

**GÜÇ SİSTEMLERİNDEKİ ALANLAR ARASI SALINIM İÇİN
STATİK VAR KOMPANSATÖR (SVC) TABANLI
GENİŞ ALAN SÖNÜMLEME SİSTEMİ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞAMİL BAYCAN YALÇIN

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**MERSİN
TEMMUZ - 2019**

**GÜÇ SİSTEMLERİNDEKİ ALANLAR ARASI SALINIM İÇİN
STATİK VAR KOMPANSATÖR (SVC) TABANLI
GENİŞ ALAN SÖNÜMLEME SİSTEMİ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞAMİL BAYCAN YALÇIN

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**




**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Naci METE**

**MERSİN
TEMMUZ - 2019**

ONAY

Şamil Baycan YALÇIN tarafından Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Naci METE danışmanlığında hazırlanan "Güç Sistemlerindeki Alanlar Arası Salınım için Statik Var Kompansatör (SVC) Tabanlı Geniş Alan Sönümleme Sistemi Tasarımı" başlıklı çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından 24 Temmuz 2019 tarihinde yapılan Tez Savunma Sınavı sonucunda oy birliği ile Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Görevi	Ünvanı, Adı ve Soyadı	İmza
Üye	Doç. Dr. Alkan ALKAYA	
Başkan	Dr. Öğr. Üyesi Emrah BIYIK	
Üye	Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Naci METE	

Yukarıdaki Jüri kararı Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 08/08/2019 tarih ve 2019.21/1168 sayılı kararıyla onaylanmıştır.


Prof. Dr. Cahit BİLİM
Fen Bilimleri Enstitü Müdürü

Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, tablo ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

ETİK BEYAN

Mersin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğinde belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlâk kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
 - Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak kullandığımı,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
 - Bu tezin herhangi bir bölümünü Mersin Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı,
 - Tezin tüm telif haklarını Mersin Üniversitesi'ne devrettiğimi
- beyan ederim.

ETHICAL DECLARATION

This thesis is prepared in accordance with the rules specified in Mersin University Graduate Education Regulation and I declare to comply with the following conditions:

- I have obtained all the information and the documents of the thesis in accordance with the academic rules.
- I presented all the visual, auditory and written informations and results in accordance with scientific ethics.
- I refer in accordance with the norms of scientific works about the case of exploitation of others' works.
- I used all of the referred works as the references.
- I did not do any tampering in the used data.
- I did not present any part of this thesis as an another thesis at Mersin University or another university.
- I transfer all copyrights of this thesis to the Mersin University.

24 Temmuz 2019 / 24 July 2019

İmza / Signature



Öğrenci Adı ve Soyadı / Student Name and Surname

Samir Baycan YALGIN

ÖZET

GÜÇ SİSTEMLERİNDEKİ ALANLAR ARASI SALINIM İÇİN STATİK VAR KOMPANSATÖR (SVC) TABANLI GENİŞ ALAN SÖNÜMLEME SİSTEMİ TASARIMI

Enterkonnekte güç sistemlerinde, salınımlar kendiliğinden gerçekleşen olgulardır. Bu salınımlar, kontrol altına alınıp sönümlenmediği sürece güç sistemlerinin sürekli hal kararlılığına bozucu etki yapmaktadırlar ve bunun sonucunda kademeli bir şekilde kesintilere ve en nihayetinde sistemlerin belirli bir bölümünün çökmesine sebep olabilmektedirler. Bu salınımlar, lokal mod salınımlar, burulma mod salınımları, kontrol mod salınımları ve alanlar arası mod salınımlar olmak üzere dört farklı kategoride sınıflandırılabilirler. İki ayrı alandaki güç sisteminin zayıf hatlarla birbirlerine bağlanmasıyla oluşabilen alanlar arası salınımlar, bu iki sistem arasındaki güç transferi kapasitesini sınırlamaktadır ve zayıf bir sönümleme karakteristiğine sahiptirler. Bu salınımları sönümleyebilmek ve bütün sistemin sürekli hal kararlılığını sağlayabilmek için en bilinen ve yaygın olarak kullanılan kontrolörler güç sistemi kararlılaştırıcılarıdır (PSS). Ancak PSS'ler lokal salınımları sönümlemede iyi bir performans gösterebilirken alanlar arası salınımları sönümlemede her zaman etkili olamamaktadırlar. Bu durum alanlar arası salınım gözlemlenebilirliğinin PSS girişlerinde kullanılan lokal sinyallerde düşük olması ile açıklanabilir. Senkron ölçüm sistemlerinin yaygınlaşmasıyla şebekenin herhangi bir noktasından alınan ölçümler –global sinyaller- bir iletişim ağı aracılığıyla kontrol birimlerine iletilmekte ve şebekenin gözlemi, korunması ve kontrolü gibi amaçlar için kullanılmaktadır. Global sinyallerin alanlar arası salınım sönümleme kontrolünde lokal sinyallerden daha etkili olduğu gösterilmiştir. Ancak bu sinyallerin kapalı devre kontrol için kullanımında değişken zaman gecikmeleri ve paket düşümleri gibi iletişim ağı kaynaklı problemler kontrolör tasarımında gözletilmelidir. Asıl fonksiyonları bağlı oldukları hatlardaki voltaj profilini düzenlemek olan Statik VAR kompensatörleri (SVC), referans voltajlarına eklenen sönümleme sinyali ile alanlar arası salınım sönümlemek amacı ile de kullanılabilirler.

Bu çalışmada alanlar arası salınım sönümleme çalışmaları için referans model olan 2 alanlı 4 generatörlü Kundur modeli kullanılarak SVC tabanlı bir geniş alan sönümleme kontrol sistemi tasarlanmıştır. Sönümleme de kullanılan global sinyal geometrik ölçü kullanılarak belirlenmiştir. Ağ gecikmeleri değişken olarak kabul edilmiş ve sönümleme sisteminin test edilmesi için bir gecikme profili tasarlanmıştır. Değişken ağ gecikmelerinin telafisi için global sinyallerin zaman etiketlerini kullanan bir telafi algoritması geliştirilmiştir. Önerilen sönümleme sistemi hem Matlab/SIMULINK kullanarak hem de OPAL-RT markalı gerçek zamanlı simülatörde denenmiş ve sonuçlar sunulmuştur. Sonuçlarda gerçek zamanlı simülatörden elde edilen sonuçlar ve simülasyondan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Statik Var Kompensatörü, Güç Sistemi Kararlılaştırıcısı, Sürekli Hal Kararlılığı.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Naci METE, Mersin Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin.

ABSTRACT

STATIC VAR COMPENSATOR (SVC) BASED WIDE AREA DAMPING SYSTEM DESIGN FOR INTER-AREA OSCILLATION IN POWER SYSTEMS

In interconnected power systems, oscillations may occur inherently. If these oscillations are not damped properly, they will degrade the steady-state stability of power systems and may lead to cascaded blackouts and even some parts of power system may collapse eventually. These oscillations can be classified as local modes, torsional modes, control modes and inter-area modes. Inter-area oscillations which can be originated by connecting two power systems in two different areas with weak tie lines, limit the power transfer across the areas and have low damping characteristics. The prevalent controllers so as to damp oscillations and to provide steady-state stability are power system stabilizers (PSS). However, PSSs can perform well in damping local oscillations, but they are not always effective in damping inter-field oscillations. This can be explained by the fact that inter-field oscillation observability is low in local signals used in PSS inputs. With the spread of synchronous measurement systems, measurements taken from any point of the power grid - global signals - are transmitted to the control units through a communication network and used for purposes such as grid monitoring, protection and control. Global signals have been shown to be more effective in inter-area oscillation damping control than local signals. However, in the use of these signals for closed-loop control, communication network-related problems such as variable time delays and packet drops must be considered in controller design. Static VAR compensators (SVC), whose main function is to regulate the voltage profile on the lines to which they are connected, can also be used to damp the inter-area oscillations with supplementary damping signal added to their reference voltages.

In this study, a SVC based wide area damping control system was designed by using the 2-field 4-generator Kundur model, which is the reference model for inter-field oscillation damping studies. The global signal used in the damping was determined using the geometric measure. The network delays are considered variable and a delay profile is designed to test the damping system. A compensation algorithm has been developed that uses time tags of global signals to compensate for variable network delays. The proposed damping system has been tested using both Matlab / SIMULINK and the OPAL-RT real-time simulator and the results are presented. In conclusion section, results which are achieved from real time simulator and simulation are compared.

Keywords: Static VAR Compensator, Power System Stabilizer, Steady-state Stability.

Advisor: Asst. Prof. Dr. Ahmet Naci METE, Department of Electrical-Electronic Engineering, University of Mersin, Mersin.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösterici ve destek olan değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Naci Mete'ye sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmam boyunca bana çalışma olanağı ve ortamı sağlayan Mersin Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'ne teşekkür ederim.

Tez jüri üyelerimden Sayın Doç. Dr. Alkan Alkaya'ya ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Emrah Bıyık'a olumlu yaklaşımları, yapıcı eleştirileri ve aktardığı bilgilerden dolayı teşekkür ederim.

Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim birimine 2018-1-TP2-2846 numaralı araştırma projesi kapsamında gerçekleştirilen "Güç Sistemlerindeki Alanlar Arası Salınım için Statik Var Kompansatör (SVC) Tabanlı Geniş Alan Sönümlenme Sistemi Tasarımı" adlı çalışma için maddi desteklerinden ötürü teşekkür ederim.

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) sağlamış olduğu kariyer geliştirme programı kapsamında yer alan 116E127 numaralı "Fazör Ölçüm Ünitesi Sinyalleri Tabanlı bir Adaptif Geniş Alan Sönümlenme Kontrol Sistemi Tasarımı ve Gerçek Zamanlı Uygulanması" adlı çalışma için maddi desteklerinden ötürü teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, hayatım boyunca beni her koşulda motive eden aileme ve TÜBİTAK projesi boyunca bana destek olan proje arkadaşım Mahir Bülent Başel'e en içten teşekkür ve sevgilerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇ KAPAK	i
ONAY	ii
ETİK BEYAN	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR ve SİMGELER	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI	4
2.1. Literatür Taraması	4
2.2. Geniş Alanlı Gözleme Sistemleri (WAMS)	7
2.2.1. Denetleyici Gözetim ve Veri Toplama Sistemleri (SCADA)	8
2.2.2. Eşzamanlı Ölçüm Teknolojisi (SMT)	8
2.2.2.1. Fazör Ölçüm Ünitesi (PMU)	9
2.2.2.2. Fazör Veri Toplayıcısı (PDC)	11
2.3. Güç Sistemlerinde Kararlılık	11
2.3.1. Küçük-Sinyal Kararlılığı	12
2.3.1.1. Modsal Analiz	14
2.3.1.2. Modların Gözlemlenebilirliği ve Kontrol Edilebilirliği	16
2.4. Güç Sistemi Kararlılaştırıcısı (PSS)	18
2.4.1. PSS Tasarımı	19
2.5. Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS)	20
2.5.1. Statik VAR Kompansatörü (SVC)	21
2.6. Yük Akışı Analizi	22
2.6.1. Gauss- Seidel Yöntemi	22
2.6.2. Newton-Raphson Yöntemi	22
3. MATERYAL ve YÖNTEM	24
3.1. İki Alanlı Dört Generatörlü Güç Sistemi Modeli	24
3.2. Yük Akışı Analizi ve Sistemin Doğrusallaştırılması	25
3.3. İletişim Ağındaki Zaman Gecikmelerinin Modellenmesi ve Adaptif Kompanzasyonu	29
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	34
4.1. Modsal Analiz Sonucu Elde Edilen Modlar ve Gözlemlenebilirlik-Kontrol Edilebilirlik Değerleri	34
4.2. Lead Kontrolör Tasarımı Sonuçları	37
4.3. Yazılımsal Benzetim Sonuçları	38
4.3.1. Küçük Bozucu Tepkileri	39
4.3.2. Büyük Bozucu Tepkileri	40
4.4 Gerçek Zamanlı Benzetim Sonuçları	42
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	43
KAYNAKLAR	44
EKLER	49
ÖZGEÇMİŞ	66

TABLolar DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Generatör Verileri	24
Tablo 3.2. İletim Hattı Verileri	25
Tablo 3.3. Transformatör Verileri	25
Tablo 3.4. Sabit Empedans Yük Verileri	25
Tablo 3.5. Kondansatör Bankı Verileri	25
Tablo 3.6. Bara Gerilim Değerleri	26
Tablo 3.7. Hat Direnç Değerleri	26
Tablo 3.8. Güç Akışı Analizi Sonrasında Elde Edilen Bara Değerleri	26
Tablo 3.9. Güç Akışı Analizi Sonrasında Elde Edilen Güç Akış Değerleri	27
Tablo 3.10. Generatörlere ve Onların Kontrol Birimlerine Ait Durum Değişkenleri	28
Tablo 3.11. Değişken Zaman Gecikmesi Parametreleri	29
Tablo 4.1. Sistemde Bulunan Bazı Salınlı Modlar	34
Tablo 4.2. 34. Modun (Lokal) Gözlemlendiği Durum Değişkenleri	36
Tablo 4.3. 36. Modun (Lokal) Gözlemlendiği Durum Değişkenleri	36
Tablo 4.4. 34. Modun Katılım Faktörü Değerleri	36
Tablo 4.5. 36. Modun Katılım Faktörü Değerleri	37
Tablo 4.6. Lokal ve Alanlar Arası Modların Gözlemlenebilirlik Ölçütü	37
Tablo 4.7. Lokal ve Alanlar Arası Modların Kontrol Edilebilirlik Ölçütü	37
Tablo 4.8 Tasarlanan Adaptif Zaman Gecikmesi Kompansatör Verileri	38

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. EMS/SCADA Sistem Konfigürasyonu	8
Şekil 2.2. Virginia Tech Üniversitesi'nde geliştirilen PMU'nun saha kurulumu	9
Şekil 2.3. PMU Blok Diyagramı	10
Şekil 2.4. Sinüsoidal sinyal ve fazör olarak gösterimi	10
Şekil 2.5. Güç Sisteminde Kararlılık Sınıflandırılması	12
Şekil 2.6. PSS Blok Diyagramı	18
Şekil 2.7. Senkron Generatör ve Uyarım Sistemi	19
Şekil 2.8. Sabit kondansatör ve TCR'den oluşan 3 fazlı statik VAR kompensatörü	21
Şekil 2.9. SVC Blok Diyagramı	21
Şekil 3.1. İki alanlı dört generatörlü güç sistemi modeli	24
Şekil 3.2. Tasarlanan Değişken Zaman Gecikmesi	30
Şekil 3.3. Sabit ve Adaptif Periyotlu Anahtarlama Yapıları	31
Şekil 3.4. Sisteme Zaman Gecikmesi, Lead Kontrolör ve GPSS Eklendikten Sonraki Durumu	32
Şekil 4.1. Sistemde yer alan salınım modları	34
Şekil 4.2. Alanlar arası modun oluşumuna sebep olan generatörler	35
Şekil 4.3. Lead kontrolörlere ait Bode çizimleri	38
Şekil 4.4. 4. Generatörün Referans Girişine Uygulanan %5'lik Değişim Sonucu Elde Edilen Alanlar Arası Güç Transferinin GPSS Olduğundaki ve Olmadığındaki Durumu	39
Şekil 4.5. Alanlar Arası Zayıf Hat Üzerine Uygulanan 3 Faz Toprak Hatası Sonrası Güç Transferinin GPSS Olduğundaki ve Olmadığındaki Durumu	39
Şekil 4.6. 4. Generatörün Referans Girişine Uygulanan %5'lik Değişim Sonucu Elde Edilen Alanlar Arası Güç Transferinin GPSS'nin ve Zaman Gecikmesinin Durumuna Göre Değişimi	40
Şekil 4.7. Alanlar Arası Zayıf Hat Üzerine Uygulanan Uygulanan 3 Faz Toprak Hatası Sonrası GPSS'in Performansının Zaman Gecikmeli Duruma ve Zaman Gecikmeli Olmayan Duruma Göre Karşılaştırılması	41
Şekil 4.8. 4. Generatörün Referans Girişine Uygulanan %5'lik Değişim Sonucu Elde Edilen Alanlar Arası Güç Transferinin Zaman Gecikmeli Durumdaki ve Gecikmenin Telafi Edildiği Durumdaki Hali	41
Şekil 4.9. Alanlar Arası Zayıf Hat Üzerine Uygulanan Uygulanan 3 Faz Toprak Hatası Sonrası GPSS'in Performansının Zaman Gecikmeli Durumdaki ve Gecikmenin Telafi Edildiği Durumdaki Hali	42
Şekil 4.10. Gerçek Zamanlı Simülatörde Gerçekleştirilen Güç Transferi	42

KISALTMALAR ve SİMGELER

Kısaltma/Simgesi	Tanım
AVR	Otomatik Gerilim Regülatörü (Automatic Voltage Regulator)
EMS	Enerji Yönetim Sistemi (Energy Management System)
FACTS	Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (Flexible AC Transmission System)
GPSS	Global Güç Sistemi Kararlılaştırıcısı
PDC	Fazör Veri Toplayıcı (Phasor Data Concentrator)
PMU	Fazör Ölçüm Ünitesi (Phasor Measurement Unit)
PSS	Güç Sistemi Kararlılaştırıcısı (Power System Stabilizer)
PQ	Yük Barası
PV	Generatör Barası
RTU	Uzak Terminal Birimi (Remote Terminal Unit)
SCADA	Denetleyici gözetim ve veri toplama sistemleri (Supervisory Control and Acquisition)
SMT	Eşzamanlı Ölçüm Teknolojisi (Synchronized Measurement Technology)
SVC	Statik Var Kompansatörü (Static VAR Compensator)
THR	Buhar/gaz türbini hız regülatörü
TCR	Tristör Kontrollü Reaktör
WADC	Geniş Alan Sönümleme Kontrolü (Wide Area Damping Control)
WAMPAC	Geniş Alan Gözlemeleme, Koruma ve Kontrol (Wide Area Monitoring Protection and Control)
WAMS	Geniş Alanlı Gözlemeleme Sistemi (Wide Area Monitoring System)
YEK	Yenilenebilir Enerji Kaynağı
T_{ω}	Washout Filtre Zaman Sabiti
T_1, T_3	İleri (Lead) Zaman Sabiti
T_2, T_4	Geri (Lag) Zaman Sabiti
α_j	Tasarlanan PSS'in ileri zaman sabitinin geri zaman sabitine oranı
K	PSS Kazancı
ω	Salınım Frekansı (açısal)
σ	Sönümleme Durumu
f	Salınım Frekansı
m_{oi}	Gözlemlenebilirlik Ölçüsü
m_{ci}	Kontrol Edilebilirlik Ölçüsü
ϕ	Sağ Özvektörlerden Oluşan Modal Matris
ϕ_i	i. Sağ Özvektör
Ψ	Sol Özvektörlerden Oluşan Modal Matris
Ψ_i	i. Sol Özvektör

1. GİRİŞ

Günümüzde, elektrik enerjisine olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu ihtiyaçtan dolayı güç sistemlerinin üretim kapasitesi de giderek arttırılmaktadır. Güç sistemi operatörleri, daha fazla yüke güç sağlamak ve daha verimli kullanımı sağlamak adına senkron generatörleri birbirlerine paralel bir şekilde bağlamaktadırlar. Fakat elektrik enerjisi piyasasında devletler tarafından ortaya koyulan bir takım kısıtlayıcı düzenlemelerin kaldırılması (deregülasyon) ve çevresel koşulların da etkisiyle güç iletim sistemleri taşıyabilecekleri kapasite sınırına yakın bir şekilde ve daha fazla stres altında çalıştırılmak zorunda kalmışlardır [1,2]. Bu durum, güç sistemlerinin gürbüzlüğünde ve operasyonlarının tahmin edilebilirliğinde azalmaya, sistem içerisinde oluşan bozucu etkilerin (distürbans) muhtemel sebeplerinin artmasına yol açmaktadır [3]. Ayrıca, karbondioksit salımı azaltma amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) mevcut yapıdaki güç sistemlerine entegrasyon oranının artırılması bir takım teknik, ekonomik ve düzenleyici zorlukları da beraberinde getirmekte hatta güç sistemlerinde kararsızlıklara da sebep olabilmektedir [4]. Güç sisteminde oluşan kararsızlıklar ise son tüketiciye ulaştırılması gereken elektrik enerjisinde büyük çaplı kesintilere yol açmaktadır ve YEK'lerin dışında da çeşitli sebepleri bulunmaktadır. Bu duruma örnek olarak gösterilebilecek büyük ölçekli güç kesintilerinden bir tanesi 1987 yılında, Tokyo'da gerçekleşmiştir. Sıcak havadan dolayı kullanılan klimaların elektrik enerjisi talebini beklenenden çok fazla artırması, güç sisteminde dinamik gerilim kararsızlığına sebep olmuş ve 2.8 milyon son tüketiciyi etkileyen 3.4 GW'lık bir güç kesintisine yol açmıştır. 14 Ağustos 2003'te ABD-Kanada arasında gerçekleşen güç kesintisinin sebebi de güç sisteminde bulunan yetersiz reaktif güç kaynaklı voltaj kararsızlığıdır [5]. Bu tür kararsızlıkların önüne geçebilmek, verimliliği ve güvenilirliği artırmak için güç sistemleri birbirlerine bağlanmaktadır [6].

Senkron generatörlerin birbirlerine paralel bağlanması ve güç sistemlerinin enterkonnekte bir biçimde birbirine bağlanması elektromekanik salınımlara neden olmaktadır [7]. Bu salınımlar, güç sistemlerinin doğasında bulunan ve sönümlenmedikleri takdirde generatör kesintisine, iletim hattı kesintisine, güç sistemi ağında bölünmelere, ülkeler veya bölgeler arası güç transferi kapasitesinde kısıtlanmalara, hatta kimi zaman geniş ölçekli elektrik kesintilerine neden olan olgulardır [8-10]. Bu salınımların en bilinenleri, lokal ve alanlar arası salınımlardır. Lokal salınımların frekansı tipik olarak 0.8-2 Hz aralığındadır, alanlar arası salınımların frekansı ise 0.1-0.7 Hz aralığındadır [11]. Lokal salınımların sönümlenmesinde geleneksel olarak güç sistemi kararlılaştırıcısı (PSS) kullanılmakta iken, alanlar arası salınımlar için genellikle tristör kontrollü seri kondansatör (TCSC), statik var kompensatörü (SVC) gibi esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS) elemanları ya da yüksek gerilimli doğru akım iletim sistemleri (HVDC) kullanılmaktadır. FACTS elemanları alçak sinyal kararlılığı açısından alanlar arası salınımları

sönümlemede etkili bir performans gösterse de hat üzerinde bu elemanların kurulması PSS'e göre daha maliyetlidir. Fakat, PSS'lerin görevi, sadece generatörlerin uyarım sistemine ekstrasdan bir sönümleme kontrol sinyali sağlayabilmek iken, FACTS'lerin sağlamış olduğu salınım sönümlemenin yanında, sahip oldukları lokal gerilim kontrol özellikleri sayesinde güç sisteminde yüklenebilirliği de artırabilmektedir. HVDC kurulum maliyeti ise FACTS elemanlarına göre daha fazladır [12-14].

Salınımların sönümlenmesinde etkili bir sonuç elde edebilmek için seçilen kontrol sistemi kadar, bu kontrol sisteminin güç sistemlerinde nerelere kurulması gerektiği ve hangi sinyalin bu kontrol sistemine giriş sinyali olarak verilmesi gerektiği de göz önünde bulundurulması gereken bir husustur. Geleneksel olarak kullanılan rezidu (artık) analizi ile herhangi bir salınım modunun oluşmasına en çok sebep olan generatörün, salınım modunun kontrol edilebilirliği açısından kontrol sisteminin kurulması gereken en uygun generatör olduğu, salınım modunun en net bir şekilde gözlemlendiği sinyalinin ise kontrol sisteminin maksimum verimlilikte sönümleme sağlayabilmesi açısından kontrol sistemine verilmesi gereken en iyi giriş sinyali olduğu görülmüştür. Salınım modu kimi zaman kontrol sisteminin kurulduğu yerdeki lokal sinyallerden en net bir şekilde gözlemlenemeyebilir. Bu durumda, enterkonnekte güç sistemindeki başka bir noktadan salınım modunun çok daha net bir şekilde gözlemlendiği global sinyaller kontrol sistemine giriş sinyali olarak verilebilmektedir. Gözlemlenebilirliği yüksek olan bu sinyallerin geniş alanlı gözleme sistemleri (WAMS) ile gerçek zamanlı olarak ölçümü ve gelişen iletişim teknolojisi ile bir noktadan başka bir noktaya çok hızlı bir şekilde transfer edilmesiyle güç sistemlerindeki salınımların sönümlenmesindeki önemi anlaşılmıştır. Lokal salınımların sönümlenmesinde, kontrolöre giriş sinyali olarak genellikle kontrolörün uyarım sistemine bağlı olduğu generatörün rotor hızı kabul edilirken alanlar arası salınımları sönümlemede ise iki ayrı alan arasında kurulan zayıf hat üzerinde gerçekleşen aktif güç akış sinyali veya iki ayrı alandaki generatörlerin rotor hızı değişimleri fark sinyali gibi global sinyaller giriş sinyali olarak kabul edilebilmektedir [15,16,21].

Bu çalışmada, Kundur tarafından önerilen [8] iki alanlı dört generatörlü güç sistemi modelinde gözlemlenen alanlar arası salınımların sönümlenmesi için PSS ve SVC'nin birlikte kullanıldığı bir algoritma geliştirilmiştir. Farklı alanlarda bulunan generatörlerden çıkan global sinyallerin iletişim ağı üzerinde taşınırken yaşanan stokastik zaman gecikmelerinin geniş alanlı kontrolörün performansını olumsuz yönde etkilemesinden dolayı zaman gecikmeleri de kontrolör tasarım algoritmasına dahil edilmiştir. Öncelikle güç sistemi modeli, MATLAB ortamında belirli bir çalışma noktası etrafında doğrusallaştırılmıştır. Sonrasında oluşturulan doğrusal modele ilişkin alanlar arası salınımın sönümlenebilmesi için, geniş alan sinyalleri tabanlı sönümleme kontrolörü tasarlanmıştır. Ardından, Simulink ortamında, sönümleme kontrolörünün kullanmış olduğu geniş alanlı sinyallerdeki zaman gecikmelerinden kaynaklı faz

kaymalarının bozucu etkisini telafi edebilmek için ileri-geri(lead-lag) kompensatörleri kontrol eden bir anahtarlama algoritması tasarlanmıştır. Bu algoritma [62]'de verilen sabit periyotlu algoritmanın zaman telafisi bakımından geliştirilmiş halidir. Önerilen SVC tabanlı geniş alan sönümlenme sistemi hem SIMULINK ile hem de OPAL-RT gerçek zamanlı simülatör ile test edilmiştir. Sönümlenme kontrolöründen elde edilen sinyalin zaman gecikmeli ve zaman gecikmesiz durumlarda alanlar arası salınımı sönümlenmeye katkısı incelenmiş ve bunlar arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca, zaman gecikmeli durumlarda sönümlenme kontrolöründen elde edilen global sinyal, tasarlanmış olan adaptif zaman gecikmesi kompensatörüne verilmiş ve kompensatörün zaman gecikmesini telafi etmedeki kabiliyeti incelenmiştir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

2.1. Literatür Taraması

Güç sistemlerinde salınımlar, senkron generatörlerin daha fazla güvenilirlik ve güç kapasitesi sağlayabilmeleri açısından birbirlerine enterkonnekte biçimde bağlanmasıyla gözlemlenmeye başlanmıştır. Başlangıçta, birbirlerine oldukça yakın bir şekilde bağlanan generatörlerde, 1-2 Hz aralığında salınımlar görülmekteydi. Bu generatörlerin rotorları üzerinde bulunan sönümleyici sargılar bu salınımların sönümlenmesinde kullanılan ilk yöntem olmuştur [9]. Senkron generatörlerin farklı yapılarıdaki uyarıcıları da salınım sönümlemede alternatif bir yöntem olarak ele alınmıştır. Manuel olarak kontrol edilen uyarıcıların salınım sönümleme oranında, yavaş DC uyarıcılara ve hızlı statik uyarıcılara göre üstünlüğü incelenmiştir [8]. Almas ve Vanfretti tarafından yapılan bir çalışmada, piyasada bulunan bir uyarım kontrol sistemi, oluşturulan gerçek zamanlı döngüde donanımsal benzetim düzeneğinde test edilmiş ve etkili sonuçlar alınmıştır [17].

1960'lı yılların başlarından beri, güç sistemi kararlılaştırıcıları (PSS) Ontario hidro-elektrik güç santralının tüm generatörlerinin uyarım sistemlerinin tamamlayıcı bir unsuru olarak görülmüşlerdir [18]. Bunun en önemli sebebi ise PSS'lerin generatörlerin uyarım sistemlerini modüle ederek bu generatörlerdeki rotorların birbirleri arasında yaptıkları salınımı sönümlemeye yönelik rotolara, rotorların hız değişimleriyle aynı fazda ekstra elektriksel tork sağlamasıdır [19]. Literatürde, birbirinden farklı tasarım yöntemleriyle tasarlanan PSS'lerin güç sistemlerindeki salınımları sönümlemede farklı sonuçlar verdiği ortaya koyulmuştur. Zea tarafından yürütülen tez çalışmasında, lokal salınımların sönümlenmesi için kullanılan PSS'lerin kazanç katsayılarının ayarlanmasıyla (tune edilmesiyle) rotor açısal hızındaki ve terminal voltajındaki salınımların sönümleme oranlarının değişimi incelenmiştir [20]. Abido'nun yürütmüş olduğu 2001 yılında yayınlanan bir çalışmada, parçacık sürü optimizasyonu ile sisteme en uygun bir şekilde tasarlanan PSS'in geniş ölçekli yüklenme durumlarında ve sistem konfigürasyonlarında yani farklı çalışma noktalarında etkili sonuçlar verdiği incelenmiştir [21]. Shi ve arkadaşları tarafından yürütülmüş olan bir başka çalışmada ise, güç sisteminde modellenemeyen dinamiklerin PSS'lerin performansında azalmaya sebep olabileceğinden dolayı bulanık mantık tabanlı bir PSS tasarlanmıştır [22]. Güç sistemlerindeki salınımları sönümlemede, PSS'lerin tasarımlarının olduğu kadar onlara gelen giriş sinyalinin seçimi de önemlidir. Alanlar arası güç transferi kapasitesini sınırlayan salınımları daha etkin bir biçimde sönümlemek için PSS'e global sinyallerin verildiği birtakım çalışmalar da literatürde yer almaktadır [23,24]. Bunun yanında, alanlar arası salınımı sönümlemek için global PSS dışında farklı yöntemler de ortaya atılmıştır. Model öngörülü kontrol (model predictive control) yöntemiyle tasarlanan sönümleme

kontrolörünün kompleks yapıdaki 16 generatörlü ve 68 baralı güç sistemindeki salınımı sönümlemede etkin performans gösterdiği anlaşılmıştır [25].

Güç elektroniğinde yaşanan gelişmeler ile daha güvenilir hale gelen esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS) kontrolörleri, güç akışını daha sıkı bir şekilde denetleyebilmesi ve iletim hatlarının taşıma kapasitesini artırabilmesi nedeniyle güç sistemlerindeki salınımları sönümlemede ve kararlılığı artırmada alternatif bir yol olarak öne çıkmıştır. En yaygın kullanılan FACTS kontrolöleri arasında tristör kontrollü reaktör (TCR), tristör kontrollü seri kondansatör (TCSC) ve statik VAR kompensatörü (SVC) bulunmaktadır. Bu çalışmada, 1970'li yıllardan beri kullanılan SVC'den yararlanılmıştır ve literatürde güç sistemlerindeki lokal ve alanlar arası salınımların sönümlenmesi için SVC'nin kullanıldığı pek çok çalışma bulunmaktadır [26,27].

1991 yılında Lerch ve arkadaşlarının yürütmüş olduğu çalışmada, SVC'nin bulunduğu baradaki gerilim ve güç ölçümlerinden yola çıkarak faz açısı farkını tahmine dayalı bir SVC kontrolörü tasarlanmıştır. Kontrolör yapısı, bang-bang kontrol ve doğrusal kontrolün optimize edilmiş haline dayanmaktadır [28].

1993 yılında Zhou'nun yürütmüş olduğu çalışmada ise, alanlar arası salınım sönümlemede, ayrık zamanlı kontrol algoritması ile çalıştırılan SVC'nin sürekli zamanlı kontrol algoritmasıyla çalıştırılan SVC'ye göre daha etkin olduğu görülmüştür. Ayrıca iki alanlı bir güç sisteminde, maksimum sönümlenmeyi elde edebilmek için SVC'nin elektriksel olarak merkezi bir noktaya kurulmasının daha uygun olduğu görülmüştür [29].

1995 yılında Zhao ve Jiang tarafından yürütülen çalışmada, SVC için gürbüz bir kontrolör tasarlanmıştır. Çalışma noktası değişiminden kaynaklı model değişimleri, frekans bölgesinde, yapılandırılmamış model belirsizlikleri olarak ifade edilmiştir. Bu belirsizlikler, kontrolörün tasarımında göz önünde bulundurulmuştur [30].

1996 yılında Wang ve Swift tarafından yapılan çalışmada SVC gerilim kontrolünün güç sisteminde salınım sönümlemeye neden çok az bir etkisinin olduğu açıklanmıştır. SVC gerilim kontrolü, güç sistemine pozitif yönlü senkronize eden tork sağlamaktadır ve böylece sistemin geçici hal kararlılığını iyileştirmektedir. Ancak, SVC'nin gerilim kontrol gücünün artırılması durumunda SVC tarafından sağlanan salınım sönümleme torkunun azalacağı ve bundan dolayı salınım genliğinin artacağı teorik olarak açıklanmıştır [31].

2000 yılında So ve Yu'nun yürütmüş olduğu çalışmada, akım enjeksiyonlu TCSC ve SVC modelleri geliştirilmiş ve iletim sistemi modeline dahil edilmiştir. Geri beslemeli olarak tasarlanan kontrolör, izdüşümsel kontrol metodundan faydalanmıştır ve güç sisteminde gerçekleşen küçük bozucu etkinin ardından gözlemlenen alanlar arası salınımı sönümleyebilmek için TCSC ve SVC'nin kontrol eylemlerini koordine etmektedir [32].

2002 yılında Phorang ve arkadaşlarının yürütmüş olduğu bir çalışmada, bulanık mantık tabanlı SVC kararlılaştırıcısı tasarlanmış ve alanlar arası salınımı sönümlemede PSS'e göre daha

etkin olduğu görülmüştür. Fakat, tasarlanan SVC kararlılaştırıcısının PSS ile birlikte kullanımında ise salınımın daha hızlı sönümlendiği gözlemlenmiştir [33].

2008 yılında Mustafa ve Magaji tarafından yürütülen çalışmada, SVC için rezidu analizine dayalı güç salınımı sönümleme kontrolörü tasarlanmıştır ve bu kontrolörden elde edilen kontrol sinyali (gerilim sinyali) SVC'nin regülatör kısmında referans gerilimine dahil edilmiştir. Kontrolörün uygulanan hata sonrası güç sisteminde görülen salınımı sönümlemede etkin sonuçlar ortaya koyduğu gözlemlenmiştir [34].

2009 yılında Magaji ve arkadaşlarının yürütmüş olduğu çalışmada, bulanık PD+PI (FPID) kontrolör tasarlanmış, ve bu kontrolörün çıkış sinyali SVC'yi modüle etmekte kullanılmıştır. PID kontrolörün parametrelerini optimize etmek için genetik algoritmalar kullanılmıştır. Öne sürülen kontrol sistemi, geleneksel PID kontrolörle karşılaştırılmış ve iki alanlı 4 generatörlü güç sistemi modelinde test edilmiştir [35].

2010 yılında Liu ve arkadaşları tarafından yapılmış olan çalışmada, temeli geniş alan kontrolüne dayalı, zaman gecikmeli geri-besleme kontrol problemi olarak formülize edilen gürbüz bir SVC sönümleme kontrolörü (RADC) tasarlanmıştır. Kontrolörün parametrelerinin belirlenmesi için boş ağırlık matrisleri metodu ve kutup yerleştirme metodu kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda öne sürülen kontrolörün sadece alanlar arası salınım sönümlemekle kalmadığı ayrıca farklı zaman gecikmelerine karşı gürbüz olduğu görülmüştür [36].

2011 yılında Hosseini ve arkadaşlarının yürütmüş olduğu bir çalışmada, parçacık sürü optimizasyonu ve genetik algoritma kullanılarak optimum bir şekilde parametre değerleri hesaplanan PSS ve SVC'nin 2 alanlı 4 generatörlü güç sisteminde uygulanan hata sonrası görülen salınım sönümlemede birbirlerine göre performansı karşılaştırılmıştır. Parçacık sürü optimizasyonu ile hesaplanan parametre değerlerinin kullanıldığı PSS ve SVC'nin genetik algoritma ile hesaplanan parametre değerlerinin kullanıldığı SVC ve PSS'e göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür [37].

Eslami ve arkadaşlarının 2011 yılında yürütmüş olduğu çalışmada, kaotik parçacık sürü optimizasyon tekniği kullanılarak PSS ve SVC'ye bağlı güç salınımı sönümleme kontrolörünün koordineli bir şekilde çalışması amaçlanmıştır. PSS ve SVC kontrolörünün geniş ölçekli sistem konfigürasyonları ile ilgili koordineli tasarım problemi, birden fazla özdeğerin elde edilmesinin amaçlandığı çok amaçlı bir fonksiyon olarak formülize edilmiştir. Simülasyon sonuçlarında, öne sürülen metodun farklı çalışma noktalarındaki düşük frekanslı salınımları sönümlediği gözlemlenmiştir [38].

2012 yılında Uhlen ve arkadaşlarının yürütmüş olduğu çalışmada, Norveç'in 420 kV'luk iletim şebekesindeki Hasle trafo merkezinde kurulan 180 MVar SVC'yi kontrol eden ve farklı alanlardaki baraların gerilim faz açıları farkını giriş sinyali olarak kabul eden geniş alanlı fazör salınım sönümleyicinin gerçek zamanlı test sonuçlarından bahsedilmektedir. Ayrıca bu

sönümleyicinin daha önce tasarlanan lokal sinyal tabanlı fazör salınım sönümleyiciye göre avantajları ve dezavantajlarından bahsedilmiştir [39].

2013 yılında Zhang ve Vittal tarafından yürütülen çalışmada, hem lokal hem de alanlar arası sinyali birlikte kullanan 2 girişli ve tek çıkışlı bir kontrolör tasarlanmıştır. Ölçülen alanlar arası salınım sinyalinin iletişim ağı üzerinden kontrol lokasyonuna gönderimi esnasında bu ağda yaşanabilecek bağlantı kopmasına ve bu yüzden oluşacak veri kaybına karşı salınımı sönümlemede esnekliği(resiliency) sağlayabilmek adına lokalde ölçülen aktif güç sinyalinden de faydalanılmıştır. Tasarlanan kontrolörün PSS sayesinde elde edilen kararlılık limitini daha da artırdığı gözlemlenmiştir [40].

2016 yılında Liu ve arkadaşlarının yürütmüş olduğu çalışmada, geleneksel olarak kullanılan modsal analiz yönteminden faydalanılarak lead-lag kontrolör tasarlanmıştır. Kontrolörün çıkış sinyali SVC'nin gerilim referansına eklenmiş ve alanlar arası salınımın sönümlenmesine etkisi incelenmiştir. Kontrolörlerin etkinliği, yaygın olarak kullanılan DiGSILENT Power Factory programı aracılığıyla gerçekleştirilen doğrusal olmayan simülasyonlarla doğrulanmıştır. Kontrolöre giriş sinyali olarak zayıf hat üzerindeki gerilim açısı farkı kullanılmıştır. Fakat kontrolör sadece tek bir çalışma noktası baz alınarak tasarlanmıştır [41].

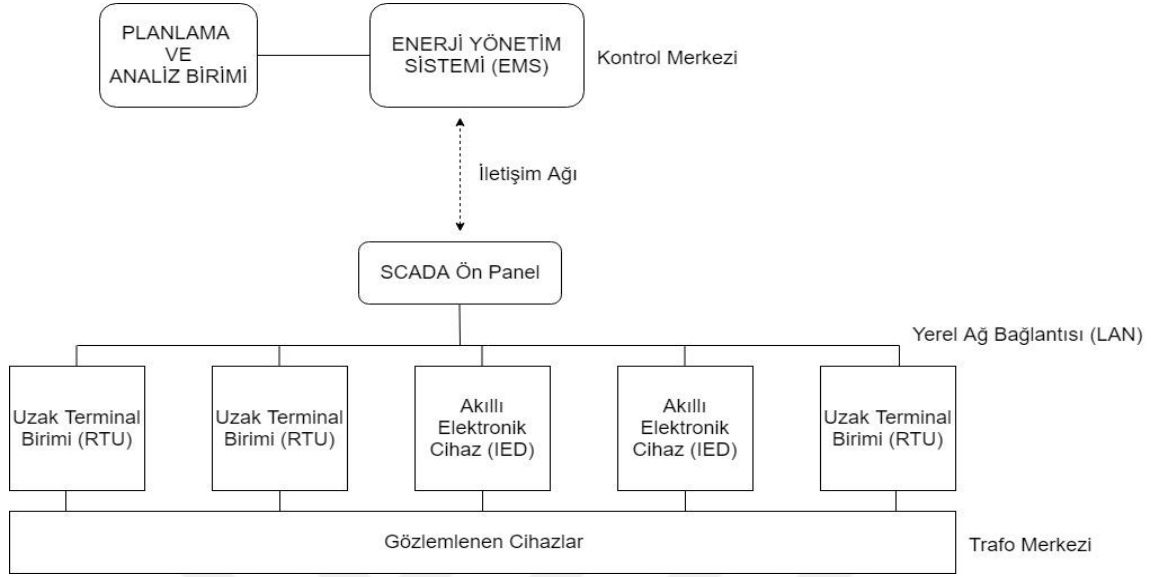
2.2. Geniş Alanlı Gözleme Sistemleri (WAMS)

Günümüzün birçok enterkonnekte şebeke sistemi, devamlı artan güç talebi, eskiyen altyapı, bölgeler arası kompleks güç transferi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının güç sistemlerine entegre olmasının getirdiği zorluk gibi etmenlerden dolayı kararlılık limitlerine çok yakın bir noktada işletilmektedirler. Tüm bu etmenler şebekelerin güvenilirliğini ve kararlılığını zayıflatmaktadır. Bundan dolayı, gerçek zamanlı olarak şebekede beklenmeyen durumlara cevap verebilmek, şebekeyi gözlemleyebilmek ve korumak, şebekenin güvenilirliğini ve kararlılığını sürdürebilmek adına kritik bir hal almıştır.

Avrupa elektrik iletim sistemleri operatörleri, 2003 yılından beri aşağıda belirtilen farklı amaçlar için geniş alanlı gözleme sistemleri kurmaktadır.

- Gerilim faz açısı farkı gözleme
- Hattın termal durumunu gözleme
- Gerilim kararlılığı gözleme
- Sistemde gerçekleşen sönümlenmelerin anlık olarak gözlemlenmesi [42,43].

2.2.1. Denetleyici Gözetim ve Veri Toplama Sistemleri (SCADA) :



Şekil 2.1. EMS/SCADA Sistem Konfigürasyonu [44].

Güç sisteminin gerçek zamanlı olarak gözlemlenmesi, temelinde durum tahminine dayanmaktadır [43]. Fakat gözleme için geleneksel olarak kullanılan denetleyici gözetim ve veri toplama sistemleri (SCADA)/enerji yönetim sistemi (EMS) gibi sistemler sadece statik olarak durum tahmini gerçekleştirebilmektedirler yani güç sisteminin anlık çekilmiş görüntüsünü verebilmektedirler. Ancak güç sistemlerinin artan talebi karşılayabilmek adına karmaşık yapısının sürekli olarak büyümesi ve YEK'lerin bu sistemlerine entegre olmasıyla güç sistemlerinin dinamik olarak gözlemlenmesi zorunlu hale gelmiştir. Eş zamanlı ölçüm teknolojisinin belkemiği olan fazör ölçüm ünitelerinin (PMU) geliştirilmesiyle güç sistemlerinde artık dinamik olarak da durum tahmini yapılabilmektedir [45].

SCADA/EMS sistemleri, düşük bir raporlama sıklığına sahip olup 3 ila 5 saniyede bir raporlama yapmaktadır ve Şekil 2.1.'de de görüleceği üzere uzak terminal birimlerine bağlı olarak çalışmaktadır. Aynı zamanda bu sistemler sadece statik olarak durum tahmini yapabildikleri için, güç sistemini yine yalnızca kararlı hal durumunda gözlemlemesi gerekmektedir [46].

2.2.2. Eşzamanlı Ölçüm Teknolojisi (SMT):

Güç sistemlerini gerçek zamanlı olarak gözlemlenmenin yanında korumanın ve kontrolünün (WAMPAC) de gerçekleştirilebilmesi açısından öne çıkan PMU tabanlı eşzamanlı

ölçüm teknolojisi bu doğrultuda atılan ilk adım olarak görülmektedir. SMT'nin en temel bileşeni PMU'lardır. WAMS sistemlerde kullanmanın birtakım avantajları bulunmaktadır:

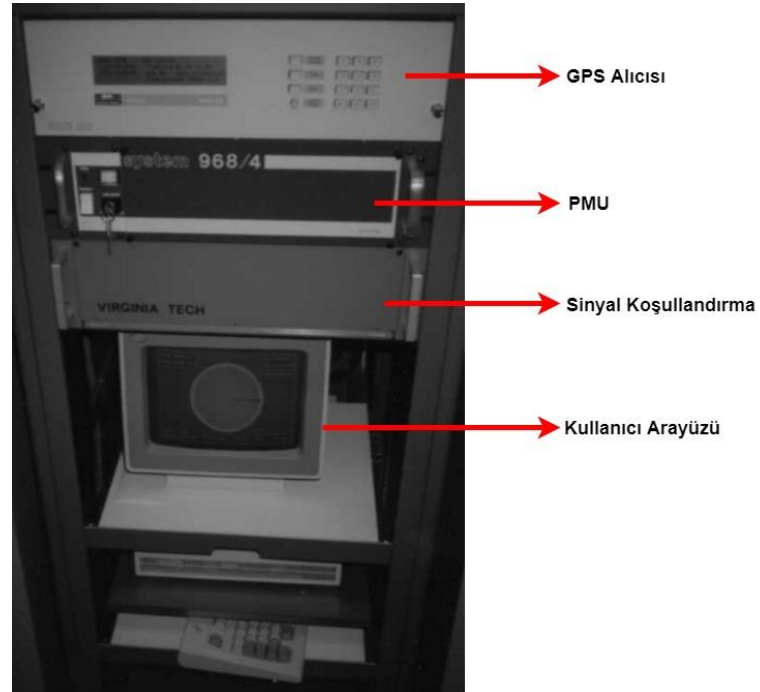
- Birbirlerinden uzakta ve farklı noktalardan alınan ölçümlere GPS saati aracılığıyla zaman etiketi verilebilmekte ve bu ölçümler eşzamanlanabilmektedirler.
- Gerilim faz açıları artık direkt olarak ölçülebilmektedirler.
- Enerji yönetim sistemi uygulamalarının hızı ve doğruluk oranı artmıştır.

Kuzey Amerika, Avrupa, Brezilya, Hindistan, Rusya ve Çin gibi pek çok bölge ve ülkede kurulan SMT'nin bazı uygulama alanları şunlardır:

- Güç sistemlerinin gerçek zamanlı olarak görselleştirilmesi
- Geliştirilmiş uyarı sistemlerinin tasarımı
- Durum kestiriminde iyileştirme
- Alanlar arası salınımlarda daha iyi sönümlenme
- Gerçek zamanlı olarak yapılan açı ve gerilim kararlılığı analizi [47].

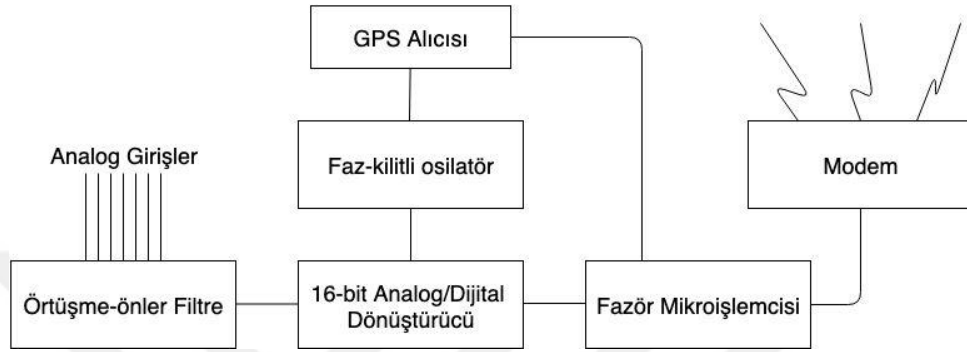
2.2.2.1. Fazör Ölçüm Ünitesi (PMU)

Şekil 2.2.'de de verilen, PMU'nun ilk prototipi 1988 yılında Virginia Tech Üniversitesi'nde Phadke ve onun araştırma ekibi tarafından üretilmiştir. [48].



Şekil 2.2. Virginia Tech Üniversitesi'nde geliştirilen PMU'nun saha kurulumu [49].

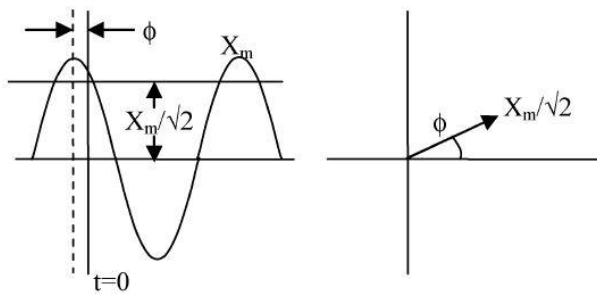
PMU'lar, pozitif, negatif ve sıfır bileşen akım – gerilim değerleri ölçebilmektedirler ve bu ölçümlerine zaman etiketi verebilmektedirler. Akım ve gerilim değerlerinin dışında frekans ve frekans değişim oranı da ölçebilmektedirler [49]. Ayrıca, geleneksel olarak kullanılan SCADA/EMS sistemlerinin aksine daha hızlı bir raporlama sıklığına sahiptir. 50 Hz'lik bir güç sisteminde saniyede 100 kez raporlama yapabilmektedir [46]. Fonksiyonel olarak blok diyagramı aşağıdaki Şekil 2.3.'te verilmiştir.



Şekil 2.3. PMU Blok Diyagramı [50].

PMU'lar akım ve gerilim değerlerinin şiddetini ölçmelerinin yanında faz açılarını da ölçebilmekte ve ölçüm değerlerini fazör olarak ifade edebilmektedirler. Ölçülen bu değerler, kendilerine zaman etiketi de verildiği için eşzamanlı fazör olarak adlandırılmaktadır. Sinüsoidal bir sinyalin fazör olarak gösterimi Şekil 2.4.'te gösterilmiştir.

Klasik fazör ifadesinin tanımı ve gösterimi:



Şekil 2.4. Sinüsoidal sinyal ve fazör olarak gösterimi [51].

Yukarıdaki şekilde sinüsoidal sinyalin ifadesi şu şekildedir:

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \phi) \quad (1)$$

Sinüsoidin fazör olarak ifadesi ise şu şekildedir:

$$X \equiv \frac{X_m}{\sqrt{2}} \varepsilon^{j\phi} = \frac{X_m}{\sqrt{2}} (\cos\phi + j\sin\phi) \quad (2)$$

Şekil 2.4.'te, ölçülen bütün gerilimlerin ve akımların aynı fazör gösteriminde gösterilebilmesi için frekansı aynı olmalıdır fakat pratikte PMU'lara gelen giriş sinyallerinin frekansı değişebilmektedir. Bu yüzden, PMU'lar fazör ifadeyi bulurken, belirli bir zaman aralığında alınan giriş sinyallerini göz önünde bulundurlar. Bu zaman aralığı ise giriş sinyalinin temel frekansından kaynaklı bir periyodu kadardır. Giriş sinyalinin frekansı sürekli olarak değişebileceği için PMU'lar fazör ifadeyi elde etmeden önce bu sinyalin temel frekansının periyodunu belirler.

Giriş sinyalinin fazör ifadesinin saptanması için en çok kullanılan yöntem, sinyalden örnekler almak ve bu örnekleri ayırık zamanlı fourier dönüşümüne sokmaktır. N sayıda örnek alınan bir sinyalin fazör ifadesi aşağıdaki şekilde bulunmaktadır [51]:

$$X = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \varepsilon^{-jk \frac{2\pi}{N}} \quad (3)$$

2.2.2.2. Fazör Veri Toplayıcısı(PDC)

PDC'ler, temelinde birden fazla kaynaktan gelen eşzamanlı fazör verisini tek bir merkezde toplayan ve bu veriyi farklı amaçlar için kullanabilen işlem birimleridir. Asıl fonksiyonu, birden fazla PMU'dan gelen eşzamanlı fazör ölçüm verisini aynı zaman etiketlerine göre düzenleyip tek bir zaman senkronizeli veri akışı oluşturmak olan PDC'ler, güç sistemindeki bütün ölçüm birimleriyle iletişim halinde olan tek birim olduklarından dolayı bütün sistemi gözlemlemek amacıyla da kullanılabilirler.

Güç sisteminde kurulmuş olan hiyerarşik geniş alanlı gözlemeleme, koruma ve kontrol yapısı nedeniyle PDC'ler saklanmış oldukları verileri farklı PDC'lere veya kontrolörlere gönderebilmektedir [52].

2.3. Güç Sistemlerinde Kararlılık

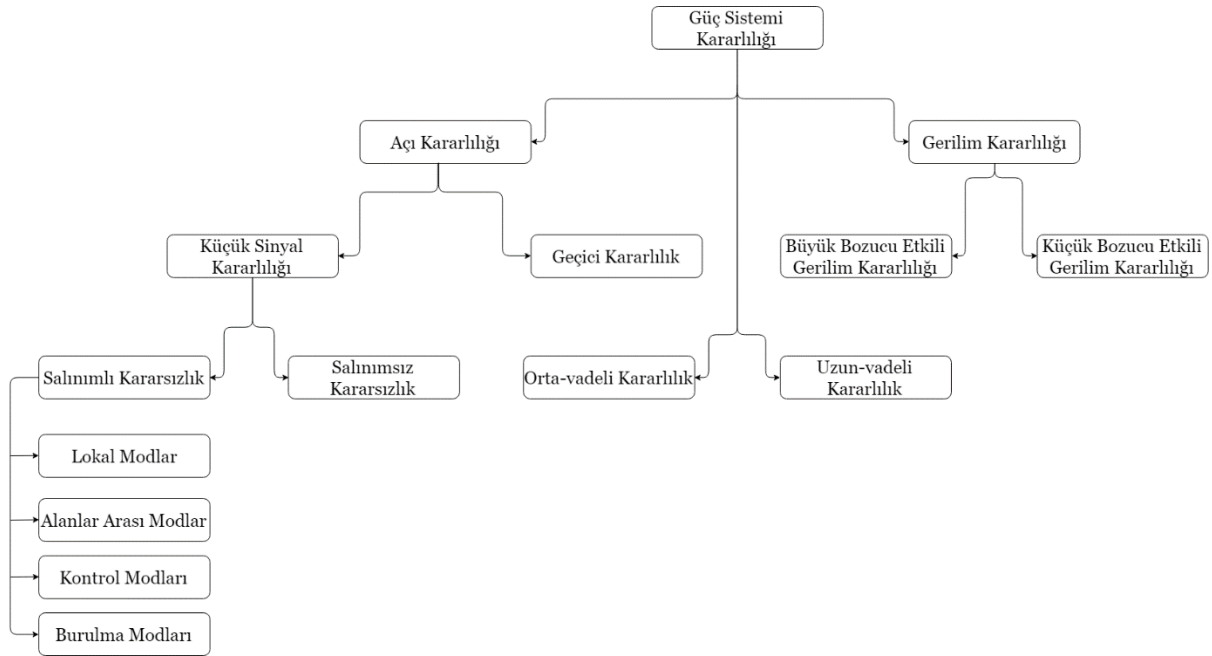
Güç sistemi kararlılığı, genel olarak, bir güç sisteminin dışarıdan herhangi bir bozucu etkinin olmadığı normal çalışma koşulları altında, denge noktasında çalışmasını sürdürebilmesi, herhangi bir bozucu etkiye maruz kaldıktan sonra ise farklı bir kabul edilebilir denge noktasına tekrardan kendisini taşıyabilmesi özelliğidir. Kararlılık problemi, geleneksel olarak güç

sisteminin senkronize operasyonunu sürdürebilme sorunlarından biri olmuştur. Kararsızlık iki farklı sebepten kaynaklanabilmektedir:

- Senkron generatörleri senkronize eden torkun yetersizliğinden dolayı rotor açıları farkının düzenli olarak artması
- Rotorda görülen salınımların şiddetinin, sönümlenme torkunun yetersizliğinden dolayı giderek büyümesi.

Güç sisteminde elektriksel gücün üretimi senkron makinelerle bağlı olduğundan, sistemin sağlıklı bir şekilde çalışması için sistemdeki bütün senkron makineler uyum içerisinde çalışmalıdırlar.

Güç sistemlerinde kararlılık aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır:



Şekil 2.5. Güç Sisteminde Kararlılık Sınıflandırılması

Bu çalışmada güç sistemlerindeki küçük sinyal kararlılığı üzerinde durulmuş, alanlar-arası ve yerel salınım modlarının en kısa sürede sönümlenmesi amaçlanmıştır.

2.3.1. Küçük Sinyal Kararlılığı

Günümüz güç sistemlerinde küçük sinyal kararsızlığı genelde sistemlerdeki salınımların yetersiz sönümlenmesinden kaynaklıdır. Salınımlar dört farklı kategoride sınıflandırılabilirler:

- *Lokal modlar*, bir üretim santralindeki generatörlerin, güç sisteminin kendileri dışında kalan tüm elemanlarına karşı yapmış olduğu salınımlardır. Lokal olarak tanımlanma

sebebi ise salınımların tek bir üretim istasyonu veya güç sisteminin küçük bir bölümüyle sınırlı olmalarıdır. Frekansları, 0.7-2 Hz arasındadırlar.

- *Alanlar arası modlar*, güç sisteminin herhangi bir bölümündeki birden fazla makinenin, başka bir bölümlerindeki makinelere karşı göstermiş olduğu salınımlardır. İki ya da daha fazla sayıdaki grup halindeki generatörlerin birbirlerine zayıf hat ile bağlanmasıyla ortaya çıkmaktadır. 0.1-0.8 Hz arasında frekans değerine sahiptirler.
- *Kontrol modları*, daha çok generatörler ve diğer kontrollerden kaynaklanmaktadır. Kötü ayarlanmış uyarıcılar, hız regülatörleri, HVDC dönüştürücüler ve SVC'ler bu salınımların genel sebepleridir.
- *Burulma modları*, türbin-generatör şaft sisteminin döngüsel bileşenlerinden kaynaklanmaktadır. Bu modlar, hız regülatörleri, HVDC kontrolleri, seri kondansatörlü kompanse edilmiş hatlarla etkileşime girdiğinden dolayı kararsızlığa sebep olabilmektedir.

Doğrusal olmayan yapıya sahip dinamik güç sistemleri, aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (4)$$

$$y = g(x, u) \quad (5)$$

Burada, x durum vektörü, u giriş vektörü, t ise zamandır.

4 ve 5'te verilen doğrusal olmayan denklemlerin belirli bir denge noktası etrafında doğrusallaştırılmasıyla aşağıdaki durum-uzay denklemleri elde edilir:

$$\Delta\dot{x} = A\Delta x + B\Delta u \quad (6)$$

$$\Delta y = C\Delta x + D\Delta u \quad (7)$$

Bu denklemlerde A matrisi $n \times n$ boyutlu bir sistem matrisi, B matrisi $n \times r$ boyutlu giriş matrisi, C matrisi $m \times n$ boyutlu çıkış matrisi, D matrisi $m \times r$ boyutlu ise ileribesleme matrisidir.

A matrisine ait özdeğerler şu formüllerden yola çıkarak bulunabilir:

$$A\phi = \lambda\phi \quad (8)$$

λ , skaler olup özdeğerleri ifade etmektedir, ϕ , ise sağ özvektördür.

$$(A - \lambda I)\phi = 0 \quad (9)$$

Çözüm kümesinde sıfıra eşit olmayan değerler bulunan özdeğerler, 9'da yer alan ifadenin determinantı alınarak elde edilen karakteristik denklemin çözümüyle bulunur.

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (10)$$

Herhangi bir özdeğere bağlı sağ ve sol özvektörlerin gösterimi şu şekildedir:

$$A\phi_i = \lambda_i\phi_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

$$\Psi_i A = \lambda_i \Psi_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

11 ve 12'deki denklemlerde ϕ_i , A matrisinin λ_i özdeğerine bağlı sağ özvektörü, Ψ_i ise sol özvektördür ve aşağıdaki gibi ifade edilirler:

$$\phi_i = \begin{bmatrix} \phi_{1i} \\ \phi_{2i} \\ \vdots \\ \phi_{ni} \end{bmatrix}, \Psi_i = \begin{bmatrix} \Psi_{1i} \\ \Psi_{2i} \\ \vdots \\ \Psi_{ni} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Birbirinden farklı özdeğerlere bağlı özvektörler, birbirlerine ortogondur. Bu yüzden,

$$\Psi_j \phi_i = 0 \quad (14)$$

Aynı özdeğere bağlı özvektörlerde ise durum şu şekildedir:

$$\Psi_i \phi_i = C_i \quad (15)$$

C_i , sıfırdan farklı sabit bir sayıdır.

2.3.1.1. Modsal Analiz:

Her bir özdeğerin sağ ve sol özvektörlerinin ayrı ayrı bir araya getirilmesiyle modal matrisler elde edilir.

$$\phi = [\phi_1 \quad \phi_2 \quad \dots \quad \phi_n] \quad (16)$$

$$\Psi = [\Psi_1^T \quad \Psi_2^T \quad \dots \quad \Psi_n^T]^T \quad (17)$$

Modal matrisler kullanılarak aşağıdaki bağıntılar elde edilir:

$$A\phi = \phi\Lambda \quad (18)$$

$$\Psi\phi = I \quad (19)$$

$$\Psi = \phi^{-1} \quad (20)$$

$$\phi^{-1}A\phi = \Lambda \quad (21)$$

21'de verilen ifadeyle, genellikle köşegen olmayan bir yapıya sahip A matrisi, köşegenleri özdeğerlerden oluşan bir köşegen matrisi olan Λ matrisine dönüşür.

Λ 'da bulunan özdeğerlerden, yalnızca reel olanlar salınımsız modları ifade eder, fakat ' $\sigma \mp j\omega$ ' şeklinde karmaşık sayı çifti halinde bulunanlar ise salınlı modları ifade eder. Burada reel kısım σ , sönümlenme durumunu, sanal kısım ω ise salınım frekansını vermektedir. Salınımsız mod negatif olması durumunda kararlıdır ve zamanla etkisi azalır, pozitif olduğunda ise aperiyojik kararsızlığa sebep olur. Salınlı modun reel kısmı negatif olduğunda sönümlenen salınımı ifade eder, pozitif olduğunda da şiddeti giderek artan salınımı ifade eder.

Salınlı bir modun frekansı Hz cinsinden şu şekilde bulunur:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (22)$$

Salınlı bir modun sönümlenme oranı ise şu şekilde hesaplanır:

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (23)$$

- *Katılım Faktörü:* Güç sisteminde herhangi bir durum değişkeninin herhangi bir moda etkisi katılım faktörü ile gösterilir. Sol ve sağ özvektörün bir araya getirilmesiyle oluşan katılım faktörü aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$P = [p_1 \quad p_2 \quad \cdots \quad p_n] \quad (24)$$

$$p_i = \begin{bmatrix} p_{1i} \\ p_{2i} \\ \vdots \\ p_{ki} \\ \vdots \\ p_{ni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1i} \Psi_{i1} \\ \phi_{2i} \Psi_{i2} \\ \vdots \\ \phi_{ki} \Psi_{ik} \\ \vdots \\ \phi_{ni} \Psi_{in} \end{bmatrix} \quad (25)$$

25'te verilen bağıntıda, $p_{ki} = \phi_{ki} \Psi_{ik}$ k. durum değişkeninin i. moda katılım oranını göstermektedir.

2.3.1.2. Modların Gözlemlenebilirliği ve Kontrol Edilebilirliği:

6'da verilen A matrisinde durum değişkenlerinin değişim oranı diğer bütün durum değişkenlerinin doğrusal bir kombinasyonu olduğundan dolayı, durum değişkenleri birbirlerini etkileyebilmektedir. Sistemdeki durum değişkenlerinin birbirlerine etkisini yok etmek için var olan durum vektörüne modal matris ile bağlı yeni bir durum vektörü oluşturulması gerekir.

$$\Delta x = \phi z \quad (25)$$

Yukarıdaki ifade 6 ve 7 nolu bağıntılarda yerine konulduğunda,

$$\phi \dot{z} = A \phi z + B \Delta u \quad (26)$$

$$\dot{z} = \phi^{-1} A \phi z + \phi^{-1} B \Delta u \quad (27)$$

$$\dot{z} = \Lambda z + B' \Delta u \quad (28)$$

$$\Delta y = C \phi z + D \Delta u \quad (29)$$

$$\Delta y = C' z + D \Delta u \quad (30)$$

28 ve 30'daki birbirinden ayrılmış durum değişkenlerinin olduğu yeni durum-uzay denklemleri elde edilir. Bu denklemlerde B' mod kontrol edilebilirlik matrisi, C' ise mod gözlemlenebilirlik matrisidir. Bu matrisler sayesinde herhangi bir modun kontrol edilebilirliği ve gözlemlenebilirliği incelenmektedir [53].

Modların kontrol edilebilirliği ve gözlemlenebilirliği açısından Heniche ve Kamwa tarafından yapılan bir çalışmada rezidu analizi ve geometrik ölçü olmak üzere iki farklı yaklaşım alanlar arası bir salınımın sönümlenmesinde seçilecek sinyalin ve sönümleme kontrol sisteminin kurulum yerinin belirlenmesinde ele alınmıştır. Bu çalışmaya göre geometrik ölçü ile seçilen sinyalin ve kontrolör kurulum yerinin rezidu analizle seçilenlere göre alanlar arası salınımı sönümlemede daha iyi sonuç verdiği görülmüştür [54]. Bu çalışmada da geometrik ölçü yöntemi seçilmiştir.

i-Rezidu Analizi:

28 ve 30'daki yeni durum-uzay denklemlerinden elde edilen transfer fonksiyonu;

$$G(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = C\phi[sI - \Lambda]^{-1}\Psi B \quad (31)$$

Bu durumda $R_i = C\phi_i\Psi_i B$ olmak üzere $G(s)$ yeniden şu şekilde ifade edilebilir:

$$G(s) = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{s - \lambda_i} \quad (32)$$

R_i , $G(s)$ 'in i . özdeğerindeki rezidusu olarak bilinmektedir.

ii-Geometrik Ölçü:

Geometrik ölçü yöntemine göre, salınım modlarının kontrol edilebilirliği, 33 ve 34'te ifadesi verilen doğrusallaştırılmış güç sisteminin durum-uzay denkleminde yer alan sistem matrisi A 'nın sol özvektörlerinin kapsadığı tek boyutlu sabit A^T alt-uzayların, giriş matrisi B 'nin her bir sütunun kapsadığı alt-uzaylara olan yakınlığıyla ifade edilir. Bu durumun formülize edilmiş hali 35'te verilmiştir.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (33)$$

$$y = Cx \quad (34)$$

$$m_{ci} = \cos[\theta(\Psi_i, B_k)] = \frac{|\Psi_i^T B_k|}{\|\Psi_i\| \|B_k\|} \quad (35)$$

35'te verilen kontrol edilebilirlik ölçüsünde, Ψ_i , A matrisinin i . salınım moduna bağlı i . sol özvektörü, B_k , B giriş matrisinin k . Sütununu temsil etmektedir. θ açısı, i . sol özvektör Ψ_i ve B 'nin k . sütunu B_k arasındaki dar açığı ifade etmektedir. $|\dots|$ gösterimi mutlak değeri, $\|\dots\|$ ise Öklid normu göstermektedir. Ψ_i ve B_k birbirlerine ortogonal olması durumunda geometrik ölçüleri sıfır olur ve i . salınım modunun sistemdeki k . girişten kontrol edilemeyeceği anlamına gelir. Bu durumun aksine Ψ_i ve B_k 'nin aralarındaki açı sıfıra yakın olduğunda, geometrik ölçüleri 1'e yakın olur ve i . salınım modu k . girişten kontrol edilebilir.

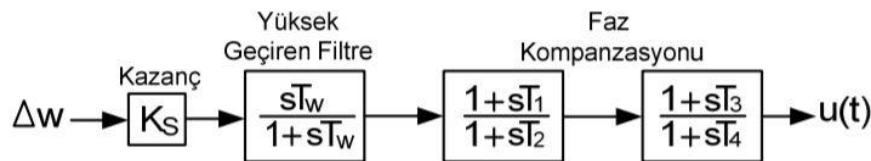
Salınım modlarının gözlemlenebilirliği ise, sistem matrisi A 'nın sağ özvektörlerinin kapsadığı tek boyutlu sabit A alt-uzayların, çıkış matrisi C 'nin her bir satırının kapsadığı alt-uzaylara olan yakınlığıyla ifade edilir ve 36'da olduğu gibi gösterilir.

$$m_{oi} = \cos[\theta(C_k, \phi_i)] = \frac{|c_k^T \phi_i|}{\|c_k\| \|\phi_i\|} \quad (36)$$

Gözlemlenebilirlik ölçüsünde, θ , C matrisinin k . satırı ve i . sağ özvektör arasındaki dar açıdır. Bu açının kosinüsü, i . salınım modunun sistemin k . çıkışındaki gözlemlenebilirliğini vermektedir [55].

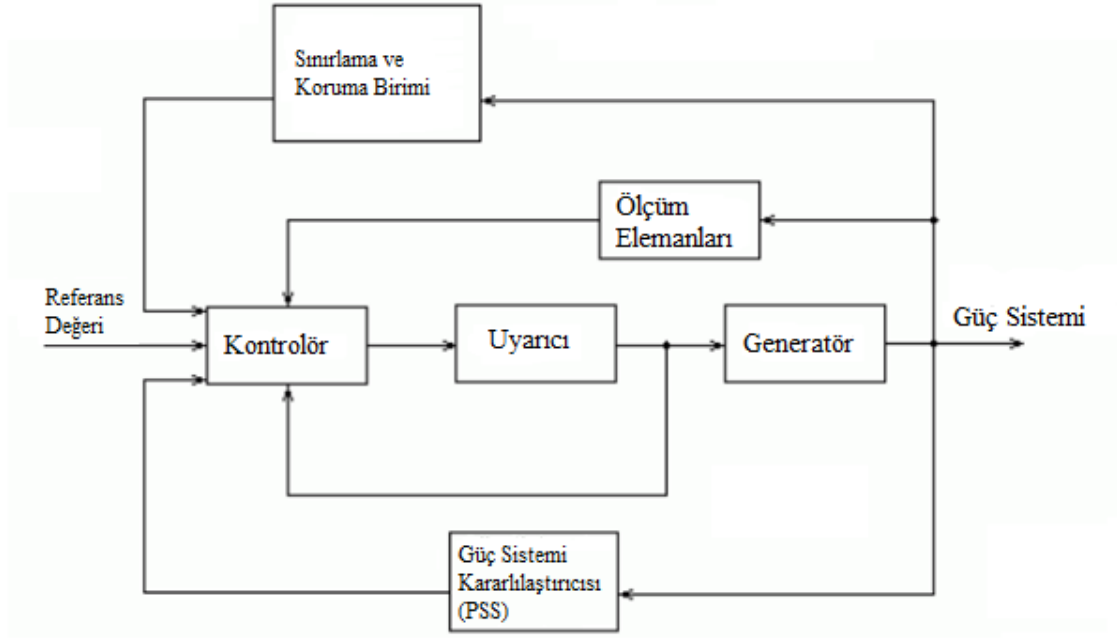
2.4. Güç Sistemi Kararlılaştırıcısı (PSS)

PSS'ler, güç sistemlerinde görülen elektromekanik salınımları sönmülemde kullanılan başlıca yöntemlerden olmuştur. Senkron generatörlerin uyartım sistemlerinde yer alan otomatik gerilim regülatörlerinin (AVR) referans girişine verdikleri ekstra sönmüleme sinyali sayesinde, daha önce var olan sönmüleme torkuna ek olarak rotor hızı değişimiyle orantılı elektriksel tork bileşeni oluşturur. PSS'lere gelen giriş sinyalinin seçiminde yaygın olarak, generatör şaft hızı, elektriksel güç veya terminal bara frekansı kullanılır Yapısında, kazanç bloğu, yüksek geçiren filtre ve ileri/geri (lead/lag) kompanzasyon blokları bulunur. PSS'e ait blok diyagramı Şekil 2.6.'da verilmiştir. Bu blok diyagramda PSS'e giriş sinyali olarak hız değişimi sinyali verilmiştir. PSS'lerin generatörlerin uyartım sistemlerindeki yeri ise Şekil 2.7.'de verilen blok diyagramla gösterilmiştir.



Şekil 2.6. PSS Blok Diyagramı [56].

Bu diyagramda, $\Delta\omega$ rotor hızındaki değişim, K_s kazanç, T_ω yüksek geçiren washout filtre sabiti, T_1 ve T_3 ileri (lead) zaman sabiti, T_2 ve T_4 ise geri (lag) zaman sabitidir.



Şekil 2.7. Senkron Generatör ve Uyarım Sistemi [57].

PSS'ler, genellikle güç sistemlerindeki generatörlere bağlı yüksek kazançlı hızlı cevap veren uyarıcılardan dolayı görülen lokal salınımların sönümlenmesinde kullanılırlar. Lokal salınımlar, aşırı koşullar haricinde çok fazla değişim göstermeyeceğinden, bu salınımların iyi bir şekilde sönümlenebilmesi için PSS'ler çoğunlukla güç sistemleri aktif haldeyken ayarlanırlar. Fakat bu süreçte, alanlar arası salınımlar kararsızlığa doğru gidebilirler [9].

2.4.1. PSS Tasarımı:

PSS tasarımı yapılırken, her zaman salınımlı ve salınımsız modların koordinat düzleminde sol yarı düzleme taşınması amaçlanmalıdır. Bu ise PSS'in sağlamış olduğu faz kaydırması ile gerçekleşir. j. generatördeki i. modu sol yarı düzleme taşımak için eklenmesi gereken faz açısı:

$$\varphi_{ij} = 180^\circ - \arg(R_{ij}) \quad (37)$$

PSS bloklarına bağlı diğer parametreler ise şöyle hesaplanır:

$$H_{PSS1j} = K_1 \frac{sT_\omega}{1+sT_\omega} \left[\frac{1+sT_{1j}}{1+sT_{2j}} \right]^m \quad (38)$$

$$T_{2j} = \frac{1}{\omega l_j \sqrt{\alpha_j}} \quad (39)$$

$$T_{1j} = \alpha_j T_{2j} \quad (40)$$

$$\alpha_j = \frac{T_{1j}}{T_{2j}} = \frac{1 - \sin\left(\frac{\varphi_{ij}}{m}\right)}{1 + \sin\left(\frac{\varphi_{ij}}{m}\right)} \quad (41)$$

Bu formüllerde m , kompanzasyon bloğu sayısını, T_ω washout filtre zaman sabitini, ωl_j lokal modun frekansını ifade etmektedir [23].

2.5. Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS)

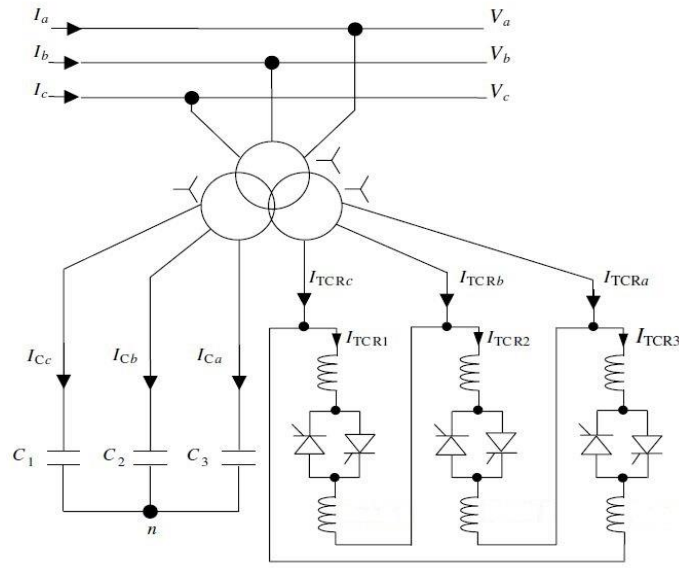
Güç sisteminde, güç akışının şebeke ağı üzerinden dağıtım iletim hattının empedansına bağlı olarak değişmektedir. Düşük empedansa sahip iletim hatları, yüksek empedansa sahip iletim hatlarının sağlamakta olduğundan daha fazla güç akışına olanak sağlayabilmektedirler. Fakat bu istenen bir durum değildir çünkü pek çok sayıda işlevsel probleme sebep olabilmektedirler. Düzenlenemeyen aktif ve reaktif güç akışlarının oluşabilmesine sebep olan bu problemler şunlardır:

- Sistem kararlılığının kaybolması
- Yüksek iletim kayıpları
- Gerilim limiti aşımı
- Kademeli olarak röle açılması.

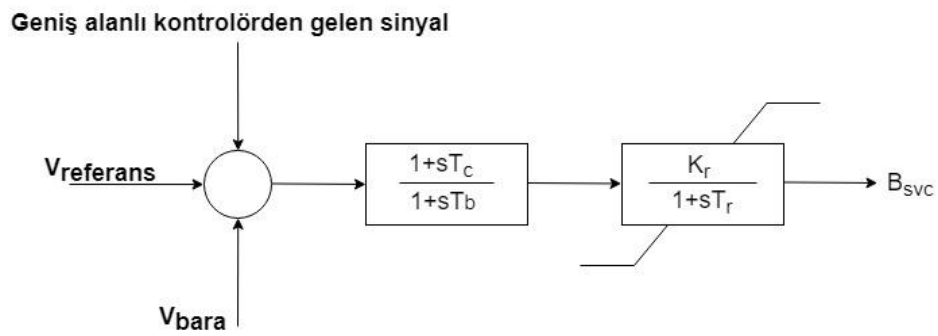
Uzun vadede bu problemler, yeni elektrik üretim tesisleri ve iletim hatları kurularak aşılmaya çalışılmıştır. Fakat bu maliyetli ve gerçekleşmesi uzun zaman isteyen bir çözüm yöntemidir. Bunun üzerine geliştirilmiş güç elektroniği ekipmanlarını kullanarak iletim hatlarını iyileştiren FACTS'ler yeni bir çözüm yolu olarak ortaya atılmıştır. FACTS'lerin amacı, güç sistemi sürekli halde ve geçici haldeyken sistemin yüksek gerilim tarafındaki güç akışının kontrolünü sağlamaktır. Birkaç farklı türde FACTS kontrolörü, dünyanın değişik bölgelerindeki güç sistemlerinde devreye alınmıştır. En bilinenleri, yük altında kademe değiştiriciler, faz açısı regülatörleri, statik VAR kompensatörleri (SVC), tristör kontrollü seri kompensatörler, birleştirilmiş güç akışı kontrolörleri ve statik kompensatörlerdir. Bu çalışmada alanlar arası salınımları sönmlemede de etkili sonuçlar gösteren SVC kullanılmıştır.

2.5.1 Statik VAR Kompansatörü (SVC)

SVC, tristör kontrollü reaktörün (TCR) kondansatör bankıyla paralel bir biçimde bağlanmasıyla oluşur. Bağlı olduğu alternatif akım (AC) şebekede, şönt bağlı değişken reaktans gibi davranır, şebekeye reaktif güç sağlar veya şebekeden reaktif güç çeker, böylelikle şebekeye bağlı olduğu noktadaki gerilim şiddetini düzenler. Yapısında bulunan tristörün tetikleme açısı kontrolü sayesinde güç sistemine hızlı bir şekilde reaktif güç sağlayabilir ve gerilim düzenleyebilmektedir. SVC'ye ait gösterim ve blok diyagramı Şekil 2.8. ve Şekil 2.9.'da verilmiştir.



Şekil 2.8. Sabit kondansatör ve TCR'den oluşan 3 fazlı statik VAR kompansatörü [27].



Şekil 2.9. SVC blok diyagramı [58].

2.6. Yük (Güç) Akışı Analizi

Güç sistemlerinde yük akışı analizi, planlama, işletim, ekonomik olarak programlandırma ve elektrik şebekeleri arası güç transferi açısından önemli ve gereklidir. Güç sistemi sürekli hal durumunda analiz edilir. Bu analizin yapılma amacı her bir hat üzerindeki güç akışını ve her bir baradaki gerilim şiddetini ve faz açısını saptamaktır. Analizin sonunda bara admitans matrisi oluşturulur. Böylelikle, geçici hal kararlılığı analizinde kullanılacak olan, sistemin çalışma noktası belirlenmiş olur. Yük akışı analizinde en çok kullanılan yöntemler Newton-Raphson ve Gauss-Seidel yöntemleridir [59,60].

2.6.1. Gauss- Seidel Yöntemi:

1874 yılında Seidel tarafından ortaya atılan ve tekrarlı bir yaklaşıma dayanan bu yönteme göre, 42'de verilen doğrusal olmayan denklemde, bulunması hedeflenen x değeri için bir tahminde bulunulur ve bu tahmin değeri x' e başlangıç değeri $x(0)$ olarak verilir. Sonrasında, 43'teki eşitlik kullanılarak bütün $k = 1, 2, \dots, N$ değerleri için 44'te verilen ifade sağlanmaya ve iterasyonların tolerans değeri olan ε 'e yakınsamasına çalışılır.

$$f(x) = 0 \quad (42)$$

$$x(i + 1) = g[x(i)] \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (43)$$

$$\left| \frac{x_k(i+1) - x_k(i)}{x_k(i)} \right| < \varepsilon \quad (44)$$

Bu denklemlerde, $x(i)$, x' 'in i . tahmini ve g , iterasyon (tekrarlama) yöntemini tanımlayan N boyutlu bir vektördür. Gauss-Seidel yönteminde iterasyonların yakınsayabilmesi için çok fazla uygulanması gerekmektedir. Fakat kimi zaman yakınsama sağlanamayabilmektedir.

2.6.2. Newton-Raphson Yöntemi:

Gauss- Seidel yöntemine göre daha çok tercih edilen bu yöntem, temelinde bilinmeyen bir x değerinin ilk tahminine ve Taylor serisi açılımına dayalı tekrarlı bir yaklaşım yöntemidir.

$$f(x) = c \quad (45)$$

Yukarıda verilen doğrusal olmayan denklemin çözümünde kullanılan ilk tahmin değeri $x^{(0)}$ ve asıl çözümden sapma miktarı $\Delta x^{(0)}$ kullanılarak, denklem yeniden yazılır.

$$f(x^{(0)} + \Delta x^{(0)}) = c \quad (46)$$

Eşitliğin sol tarafı, Taylor serisinin $x^{(0)}$ etrafında açılımı sağlanarak genişletilir.

$$f(x^{(0)}) + \left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)} \Delta x^{(0)} + \frac{1}{2!} \left(\frac{d^2f}{dx^2}\right)^{(0)} (\Delta x^{(0)})^2 + \dots = c \quad (47)$$

47'deki eşitlikte sapma miktarı $\Delta x^{(0)}$ 'in çok küçük olduğu varsayılarak daha büyük dereceli terimleri ihmal edilebilir. Böylelikle aşağıdaki ifade elde edilebilir.

$$c - f(x^{(0)}) \cong \left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)} \Delta x^{(0)} \quad (48)$$

İlk tahmin değeri $x^{(0)}$ 'e sapma miktarı $\Delta x^{(0)}$ 'in eklenmesiyle 49'da verilen ikinci yaklaşım ifadesi elde edilir.

$$x^{(1)} = x^{(0)} + \frac{\Delta c^{(0)}}{\left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)}} \quad (49)$$

Yöntemin tekrarlı olarak kullanılmasıyla aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$\Delta c^{(k)} = c - f(x^{(k)}) \quad (50)$$

$$\Delta x^{(k)} = \frac{\Delta c^{(k)}}{\left(\frac{df}{dx}\right)^{(k)}} \quad (51)$$

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)} \quad (52)$$

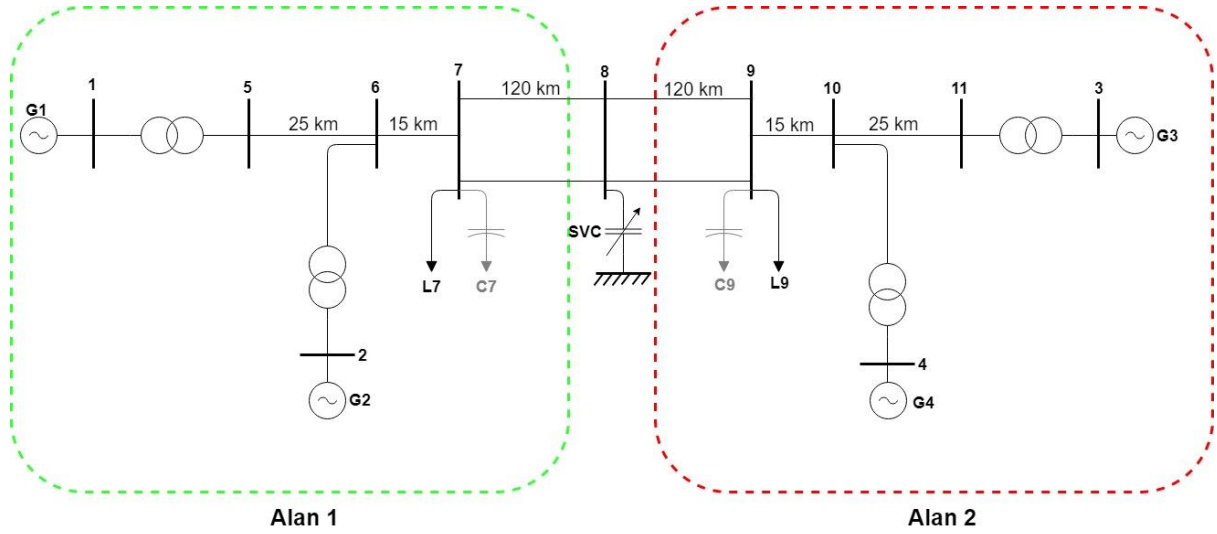
İterasyonlar sonucunda, Gauss-Seidel yönteminde olduğu gibi 53'te verilen eşitsizliğin sağlanması gerekmektedir [53, 59, 61].

$$x^{(k+1)} - x^{(k)} \leq \varepsilon \quad (53)$$

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. İki Alanlı Dört Generatörlü Güç Sistemi Modeli

Bu çalışmada Kundur tarafından önerilen, literatürdeki çalışmalarda sıklıkla kullanılan iki alanlı dört generatörlü güç sistemi modeli kullanılmıştır. Güç sistemi modeli Şekil 3.1.'de verilmiştir. Geleneksel olarak kullanılan modelden farklı olarak bu modelde, 8. baraya SVC eklenmiş ve alanlar-arası sönümlenmeye etkisi incelenmiştir.



Şekil 3.1. İki alanlı dört generatörlü güç sistemi modeli

2 alanlı 4 generatörlü güç sistemi modelinde kullanılan generatör, iletim hattı, trafo, yük, kondansatör bankı ve SVC için baz değerleri ve per-unit değerleri sırasıyla Tablo 3.1-5'te verilmiştir. Modeldeki generatör ve uyarım sistemine ait dinamik değerler ekler kısmındaki Ek-1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Generatör Verileri

Baz Güç Değeri:	900 MVA
P_{G1}	0.7778 pu
Q_{G1}	0.1985 pu
P_{G2}	0.7778 pu
Q_{G2}	0.2440 pu
P_{G3}	0.7989 pu
Q_{G3}	0.1876 pu
P_{G4}	0.7778 pu
Q_{G4}	0.2055 pu

Tablo 3.2. İletim Hattı Verileri

Baz Güç Değeri:	100 MVA
Baz Gerilim Değeri:	230 kV
Rezistans (r):	0.0001 pu/km
Reaktans x_L:	0.001 pu/km
Süseptans b_c:	0.00175 pu/km

Tablo 3.3. Transformatör Verileri

Baz Güç Değeri:	900 MVA
Baz Gerilim Değeri:	20/230 kV
Reaktans x_L:	J0.15 pu

Tablo 3.4. Sabit Empedans Yük Verileri

Baz Güç Değeri:	900 MVA
P_{L7}:	1.074 pu
P_{L9}:	1.9633 pu
Q_{L7}:	0.1111 pu
Q_{L9}:	0.1111 pu

Tablo 3.5. Kondansatör Bankı Verileri

Baz Güç Değeri:	900 MVA
Q_{c7}:	0.2222 pu
Q_{c9}:	0.3889 pu

3.2. Yük Akışı Analizi ve Sistemin Doğrusallaştırılması

Güç sistemleri, kendilerine özgü yapıları gereği doğrusal olmayan (non-linear) sistem oldukları için bu sistemler, belirli bir çalışma noktası etrafında doğrusallaştırılmalıdır. Chow ve Rogers tarafından geliştirilen MATLAB tabanlı 'Power System Toolbox (PST)', güç sisteminin küçük sinyal kararlılık analizinde kullanılmıştır.

Yük akışı analizi için, öncelikle güç sistemi modelini tanımlayacak olan matrisler oluşturulmalıdır. Bu matrisler 'bara' ve 'hat' matrisleridir. Bara ve hat matrislerinde, bara numarası, bara tipi (salınım barası, yük barası (PQ) ve generatör barası (PV)), bara gerilim şiddeti ve gerilim faz açısı, baraya bağlı generatörlerin ve yüklerin ürettiği ve tükettiği aktif ve reaktif güçler, baraya ait anma (rated) gerilim değerleri, hatların rezistans, reaktans ve yüklenme değerleri, ayrıca hangi baralar arasında bulunduğu dair ifadeler yer almaktadır. Bara ve hat matrisleri kullanılarak yük akışı analizi yapılır ve bu analiz sonucunda güç sisteminin çalışma noktası belirlenir. Yük akışı analizinde 'Newton-Raphson' metodu kullanılmıştır. Yük akışı analizinde kullanılan bara ve hat matrisleri Tablo 3.6. ve 3.7.'da verilmiştir.

Tablo 3.6. Bara Gerilim Değerleri

Bara Numarası	Bara Şiddeti (pu)	Gerilim Açısı	Gerilim	Bara Tipi	Anma Gerilim Değerleri (kV)
1	1.03	20.2°		PV (Generatör)	20
2	1.01	10.5°		PV (Generatör)	20
3	1.03	-6.80°		Salınım (Referans)	20
4	1.01	-17.0°		PV (Generatör)	20
5	1.0075	13.75°		PQ (Yük)	230
6	0.9806	3.7011°		PQ (Yük)	230
7	0.9654	-4.6569°		PQ (Yük)	230
8	0.9539	-18.3798°		PV (Generatör)	230
9	0.9764	-31.8232°		PQ (Yük)	230
10	0.9863	-23.4626°		PQ (Yük)	230
11	1.0094	-13.1855°		PQ (Yük)	230

Tablo 3.7. Hat Direnç Değerleri

Hattın Bağlı Olduğu Baralar	Rezistans (pu)	Reaktans (pu)	Hat Yüklenme Değeri (pu)
1. Bara 5. Bara	0	0.15	0
2. Bara 6. Bara	0	0.15	0
3. Bara 11. Bara	0	0.15	0
4. Bara 10. Bara	0	0.15	0
5. Bara 6. Bara	0.0025	0.025	0.04375
6. Bara 7. Bara	0.0015	0.015	0.0262
7. Bara 8. Bara	0.0120	0.120	0.2100
7. Bara 8. Bara	0.0120	0.120	0.2100
8. Bara 9. Bara	0.0120	0.120	0.2100
8. Bara 9. Bara	0.0120	0.120	0.2100
9. Bara 10. Bara	0.0015	0.015	0.0262
10. Bara 11. Bara	0.0025	0.025	0.04375

Uygulanan yük akışı analizi için de PST'de yer alan 'lfdemo' komutu kullanılmış ve bu analizin sonucunda yeni bara değerleri ve hat akış değerleri ile yönleri Tablo 3.8 ve 3.9'de verilmiştir.

Tablo 3.8. Güç Akışı Analizi Sonrasında Elde Edilen Bara Değerleri

Bara Numarası	Bara Gerilim Şiddeti (pu)	Bara Gerilim Açısı	Üretilen		Harcanan (Yük)	
			Aktif Güç (pu)	Reaktif Güç (pu)	Aktif Güç (pu)	Reaktif Güç (pu)
1	1.03	21.4545°	0.7778	0.2271	0	0
2	1.01	11.6384°	0.7778	0.3125	0	0
3	1.03	-6.8°	0.8263	0.2279	0	0
4	1.01	-17.6598°	0.7778	0.2860	0	0
5	1.0033	14.9723°	0	0	0	0
6	0.9705	4.8024°	0	0	0	0
7	0.9438	-8.1489°	0	0.2222	1.0740	0.1111

Tablo 3.8. (Devamı)

Bara Numarası	Bara Gerilim Şiddeti (pu)	Bara Gerilim Açısı	Üretilen			Harcanan (Yük)		
			Aktif Güç (pu)	Reaktif Güç (pu)		Aktif Güç (pu)	Güç	Reaktif Güç (pu)
8	0.9539	-23.2134°	0	0.0831		0		0
9	0.9555	-37.6487°	0	0.3889		1.9633		0.1111
10	0.9744	-24.4682°	0	0		0		0
11	1.0040	-13.6834°	0	0		0		0

Tablo 3.9. Güç Akışı Analizi Sonrasında Elde Edilen Güç Akış Değerleri

Hat Numarası	Hattın Olduğu 1. Bara	Bağlı	Hattın Olduğu 2. Bara	Aktarılan Güç (pu)	Aktif	Aktarılan Reaktif (pu)	Güç
1	1	→	5	0.7778		0.2271	
2	2	→	6	0.7778		0.3125	
3	3	→	11	0.8263		0.2279	
4	4	→	10	0.7778		0.2860	
5	5	→	6	0.7778		0.1343	
6	6	→	7	1.5417		0.2088	
7	7	→	8	0.2165		-0.0122	
8	7	→	8	0.2165		-0.0122	
9	8	→	9	0.2108		-0.0065	
10	8	→	9	0.2108		-0.0065	
11	9	→	10	-1.5523		0.2019	
12	10	→	11	-0.8107		0.0272	

Tablo 3.9.'dan görüldüğü üzere, yük akışı analizi uygulandıktan sonra, alan 1'den alan 2'ye 389.7 MW aktif güç aktarıldığı gözlemlenmiştir. Aktarılan güç, (54)'te verilen ifade ile hesaplanmıştır. Böylece, sistemin çalışma noktası belirlenmiştir.

$$P_{7 \gg 8} = P_{gerçek} = P_{pu} \times S_{baz} = (0.2165) \times 2 \times 900 = 389.7 \text{ MW} \quad (54)$$

Sistemin çalışma noktası belirlendikten sonra bu nokta etrafında doğrusallaştırılmıştır. Sistem doğrusallaştırılırken 'Taylor serisi açılımı' yöntemi kullanılmıştır ve tüm generatörlerin uyarım sistemlerinin aynı olduğu ve bu uyarım sistemlerine aynı kontrol birimlerinin etki ettiği kabul edilmiştir. Detaylı özellikleri Ek-1'de verilen bu uyarım sistemleri ve kontrol birimleri şunlardır:

- IEEE ST3A Statik Uyarım Sistemi
- Buhar/gaz türbini hız regülatörü (THR)
- PSS

Sistemin doğrusal modeli, küçük sinyal kararlılığı analizinde kullanılan 'svm_mgen' komutuyla elde edilmiş ve doğrusal modele ait 'A', 'B' ve 'C' matrisleri elde edilmiştir. A (sistem)

matrisi 62×62 boyutludur, yani sistemde 62 durum değişkeni bulunmaktadır. Bunlardan 2 tanesi SVC'ye ait olup geriye kalan 60 tanesi ise 4 generatöre ve onların kontrol birimine bağlıdır. Her bir generatör ve generatöre bağlı kontrol birimleri için 15 tane durum değişkeni vardır. Bu durum değişkenlerine ilişkin detaylar Tablo 3. 10.'da verilmiştir.

Tablo 3.10. Generatörlere ve Onların Kontrol Birimlerine Ait Durum Değişkenleri

Generatör	δ	Rotor Açısı
	ω	Rotor Hızı
	E'_q	q Ekseni Geçici (Transient) Gerilim
	ψ''_d	d Ekseni Alt Geçici (subtransient) Akı
	E'_d	d Ekseni Geçici (Transient) Gerilim
	ψ''_q	q Ekseni Alt Geçici (subtransient) Akı
Uyarıcı	V_TR	Gerilim Transdüser Çıkışı (pu)
	V_As	Regülatör Gerilimi Durum Değişkenleri (pu)
	V_R	Regülatör Çıkış Gerilimi (pu)
PSS	pss1	Washout Filtre Durum Değişkeni
	pss2	İlk İleri/Geri Kontrolörün Durum Değişkeni
	pss3	İkinci İleri/Geri Kontrolörün Durum Değişkeni
THR	tg1	Regülatör Durum Değişkeni
	tg2	Servo Durum Değişkeni
	tg3	Ara Isıtıcı (reheater) Durum Değişkeni

Sistem matrisi (A) 'svm_mgen' komutuyla elde edildikten sonra, bu sistem matrisine bağlı özdeğerler ve sağ özvektörler MATLAB'da yer alan 'eig' komutuyla bulunmuştur. Sol özvektörlerin yer aldığı modal matris ise sağ özvektörlerden oluşan modal matrisin tersi alınarak bulunmuştur. Sağ özvektörlerin oluşturduğu modal matriste, salınımlı modların gözlemlenebilirliği ele alınmıştır. Sol özvektörlerin oluşturduğu modal matriste ise salınımlı modların en iyi kontrol edilebileceği durum değişkenleri ve bunların hangi generatörde olduğu ele alınmıştır. Her iki özvektörün farklı indekslerdeki elemanlarının çarpımıyla elde edilen, sistemdeki herhangi bir durum değişkeninin salınım moduna etkisini gösteren katılım faktörleri de hesaplanmıştır. Ayrıca, salınımlı modların en iyi hangi çıkış sinyalinde gözlemlendiğini belirlemede ve en iyi hangi generatörde sönümlendiğini belirlemede, sağ ve sol özvektörlerin dışında, 2.3.1'de bahsedilen geometrik ölçü yöntemi kullanılmış ve alanlar arası salınımın etkin bir biçimde sönümlenmesi için kontrolöre gelecek olan giriş sinyali belirlenmiştir. Bu çalışmada, alanlar arası salınım sönümlenme kontrolörü olarak global güç sistemi kararlılaştırıcısı (GPSS) kullanılmış ve GPSS'den gelen kontrol sinyali SVC'nin referans girişine verilmiştir. Lokal salınımların sönümlenme oranını artırmak için ise lokal PSS'ler kullanılmıştır. Çalışmanın asıl amacı alanlar arası salınımın sönümlenme oranını artırmak olduğu için, lokal PSS'lerin tasarımı üzerinde durulmamıştır.

GPSS'nin girişine gelecek olan sinyal belirlendikten sonra, 2.4'te yer alan PSS tasarım yöntemi kullanılarak geniş alan sönümlenme kontrolörü tasarlanmıştır. Elde edilen salınım modları, seçilen GPSS giriş sinyali, tasarlanan GPSS ve onun alanlar arası salınıma etkisi bulgular ve tartışma kısmında verilmiştir.

3.3. İletişim Ağındaki Zaman Gecikmelerinin Modellenmesi ve Adaptif Kompanzasyonu

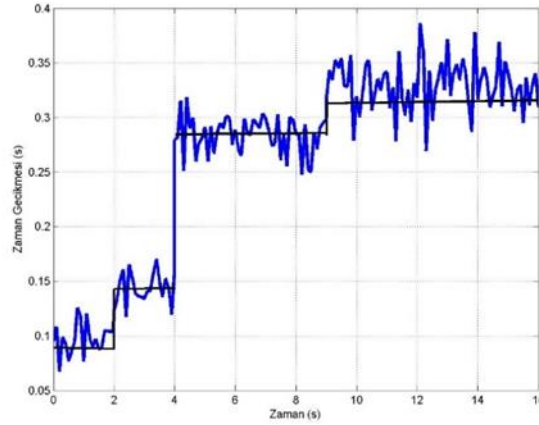
Kontrol sinyallerinin ve salınımların iyi gözlemlendiği, PMU'lar tarafından ölçülen sinyallerin iletişim ağı üzerinden aktarımı sırasında yaşanan zaman gecikmeleri stokastik karakterdedir. Bu nedenle, zaman gecikmelerinin sabit olduğu varsayılarak tasarlanan ileri (lead) kontrolörler, zaman gecikmesinin sebep olduğu bozucu etkiyi telafi etmede etkili bir performans gösterememektedirler. Zaman gecikmesi, değişken yapısı göz önünde bulundurulduğunda, geniş alanlı sönümlenme kontrol sinyalinin etkin sonuçlar verebilmesi adına oluşabilecek maksimum ve minimum zaman gecikmeleri arasında belirli aralıklara bölünmüştür ve belirlenen aralıklara göre gerçekleşen zaman gecikmelerinin etkisini telafi edecek lead kontrolörler tasarlanmıştır. PMU'ların ölçümlerine verdikleri zaman etiketleri sayesinde iletişim ağı kaynaklı zaman gecikmeleri hesaplanabilmektedir. Bu gecikmeleri uygun miktarda telafi edecek, daha önceden offline olarak tasarlanmış lead kontrolörler arasından seçim yapacak anahtarlama algoritması geliştirilmiştir. İletişim ağında yaşanan gecikmeler, Gaussyan dağılımlı rassal değişken olarak tanımlanmıştır. Bu kabullenme ile bir zaman gecikmesi profili tasarlanmıştır. Bu zaman gecikmesine ait olasılık yoğunluk fonksiyonu 55'te, ortalama ve standart sapma verileri de Tablo 3.11.'de verilmiştir.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (55)$$

Tablo 3.11. Değişken zaman gecikmesi parametreleri

Zaman (s)	σ (ms)	μ (ms)
0-2	10	90
2-4	20	140
4-9	15	285
9-16	20	330

Değişken zaman gecikmesi modeli Şekil 3.2.'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Tasarlanan değişken zaman gecikmesi

Adaptif zaman gecikmesi algoritması gerçekleştirilirken sırası ile şu aşamalar izlenilmiştir:

- i. Zaman gecikme aralığının bölünmesi
- ii. Anahtarlama kurallarının belirlenmesi
- iii. Adaptif anahtarlama periyodu seçimi.

i-Zaman gecikme aralığının bölünmesi: Güç sistemlerinde kullanılan iletişim ağına göre zaman gecikme miktarları değişmektedir. Zaman gecikme değerinin maksimum değeri ya da bu gecikmeden kaynaklı faz kaybı üzerinden istenen aralık sayısı eşit olarak bölünebilir. Her bir aralıkta telafi edilecek faz değeri belirlenir. Faz telafisi için genellikle birinci dereceden lead kontrolör kullanımı yeterli olmaktadır. Lead kontrolör tasarımları şu bağıntılarla yapılabilir [62]:

$$H_c = K_c \frac{1+sT_{c1}}{1+sT_{c2}} \quad (56)$$

$$T_{c1} = \frac{\tan\theta + T_{c2}\omega_i}{\omega_i + T_{c2}\omega_i^2 \tan\theta} \quad (57)$$

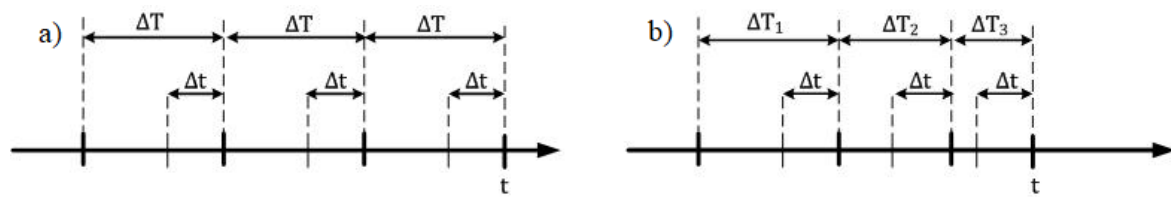
$$K_c = \frac{1}{|(T_{c1}j\omega_i + 1)(T_{c2}j\omega_i + 1)|} \quad (58)$$

Burada θ zaman gecikmesinden kaynaklı faz kaybı, ω_i salınım açısal frekansı temsil etmektedir. T_{c2} 0.05-0.1 aralığında seçilebilir.

Bu çalışmada sistemdeki maksimum gecikme değeri 360 ms olarak kabul edilip, adaptif zaman gecikmesi telafisi için 6 aralık belirlenmiştir. Her bir aralıkta uygulanacak olan telafi miktarı o aralığın ortalaması olarak kabul edilmiştir. Bu kabullere göre her bir aralık için (57) ve

(58) ile verilen bağıntılar kullanılarak (56)'da verilen formda tek dereceli lead kontrolörler tasarlanmıştır.

ii-Anahtarlama kurallarının belirlenmesi: PMU ölçümlerinin alındığı zaman ile bu ölçümlerin global sönümlenme kontrolörüne geldiği zaman farkı PMU zaman etiketlerinden belirlendikten sonra bu zaman gecikmesi telafisi için kullanılacak kontrolör seçimi belirlenen anahtarlama kurallarına göre yapılır. Şekil 3. 3.'te görüldüğü gibi sabit ΔT periyotlu anahtarlama yapılan bir yapıda $\Delta t < \Delta T$ aralığı boyunca yapılan zaman gecikmesi ölçümlerinin ortalaması kullanılarak bir sonraki aralıkta devreye alınacak kontrolör belirlenir [63].



Şekil 3.3. (a) Sabit [64] ve (b) adaptif periyotlu anahtarlama yapıları

iii-Adaptif anahtarlama periyodu seçimi: Sabit periyot anahtarlama sistemlerinde gerçek zamanlı faz telafisi bir önceki anahtarlama periyodunda hesaplanan zaman gecikmesine bağlı olarak yapılmaktadır. Zaman gecikmesinin ağ kaynaklı olarak hızlı değişiklik gösterdiği durumlarda anahtarlama periyodu yeterince küçük değilse fazladan ya da yetersiz faz telafisi yapılması muhtemeldir. Periyodun oldukça küçük seçilmesi ise sık anahtarlama dolaylı olarak kararlılıkların tetiklenmesine neden olabilir. Bu çalışmada önerilen adaptif periyotlu anahtarlama şu şekildedir:

$S_{\Delta T} = \{\Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_n\}$ seçilmiş olan büyükten küçüğe sıralı anahtarlama periyotları, τ_j j. Δt aralığında hesaplanmış olan ortalama zaman gecikmesi ve M operatör tarafından belirlenecek bir parametre olsun. $t = T_c$ anında anahtarlama periyodu $\Delta T = \Delta T_i$ ve hesaplanmış ortalama zaman gecikmesi τ_i olsun. Bu durumda anahtarlama periyodu seçme algoritması,

$t = T_c + \Delta T$ anında, eğer

$$\tau_{i+1} - \tau_i > M \text{ ise } \Delta T = \Delta T_{i+1} \quad (59)$$

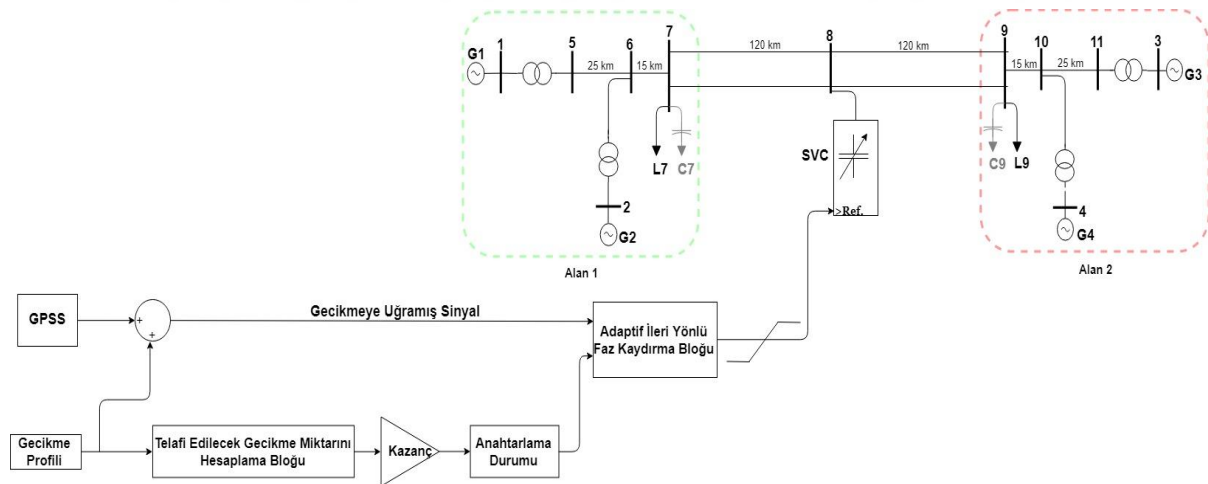
$$\tau_{i+1} - \tau_i < M \text{ ise } \Delta T = \Delta T_{i-1} \quad (60)$$

Benzetim çalışmalarında adaptif kompanzasyon algoritması için şu seçimler yapılmıştır: $S_{\Delta T}=\{4,2\}$, $M=50$ ms., $\Delta t=1$ sn. Buna göre anahtarlama periyodu 4 sn. ya da 2 sn. olarak belirlenebilmektedir. Anahtarlama periyotlarının son 1 saniyesi boyunca o periyottaki ortalama zaman gecikmesi hesaplanmaktadır. İki anahtarlama periyodu arasında ölçülen ortalama zaman gecikmesi farkı 50 ms den fazla olduğunda, mevcut anahtarlama periyodu 4 sn ise bir sonraki aralıkta anahtarlama periyodu 2 sn ye düşürülecektir. İki aralık arasında ortalama zaman gecikmesi farkı 50 ms'nin altına düştüğünde, bir sonraki aralıkta anahtarlama periyodu yeniden 4 sn. olacaktır. Böylelikle ağ yoğunluğundan ya da başka bir sebepten dolayı ağ gecikmelerinde büyük dalgalanmalar meydana geldiğinde bu değişimler daha küçük bir anahtarlama periyodunun kullanılması ile gerçek değerlerine yakın bir şekilde telafi edilebileceklerdir.

Geniş alan sönümlenme kontrolörü olarak seçilen global PSS (GPSS) 2.4'te anlatılan metot kullanılarak 50'de verildiği gibi hesaplanmıştır. Bu kontrolörün çıkışı SVC'nin asıl fonksiyonunu etkilememesi için ± 0.15 p.u. olarak sınırlandırılmıştır.

$$H_{GPSS} = 1500 \frac{10s}{1+10s} \left(\frac{1+0.158s}{1+0.706s} \right)^2 \quad (61)$$

SVC bulunan iki alanlı güç sistemine GPSS ve zaman gecikmesi kompensatörü eklendikten sonraki elde edilen geniş alan sönümlenme sistemine ait diyagram Şekil 3.4.'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Sisteme Zaman Gecikmesi, Lead Kontrolör ve GPSS Eklendikten Sonraki Durumu

Bu sistemin yazılımsal benzetimi Matlab/SIMULINK kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gerçek zamanlı benzetim için OPAL-RT firmasının geliştirdiği RT-LAB programı kullanılmıştır. RT-LAB programı Simulink'le uyumlu bir program olup Simulink'te oluşturulan modelin gerçek zamanlı simülasyonun merkezi işlemci birimine aktarılmasını ve orada çalıştırılmasını sağlar. Bu

amaçla, RT-LAB’de öncelikli olarak boş bir proje oluşturulur. Ardından oluşturulan projeye hedef aygıt (simülatör) tanıtılır ve yeni boş bir model eklenir. Oluşturulan boş modelde gerçek zamanlı olarak çalıştırılmak istenen model kurulur ve modelin çalışma modu belirlenir (yazılım senkronizeli veya donanım senkronizeli). Bu işlemler yapıldıktan sonra model offline simülasyon modunda çalıştırılır ve modelde herhangi bir hata olup olmadığı gözlemlenir. Hata var ise bu hatalar çözümlenip model derlenir. Hatanın olmadığı durumda da model derlenir ve simülatöre yüklenir. Yükleme işleminin tamamlanmasıyla model gerçek zamanlı olarak çalıştırılır ve modelin en üst seviyesinde bulunan konsol bloğu açılır ve burada gözlemlemek istenilen sinyaller gözlemlenir. Konsol bloğundan modele müdahale de edilebilip online olarak herhangi bir giriş sinyali verilebilmektedir. Gerçek zamanlı model için yapılması gereken uyarlamalar ekler bölümde yer alan Ek-2’de açıklanmıştır.

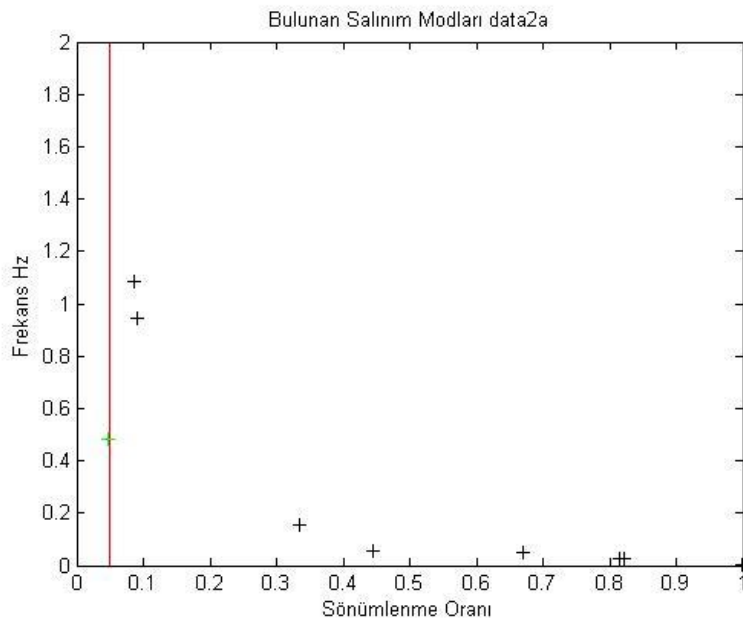


4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde önerilen SVC tabanlı geniş alan sönümlenme kontrol sisteminin yazılımsal ve gerçek zamanlı benzetim sonuçları verilmiştir.

4.1. Modsal Analiz Sonucu Elde Edilen Modlar ve Gözlemlenebilirlik-Kontrol Edilebilirlik Değerleri

Sistem doğrusallaştırıldıktan sonra elde edilen salınım modları Şekil 4.1.'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Sistemde yer alan salınım modları

Şekil 4.1.'den de fark edileceği üzere sistemde herhangi bir kararsız mod bulunmamaktadır. Sadece birbirinden farklı frekanslarda ve farklı sönümlenme oranlarına sahip salınım modları bulunmaktadır. Bu salınım modlarından bir kısmı, bu modların sönümlenme oranı ve frekansı ile ilgili bilgiler Tablo 4.1.'de verilmiştir.

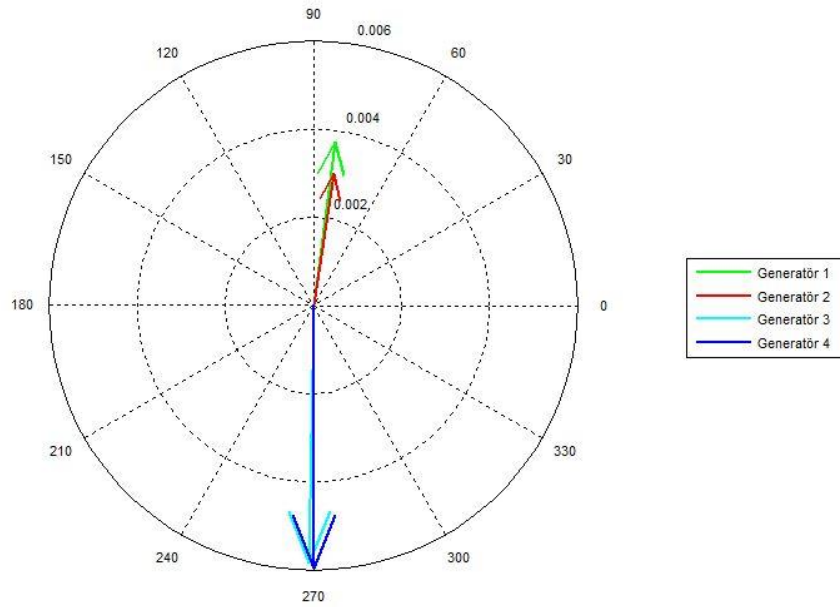
Tablo 4.1. Sistemde Bulunan Bazı Salınımlı Modlar

Mod Numarası	Salınımlı Mod	Modun Frekansı	Modun Sönümlenme Oranı	Modun Türü
28	-0.14535-3.0376i	0,483 Hz	0,0478	Alanlar-arası
34	-0.53967-5.9211i	0,942 Hz	0,0907	Lokal
36	-0.59631-6.8271i	1,086 Hz	0,0870	Lokal

Tablo 4.1. (Devamı)

Mod Numarası	Salınımlı Mod	Modun Frekansı	Modun Sönümlenme Oranı	Modun Türü
21	-0.3423-0.96195i	0,153 Hz	0,3352	Lokal
10	-0.16663-0.33484i	0,053 Hz	0,4455	Lokal

Sistemde bulunan bu modların dışında başka salınım modları da bulunmaktadır. Fakat bu salınımların frekansları düşük olmalarına rağmen sönümlenme oranları yüksektir. Bu yüzden sistemde çok çabuk bir şekilde kaybolmaktadırlar. Fakat Tablo 4.1.'de de yer alan alanlar arası mod düşük bir sönümlenme karakteristiğine sahiptir. Bu modun oluşmasına sebep olan generatörler ise Şekil 4.2.'de verilmiştir. Tabloda 4.1.'de yer alan 34. ve 36. Modlar ise lokal modlardır ve bunların sönümlenme oranları sistemdeki her bir generatörün uyarım sitemine dahil edilen PSS'ler sayesinde artırılmıştır. 21. ve 10. modlar da lokal modlar olup sönümlenme oranları diğer lokal modlara ve alanlar arası moda göre daha yüksektir.

**Şekil 4.2.** Alanlar arası modun oluşumuna sebep olan generatörler

34. ve 36. modların en iyi gözlemlenebildiği durum değişkenleri, sağ özvektörlerin oluşturduğu modal matris ϕ' 'de o modlara karşılık gelen 34. ve 36. sütun vektörlerine bakılarak belirlenmiştir. Modlara karşılık gelen sütun vektörleri Tablo 4.2. ve 4.3.'te verilmiştir.

Tablo 4.2. 34. Modun (Lokal) Gözlemlendiği Durum Değişkenleri

Durum Değişkeni Numarası	Durum Değişkeni	Özvektör Değerleri
⋮	⋮	⋮
15	tg3	0
16	δ	1
17	ω	-0,000780733
18	E'_q	0,003988905
19	ψ''_d	-0,05510593
20	E'_d	-0,076957705
⋮	⋮	⋮

Tablo 4.3. 36. Modun (Lokal) Gözlemlendiği Durum Değişkenleri

Durum Değişkeni Numarası	Durum Değişkeni	Özvektör Değerleri
⋮	⋮	⋮
30	tg3	0
31	δ	1
32	ω	-0,001899983
33	E'_q	0,005598788
34	ψ''_d	-0,119903764
35	E'_d	-0,065532443
⋮	⋮	⋮

Tablolardaki durum değişkeni numaraları PST'de yer alan 'mac_state' komutu ile elde edilmiştir. Tablo 3.9'daki generatör ve kontrol birimlerine bağlı durum değişkenleri de bu komut ile bulunmuştur. Üstteki tablolarda görüldüğü üzere salınım modlarının en iyi gözlemlendiği sinyaller şöyledir:

- 34. lokal mod için 2. generatörün rotor açısı,
- 36. lokal mod için 3. generatörün rotor açısı.

Ayrıca, her bir mod için katılım faktörü incelendiğinde de aynı durum değişkenlerinin modlara etkisinin en yüksek olduğu görülmüştür. Tablo 4.4. ve 4.5.'te normalize edilmiş katılım faktörleri hesaplanmıştır.

Tablo 4.4. 34. Modun Katılım Faktörü Değerleri

Durum Değişkeni Numarası	Durum Değişkeni	Katılım Faktörü
⋮	⋮	⋮
15	tg3	0
16	δ	1
17	ω	0,552115676
18	E'_q	0
⋮	⋮	⋮

Tablo 4.5. 36. Modun Katılım Faktörü Değerleri

Durum Değişkeni Numarası	Durum Değişkeni	Katılım Faktörü
:	:	:
30	tg3	0
31	δ	0,963068315
32	ω	1
33	E'_q	0
:	:	:

Lokal modlar için ve alanlar arası mod için geometrik ölçü yöntemi kullanılarak da bu modların en iyi gözlemlendiği durum değişkenleri bulunmuştur. Geometrik ölçü yöntemine göre elde edilen 34., 36. ve 28. modların kontrol edilebilirlik ve gözlemlenebilirlik ölçütleri aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo 4.6. Lokal ve Alanlar Arası Modların Gözlemlenebilirlik Ölçütü

Modlar	Generatör 1	Generatör 2	Generatör 3	Generatör 4
34. Mod	0,006348	0,00733	0,00038	0,000343
36. Mod	3,75e-06	0,000136	0,013613	0,010276
28. Mod	0,003137	0,002533	0,004901	0,004997

Tablo 4.7. Lokal ve Alanlar Arası Modların Kontrol Edilebilirlik Ölçütü

Modlar	Generatör 1	Generatör 2	Generatör 3	Generatör 4
34. Mod	0,207818884	0,027805576	0,090846631	1,03364E-09
36. Mod	0,093765	0,021344	0,38002	4,88e-10
28. Mod	0,046826	0,028767	7,38e-06	2,24e-09

Tablo 4.6.'dan da anlaşılacağı üzere 34. ve 36. modların en iyi gözlemlendiği sinyaller sırasıyla 2. ve 3. generatörlerde bulunmaktadır. Bu durum Tablo 4.2. ve 4.3.'te verilen değerlerle örtüşmektedir. Alanlar arası mod olan 28. Mod ise alan 2'de yer alan 4. generatörün rotor hızı sinyalinde gözlemlenebilirken bu modun kontrolü alan 1'deki generatör 1'in uyarım sistemine verilecek olan ek bir sönümlenme kontrol sinyali sayesinde sağlanabilmektedir. Fakat bu modun sönümlenmesi için oluşturulan sönümlenme kontrol sinyali SVC'nin referans girişine eklenecektir.

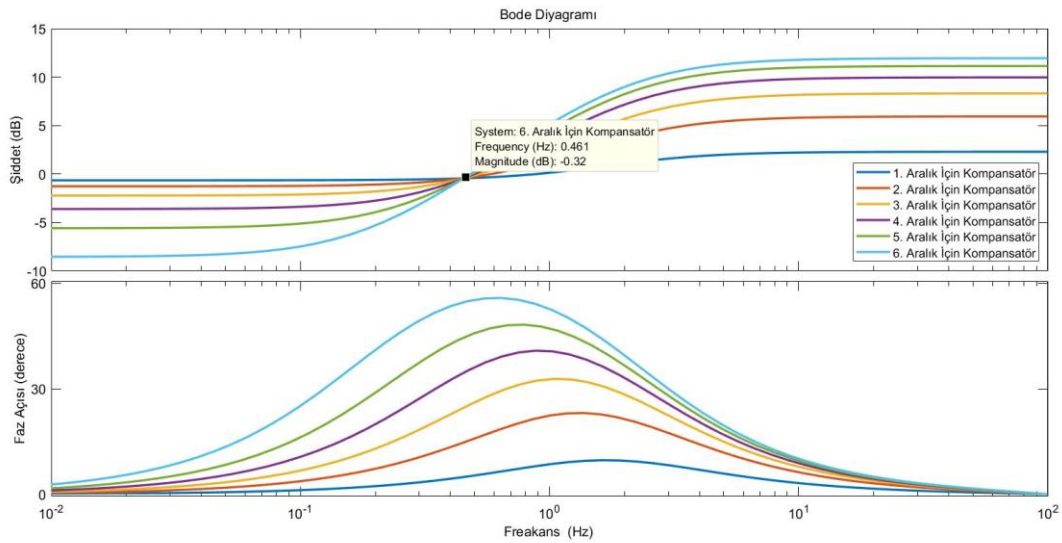
4.2. Lead Kontrolör Tasarımı Sonuçları

Zaman gecikmeleri, 6 farklı aralığa bölünmüş ve her bir aralık için ayrı ayrı lead kontrolör tasarlanmıştır. Kontrolör değerleri Tablo 4.8.'de verilmiştir.

Tablo 4.8. Tasarlanan adaptif zaman gecikmesi kompensatör verileri

Aralık No	Gecikme Aralığı	Telafl Edilen Gecikme	K_c	T_{c1}	T_{c2}
1	(0.0,60.0]	30.0	0.9084	0.1030	0.07
2	(60.0,120.0]	90.0	0.8152	0.1789	0.07
3	(120.0,180.0]	150.0	0.6824	0.2805	0.07
4	(180.0,240.0]	210.0	0.5163	0.4418	0.07
5	(240.0,300.0]	270.0	0.3246	0.7830	0.07
6	(300.0,360.0]	330.0	0.1163	2.3063	0.07

Tasarlanan kompensatörlerin frekans cevapları Şekil 4. 3.'te verilmiştir.

**Şekil 4.3.** Lead kontrolörlere ait Bode çizimleri

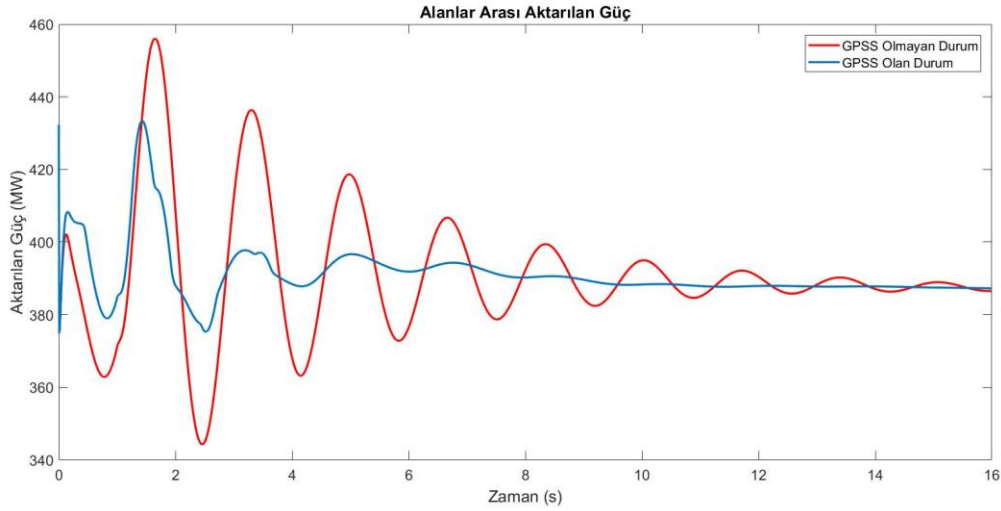
Şekil 4.3'te de görüldüğü gibi, tasarlanan lead kontrolörler 0.48 Hz olan alanlar arası salınım frekansında istenen faz katkısını yapmaktadırlar.

4.3. Yazılımsal Benzetim Sonuçları

Tasarlanan geniş alanlı sönümleme kontrolörünün (GPSS) alanlar arası güç transferi üzerindeki ve rotor hızlarındaki salınımları sönümlemeye yönelik performansı, güç sistemine uygulanan küçük ve büyük iki farklı bozucu etki için ele alınmıştır. Küçük bozucu olarak alan 2'de yer alan 4. generatörün terminal voltajının %5 oranında artırılması seçilmiştir. Büyük bozucu olarak ise alanlar arasında yer alan zayıf hat üzerinde 3 faz toprak hatası uygulanmıştır.

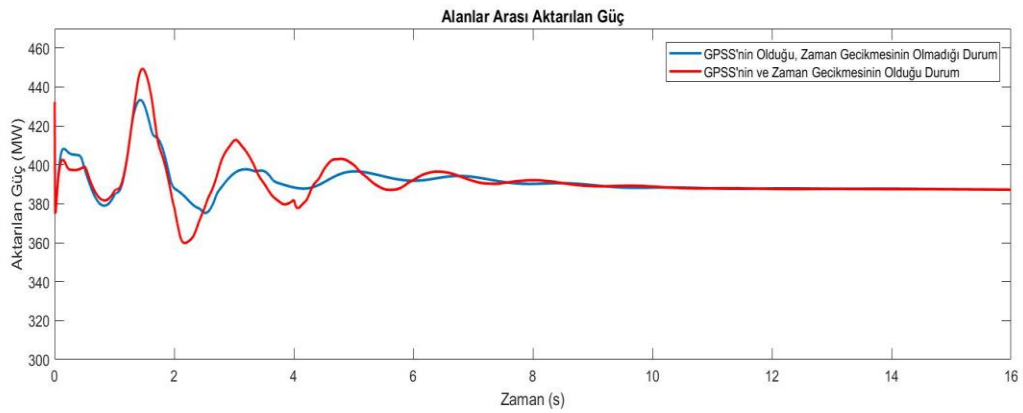
4.3.1 Küçük Bozucu Tepkileri:

Şekil 4.4 de sisteme uygulanan küçük bozucu sonucunda alanlar arası güç transferinin GPSS var iken ve yok iken hali gösterilmektedir. Bu durum zaman gecikmesinin olmadığı ideal durumdur. Seçilen global sinyalin alanlar arası salınımı sönümlenme oldukça etkili olduğu görülmektedir.



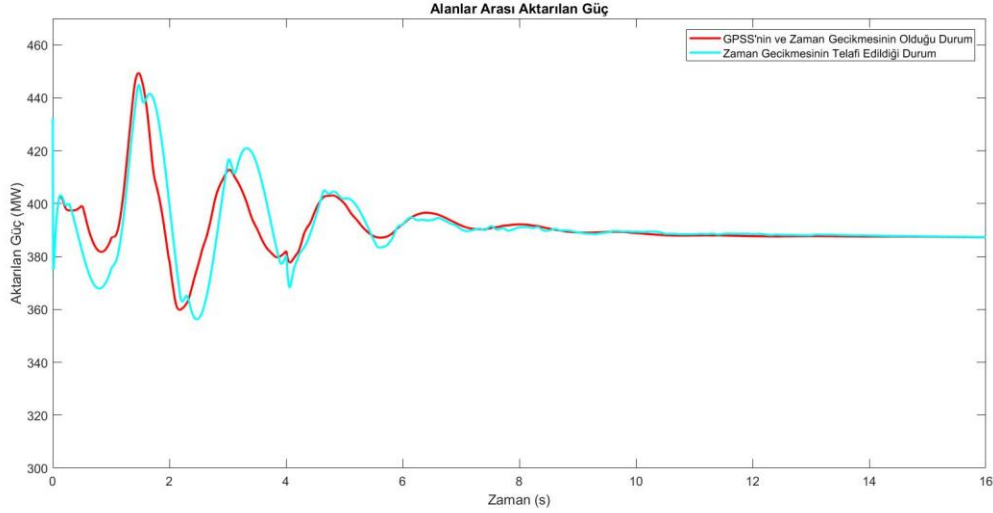
Şekil 4.4. 4. Generatörün Referans Girişine Uygulanan %5'lik Değişim Sonucu Elde Edilen Alanlar Arası Güç Transferinin GPSS Olduğundaki ve Olmadığındaki Durumu

Tasarlanan zaman gecikmesinin sisteme eklenmesiyle elde edilen sönümlenme performansı Şekil 4.5.'te verilmiştir. Zaman gecikmesinin alanlar arası güç transferinde salınım genliğini artırdığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.5. 4. Generatörün Referans Girişine Uygulanan %5'lik Değişim Sonucu Elde Edilen Alanlar Arası Güç Transferinin GPSS'nin ve Zaman Gecikmesinin Durumuna Göre Değişimi

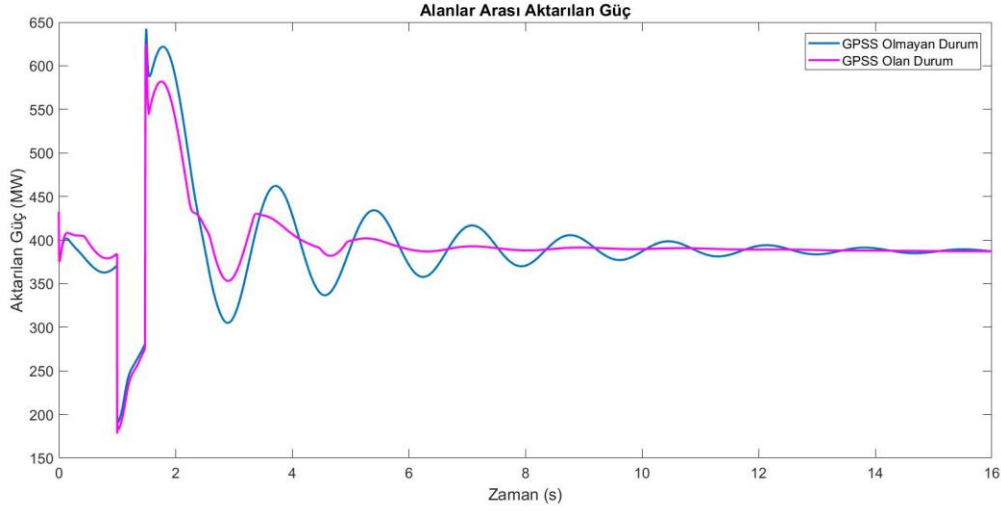
Tasarlanan zaman gecikmesi algoritmasının sisteme eklenmesi ile elde edilen alanlar arası güç transferi tepkisi Şekil 4.6'da verilmiştir. Zaman gecikmesi telafisinin ancak 6. saniyeden sonra etkili olduğu görülmüştür. Daha etkili zaman telafisi için benzetim parametrelerinden 4 saniyelik anahtarlar periyodunun daha kısa seçilmesi gerektiği görülmektedir.



Şekil 4.6. 4. Generatörün Referans Girişine Uygulanan %5'lik Değişim Sonucu Elde Edilen Alanlar Arası Güç Transferinin Zaman Gecikmeli Durumdaki ve Gecikmenin Telafi Edildiği Durumdaki Hali

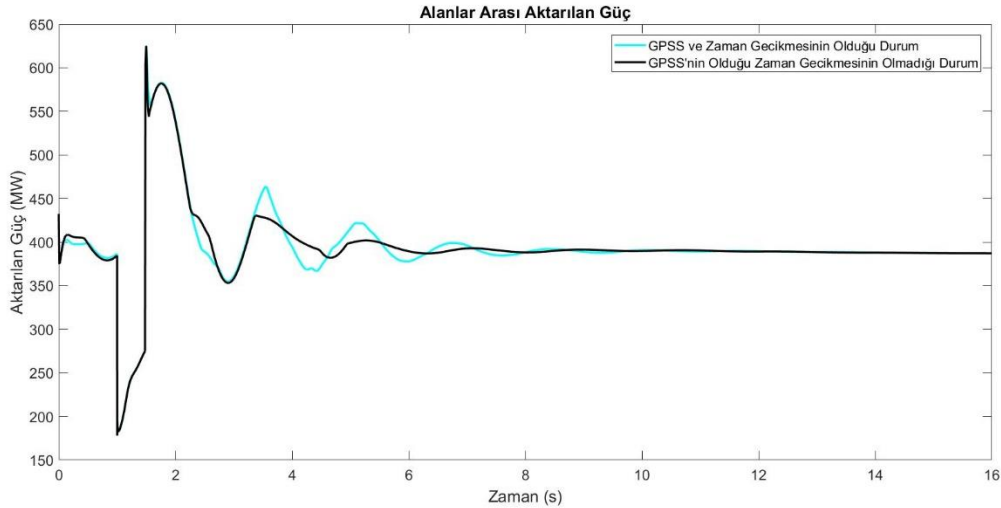
4.3.2 Büyük Bozucu Tepkileri:

Büyük bozucu uygulanan zaman gecikmesiz ideal durumdaki alanlar arası güç transferi tepkisi Şekil 4.7'de verilmiştir. SVC tabanlı geniş alan sönümlenme kontrolörünün bu hata durumunda da etkili bir performans gösterdiği görülmektedir.

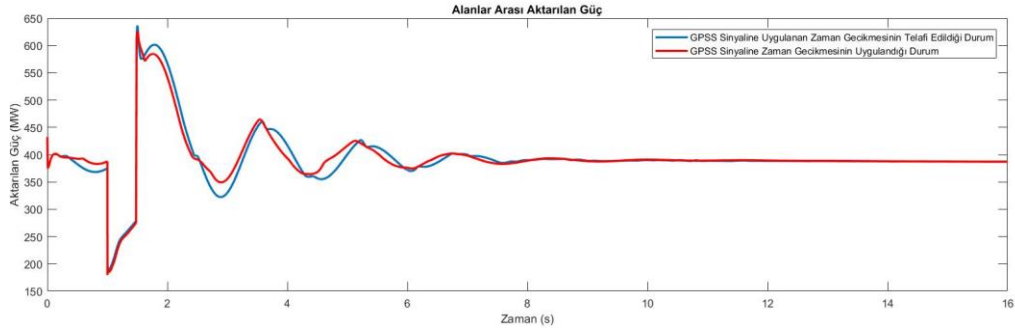


Şekil 4.7. Alanlar Arası Zayıf Hat Üzerine Uygulanan 3 Faz Toprak Hatası Sonrası Güç Transferinin GPSS Olduğundaki ve Olmadığındaki Durumu

Zaman gecikmesinin sönümleme performansı üzerindeki bozucu etkileri Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Önerilen algoritmanın sisteme eklenmesiyle elde edilen tepki ise Şekil 4.9' da verilmiştir. Büyük bozucu tepkisi küçük bozucu tepkisine göre nispeten daha iyi görünse de zaman telafisi performansının yetersiz olduğu söylenebilir. Bu durum daha küçük anahtarlama periyotlarının seçimiyle aşılabılır ama bu da sık anahtarlama sonucu başka salınımları tetikleyebilir. Bu algoritmanın seçilen aynı benzetim parametreleri ile PSS tabanlı sönümleme sistemlerinde etkili sonuçlar aldığı [64]'de yapılan çalışma ile gösterilmiştir.



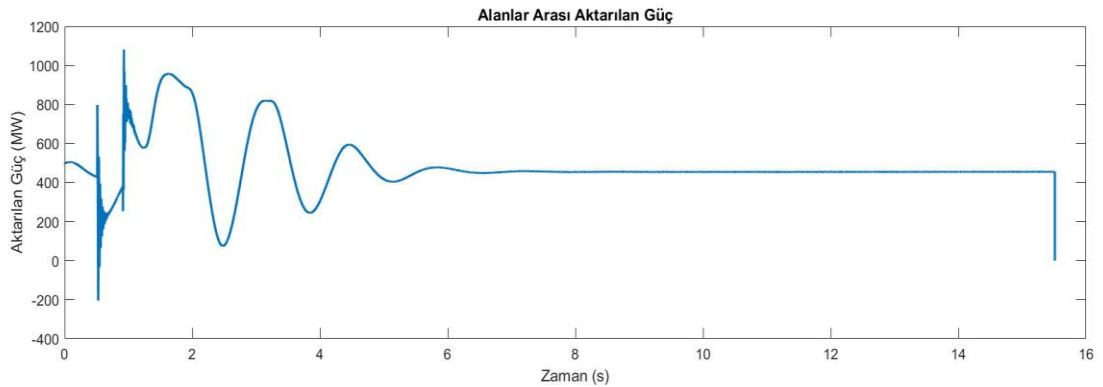
Şekil 4.8. Alanlar Arası Zayıf Hat Üzerine Uygulanan Uygulanan 3 Faz Toprak Hatası Sonrası GPSS'in Performansının Zaman Gecikmeli Duruma ve Zaman Gecikmeli Olmayan Duruma Göre Karşılaştırılması



Şekil 4.9. Alanlar Arası Zayıf Hat Üzerine Uygulanan Uygulanan 3 Faz Toprak Hatası Sonrası GPSS'in Performansının Zaman Gecikmeli Durumdaki ve Gecikmenin Telafi Edildiği Durumdaki Hali

4.4. Gerçek Zamanlı Benzetim Sonuçları

Önerilen sönümlenme sistemi OPAL-RT OP4510 gerçek zamanlı simülasyon kullanılarak test edilmiştir. Şekil 4.10 da zaman gecikmeli sistemde zaman gecikmesi telafi algoritmasının devrede olduğu durumdaki alanlar arası güç transferi tepkisi verilmiştir. Simülasyon sırasında hiçbir overrun gözlenmemiştir. Bu durum önerilen algoritmanın gerçek zamanlı sistemlerde kullanıma uygun olduğu göstermektedir. Yazılımsal benzetimde çözücü (solver) ve SVC modeli olarak 'phasor', gerçek zamanlı benzetimde ise ayrık çözücü ve tristör tabanlı detaylı SVC modelinin kullanılmış olması iki benzetim arasında görülen farklılıkların temel sebeplerindedir.



Şekil 4.10. Gerçek Zamanlı Simülasyonda Gerçekleştirilen Güç Transferi

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada oluşturulan iki alanlı 4 generatörlü güç sistemi modelindeki iki farklı alandaki generatör gruplarının birbirlerine karşı göstermiş olduğu salınımların sönümlenmesi için zaman gecikmelerini de hesaba katan adaptif bir kontrol algoritması geliştirilmiştir. Sistemdeki salınım modları, modsal analiz kullanarak belirlenmiştir. Modların gözlemlenebilirliği ve kontrol edilebilirliği geometrik ölçü yöntemiyle bulunmuştur. Böylece, oluşan lokal ve alanlar arası modların en iyi hangi sinyallerden gözlemlenebildiği ve en iyi hangi generatörde veya barada kontrol edilebildiği saptanmıştır. Sisteme ait A, B, C matrisleri yaygın olarak kullanılan 'Power System Toolbox (PST)' ile bulunmuş olup yük akışı analizi de yine bu toolbox aracılığıyla yapılmıştır. Lokal salınımların sönümlenmesinde buldukları generatörlerin hız değişim değerlerini giriş sinyali olarak kabul eden lokal PSS'ler, alanlar arası salınımların sönümlenmesinde ise iki farklı alanda bulunan 1. ve 3. generatörün hız farkını giriş sinyali olarak kabul eden global PSS tasarlanmıştır. Lokal PSS'lerden çıkan kontrol sinyalleri buldukları generatörlerin uyarım sistemlerine dahil edilmiş olup global PSS'ten çıkan kontrol sinyali ise zayıf hat üzerine kurulu SVC'nin referans girişine eklenmiştir. Global PSS tasarlandıktan sonra, ölçüm ve kontrol sinyallerinin taşındığı iletişim ağındaki zaman gecikmesi Gaussyan dağılımlı rassal değişken olarak modellenip güç sistemine dahil edilmiştir. Zaman gecikmelerinin sebep olduğu bozucu etkiyi ortadan kaldırmak için lead-lag kontrolörleri kontrol eden adaptif bir anahtarlama algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmanın ve tasarlanan global PSS'in zaman gecikmelerine ve salınımlara karşı ortaya koymuş olduğu performansları farklı durumlar için karşılaştırılmıştır. Ayrıca geliştirilen algoritma ve tasarlanan global PSS gerçek zamanlı olarak test edilmiş ve salınım sönümlemede etkili olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada geliştirilen algoritma daha da iyileştirilip alanlar arası salınımları daha kısa sürede bastırabilir. Yaşanabilecek zaman gecikmeleri daha fazla aralığa bölünüp bu aralıktaki ortalama değerler yerine maksimum veya minimum değerler kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1]. Novosel, D., "CIEE Phasor Measurement Application Study," project report, for California Energy Commission, KEMA Inc., 2008.
- [2]. Chapman, S. J., *Electric machinery Fundamentals*. 5th ed.; McGraw-Hill, New York, 2012.
- [3] Morison K., Lei Wang, Kundur P., "Power system security assessment", IEEE Power and Energy Magazine, Volume 2, Issue 5, September - October 2004, Pages 30 – 39.
- [4]. Bahar, H. and J. Sauvage (2013), "Cross-Border Trade in Electricity and the Development of Renewables-Based Electric Power: Lessons from Europe", OECD Trade and Environment Working Papers, 2013/02, OECD Publishing.
- [5]. Atputharajah, A., Saha, T. K. (2009, December). Power System Blackouts - Literature review. *Fourth International Conference on Industrial and Information Systems, ICIIS 2009*.
- [6]. Masoum, M. A. S., Fuchs, E. W., *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*. 2nd ed; Elsevier, San Diego, 2015.
- [7]. Pal, B., Chaudhuri, B., *Robust Control in Power Systems*. Springer, USA, 2005.
- [8]. M. Klein, G. J. Rogers and P. Kundur, "A Fundamental Study of Inter-area Oscillations in Power Systems," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 3, pp. 914-921, August 1991.
- [9]. Rogers, G. (2000). Power System Oscillations. New York: Springer Science+Business Media.
- [10]. Rogers, G., "Demystifying Power System Oscillations," *IEEE Computer Applications in Power*, pp. 30-35, July 1996.
- [11]. Kundur, P., Klein, M., Rogers, G. J., Zywno, M. S. (1989). Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 4(2), 614-626.
- [12]. J. Chow, J. Sanchez-Gasca, H. Ren, and S. Wang, "Power System Damping Controller Design Using Multiple Input Signals," *IEEE Control System Magazine*, vol. 20, no. 4, pp. 82-90, August 2000.
- [13]. Hingorani, N., Gyugyi, L. (2000). Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems. IEEE Press, New York.
- [14]. Mithulananthan, N., Canizares, C. A., Reeve, J., Rogers, G. J. (2003). Comparison of PSS , SVC , and STATCOM Controllers for Damping Power System Oscillations. *IEEE Transactions on Power Systems*, 18(2), 786-792.
- [15]. Zhang, Y., Bose, A. (2008). Design of Wide-Area Damping Controllers for Interarea Oscillations. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(3), 1136-1143.
- [16]. Mittelstadt, W. A., Krause, P. E., Overholt, P. N., Hauer, J. F., Wilson, R. E., Rizy, D. T. (1995). The DOE wide area measurement system (WAMS) project—Demonstration of dynamic information technology for future power system. *Fault and Disturbance Analysis & Precise Measurements in Power Systems*, 1-7.

- [17]. Almas, M. S., Vanfretti, L. "RT-HIL testing of an excitation control system for oscillation damping using external stabilizing signals," 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, CO, 2015, pp. 1-5.
- [18]. Tapin, L., Mehta, R. K. (2014). Overview and Literature Survey of Power System Stabilizer In Power Systems. *International Journal of Engineering Research and Development*, 10(6), 60-71.
- [19]. Larsen, E. V., Swann, D. A. (1981). Applying power system stabilizers part I: General concepts. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-100(6), 3017-3024.
- [20]. Zea, A. A., Power System Stabilizers for The Synchronous Generator - Tuning and Performance Evaluation, Master of Science Thesis, Department of Energy and Environment, Division of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2013.
- [21] Abido, M. A., (2001). Swarm Optimization for Multimachine Power System Stabilizer Design. *2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 01CH37262)*, vol.3, pp. 1346-1351.
- [22] Shi, J., Herron, L.H., Kalam, A. (1993). Design and Implementation of a PC-based Automatic Voltage Regulator and Fuzzy Logic Power System Stabilizer. *IEE 2nd International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management*, vol.1, pp.293-298.
- [23]. Aboul-Ela, M. E., Sallam, A. A., McCalley, J. D., Fouad, A. A. (1996). Damping Controller Design for Power System Oscillations Using Global Signals. *IEEE Transactions on Power Systems*, 11(2), 767-773.
- [24]. Snyder, A. F., Hadjsaid, N., Georges, D., Mili, L., Phadke, A. G., Faucon, O., Vitet, S. Inter-Area Oscillation Damping with Power System Stabilizers and Synchronized Phasor Measurements. *1998 International Conference on Power System Technology. Proceedings(Cat. No. 98EX151)*, vol.2, 790-794.
- [25]. Bıyık, E., Husein, M. (2017). Damping wide-area oscillations in power systems: a model predictive control design. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 26(1), 467-478.
- [26]. Hingorani, N. G. (1993). Flexible AC Transmission. *IEEE Spectrum*, 30(4), 40-45.
- [27]. Acha, E., Fuerte-Esquivel, C. R., Ambriz-Perez, H., Angeles-Camacho, C. (2004). FACTS - Modelling and Simulation in Power Networks. England: John Wiley & Sons Ltd.
- [28]. Lerch, E., Povh, D., Xu, L. (1991). Advanced SVC Control for Damping Power System Oscillations. *IEEE Transactions on Power Systems*, 6(2), 524-535.
- [29]. Zhou, E. Z. (1993). Application of Static Var Compensators to Increase Power System Damping. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(2), 655-661.
- [30]. Zhao, Q., Jiang, J. (1995). Robust SVC Controller Design for Improving Power System Damping. *IEEE Transactions on Power Systems*, 10(4), 1927-1932.
- [31]. Wang, H. F., Swift, F. J. (1996). Capability of the static VAR compensator in damping power system oscillations. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 143(4), 353-358.

- [32]. So, P. L., Yu, T. (2000). Coordination of TCSC and SVC for Inter-Area Stability Enhancement. *2000 International Conference on Power System Technology, Proceedings*, vol.1, 553-558.
- [33]. Phorang, K., Leelajindakraireak, M., Mizutani, Y. (2002). Damping Improvement of Oscillation in Power System by FuzzyLogic Based SVC Stabilizer. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, vol.3, 1542-1547.
- [34]. Mustafa, M. W., Magaji, N. (2008). Design of Power Oscillation Damping Controller for SVC Device. *2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08)*, 1329-1332.
- [35]. Magaji, N., Mustafa, M. W., Muda, Z. B. (2009). Power System Damping Using GA Based Fuzzy Controlled SVC Device. *TENCON 2009 - 2009 IEEE Region 10 Conference*, Singapore, 1-7.
- [36]. Liu, F., Yokoyama, R., Li, Y., Zhou, Y., Wu, M. (2010). SVC Robust Additional Damping Controller Design for Power System with Considering Time-delay of Wide-area Signals. *2010 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Prague*, 313-316.
- [37]. Hosseini, H., Tusi, B., Razmjoooy, N., Khalilpoor, M. (2011). Optimum design of PSS and SVC controller for damping low frequency oscillation (LFO). *The 2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation*, 62-67.
- [38]. Eslami, M., Shareef, H., Mohamed, A., Khajehzadeh, M. (2011). Coordinated Design of PSS and SVC Damping Controller Using CPSO. *2011 5th International Power Engineering and Optimization Conference*, 11-16.
- [39]. Uhlen, K., Vanfretti, L., de Oliveira, M. M., Leirbukt, A. B., Aarstrand, V. H., Gjerde, J. O. (2012). Wide-Area Power Oscillation Damper Implementation and Testing in the Norwegian Transmission Network. *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 1-7.
- [40]. Zhang, S., Vittal, V. (2013). Design of Wide-Area Power System Damping Controllers Resilient to Communication Failures. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(4), 4292-4300.
- [41]. Liu, Z., Cheng, X., Cai, D., Ding, L. (2016). The application of SVC for damping inter-area oscillations. *2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2236-2239.
- [42]. Kande, M., Gore, R. (2015). Analysis of Wide Area Monitoring System Architectures. *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 1269-1274.
- [43]. Phadke, A.G. (2008). The Wide World of Wide Area Measurement. *IEEE power& energy magazine, September/October*, 6(5), 52-65.
- [44]. Abur, A., Exposito, A. G. (2004). Power System State Estimation: Theory and Implementation. New York: Marcel Dekker, Inc .
- [45]. Huang, Z., Zhou, N., Li, Y., Nichols, P., Jin, S., Diao, R., Chen, Y. (2014). Dynamic paradigm for grid operations. *IFAC Proceedings*, 45(21), 218-223.
- [46]. Asprou, M., Chakrabarti, S., Kyriakides, E. (2014). A Two-Stage State Estimator for Dynamic Monitoring of Power Systems. *IEEE Systems Journal*, 11(3), 1767-1776.

- [47]. Chakrabarti, S., Kyriakides, E., Bi, T., Cai, D., Terzija, V. (2009). Measurements get together. *IEEE Power and Energy magazine, January*, 7(1), pp. 41-49.
- [48]. Phadke, A. G. (2002). Synchronized phasor measurements-a historical overview. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, vol.1, 476-479.
- [49]. Phadke, A. G., Bi, T. (2018). Phasor measurement units, WAMS, and their applications in protection and control of power systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 6(4), 619-629.
- [50]. Phadke, A. G., Thorp, J. S., (2006). History and Applications of Phasor Measurements. *2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, 331-335.
- [51]. Phadke, A. G., Thorp, J. S., (2008). Synchronized Phasor Measurements and Their Applications. New York: Springer.
- [52]. IEEE Power and Energy Society (2013). IEEE Guide for Phasor Data Concentrator Requirements for Power System Protection, Control, and Monitoring. *IEEE Std C37.244-2013*, 1-65.
- [53]. Kundur, P. (1994). Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill, Inc.
- [54]. Heniche, A., Kamwa, I. (2008). Assessment of Two Methods to Select Wide-Area Signals for Power System Damping Control, *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(2), 572-581.
- [55]. Hamdan, A. M. A., Elabdalla, A. M. (1988). Geometric Measures of Modal Controllability and Observability of Power System Models, *Electric Power Systems Research*, 15(2), 147-155.
- [56]. Yazıcı, İ., Özdemir, A. (2008). Optimal Kazanç Tabloları ile Güç Sistem Kararlayıcısı Tasarımı, *SAÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 38-42.
- [57]. Jerković, V., Miklošević, K., Špoljarić, Ž. (2010). Excitation System Models of Synchronous Generator. *28th International Conference Science in Practice*.

[58]. Saraf, P., Balasubramaniam, K., Hadidi, R., Makram, E. (2015). Design of a wide area damping controller based on partial righteigenstructure assignment, *Electric Power Systems Research*, vol. 134, 134-144.

[59]. Saadat, H. (1999). Power System Analysis. Boston: McGraw-Hill, Inc.

[60]. Aggarwal, S. K., Power Flow Analysis in Integrated AC-DC Systems, Yüksek Lisans Tezi, Department of Electrical Engineering National Institute of Technology, Kurukshetra University, 2004.

[61]. Glover, J. D., Sarma, M. S., Overbye, T. J. (2012). Power System Analysis and Design. Stamford: Cengage Learning.

[62]. Chen G, Sun Y, Venkatasubramanian V, Cheng L, Lin J, Bose A, Zhao W, Lin C. (2012). Wide area control framework design considering different feedback time delays. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*: 1-8.

[63]. Cheng Lin, Chen G, Gao W, Zhang F. (2014). Adaptive time delay compensator (ATDC) design for wide-area power system stabilizer. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(6): 2957-2966.

[64]. Yalçın, Ş. B., Başel, M. B., Mete, A.N., An Adaptive Wide-Area Damping Control Scheme Considering Networked Induced Time Delays. *6th International Conference on Control Engineering & Information Technology*, 2018: 1-6.

EKLER**EK-1****Güç Sistemi Modelindeki Generatörlere Ait Dinamik Parametre Değerleri**

Açıklama	Sembol	Değer	Birim
Nominal Görünür Güç	MBASE	900	MVA
d-ekseni Açık Devre Transient Zaman Sabiti	T'_{d0}	8.0	s
d-ekseni Açık Devre Sub-transient Zaman Sabiti	T''_{d0}	0.03	s
q-ekseni Açık Devre Transient Zaman Sabiti	T'_{q0}	0.4	s
q-ekseni Açık Devre Sub-transient Zaman Sabiti	T''_{d0}	0.05	s
Atalet sabiti	H	H _{1,2} = 7.2 H ₃ = 4.5 H ₂ = 7	MW.s/MVA
Hız Sönümlenme	D	0	pu
d-ekseni Senkron Reaktans	X_d	1.8	pu
q-ekseni Senkron Reaktans	X_q	1.7	pu
d-ekseni Transient Reaktans	X'_d	0.3	pu
q-ekseni Transient Reaktans	X'_q	0.55	pu
Sub-transient Reaktans	$X''_d = X''_q$	0.25	pu
Kaçak Reaktans	X_l	0.2	pu
1.0 pu Gerilimde Doyma Faktörü	S(1.0)	0.0392	
1.2 pu Gerilimde Doyma Faktörü	S(1.2)	0.2672	

Lokal PSS'lere Ait Parametre Değerleri

Açıklama	Sembol	G1	G3	Birim
Kararlaştırıcı Kazancı	K	30	30	-
Washout Zaman Kazancı	T	10	10	-
1. Lead-Lag Pay Zaman Sabiti	T_1	0.05	0.05	s
2. Lead-Lag Pay Zaman Sabiti	T_2	0.02	0.02	s
1. Lead-Lag Payda Zaman Sabiti	T_3	3	3	s
2. Lead-Lag Payda Zaman Sabiti	T_4	5.4	5.4	s
Kararlaştırıcı Sinyal Maximum Değeri	H_{LIM}	0.15	0.15	s

* Sistemde sadece 1. ve 3. generatörlere lokal PSS kurulmuştur.

Buhar/Gaz türbini Hız Regülatörü Verileri

Açıklama	Sembol	Değer	Birim
Türbin Gecikmesi Zaman Sabiti	T_3	2	-
Türbin Değişken Zaman Sabiti	T_2	1	s
Türbin Güç Katsayısı	A_T	1	s
Sürtünme Kaybı Faktörü	D_T	0	s
Kontrolör Düşümü	R	0.05	s
Hız Kontrolörü Zaman Sabiti	T_1	0.2	s
Türbin Nominal Gücü	P_N	0	s
Minimum Geçit Limiti	V_{min}	0	s
Maksimum Geçit Limiti	V_{max}	1	p.u

ST3A Dinamik Verileri

Açıklama	Sembol	Değer	Birim
Gerilim Transdüseri Zaman Sabiti	T_R	0.015	s
Maksimum Kontrolör Girişi	$V_{I_{max}}$	0.9	pu
Maksimum Kontrolör Girişi	$V_{I_{min}}$	-0.9	pu
TGR 1. Blok Pay Zaman Sabiti	T_C	1	s
TGR 1. Blok Payda Zaman Sabiti	T_B	10	s
Dengeleme Kazancı	K_G	0.1	pu
Voltaj Komponent Değeri	K_P	1	pu
AVR Kararlı Hal Kazancı	K_A	200	pu
Doğrultucu Köprüsü Eşdeğer Zaman Sabiti	T_A	0.1	s
Voltaj Komponent Açısı	$theta_p$	20	deg
Akım Faktörü	K_I	0.1	pu
Maksimum Kontrolör Çıkışı	$V_{R_{max}}$	5	pu
Minimum Kontrolör Çıkışı	$V_{R_{min}}$	-5	pu
Tahrik Sistemi Akım Faktörü	K_C	0.1	pu
Giriş Filtre Faktörü	K_J	0	pu
Voltaj Ölçüm Reaktansı	X_L	0.1	pu
Tahrik Sistemi Maksimum Output	EFD_{max}	6	pu
Dengeleme Yolu Maksimum Gerilimi	$V_{g_{max}}$	10	pu

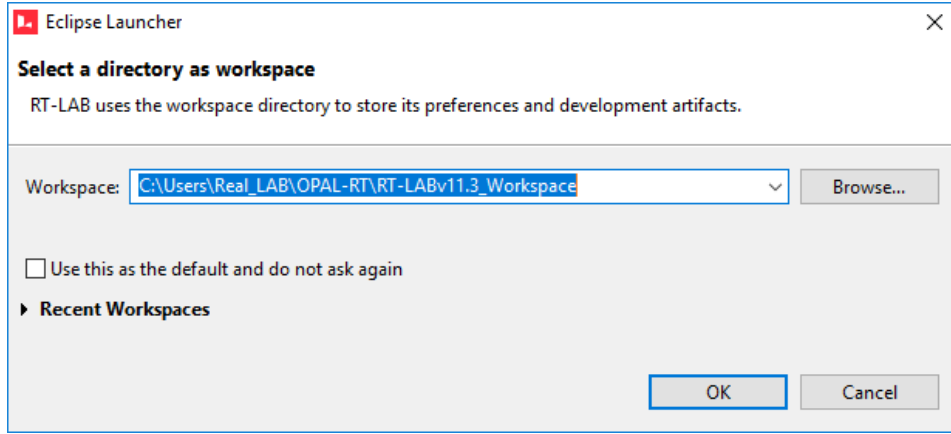
EK-2**Güç Sistemi Modelinin ve Tasarlanan Adaptif Algoritma ve GPSS'nin Gerçek Zamanlı Simülatöre Gömülmesi**

Yazılımsal benzetimde kullanılan 2 alanlı 4 generatörlü güç sisteminin gerçek zamanlı simülatörde kullanımı için gereken model uyarlamaları sırasıyla şu adımlar izlenerek yapılmıştır:

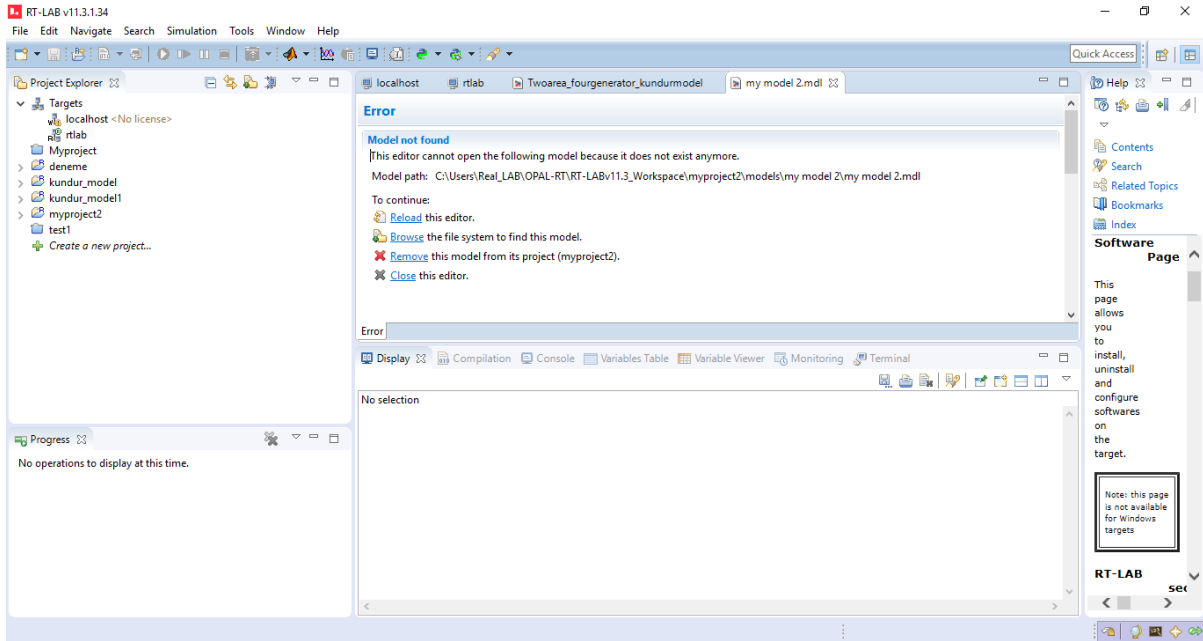
- i. Hedef aygıtın (simülatörün) projeye eklenmesi
- ii. RT-LAB'de yeni bir projenin oluşturulması
- iii. Projeye yeni bir modelin eklenmesi
- iv. Eklenen modelin kurulması ve düzenlenmesi

1. Hedef Aygıtın(Simülatörün) Projeye Eklenmesi

Öncelikle, RT-LAB programı açıldığında oluşturulan projelerin kaydedileceği çalışma alanının (workspace) belirleneceği diyalog kutusu Şekil 1.'deki gibidir. Burada hedef dosya dizini belirlenip tamama (OK) basılınca Şekil 2.'de gösterilen RT-LAB programının ara yüzü çıkmaktadır.



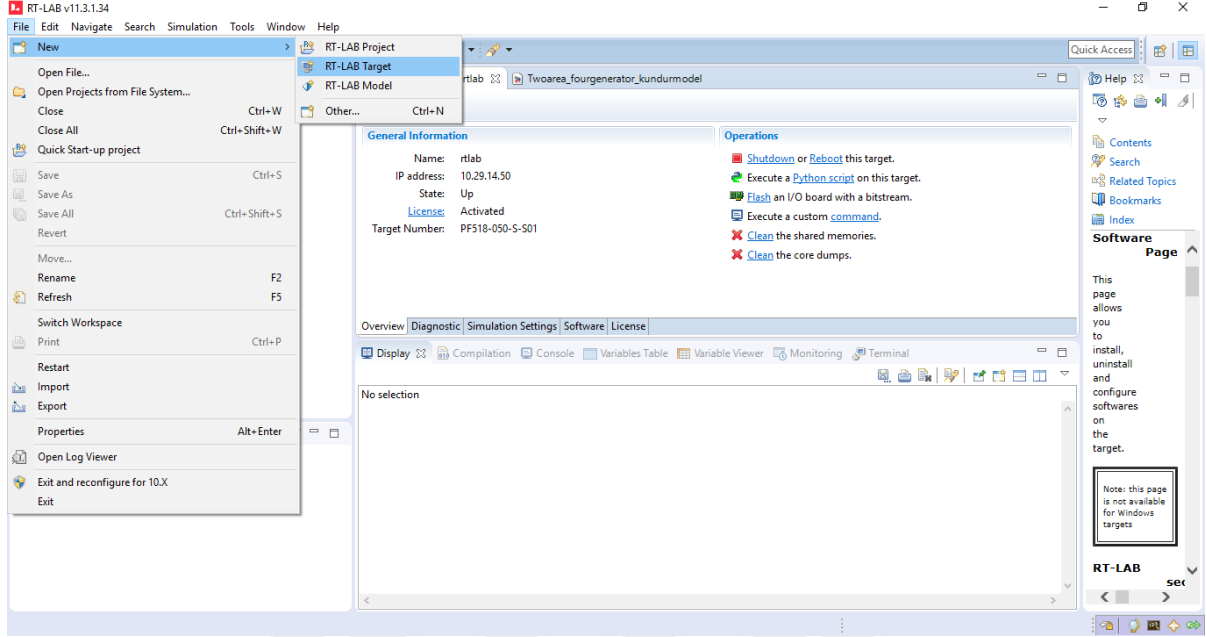
Şekil 1. Hedef dosya dizinin(Workspace) belirleneceği diyalog kutusu



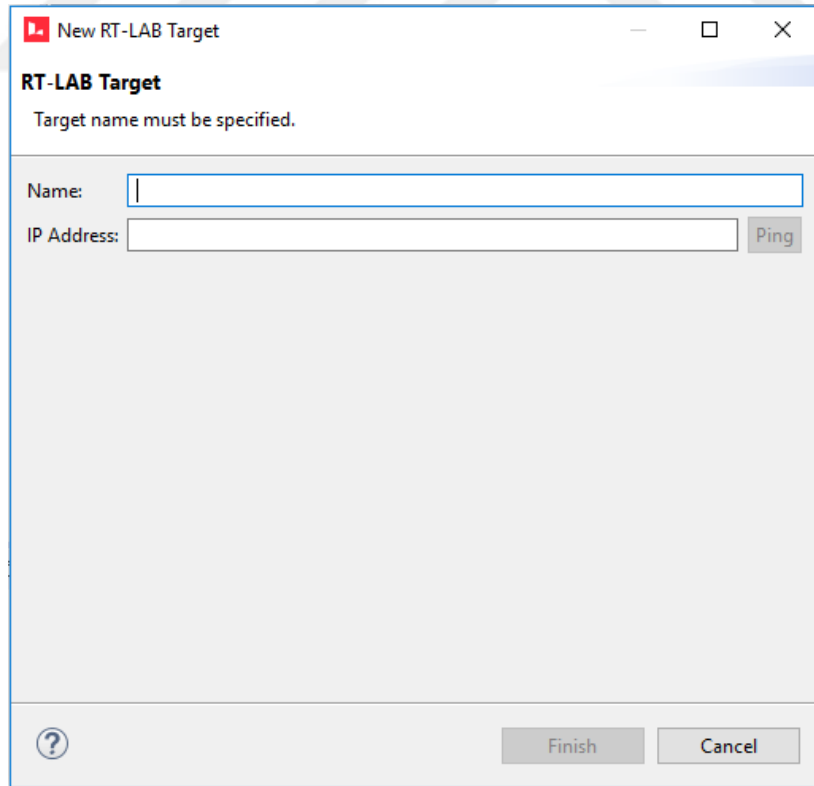
Şekil 2. Açılış arayüzü

Ara yüzde 'Project Explorer' bölümünde yer alan 'Targets' alt bölümüne kullanılacak olan simülâtör hedef aygıt olarak eklenmelidir. Bu iki farklı yöntemle yapılabilmektedir. Birincisinde açılış ara yüzünün sol üst tarafında bulunan 'File' sekmesine gelip buradan sırasıyla Şekil 3.'te görüldüğü gibi 'New>RT-LAB Target' seçeneğinin seçilmesi gerekmektedir. Seçildikten sonra Şekil 4.'te görülen diyalog kutusunda simülâtörün isminin ve IP adresinin belirlenmesi gerekmektedir. Diğer yöntemde Şekil 5.'te ifade edildiği gibi ise yine 'Project Explorer' bölümünde yer alan 'Targets' alt bölümüne gelip buradan 'Discover Targets' seçilmesi gerekmektedir. Sonrasında RT-LAB programı yerel ağa bağlı olan simülâtörü otomatik olarak aramaktadır.

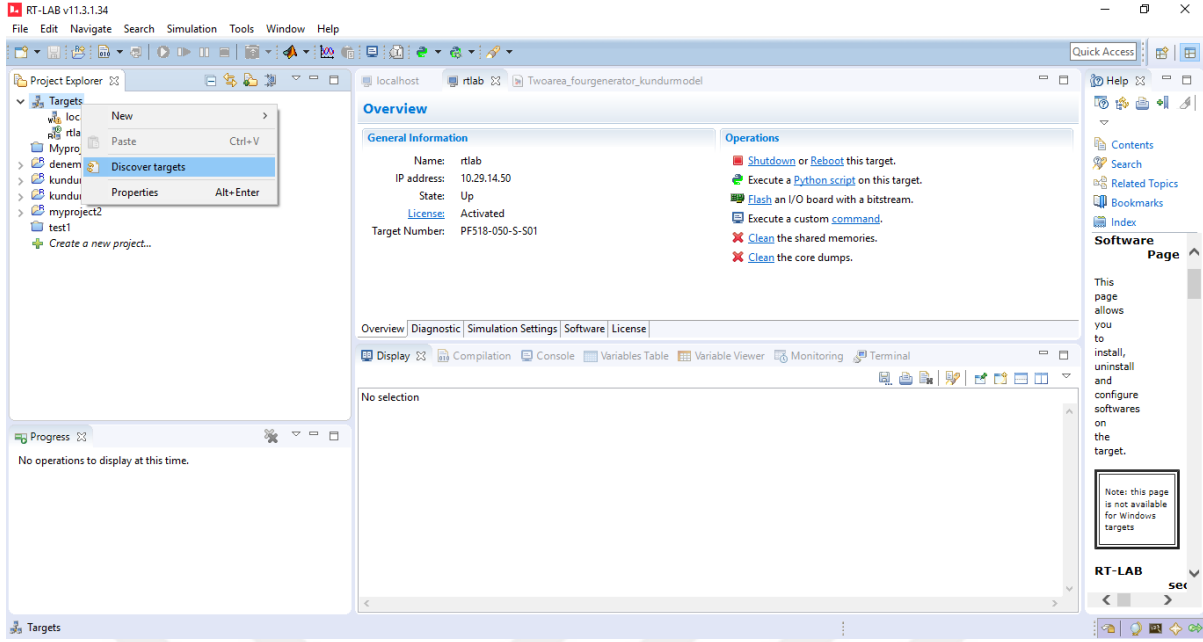
Simülâtör eklendikten sonra, onunla ilgili simülasyon ayarlarının, lisanslama işleminin ve kapsamlı bilgilerin bulunduğu alt pencerede çeşitli ayarlar yapılabilmektedir. Bu alt pencere Şekil 6.'da görülmektedir.



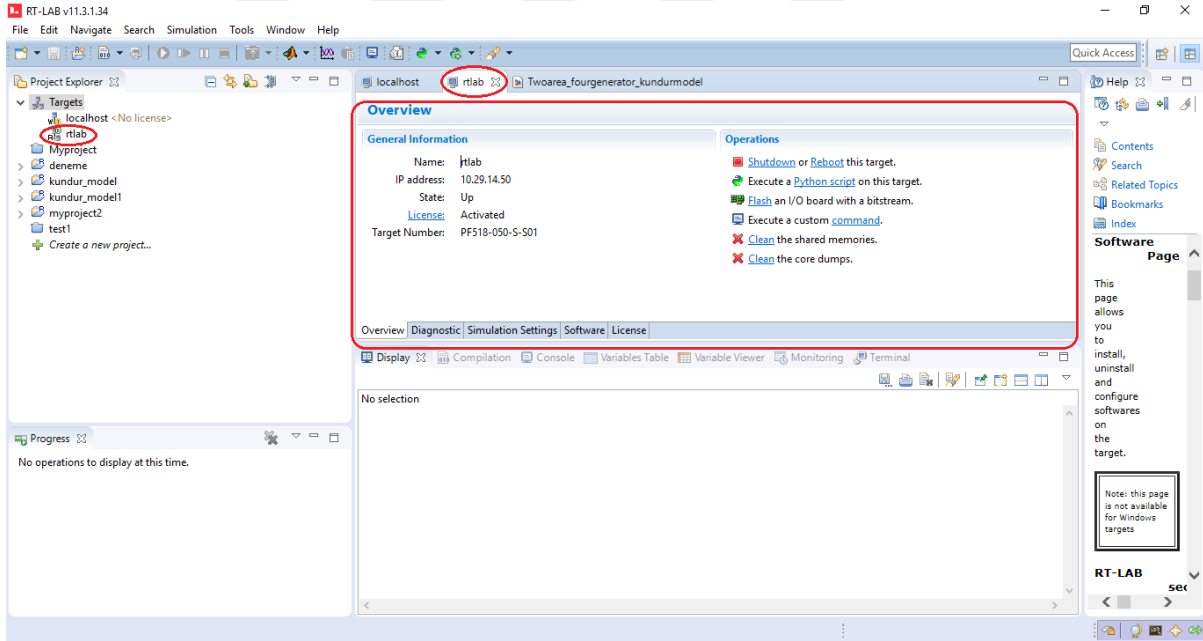
Şekil 3. Simülâtörün RT-LAB programına hedef aygıt olarak eklenmesi



Şekil 4. Simülâtörün isim ve IP adresinin belirlenmesi



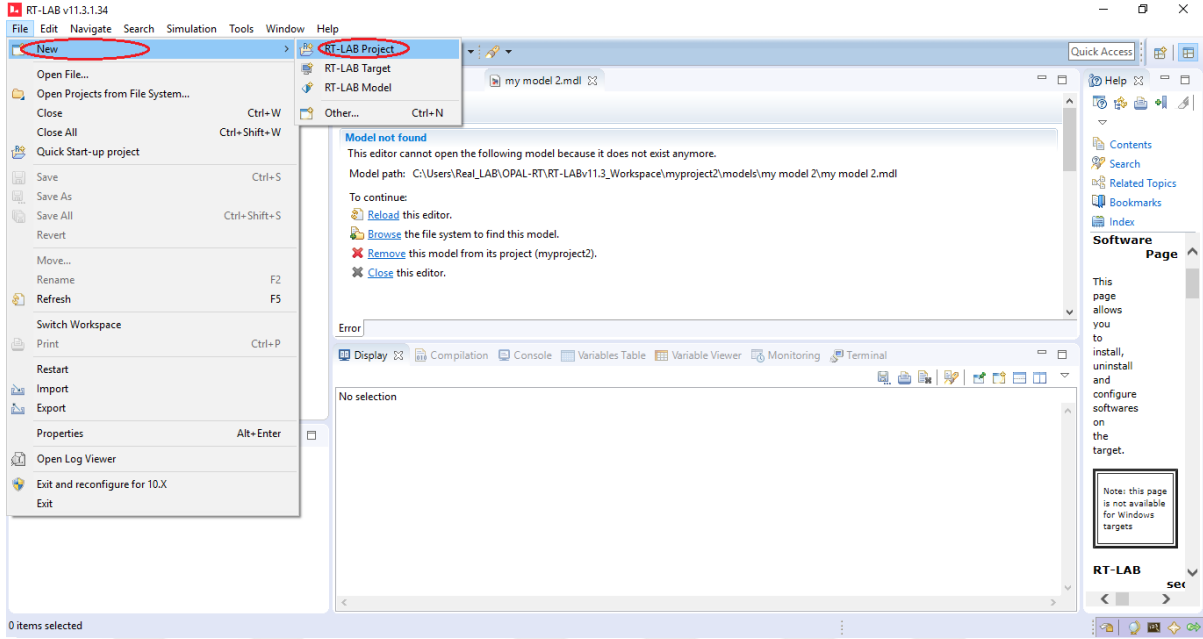
Şekil 5. Simülâtörün RT-LAB programına hedef aygıt olarak eklenmesi için ağda otomatik olarak aratılması



Şekil 6. RT-LAB programına hedef aygıt olarak eklenen simülâtörle ilgili kapsamlı bilgilerin olduğu alt pencere

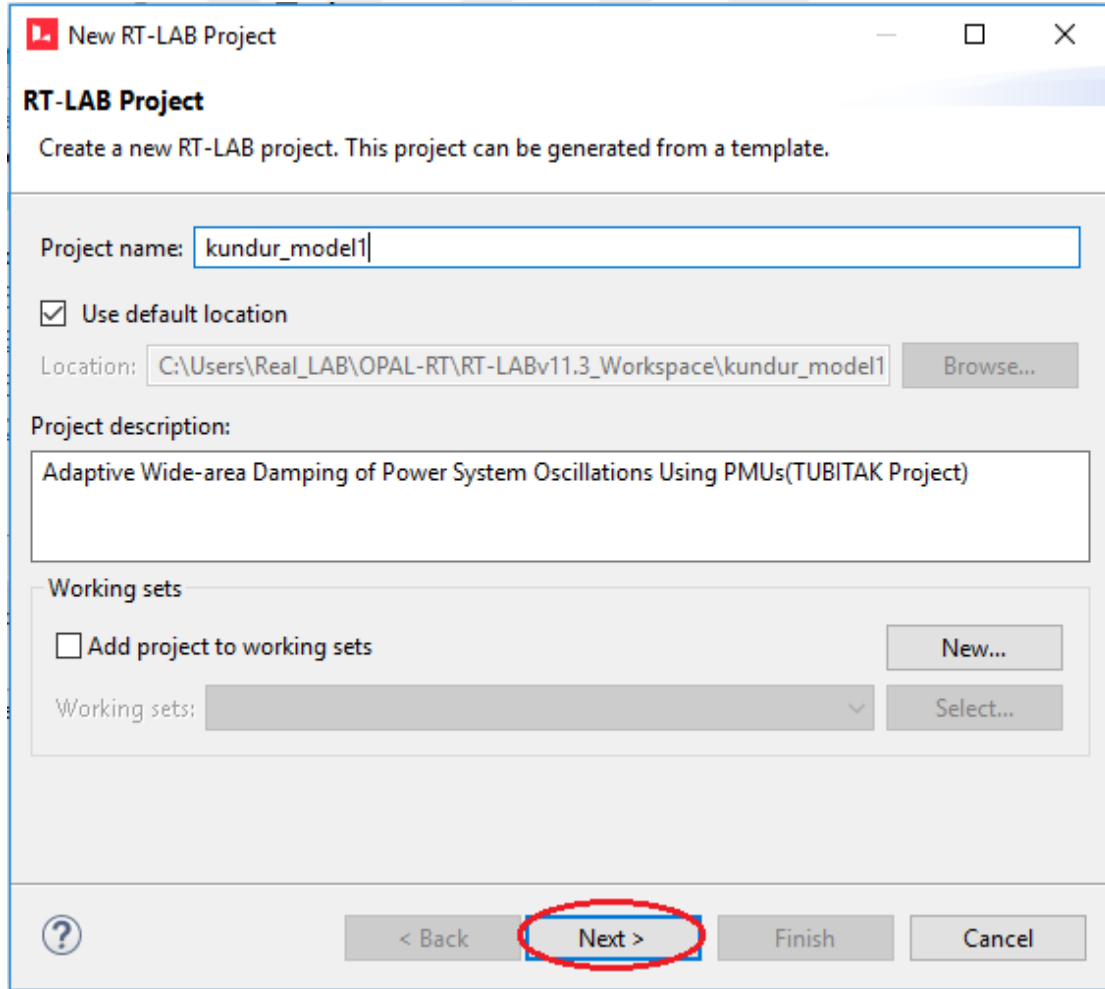
2. RT-LAB'de Yeni Bir Projenin Oluşturulması

Simülâtörle ilgili ayarlar yapıldıktan sonra yeni bir proje oluşturulması için Şekil 7.'de görüldüğü gibi sırasıyla 'File>New>RT-LAB Project' seçeneğinin seçilmesi gerekmektedir.



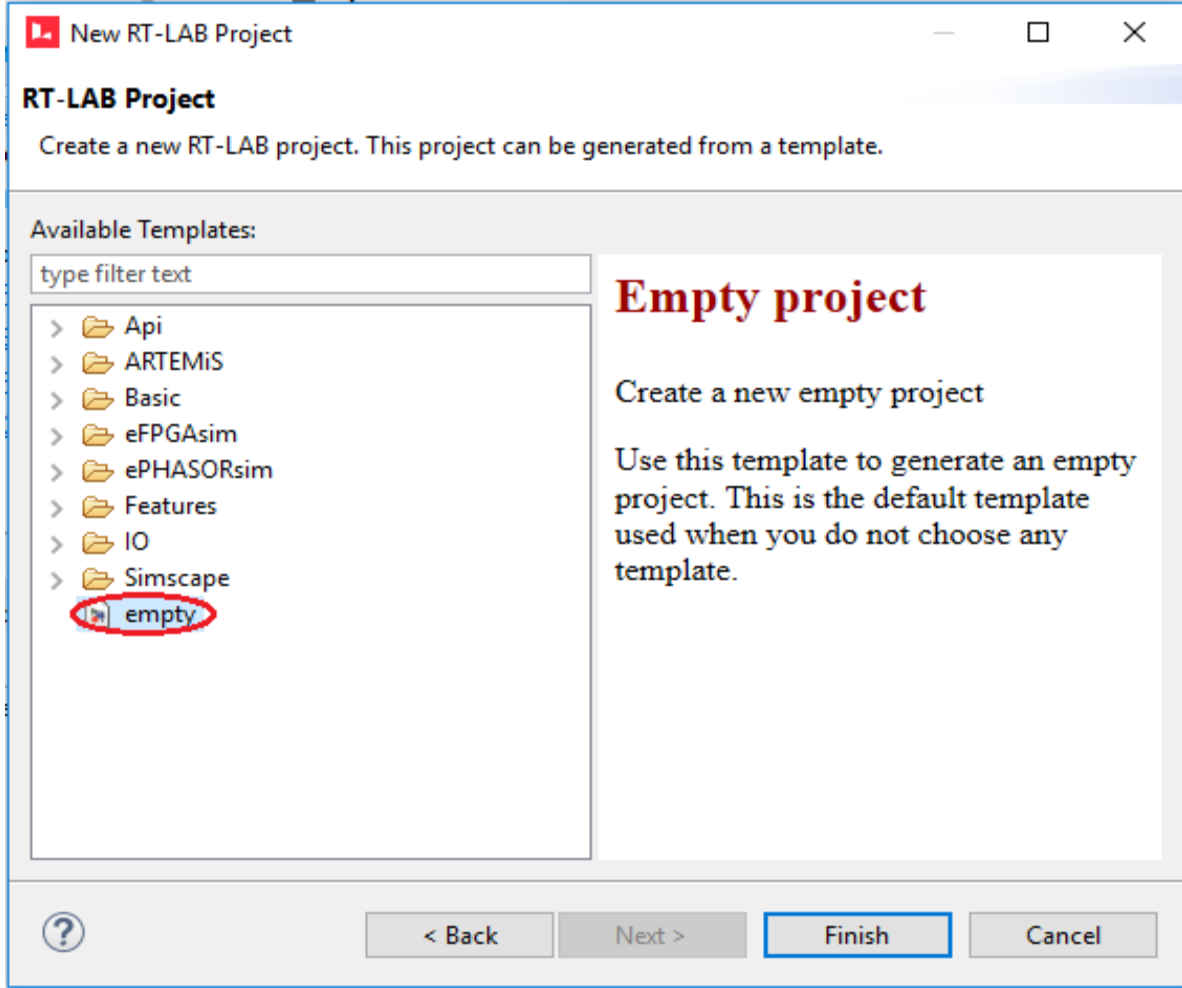
Şekil 7. Projenin oluşturulması

Bu seçenek seçildikten sonra Şekil 8.'de görülen diyalog kutusu açılmaktadır.



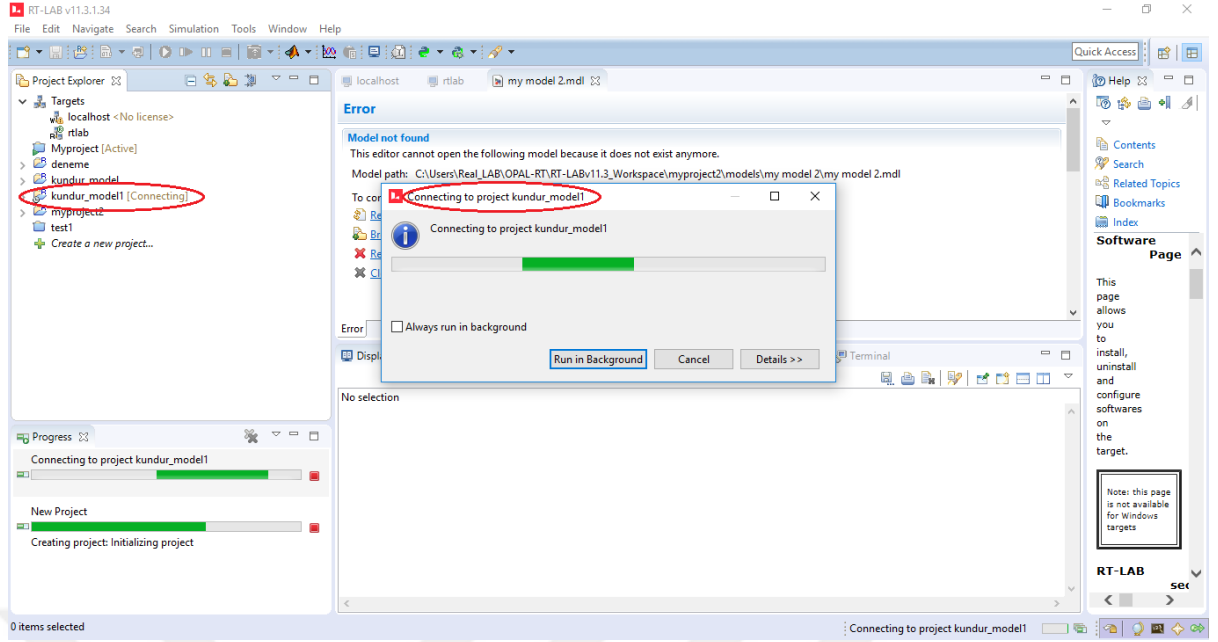
Şekil 8. Proje bilgilerinin belirlenmesi

Bu diyalog kutusunda projenin ismi, konumu ve tanımı ile ilgili bilgiler belirlendikten sonra bir sonraki aşamaya geçilmesi gerekmektedir. Bu aşama Şekil 9.'da görülmektedir.



Şekil 9. Projenin şablonunun belirlenmesi

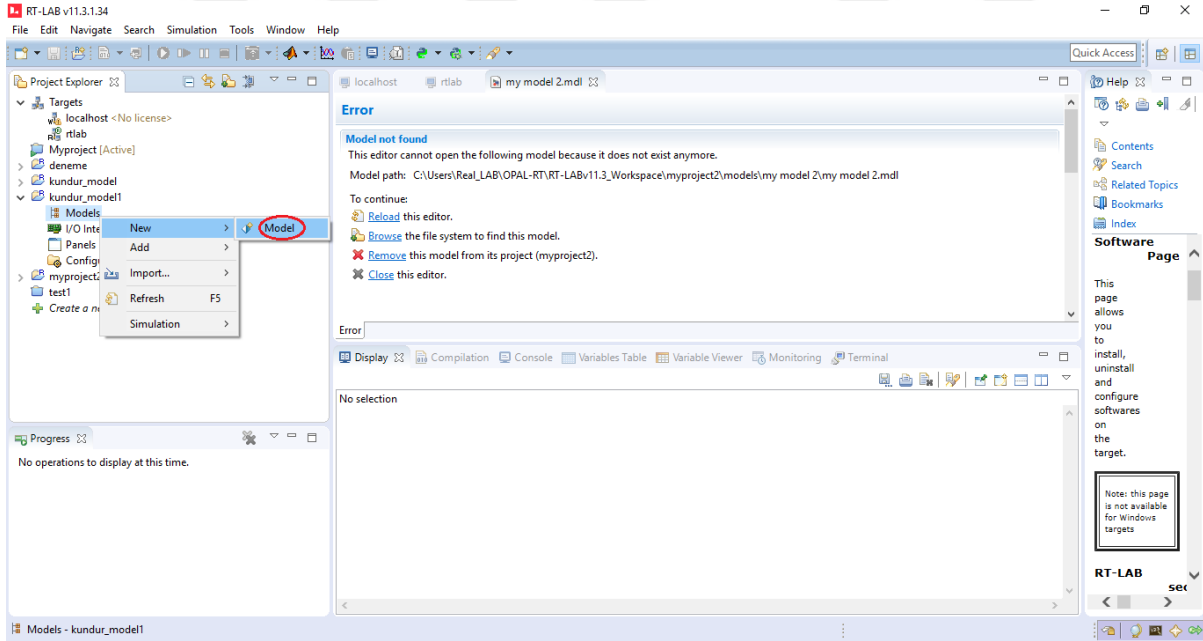
Bu aşamada hazırda bulunan şablonlardan birisi veya boş bir şablon seçilebilmektedir. Seçildikten sonra projenin oluşturulması tamamlanmaktadır ve ekranda Şekil 10.'da görüldüğü gibi bir diyalog kutusu belirmektedir.



Şekil 10. Projenin oluşturulma aşaması

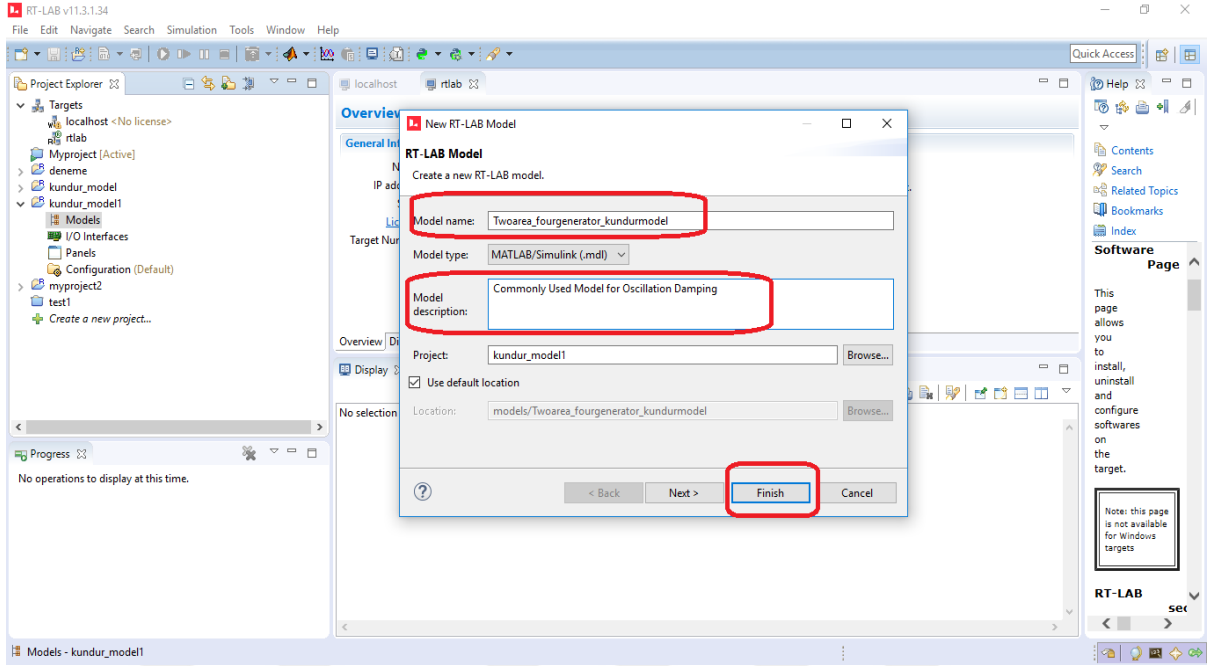
3. Projeye Yeni Bir Modelin Eklenmesi

Proje oluşturulması tamamlandıktan sonra bu projeye yeni bir model eklenmesi gerekmektedir. Modelin eklenmesi, Şekil 11.'deki gibi yapılmaktadır. 'Project Explorer'da oluşturulan projenin alt sekmesinde sırasıyla 'Models>New>Model' seçeneğinin seçilmesi gerekmektedir.



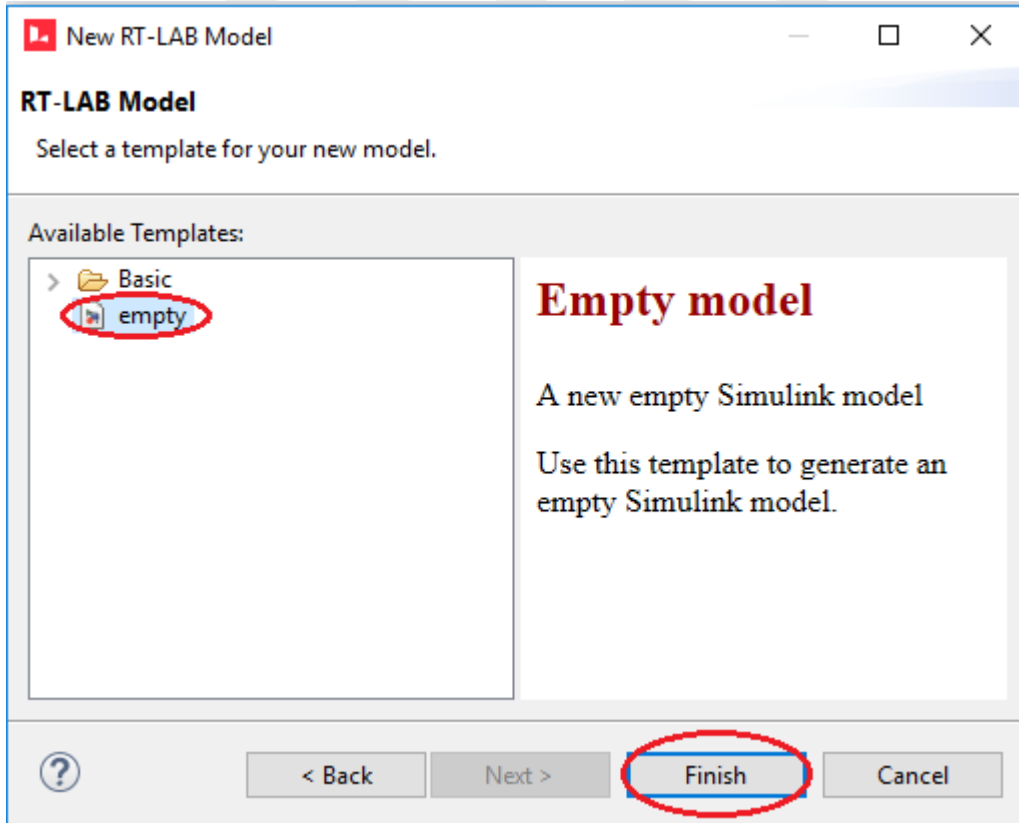
Şekil 11. Oluşturulan projeye yeni bir model eklenmesi

Bu model eklendikten sonra model ile ilgili bilgilerin belirlendiği Şekil 12.'de görülen diyalog kutusu açılmaktadır. Burada modelin tipi, ismi, tanımı gibi model ile ilgili bilgiler belirlenmektedir.



Şekil 12. Model bilgilerinin belirlenmesi

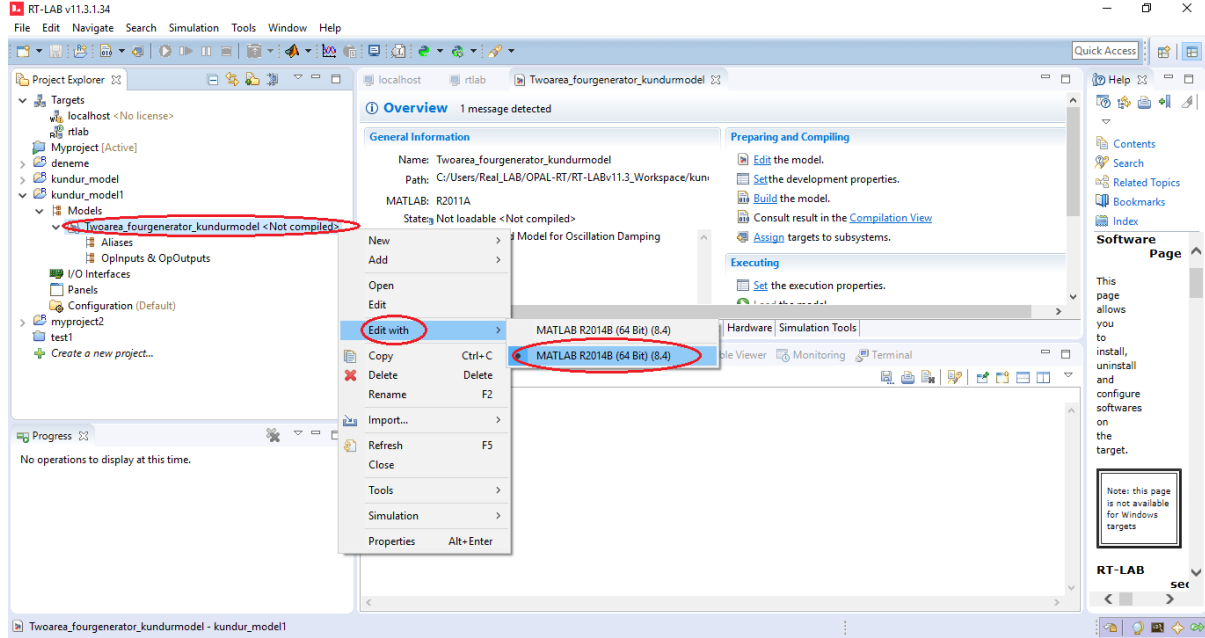
Sonraki aşamada ise model için hazır bulunan şablonlardan birisi veya boş bir şablon seçilmektedir.



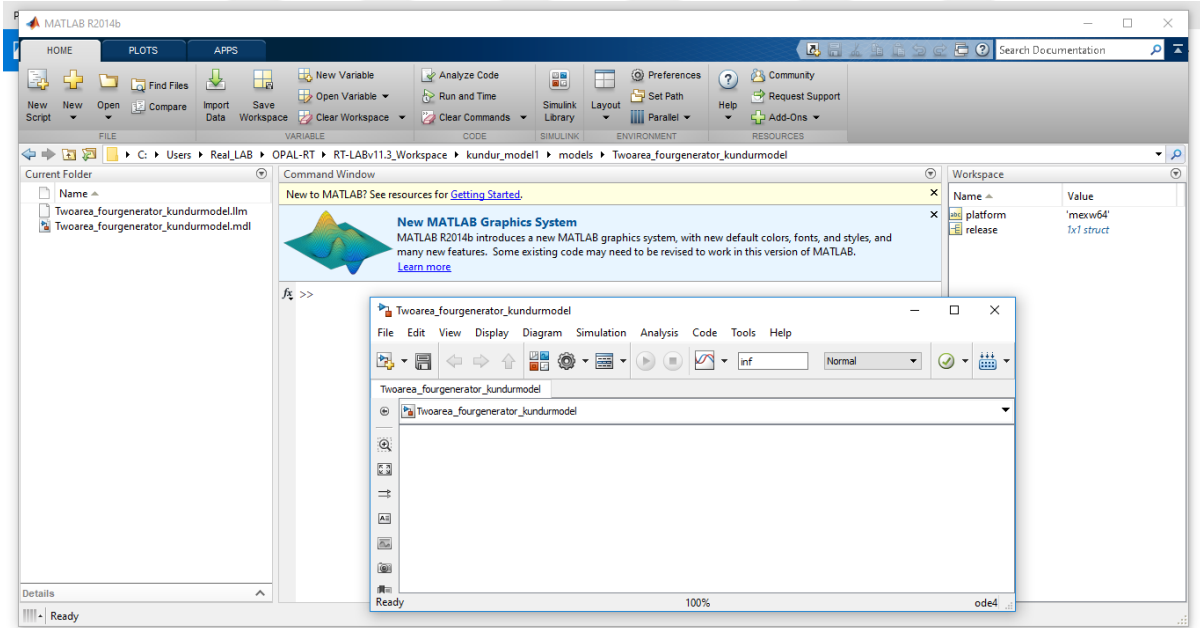
Şekil 13. Model şablonunun belirlenmesi

4. Eklenen Modelin Kurulması ve Düzenlenmesi

Model oluşturulduktan sonra, Şekil 14.'te görüldüğü üzere RT-LAB ile uyumlu Matlab 2014b ile düzenlenmektedir. Uyumlu Matlab versiyonu seçildikten sonra ise modeli kurabilmek için Şekil 15.'te görülen Matlab ve Simulink sayfa ları açılmaktadır.



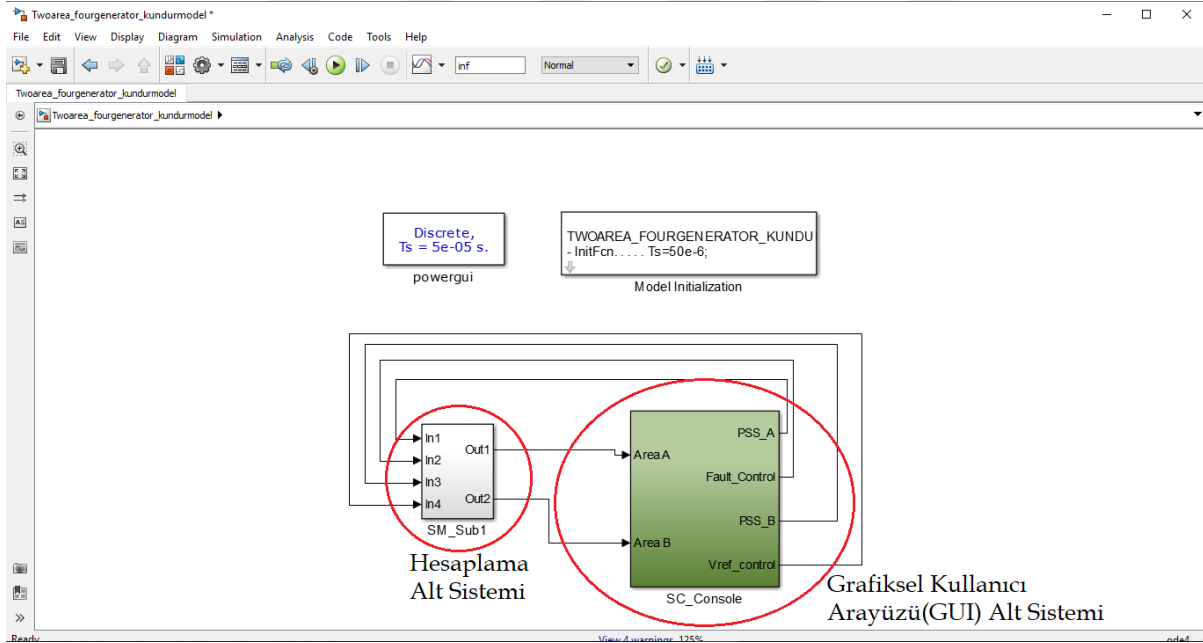
Şekil 14. Modelin düzenlenmesi



Şekil 15. Modelin düzenlenmesi veya kurulması için açılan Matlab/Simulink pencereleri

RT-LAB'de model oluşturulurken, modelin en üst seviyesinde alt sistemler yer almalıdır ve bu alt sistemlerde hesaplama ve gözlemlene kısmının birbirinden ayrı olması gerekmektedir. Bu yüzden her iki kısım birbirinden farklı iki alt sistem içerisinde gruplanmaktadır. Hesaplama kısmı ana hesaplama alt sisteminde, gözlemlene kısmı ise grafiksel

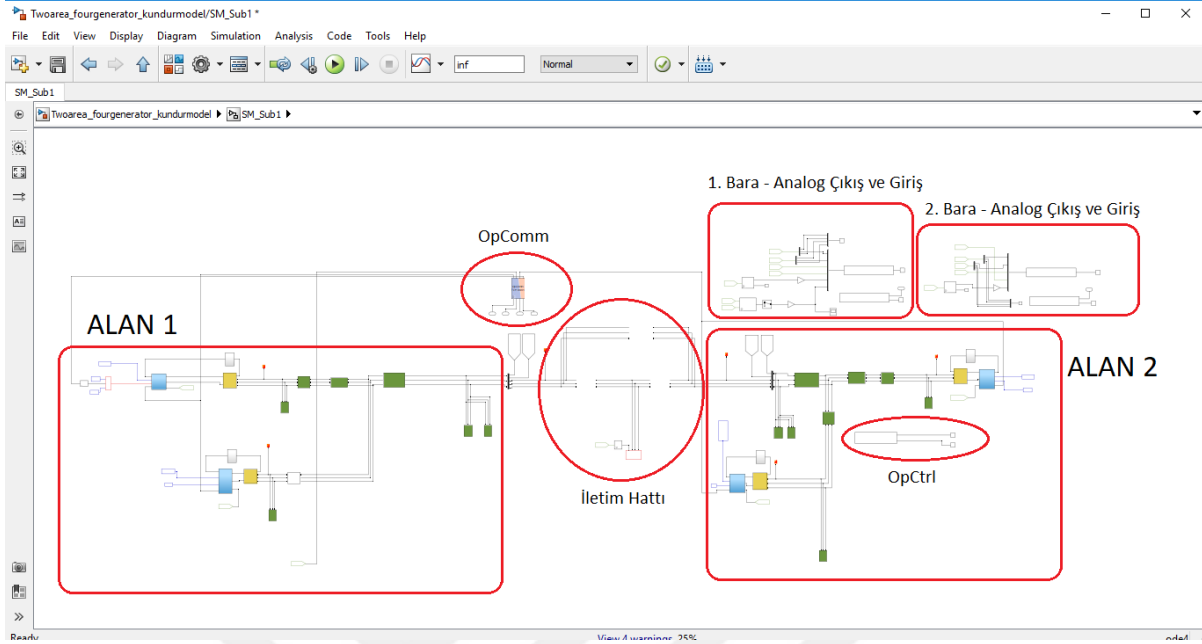
kullanıcı ara yüzü alt sisteminde gruplanmaktadır. Hesaplama kısmı, tasarlanan modele bağlı olarak birden fazla hesaplama alt sistemi içerisinde gruplanabilir. Bu durumda, ana hesaplama alt sisteminden farklı olarak diğer hesaplama alt sistemleri, bağımlı hesaplama alt sistemi olarak çalışmaktadırlar. Fakat, grafiksel kullanıcı ara yüzü kısmı maksimum bir tane olmalıdır. Modeli tasarlayan kişinin tasarımına göre hesaplama ve grafiksel kullanıcı ara yüzü alt sistemlerinin sayısı değişmektedir. Gerçek zamanlı hedef aygıtın, simülâtörün, merkezi işlemci biriminin çekirdek sayısı da hesaplama alt sisteminin toplam sayısını kısıtlayabilmektedir. Her bir çekirdek tek bir hesaplama alt sistemini hafızasında tutmaktadır. Bu yüzden çekirdek sayısı, modeli tasarlayan kişi tarafından tasarımda kullanılan hesaplama alt sisteminin sayısını belirlemek için önemli bir kriter olarak göz önünde bulundurulmalıdır. Hesaplama alt sistemi adlandırılırken önüne 'SM_' eki getirilmelidir. Grafiksel kullanıcı ara yüzü ise adlandırılırken önüne 'SC_' eki getirilmektedir. Projede kullanılan modelin üst seviye hali Şekil 16.'da verilmiştir. Burada görülen powergui bloğu, Simulink'in 'Simscape' kütüphanesinde yer alan blokları içeren modelin ayrık (discrete) olarak simüle edilebilmesi için gereklidir. 'Model initialization' kısmı ise modelin simüle edilmesinden önce örnekleme zamanını ayarlamak için gereklidir. Örnekleme zamanı 50 µs olarak belirlenmiştir. Ayrıca, hesaplama alt sistemi ile grafiksel kullanıcı ara yüzü alt sistemi arasındaki bağlantı asenkron yapıdır.



Şekil 16. Simulink'te modellenen 2 alanlı 4 generatörlü sistem

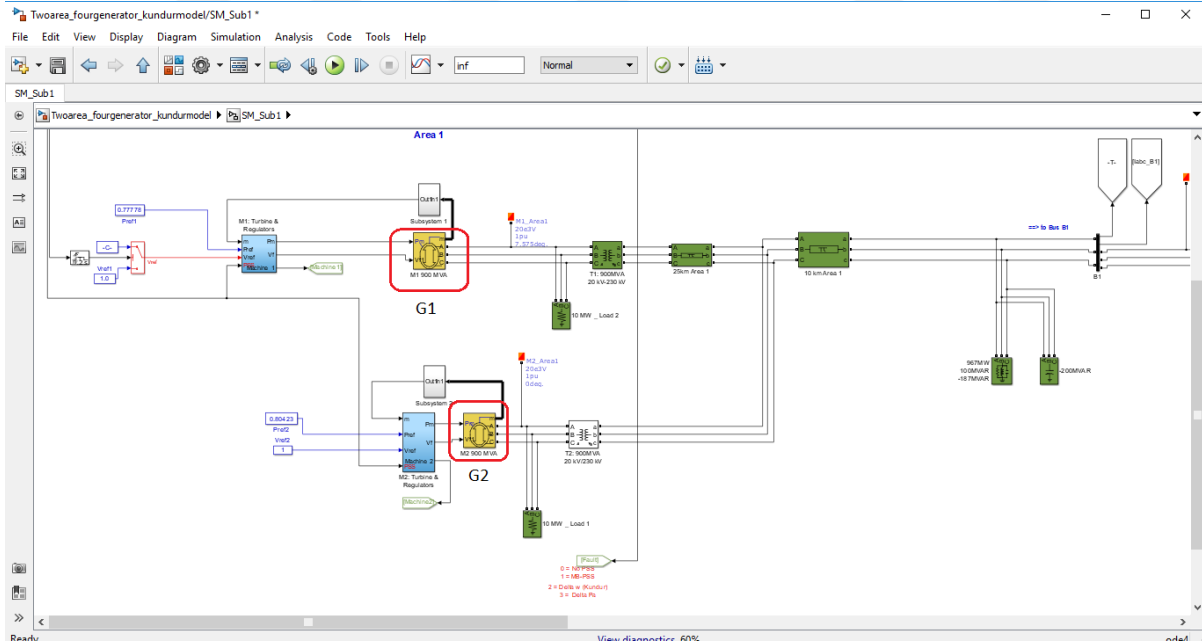
Hesaplama alt sisteminde tasarlanan 2 alanlı 4 generatörlü güç sistemi modelinin genel görünümü Şekil 17.'de verilmiştir. Burada 'OpComm' bloğu alt sistemler arasında iletişimi sağlayabilmek için kullanılmıştır. Hesaplama alt sistemine gelen 4 farklı girişle herhangi bir işlem

yapılmadan önce bu girişler 'OpComm' bloğundan geçirilmelidir. Benzer durum, grafiksel kullanıcı ara yüzü alt sistemindeki 'OpComm' bloğu için de geçerlidir.

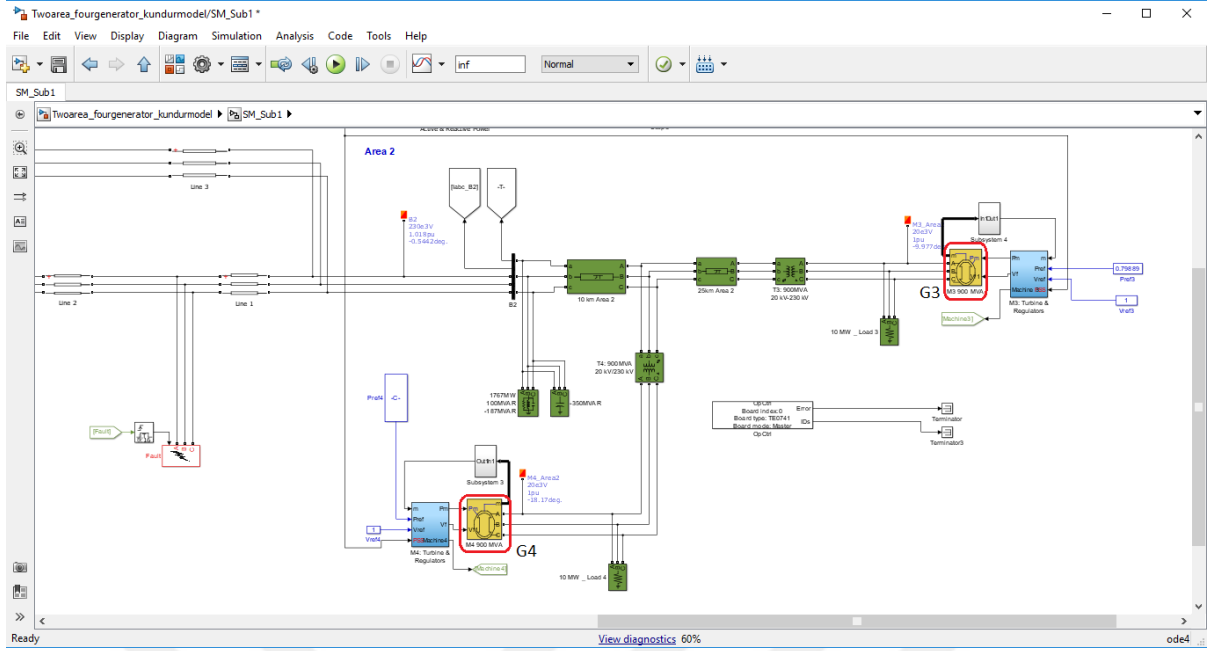


Şekil 17. Simulink'te modellenen 2 alanlı 4 generatörlü sistem

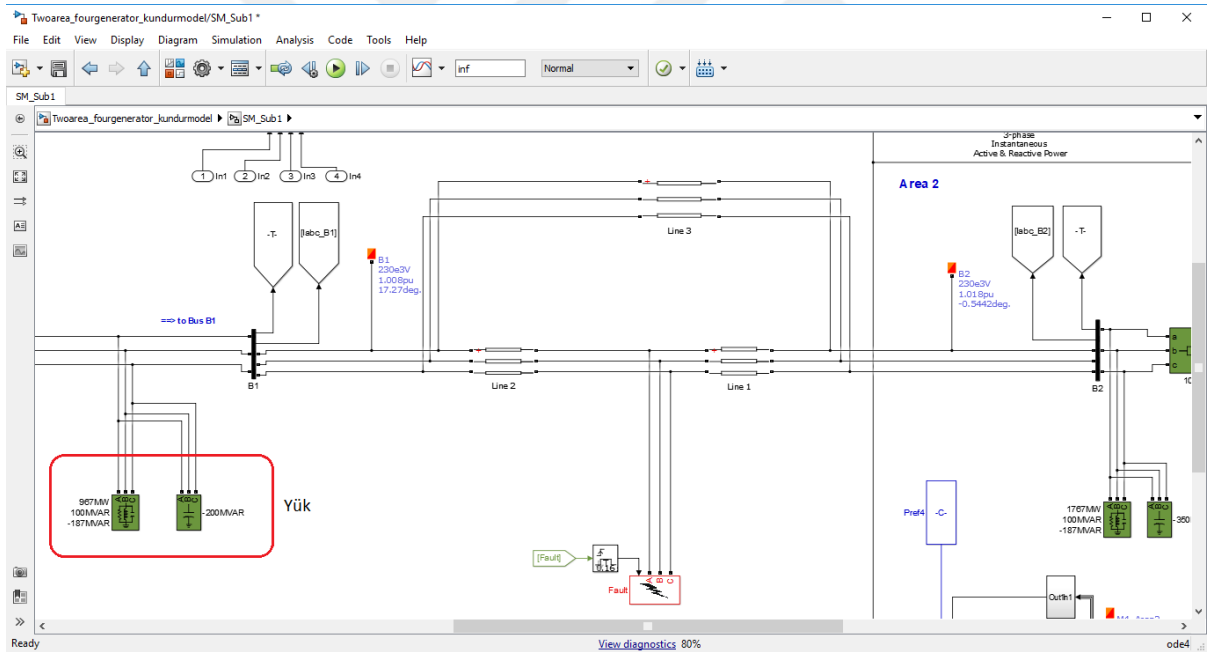
Şekil 17.'de görülen 'Alan 1', 'Alan 2' ve 'İletim Hattı'nın görüntüleri daha net bir şekilde Şekil 18., Şekil 19. ve Şekil 20.'de verilmiştir.



Şekil 18. 2 alanlı 4 generatörlü sistem – alan 1

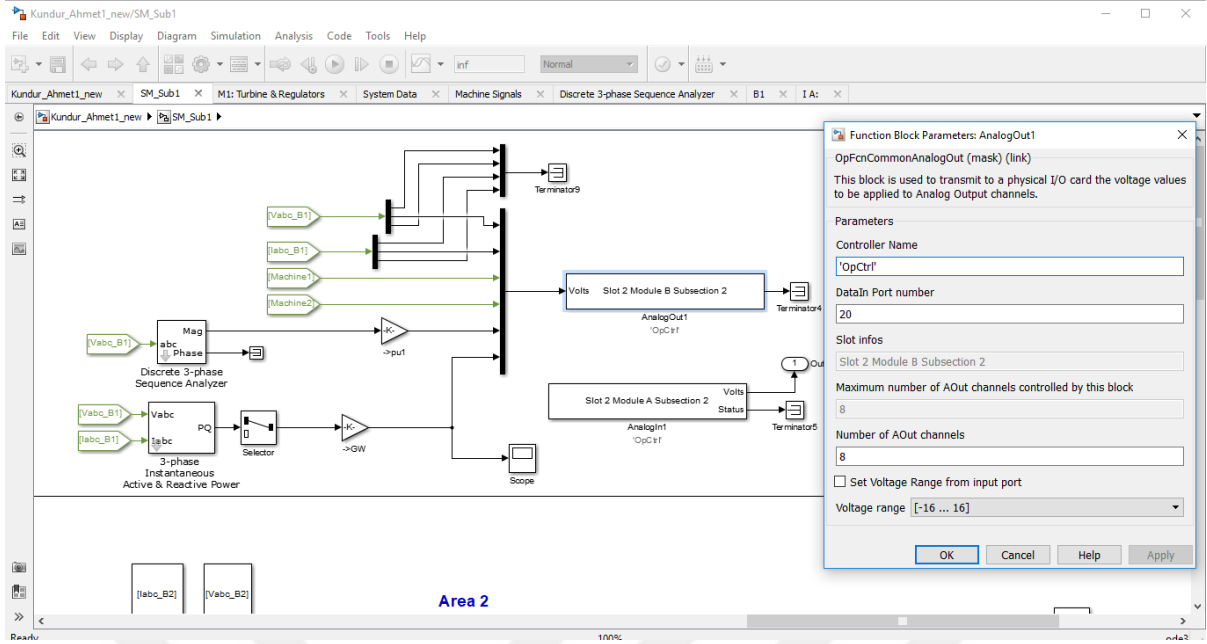


Şekil 19. 2 alanlı 4 generatörlü sistem – alan 2

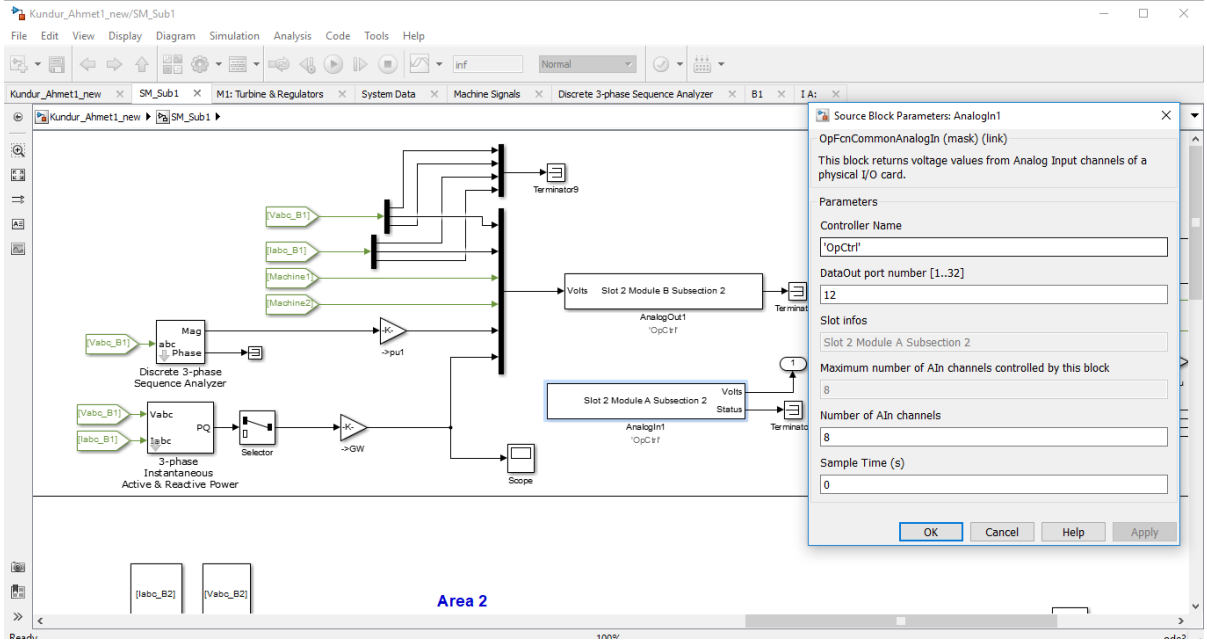


Şekil 20. 2 alanlı 4 generatörlü sistem – iletim hattı

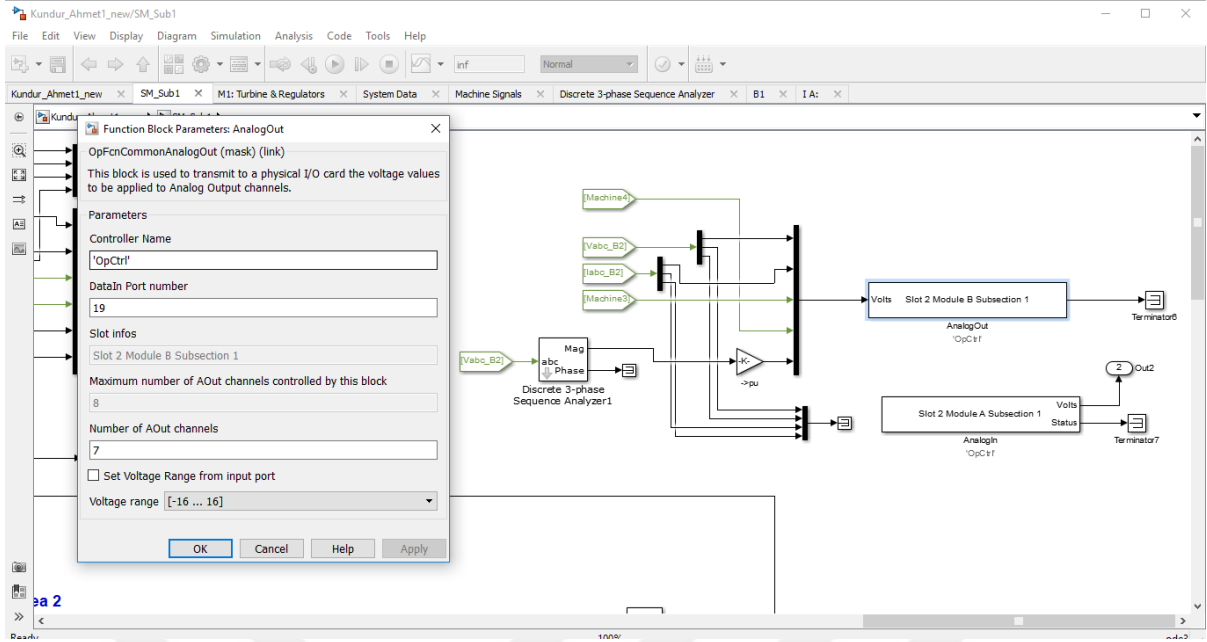
Şekil 17.'de yer alan 1. bara ve 2. bara analog giriş ve çıkış bloklarının ve 'OpCtrl' bloğunun daha net görüntüleri ve bu blokların parametre değerleri de Şekil 21., 22., 23., 24. ve 25.'tedir. Analog çıkış blokları, analog çıkışa verilecek gerilim değerlerinin fiziksel bir giriş/çıkış kartına iletilmesinde kullanılır. Analog giriş blokları ise fiziksel giriş/çıkış kartına gelen voltaj değerlerinin okunmasında kullanılır. 'OpCtrl' bloğu, simülasyonun içinde yer alan 'TE0741' tipi kartın programlanmasını, başlatılmasını ve senkronizasyon modunun belirlenmesini sağlar.



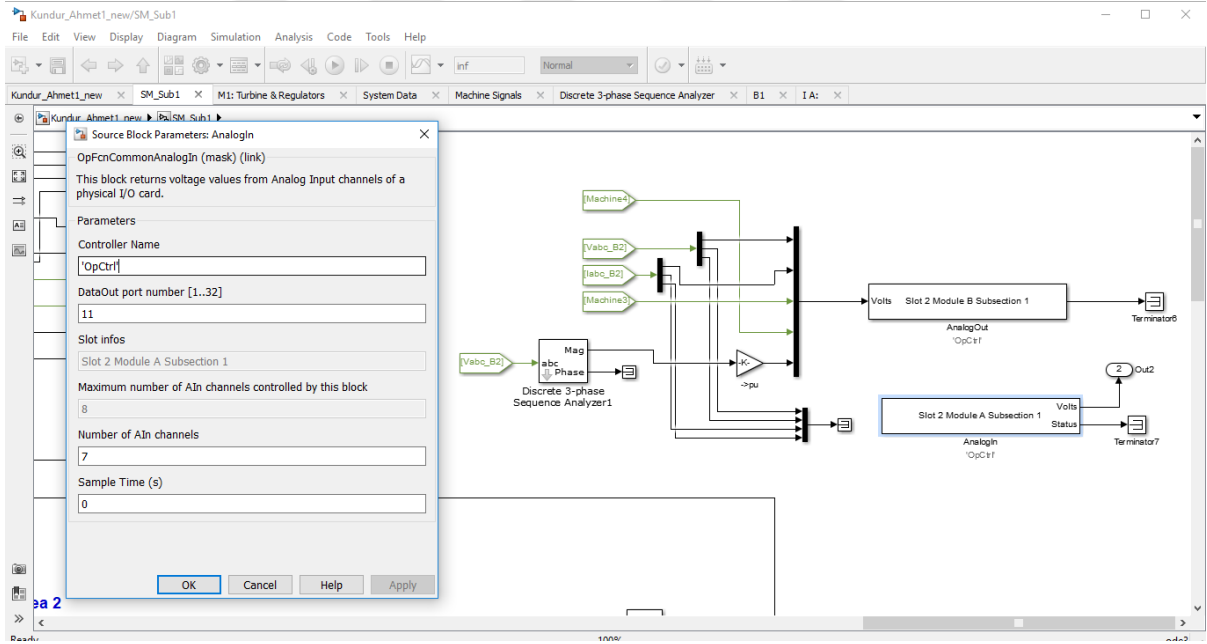
Şekil 21. 1. Bara analog çıkış bloğu ve parametre değerleri



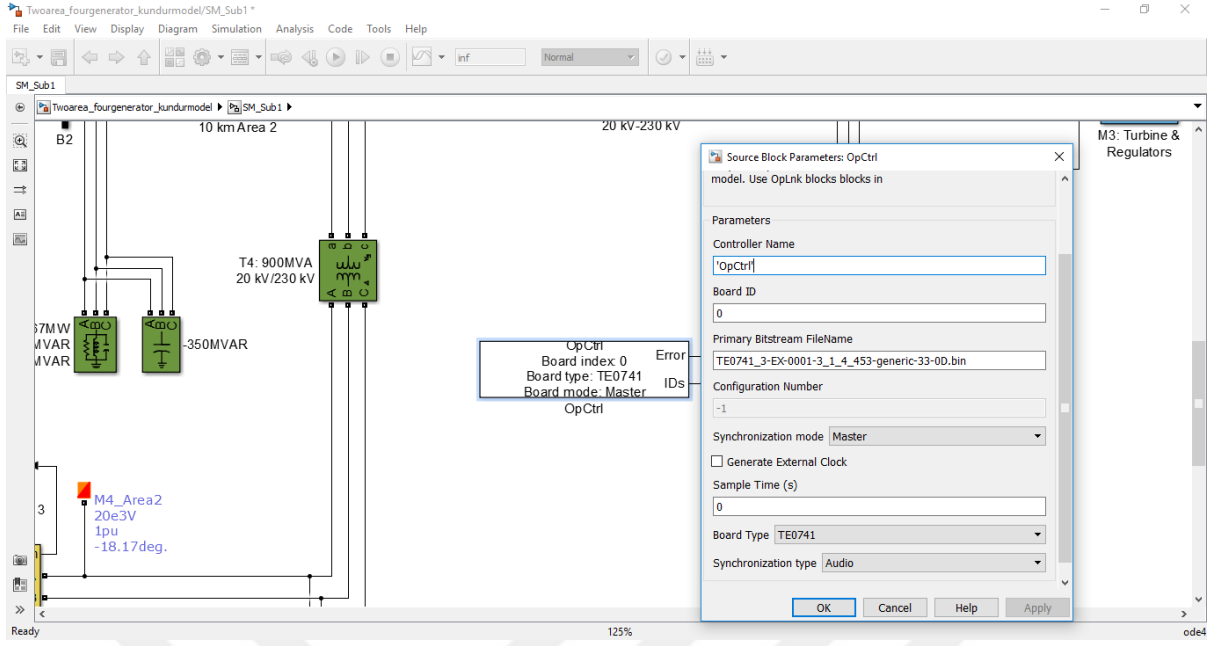
Şekil 22. 1. Bara analog giriş bloğu ve parametre değerleri



Şekil 23. 2. Bara analog çıkış bloğu ve parametre değerleri

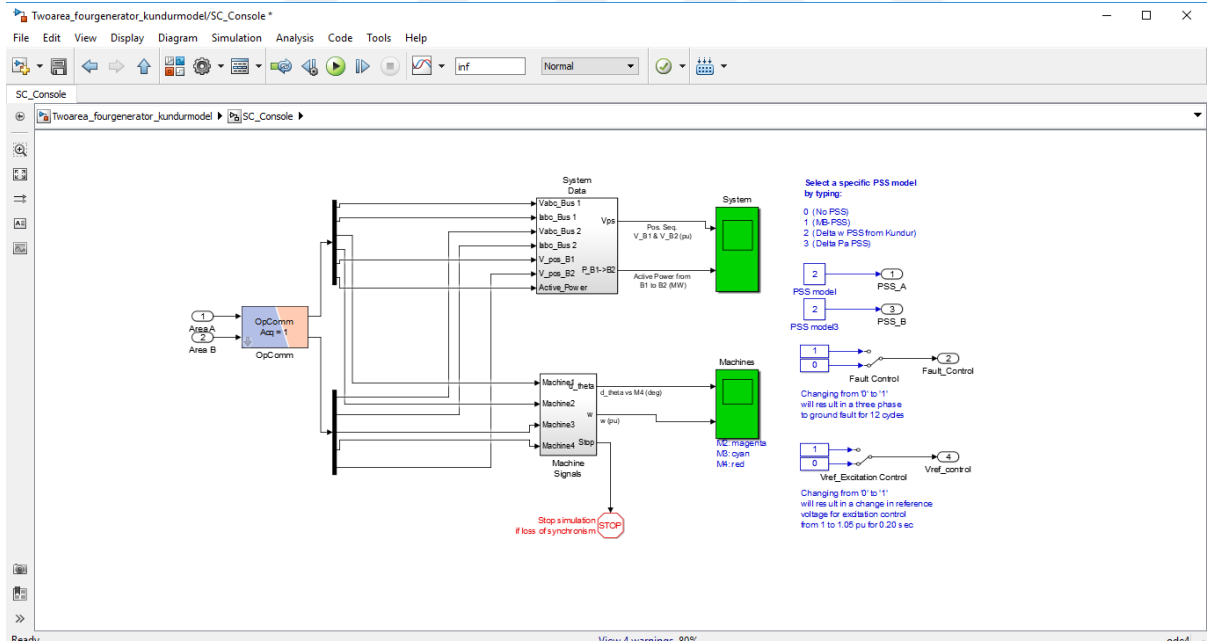


Şekil 24. 2. Bara analog giriş bloğu ve parametre değerleri



Şekil 25. OpCtrl bloğu ve parametre değerleri

Şekil 16.'da modelin en üst seviyesinde yer alan grafiksel kullanıcı arayüzü alt sisteminin içeriği Şekil 26.'da verilmiştir.



Şekil 26. Grafiksel kullanıcı arayüzü alt sistemi

Bu alt sistemde, hesaplama alt sistemindeki analog girişlerden gelen verilerin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, generatörlerin uyarım sistemine etki eden 'Vref_Excitation control', iletim hattına uygulanan 'Fault_Control', ve hazırda bulunan PSS modellerinin seçiminde kullanılan 'PSS model' gibi kontrol girişleri de bulunmaktadır. Böylelikle, simülasyonun merkezi işlemci birimindeki çekirdeğinde yer alan hesaplama alt sisteminde bulunan güç sistemi modeline dışarıdan müdahale edilebilmektedir. Hesaplama alt sisteminde

işlemler çok hızlı gerçekleştiği için modeldeki verilerin değişimi gözlemlenmemektedir. Bu yüzden grafiksel kullanıcı ara yüzü alt sistemine ihtiyaç vardır.



ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Şamil Baycan YALÇIN

Doğum Tarihi : 09.03.1992

E-mail : samilbyalcin@gmail.com

Öğrenim Durumu :

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lise	Sayısal	Mehmet Adnan Özçelik Anadolu Lisesi	2006-2010
Lisans	Elektrik-Elektronik Mühendisliği	Anadolu Üniversitesi	2010-2015

Görevler :

Görev Ünvanı	Görev Yeri	Yıl
Araştırma Görevlisi	Mersin Üniversitesi	2019-Halen

ESERLER (Makaleler ve Bildiriler)

1. Yalçın, Ş. B.; Başel, M. B.; Mete, A.N., "An Adaptive Wide-Area Damping Control Scheme Considering Networked Induced Time Delays", 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology, 2018-10-25, 2018-10-27, İstanbul, (2018).