



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

**FARKLI GENERATÖR DENETLEYİCİLERİ VE ÇBAG TABANLI
RÜZGAR TÜRBİNİ ENTEGRE EDİLEN GÜÇ SİSTEMİNDE
KÜÇÜK SİNYAL KARARLILIĞININ İNCELENMESİ**

MAHMUT ÖZBAY

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK VE BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

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

DÜZCE, 2021

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FARKLI GENERATÖR DENETLEYİCİLERİ VE ÇBAG TABANLI
RÜZGAR TÜRBİNİ ENTEGRE EDİLEN GÜÇ SİSTEMİNDE
KÜÇÜK SİNYAL KARARLILIĞININ İNCELENMESİ

Mahmut ÖZBAY tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar 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

Prof. Dr. Yusuf SÖNMEZ

Gazi Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi:23/08/2021

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.

23 Ağustos 2021

Mahmut ÖZBAY

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanması süresince gösterdiği her türlü destek ve yardımlarından dolayı çok değerli hocam ve tez danışmanım Doç. Dr. Mehmet Kenan DÖŞOĞLU'na en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

23 Ağustos 2021

Mahmut ÖZBAY

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR.....	ix
SİMGELER	x
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
2. GÜÇ SİSTEMLERİNDE KÜÇÜK SİNYAL KARARLILIĞI	4
3. ÖZDEĞER ANALİZİ.....	11
4. SENKRON MAKİNE DÜZENLEYİCİLERİ.....	13
4.1. TÜRBİN YÖNETİCİSİ (TY).....	13
4.2. OTOMATİK GERİLİM REGÜLATÖRÜ (OGR)	14
4.2.1. Otomatik Gerilim Regülatörü Tip-1	14
4.2.2. Otomatik Gerilim Regülatörü Tip -2	15
4.2.3. Otomatik Gerilim Regülatörü Tip-3	16
4.3. GÜÇ SİSTEMİ KARARLI KILICILARI (GSKK)	16
5. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖR (ÇBAG).....	20
6. KATI OKSİT YAKIT HÜCRELERİ	22
7. BENZETİM ÇALIŞMASI	24
8. BENZETİM ÇALIŞMASI SONUÇLARI	27
8.1. GENERATÖRLERİN KONTROLSÜZ OLDUĞU DURUM	27
8.2. GENERATÖRLERE GSKK VE OGR İLAVE EDİLDİĞİ DURUM.....	31
8.3. GENERATÖRLERE GSKK, OGR VE TY İLAVE EDİLDİĞİ DURUM ...	35
8.4. GÜÇ SİSTEMİNE 100 MVA ÇBAG TABANLI RÜZGAR TÜRBİNİ EKLENDİĞİNDE OLUŞAN DURUM.....	39

8.5. GÜÇ SİSTEMİNE KATI OKSİT YAKIT HÜCRESİ EKLENDİĞİNDE OLUŞAN DURUM.....	41
9. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	46
10. KAYNAKLAR	48
ÖZGEÇMİŞ.....	52



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Güç sistemi kararlılığının sınıflandırılması	4
Şekil 2.2. Güç sistemi kararlılığı basitleştirilmiş devre modeli	8
Şekil 5.1. ÇBAG devre modeli	20
Şekil 7.1. 2 bölgeli güç sistemi devre modeli	24
Şekil 8.1. Sistemde kontrol elemanı olmadığı durumda generatör gerilimleri	27
Şekil 8.2. Sistemde kontrol elemanı olmadığı durumda yük barası gerilimleri	28
Şekil 8.3. Sistemde kontrol elemanı olmadığı durumda generatör açısal hızları.....	28
Şekil 8.4. Sistemde kontrol elemanı olmadığı durumda generatör aktif güçleri	29
Şekil 8.5. Sistemde kontrol elemanı olmadığı durumda generatör reaktif güçleri	29
Şekil 8.6. Sistemde kontrol elemanı olmadığı durumda özdeğer analiz sonuçları	30
Şekil 8.7. Generatörlere GSKK ve OGR ilave edildiğinde generatör barası gerilimleri	32
Şekil 8.8. Generatörlere GSKK ve OGR ilave edildiğinde yük barası gerilimleri.....	32
Şekil 8.9. Generatörlere GSKK ve OGR ilave edildiğinde generatör açısal hızları.....	33
Şekil 8.10. Generatörlere GSKK ve OGR ilave edildiğinde generatör aktif güçleri.....	33
Şekil 8.11. Generatörlere GSKK ve OGR ilave edildiğinde generatör reaktif güçleri..	34
Şekil 8.12. Generatörlere GSKK ve OGR ilave edildiğinde özdeğer analiz sonuçları ..	34
Şekil 8.13. TY ilave edilmiş test sistemindeki generatör barası gerilimleri	36
Şekil 8.14. TY ilave edilmiş test sistemindeki yük barası gerilimleri	36
Şekil 8.15. TY ilave edilmiş test sistemindeki generatör açısal hızları	37
Şekil 8.16. TY ilave edilmiş test sistemindeki generatör aktif güçleri	37
Şekil 8.17. TY ilave edilmiş test sistemindeki generatör reaktif güçleri	38
Şekil 8.18. TY ilave edilmiş test sistemindeki özdeğer analizi sonuçları.....	38
Şekil 8.19. ÇBAG rüzgâr türbini eklenmiş durumdaki özdeğer analizi sonuçları	40
Şekil 8.20. 100 MVA KOYH eklenmiş özdeğer analizi sonuçları.....	41
Şekil 8.21. 125 MVA KOYH eklenmiş durumdaki özdeğer analizi sonuçları.....	43
Şekil 8.22. 150 MVA KOYH eklenmiş durumdaki özdeğer analizi sonuçları.....	44

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 7.1. 2 bölgeli güç sisteminin hat parametreleri.....	25
Çizelge 7.2. 2 bölgeli güç sisteminin generatör bilgileri	25
Çizelge 8.1. Sistemde kontrol elemanı olmadığı durumda küçük sinyal kararlılık analizi sonuçları.....	31
Çizelge 8.2. Generatörlere GSKK ve OGR ilave edildiğinde küçük sinyal kararlılık analizi sonuçları.....	35
Çizelge 8.3. TY ilave edilmiş test sistemindeki küçük sinyal kararlılık analizi sonuçları	39
Çizelge 8.4. 100 MVA ÇBAG tabanlı rüzgâr türbini ilave edilmiş test sistemindeki küçük sinyal kararlılık analizi sonuçları.....	40
Çizelge 8.5 100 MVA KOYH ilave edilmiş test sistemindeki küçük sinyal kararlılık analizi sonuçları.....	42
Çizelge 8.6 125 MVA KOYH ilave edilmiş test sistemindeki küçük sinyal kararlılık analizi sonuçları.....	43
Çizelge 8.7. 150 MVA KOYH eklenmiş durumdaki küçük sinyal kararlılık analizi sonuçları	44

KISALTMALAR

ÇBAG	Çift beslemeli asenkron generatör
FACTS	Esnek AC iletim sistemi
GSKK	Güç sistemi kararlı kılıcısı
IEEE	Elektrik elektronik mühendisleri enstitüsü
KOYH	Katı oksit yakıt hücresi
OGR	Otomatik gerilim regülatörü
PSAT	Güç sistemleri analizi araç kutusu
SSSC	Statik senkron seri kompanzatör
STATCOM	Statik senkron kompanzatör
SVC	Statik var kompanzatör
TCSC	Tristör kontrollü seri kompanzatör
TY	Türbin yöneticisi
UPFC	Birleştirilmiş güç akışı kontrolü
WSCC	Batı sistemleri koordinasyon kurulu

SİMGELER

E'	Senkron generatörde indüklenen gerilim
E_T	Stator terminal gerilimi
g	Sistem çıkışı ile girişi arasındaki ilişkiyi gösteren vektör
H	Atalet momenti sabiti
I_a	Sistem akımı
i_{ds} ve i_{qs}	d-q eksen stator akımları
i_{dr} ve i_{qr}	d-q eksen rotor akımları
$i_{dg} - i_{qg}$	Şebeke tarafı dönüştürücünün d-q eksen akımlarıdır
K_D	Sönümleme katsayısı
K_v	Gerilim kazancı
P^{\max}	Maksimum türbin çıkışı
P^{\min}	Minimum türbin çıkışı
P_g	GSKK bağlı iken generatör aktif gücü
R_s	Stator direnci
R_r	Rotor direnci
S_e	Uyarıcının doygunluk fonksiyonu
T_e	Anti-windup zaman sabiti
T_ω	Arındırma zaman sabiti
T_e	Alan devresi sabiti
T_T	Ölçüm süresi sabiti
T_s	Yönetici zaman katsayısı
T_c	Servo zaman katsayısı
T_3	Geçici zaman katsayısı
T_4	Güç oranı zaman katsayısı
T_5	Reheat zaman sabiti
T_s	Yönetici zaman katsayısı
u	Sistem girişi
$v_{r,\min}$	Minimum v_r değeri
$v_{r,\max}$	Maksimum v_r değeri

v_{r1}	Yükseltici durum değişkeni
v_{r2}	Dengeleyici durum değişkeni
$v_{r,min}$	Minimum v_r değeri
v_{ref}	OGR referans gerilimi
v_m	Ölçülen gerilim
v_f	Geri besleme gerilimi
V_0	Bara ofset gerilimi
v_1	Arındırma devre sinyali
v_s	GSKK çıkış sinyali
v_g	GSKK bağlı iken gerenarötün gerilimi
v_{ds} ve v_{qs}	d-q eksen stator gerilimleri
v_{dr} ve v_{qr}	d-q eksen rotor gerilimleri
$v_{dg} - v_{qg}$	şebeke kısmı dönüştürücü d-q eksen gerilimleri
$v_{dg} - v_{qg}$	şebeke kısmı dönüştürücü d-q eksen gerilimleri
ω_m	Rotor açısai hızı
ω_{ref}	Referans hızı
x_i	Durum vektörü
X_d'	Geçici reaktans
X_E	Alicı uçtaki reaktans
X_s	Stator reaktansı
X_r	Rotor reaktansı
X_m	Mıknatıslanma reaktansı
μ_0	Regülatör kazancı
λ	A matrisinin özdeęeri
δ_i	Rotor açıları

ÖZET

FARKLI GENERATÖR DENETLEYİCİLERİ VE ÇBAG TABANLI RÜZGAR TÜRBİNİ ENTEGRE EDİLEN GÜÇ SİSTEMİNDE KÜÇÜK SİNYAL KARARLILIĞININ İNCELENMESİ

Mahmut ÖZBAY

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim
Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Kenan DÖŞOĞLU

Ağustos 2021, 51 sayfa

Çok makinalı güç sistemlerinin sürekli, ekonomik ve güvenilir olarak çalışmasında benzetim programları yardımı ile kararlılık analizleri incelenmektedir. Güç sistemlerinde en yaygın kararlılık analizi yapılanlardan birisi de küçük sinyal kararlılığıdır. Bu tez çalışmasında 4 makinalı 2 alanlı test sisteminde küçük sinyal kararlılığı analizi incelenmiştir. Benzetim çalışması Güç Sistemleri Analiz Programı (PSAT)'da yapılmıştır. Bu test sisteminde kullanılan senkron generatörlerde Otomatik Gerilim Regülatörü (OGR), Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı (GSKK) ve Türbin Yöneticisi (TY) modellerinin kullanılması ile güç sisteminin küçük sinyal kararlılığı analizleri gerçekleştirilmiştir. Dahası güç sisteminde senkron generatörlerden birisinin yerine ilave edilen Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) tabanlı rüzgar türbini ile küçük sinyal kararlılığı analizi incelenmiştir. Ayrıca güç sistemine Katı Oksit Yakıt Hücre (KOYH) ilave edilerek kararlılık analizi yapılmıştır. 4 makinalı 2 alanlı test sisteminde senkron generator açılma hız değişimleri, aktif-reaktif güç değişimleri ve bara gerilim değişimleri detaylı olarak incelenmiştir. Küçük sinyal kararlılığı analizinde sistemi çalışma bölgeleri, baskın makineler, özdeğerler, salınım frekansı, sönümlenme oranları ve katılım faktörü değerleri tablolar halinde sunulmuştur. Elde edilen bulgular neticesinde OGR, GSKK, TY, ÇBAG tabanlı rüzgar türbinleri ve KOYH kullanılması ile küçük sinyal kararlılığı analizinde etkili sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çift beslemeli asenkron generatör tabanlı rüzgar türbini, Güç sistem kararlı kılıcısı, Küçük sinyal kararlılığı, Otomatik gerilim regülatörü, Türbin yöneticisi.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF SMALL SIGNAL STABILITY IN POWER SYSTEM INTEGRATED DFIG BASED WIND TURBINE AND DIFFERENT GENERATOR CONTROLLER

Mahmut ÖZBAY

Düzce University

Institute of Graduate Studies, Department of Electrical-Electronic and Computer
Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Mehmet Kenan DÖŞOĞLU

August 2021, 51 pages

Stability analyzes are examined with the help of simulation programs in the continuous, economical and reliable operation of multi-machine power systems. One of the most common stability analysis in power systems is small signal stability. In this thesis, small signal stability analysis was investigated in a 4-machine 2-field test system. The simulation study was carried out in the Power Systems Analysis Program (PSAT). Small signal stability analyzes of the power system were carried out by using Automatic Voltage Regulator (AVR), Power System Stabilizer (PSS) and Turbine Governor (TG) models in the synchronous generators used in this test system. Moreover, small signal stability analysis was investigated with a Double Fed Induction Generator (DFIG) based wind turbine, which was added instead of one of the synchronous generators in the power system. In addition, the stability analysis was made by adding Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) to the power system. In the 4-machine 2-field test system, synchronous generator angular velocity changes, active-reactive power changes and bus voltage changes were examined in detail. In small signal stability analysis, system operating regions, dominant machines, eigenvalues, oscillation frequency, damping ratios and participation factor values are presented in tables. As a result of the findings, effective results have been reached in small signal stability analysis by using AVR, PSS, TG, DFIG based wind turbines and SOFC.

Keywords: Automatic voltage regulator, Double fed induction generator, Power system stabilizer, Small signal stability, Turbine governor.

1. GİRİŞ

Güç sistemlerinin çalışma koşulları teknoloji ve endüstriyel gelişmeler nedeniyle karmaşık bir hal almaktadır. Güç sistemlerinin büyümesi ile güvenilir çalışma ve dinamik davranışının korunması istenmektedir. Karmaşık hale gelen güç sistemlerinin işletilmesinde çeşitli sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bunun için güç sistemleri her türlü olumsuz durum göz önünde bulundurularak planlanmalı, kararlılık analizleri ve kontrol tasarımlarının dikkate alınması gerekmektedir. Bu yüzden güç sistemlerinde benzetim çalışmalarının yapılması önemli bir unsur olmaktadır. Benzetim analiz yaklaşımlarından birisi de küçük sinyal kararlılığıdır. Güç sistemlerinde küçük sinyal kararlılığı ilgili literatürde çalışmalar mevcuttur. Çok makinalı güç sistemlerinde doğrusal olmayan doyum ve şebeke tarafındaki dağılmalara karşı küçük sinyal kararlılığı analizi gerçekleştirilmiştir. Güç sisteminin geçici kararlılık esnasında güvenli olarak çalışabilmesinde GSKK'nın özdeğer üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir [1].

Güç sistemlerinde küçük sinyal kararlılığı analizi için kullanılan yaklaşımlardan bazıları da faz ölçüm ünitesi, ayırık kısmi diferansiyel denklem çözümleme modülü, uygun zaman çalışma modülü, doğrusal ayırık çalışma modülü ve yüksek zaman çözümleme üniteleri, alan ölçüm sistemleridir. Bu kontrol yaklaşımlarının kullanılması ile güç sistemlerinde daha az salınımların olduğu kapsamlı olarak incelenmiş ve yorumlanmıştır [2]-[4]. Farklı güç sistemlerinde küçük sinyal kararlılığı analizi için eş zamanlı iterasyon, seçici model analizi ve modifiye edilmiş yöntemler kullanılmıştır. Sistemin özdeğerinin hesaplanmasında ve dinamik performansının sağlanmasında kullanılan yöntemlerin küçük sinyal kararlılığı üzerinde etkili sonuçlar verdiği görülmüştür [5]-[7]. Dahası güç sistemlerinde küçük sinyal kararlılığı analizinde var olan yöntemlerin geliştirilmesi ve dinamik dayanıklılığı arttırmada alternatif çözümler bulunmaktadır. Güç sistemlerinin karmaşıklığı ve ağır yüklenme koşulları altında özdeğer analizinde farklı benzetim programları kullanılarak kapsamlı analizler gerçekleştirilmiştir [8]. Çok makinalı güç sistemlerinde doğrusallaştırılmış durum eşitlikleri kullanarak küçük sinyal kararlılığı analizi incelenmiştir. Tüm güç sistemi parametrelerinin doğrusal olarak modellenmesinde sistemin sürekli durum çalışmasındaki frekans ölçümleri alınarak ve modellenmeler

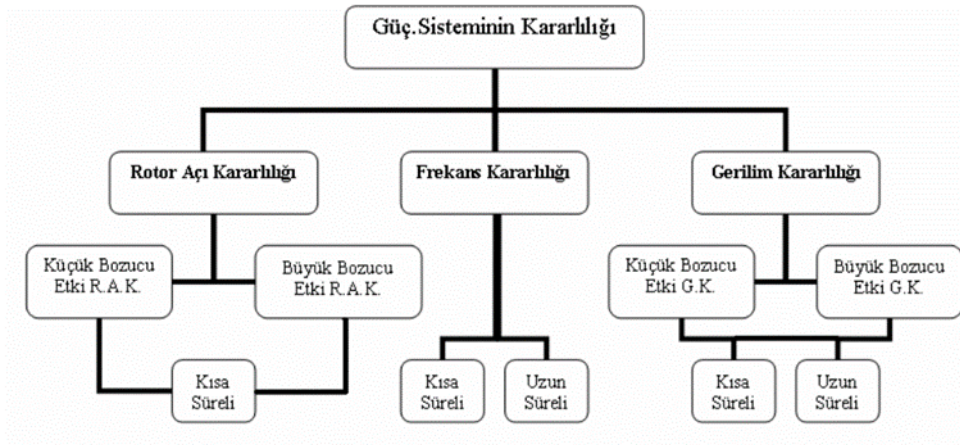
oluşturularak özdeğer analizleri hesaplanmıştır [9]. Küçük sinyal kararlılığı analizinde kullanılan yaklaşımlardan birisi de sistem empedans kriteri belirleme yöntemidir. Yük değişimleri, giriş gerilim ve akım değişimine göre tasarlanan bu yöntem özdeğer hesaplamasında kolaylık sağlamaktadır. Sistem yüklenmesinde haritalama yaklaşımı kullanımı ile küçük sinyal kararlılığı iyileştirilmektedir [10]-[12]. Güç sistemlerinin planlaması ve işletilmesinde güç transfer kapasitesinin iyileştirilmesi frekans kararlılığı açısından önemlidir. Küçük sinyal kararlılığı analizinde yüklenme durumlarına göre çeşitli modeller geliştirilmiştir. Bu modeller sayesinde iteratif yöntemlerde hesaplama kolaylığı sağlanmıştır [13]. Karmaşık hal alan güç sistemlerinde küçük sinyal kararlılığı için tahminsel yaklaşım modellerinin kullanımı mevcuttur. Sistemdeki arızalar ve tahmin edilemeyen sistem yüklenmelerine karşı özdeğer hesaplamaları için tahminsel yöntemlerin geliştirilmesi ve kullanımı frekans kararlılığı açısından etkili çözümler sunmuştur [14], [15]. Küçük sinyal kararlılığının güç sistemlerinde etkili olarak kullanıldığı diğer bir alan ise elektromekanik salınım sönümlemesidir. Burulma salınımları ve yüksek gerilim doğru akım dağıtımı için özdeğer analizinde sabit admitans modeli geliştirilerek hem elektromekanik salınımların sönümlenmesi hem de sistemin dinamik zaman cevabı açısından iyi sonuçlar vermesi sağlanmıştır [16]. Şebekeye bağlı ÇBAG tabanlı güç sistemlerinde enerji depolama elemanları kullanılarak küçük sinyal kararlılığı analizi incelenmiştir. Farklı yüklenme koşulları ve bozucu etkiler karşısında sistemin dinamik davranışı analiz edilerek, salınım sönümlenmesi ve frekans değişim etkileri enerji depolama elemanları tarafından kapsamlı olarak ele alınmıştır [17], [18]. Güç sistemlerinde küçük sinyal kararlılığı analizinde senkron generatörlerde kontrol modellerinin geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Bunlar OGR, GSKK, TY modelleridir. Bu modeller bazı çalışmalarda GSKK uyarım modelleri ve OGR ile birlikte kullanılırken, bazı çalışmalarda ise GSKK geliştirilerek farklı analiz yaklaşımları için kullanılmaktadır. Güç sistemlerinin çok alanlı çalışmalarında frekans düşmeleri ve salınımları azaltmada etkin olarak GSKK modelleri uyarım modelleri ile birlikte kullanılmıştır. GSKK ve uyarım modellerinin küçük sinyal kararlılığı ve özdeğer hesaplamalarında da etkili olduğu görülmüştür [19]. Çok makinalı güç sistemlerinde GSKK modelinin OGR modeli birlikte kullanıldığı çeşit modeller geliştirilmiştir. Bu modeller güç sistemlerinin yüklenme durumları, şebeke karakteristik değişimleri ve dinamik davranışından dolayı GSKK ile OGR modeli küçük sinyal kararlılığı üzerinde etkili olmaktadır. Dahası güç sistemlerinde meydana gelen elektromekanik salınımların

azaltılmasında da kullanımı etkindir [20], [21]. Küçük sinyal kararlılığı analizinde GSKK modelleri optimum çalışma parametrelerinin belirlenmesi ile çeşitli simetrik ve asimetrik arıza analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Senkron generatörde farklı GSKK modellerinin geliştirilmesinin frekans oranları, salınım sönümlenmesi, katılım faktörü, çalışma bölgeleri ve baskın parametreleri belirlemede önemli bir yeri bulunmaktadır [22], [23]. Çok makinalı güç sistemlerinde hem özdeğer hesaplaması hem de frekans kontrolünün sağlanmasında Esnek AC İletim Sistemi (FACTS) cihazları kullanılmaktadır. FACTS cihazlarından Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM), Statik Var Kompanzatör (SVC), Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC), Tristör Kontrollü Seri Kompanzatör (TCSC) ve Birleştirilmiş Güç Akışı Kontrolü (UPFC)'nin küçük sinyal kararlılığı analizinde kullanılmasının etkili olduğu görülmüştür [24]-[27]. Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye bağlanması ile güç sistemlerinin çalışma koşullarının iyileştirilmesi sağlanmaktadır. Hem maliyet açısından hem de aktif güç ve moment kontrolünde etkili olmasından dolayı ÇBAG tabanlı rüzgar türbinleri yaygın olarak tercih edilmektedir. ÇBAG tabanlı rüzgar türbinleri kullanılmasının çok makinalı güç sistemlerinde küçük sinyal kararlılığı analizinde iyi sonuçlar verdiği ve parametrelerdeki salınımın azaltılmasında etkili olduğu görülmüştür. Dahası çok bölgeli çalışmalarda ÇBAG tabanlı rüzgar türbinlerinin farklı rüzgar gücü ürettiği durumlarda ve senaryolarda etkili sonuçlar vermesi söz konusu olmuştur [28]-[35]. Senkron generatörlerde kullanılan geliştirilmiş GSKK, OGR ve TY modellerinin birlikte kullanılması küçük sinyal kararlılığı analizinde frekans oranları, katılım faktörü, çalışma bölgeleri ve baskın parametreleri belirlemede çok daha etkili olması ve salınım sönümlenmesinin daha da iyi hale getirilmesi için bu tez çalışmasında GSKK, OGR ve TY modellerinin birlikte kullanılması amaçlanmıştır. GSKK, OGR ve TY modellerinin senkron generatörlerde farklı model tiplerinin karşılaştırması yapılarak en uygun olanları tespit edilmiştir. Çok makinalı güç sistemlerinde bu üç modelin birlikte kullanılmasına ilaveten ÇBAG tabanlı rüzgar türbininin entegre edilmesi ve KOYH kullanılmasıyla özdeğer hesaplamasında daha etkili sonuçların alınması hedeflenmiştir. Bu şekilde hazırlanan tez çalışmasının literature katkısı sunulmuştur. Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar detaylı olarak gösterilmiştir.

2. GÜÇ SİSTEMLERİNDE KÜÇÜK SİNYAL KARARLILIĞI

Geçmişten günümüze kadar olan süreçte, güç sistemlerinde küçük sinyal kararlılığı problemleri görülmektedir. Sistem salınımları sönümlenme veya senkronizasyon olmadığından dolayı sönümsüz ya da artan bir şekilde oluşur. Kararsız salınımlar tek bir generatörde veya güç sisteminin küçük bir parçasında ya da birbirine bağlı büyük bir güç sisteminde olabilir. Bu durumda bu soruna yerel modda ortaya çıkmış bir sorun olarak bakılabilir. Diğer bir durum ise, enterkonnekte güç sisteminin dengesiz salınımlarını ifade eden alanlar arası mod problemi, 1996'da meydana gelen WSCC (Batı Sistemleri Koordinasyon Kurulu) sistemi olayı ile iyi bir şekilde anlaşılabilir, devre kesintileri, alanlar arası mod olarak düşük frekanslı salınımlar meydana getirir ve tüm güç sisteminin kesilmesine sebep olur [36].

Küçük sinyal kararlılığı, küçük bozulmalar meydana geldiğinde senkronizasyonu koruma yeteneği demektir. Bozulmalar çok küçük varsayılır, bu nedenle sistem durumunu gösteren denklemler çalışma sırasında doğrusallaştırılmalıdır. Küçük sinyal kararlılığı ve geçici kararlılığın her ikisi de rotor açısı ile ilgilidir. Küçük sinyal kararlılığı ve geçici kararlılık, Şekil 2.1'de gösterilen güç sistemi kararlılığı sınıflandırılması tablosunda rotor açısı kararlılığı alt sekmesinde bulunmaktadır. Güç sistemlerinde kararlılık üç alt dala ayrılır, bunlar: Rotor açısı kararlılığı, frekans kararlılığı ve gerilim kararlılığıdır [37].



Şekil 2.1. Güç sistemi kararlılığının sınıflandırılması.

Kararsızlığı meydana getiren etken generatör veya yük olabilir. Zaman durumuna göre kısa süreli ve uzun süreli olarak ikiye ayrılır. Zaman bakımından kısa süreli olarak sayılan rotor açığı kararlılığı, güç sisteminin elektromekanik dinamiklerine bağlı olarak birkaç saniye içinde oluşan bir kararlılık sorunudur. Küçük sinyal ve çok kısa süreli (geçici) olmak üzere iki çeşittir. Küçük sinyal kararlılığı elektromekanik zararsız salınımların meydana getirdiği küçük bozucu etkilerden dolayı ortaya çıkar. Çok kısa süreli kararlılık senkronizasyonun zayıflaması sorunundan kaynaklanır. Güç sisteminde büyük bozulmalara neden olur. Geçici kararlılık güç sisteminin şebekedeki bir arızaya dayanabilme yeteneği olarak da tanımlanabilir. Eğer güç sistemi geçici kararlılık sınırları dışına çıkarsa arıza sonrasında bazı generatörler sistemdeki diğer generatörler ile aralarındaki senkronizmayı kaybeder. Bu durum genellikle arızadan 5-10 saniye sonra meydana gelir. Arıza sonucunda bu generatörlerin güç sisteminden çıkarılmaları gerekecektir. Eğer bunlar büyük bir generatör grubu ise buradaki tüm bölge diğer bölgeler ile arasındaki senkronizasyonu kaybeder. Dolayısıyla yük ile şebeke arasında kesinti meydana gelir. Bu durum sistemde arıza öncesindeki yük akışının kesintiye uğraması demektir. Kritik bir arızada kararlılık sınır değerleri ile güç akışı gerçekleşebilir. Gerilim kararlılığı yüklerin durumuna bağlı olarak oluşur. Yüklerin dinamik özelliklerinin zaman durumlarına bağlı olarak gerilim kararlılığı, kısa ve uzun süreli gerilim kararlılığı olmak üzere iki kısımda incelenir. Kısa süreli gerilim kararlılığı asenkron motorların, senkron generatörlerin uyartım devrelerinin ve elektronik kontrollü cihazların (DC yüksek gerilim cihazları ve statik VAR kompanzatörlerinin) özelliklerinden kaynaklanır. Kısa süreli gerilim kararlılığı zaman bakımından açığı kararlılığı ile aynı sayılabilir. Dolayısıyla problemin modellenmesi ve analizi de aynı şekilde yapılabilir. Kısa süreli gerilim kararlılığı ile açığı kararlılığı problemlerini meydana geliş açısından birbirlerinden ayırt etmek pek kolay değildir. Bütün gerilim çökmelerinin sebeplerinin arkasında gerilim ve açığı kararsızlıkları birlikte bulunmaktadır. Kısa süreli değişimler olduğunda, sistemin kontrol değerlerinin zaman değişimleri daha yavaş olduğundan kısa sürede kontrol sistemleri görevini yerine getiremez. Uzun süreli bozucu etki değişimleri, birkaç dakika hatta daha da uzun süreye sahiptirler. Uzun süreli kararlılık problemleri frekans ve gerilim kararlılığı olmak üzere ikiye ayrılır. Frekans problemi güç sisteminde temel bir bozucu etki sebebiyle oluşur. Frekans kararsızlığı generatörler ve yükler arasındaki aktif güç dengesizliğinden kaynaklanır. Generatörlerden talep edilen aktif güç değerlerinde artma meydana geldiğinde generatörlerin ürettiği enerjinin frekanslarında da değişimler gerçekleşir. Frekanslardaki değişimler generatörlere bağlı hız regülatörleri ile kontrol

edilir ve sabit frekanslı enerji üretilmesi sağlanır. Sistem frekansı düştüğünde veya yükseldiğinde üretilen güç artar veya azalır. Uzun süreli gerilim kararlılığının analiz edilebilmesi için uzun süreli değişimlerin ayrıntılı bir şekilde modellenmesi gerekir. Uzun süreli gerilim kararlılığı güç sistemindeki yük, kademe değiştiriciler veya anahtarlamalı şönt kompanzasyon gibi elemanların özelliklerine göre değişir. Elektrik güç santrallerinin kontrol sistemlerinin özellikleri, buhar üretim sistemlerinin özellikleri ve otomatik üretim kontrol sistemleri gibi uzun süreli değişimler, uzun süreli gerilim kararlılığı üzerinde etkilidir. Uzun süreli gerilim kararlılığı için otomatik üretim kontrol sistemleri ve otomatik olmayan kontrolde ise operatörlerin kontrol üzerindeki etkileri, sürekli yüklerin özellikleri, transformatörlerin yük altında kademe değiştirme durumlarının ayrıntılı olarak bilinmesi gerekmektedir.

İyi bir şekilde analiz edebilmesi amacı ile gerilim kararlılığının kendi içerisinde küçük ve büyük bozucu etki altında olmak üzere sınıflandırılması daha uygun olur. Küçük bozucu etki gerilim kararlılığı yük değişimi gibi küçük bozucu etkilerden sonra gerilimi kontrol etme yeteneği olarak tanımlanabilir. Bu durumdaki bir sistemin gerilim kararlılığı analizi sürekli çalışma durumunda yapılır. Güç sistemi çalışma noktası civarında doğrusal olarak değişir ve sistemin analizi öz değerler ve öz değerler vektörü tekniği ile yapılır. Büyük bozucu etki gerilim kararlılığı, sistemde anahtarlama yapılması, yükün veya üretimin ortadan kalkması durumlarında sistemin arızalanmasıyla meydana gelir. Büyük bozucu etki gerilim kararlılığı uzun zamanlı yük akışı analizi ve doğrusal olmayan zaman durumu için kısa zaman bölümünün kullanılması ile analiz edilebilir. Gerilim kararlılığı doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemlerden oluşan bir sorundur. Güç sistemindeki elektromekanik salınımlar rotor açısı kararlılığı alanında incelenir, Salınımlar, senkron generatörlerin güç çıkışlarının rotor açı değişimleri ile ilişkili davranışlarından dolayı oluşur. Generatörlerin elektromanyetik torku sabit ve mekanik güce eşit olduğundan, hattaki bir arıza gibi bozulmanın neden olduğu elektromanyetik torkun ani değişiminde, generatörün rotor hareketini arttırmak veya zayıflatmak için ek enerjiye ihtiyaç duyulacaktır. Birbirine bağlı generatörler düşünüldüğünde, bir bozulma meydana gelirse bazı generatörler senkronizasyondan çıkabilir. Yavaş senkron generatör, kısmi gücü diğer generatörlere aktarır. Bozulma iki çeşit dengesiz salınım ile gerçekleşebilir, biri rotor açısı sapması ile ilgili yetersiz senkronizasyon, diğeri ise rotor hızı sapması ile ilgili yetersiz sönümlemedir. Sönümleme eksikliği, küçük sinyal kararlılığında var olan ve güç sisteminde sönümlenemeyen osilasyonlarla sonuçlanan temel problemdir [37].

Küçük bozulma altında, küçük sinyal kararlılığı problemi yerel veya global olabilir. Yerel mod genellikle bir generatörden diğer generatörlere karşı meydana gelen rotor salınımını ifade eder. Bunun aksine global mod ise birbirine bağlı büyük generatör grupları arasında olur. Yerel mod için frekans genel olarak 1-3 Hz aralığındadır. Global mod için ise frekans 0,3-0,8 Hz aralığında gerçekleşir [38], [39]. Güç sistemi dinamik ve doğrusal olmayan bir sistemdir. Sistemin durumu, sistemin bir sonraki performansı alması için gerekli olan anlık bilgidir. Durumlar zaman zaman değişir ve herhangi bir fiziksel değişken arasından seçilebilir. Durum-Uzay yöntemi, güç sistemini n boyutundan anlamak için bir metottür.

m'inci mertebeden doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerle ifade edilebilen güç sistemi Denklem (2.1)'de gösterilmiştir.

$$\dot{x}_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_m; u_1, u_2, \dots, u_q; t) \quad (2.1)$$

x , farklı zamanlarda sistemin durumlarını ifade eder, u sistemin girişi, t zaman olarak belirtilir. \dot{x} , zamanla birlikte durum diferansiyel değişkenleridir.

Ek olarak, durum ve giriş ifadeleri Denklem (2.2) ve Denklem (2.4) arasında vektörel olarak gösterilmiştir.

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_m \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_q \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_m \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Sistemin çıkışı, sistemin kararlı olup olmadığını belirlemek için kullanılır. Çıkışlar, sistemin durumunu ve girdisini içermelidir. Çıkışın anlaşılması için, ifadesi Denklem (2.5)'de gösterilmiştir.

$$y = g(x, u) \quad (2.5)$$

y ve g ayrıca vektör olarak Denklem (2.6) ve Denklem (2.7)'de gösterilmiştir.

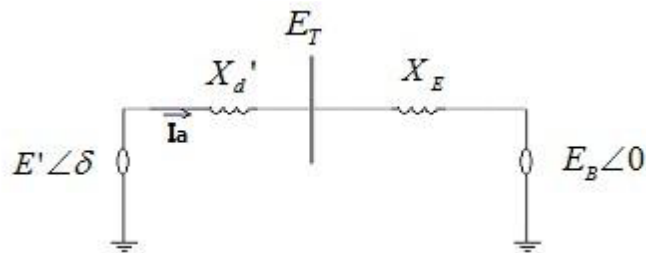
$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_l \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$g = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \dots \\ g_l \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Burada g , çıkış ile giriş arasındaki ilişkiyi gösteren vektördür.

Denklem (2.1)'den \dot{x} , bir durum değişkenini temsil eder. Bir sistemin kalıcı durumunu incelerken, durum değişkenlerinde bir değişiklik olmaması gerekir. Sistem kararlı hale geldiğinde, \dot{x} her zaman sıfırdır. \dot{x} 'in sıfıra eşit olduğu durum, denge noktası olarak belirlenir. Güç sistemi için, doğrusal olmadığından dolayı denge noktası birden fazla olacaktır.

Şekil 2.2'de gösterilem model güç sistemin kararlılığını analiz etmek için sonsuz baraya bağlı tek bir makineyi ifade eder [39]. Ayrıca, analizi basitleştirmek için tüm dirençler ihmal edilmiştir.



Şekil 2.2. Güç sistemi kararlılığı basitleştirilmiş devre modeli [39].

Tüm dirençler ihmal edildiğinden, $E' \angle \delta$ geçici reaktans X_d' 'den önceki gerilimi gösterir. Alıcı uçtaki sistem X_E reaktansı ile bağlanır ve alıcı uçtaki gerilim $E_B \angle 0$ 'dır.

E_T , statorun çıkış gerilimi, I_a sistem akımıdır. E' gerilimi E_B geriliminin δ derece önündedir.

İlişkiler Denklem (2.8)'de gösterilmiştir.

$$I_a = \frac{E' \angle \delta - E_B \angle 0}{j(X'_d + X_E)} \quad (2.8)$$

Denklem (2.8)'de $X'_d + X_E = X_T$ varsayalım. Gönderen uçta üretilen güç aşağıdaki gibi ifade edilir, I_a^* , I_a 'nın eşleniğidir.

$$S_s = E' \bullet I_a = \frac{E'E_B \sin \delta}{X_T} + j \frac{E'(E' - E_B \cos \delta)}{X_T} \quad (2.9)$$

Tüm dirençler ihmal edildiğinden;

$$T_e = \frac{E'E_B}{X_T} \sin \delta \quad (2.9)$$

T_e Denklem (2.9) generatörün hava aralığı torkudur. Sistemde küçük değişiklikler yapmak için. Hava aralığı torkunun değişimi ΔT_e olarak alınır, rotor açısının başlangıç durumu δ_0 'dır. Bu durumda ilişki Denklem (2.10)'daki gibi gösterilir.

$$\Delta T_e = \frac{dT_e}{d\delta} \Delta \delta = \frac{E'E_B}{X_T} \cos \delta_0 (\Delta \delta) \quad (2.10)$$

Burada $\Delta \delta$ rotor açısının değişimidir. Sistemi başlangıç noktası çevresinde doğrusallaştırmak için, analizde hareket denklemi kullanılır.

$$\frac{d\Delta \omega_r}{dt} = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - K_D \Delta \omega_r) \quad (2.11)$$

Hareket denklemi Denklem (2.11)'de gösterilmiştir. Burada H atalet momenti sabiti, K_D , sistemi belirlerken önemli olan sönümleme katsayısıdır. ω_r , rad / s cinsinden rotorun açısal hızını ifade eder. ω_0, ω_r rotor açısal hızının nominal değeridir. Denklem (2.10) değiştirilerek, Denklem (2.11) doğrusallaştırıldığında, ifade Denklem (2.13)'teki gibi olur.

$$\frac{d\Delta \omega_r}{dt} = \frac{1}{2H} = [\Delta T_m - K_s \Delta \delta - K_D \Delta \omega_r] \quad (2.13)$$

Önceki türevden dolayı Denklem (2.10)'da $K_s = \frac{E'E_B}{X_T} \cos\delta_0$ olarak alınmıştır. Açının konumu Denklem (2.14)'de gösterilmiştir.

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_0 \Delta\omega_r \quad (2.14)$$

(2.13) ve (2.14) denklemleri matris biçiminde yazılırsa:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_D}{2H} & -\frac{K_S}{2H} \\ \omega_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 2H \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m \quad (2.15)$$

Denklem (2.15) ayrıca $\dot{x} = Ax + bu$ şeklinde de ifade edilir. Burada x , sistemin durumu ve u , sistemin girişidir. Matrise göre, sönümleme hız sapması ile ilgilidir, senkronizma ise rotor açısı sapmasına karşılık gelir. Küçük sinyal kararlılığı problemlerini analiz ederken, sönüm oranı ve senkronizasyon güç sisteminin davranışını değerlendirmek için kullanılan indekslerdir [36], [50].

3. ÖZDEĞER ANALİZİ

Sistem denge noktasındayken, $\dot{x} = 0$, doğrusal olmayan ve dinamik güç sistemi gibi olduğu varsayılır. Bu durumda ifadeler Denklem (3.1) ve Denklem (3.2)'deki gibi yazılır.

$$\dot{x}_0 = f(x_0, u_0) = 0 \quad (3.1)$$

$$y_0 = g(x_0, u_0) \quad (3.2)$$

x_0 ve u_0 u denge noktasındaki durum ve girişi gösterir, y_0 denge noktasındaki çıkışı gösterir. x değeri, x_0 durum değişkenindeki değişiklik olarak kabul edilebilir. İlişki Denklem (3.3)'de gösterilmiştir.

$$\dot{x} = \dot{x}_0 + \Delta\dot{x} \quad (3.3)$$

Δx , bozulma olduğunda x_0 durumundaki değişikliktir ve Denklem (3.4)'de gösterilmiştir.

$$\dot{x} = f[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] \quad (3.4)$$

Daha sonra, bozulma küçük sinyal kararlılığı gibi küçükse, Taylor'ın seri genişletmesi kullanılabilir. Denklem (3.4) genişletilerek elde edilen ifadeler Denklem (3.5) ve Denklem (3.9) arasında gösterilmiştir.

$$\dot{x}_n = \dot{x}_{n-0} + \Delta\dot{x}_n \quad (3.5)$$

$$= f_n[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] \quad (3.6)$$

$$= f_n(x_0, u_0) + \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_m} \Delta x_m + \frac{\partial f_n}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial u_q} \Delta u_q \quad (3.7)$$

\dot{x}_{n-0} Denklem (3.5)'in n. kez sıfırdaki türevidir.

$$\dot{x}_n = \Delta\dot{x}_n \quad (3.8)$$

$$= \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_m} \Delta x_m + \frac{\partial f_n}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial u_q} \Delta u_q \quad (3.9)$$

Benzer şekilde, çıkış ifadesi de aynı şekilde elde edilerek Denklem (3.10)'da gösterilmiştir.

$$\Delta y_m = \frac{\partial g_m}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial g_m}{\partial x_m} \Delta x_m + \frac{\partial g_m}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial g_m}{\partial u_q} \Delta u_q \quad (3.10)$$

Denklem (3.9) ve Denklem (3.10)'un yapılarını özetlemek gerekirse Denklem (3.11) ve Denklem (3.12) formatında yazılabilir.

$$\Delta \dot{x} = A\Delta x + B\Delta u \quad (3.11)$$

$$\Delta \dot{y} = C\Delta x + D\Delta u \quad (3.12)$$

Burada $A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_m} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_m} \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_q} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial u_q} \end{bmatrix}$

$C = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_m} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial x_m} \end{bmatrix}$, $D = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial u_q} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial u_q} \end{bmatrix}$

Tüm hesaplama sürecine, güç sisteminde küçük bozulma etrafında doğrusallaştırma denir. Özdeğerleri elde etmek için doğrusallaştırma süreci gereklidir. Karakteristik denklem Denklem (3.13)'de gösterilmiştir.

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (3.13)$$

Burada λ , A matrisinin özdeğeridir. λ değeri genellikle bir sistemin kararlılığını temsil eder. Kontrol sistemindeki bilgilere dayanarak,

$\lambda < 0$ ise sistem kararlı.

$\lambda = 0$ ise sistem kritik konumdadır.

$\lambda > 0$ ise sistem kararsızdır.

Özdeğerler eşlenik olduğunda, öz değerin gerçekte kısmı sönümlenme büyüklüğünü temsil eder, imajiner kısım salınımların frekansını verir [40].

4. SENKRON MAKİNE DÜZENLEYİCİLERİ

Bu bölümde senkron makinelerin kontrol edilebilmesi amacıyla kullanılan elemanlara değinilmiştir. Bunlar; Türbin Yöneticisi, Otomatik Gerilim Regülatörü ve Güç Sistemi Kararlı Kılıcılarında [41].

4.1. TÜRBİN YÖNETİCİSİ (TY)

Türbin Yöneticileri (TY'ler) senkron makinelerin öcelikli frekans kontrolünü sağlar. Mekanik moment limitleri ve düşme oranına bağlı olarak makinenin çalışma güç oranı ayarlanır. Sistemde mekanik moment sınır değeri başlangıç adımında doğrulanmaktadır. İki tip türbin yöneticisi modeli kullanılmaktadır. İlk modelde referans açısal hız ile makinenin o anda ki açısal hızı arasındaki fark $1/R$ oranında bir kazanç bloğu ile çarpılarak ikincil aktif güç ile toplanmasıyla giriş gücü hesaplanmıştır. Tip-1 modelin matematiksel ifadeleri Denklem (4.1) ve Denklem (4.6) arasında gösterilmiştir.

$$p_{in}^* = p_{order} + \frac{1}{R}(\omega_{ref} - \omega) \quad (4.1)$$

$$p_{in} = \begin{cases} p_{in}^* & \text{if } p^{\min} \leq p_{in}^* \leq p^{\max} \\ p^{\max} & \text{if } p_{in}^* > p^{\max} \\ p^{\min} & \text{if } p_{in}^* < p^{\min} \end{cases} \quad (4.2)$$

$$\dot{x}_{g1} = (p_{in} - x_{g1}) / T_s \quad (4.3)$$

$$\dot{x}_{g2} = \left(\left(1 - \frac{T_3}{T_c} \right) x_{g1} - x_{g2} \right) / T_c \quad (4.4)$$

$$\dot{x}_{g3} = \left(\left(1 - \frac{T_4}{T_5} \right) \left(x_{g2} + \frac{T_3}{T_c} x_{g1} \right) - x_{g3} \right) / T_5 \quad (4.5)$$

$$p_m = x_{g3} + \frac{T_4}{T_5} \left(x_{g2} + \frac{T_3}{T_c} x_{g1} \right) \quad (4.6)$$

İkinci modelde ise yine aynı şekilde referans açısal hızı ile reel açısal hız arasındaki fark $1/R$ kazanç bloğuyla çarpılmış sonrasında bir transfer fonksiyonu bloğuna girdikten sonra

farklı olarak mekanik gücün başlangıç değeriyle toplanmasıyla mekanik gücün son değeri elde edilmiştir. Tip-2 türbin yöneticisi modelinin matematiksel ifadeleri ise Denklem (4.7) ve Denklem (4.9) arasında gösterilmiştir.

$$\dot{x}_g = \left(\frac{1}{R} \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) (\omega_{ref} - \omega) - x_g \right) / T_2 \quad (4.7)$$

$$p_m^* = x_g + \frac{1}{R} \frac{T_1}{T_2} (\omega_{ref} - \omega) + p_m^0 \quad (4.8)$$

$$p_m = \begin{cases} p_m^* & p^{\min} \leq p_m^* \leq p^{\max} \\ p^{\max} & p_m^* > p^{\max} \\ p^{\min} & p_m^* < p^{\min} \end{cases} \quad (4.9)$$

Burada ω_{ref} referans hız, p^{\max} maksimum türbin çıkışı, p^{\min} minimum türbin çıkışı, T_s yönetici zaman katsayısı, T_c servo zaman katsayısı, T_3 geçici kazanç zaman katsayısı, T_4 güç oranı zaman katsayısı, T_5 reheat zaman katsayısı, u bağlantı durumu olarak tanımlanmıştır [3].

4.2. OTOMATİK GERİLİM REGÜLATÖRÜ (OGR)

Otomatik Gerilim Regülatörleri (OGR'ler), senkron makinelerin birincil voltaj regülasyonunu tanımlar. Pratikte birkaç OGR modeli önerilmiş ve gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, üç basit OGR türü açıklanmaktadır. OGR Tip-1, standart dc uyarıcı IEEE Tip 1'in basitleştirilmiş halidir, OGR Tip-2 ise statik uyarıcı modelidir. OGR Tip-3, temel kararlılık analizleri için kullanılabilir en basit OGR modelidir. Ayrıntılı sistem çok daha karmaşık olmasına rağmen, birincil voltaj regülasyonunun çekirdeği OGR, uyarıcı ve makine d eksenini emk'dan oluşan bir transfer fonksiyonuna indirgenebilir. OGR kazancına bağlı olarak, sistem kararlı veya kararsız olabilir [42], [43].

4.2.1. Otomatik Gerilim Regülatörü Tip-1

OGR Tip-1'de anlık olarak ölçülen gerilim ve sistemin referans geriliminin farkı alınarak bir transfer fonksiyona girmektedir. Bu transfer fonksiyonu bloğunun çıkışı ise rotor referans gerilimini vermektedir. Uyarım gerilimi ise Rotor referans gerilimi ile doyum oranı arasındaki farkın alınmasıyla oluşur [43]. OGR Tip-1'in matematiksel ifadesi Denklem (4.10) ve Denklem (4.14) arasında gösterilmiştir.

$$\dot{v}_m = \frac{V - v_m}{T_r} \quad (4.10)$$

$$\dot{v}_{r1} = \frac{1}{T_1} \left[\mu_0 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) (v_{ref} - v_m) - v_{r1} \right] \quad (4.11)$$

$$\dot{v}_{r2} = \frac{1}{T_4} \left[\left(1 - \frac{T_3}{T_4} \right) (v_{r1} + \mu_0 \frac{T_2}{T_1} (v_{ref} - v_m)) - v_{r2} \right] \quad (4.12)$$

$$v_r^* = v_{r2} + \frac{T_3}{T_4} \left[v_{r1} + \mu_0 \frac{T_2}{T_1} (v_{ref} - v_m) - v_{r1} \right] \quad (4.13)$$

$$\dot{v}_f = -\frac{1}{T_e} \left[v_f (1 + S_e(v_f)) - v_r \right] \quad (4.14)$$

4.2.2. Otomatik Gerilim Regülatörü Tip -2

OGR Tip-2 önceki DC uyarıcıdan daha hızlı yanıt ile karakterize edilen tipik bir statik uyarıcıyı modellemektedir.

Bu modelde ölçülen gerilim ile referans gerilim arasındaki fark alınarak sonrasında lede edilen değer ile uyarım gerilimi arasındaki fark kontrol bloğuna girmektedir. Minimum ve maksimum değerler arasındaki uygun verilerin seçilip ayarlanmasıyla rotor gerilimi oluşmaktadır. Bu rotor gerilimi ve doyum oranı arasındaki farkın alınmasıyla elde edilen sonuç transfer fonksiyonu ile çarpılarak uyarım gerilimi elde edilmektedir. OGR Tip-2'nin matematiksel ifadesi Denklem (4.15) ve Denklem (4.18) arasında gösterilmiştir.

$$\frac{dv_{r1}}{dt} = \frac{1}{T_a} \left[Ka \left(v_{ref} - v_m - v_{r2} - \frac{K_f}{T_f} v_f \right) - v_{r1} \right] \quad (4.15)$$

$$\frac{dv_m}{dt} = \frac{V - v_m}{T_r} \quad (4.16)$$

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

$$\frac{dv_{r2}}{dt} = -\frac{1}{T_f} \left(\frac{K_f}{T_f} v_f + v_{r2} \right) \quad (4.18)$$

4.2.3. Otomatik Gerilim Regülatörü Tip-3

OGR Tip-3, temel kararlılık çalışmaları için faydalı olabilecek basit bir modeldir. Güç sistemi kararlı kılıcısı (GSKK) giriş sinyalinin transfer fonksiyona girmesiyle kaynak gerilimi alınmaktadır. OGR Tip-3'ün matematiksel ifadesi Denklem (4.19) ve Denklem (4.21) arası gösterilmiştir.

$$\dot{v}_m = \frac{V - v_m}{T_r} \quad (4.19)$$

$$\dot{v}_r = \frac{1}{T_2} \left[\mu_0 \left(1 - \frac{T_1}{T_2} (v_{ref} - v_m) - v_r \right) \right] \quad (4.20)$$

$$\dot{v}_f = \frac{1}{T_e} \left[\left(v_r + \mu_0 \frac{T_1}{T_2} (v_{ref} - v_m) + v_{f0} \right) \frac{V}{V_0} - v_f \right] \quad (4.21)$$

Burada v_{ref} OGR'nin referans gerilimi, v_m Ölçülen gerilim, v_f Geri besleme gerilimi, μ_0 Regülatör kazancı, T_1, T_2, T_3, T_4 OGR zaman sabitleri, T_e Alan devresi sabiti T_r Ölçüm süresi sabiti, $v_{r,\min}$ v_r 'nin alt limiti, $v_{r,\max}$ v_r 'nin üst limiti, v_{r1} Yükseltici durum değişkeni, v_{r2} Dengeleyici durum değişkeni, S_e Uyarıcının doygunluk fonksiyonu, V_{f0} İlk alan gerilimi, V_0 Bara offset gerilimidir.

4.3. GÜÇ SİSTEMİ KARARLI KILICILARI (GSKK)

Güç Sistemi Kararlı Kılıcıları (GSKK'lar), güç sistemi salınımlarını sönmölemek için kullanılır.

Literatürde birkaç GSKK modeli önerilmiştir fakat temelde GSKK'nin çalışma mantığı tüm kontrol tipleri için aynıdır.

GSKK'nın çalışma mantığını anlamak için senkron makinenin sönmösüz elektromekanik modelini Denklem (4.22) ve Denklem (4.33) arasında gösterilmiştir.

$$2H \frac{\partial \omega}{\partial t} = p_m - p_e(\delta) \quad (4.22)$$

Buradan:

$$p_e(\delta) = \frac{e_q' v_h}{x_d} \sin(\delta - \theta_h) \quad (4.23)$$

Yukarıdaki ifadeyi çözümlersek ve P_m mekanik gücü sabit varsayılırsa Denklem (4.24) yazılabilir.

$$2Hs\Delta\omega = -\frac{\partial p_e}{\partial \delta} \Delta\delta - \frac{\partial p_e}{\partial e_q'} \Delta e_q' - \frac{\partial p_e}{\partial v_h} \Delta v_h \quad (4.24)$$

e_q' ve v_h sabit ise Denklem (4.25) ortaya çıkar.

$$2Hs\Delta\omega = -\frac{\partial p_e}{\partial \delta} \Delta\delta = -k\Delta\delta \quad (4.25)$$

$$k = \frac{e_q' v_h}{x_d} \cos(\delta_0 - \theta_0) \quad (4.26)$$

$$\Delta\omega = s\Delta\delta$$

$$2Hs^2\Delta\delta + k\Delta\delta = 0 \quad (4.27)$$

Burada bir çift özdeğere sahip olan kompleks kökler Denklem (4.28)'de gösterilmiştir.

$$\lambda_{1,2} = \pm j \sqrt{\frac{k}{2H}} \quad (4.28)$$

GSKK Denklem (4.29)'daki değişikliği yapabilmemize imkan verir.

$$\Delta v_h = k_1 \Delta\delta \quad (4.29)$$

$$2Hs\Delta\omega = -k\Delta\delta - k_\omega s\Delta\delta \quad (4.30)$$

$$k_\omega = k_1 \frac{\partial p_e}{\partial p_q} \quad (4.31)$$

$$2Hs^2\Delta\delta + k_\omega s\Delta\delta + k\Delta\delta = 0 \quad (4.32)$$

Buradan da negatif gerçekte kısmı olan bir çift kompleks özdeğer içeren Denklem (4.33) ortaya çıkar.

$$\lambda_{1,2} = -\frac{k_\omega}{4H} \pm j \sqrt{\frac{8kH - k_\omega^2}{4H}} \quad (4.33)$$

Uygulamada, OGR'ye aktif güç veya rotor frekansı ile orantılı bir geri besleme sinyali eklenerek elde edilir. Tipik GSKK giriş sinyalleri, rotor hızı ω , aktif güç p_h ve ayrıca GSKK'nın otomatik gerilim regülatörü aracılığıyla bağlandığı generatörün bara gerilimi v_h 'dir. GSKK çıkış sinyali v_s , OGR'nin referans gerilimi v_{ref} 'i değiştiren bir sinyaldir. Bu çalışma da üç temel GSKK modelinden bahsedilmiştir.

GSKK Tip-1'de açısal hız, giriş gücü ve generatör bara gerilimleri toplanarak kaskat bağlı transfer fonksiyonu bloklarına girmektedir. Blok çıkışında gerilimin minimum-maksimum aralıklarını ayarlanarak referans gerilim ifadesiyle toplanmasıyla çıkış sinyali elde edilmektedir. GSKK Tip-1'in matematiksel ifadesi Denklem (4.34) ve Denklem (4.35)'te verilmiştir.

$$\dot{v}_1 = -(K_\omega \omega + K_p P_g + K_v V_g + v_1) / T_\omega \quad (4.34)$$

$$\dot{v}_s = (K_\omega \omega + K_p P_g + K_v V_g + v_1 + v_s) / T_e \quad (4.35)$$

GSKK Tip-2 giriş sinyalinin arka arkaya 4 transfer fonksiyon bloğuna girerek çıkışta gerilimin minimum-maksimum değerlerinin ayarlanmasıyla generatör kaynak gerilimi elde edilerek oluşturulmuştur. GSKK Tip-2'nin matematiksel ifadesi Denklem (4.36) ve Denklem (4.39) arasında gösterilmiştir.

$$\dot{v}_1 = -\frac{K_\omega V_{sl} + v_1}{T_\omega} \quad (4.36)$$

$$\dot{v}_2 = \frac{1}{T_2} \left[\left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) (K_\omega V_{sl} + v_1) - v_2 \right] \quad (4.37)$$

$$\dot{v}_3 = \frac{1}{T_4} \left\{ \left(1 - \frac{T_3}{T_4} \right) \left[v_2 + \frac{T_1}{T_2} (K_\omega V_{sl} + v_1) \right] - v_3 \right\} \quad (4.38)$$

$$\dot{v}_s = \frac{1}{T_e} \left\{ v_3 + \frac{T_3}{T_4} \left[v_2 + \frac{T_1}{T_2} (K_\omega V_{sl} + v_1) \right] - v_s \right\} \quad (4.39)$$

GSKK Tip-3'de GSKK giriş sinyali 3 transfer fonksiyon bloğuna girerek senkron generatör kaynak gerilimi oluşturulmaktadır. GSKK Tip-3'e ait matematiksel ifade Denklem (4.40) ve Denklem (4.43) arasında verilmiştir.

$$\dot{v}_1 = -\frac{K_\omega V_{sl} + v_1}{T_\omega} \quad (4.40)$$

$$\dot{v}_2 = \frac{1}{T_4} v_3 + \frac{1}{T_4} \left(T_1 - T_2 \frac{T_3}{T_4} \right) (K_\omega V_{SI} + v_1) \quad (4.41)$$

$$\dot{v}_3 = -v_2 - \frac{T_2}{T_4} v_3 + \left[1 - \frac{T_3}{T_4} - \frac{T_2}{T_4} \left(T_1 - T_2 \frac{T_3}{T_4} \right) \right] (K_\omega V_{SI} + v_1) \quad (4.42)$$

$$\dot{v}_s = \frac{1}{T_e} \left[v_2 + \frac{T_3}{T_4} (K_\omega V_{SI} - v_1) - v_s \right] \quad (4.43)$$

Burada v_1 Arındırma sinyali, v_s GSKK çıkış sinyali, P_g GSKK bağlı iken aktif güç, V_g gerenarötün gerilimi, K_v Gerilim kazancı, T_ω Arındırma sabiti, T_e Anti-windup zaman sabitidir [47], [48].



5. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖR (ÇBAG)

Şebekeye bağlı Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG)'ın devre modeli Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Asenkron generatörlerin rotor ve stator akı dinamiklerinin güç şebekesinin dinamiklerine göre daha hızlı yanıt verdiği düşünülmektedir. Ayrıca asenkron generatörlerde güç elektroniği tabanlı kontrolcüler sayesinde generatörün rotor hızı şebekeden bağımsız hale gelmektedir. Bu şekilde avantajlarından dolayı yapılan çalışmada ÇBAG kullanılması tercih edilmiştir. ÇBAG'ün kararlı hal denklemleri Denklem (5.1) ve Denklem (5.4) arasında gösterilmiştir [49].

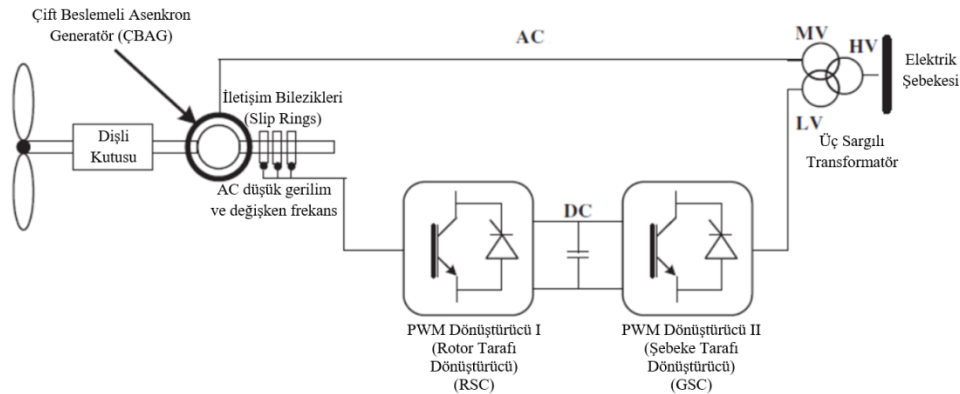
$$v_{ds} = -R_s i_{ds} + ((X_s + X_m) i_{qs} + X_m i_{qr}) \quad (5.1)$$

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

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

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

Burada v_{ds} ve v_{qs} d-q eksen stator gerilimleri, v_{dr} ve v_{qr} d-q eksen rotor gerilimleri, i_{ds} ve i_{qs} d-q eksen stator akımları, i_{dr} ve i_{qr} d-q eksen rotor akımları, R_s Stator direnci, X_s stator reaktansı, R_r Rotor direnci, X_r Rotor reaktansı, X_m Mıknatıslanma reaktansı, ω_m Rotor hızıdır [45], [46].



Şekil 5.1. ÇBAG devre modeli.

ÇBAG'de şebekeye verdiği güç, güç elektroniği tabanlı dönüştürücünün çalışma moduna ve stator-rotor akımlarına bağlıdır. Bunun için ÇBAG'de eşitlikleri yazarken bu parametreler göz önünde bulundurularak yazılmalıdır. ÇBAG şebeke tarafındaki güç eşitlikleri ve rotor tarafındaki güç eşitlikleri Denklem (5.5) ve Denklem (5.8) arasında gösterilmiştir.

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

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

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

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

Burada v_{dg} ve v_{qg} Şebeke kısmı dönüştürücü d-q eksen gerilimleri, i_{dg} ve i_{qg} Şebeke tarafı dönüştürücünün d-q eksen akımlarıdır.

6. KATI OKSİT YAKIT HÜCRELERİ

Yakıt hücreleri üç bölümden oluşmaktadır. Bunlar yakıt işlemcisi, yakıt hücre devresi ve güç bağlantı birimidir. Güç işlemcisi bönüştürülme işleminin yapıldığı bölümdür. Yakıt hücresi devresi elektrokimyasallar vasıtasıyla elektriğin üretildiği bölümdür. Güç bağlantı birimi ise AC güç akım, gerilim ve frekans barındıran birimdir. Güç bağlantı birimi şebekenin ihtiyacı olan göre AC gücü DC güce dönüştürür. İki bloktan oluşur. İlk blok aktif ve reaktif güç bilgilerini gönderir ve şebekede analiz edilir. Bu blok şebeke ara yüz denetleyicisi olarak adlandırılmaktadır. İkinci blok ise yakıt hücresinin durağan modelden oluştuğu, bu blok ile diğer birimlerin dengeli ve kararlı bir şekilde çalışmasını sağlayan birimdir. Yakıt hücre akımının sabit güç kontrolü ile hesaplanma şekli Denklem (6.1)'de gösterilmiştir.

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

Burada, I_k yakıt hücresi akımı, V_{k0} başlangıç DC gerilimi, i_k başlangıç yakıt hücresi akımı, T_e küçük zaman sabitidir. Eğer yakıt hücresinin entegre edildiği şebekede giriş sinyali çok büyük olursa akım hesabı Denklem (6.2)'deki gibi olmaktadır.

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

Burada, U_{lim} minimum-maksimum yakıt sarfiyatı, H_2 hidrojen oranı, q soğutma katsayısı, K_r DC katsayısıdır. Yakıt hücresinin AC gerilimi modülasyon genliği vasıtasıyla ayarlanmaktadır. Modülasyon genlik ifadesi Denklem (6.3)'te gösterilmiştir.

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

Burada, m modülasyon genliği, K_m modülasyon katsayısı, V_{ref} referans gerilim, V_s ölçülen şebeke gerilimi, T_m modülasyon zaman sabitidir. Yakıt hücresinin DC gücü şebekeye aktif ve reaktif güç basmaktadır. Şebekeye ilave edilen aktif ve reaktif güç eşitlikleri Denklem (6.4) ve Denklem (6.5)'de gösterilmiştir.

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

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

Burada, V_t yakıt hücresinin çıkış gerilimi, X_t transformatör reaktansı, θ_t çıkış geriliminin faz açısı ve θ_s kaynak geriliminin faz açısıdır. Kaynak gerilim açısı Denklem (6.6)'da gösterilmiştir.

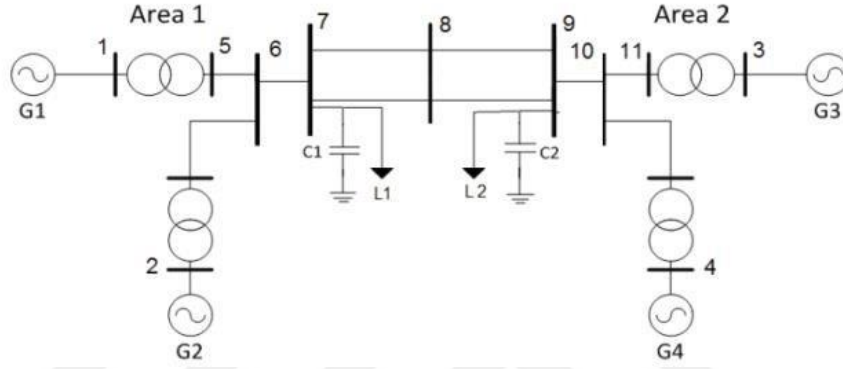
$$\theta_t = \theta_s + a \sin\left(\frac{X_t I_k}{K_m V_s}\right) \quad (6.6)$$

Denklem (6.6)'da verilen çıkış geriliminin açı ifadesi denklem (6.5) ile birleştirildiğinde Denklem (6.7) aşağıdaki şekilde olur [44].

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

7. BENZETİM ÇALIŞMASI

Bu tez çalışması Kundur'un 2 bölge test sistemi üzerinde senaryolar üretilerek gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Güç Sistemleri Analizi Programı'ndan (PSAT) yararlanılmıştır. Kundur'un 2 Bölge 4 generatörlü test sistemi Şekil 7.1'de gösterilmiştir.



Şekil 7.1. 2 bölge güç sistemi devre modeli.

Kundur'un iki bölge test sisteminde 1 adet salınım barası, 4 adet generatör, 12 adet iletim hattı, iki adet yük bulunmaktadır. İki bölmeli test sisteminde 1-5, 2-6, 3-11, 4-10 iletim hatlarında gerilimi yükselten transformatörler kullanılmıştır. Kundur'un iki baralı test sistemindeki hat bilgileri ve generatör bilgileri Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.1. 2 bölge güç sisteminin hat parametreleri.

Hat sayısı	Baradan	Baraya	Hat empedansı (p.u.)		Suseptans (p.u.)
			Direnç	Reaktans	
1	1	5	0	0,15/9	0
2	2	6	0	0,15/9	0
3	3	11	0	0,15/9	0
4	4	10	0	0,15/9	0
5	5	6	25x0,0001	25x0,001	25x0,00175
6	10	11	25x0,0001	25x0,001	25x0,00175
7	6	7	10x0,0001	10x0,001	10x0,00175
8	9	10	10x0,0001	10x0,001	10x0,00175
9	7	8	110x0,0001	110x0,001	110x0,00175
10	7	8	110x0,0001	110x0,001	110x0,00175
11	8	9	110x0,0001	110x0,001	110x0,00175
12	8	9	110x0,0001	110x0,001	110x0,00175

Çizelge 7.2. 2 bölge güç sisteminin generatör bilgileri.

Bara	Güç (MVA)	X_d (pu)	X'_d (pu)	X''_d (pu)	T'_{d0} (s)	T''_{d0} (s)	X'_q (pu)	X''_q (pu)	T'_{q0} (s)	T''_{q0} (s)	H (s)
1	900	1,8	0,3	0,25	8	0,03	1,7	0,25	0,4	0,05	6,5
2	900	1,8	0,3	0,25	8	0,03	1,7	0,25	0,4	0,05	6,5
3	900	1,8	0,3	0,25	8	0,03	1,7	0,25	0,4	0,05	6,175
4	900	1,8	0,3	0,25	8	0,03	1,7	0,25	0,4	0,05	6,175

Bu çalışmada senaryolar Kundur'un iki bölmeli test sisteminde 1-1,05 saniyeleri arası meydana gelen 50 ms süreli üç faz kısa devre hatası ve bu hatadan dolayı ortaya çıkan kararsızlık durumlarının zaman domeninde incelenmesi üzerine kurulmuştur.

İlk senaryoda test sisteminde hiçbir düzenleyici elemanı yok iken, ikinci senaryoda generatörlere OGR ve GSKK elemanı eklenerek, üçüncü senaryoda generatörlere OGR ve GSKK ile birlikte TY elemanı kullanılmasıyla, dördüncü senaryoda sisteme ÇBAG tabanlı rüzgar türbini eklenmesiyle ve son senaryoda ise şebekeye katı oksit yakıt hücresi eklenerek kararlılık analizleri yapılmıştır.

Çalışmada her senaryo sonunda generatör ve yük baraları ayrı ayrı olmak üzere bara gerilimleri, generatör aktif-reaktif güçleri ve generatör açılma hızları grafikler halinde verilmiştir. Ayrıca her senaryoda küçük sinyal kararlılığı analizi yapılarak özdeğerler, osilasyon frekansları, sönümleme oranları ve katılım faktörleri tablolar halinde özdeğer grafikleri ile birlikte verilmiştir.

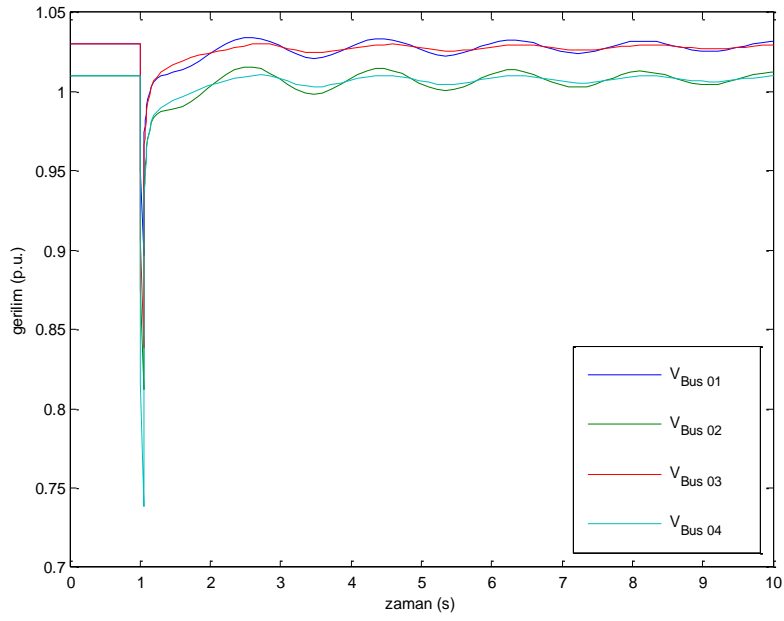
Çalışmada kullanılan OGR, GSKK ve TY'nin PSAT modelleri daha önceki çalışmalarda kullanılmış ve en iyi sonuç veren modeller olarak belirlenmiştir. Bu modeller OGR için Tip-2, GSKK için Tip-2 ve TY için Tip-2'dir. Dördüncü senaryoda test sistemine 1 numaralı baradaki generatör yerine eklenen 100 MVA ÇBAG tabanlı rüzgar türbini tek baralı bir iletim hattı üzerinden bağlanarak devreye alınmıştır. Son senaryoda ise yine 1 numaralı baraya rüzgar türbinine ek olarak katı oksit yakıt hücresi eklenerek sisteme 100 MVA, 115 MVA ve 150 MVA kapasite küçük sinyal kararlılığına etkisi incelenmiştir.



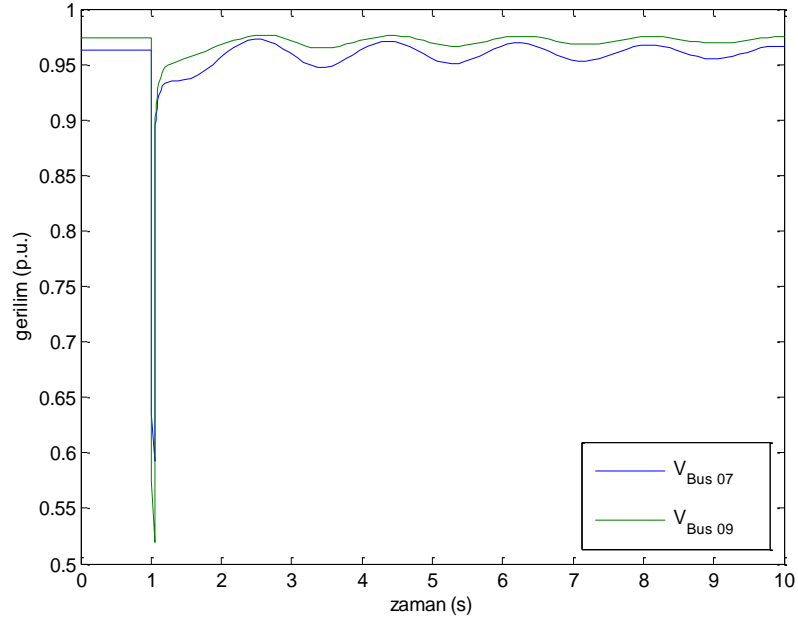
8. BENZETİM ÇALIŞMASI SONUÇLARI

8.1. GENERATÖRLERİN KONTROLSÜZ OLDUĞU DURUM

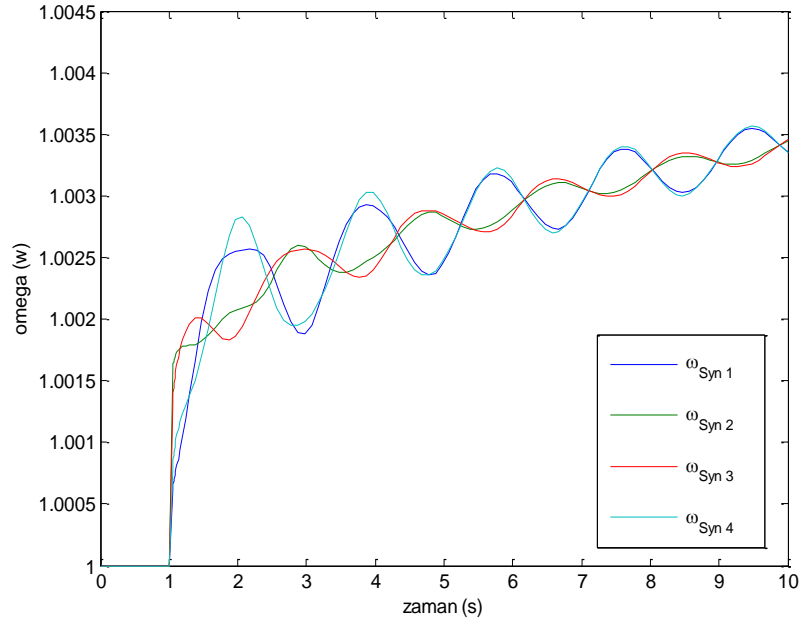
Bu senaryoda sistemde generatörlere ait bir GSKK, OGR ve TY bulunmamaktadır. Ayrıca sisteme henüz ÇBAG tabanlı rüzgar türbinleri ilave edilmemiştir. Mevcut şartlar altında yapılan analiz sonuçları Şekil 8.1, Şekil 8.2, Şekil 8.3, Şekil 8.4, Şekil 8.5, Şekil 8.6 ve Çizelge 8.1’de gösterilmiştir.



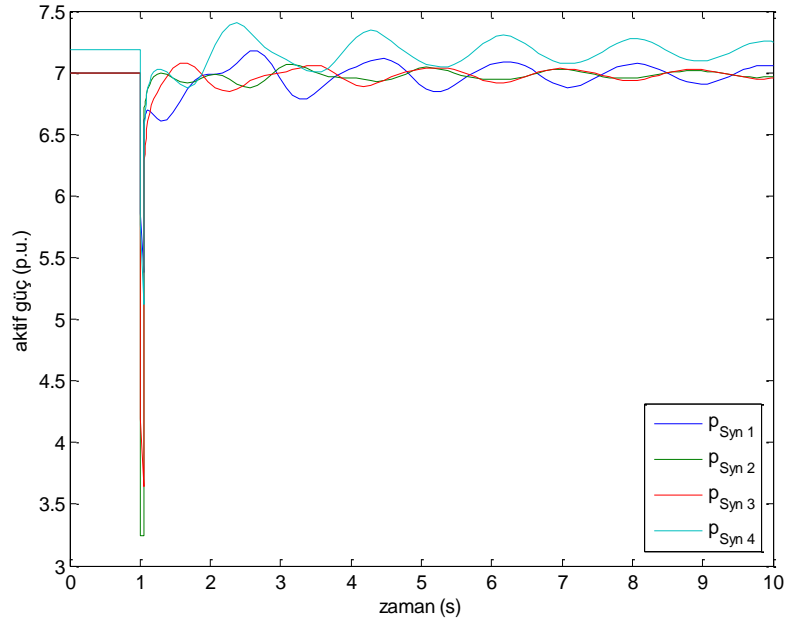
Şekil 8.1. Sistemde kontrol elemanı olmadığı durumda generatör gerilimleri.



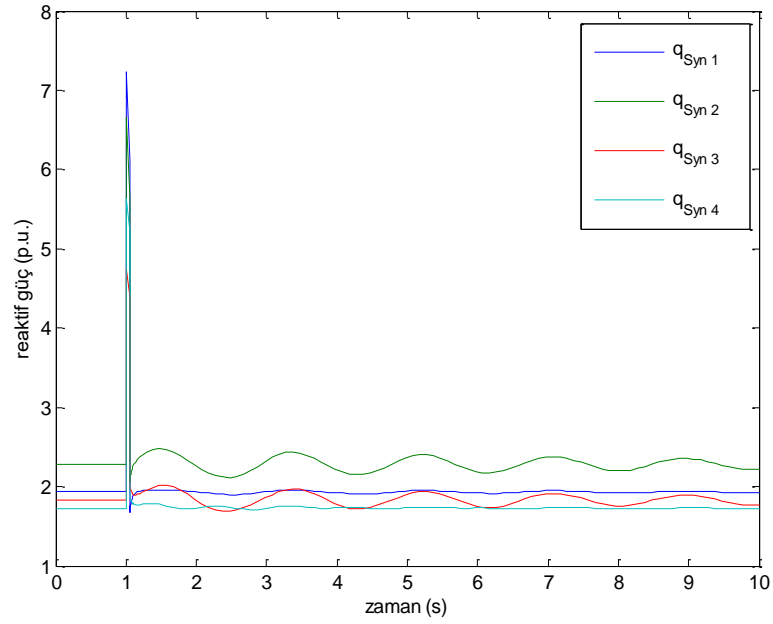
Şekil 8.2. Sistemde kontrol elemanı olmadığı durumda yük barası gerilimleri.



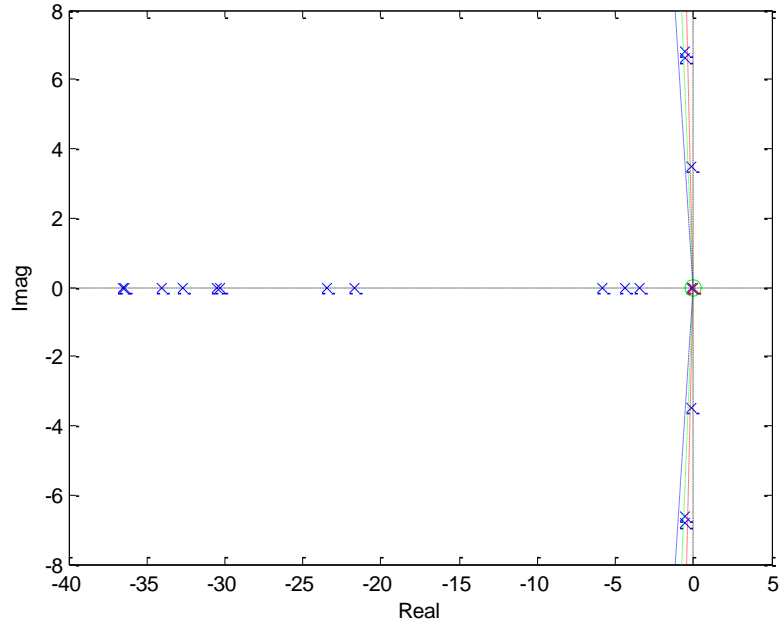
Şekil 8.3. Sistemde kontrol elemanı olmadığı durumda generatör açısal hızları.



Şekil 8.4. Sistemde kontrol elemanı olmadığı durumda generatör aktif güçleri.



Şekil 8.5. Sistemde kontrol elemanı olmadığı durumda generatör reaktif güçleri.



Şekil 8.6. Sistemde kontrol elemanı olmadığı durumda özdeğer analiz sonuçları.

Bu senaryoda sistemde hiçbir kontrol elemanı olmadığı durumda arıza anında salınımların çok fazla olduğu, gerilim çökmelerinin şiddetli yaşandığı görülmüştür. Bu durumda generatör barası gerilimleri 0,74 p.u. değerine yük barası gerilimleri ise 0,54 p.u. değerine kadar düşmüştür. Generatör açısal hızları ise salınımlı bir şekilde sonsuza gitmiştir. Generatör aktif gücünde 7 p.u. değerinden 3,2 p.u. gibi büyük bir düşüş gözlenmiştir.

Osilasyon sönümleme oranlarının %3 ile %8 arası düşük seviyelerde olmasından dolayı sistemde sönümlenemeyen kararsız salınımlar bulunmaktadır. İlk senaryoda katılım faktöründe en etkili ilişkili değişkenler bölgeler arası modda δ_1 ve ω_1 olup analize %25,6 oranında katılmışlardır fakat bu sönümleme oranı salınımları sönümlemek için yeterli olmamaktadır.

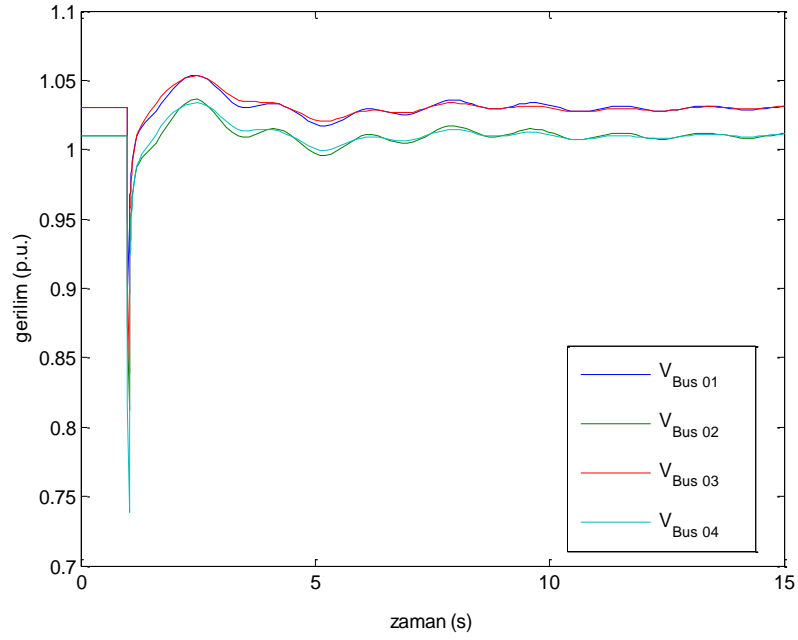
Çizelge 8.1. Sistemde kontrol elemanı olmadığı durumda küçük sinyal kararlılık analizi sonuçları.

Mod	Baskın Makineler	Özdeğerler	Osilasyon Frekansı (Hz)	Sönümlenme Oranı ζ (%)	Katılım Faktörü (%)
Yerel Mod-1	G ₁	-0,56 ± 6,79	1,0819	8,237	$\delta_1=25,6$ $\omega_1=25,6$
Yerel Mod-2	G ₂	-0,56 ± 6,61	1,0522	8,475	$\omega_2=24,8$ $\delta_2=24,8$
Böl. Arası Mod-1	G ₄	-0,12 ± 3,46	0,5511	3,598	$\omega_4=18,8$ $\delta_4=18,8$

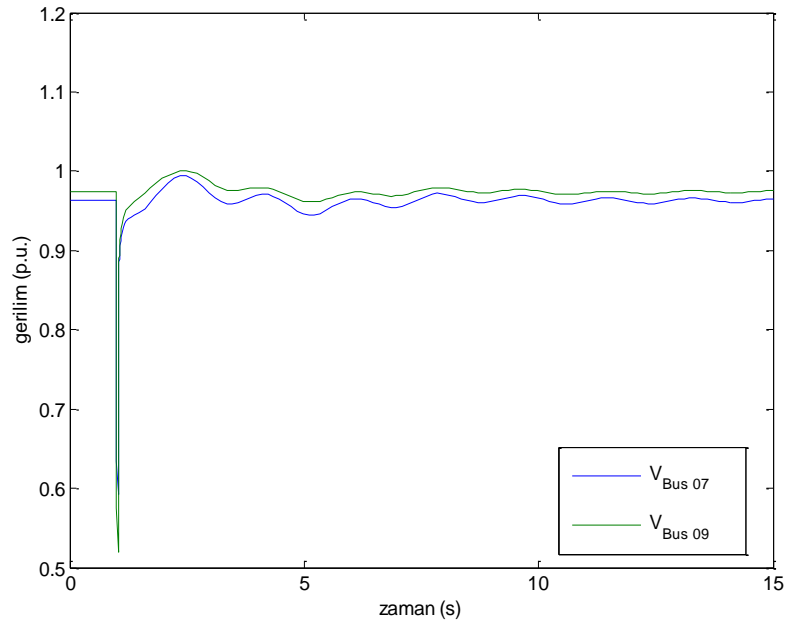
8.2. GENERATÖRLERE GSKK VE OGR İLAVE EDİLDİĞİ DURUM

İkinci senaryoda sistemde mevcut 4 tane generatöre GSKK ve OGR kontrolcileri ilave edilmiştir.

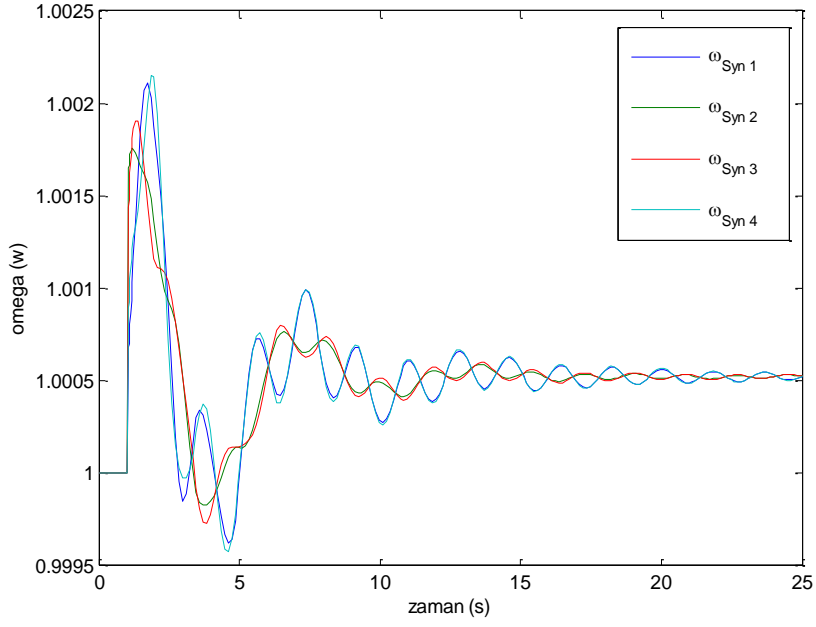
Sistemde kullanılan GSKK ve OGR tipleri farklı çalışmalarda en iyi sonuç veren tipler olarak seçilmiştir. Analiz sonuçları Şekil 8.7, Şekil 8.8, Şekil 8.9, Şekil 8.10, Şekil 8.11, Şekil 8.12 ve Çizelge 8.2' de gösterilmiştir.



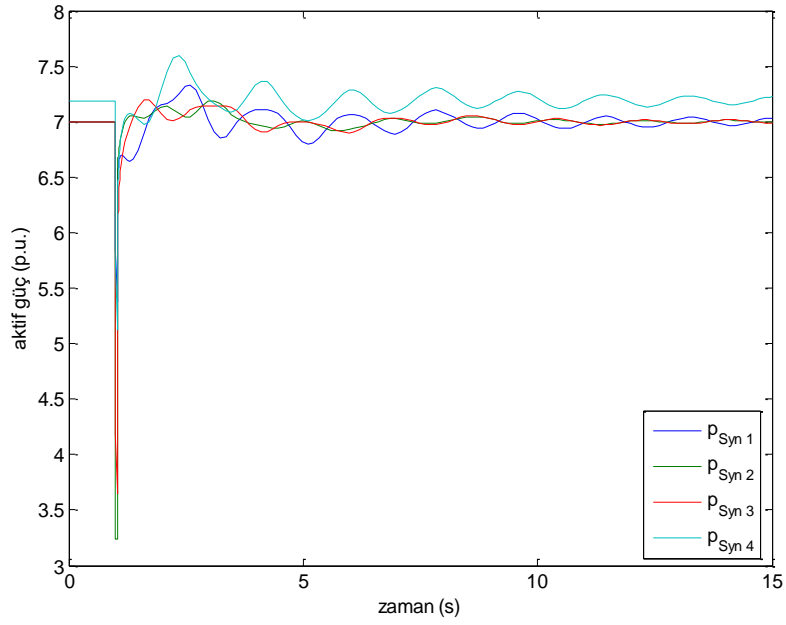
Şekil 8.7. Generatörlere GSKK ve OGR ilave edildiğinde generatör barası gerilimleri.



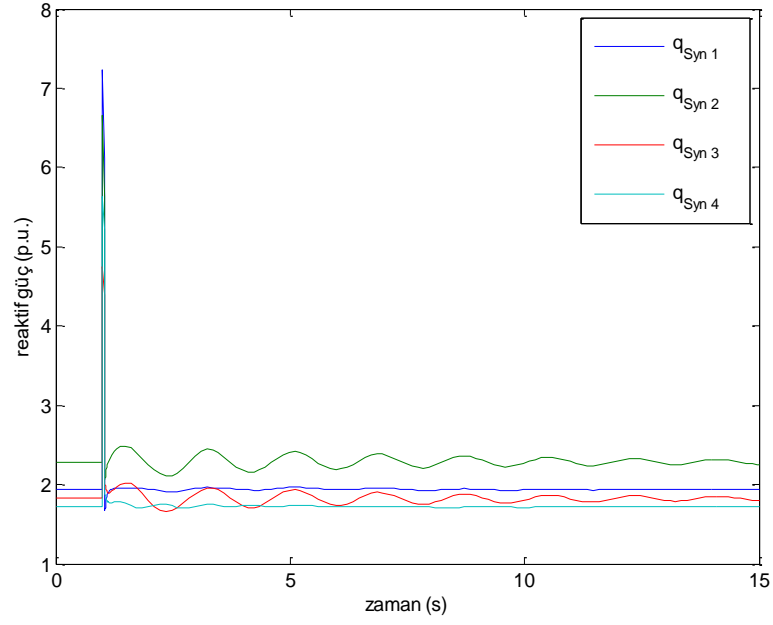
Şekil 8.8. Generatörlere GSKK ve OGR ilave edildiğinde yük barası gerilimleri.



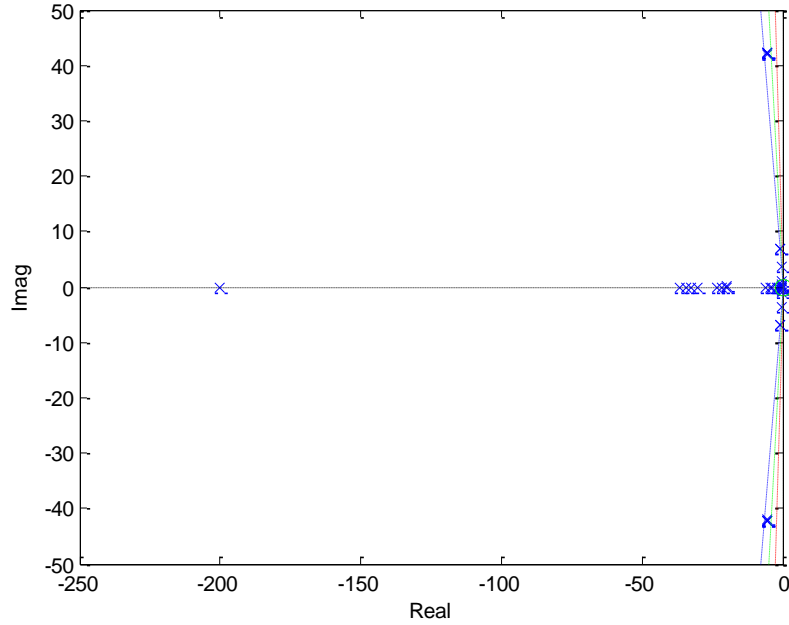
Şekil 8.9. Generatörlere GSKK ve OGR ilave edildiğinde generatör açısal hızları.



Şekil 8.10. Generatörlere GSKK ve OGR ilave edildiğinde generatör aktif güçleri.



Şekil 8.11. Generatorlere GSKK ve OGR ilave edildiğinde generator reaktif güçleri.



Şekil 8.12. Generatorlerde GSKK ve OGR olduğunda özdeğer analiz sonuçları.

İkinci senaryoda ilk senaryoda kullanılan sistemdeki generatorlere OGR Tip-2 ve GSKK Tip-2 kontrol elemanları ilave edilmiştir. Bu durumda sistemde özellikle osilasyon sönümlenmelerinde ilk senaryoya göre iyileşmeler görülmüştür. İkinci senaryoda sönümlenme oranları %8'in üzerinde olup, sistemin özdeğerleri zaman domeninin sol yarı bölgesine daha fazla yaklaştığından dolayı sistem daha kararlı hale gelmiştir. Generator

açısal hızları kararlı hâle geçme eğiliminde olsa da 20s süren dinamik analiz süresi boyunca sistem hâlâ tam kararlı hâle geçememiştir.

Sisteme OGR ve GSKK eklenmesinin arıza anında yaşanan kısa süreli gerilim çökmesi problemine ise büyük bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Katılım faktöründe en etkili ilişkili değişkenler bölgeler arası modda δ_1 ve ω_1 olup analize %24,5 ve %25,4 oranında katılmıştır.

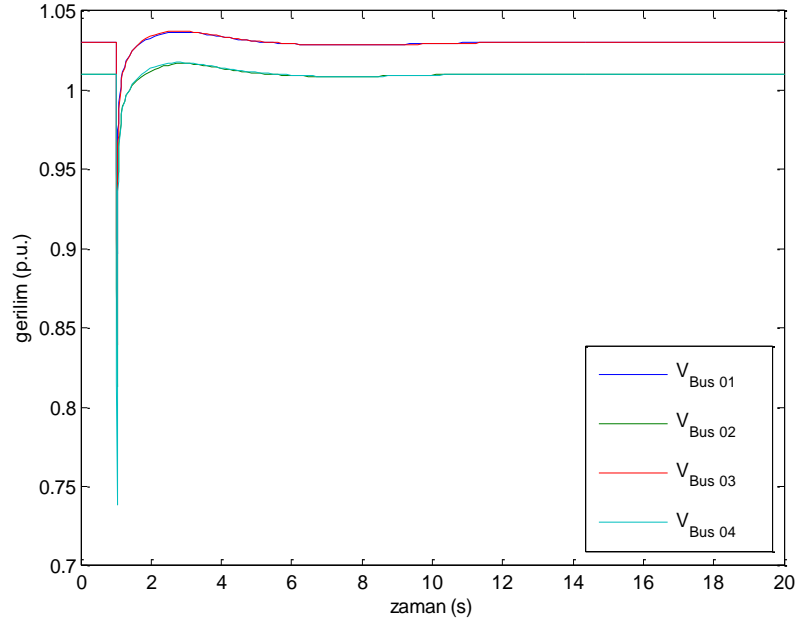
Çizelge 8.2. Generatörlere GSKK ve OGR ilave edildiğinde küçük sinyal kararlılık analizi sonuçları.

Mod	Baskın Makineler	Özdeğerler	Osilasyon Frekansı (Hz)	Sönümlenme Oranı ζ (%)	Katılım Faktörü (%)
Yerel Mod-1	G ₁	-0,597 $\pm j6,947$	1,1058	8,567	$\delta_1=24,5$ $\omega_1=25,4$
Yerel Mod-2	G ₂	-0,591 \pm j6,74	1,0737	8,728	$\omega_2=23,93$ $\delta_2=24,81$
Böl Arası Mod-1	G ₄ ,G ₁	-0,15 \pm j3,55	0,5652	4,234	$\delta_4=19,05$ $\delta_1=19,9$

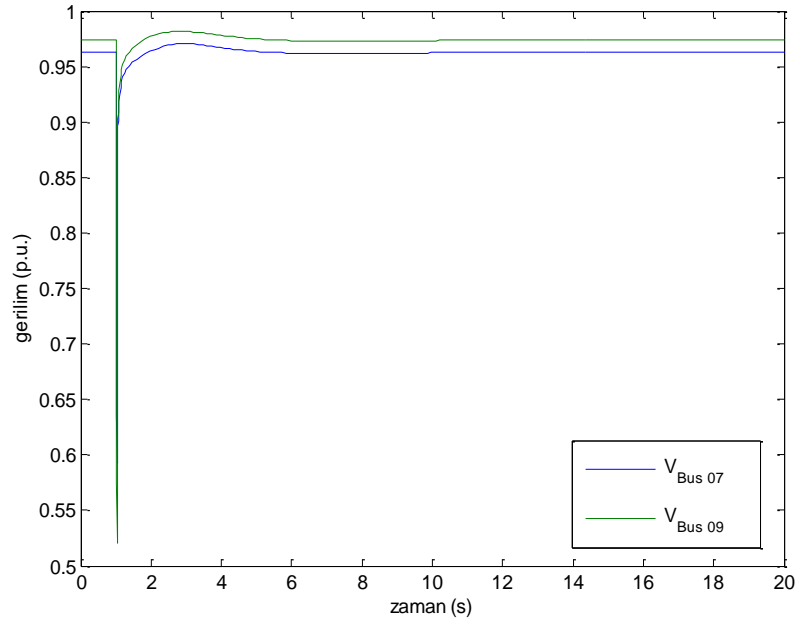
8.3. GENERATÖRLERE GSKK, OGR VE TY İLAVE EDİLDİĞİ DURUM

Bu senaryoda önceki senaryoya ek olarak güç sistemindeki generatörlere TY ilave edilmiştir.

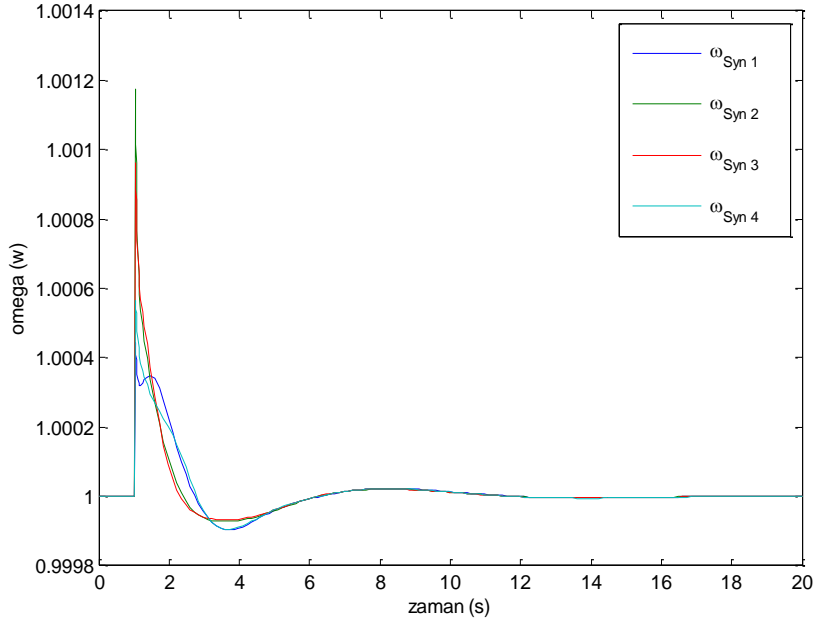
Sistemde kullanılan TY modeli, daha önceki çalışmalarda kullanılmış daha etkili performans veren Tip-2 modelidir. Analiz sonuçları Şekil 8.13, Şekil 8.14, Şekil 8.15, Şekil 8.16, Şekil 8.17, Şekil 8.18 ve Çizelge 8.3'te gösterilmiştir.



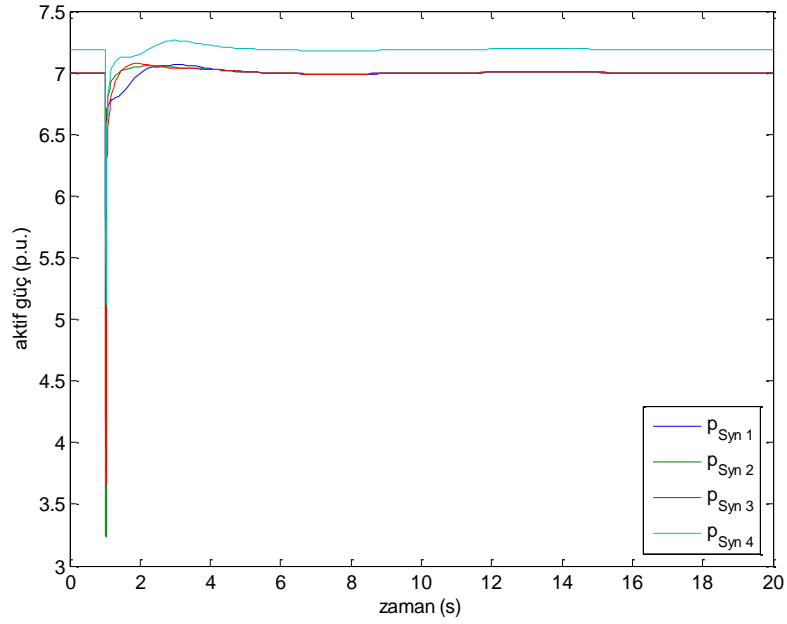
Şekil 8.13. TY ilave edilmiş test sistemindeki generatör barası gerilimleri.



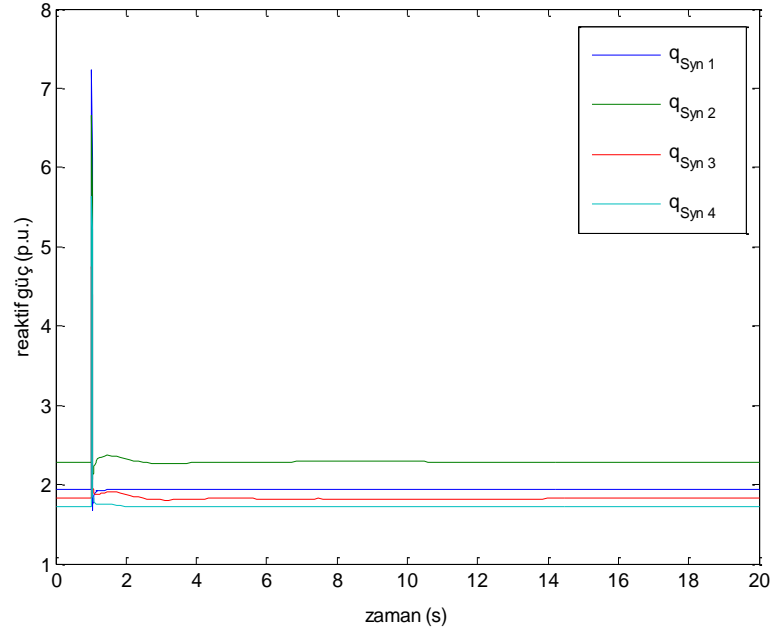
Şekil 8.14. TY ilave edilmiş test sistemindeki yük barası gerilimleri.



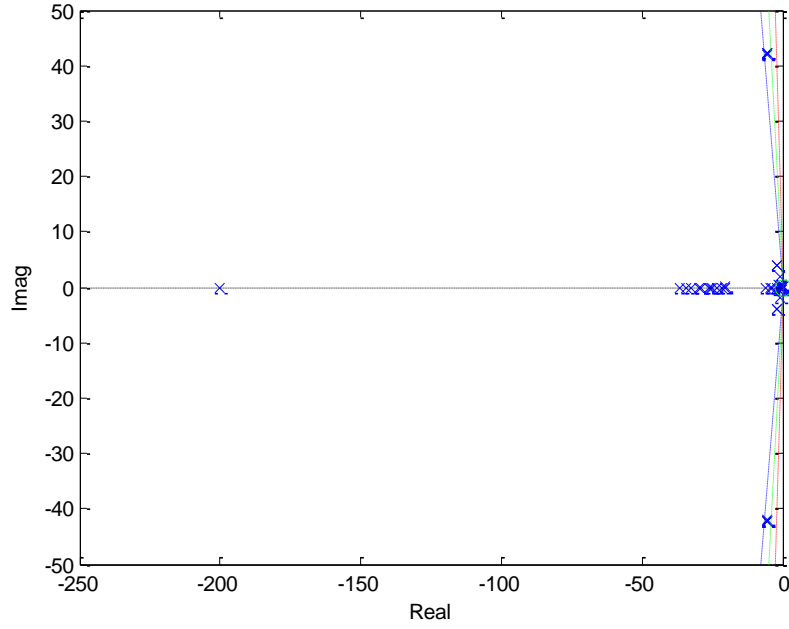
Şekil 8.15. TY ilave edilmiş test sistemindeki generatör açılmal hızları.



Şekil 8.16. TY ilave edilmiş test sistemindeki generatör aktif güçleri.



Şekil 8.17. TY ilave edilmiş test sistemindeki generatör reaktif güçleri.



Şekil 8.18. TY ilave edilmiş test sistemindeki özdeğer analizi sonuçları.

Üçüncü senaryoda ise mevcut sisteme ek olarak TY ilave edilmiştir. Bu durumda ikinci senaryoda çözülemeyen ani gerilim düşümü probleminde iyileşme gözlenmiştir. Sistemdeki dört generatörden üçünün arıza anında ki gerilim çökmeleri 0,9 p.u. değerine kadar iyileşmiştir. Ayrıca yük barası gerilimleri de arıza anında ani bir düşme yaşadıkdan snra kısa süre içerisinde toparlanma göstererek kararlı bir hale geçmiştir.

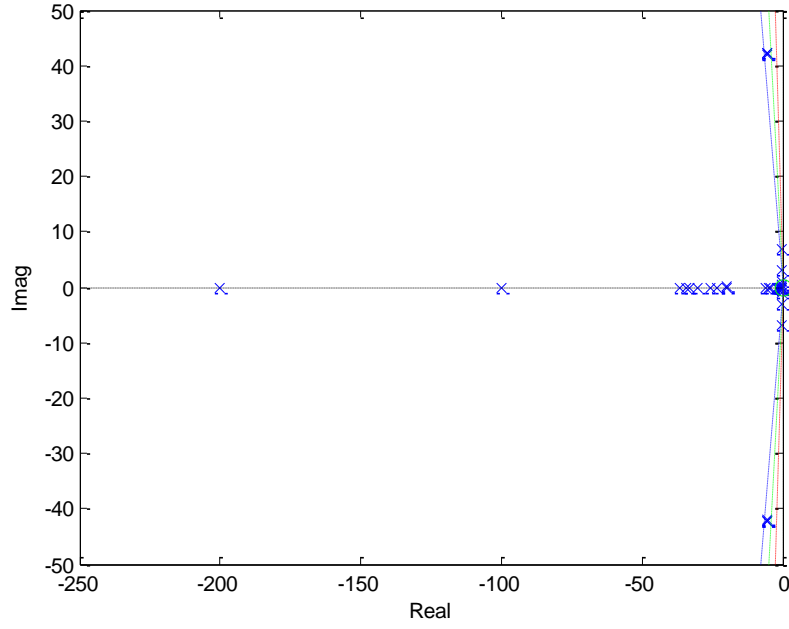
Osilasyon sönümlenme oranları ise sisteme TY ilave edildikten sonra çok büyük bir iyileşme göstererek %47 seviyelerine kadar yükselmiştir. Dahası dinamik analizde arıza meydana geldikten sonra 10 saniye içerisinde generatör açısal hız değişimleri kararlı bir hale gelerek lineer bir grafik elde edilmiştir. Sisteme TY ilave edildikten sonra generatörler alanlar arası modda etkileşime geçerek kararlılığa katkı sağlayıp yerel modda birbirleriyle etkileşime geçmediği gözlenmiştir. Katılım faktöründe en etkili ilişkili değişkenler bölgeler arası modda δ_1 olup analize %21,57 oranında katılmıştır.

Çizelge 8.3. TY ilave edilmiş test sistemindeki küçük sinyal kararlılık analizi sonuçları.

Mod	Baskın Makineler	Özdeğerler	Osilasyon Frekansı (Hz)	Sönümlenme Oranı ζ (%)	Katılım Faktörü (%)
Böl. Arası Mod-1	G ₁	-1,784 ± j3,89	0,6205	41,623	$\delta_1=21,57$
Böl. Arası Mod-2	G ₂ ,G ₃	-1,745 ± j3,85	0,6133	41,271	$\delta_2=20,72$
Böl. Arası Mod-3	G ₄ ,G ₁	-1,075 ± j1,98	0,3154	47,694	$\delta_4=17,11$ $\delta_1= 15,13$

8.4. GÜÇ SİSTEMİNE 100 MVA ÇBAG TABANLI RÜZGAR TÜRBİNİ EKLENDİĞİNDE OLUŞAN DURUM

Bu senaryoda güç sistemindeki 1 nolu barada bulunan generatör yerine 100 MVA ÇBAG rüzgar türbini eklenerek küçük sinyal analizi yapılmıştır. Özdeğer analizi sonucu Şekil 8.19'da gösterilmiştir.



Şekil 8.19. ÇBAG rüzgâr türbini eklenmiş durumdaki özdeğer analizi sonuçları.

Çizelge 8.4. 100 MVA ÇBAG tabanlı rüzgâr türbini ilave edilmiş test sistemindeki küçük sinyal kararlılık analizi sonuçları.

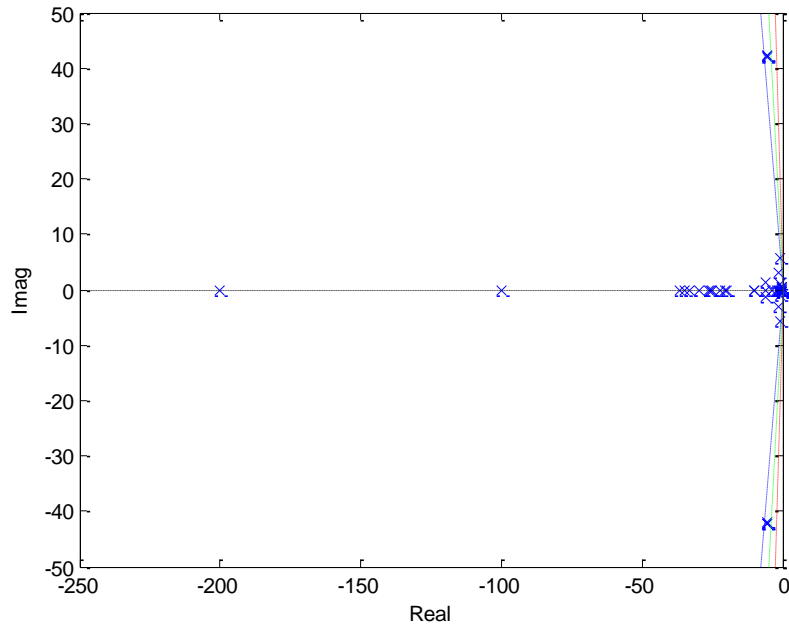
Mod	Baskın Makineler	Özdeğerler	Osilasyon Frekansı (Hz)	Sönümlenme Oranı ζ (%)	Katılım Faktörü (%)
Böl. Arası Mod-1	G ₁ ,G ₃	-1,83± 3,94	0,69	42,12	$\delta_1=22,3$ $\delta_3=17,9$
Böl. Arası Mod-2	G ₂ ,G ₃	-1,08 ± 2,15	0,38	44,88	$\delta_2=16$ $\delta_3= 14$
Böl. Arası Mod-3	G ₂ ,G ₁	-1,56 ±j0,33	0,25	97,83	Tg ₂ =15 PSS ₁ = 11

Bu durumda küçük sinyal analizinde etkili sönümlenme oranları elde edilmiştir. Sistemdeki osilasyonlar %51 oranında sönümlenmektedir.

Ayrıca sistemin özdeğerleri diğer senaryolara göre zaman domeninin daha fazla sol yarı bölgesinde kalmıştır bu durum da sistemin diğer senaryolara göre daha fazla kararlı olduğunu göstermektedir. Sisteme ÇBAG tabanlı rüzgar türbini eklenmesi bölgeler arası moda etkili olup ÇBAG'ın diğer senkron makinelerle etkileşime girerek kararlılığı iyileştirdiği görülmüştür. Katılım faktöründe en faydalı ilişkili değişkenler bölgeler arası moda δ_2 ve Tg_2 olup analize %34 ve %26,3 oranında katılmışlardır.

8.5. GÜÇ SİSTEMİNE KATI OKSİT YAKIT HÜCRESİ EKLENDİĞİNDE OLUŞAN DURUM

Bu senaryoda sisteme KOYH eklenerek yakıt hücresinin 100 MVA, 125 MVA ve 150 MVA olduğu durumda küçük sinyal kararlılığı analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları Şekil 8.20, Şekil 8.21, Şekil 8.22 ve Çizelge 8.5, Çizelge 8.6 Çizelge 8.7'de gösterilmiştir.

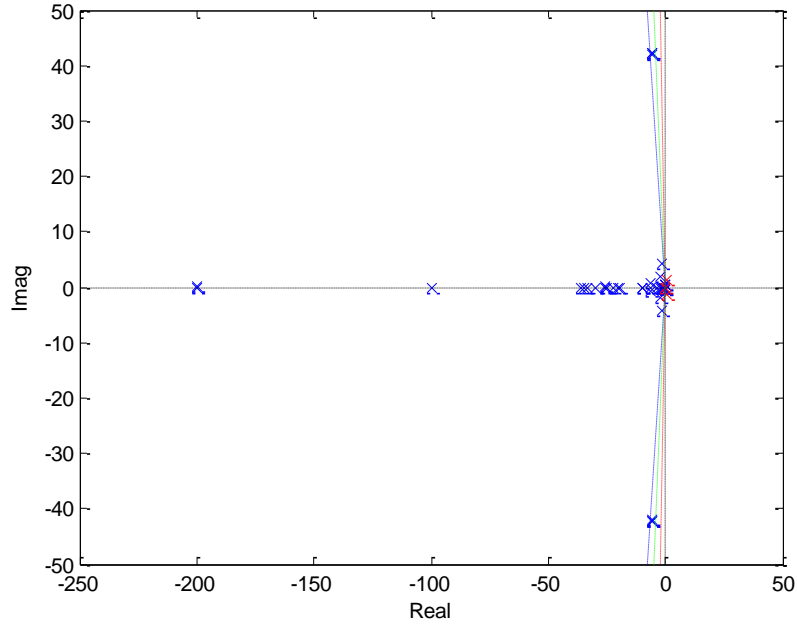


Şekil 8.20. 100 MVA KOYH eklenmiş durumdaki özdeğer analizi sonuçları.

Çizelge 8.5. 100 MVA KOYH ilave edilmiş test sistemindeki küçük sinyal kararlılık analizi sonuçları.

Mod	Baskın Makineler	Özdeğerler	Osilasyon Frekansı (Hz)	Sönümlenme Oranı ζ (%)	Katılım Faktörü (%)
Böl. Arası Mod-1	G ₃	-1,12± 5,76	0,93	19,08	$\omega_3=31,1$ $\delta_3=29,4$
Böl. Arası Mod-2	G ₂ ,YH	-5,83 ± 1,36	0,95	97,38	$e'_{d2}=46,4$ $m_{sofc}=42$
Böl. Arası Mod-3	G ₂	-1,17 ±j3,01	0,51	36,22	$\delta_2=27,4$ $T_{g2}= 17,6$

Son senaryoda sisteme 100 MVA'lık KOYH eklendiğinde sistemin bölgeler arası mod-1 ve 3'teki özdeğerleri artarak kararlılığı negatif etkilemiş olsa da katılım faktörüne %42 gibi yüksek bir yüzdeyle katılan m_sofc yakıt hücresi ilişkili değişkeni bölgeler arası mod-2'de %97,38 gibi bir sönümlenme oranı sağlayarak sistemin genel kararlılığını iyileştirmiştir.



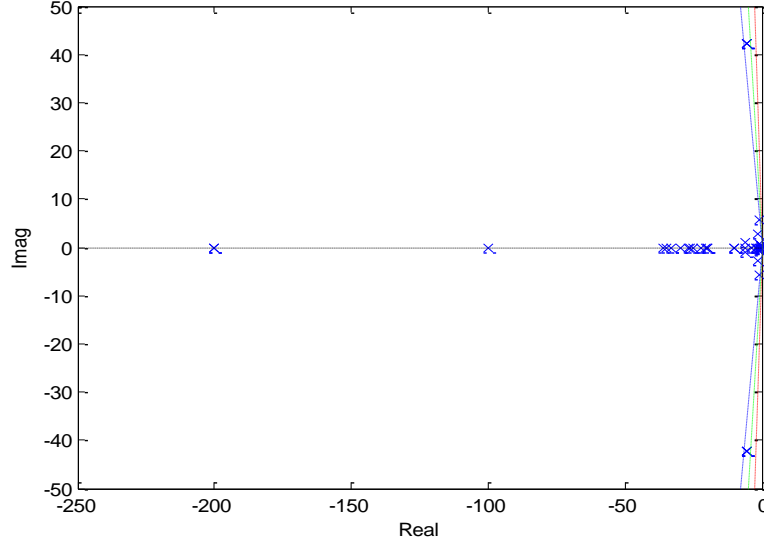
Şekil 8.21. 125 MVA KOYH ilave edilmiş test sistemindeki özdeğer analizi sonuçları.

Çizelge 8.6. 125 MVA KOYH ilave edilmiş test sistemindeki küçük sinyal kararlılık analizi sonuçları.

Mod	Baskın Makineler	Özdeğerler	Osilasyon Frekansı (Hz)	Sönümlenme Oranı ζ (%)	Katılım Faktörü (%)
Böl. Arası Mod-1	G ₃	-1,10 ± 5,72	0,92	18,88	$\omega_3=31,1$ $\delta_3=29,4$
Böl. Arası Mod-2	G ₂ , YH	-6,09 ± 1,13	0,98	98,32	$e'_{d2}=47,4$ $m_{sofc}=42,4$
Böl. Arası Mod-3	G ₂	-1,18 ± j2,86	0,49	38,13	$\delta_2=32,1$ $Tg_2=20,9$

Sisteme 125 MVA'lık KOYH eklendiğinde sistemin sadece bölgeler arası mod-1'deki öz değerleri artarak kararlılığı negatif etkilemiş, yakıt hücresinin 100 MVA olduğu duruma göre bölgeler arası mod-3'te de iyileşme gözlenmiştir. Katılım faktörüne %42,4 oranında

yüksek bir yüzdeyle katılan m_sofc yakıt hücresi ilişkili değişkeni bölgeler arası mod-2'de %98,32 gibi bir sönümlenme oranı sağlayarak sistemin genel kararlılığını 100 MVA yakıt hücresi olduğu duruma göre daha çok iyileştirmiştir.



Şekil 8.22. 150 MVA KOYH eklenmiş durumdaki özdeğer analizi sonuçları.

Çizelge 8.7. 150 MVA KOYH eklenmiş durumdaki küçük sinyal kararlılık analizi sonuçları.

Mod	Baskın Makineler	Özdeğerler	Osilasyon Frekansı (Hz)	Sönümlenme Oranı ζ (%)	Katılım Faktörü (%)
Böl. Arası Mod-	G_3, G_1	$-1,38 \pm 4,38$	0,73	30,05	$\omega_3=21,4$ $\delta_1=20,0$
Böl. Arası Mod	G_2, YH	$-6,25 \pm 0,84$	0,95	99,1	$e'_{d2}=48,04$ $m_sofc=42,6$
Böl. Arası Mod-	G_2	$-1,84 \pm j2,03$	0,51	67,15	$\delta_2=14,6$ $Tg_2= 13,5$

Sisteme 150 MVA'lık KOYH eklendiğinde analizler boyunca en etkili sonuçlar alınmıştır. Tüm modlardaki özeğerler negatif yönde artış göstererek sistemin genel kararlılığını arttırmıştır. Ayrıca yakıt hücresinin 150 MVA olduğu durumda en yüksek osilasyon sönümlene oranına ulaşılmıştır. Katılım faktörüne %42,6 oranında yüksek bir yüzdeyle katılan m_sofc yakıt hücresi ilişkili değişkeni Bölgeler arası mod-2'de %99,1 gibi yüksek bir sönümlene oranı sağlayarak sistemin genel kararlılığını en iyi seviyeye getirmiştir.



9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Kundur'un 4 makinalı 2 bölgeli sistemi kullanılarak küçük sinyal kararlılığı analizi incelenmiştir. Küçük sinyal kararlılığı analizinde öncelikli olarak çalışmada kullanılan OGR, GSKK ve TY modelleri literatürde yapılan çalışmalarda en iyi sonucu veren modeller olarak belirlenmiştir. Özdeğer analizinde elde edilen özvektörlerden sadece osilasyon frekansı 0,2 Hz ile 2 Hz aralığında olan bölgeler arası mod ve yerel mod içerisinde bulunan özdeğerler çizelgede gösterilmiştir. Sonrasında hiçbir kontrol modelinin kullanılmadığı durum, OGR ile GSKK'nin kullanıldığı durum ve OGR, GSKK ve TY modellerinin hepsinin kullanıldığı durumlarda küçük sinyal kararlılığı analizleri incelenmiştir. Dahası ÇBAG tabanlı rüzgar türbinin senkron generatörlerle kullanıldığı durum ve KOYH'nin farklı güç değerlerinde kullanılması ile sistemin küçük sinyal kararlılığı analizi gerçekleştirilmiş olup, elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. OGR, GSKK ve TY modellerinin birlikte kullanılması ile kontrol modeli kullanılmadığı durum ve OGR ile GSKK'nin kullanıldığı duruma göre parametrelerde görülen salınımların azaldığı görülmüştür. OGR, GSKK ve TY birlikte kullanılması ile küçük sinyal kararlılığı açısından etkili sonuçlar verdiği bu tez çalışmasında görülmüştür. ÇBAG tabanlı rüzgar türbininin 4 makinalı 2 alanlı sisteme ilave edilmesi ile özellikle de yerel mod çalışmada etkili olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra ÇBAG'ın her iki bölgedeki senkron makineler ile etkileşime girerek kararlılığı iyileştirdiği görülmüştür. Bu tez çalışmasında kullanılan KOYH'nin güç değerinin artması ile küçük sinyal kararlılığında hesaplanan özdeğerlerin çoğunun negatif olduğu ve sistem kararlılığını sağladığı görülmüştür.

Yapılan tez çalışmasında güç sistemlerinde kullanılan OGR, GSKK ve TY gibi kontrol elemanlarının önemi vurgulanmıştır, ayrıca bu elemanların birlikte kullanılmasının güç sistemleri için küçük sinyal kararlılığı açısından önemli olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde ÇBAG tabanlı rüzgar türbini ve KOYH'nin kullanılmasının küçük sinyal kararlılığı analizlerinde etkili sonuçlar verebileceği görülmektedir. Bu tez çalışması ile farklı güç sistemlerinde OGR, GSKK, TY, ÇBAG tabanlı rüzgar türbini ve KOYH'nin kullanılabilmesi, küçük sinyal kararlılığının yanı sıra açı kararlılığı ve gerilim kararlılığı çalışmalarında tercih edilebileceği görülmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan

elemanların Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi (FACTS) elemanlarından Statik Senkron Kompanzatör, Statik Var Kompanzatör, Statik Senkron Seri Kompanzatör, Tristör Kontrollü Seri Kompanzatör ve Birleştirilmiş Güç Akışı Kontrolü ile birlikte kullanılması ile küçük sinyal kararlılığı analizlerine zemin hazırlayabileceği öngörülmüştür.



10.KAYNAKLAR

- [1] H. Xin, D. Gan, Z. Qu, & J. Qiu, "Impact of saturation nonlinearities/disturbances on the small-signal stability of power systems: An analytical approach", *Electric Power systems Research*, c. 78, sayı 5, ss. 849-860, 2008.
- [2] H. Jia, X. Yu, Y. Yu & C. Wang, "Power system small signal stability region with time delay", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 30, sayı 1, 2008.
- [3] F. Milano, "Small-signal stability analysis of large power systems with inclusion of multiple delays", *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 31, sayı 4, ss. 3257-3266, 2015.
- [4] R. H. Salim & R. A. Ramos, "A model-based approach for small-signal stability assessment of unbalanced power systems", *IEEE Transactions on Power systems*, c. 27, sayı 4, ss. 2006-2014, 2012.
- [5] L. Wang & A. Semlyen, "Application of sparse eigenvalue techniques to the small signal stability analysis of large power systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 5, sayı 2, ss. 635-642, 1990.
- [6] P. Kundur, G. J. Rogers, D. Y. Wong, L. Wang & M. G. Lauby, "A comprehensive computer program package for small signal stability analysis of power systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 5, sayı 4, ss. 1076-1083, 1990.
- [7] L. Rouco, & I. J. Perez-Arriaga, "Multi-area analysis of small signal stability in large electric power systems by SMA", *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 8, sayı 3, ss. 1257-1265, 1993.
- [8] G. Angelidis & A. Semlyen, "Improved methodologies for the calculation of critical eigenvalues in small signal stability analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 11, sayı 3, ss. 1209-1217, 1996.
- [9] M. Parniani, & M. R. Iravani, "Computer analysis of small-signal stability of power systems including network Dynamics", *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, c. 142, sayı 6, ss. 613-617, 1995.
- [10] X. Wang, R. Yao & F. Rao, "Three-step impedance criterion for small-signal stability analysis in two-stage DC distributed power systems", *IEEE Power Electronics Letters*, c. 1, sayı 3, ss. 83-87, 2003.
- [11] J. Liu, X. Feng, F. C. Lee & D. Borojevich, "Stability margin monitoring for DC distributed power systems via perturbation approaches", *IEEE Transactions on Power Electronics*, c. 18, sayı 6, ss. 1254-1261, 2003.
- [12] M. Amin & M. Molinas, "Small-signal stability assessment of power electronics based power systems: A discussion of impedance-and eigenvalue-based methods", *IEEE Transactions on Industry Applications*, c.53, sayı 5, ss. 5014-5030, 2017.
- [13] C. Y. Chung, L. Wang, F. Howell & P. Kundur, "Generation rescheduling methods to improve power transfer capability constrained by small-signal stability", *IEEE*

- Transactions on Power Systems*, c. 19, sayı 1, ss. 524-530, 2004.
- [14] C. K. Pans, Z. Y. Dong, P. Zhang & X. Yin, “Probabilistic analysis of power system small signal stability region”, *International Conference on Control and Automation*, Budapeşte, Macaristan, 2005, ss. 503-509.
- [15] J. L. Rueda, D. G. Colome & I. Erlich, “Assessment and enhancement of small signal stability considering uncertainties”, *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 24, sayı 1, ss. 198-207, 2009.
- [16] C. Karawita & U. D. Annakkage, “A hybrid network model for small signal stability analysis of power systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 25, sayı 1, ss. 443-451, 2009.
- [17] W. Du, H. F. Wang, X. F. Zhang & L. Y. Xiao, “Effect of grid-connected solid oxide fuel cell power generation on power systems small-signal stability”, *IET Renewable Power Generation*, c. 6, sayı 1, ss. 24-37, 2012.
- [18] D. Lastomo, H. Setiadi, M. Faisal, A. Ashfahani, G. Bangga, G. Hutomo & I. Bumi, “The effects of energy storages on small signal stability of a power system”, *International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications*, Surabaya, Endonezya, 2017, ss. 52-57.
- [19] Z. Liu, W. Yao & J. Wen, “Enhancement of power system stability using a novel power system stabilizer with large critical gain”, *Energies*, c. 10, sayı 4, ss. 449-464, 2017.
- [20] K. T. Law, D. J. Hill & N. R. Godfrey, “Robust controller structure for coordinated power system voltage regulator and stabilizer design”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, c. 2, sayı 3, ss. 220-232, 1994.
- [21] H. Quinot, H. Bourles & T. Margotin, “Robust coordinated AVR+ PSS for damping large scale power systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 14, sayı 4, ss. 1446-1451, 1999.
- [22] K. Kumara & A. D. Srinivasan, “Design of optimal controllers for the power system stabilizer—Effect of operating conditions”, *Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies*, Coimbatore, Hindistan, 2017, ss. 1-6.
- [23] H. Delavari, & K. Flahzadeh, “Robust fractional order adaptive power system stabilizer for a multi-machine System”, *27th Iranian Conference on Electrical Engineering*, Yazd, İran, 2019, ss. 544-548.
- [24] W. Hu, C. Su, J. Fang & Z. Chen, “Comparison study of power system small signal stability improvement using SSSC and STATCOM”, *39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Vien, Avusturya, 2013, ss. 1998-2003.
- [25] D. Mondal, A. Chakrabarti & A. Sengupta, “Optimal placement and parameter setting of SVC and TCSC using PSO to mitigate small signal stability problem”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 42, sayı 1, ss. 334-340, 2012.
- [26] A. B. Khormizi & A. S. Nia, “Damping of power system oscillations in multi-machine power systems using coordinate design of PSS and TCSC”, *10th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Roma, İtalya, 2011, ss. 1-4.

- [27] W. Fang & H. W. Ngan, “Enhancing small signal power system stability by coordinating unified power flow controller with power system stabilizer”, *Electric Power Systems Research*, c. 65, sayı 2, ss. 91-99, 2003.
- [28] B. Mehta, P. Bhatt & 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.
- [29] G. Tsourakis, B. M. Nomikos & C. D. Vournas, “Effect of wind parks with doubly fed asynchronous generators on small-signal stability”, *Electric Power Systems Research*, c. 79, sayı 1, ss. 190-200, 2009.
- [30] D. Gautam, V. Vittal & T. Harbour, “Impact of increased penetration of DFIG-based wind turbine generators on transient and small signal stability of power systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 24, sayı 3, ss. 1426-1434, 2009.
- [31] J. Shi & C. Shen, “Impact of DFIG wind power on power system small signal stability”, *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference*, Washington, A.B.D., 2013, ss. 1-6.
- [32] J. Hu, H. Yuan & X. Yuan, “Modeling of DFIG-based WTs for small-signal stability analysis in DVC timescale in power electronized power systems”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, c. 32, sayı 3, ss. 1151-1165, 2017.
- [33] C. Qin & Y. Yu, “Small signal stability region of power systems with DFIG in injection space”, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, c. 1, sayı 2, ss. 127-133, 2013.
- [34] P. He, F. Wen, G. Ledwich & Y. Xue, “Small signal stability analysis of power systems with high penetration of wind power”, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, c. 1, sayı 3, ss. 241-248, 2013.
- [35] S. Essallah, A. Bouallegue & 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.
- [36] P. Kundur & L. Wang, “Small signal stability analysis: experiences, achievements, and challenges”, *Power Conference 2002*, Kunming, Çin, 2002, ss. 6-12.
- [37] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. V. Cutsem, & V. Vittal, “Definition and classification of power system stability”, *IEEE Transection Power Systems*, c. 19, sayı 2, ss. 1387-1401, 2004.
- [38] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, New York, A.B.D., McGraw Hill, 1994.
- [39] M. A. Pai, & D. P. Gupta, *Small Signal Analysis of Power Systems*, Harrow, İngiltere: Alpha Science International, 2004.
- [40] Westinghouse Electric Corporation, *Electrical Transmission and Distribution Reference*, Florida, A.B.D.: Westinghouse Electric & Manufacturing Company, 1942.
- [41] Extended Transient-Midterm Stability Program Ver. 3.1: User’s Manual, *Bilgisayar Programı*: EPRI, TR-102004-V2R1, 1994.

- [42] M. L. Crenshaw, K. E. Bollinger, R. T. Byerly, R. L. Cresap, L. E. Eilts, D. E. Eyre, F. W. Keay, P. Kundur, E. V. Larsen, D. C. Lee, J. F. Luini, R. G. Pillote, P. L. Dandeno, "Excitation system models for power system stability studies", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, c. 100, sayı 2, ss. 494-509, 1981.
- [43] F.P. DeMello & C. Concordia, "Concepts of synchronous machine stability as effected by excitation control", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, c. 88, ss. 316-329, 1969.
- [44] B. Yildirim & M. T. Gencoglu, "Oscillatory stability and eigenvalue analysis of power system with microgrid," *Electrical Engineering*, c. 100, sayı 4, ss. 2351-2360, 2018.
- [45] J. G. Sloopweg, H. Polinder, W. L. Kling, "Representing wind turbine electrical generating systems in fundamental frequency simulations.", *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 18, sayı 4, ss. 516-524, 2003.
- [46] J. Bhukya & V. Mahajan, "Modelling of power system stabilizer for double fed Induction generator based wind power system", *IEEE 8th Power India International Conference*, Kurukshetra, Hindistan, 2018.
- [47] E. Sorrentino & F. León, "Comparison among typical input signals of different types of Power System Stabilizers (PSS)", *IEEE Andean Conference*, Quito, Ekvador, 2020.
- [48] S. Essallah & A. Bouallegue, "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.
- [49] L. Adjoudj, F. Lakdja, "Synthesis integrating wind generation and FACTS of network", *International Conference on Electrical Sciences and Technologies*, Mağrip, Tunus, ss. 1-6, 2014.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Mahmut ÖZBAY

Yabancı Dili :İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2021
Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2017
Lise	Bilişim Teknolojileri	Yahya Günsür Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi	2011

YAYINLAR

- [1] M. K. Döşoğlu, M. Özbay, M. Dursun, G. Poyraz & B. Küçük, “Effects on static voltage stability of the nonlinear load modelling in power systems”, *International Multidisciplinary Congress of Eurasia*, Roma, İtalya, 2017.
- [2] M. K. Döşoğlu, M. Özbay, M. Dursun, G. Poyraz & B. Küçük, “ZIP yük modelinde maksimum yüklenme parametre değerinin STATCOM ve SVC ile iyileştirilmesi”, *II. International Scientific and Vocational Studies Congress*, Nevşehir, Türkiye, 2018.
- [3] M. K. Döşoğlu, M. Özbay, M. Dursun, G. Poyraz & B. Küçük, “Farklı güç sistemi denetleyici modelleri ile geçici durum analizinin incelenmesi”, *II. International Scientific and Vocational Studies Congress*, Nevşehir, Türkiye, 2018.

- [4] M. K. Döşoğlu & M. Özbay, “Farklı rüzgar gücü ve ZIP yük model parametre değerlerinin statik gerilim kararlılığı üzerindeki etkileri”, *International Marmara Science and Social Sciences Congress*, Kocaeli, Türkiye, 2018.
- [5] M. K. Döşoğlu & M. Özbay, “Güç sistemlerinde gerilim kararlılığı için STATCOM’un optimum yerleşim noktasının belirlenmesi”, *International Marmara Science and Social Sciences Congress*, Kocaeli, Türkiye, 2018.

