimleri.



Şekil 8.33. TG Tip-1 - Senkron generatör aktif güç değerleri.



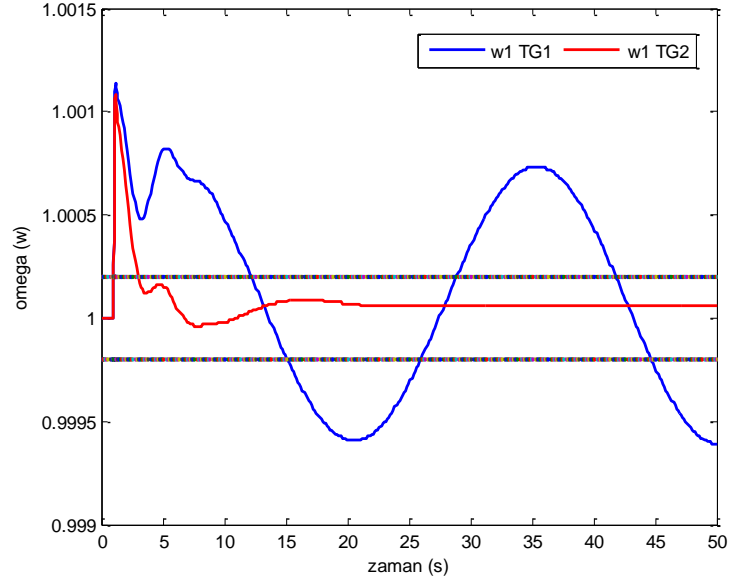
Şekil 8.34. TG Tip-1 - Senkron generatör reaktif güç değerleri.

Geçici kararlılık analizi sonuçlarına göre TG Tip-1'in kullanıldığı durumda sistem üzerinde arıza oluşumu ile başlayan salınımlar sönümlenememiştir. Tip-2'de ise bu durumun aksine salınımların sönümlendiği gözlemlenmiştir. Dolayısıyla TG Tip-2'nin TG Tip-1'e göre daha iyi sonuç verdiği kanaatine varılmıştır.

8.1.1. PSS Tip-2, AVR Tip-1 ve Farklı TG Tiplerinin Birinci Senkron Generatör Üzerindeki Etkisi

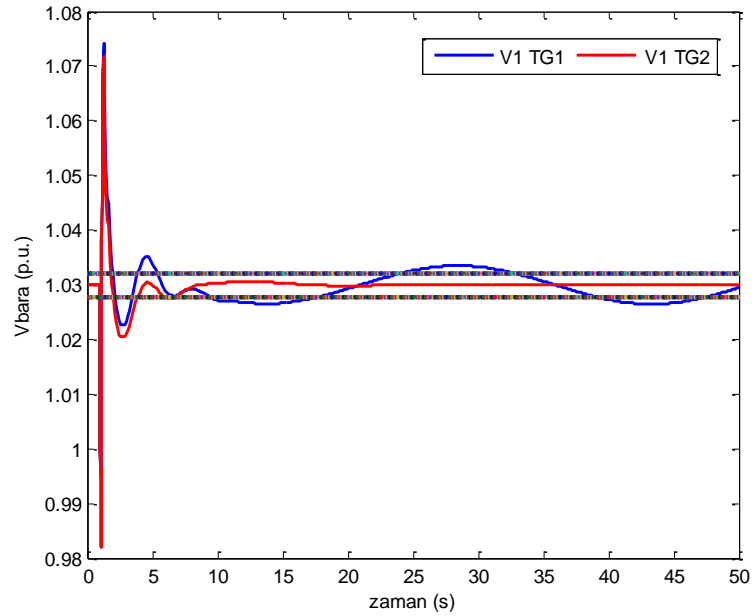
Farklı TG tiplerinin kullanılması ile elde edilen geçici kararlılık analizlerinden yararlanılarak birinci senkron generatörün açısal hızı, bara gerilimi, aktif ve reaktif gücünün aldığı en yüksek değer, en düşük değer, oturma zamanı ve toplam hata değeri gözlemlenmiştir. Gözlem sonuçları çizelgeler ile ifade edilmiştir. Çizelgelerde belirtilen toplam hata değeri $\sum |X_{\delta} - X_g|$ ile hesaplanmıştır. Burada; X_{δ} , sistemde meydana gelen bozunumlar sonucunda denetleyiciler ile birlikte elde edilen değerleri, X_g , bozunumlar öncesindeki senkron generatör değerini ifade etmektedir.

TG Tip-1'in ve TG Tip-2'nin kullanıldığı durumda birinci senkron generatörün açısal hız değişimi Şekil 8.35'de, bara gerilim değişimi Şekil 8.36'da, aktif güç değişimi Şekil 8.37'de, reaktif güç değişimi Şekil 8.38'de, bu değişimler ile ilgili gözlemler ise çizelge 8.8'de gösterilmiştir.



Şekil 8.35. Farklı TG tipleri ile birinci senkron generatör açısız hız değışimi.

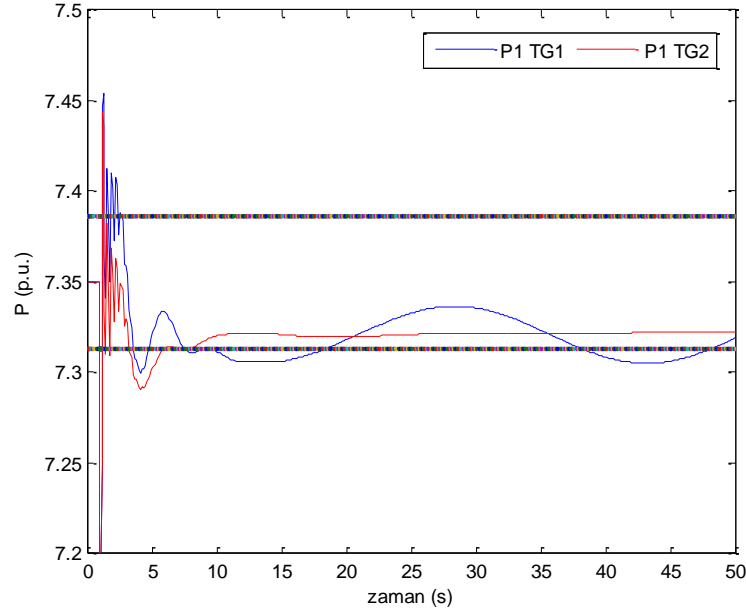
PSS Tip-2 ve AVR Tip-1 ile birlikte TG Tip-1'in kullanıldığı durumda birinci senkron generatörün açısız hızı en yüksek 1,0011 değeri en düşük 0,9994 değeri ulaşmıştır. 1,0002 ile 0,9998 arasında yerleşemediği için oturma zamanı hesaplanamamıştır. Toplam hata ise 0,1952 olarak bulunmuştur. TG Tip-2'nin kullanıldığı durumda ise açısız hızın en yüksek değeri bir değışiklik olmamış, en düşük değeri 1,0000'a ulaşmıştır. Dahası 1,0002 ile 0,9998 değeri arasında 2,9839 saniyede yerleşmiştir. Toplam hatası ise 0,0492 olarak bulunmuştur.



Şekil 8.36. Farklı TG tipleri ile birinci senkron generatör bara gerilim değışimi.

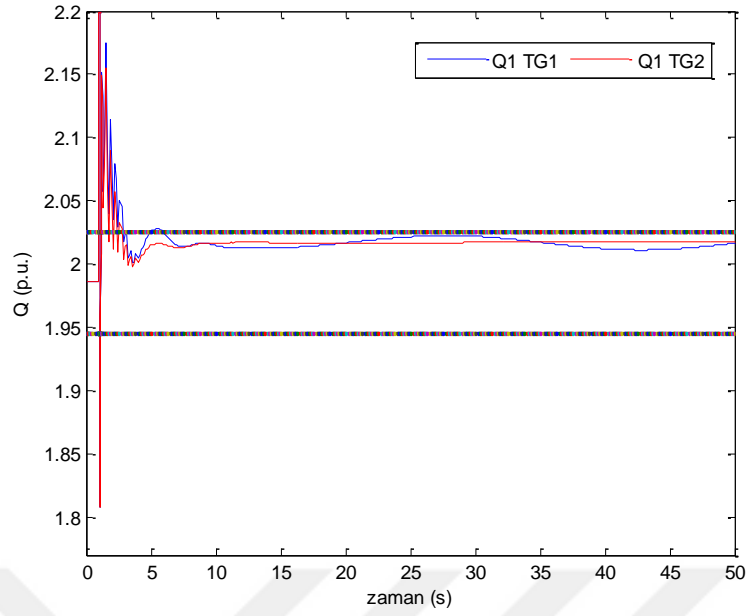
TG Tip-1'in kullanıldığı durumda bara gerilimi en yüksek 1,0742 p.u. değeri en düşük

1,0717 p.u. değerine ulaşmıştır. 1,0321 p.u. ile 1,0280 p.u. değerleri arasında yerleşemediği için oturma zamanı hesaplanamamıştır. Toplam hatası ise 1,6094 olarak bulunmuştur. TG Tip-2'nin kullanıldığı durumda ise bara gerilimi en yüksek 1,0717 p.u. değerine ulaşmış, en düşük 0,9820 p.u. değerine ulaşmıştır. Dahası 1,0321 p.u. ile 1,0280 p.u. değerleri arasında 6,9839 saniyede yerleşmiştir. Toplam hatası ise 0,8363 olarak bulunmuştur.



Şekil 8.37. Farklı TG tipleri ile birinci senkron generatör aktif güç değişimi.

TG Tip-1'in kullanıldığı durumda birinci senkron generatörün aktif gücü en yüksek 7,4542 p.u. değerine, en düşük 5,2704 p.u. değerine ulaşmıştır. 7,3868 p.u. ile 7,3433 p.u. değerleri arasında yerleşemediği için oturma zamanı hesaplanamamıştır. Toplam hatası ise 36,2283 olarak bulunmuştur. TG Tip-2'nin kullanıldığı durumda ise en yüksek değer 7,4437 p.u. değerine, en düşük 5,2706 p.u. değerine ulaşmıştır. 7,3868 p.u. ile 7,3433 p.u. değerleri arasında 7,9839 saniyede yerleşmiştir. Toplam hatası ise 35,3198 olarak bulunmuştur.



Şekil 8.38. Farklı TG tipleri ile birinci senkron generatör reaktif güç değişimi.

TG Tip-1'in kullanıldığı durumda birinci senkron generatörün reaktif gücü en yüksek 4,2943 p.u. değerine, en düşük 1,8073 p.u. değerine ulaşmıştır. 2,0253 p.u. ile 1,9459 p.u. değerleri arasında 5,9839 saniyede yerleşmiştir. Toplam hatası ise 33,8963 olarak bulunmuştur. TG Tip-2'nin kullanıldığı durumda birinci senkron generatör reaktif gücünün en yüksek ve en düşük değerlerinde bir değişiklik olmamıştır. 2,0253 p.u. ile 1,9459 p.u. değerleri arasında ise 2,8589 saniyede ulaşmıştır. Toplam hatası 33,6570 olarak bulunmuştur.

Çizelge 8.8. Farklı TG tiplerinin birinci senkron generatörün açılma hızı, bara gerilimi, aktif ve reaktif gücü üzerindeki etkisi.

	Tip	En yüksek değer	En düşük değer	Oturma zamanı	Toplam hata
w1	1	1,0011	0,9994	-	0,1952
	2	1,0011	1,0000	2,9839	0,0492
V1	1	1,0742	0,9820	-	1,6094
	2	1,0717	0,9820	6,9839	0,8363
P1	1	7,4542	5,2704	-	36,2283
	2	7,4437	5,2706	7,9839	35,3198
Q1	1	4,2943	1,8073	5,9839	33,8963
	2	4,2943	1,8073	2,8589	33,6570

Bölüm 8.1’de özdeğer analizi ile elde edilen sonuçlarda olduğu gibi geçici kararlılık analizinde de elde edilen sonuçlar PSS Tip-2 ve AVR Tip-1 ile kullanılan TG Tip-2’nin sistemde oluşan bozunumları iyileştirme konusunda TG Tip-1’den daha iyi olduğunu göstermektedir. TG Tip-2’nin kullanıldığı durumda tüm değerler belirtilen aralıklara yerleşebilmiş ve salınımlar sönmülebilmektedir.

8.2. ÇBAG VE EDS’NİN KÜÇÜK SİNYAL KARARLILIĞINA ETKİSİ

Beşinci olarak birlikte kullanıldığı durumda en iyi sonucu verdiği görülen denetleyici modellerinin (PSS Tip-2, AVR Tip-1 ve TG Tip-2) kullanıldığı durumda, 1,5 MVA gücündeki ÇBAG tabanlı rüzgâr türbini 7. Baraya bağlanarak inceleme yapılmıştır. Elde edilen özdeğerler, sönmüleme oranları, frekanslar ve salınım modları Çizelge 8.16’da belirtildiği gibidir.

Çizelge 8.9. ÇBAG'ın küçük sinyal kararlılığına olan etkisi.

UPFC-POD + PSS Tip-2, AVR Tip-1, TG Tip-2					
No	ÇBAG	λ	ξ (%)	f	Salınım Modları
1	Yok	-7,8582±j2,0070	96,89	0,3194	Bölgeler arası
	Var	-7,8582±j2,0067	96,89	0,3194	
2	Yok	-7,9725±j1,9122	97,24	0,3043	Bölgeler arası
	Var	-7,9734±j1,9107	97,24	0,3041	
3	Yok	-3,7460±j0,6364	98,59	0,1013	Bölgeler arası
	Var	-3,7458±j0,6362	98,59	0,1013	
4	Yok	-0,5928±j1,6417	33,96	0,2613	Bölgeler arası
	Var	-0,5927±j1,6418	33,96	0,2613	
5	Yok	-0,9960±j1,5126	54,99	0,2407	Bölgeler arası
	Var	-0,9957±j1,5125	54,99	0,2407	

UPFC-POD ile birlikte PSS Tip-2, AVR Tip-1 ve TG Tip-2 denetleyicilerinin kullanıldığı sisteme ÇBAG tabanlı rüzgâr türbininin eklenmesinin sistem kararlılığına olumsuz bir etkisinin olmadığı kararlılık açısından mevcut durumun korunduğu gözlemlenmiştir.

Altıncı ve son olarak, beşinci durumdaki koşullarda çalışan güç sisteminde, 4. Baraya bağlanan 100 MVA gücündeki yakıt hücresinin küçük sinyal kararlılığına olan etkisi incelenmiştir. İncelemelerde elde edilen özdeğerler, sönümleme oranları, frekanslar ve salınım modları Çizelge 8.17’de belirtildiği gibidir.

Çizelge 8.10. Yakıt hücresinin küçük sinyal kararlılığına etkisi.

Yakıt Hücresinin Küçük Sinyal Kararlılığı Üzerine Etkisi					
No	Yakıt Hücresi Yüzdeleri Güç Değeri	λ	ξ (%)	f	Salınım Modları
1	%0	-7,8582±j2,0067	96,89	0,3194	Bölgeler arası
	%20	-7,8658±j2,0351	96,81	0,3239	
	%40	-7,8585±j2,0062	96,89	0,3193	
	%60	-7,8584±j2,0061	96,89	0,3193	
	%80	-7,8656±j2,0407	96,79	0,3248	
	%100	-7,8657±j2,1034	96,60	0,3348	
2	%0	-7,9734±j1,9107	97,24	0,3041	Bölgeler arası
	%20	-6,9160±j2,7878	92,75	0,4437	
	%40	-6,7795±j3,0327	91,28	0,4827	
	%60	-6,5379±j3,3451	89,02	0,5324	
	%80	-6,4339±j3,3921	88,45	0,5399	
	%100	-6,4943±j3,3450	88,96	0,5324	
3	%0	-3,7458±j0,6362	98,59	0,1013	Bölgeler arası
	%20	-3,9000±j1,3222	94,71	0,2104	
	%40	-3,9297±j1,2913	95,00	0,2055	
	%60	-3,9558±j1,2132	95,60	0,1931	
	%80	-3,9956±j1,0988	96,42	0,1749	
	%100	-3,9818±j1,0906	96,44	0,1736	
4	%0	-0,6031±j1,6475	33,96	0,2622	Bölgeler arası
	%20	-0,9791±j1,4881	54,97	0,2368	
	%40	-0,9946±j1,5056	55,12	0,2396	
	%60	-1,0023±j1,4893	55,83	0,2370	
	%80	-0,9843±j1,4965	54,95	0,2381	
	%100	-0,9673±j1,4683	55,01	0,2337	
5	%0	-0,9957±j1,5125	54,99	0,2407	Bölgeler arası
	%20	-1,0914±j1,4055	61,33	0,2237	
	%40	-1,0921±j1,3874	61,85	0,2208	
	%60	-1,0345±j1,4348	58,48	0,2284	
	%80	-0,9114±j1,3862	54,94	0,2206	
	%100	-0,9046±j1,3850	54,68	0,2204	

UPFC-POD, PSS Tip-2, AVR Tip-1 ve TG Tip-2 ile birlikte ÇBAG'nin kullanıldığı sisteme eklenen 100 MVA gücündeki yakıt hücresi sisteme farklı yüzdelik dilimlerde güç ilave etmiştir. Bu durumda 1. 3. ve 4. özdeğerlerde kararlılık açısından iyileşme gözlemlenirken 2. özdeğerde kötüleşme, 5. özdeğerde ise önce iyileşme daha sonra kötüleşme gözlemlenmiştir.



9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında KUNDUR'un 2 alanlı – 4 generatörlü güç sistemi üzerinde farklı denetleyici tipleri ile birlikte özdeğer analizi yöntemi kullanılarak küçük sinyal kararlılığı analizi incelemesi yapılmıştır. Özdeğer analizi sonuçlarında osilasyon frekansı 0,1 ile 2 Hz arasında olan, yerel alan ve bölgeler arası mod içerisinde bulunan özdeğerler çizelgelerde gösterilmiştir. Yapılan çalışmada ilk olarak hiçbir denetleyicinin bulunmadığı güç sisteminde 8. Barada 1. Saniyede oluşan üç faz kısa devre arızası ile 1,05. saniyede 8 ve 9 numaralı baralar arasındaki hattın kopması sonucu oluşan arızaların küçük sinyal kararlılığına olan etkisi incelenmiştir. Daha sonra güç sistemine UPFC-POD ile birlikte PSS, AVR ve TG eklenerek bu denetleyicilerin farklı tiplerinin birlikte kullanılmasıyla küçük sinyal kararlılığı analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Denetleyicilerin hangi tip modeli kullanılırsa kullanılsın denetleyicinin bulunmadığı duruma göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Küçük sinyal kararlılığı açısından en iyi sonucun UPFC-POD ile PSS Tip-2, AVR Tip-1 ve TG Tip-2'nin birlikte kullanıldığı durumda elde edildiği görülmüştür. ÇBAG tabanlı rüzgâr türbininin bu denetleyicilerle birlikte kullanıldığı durumda güç sisteminin küçük sinyal kararlılığına olumsuz bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Dahası sisteme EDS bağlanmış ve özdeğerler sonuçlarının çoğunluğunun iyileştiği gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışması güç sistemlerinde UPFC-POD, PSS, AVR ve TG gibi denetleyicilerin kullanılmasının önemini vurgulamış, küçük sinyal kararlılığına etkisini belirtmiştir. Dahası güç sistemine ilave edilen ÇBAG tabanlı rüzgâr türbini ve EDS'nin de kararlılık üzerindeki etkilerini göstermiştir. Bu tez çalışmasından yola çıkarak farklı güç sistemlerinde de UPFC-POD, PSS, AVR, ÇBAG tabanlı rüzgâr türbini ve EDS'nin kullanılabilmesi ön görülmektedir. Ayrıca bu çalışmanın; UPFC'nin yanı sıra STATCOM, SVR, TCSC ve SSSC gibi FACTS cihazlarının da POD ile birlikte kullanılma durumlarında küçük sinyal kararlılığı analizlerine zemin hazırlayacağı, farklı güçlerde kullanılan ÇBAG tabanlı rüzgâr türbinleri ile EDS'nin kullanımının daha detaylı incelemelerine zemin hazırlayabileceği ön görülmüştür.

10. KAYNAKLAR

- [1] P. S. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [2] K. R. Padiyar, *Facts Controllers in Power Transmission Distribution*. New Delhi, India: New Age International Limited, 2007.
- [3] D. Murali, M. Rajaram, ve N. Reka, "Comparison of FACTS devices for power system stability enhancement," *International Journal of Computer Applications*, c. 8, sayı 4, ss. 30–35, 2010.
- [4] E. Gholipour ve S. Saadate, "Improving of transient stability of power systems using UPFC," *IEEE Transactions on Power Delivery*, c. 20, sayı 2, ss. 1677–1682, 2005.
- [5] X. Zhu, M. Jin, X. Kong, J. Zhao, J. Liu, ve Q. Zhou, "Subsynchronous resonance and its mitigation for power system with unified power flow controller," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, c. 6, sayı 1, ss. 181–189, 2018.
- [6] D. K. Raju, B. S. Umre, A. S. Junghare, ve B. C. Babu, "Mitigation of subsynchronous resonance with fractional-order PI based UPFC controller," *Mechanical Systems and Signal Processing*, c. 85, sayı Jan 2016, ss. 698–715, 2017.
- [7] C. E. Prasad ve S. Vadhera, "Damping of sub synchronous resonance using fuzzy based PI controlled UPFC," *2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES)*, Kozhikode, India, 2015, ss. 1–5.
- [8] R. K. Pandey ve N. K. Singh, "Electrical power and energy systems UPFC control parameter identification for effective power oscillation damping," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 31, sayı 6, ss. 269–276, 2009.
- [9] D. B. Valle ve P. B. Araujo, "The influence of GUPFC FACTS device on small S-signal stability of the electrical power systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 65, ss. 299–306, 2015.
- [10] B. Hekimoğlu, "Sine-cosine algorithm-based optimization for automatic voltage regulator system," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, c. 41, sayı 6, ss. 1761–1771, 2019.
- [11] M. S. Widyan, "On the effect of AVR gain on bifurcations of subsynchronous resonance in power systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 32, sayı 6, ss. 656–663, 2010.

- [12] P. Dabur, N. K. Yadav, ve R. Avtar, “Matlab design and simulation of AGC and AVR for single area power system with fuzzy logic control,” *International Journal of Soft Computing and Engineering*, c. 1, sayı 6, ss. 44–49, 2012.
- [13] P. Dabur, N. K. Yadav, ve V. K. Tayal, “Matlab design and simulation of AGC and AVR for multi area power system and demand side management,” *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, c. 3, sayı 2, ss. 259–264, 2011.
- [14] H. Gozde, “Robust 2DOF state-feedback PI-controller based on meta-heuristic optimization for automatic voltage regulation system,” *ISA Transactions*, c. 98, ss. 26–36, 2020.
- [15] M. Micev, M. Čalasan, ve D. Oliva, “Fractional order PID controller design for an AVR system using chaotic yellow saddle goatfish algorithm,” *Mathematics*, c. 8, sayı 7, s. 1182, 2020.
- [16] T. A. Jumani, M. W. Mustafa, Z. Hussain, M. M. Rasid, M. S. Saeed, M. M. Memon, I. Khan, K. S. Nisar, “Jaya optimization algorithm for transient response and stability enhancement of a fractional-order PID based automatic voltage regulator system,” *Alexandria Engineering Journal*, c. 59, sayı 4, ss. 2429–2440, 2020.
- [17] P. Dey, A. Saha, S. Mitra, B. Dey, A. Bhattacharya, ve B. Marungsri, “Improvement of small-signal stability with the incorporation of FACTS and PSS,” *Control Applications in Modern Power System*, c. 710, ss. 335–344, 2021.
- [18] B. R. G. L. F. B. Martins, P. B. Araujo, E. V. Fortes, ve E. L. Miotto, “Design of the PSSs, PI – UPFC and PI – UPFC – POD controllers using the firefly algorithm,” *The 12th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - (CLAGTEE)*, Mar del Plata, Arjantin, 2017 ss. 1–7.
- [19] M. A. Furini, A. L. S. Pereira, ve P. B. Araujo, “Pole placement by coordinated tuning of power system stabilizers and FACTS-POD stabilizers,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 33, sayı 3, ss. 615–622, 2011.
- [20] C. R. Makkar ve L. Dewan, “Simultaneous coordination of power system stabilizer and UPFC for improving dynamic stability of multimachine system,” *2014 IEEE 6th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, Kurukshetra, India, 2014, ss. 1–4.
- [21] A. N. Hussain, F. Malek, M. A. Rashid, L. Mohamed, ve N. A. Mohd Affendi, “Optimal coordinated design of multiple damping controllers based on PSS and UPFC device to improve dynamic stability in the power system,” *Mathematical Problems in Engineering*, c. 2013, sayı 4, ss. 1–15, 2013.
- [22] R. A. Ramos, “Stability analysis of power systems considering AVR and PSS output limiters,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 31, sayı 4, ss. 153–159, 2009.

- [23] G. J. W. Dudgeon, W. E. Leithead, A. Dysko, J. O'Reilly, ve J. R. McDonald, "The effective role of AVR and PSS in power systems: frequency response analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 22, sayı 4, ss. 1986–1994, 2007.
- [24] A. Dysko, W. E. Leithead, ve J. O'Reilly, "Enhanced power system stability by coordinated PSS design," *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 25, sayı 1, ss. 413–422, 2010.
- [25] S. Muller, M. Deicke, ve R. W. De Doncker, "Doubly fed induction generator systems for wind turbines," *IEEE Industry applications magazine*, c. 8, sayı 3, ss. 26–33, 2002.
- [26] X. Zhu and Z. Pan, "Impedance-model-based SSR study considering DFIGs at different locations," *2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Sydney, NSW, Avustralya, 2017, ss. 1–5.
- [27] Y. M. Alsmadi, L. Xu, F. Blaabjerg, J. P. Ortega, A. Y. Abdelaziz, A. Wang ve Z. Albataineh, "Detailed investigation and performance improvement of the dynamic behavior of grid-connected DFIG-based wind turbines under LVRT conditions," *IEEE Transactions on Industry Applications*, c. 54, sayı 5, ss. 4795–4812, 2018.
- [28] R. Liu, J. Yao, X. Wang, P. Sun, J. Pei, ve J. Hu, "Dynamic stability analysis and improved LVRT schemes of DFIG-based wind turbines during a symmetrical fault in a weak grid," *IEEE Transactions on Power Electronics*, c. 35, sayı 1, ss. 303–318, 2020.
- [29] D. Gautam ve V. Vittal, "Impact of DFIG based wind turbine generators on transient and small signal stability of power systems," *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Calgary, Kanada, 2009, ss. 1426–1434.
- [30] V. T. Arathi, M. J. Laly, E. P. Cheriyan, ve A. T. Mathew, "Small signal stability analysis of a two area system with and without the integration of a large scale wind farm using PSAT," *2018 International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies (ICCPCT)*, Kannur, India, 2018, ss. 317–322.
- [31] M. Rawal, D. C. Nautiyal, ve M. S. Rawat, "Analysis of small signal stability in DFIG integrated power system," *2021 International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (ICAECT)*, Bhilai, India, 2021, ss. 1–6.
- [32] B. Mehta, P. Bhatt, ve V. Pandya, "Small signal stability analysis of power systems with DFIG based wind power penetration," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 58, ss. 64–74, 2014.
- [33] N. Altin, "Energy storage systems and power system stability," *2016 International Smart Grid Workshop and Certificate PrAVRam (ISGWCP)*, İstanbul, Türkiye, 2016, ss. 1–7.

- [34] U. Datta, A. Kalam, ve J. Shi, "Battery energy storage system for transient frequency Stability enhancement of a large-scale power system," *2017 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Melbourne, Australia, 2017, ss. 1–5.
- [35] F. Moazeni ve J. Khazaei, "Electrochemical optimization and small-signal analysis of grid-connected polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells for renewable energy integration," *Renewable Energy*, c. 155, ss. 848–861, 2020.
- [36] M. K. Döşoğlu ve A. B. Arsoy, "Transient modeling and analysis of a DFIG based wind farm with supercapacitor energy storage," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 78, ss. 414–421, 2016.
- [37] R. Shankar, R. Bhushan, ve K. Chatterjee, "Small-signal stability analysis for two-area interconnected power system with load frequency controller in coordination with FACTS and energy storage device," *Ain Shams Engineering Journal*, c. 7, sayı 2, ss. 603–612, 2016.
- [38] D. Lastomo, H. Setiadi, M. Faisal, A. Ashfahani, G. Bangga, G. Hutomo, A. Sabila ve I. Bumi, "The effects of energy storages on small signal stability of a power system," *2017 International Seminar on Intelligent Technology and its Applications (ISITIA)*, Surabaya, Indonesia, 2017, ss. 52–57.
- [39] N. Noroozian ve G. Andersson, "Damping of inter-area and local modes by use of controllable components," *IEEE Transactions on Power Delivery*, c. 10, sayı 4, ss. 2007–2012, 1995.
- [40] I. Perez-arriaga, G. Verghese, ve F. Schewpe, "Selective modal analysis with applications to electric power systems, PART I: Heuristic Introduction," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, c. PAS-101, sayı 9, ss. 3117–3125, 1982.
- [41] M. M. Ertay ve Z. Aydoğmuş, "Güç sistemlerinde Facts uygulamaları," *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, c. 4, sayı 2, ss. 40–58, 2012.
- [42] M. A. Kamarposhti, M. Alinezhad, H. Lesani, ve N. Talebi, "Comparison of SVC, STATCOM, TCSC, and UPFC controllers for static voltage stability evaluated by continuation power flow method," *2008 IEEE Canada Electric Power Conference*, Vancouver, Kanada, 2008, ss. 1–8.
- [43] M. M. Eray, "Enerji iletim sistemlerinin UPFC ile kontrolü," Yüksek lisans tezi, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2006.
- [44] N. G. Hingorani, "Flexible AC transmission," *IEEE Spectrum*, c. 30, sayı 4, ss. 40–45, 1993,
- [45] L. Gyugyi, C. D. Schauder, ve K. K. Sen, "Static synchronous series compensator: A solid-state approach to the series compensation of transmission lines," *IEEE*

Transactions on Power Delivery, c. 12, sayı 1, ss. 406–417, 1997.

- [46] K. Döşoğlu, “Güç sistemlerinde geçici kararlılık için UPFC, GSSC ve alt-geçici dinamik modellerin geliştirilmesi,” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 8, ss. 1612–1625, 2020.
- [47] H. M. Ayres, I. Kopcak, M. S. Castro, F. Milano, ve V. F. da Costa, “A didactic procedure for designing power oscillation dampers of FACTS devices,” *Simulation Modelling Practice and Theory*, c. 18, sayı 6, ss. 896–909, 2010.
- [48] M. S. Castro, H. M. Ayres, V. F. da Costa, ve L. C. P. da Silva, “Impacts of the SSSC control modes on small-signal and transient stability of a power system,” *Electric Power Systems Research*, c. 77, sayı 1, ss. 1–9, 2007.
- [49] S. Essallah, A. Buallegue, ve A. Khedher, “Integration of automatic voltage regulator and power system stabilizer: small-signal stability in DFIG-based wind farms,” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, c. 7, sayı 5, ss. 1115–1128, 2019.
- [50] E. Sorrentino ve F. Leon, “Comparison among typical input signals of different types of power system stabilizers (PSS),” *IEEE Andean Conference*, Quito, Ekvador, 2020, ss. 1–6.
- [51] L. Adjoudj, F. Lakdja, F. Z. Gherbi, ve D. Ould Abdsallem, “Synthesis integrating wind generation and FACTS of network,” *2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, Tunus, 2014, ss. 1–6.
- [52] J. G. Sloopweg, H. Polinder, ve W. L. Kling, “Representing wind turbine electrical generating systems in fundamental frequency simulations,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, c. 18, sayı 4, ss. 516–524, 2003.
- [53] B. Yildirim ve M. T. Gencoglu, “Oscillatory stability and eigenvalue analysis of power system with MicrAVRid,” *Electrical Engineering*, c. 100, sayı 4, ss. 2351–2360, 2018.
- [54] F. Milano, “An open source power system analysis toolbox,” *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 20, sayı 3, ss. 1199–1206, 2005.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Muhammet DEMİRBAŞ

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2021
Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2019
Lise		Güngören Anadolu Lisesi	2015

YAYINLAR

- [1] M. Demirbaş ve M. Dursun, “3 fazlı asenkron motorun farklı çalışma koşulları altındaki tepkisinin vektör kontrol tekniği ile analizi,” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 8, sayı 4, ss. 2430–2442, 2020.
- [2] M. Demirbaş, E. Kaymaz, ve M. K. Döşoğlu, “Güç sistemlerinde senkron generatör modelleri ile gerilim kararlılığı analizinin incelenmesi,” *International Marmara Sciences Congress (Autumn)*, Kocaeli, Türkiye, 2020, ss. 415-422.
- [3] M. Demirbaş ve M. K. Döşoğlu, “Güç sistemlerinde farklı TG modelleri ve UPFC-POD ile küçük sinyal kararlılığının incelenmesi,” *II. International Hazar Scientific Researches Conference*, Bakü, Azerbaycan, 2021, ss. 763-773.
- [4] M. K. Döşoğlu ve M. Demirbaş, “ÇBAG tabanlı rüzgar türbinlerinin çok makinalı güç sistemi üzerindeki etkilerinin incelenmesi,” in *II. International Hazar Scientific Researches Conference*, Bakü, Azerbaycan, 2021, ss. 753-762.
- [5] M. K. Döşoğlu, E. Kaymaz, ve M. Demirbaş, “Güç sistemlerinde farklı baralardaki ZIP yük modelinin yük akışı ve kayıplar üzerindeki etkisi,” *Al-Farabi International Congress On Applied Sciences*, Nahçıvan, Azerbaycan, 2021, ss. 522-529.

- [6] M. Demirbaş ve M. K. Döşoğlu, “Çok makinalı güç sistemlerinde farklı AVR modelleri, POD, UPFC ile küçük sinyal kararlılığının incelenmesi,” *Al-Farabi International Congress On Applied Sciences*, Nahçıvan, Azerbaycan, 2021, ss. 512-521.

