

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOK MAKİNALI GÜÇ SİSTEMİNDE AÇISAL KARARLILIK ANALİZİ VE
KONTROLÖR PARAMETRE OPTİMİZASYONU**

DOKTORA TEZİ

Serdar EKİNCİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOK MAKİNALI GÜÇ SİSTEMİNDE AÇISAL KARARLILIK ANALİZİ VE
KONTROLÖR PARAMETRE OPTİMİZASYONU**

DOKTORA TEZİ

**Serdar EKİNCİ
(504102002)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ayşen DEMİRÖREN

HAZİRAN 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504102002 numaralı Doktora Öğrencisi **Serdar EKİNCİ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ÇOK MAKİNALI GÜÇ SİSTEMİNDE AÇISAL KARARLILIK ANALİZİ VE KONTROLÖR PARAMETRE OPTİMİZASYONU**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Ayşen DEMİRÖREN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mehmet UZUNOĞLU**
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. İstemihan GENÇ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet Ali YALÇIN
Sakarya Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. H. Lale ZEYNELGİL
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 12 Mayıs 2015
Savunma Tarihi : 5 Haziran 2015

Eşime ve çocuklarıma,

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın her aşamasında yakın ilgi ve desteğini gördüğüm; çalışmalarımın yönlendirilmesi ve sonuçlandırılmasında büyük emeği geçen tez danışmanım sayın Prof. Dr. Ayşen DEMİRÖREN'e, çalışmalarım sırasında beni maddi açıdan destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Haziran 2015

Serdar EKİNCİ
(Elektrik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Kapsamı.....	5
1.2 Tezin Amacı	5
2. YÜK AKIŞ ANALİZİ.....	9
2.1 Bara Admitans Matrisi	9
2.2 Newton-Raphson Metodu	10
2.3 Newton-Raphson Yük Akış Çözümü	12
3. KÜÇÜK İŞARET KARARLILIK ANALİZİ.....	17
3.1 Statik Uyarmalı Akı Sönümlü Model.....	17
3.1.1 Diferansiyel denklemler	17
3.1.2 Stator cebirsel denklemler	18
3.1.3 Şebeke Denklemleri	18
3.2 Lineerleştirilmiş Küçük İşaret Modeli	19
3.3 Başlangıç Koşulları	21
3.4 Çok Makinalı Güç Sistemlerinin Lineerleştirilmesi.....	21
3.5 Sabit Katsayılı Homojen/Homojen Olmayan Birinci Dereceden Diferansiyel Denklemlerin Çözümü	31
3.5.1 Modal analiz yöntemi.....	31
3.5.1.1 Homojen çözüm	31
3.5.1.2 Homojen olmayan sistem çözümü	34
3.5.2 Özel durum analizi	35
3.5.3 Katılım faktörünün çıkarılması	41
3.6 Lineerleştirilmiş Güç Sistemlerinde Küçük İşaret Kararlılık Analizi.....	41
3.6.1 Kararlılık koşulları	42
4. UYARMA SİSTEMİ VE PSS	45
4.1 PSS'nin Yapısı	45
4.2 PSS'nin Lineerleştirilmesi.....	46
4.2.1 Herhangi bir k. makinaya PSS eklenmesi durumu	46
4.2.2 A_{11} , A_{12} , A_{21} ve A_{22} matrislerinin bulunması.....	48
4.2.3 Çoklu sayıda PSS eklenmesi durumu	49
4.3 PSS İçin En Uygun Yer Tayini	51
5. MODERN SEZGİSEL ALGORİTMALAR.....	53
5.1 Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO).....	53
5.2 Yapay Arı Kolonisi (ABC) Algoritması	55

5.3 Performans İndeksleri.....	58
5.4 Amaç Fonksiyonları ve Optimizasyon Problemi	59
6. GEÇİCİ HAL KARARLILIK ANALİZİ	61
6.1 Diferansiyel Denklemlerin Modellenmesi	61
6.2 Stator Cebirsel Denklemlerin Modellenmesi	63
6.3 Şebeke Denklemlerinin Modellenmesi.....	63
7. TEST SİSTEM 1 VE SONUÇLAR.....	69
7.1 Yük Akış Analizi	70
7.2 Küçük İşaret Kararlılık Analizi	70
7.3 Amaç Fonksiyonu ve PSS parametrelerinin optimizasyonu	71
7.4 Lineer Olmayan Zaman Domeninde Simülasyonlar	74
7.5 Performans İndeksi Analizi	86
8. TEST SİSTEM 2 VE SONUÇLAR.....	89
8.1 Yük Akış Analizi	91
8.2 Küçük İşaret Kararlılık Analizi	91
8.3 Amaç Fonksiyonu ve PSS parametrelerinin optimizasyonu	93
8.4 Lineer Olmayan Zaman Domeninde Simülasyonlar	98
8.5 Performans İndeksi Analizi	109
9. POWSYS GUI PROGRAM PAKETİ	111
9.1 MATLAB GUI Bileşenleri.....	111
9.2 Program Paketinin Genel Özellikleri.....	113
9.3 Programın Test Edilmesi	117
9.4 Programın Performansı.....	135
10. SONUÇLAR	137
KAYNAKLAR.....	139
EKLER.....	145
ÖZGEÇMİŞ	171

KISALTMALAR

ABC	: Artificial Bee Colony (Yapay Arı Kolonisi)
FACT	: Flexible AC Transmission Systems (Esnek AC İletim Sistemleri)
PFA	: Power Flow Analysis (Yük Akış Analizi)
PSS	: Power System Stabilizer (Güç Sistemi Kararlı Kılıcı)
PSO	: Particle Swarm Optimization (Parçacık Sürüsü Optimizasyonu)
SSSA	: Small Signal Stability Analysis (Küçük İşaret Kararlılık Analizi)
TDS	: Time-domain Simulation (Geçici Hal Kararlılık Analizi)
WSCC	: Western System Coordinating Council

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Güç sistemlerinde kullanılan MATLAB tabanlı program paketleri.....	7
Çizelge 3.1 : Özel durum analizi	35
Çizelge 3.2 : Dört farklı özel durum analizi	41
Çizelge 3.3 : Katılım Faktörü	41
Çizelge 7.1 : 3 makinalı sistemin yük akış sonuçları.....	70
Çizelge 7.2 : 3 makinalı güç sistemi için başlangıç çalışma noktaları	70
Çizelge 7.3 : Kontrolsüz sistemin özdeğerleri, sönüm oranları ve frekansları.....	71
Çizelge 7.4: Kontrolsüz sistemin elektromekanik salınım modları.....	71
Çizelge 7.5 : PSO ve ABC tekniklerini kullanarak bulunan PSS parametreleri	72
Çizelge 7.6 : PSO ile optimize edilen sistemin özdeğerleri, sönüm oranları ve frekansları	73
Çizelge 7.7 : ABC ile optimize edilen sistemin özdeğerleri, sönüm oranları ve frekansları	73
Çizelge 7.8 : Farklı arıza türleri için kritik temizleme zamanları.....	74
Çizelge 7.9 : PSO ve ABC ile optimize edilen sistemin performans indekslerinin değerleri.....	86
Çizelge 8.1 : 10 makinalı sistemin yük akış sonuçları.....	90
Çizelge 8.2 : 10 makinalı güç sistemi için başlangıç çalışma noktaları	91
Çizelge 8.3 : Kontrolsüz sistemin özdeğerleri, sönüm oranları ve frekansları.....	92
Çizelge 8.4 : Kontrolsüz sistemin elektromekanik salınım modları.....	93
Çizelge 8.5 : PSO ve ABC tekniklerini kullanarak bulunan PSS parametreleri	94
Çizelge 8.6 : PSO ile optimize edilen sistemin özdeğerleri, sönüm oranları ve frekansları	95
Çizelge 8.7 : ABC ile optimize edilen sistemin özdeğerleri, sönüm oranları ve frekansları	96
Çizelge 8.8 : Farklı arıza türleri için kritik temizleme zamanları.....	98
Çizelge 8.9 : PSO ve ABC ile optimize edilen sistemin performans endekslerinin değerleri.....	110
Çizelge 9.1 : 16 makinalı sistemin yük akış sonuçları.....	118
Çizelge 9.2 : Kontrolsüz sistemin özdeğerleri, sönüm oranları ve frekansları.....	120
Çizelge 9.3 : Kontrolsüz sistemin elektromekanik salınım modları.....	121
Çizelge 9.4 : ABC tekniği kullanarak bulunan PSS parametreleri.....	126
Çizelge 9.5 : PowSysGUI programının performansı	135
Çizelge A.1 : 3 makinalı sistemin bara verileri	146
Çizelge A.2 : 3 makinalı sistemin hat verileri	146
Çizelge A.3 : 3 makinalı sistemin generatör verileri	146
Çizelge A.4 : 3 makinalı sistemin uyarma verileri	146
Çizelge B.1 : Geleneksel metot ile optimize edilen sistemin özdeğerleri, sönüm oranları ve frekansları.....	147

Çizelge C.1 : 10 makinalı sistemin bara verileri	150
Çizelge C.2 : 10 makinalı sistemin hat verileri	151
Çizelge C.3 : 10 makinalı sistemin generatör verileri	152
Çizelge C.4 : 10 makinalı sistemin uyarma verileri	152
Çizelge E.1 : 16 makinalı sistemin bara verileri.....	163
Çizelge E.2 : 16 makinalı sistemin hat verileri.....	164
Çizelge E.3 : 16 makinalı sistemin generatör verileri	166
Çizelge E.4 : 16 makinalı sistemin uyarma verileri.....	167
Çizelge F.1 : Kontrolsüz sistemin özdeğerleri.....	168

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Kararlılık sınıflandırılması	4
Şekil 1.2 : PowSysGUI programının yapısı.....	5
Şekil 3.1 : Senkron makina akı sönümlü model dinamik devresi	18
Şekil 3.2 : Enterkonnekte şebekeye bağlı senkron makina dinamik devresi.....	19
Şekil 4.1 : Uyarma sistemi blok diyagramı	45
Şekil 4.2 : PSS'nin blok diyagramı.....	45
Şekil 4.3 : Elektromekanik salınım mod özdeğerlerin istenilen tasarım bölgesi.....	51
Şekil 6.1 : Simulink bloklarla güç sisteminin lineer olmayan diferansiyel denklemlerinin modellenmesi	62
Şekil 6.2 : Stator cebirsel denklemlerin Simulink bloklarla modellenmesi.....	63
Şekil 6.3 : Yük admitans gösterimi	65
Şekil 6.4 : Simulink bloklarla şebeke denklemlerinin modellenmesi.....	66
Şekil 6.5 : Subsystem'in iç yapısı.....	67
Şekil 7.1 : 3 makinalı 9 baralı WSCC sistemi	69
Şekil 7.2 : J çoklu amaç fonksiyonun iterasyon sayısı ile yaklaşımı.....	72
Şekil 7.3 : 3 makinalı sistemin Senaryo 1 için $\delta_2 - \delta_1$ 'in sistem cevabı	75
Şekil 7.4 : 3 makinalı sistemin Senaryo 1 için $\delta_3 - \delta_1$ 'in sistem cevabı.....	75
Şekil 7.5 : 3 makinalı sistemin Senaryo 1 için $\omega_2 - \omega_1$ 'in sistem cevabı	76
Şekil 7.6 : 3 makinalı sistemin Senaryo 1 için $\omega_3 - \omega_1$ 'in sistem cevabı	76
Şekil 7.7 : 3 makinalı sistemin Senaryo 1 için P_{e1} 'in sistem cevabı.....	76
Şekil 7.8 : 3 makinalı sistemin Senaryo 1 için P_{e2} 'nin sistem cevabı.....	77
Şekil 7.9 : 3 makinalı sistemin Senaryo 1 için P_{e3} 'ün sistem cevabı.....	77
Şekil 7.10 : 3 makinalı sistemin Senaryo 2 için $\delta_2 - \delta_1$ 'in sistem cevabı.....	77
Şekil 7.11 : 3 makinalı sistemin Senaryo 2 için $\delta_3 - \delta_1$ 'in sistem cevabı.....	78
Şekil 7.12 : 3 makinalı sistemin Senaryo 2 için $\omega_2 - \omega_1$ 'in sistem cevabı	78
Şekil 7.13 : 3 makinalı sistemin Senaryo 2 için $\omega_3 - \omega_1$ 'in sistem cevabı	78
Şekil 7.14 : 3 makinalı sistemin Senaryo 2 için P_{e1} 'in sistem cevabı.....	79
Şekil 7.15 : 3 makinalı sistemin Senaryo 2 için P_{e2} 'nin sistem cevabı.....	79
Şekil 7.16 : 3 makinalı sistemin Senaryo 2 için P_{e3} 'ün sistem cevabı.....	79
Şekil 7.17 : 3 makinalı sistemin Senaryo 3 için $\delta_2 - \delta_1$ 'in sistem cevabı	81
Şekil 7.18 : 3 makinalı sistemin Senaryo 3 için $\delta_3 - \delta_1$ 'in sistem cevabı.....	81
Şekil 7.19 : 3 makinalı sistemin Senaryo 3 için $\omega_2 - \omega_1$ 'in sistem cevabı	81
Şekil 7.20 : 3 makinalı sistemin Senaryo 3 için $\omega_3 - \omega_1$ 'in sistem cevabı	82
Şekil 7.21 : 3 makinalı sistemin Senaryo 3 için P_{e1} 'in sistem cevabı.....	82
Şekil 7.22 : 3 makinalı sistemin Senaryo 3 için P_{e2} 'nin sistem cevabı.....	82
Şekil 7.23 : 3 makinalı sistemin Senaryo 3 için P_{e3} 'ün sistem cevabı.....	83

Şekil 7.24 : 3 makinalı sistemin Senaryo 4 için $\delta_2 - \delta_1$ 'in sistem cevabı	83
Şekil 7.25 : 3 makinalı sistemin Senaryo 4 için $\delta_3 - \delta_1$ 'in sistem cevabı.....	83
Şekil 7.26 : 3 makinalı sistemin Senaryo 4 için $\omega_2 - \omega_1$ 'in sistem cevabı.....	84
Şekil 7.27 : 3 makinalı sistemin Senaryo 4 için $\omega_3 - \omega_1$ 'in sistem cevabı.....	84
Şekil 7.28 : 3 makinalı sistemin Senaryo 4 için P_{e1} 'in sistem cevabı.....	84
Şekil 7.29 : 3 makinalı sistemin Senaryo 4 için P_{e2} 'nin sistem cevabı.....	85
Şekil 7.30 : 3 makinalı sistemin Senaryo 4 için P_{e3} 'ün sistem cevabı.....	85
Şekil 8.1 : 10 makinalı 39 baralı New England güç sistemi	89
Şekil 8.2 : J çoklu amaç fonksiyonun iterasyon sayısı ile yaklaşımı	94
Şekil 8.3 : 10 makinalı sistemin Senaryo 1 için $\delta_6 - \delta_1$ 'in sistem cevabı.....	99
Şekil 8.4 : 10 makinalı sistemin Senaryo 1 için $\delta_7 - \delta_1$ 'in sistem cevabı	100
Şekil 8.5 : 10 makinalı sistemin Senaryo 1 için $\omega_6 - \omega_1$ 'in sistem cevabı.....	100
Şekil 8.6 : 10 makinalı sistemin Senaryo 1 için $\omega_7 - \omega_1$ 'in sistem cevabı.....	100
Şekil 8.7 : 10 makinalı sistemin Senaryo 1 için P_{e6} 'nın sistem cevabı.....	101
Şekil 8.8 : 10 makinalı sistemin Senaryo 1 için P_{e7} 'nin sistem cevabı.....	101
Şekil 8.9 : 10 makinalı sistemin Senaryo 2 için $\delta_6 - \delta_1$ 'in sistem cevabı.....	101
Şekil 8.10 : 10 makinalı sistemin Senaryo 2 için $\delta_7 - \delta_1$ 'in sistem cevabı	102
Şekil 8.11 : 10 makinalı sistemin Senaryo 2 için $\omega_6 - \omega_1$ 'in sistem cevabı.....	102
Şekil 8.12 : 10 makinalı sistemin Senaryo 2 için $\omega_7 - \omega_1$ 'in sistem cevabı.....	102
Şekil 8.13 : 10 makinalı sistemin Senaryo 2 için P_{e6} 'nın sistem cevabı.....	103
Şekil 8.14 : 10 makinalı sistemin Senaryo 2 için P_{e7} 'nin sistem cevabı.....	103
Şekil 8.15 : 10 makinalı sistemin Senaryo 3 için $\delta_8 - \delta_1$ 'in sistem cevabı.....	104
Şekil 8.16 : 10 makinalı sistemin Senaryo 3 için $\delta_{10} - \delta_1$ 'in sistem cevabı.....	105
Şekil 8.17 : 10 makinalı sistemin Senaryo 3 için $\omega_8 - \omega_1$ 'in sistem cevabı.....	105
Şekil 8.18 : 10 makinalı sistemin Senaryo 3 için $\omega_{10} - \omega_1$ 'in sistem cevabı	105
Şekil 8.19 : 10 makinalı sistemin Senaryo 3 için P_{e8} 'in sistem cevabı.....	106
Şekil 8.20 : 10 makinalı sistemin Senaryo 3 için P_{e10} 'un sistem cevabı	106
Şekil 8.21 : 10 makinalı sistemin Senaryo 4 için $\delta_8 - \delta_1$ 'in sistem cevabı.....	106
Şekil 8.22 : 10 makinalı sistemin Senaryo 4 için $\delta_{10} - \delta_1$ 'in sistem cevabı.....	107
Şekil 8.23 : 10 makinalı sistemin Senaryo 4 için $\omega_8 - \omega_1$ 'in sistem cevabı.....	107
Şekil 8.24 : 10 makinalı sistemin Senaryo 4 için $\omega_{10} - \omega_1$ 'in sistem cevabı	107
Şekil 8.25 : 10 makinalı sistemin Senaryo 4 için P_{e8} 'in sistem cevabı.....	108
Şekil 8.26 : 10 makinalı sistemin Senaryo 4 için P_{e10} 'un sistem cevabı	108
Şekil 9.1 : GUI tasarım penceresi	111
Şekil 9.2 : PowSysGUI programının ana grafik kullanıcı ara yüzü.....	112
Şekil 9.3 : Yük Akış Analizi Programı ara yüzü	113
Şekil 9.4 : Küçük İşaret Kararlılık Analizi Programı ara yüzü.....	114
Şekil 9.5 : Geçici Hal Kararlılık Analizi Programı ara yüzü	115
Şekil 9.6 : PSS Tasarım Programı ara yüzü.....	116
Şekil 9.7 : 16 makinalı 68 baralı güç sistemi	117
Şekil 9.8 : Örnek güç sisteminin yük akış sonuçları.....	118

Şekil 9.9 : Kontrolsüz sistem için sönüm oranı/frekans grafiği	122
Şekil 9.10 : Elektromekanik salınım modları için katılım faktörleri	125
Şekil 9.11 : Kontrollü sistem için sönüm oranı/frekans grafiği	126
Şekil 9.12 : Örnek güç sistemi için kullanılan PSS Tasarım Programı	127
Şekil 9.13 : Amaç fonksiyonun değişimi	127
Şekil 9.14 : PSS'li sistemin küçük işaret kararlılık analizi	128
Şekil 9.15 : PSS'li sistemin geçici hal kararlılık analizi	129
Şekil 9.16 : Kontrolsüz sistem için rotor açıları	129
Şekil 9.17 : Kontrollü sistem için rotor açıları	130
Şekil 9.18 : Kontrolsüz sistem için rotor hız sapmaları	130
Şekil 9.19 : Kontrollü sistem için rotor hız sapmaları	130
Şekil 9.20 : Kontrolsüz sistem için elektriksel güçler	131
Şekil 9.21 : Kontrollü sistem için elektriksel güçler	131
Şekil 9.22 : Kontrolsüz sistem için uç gerilimler	131
Şekil 9.23 : Kontrollü sistem için uç gerilimler	132
Şekil 9.24 : Kontrolsüz sistem için rotor açıları	132
Şekil 9.25 : Kontrollü sistem için rotor açıları	133
Şekil 9.26 : Kontrolsüz sistem için rotor hız sapmaları	133
Şekil 9.27 : Kontrollü sistem için rotor hız sapmaları	133
Şekil 9.28 : Kontrolsüz sistem için elektriksel güçler	134
Şekil 9.29 : Kontrollü sistem için elektriksel güçler	134
Şekil 9.30 : Kontrolsüz sistem için uç gerilimler	134
Şekil 9.31 : Kontrollü sistem için uç gerilimler	135
Şekil B.1 : 3 makinalı sistemin $\delta_2 - \delta_1$ 'in sistem cevabı	148
Şekil B.2 : 3 makinalı sistemin $\delta_3 - \delta_1$ 'in sistem cevabı	148
Şekil B.3 : 3 makinalı sistemin $\omega_2 - \omega_1$ 'in sistem cevabı	148
Şekil B.4 : 3 makinalı sistemin $\omega_3 - \omega_1$ 'in sistem cevabı	149
Şekil D.1 : PowSysGUI paket programının çalıştırılması	153
Şekil D.2 : Yük Akışı Analizi Programı	154
Şekil D.3 : Yük akış analizi için 9 baralı örnek güç sisteminin seçilmesi	154
Şekil D.4 : 9 baralı güç sistemine ilişkin veri formatı	155
Şekil D.5 : Yük Akışı Analizi Programının çalıştırılması	156
Şekil D.6 : Küçük İşaret Kararlılık Analizi Programı	156
Şekil D.7 : 9 baralı örnek sistem için PSS parametrelerinin seçilmesi ve yüklenmesi	157
Şekil D.8 : 9 baralı sistem için PSS parametreleri	157
Şekil D.9 : Küçük İşaret Kararlılık Analizi Programının çalıştırılması	158
Şekil D.10 : Geçici Hal Kararlılık Analizi Programı	159
Şekil D.11 : Geçici Hal Kararlılık Analizi Programının çalıştırılması	160
Şekil D.12 : Güç Sistemi Kararlı Kılıcı Tasarımı Programı	160
Şekil D.13 : PSS tasarımında kullanılabilecek Simulink tabanlı 4 amaç fonksiyonu	161
Şekil D.14 : PSS Tasarım Programının çalıştırılması	162
Şekil F.1 : 3 makinalı sistemin $\delta_2 - \delta_1$ 'in sistem cevabı	169
Şekil F.2 : 3 makinalı sistemin $\delta_3 - \delta_1$ 'in sistem cevabı	169
Şekil F.3 : 3 makinalı sistemin $\omega_2 - \omega_1$ 'in sistem cevabı	169
Şekil F.4 : 3 makinalı sistemin $\omega_3 - \omega_1$ 'in sistem cevabı	170

ÇOK MAKİNALI GÜÇ SİSTEMİNDE AÇISAL KARARLILIK ANALİZİ VE KONTROLÖR PARAMETRE OPTİMİZASYONU

ÖZET

Güç sistemlerinde en önemli araştırma konularından olan kararlılık, rotor açısı kararlılığı, gerilim kararlılığı ve frekans kararlılığı olmak üzere üç ana sınıfa ayrılmaktadır. Bu tezde temel olarak rotor açısı kararlılığına değinilmiştir. Rotor açısı kararlılığı, küçük veya büyük arızalara maruz kalan güç sisteminin senkronizasyonunu koruma yeteneğidir.

Büyük güç sistemlerinde yaygın problemlerden biri düşük frekanslı güç sistem salınımlarıdır. Yeterli sönüm mevcut değilse, bu salınımlar giderek devam eder ve sistem senkronizasyonunu kaybedinceye kadar büyür. Senkron generatörlerin kararlı ve güvenilir çalışmasını sağlamak için güç mühendisliğinde çok sayıda çalışma yapılmıştır. Güç sistemi kararlı kılıcılar (Power System Stabilizers, PSSs) bu problem için alternatif çözümlerden biridir. PSS, yardımcı kararlı kılıcı işaretler kullanıp kendi uyarmasını kontrol ederek, generatör rotor salınımlarına sönüm eklemek için kullanılır.

Son yıllarda, zor olan optimizasyon problemlerini çözmek amacıyla çeşitli sezgisel optimizasyon teknikleri önerilmiştir. Bu yöntemlerin birçoğu doğadan esinlenilmiş olup, evrimsel algoritmalar ve sürü zekâları olmak üzere iki önemli kategoride sınıflandırılabilir. Problem ve modelden bağımsız olan doğadan esinlenmiş sezgisel optimizasyon teknikleri, geleneksel optimizasyon tekniklerindeki eksikliklerin giderilmesi için önerilmektedir. Bu yöntemlere dayalı Genetik Algoritma (Genetic Algorithm, GA), Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO), Diferansiyel Gelişim (Differential Evolution, DE) algoritması ve yapay arı kolonisi (Artificial Bee Colony, ABC) algoritması gibi çeşitli algoritmalar optimum PSS parametrelerini etkin şekilde bulmak için yaygın olarak uygulanmıştır.

Güç sistemlerinde Power System Simulator (Simpow) ve DigSilent gibi hesaplama yönünden çok etkili ve yeterince kullanıcı dostu olan ticari programlar ile MATLAB tabanlı ücretsiz bir yazılım olan Power System Toolbox (PST) ve ticari bir yazılım olan SimPowerSystems (SPS) gibi çeşitli programlar mevcuttur. Bu programların çoğunda bileşen modellerini incelemek ve değişiklik yapmak zordur veya olanaksızdır. Ayrıca bu programların öğrenilmesi genellikle önemli eğitim gerektirmektedir ve bu sebepten ötürü normal derslik kullanımlarına uygun değildir. Akademik ve eğitim kullanıcıları için bileşen modellerinin şeffaf ve esnek olması ve öğrencilerin simülasyonlarını kolaylıkla yapabilmesi daha önemlidir.

Bu tezde, MATLAB ortamında çalışan ve grafiksel kullanıcı arabirimine (graphical user interfaces, GUI) sahip PowSysGUI adında yeni bir eğitimsel yazılım paketi, elektrik güç sistem analizi ve tasarımlarında kullanılması için geliştirildi. Bu program açık kaynak kodlu yazılımdır ve güç sistemleri alanında kod yazmayı öğrenmek isteyen biri bu programın iç yapısını görebilir. Bu program paketi, araştırmacılar ve eğitimciler için kullanması ve değiştirmesi kolay olan bir simülasyon aracı olarak

amaçlandı. PowSysGUI, anlaşılması ve değiştirilmesi için kodu basit tutarak olası en iyi performansı vermesi için tasarlandı. PowSysGUI yük akışı analizi, küçük işaret kararlılık analizi, zaman domen simülasyonu ve evrimsel hesaplama tekniklerini kullanarak PSS tasarımı için verimli algoritmalara sahiptir ve kolay kodlamaya izin verir.

Tezde geliştirilen programın kapasitelerini ve eğitim/araştırma amaçları için uygunluğunu göstermek amacıyla temel özellikleri, algoritmaları ve farklı güç sistemleri üzerinde çeşitli durum çalışmaları sunuldu. Simülasyon sonuçları, PowSysGUI paket programının elektrik güç sistem çalışmaları için güçlü ve gelecek vaat eden bir araç olduğunu gösterdi. Ayrıca PowSysGUI açısıl kararlılık kavramının anlaşılmasında çok yararlıdır ve elektrik mühendisliğindeki özellikle kararlılık konularını içeren bazı lisans/yüksek lisans derslerinde etkin olarak kullanılabilir.

ANGULAR STABILITY ANALYSIS AND CONTROLLER PARAMETER OPTIMIZATION IN MULTI-MACHINE POWER SYSTEM

SUMMARY

Load flow or power flow analysis is implemented in a power system analysis course for the determination of voltage magnitudes and angles of various bus bars as well as real and reactive power flow. It is, in fact, a problem of solving a system of nonlinear equations. To solve load flow problems as efficiently as possible, a myriad of different methods have been proposed in the literatures.

The stability of power systems has been and continues to be of a fundamental concern in system operations. Modern electrical power systems have grown to a complexity which is not easy to handle by conventional methods because of growing interconnections, installation of large generating units and extra high voltage tie-lines etc. The power system stability is usually categorized based on the following considerations:

- a) Rotor angle stability
- b) Voltage stability
- c) Frequency stability

In this thesis, mainly the rotor angle stability is considered. Rotor angle stability denotes the ability of the grid's synchronous machines to remain in synchronism following being subjected to large and small disturbances. It can also be directly related to maintaining or restoring the equilibrium of the system between electromagnetic torque and mechanical torque of each synchronous machine in the system. There are two basic approaches of stability studies for exploring the impact of disturbances on the electromechanical dynamic behavior of the power system: steady-state and transient stability.

The steady-state or small signal stability of a power system refers to the ability of the system to maintain synchronism after being subjected to a small disturbance. Steady-state stability studies are usually less comprehensive than transient stability studies, and often perform on a single machine infinite bus or just a few machines undergoing one or more small disturbances. Hence, steady-state stability studies are used to examine the stability of the system under incremental variations in parameters or operating conditions at a steady-state equilibrium point. The nonlinear differential and algebraic equations of the system are replaced by a set of linear equations, which are solved by methods of linear analysis to check if the system is steady-state stable.

Transient stability or large-disturbance rotor angle stability denotes the ability of the power system to maintain synchronism while being subjected to severe disturbances, including a short circuits and/or outages of major transmission lines. In this case, the system's response is governed by the system nonlinearities; hence linearized of the system equations do not work. It is worth to note that while steady-state stability is a function only of operating conditions, transient stability is a function of both the operating conditions and disturbances. This complicates the analysis of transient

stability substantially, but the resultant nonlinear differential and algebraic equations of the overall system can be solved by means of using either direct methods or iterative step-by-step procedures.

Power systems undergo low frequency oscillations when they are vulnerable to disturbances. The oscillations might continue and develop to trigger the system separation in the case of lack of sufficient damping. To augment the system damping, the generators are fitted out with the power system stabilizers (PSSs), which are designed to supply supplementary feedback stabilizing signals in the excitation systems. PSSs prolong the power system stability level through advancing the system damping of the low frequency oscillations, which are related to the electromechanical modes.

A number of techniques, such as optimal control, adaptive control, variable structure control and intelligent control, have been used in the design of PSS. These existing techniques contain numerous disadvantages, since the control law is contingent upon a linearized machine model and the control parameters are arranged for definite nominal operating settings. The parameters of the controllers are not also valid, as the system conditions modify nonlinear in the situation of large disturbances.

In the last two decades, several heuristic optimization techniques have been proposed in order to solve difficult optimization problems. Most of these methods are inspired by nature and can be classified into two main categories: evolutionary algorithms and swarm intelligence. Nature-inspired heuristic optimization algorithms, independent from the problem and model, have been proposed to explain deficiencies of conventional optimization algorithms. A number of algorithms based on these methods, such as Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), Differential Evolution (DE) algorithm and Artificial Bee Colony (ABC) algorithm, have been widely proposed and applied to find the optimal set of parameters to effectively design the PSS. The outcomes are propitious and substantiate the potential of these algorithms for optimal PSS design.

The simulation of power systems using special purpose tools is nowadays a well-established field and a number of commercial tools, such as Simpow, NEPLAN, EuroStag and PSS/E, are available. Although most of these tools are computationally very efficient and reasonably user-friendly, they have a closed architecture in which it is hard or impossible to view or change most of the component models. What is more, these simulators are not ideal for normal classroom use since they often require substantial training. For academic and educational use, it is more significant that the component modeling be transparent and flexible that help students quickly get started with their simulations.

Over the last decade, a myriad of high-level scientific languages, including MATLAB, MATHEMATICA and MODELICA, have become more and more popular for both research and educational purposes. Any of these languages can lead to desired results in the field of power system analysis. Nevertheless, MATLAB proved to be the best user choice. Key features of MATLAB are the matrix-oriented programming, wonderful plotting capabilities and a graphical environment (SIMULINK) which greatly simplifies control scheme design. Therefore, several MATLAB-based commercial, research and educational power system tools have been proposed, such as Power System Toolbox (PST), Electromagnetic Transients Program in MATLAB (MatEMTP), Voltage Stability Toolbox (VST), Power Analysis Toolbox (PAT), Educational Simulation Tool (EST), SimPowerSystems

(SPS), Power System Analysis Toolbox (PSAT), Matlab Power System Simulation Package (MatPower) and MatDyn. But only a few of them are entirely free and open source.

Graphical user interfaces (GUIs) are being increasingly used in the classroom to provide users of computer simulations with a friendly and visual approach to specify all input parameters and enhance the configuration flexibility. In this thesis, an educational software package called PowSysGUI (Power System GUI), which runs on MATLAB and uses GUIs, has been developed for analysis and design of electric power systems. It is open-source software and anyone can see the inner structure of the program to understand how to code a power-engineering problem. It is designed as a simulation tool for researchers and educators, as it is simple to use and modify. PowSysGUI is designed to give the best performance possible while keeping the code more simple and plain to understand and modify.

PowSysGUI has efficient algorithms for power flow analysis, small signal stability analysis, time-domain simulation and PSS design using evolutionary computation methods. PowSysGUI also allows easy scripting, and comprises four main programs:

- 1) Power Flow Analysis (PFA) : PowSysGUI finds admittance matrix and uses the standard Newton-Raphson Method for power flow.
- 2) Small Signal Stability Analysis (SSSA) : PowSysGUI allows computing and plotting all the eigenvalues and the participation factors of the system, once the power flow has been solved. To ensure high-precision results, the eigenvalues are calculated by using analytical Jacobian matrices.
- 3) Time-domain Simulation (TDS) : This program is Simulink-based and plots system responses and gives reduced admittances matrices. It has to be bear in mind that a transient stability analysis is characteristically more complicated than power flow and small signal stability analysis.
- 4) PSS Design : This program contains two types of objective functions: eigenvalue-based objective function and time domain-based objective function for PSS parameters tuning problem. In this program, some heuristic optimization techniques are applied to search for optimal PSS controller's parameters.

Basic features, algorithms, and a variety of case studies based on the IEEE 9-bus, IEEE 39-bus and IEEE 68-bus test systems are presented in this thesis in order to illustrate the capabilities of the presented tool and its suitability for educational and research purposes. Simulation results show that PowSysGUI is a powerful and promising tool for electric power system studies, and very helpful to understand angle stability phenomena. Likewise, PowSysGUI could be effectively used to enhance power engineering undergraduate/graduate courses. PowSysGUI developed in this thesis is available to the reader. For more information, please contact the communicating author at ekinciser@yahoo.com.

1. GİRİŞ

Kararlılık her zaman güç sistemlerinin en önemli ilgi alanlarından biri olmuştur. Güç sisteminin elektromekanik dinamik davranışı üzerindeki arızaların etkisini değerlendiren kararlılık çalışmaları; geçici hal ve sürekli hal kararlılığı olmak üzere ikiye ayrılır. Sürekli hal kararlılığı ya da diğer adıyla küçük işaret kararlılığı, güç sisteminin küçük bozulmalar altında senkronizmayı koruma yeteneğidir. Geçici hal kararlılığı, büyük arızaya maruz kalan güç sisteminin senkronizasyonda kalma yeteneğidir. İletim sistemindeki arızalar, ani yük değişiklikleri, üretim birimlerinin kaybı, önemli iletim hatlarının devre dışı kalması ve hat anahtarlamaları büyük arıza örneklerinden sayılmaktadır. Bu tür arızalarda sistem cevabı, generatör rotor açıları, yük akışları, bara gerilimleri ve diğer sistem değişkenlerinin büyük sapmalarına yol açar. Sürekli hal kararlılığı yalnızca başlangıç çalışma koşullarının bir fonksiyonu olmasına rağmen, geçici hal kararlılığı ise başlangıç çalışma koşulları ve bozucu etkilerin bir fonksiyonudur. Bununla birlikte, geçici hal kararlılığı çalışmaları büyük hataları içerir ve sistem denklemlerini lineer hale getirmesine izin vermez. Bu özelliklerinden dolayı, geçici hal kararlılık analizi önemli ölçüde karmaşıktır. Düşünülen farklı bozucu etkiler (büyük arıza) için tekrarlı analizlerin yapılması gereklidir. Geçici hal kararlılık analizi çalışmalarında, sıklıkla düşünülen bozucu etkiler çeşitli kısa devrelerdir. Bunların dışında, bağlı makinanın maksimum hızlanmasına sebep olduğu için generatör barasındaki üç fazlı kısa devre en ciddi arıza türüdür [1].

İlk kurulduğu dönemlerde güç sistemleri basit ve nispeten yereldi. Diğer ifadeyle, güç yük merkezleri yanında üretilirdi ve bundan dolayı gücün uzun iletim hatları boyunca gönderilmesi ve alınması zordu. Ayrıca, kontrol bölgeleri arasındaki enterkonnekte (ara bağlantılı) sistemler yaygın değildi. Seri ve şönt reaktif kompensatörler, gerilim düzenleyici transformatörler ve faz kaydırıcılar mekanik cihazlar aracılığıyla manuel olarak çalıştırıldığından dolayı, hızlı kontrol mevcut değildi. Sonuç olarak, sürekli durum çalışması esnasında, bu cihazların güç sistem performansını kontrol etmeleri sınırlıydı [2,3].

Günümüzde, güç talebi süratle büyümekte ve bu yüzden karmaşık güç sistemlerine olan ihtiyaç artmaktadır. Diğer taraftan, iletimdeki ve üretimdeki genişleme, kaynakların sınırlı mevcut olmasından ve sıkı çevresel zorlamalardan dolayı kısıtlıdır. Geçmişe nazaran günümüzde güç sistemlerine daha çok yüklenmesinin sonucu olarak, sistemlerin kendi geçici kararlılık sınırları yakınlarında çalışmalarına sebep oluyor. Bununla birlikte, uzak mesafeli güç sistemleri arasındaki enterkonnekte bağlantı şu anda yaygın bir yöntemdir ki, bu 0.1–3.0 Hz aralığındaki düşük frekans salınımlarını yükselterek verir. Eğer salınımlar iyi söndürülmezse, bu salınımlar senkronizasyon kaybıyla sonuçlanıncaya kadar, büyümeye devam ederler [4-5].

Güç sisteminde düşük frekanslı salınımların sönümünü artırmak maksadıyla kullanılan güç sistemi kararlı kılıcılar (Power System Stabilizers: PSSs) uzun yıllardan beri kullanılmaktadır. Generatör uyarma sistemi üzerinde çalışan PSS'lerin atanmış olduğu görevlerde etkili bir performans sergiledikleri ispatlanmıştır. Ama birçok avantajlarına rağmen, PSS'lerin gerilim profiline ters etkileri vardır ki, bu güç faktörü ilerlemesine ve büyük arızalardan kaynaklanan salınımları bastıramamasına (özellikle generatör uçlarında meydana gelen üç fazlı arızalarda) yol açar [4-5].

İlk dönemlerde, DeMello ve Concordia [6] uyarma kontrolü tarafından etkilenen senkron makine kararlılık kavramını ortaya çıkardı. Günümüzde, küçük salınımları bastırmak ve söndürmek için geleneksel faz ilerlemeli-gerilemeli güç sistemi kararlı kılıcılar (conventional power system stabilizers: CPSSs) elektriksel güç sistemlerinde daha çok kullanılmaktadır. Kundur vd. [7] yerel ve bölgeler arası modlardaki geçici kararlılığı düzeltmek amacıyla geleneksel faz ilerlemeli gerilemeli PSS'lerin parametrelerini belirlemek için detaylı analitik çalışmalar sundu. Bu parametreler, kararlı kılıcı kazancı, kararlı kılıcı çıkış limitleri ve işaret temizlemelerinden (signal washout) meydana gelir. Bunlarla birlikte, Gibbard [8] geniş aralıktaki sistem yüklenme durumlarında, CPSS'nin yeterli derecede sönüm performansı sağladığını ispat etmiştir. CPSS'nin dayanıklı yapısı, moment-referans gerilim transfer fonksiyonunun geniş aralıklı çalışma durumlarında daha az değişmesinden kaynaklanmaktadır.

1960-1970 yılları arasında klasik optimizasyon teknikleri geliştirilmesine rağmen bu teknikler lineer ve diferansiyel olmayan mühendislik problemleri çözümünde yetersiz kaldı. Yakın zamanda Genetik Algoritma (GA: genetic algorithm) [9-11],

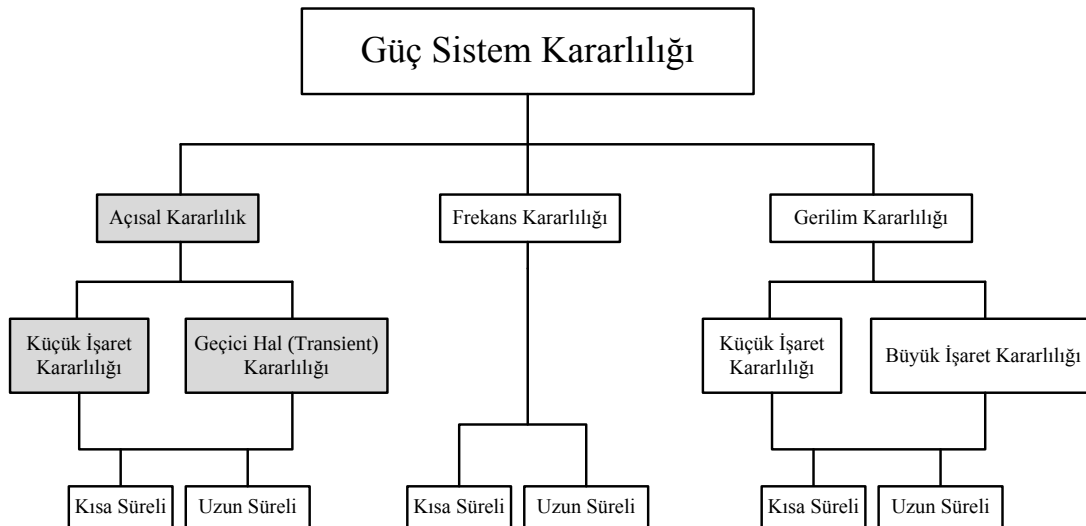
Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO: Particle Swarm Optimization) [12-13], Diferansiyel Gelişim (DE: Differential Evolution) [14-15], Kültürel Algoritma (CA: Cultural Algorithms) [16], Adaptif Mutasyon Yetiştirici Genetik Algoritması (ABGA: Adaptive Mutation Breeder Genetic Algorithm) [17], Kaotik Optimizasyon Algoritması (COA: Chaotic Optimization Algorithm) [18], Bal Arısı Çiftleşme Optimizasyonu (HBMO: Honey Bee Mating Optimization) [19] ve Yarasa Algoritması (BA: Bat Algorithm) [20-21] gibi bazı optimizasyon teknikleri, etkili bir şekilde optimum parametre takımlarını bularak PSS tasarlamada yaygın olarak uygulanmıştır. Son yıllarda Karaboğa [22-23] sezgisel-üstü algoritmalar kategorisi altında çok umut verici olan yapay arı kolonisi (ABC: Artificial Bee Colony) algoritmasını sundu. ABC algoritması, bal arısı sürülerinin davranışları üzerine dayalı yeni bir arama algoritmasıdır. Yapılan ön çalışmalar ABC algoritmasının kısıtsız optimizasyon problemlerini çözmede GA ve PSO tekniklerinden üstün olduğu gösterilmiştir [22-23]; çünkü bu teknikler çok modlu optimizasyon problemlerinde yetersiz kalmaktaydı. Bundan dolayı ABC algoritması çeşitli optimizasyon problemlerine başarılı şekilde uygulanmıştır [24-28].

Güç sistemi kararlılık analizi için simülasyon programları iki ana sınıfa ayrılabilir: Ticari yazılım paketleri ve eğitim/araştırma amaçlı yazılım paketleri. Power System Simulator for Engineering (PSS/E), Power System Simulator (Simpow), DigSilent, EuroStag, NEPLAN and PowerWorld gibi çeşitli ticari yazılım paketleri satışa sunulmuştur. Bu programlar, analiz amaçları için kullanıcılara kapsamlı bileşenler/sistemlere, modellere ve hesaplama açısından etkili algoritmalara erişimine izin verir. Ancak bu programlar eğitim ve araştırma alanları için uygun değildir, çünkü bunlar genellikle yeni bileşen modellerin ve algoritmaların değiştirilmesine veya dahil edilmesine olanak vermez. Eğitim ve araştırma alanlarında, basit prototip için esneklik ve potansiyel onun hesaplama verimliliğinden daha önemlidir.

Son on yılda, MATLAB, MATHEMATICA ve MODELICA gibi çeşitli yüksek seviyeli programlar araştırma ve eğitim amaçları için çok popüler oldular. Bu programlardan her biri güç sistem analizi alanlarında iyi sonuçlar verebilir. Bu programlardan MATLAB en iyi kullanıcı seçeneğini olduğunu kanıtlamıştır. MATLAB program dilinin en önemli özellikleri; matris odaklı programlanması, üstün çizim kapasitelerine sahip olması ve kontrol şeması tasarımını son derece

basitleştiren bir grafik ortamı olan Simulink programını içermesidir [29]. MATLAB ile birlikte bütünleşik olarak çalışan bir simülasyon programı olan Simulink, dinamik sistemleri modelleme, tasarlama ve simülasyon yapma olanağı verir. Simulink sürekli zamanlı, ayırık zamanlı ve her ikisini de içeren hibrit sistemleri desteklemektedir. Simulink, blok diyagram modellerini oluşturmak için “sürükle-bırak” işlemi kullanılarak bir grafiksel kullanıcı ara birimi sağlar. Zengin bir blok kütüphanesi yardımıyla bir sistem kolaylıkla inşa edilebilir ve simülasyon sonuçları hızlı şekilde gösterilebilir. İdeal bir araştırma aracı olan Simulink programının özellikle lineer olmayan bir sistemin davranışlarını incelemek için kullanılması yararlıdır. Simulink programının kullanımı, birçok araştırma çalışmasında ve aynı zamanda güç sistemleri alanlarında çok hızlı şekilde büyümektedir [30-34].

Güç sistemi simülasyonu, modellemesi ve analizlerinde, Power System Toolbox (PST) [35], Electromagnetic Transients Program in MATLAB (MatEMTP) [36], Voltage Stability Toolbox (VST) [37], Power Analysis Toolbox (PAT) [38], Educational Simulation Tool (EST) [39], SimPowerSystems (SPS) [40], Power System Analysis Toolbox (PSAT) [29], Matlab Power System Simulation Package (MatPower) [41], and MatDyn [42] gibi çeşitli MATLAB tabanlı programlar mevcuttur. Bu programların çoğunda, bileşen modellerine erişilebilir, ancak bu modellerde değişiklik yapmak için, bu özel ortamdaki model dosyalarının etkileşimi uygun bir anlayış gerektirir.



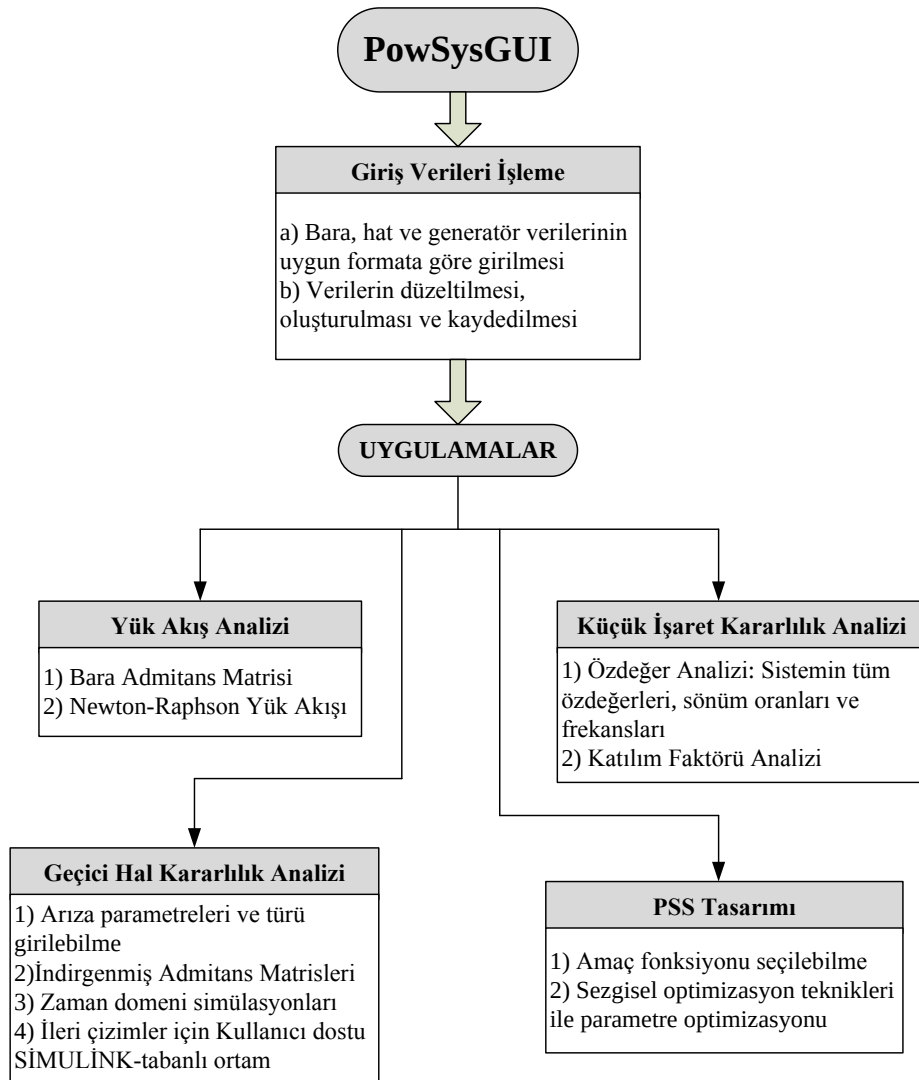
Şekil 1.1 : Kararlılık sınıflandırılması.

1.1 Tezin Kapsamı

Şekil 1.1’de kararlılık sınıflandırılması verilmiş olup, tez açısıl kararlılık kısmından; küçük işaret kararlılık ve geçici hal kararlılık analizleri kapsamına girmektedir.

1.2 Tezin Amacı

Bu tezin temel amacı, matematiksel temele dayalı, güç sistemlerinde açısıl kararlılık analizi yapabilen, eğitim alanında da kullanılabilecek yeni ve gelişmiş grafik kullanıcı arabirimine sahip bir paket program tasarlamaktır. Şekil 1.2’de görüleceği gibi bu yeni GUI paket programı (**PowSysGUI**: program adı) 4 alt programdan meydana gelmektedir.



Şekil 1.2 : PowSysGUI programının yapısı.

1. Yük Akış Analizi Programı: Bu program yardımıyla; bara admitans matrisinin hesaplanması ve Newton-Raphson metodu kullanarak yük akış analizi sonuçları bulunur.
2. Küçük İşaret Kararlılık Analizi Programı: Bu program güç sisteminin başlangıç çalışma koşullarının bulunması, zdeğer analizi (sistemin tüm özdeğerlerin çözülmesi ve çizilmesi) ve katılım faktörü analizi yapabilecek kapasitedir. Sistemin zdeğerleri, analitik Jakobiye matrisler kullanılarak hesaplanmaktadır ve bu metot özdeğerlerin yüksek hassasiyetle hesaplar. Bu program aynı zamanda Yük Akış Analizi Programı ile etkileşim halindedir.
3. Geçici Hal Kararlılık Analizi Programı: Bu program aracılığıyla, değişik arıza durumlarına (arıza olan hattın devreden çıkarılması; arızadan sonra sistemin eski haline dönmesi; mekanik güç veya referans gerilimde meydana gelen değişimler; kritik arıza temizleme sresinden büyük arızalanma zamanı vs.) maruz kalan bir güç sistemin geçici hal kararlılığı kolaylıkla incelenir. Bu programın tasarımı Simulink blokları kullanılarak modellenmiş olup, bu programda ayrıca istenilen her işareten kolaylıkla çıkış alınıp zamana göre çizim yapılabilir. Bununla birlikte ileri düzey Simulink-tabanlı bu program ile güç sistemlerinde araştırma yapan ğrenci ve mühendisler, büyük arıza altındaki bir g sisteminin geçici hal kararlılık analizi hakkında detaylı incelemeler yapabilir. Bu program aynı zamanda Yük Akış Analizi Programı ile etkileşim halindedir.
4. Güç sistemi kararlı kılıcı (PSS) tasarımı Programı: Küçük İşaret Kararlılık Analizi Programı'ndaki Katılım Faktörü Analizi (Participation Factor Analysis) kullanılarak PSS'lerin şebekedeki en uygun yer(ler)i bulunduktan sonra, g sistemi kararlı kılıcı (PSS) tasarımı program yardımıyla PSS'nin parametre tasarımı değişik optimizasyon teknikleri kullanılarak yapılabilmektedir. Optimizasyon yapılırken amaç fonksiyonları zdeğer tabanlı veya zaman domenı tabanlı seçilebilmektedir. Bu program paketinde kullanılan sezgisel optimizasyon teknikleri: **PSO**: parçacık sürüsü optimizasyonu; **ABC**: Yapay arı kolonisi. Ayrıca farklı optimizasyon tekniklerinin zamanla eklenebilme özelliğine sahiptir. Bu programın diğer üç program ile etkileşim halde olduğu açıktır.

Tezde, popölasyona dayalı yeni bir sezgisel optimizasyon tekniği olan ABC algoritması çeşitli örnek sistemler üzerinde optimum PSS parametrelerini bulmada kullanıldı ve ayrıca PSO tabanlı PSS ile detaylı karşılaştırıldı. Küçük işaret kararlılık analizleri, geçici hal kararlılık analizleri ve çeşitli performans indeks analizleri yapılarak, ABC tabanlı PSS’li sistemlerin PSO tabanlı PSS’li sistemlerden daha üstün performans ortaya koydukları gösterildi.

Tezde tasarlanan MATLAB/Simulink tabanlı PowSysGUI paket programının ve diğer dört programla (PST, MatPower, SPS ve PSAT) karşılaştırılması Çizelge 1.1’de verilmiştir. Kullanıcı dostu grafik kullanıcı arabirimine sahip PowSysGUI tasarlanırken kodlar mümkün olduğunca basit ve anlaşılır şekilde matematiksel temeller baz alınarak yazıldı. Ayrıca, araştırmacılar ve eğitimciler tarafından program paketinde değişiklikler ve eklemeler kolaylıkla yapılabilir. Dört ana programdan oluşan PowSysGUI paket programının etkinliği ve çalışma performansı 3 makinalı 9 baralı, 10 makinalı 39 baralı ve daha büyük bir sistem olan 16 makinalı 68 baralı gibi farklı güç sistemlerinde başarıyla test edildi. Geliştirilen bu program paketi, üniversitelerde okutulan Güç Sistem Analizi ve Elektriksel Güç Sistemlerinde Kararlılık Analizi gibi yüksek lisans/doktora derslerinin daha iyi anlaşılması için yardımcı bir araç olarak da kullanılabilir.

Çizelge 1.1 : Güç sistemlerinde kullanılan MATLAB tabanlı program paketleri.

Program Adı ve İşlevleri	PST	MatPower	SPS	PSAT	PowSysGUI
Yük Akışı Analizi	x	x	x	x	x
Küçük İşaret Kararlılık Analizi	x		x	x	x
Geçici Hal Kararlılık Analizi	x		x	x	x
PSS Uygulamaları	x		x	x	x
Parametre Optimizasyonu			x		x
Grafik Kullanıcı Arabirimi (GUI)			x	x	x

Bu tezin düzenlenmesi: 2. Bölüm’de yük akış analizine değinildi. 3. Bölüm’de güç sistemlerine ilişkin diferansiyel-cebirsal denklem takımları lineer hale getirildi ve güç sisteminin lineerleştirilmiş durum denklemleri çıkartılıp tam çözümü Modal Analiz yöntemi kullanılarak detaylı şekilde yapıldı. 4. Bölüm’de, güç sistemi kararlı kılıcıların (PSS) yapısına, analitik olarak lineerleştirilmesine ve optimal yerlerinin

seçimine değinildi. Bölüm 5'te sezgisel optimizasyon tekniklerinden PSO ve ABC metotlarına, performans indekslerine, amaç fonksiyonlarına ve optimizasyon problemine ve 6. Bölüm'de geçici hal kararlılık analizine değinildi. nceki bölümlerde tasarlanan MATLAB/Simulink tabanlı programların örnek güç sistemleri üstünde test edilmesi 7. ve 8. Bölüm'de verilmiştir. 9. Bölüm'de geliştirilen programlara GUI özelliği eklenerek hedeflenen PowSysGUI programı elde edilerek büyük bir g sistemi üstündeki performansı ve etkinliği kanıtlanmıştır. Son bölümde ise sonuçlara ve gelecekteki çalışmalarda PowSysGUI programına ilave özellikler eklenerek gelişimine değinildi.

2. YÜK AKIŞ ANALİZİ

Bu bölümde, düğüm-gerilim denklemlerinden yola çıkarak bara admitans matrisi oluşturuldu. Lineer olmayan cebirsel denklem çözümlerinde daha yaygın kullanılan yinelemeli tekniklerden olan Newton-Raphson metodu incelendi. Bu tekniğin güç sistemlerine uygulanması ele alındı ve genelleştirilmiş yük akış analizi yapabilecek MATLAB tabanlı bir program hazırlandı.

2.1 Bara Admitans Matrisi

n baralı sistem için, düğüm-gerilim denklemleri matris formunda yazılırsa [43];

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \vdots \\ \bar{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} & \cdots & \bar{Y}_{1n} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} & \cdots & \bar{Y}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{Y}_{n1} & \bar{Y}_{n2} & \cdots & \bar{Y}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \vdots \\ \bar{V}_n \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

veya

$$\bar{I}_{bus} = \bar{Y}_{bus} \bar{V}_{bus} \quad (2.2)$$

Burada $\bar{I}_{bus}$ bara akım vektörü, $\bar{V}_{bus}$ bara gerilim vektörü ve $\bar{Y}_{bus}$ bara admitans matrisi olarak bilinir. Köşegen admitans elemanı (self-admittance)

$$Y_{ii} = \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n y_{ij} \quad (2.3)$$

ve köşegen olmayan admitans elemanı

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \quad (2.4)$$

şeklinde bulunur.

2.2 Newton-Raphson Metodu

Lineer olmayan cebirsel denklemlerin tekrarlı çözümlerinde, Gauss-Seidel, Newton-Raphson ve Quasi-Newton metotları literatürde daha çok kullanılmaktadır. Newton-Raphson metodu, bilinmeyen başlangıç tahmine dayalı ardışık yaklaşım prosedürüdür ve Taylor seri açılımını kullanır. Aşağıda verilen tek boyutlu denklemi göz önüne alalım;

$$f(x) = c \quad (2.5)$$

$x^{(0)}$ çözümün başlangıç tahmini ve $\Delta x^{(0)}$ gerçek çözümden küçük sapma olsun, bu durumda;

$$f(x^{(0)} + \Delta x^{(0)}) = c \quad (2.6)$$

olur. Yukarıdaki denklemin sol tarafını $x^{(0)}$ civarında Taylor serisine genişletirsek,

$$f(x^{(0)}) + \left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)} \Delta x^{(0)} + \frac{1}{2!} \left(\frac{d^2 f}{d^2 x}\right)^{(0)} (\Delta x^{(0)})^2 + \dots = c \quad (2.7)$$

ve $\Delta x^{(0)}$ hatasının çok küçük olduğunu kabul edersek ve yüksek dereceli terimler ihmal edilirse, aşağıdaki gibi bir sonuç elde edilir,

$$\Delta c^{(0)} = c - f(x^{(0)}) = \left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)} \Delta x^{(0)} \quad (2.8)$$

$\Delta x^{(0)}$ 'ı başlangıç tahminine eklersek, ikinci yaklaşımdaki değeri buluruz,

$$x^{(1)} = x^{(0)} + \frac{\Delta c^{(0)}}{\left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)}} \quad (2.9)$$

Bu prosedürün ardışık şekilde kullanılması Newton-Raphson algoritmasını verir.

$$\Delta c^{(k)} = c - f(x^{(k)}) \quad (2.10)$$

$$\Delta x^{(k)} = \frac{\Delta c^{(k)}}{\left(\frac{df}{dx}\right)^{(k)}} \quad (2.11)$$

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)} \quad (2.12)$$

Benzer şekilde, n değişkenden oluşan n denklemlili bir sistem düşünelim,

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1$$

$$f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_2$$

.....

$$f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_n \quad (2.13)$$

Yukarıdaki denklemlerin sol taraflarını başlangıç tahminleri civarında Taylor serilerine açarsak ve yüksek dereceli terimleri ihmal edersek,

$$(f_1^{(0)}) + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right)^{(0)} \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right)^{(0)} \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right)^{(0)} \Delta x_n^{(0)} = c_1$$

$$(f_2^{(0)}) + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^{(0)} \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^{(0)} \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)^{(0)} \Delta x_n^{(0)} = c_2$$

...

$$(f_n^{(0)})_+ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right)^{(0)} \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right)^{(0)} \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right)^{(0)} \Delta x_n^{(0)} = c_n \quad (2.14)$$

elde edilir. Bunları matris formda yazarsak,

$$\begin{bmatrix} c_1 - f_1^{(0)} \\ c_2 - f_2^{(0)} \\ \vdots \\ c_n - f_n^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right)^{(0)} \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right)^{(0)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right)^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

olur. Kısa bir biçimde, bu ifade aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

$$\Delta C^{(k)} = J^{(k)} \Delta X^{(k)} \quad (2.16)$$

ve n boyutlu durum için, Newton-Raphson algoritması aşağıdaki gibi olur:

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} + \Delta X^{(k)} \quad (2.17)$$

Burada,

$$\Delta X^{(k)} = \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(k)} \\ \Delta x_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(k)} \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad \Delta C^{(k)} = \begin{bmatrix} c_1 - f_1^{(k)} \\ c_2 - f_2^{(k)} \\ \vdots \\ c_n - f_n^{(k)} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$J^{(k)} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right)^{(k)} & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right)^{(k)} \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right)^{(k)} & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right)^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right)^{(k)} & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right)^{(k)} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$J^{(k)}$ Jakobien matrisi olarak adlandırılır. Bu matrisin elemanları $X^{(k)}$ 'da hesaplanan kısmi türevleridir. Her iterasyonda $J^{(k)}$ 'nin tersinin olduğu varsayılır. Lineer olmayan denklem takımlarına uygulanan Newton metodu, tahminlerin hassasiyetini iyileştiren değerleri belirlemek için lineer denklem takımlarını çözme problemine indirger.

2.3 Newton-Raphson Yük Akış Çözümü

Kuadratik yakınsamadan dolayı, Newton metodu matematiksel olarak Gauss-Seidel metodundan üstündür [43]. Büyük güç sistemlerinde, Newton-Raphson metodunun daha verimli ve kullanışlı olduğu saptanmıştır. i barasındaki akım vektörü kutupsal formda aşağıdaki gibi yazılabilir [43-44];

$$\bar{I}_i = \sum_{k=1}^n \bar{Y}_{ik} \bar{V}_k = \sum_{j=1}^n Y_{ik} V_k \angle \theta_k + \alpha_{ik} \quad (2.20)$$

i barasındaki karmaşık güç ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$P_i + jQ_i = \bar{V}_i \bar{I}_i^* \quad (2.21)$$

(2.20) denkleminde $\bar{I}_i$ 'yi, (2.21) denkleminde yerine koyarsak,

$$P_i + jQ_i = V_i \angle \theta_i \sum_{j=1}^n Y_{ik} V_k \angle -\theta_k - \alpha_{ik} = \sum_{j=1}^n V_i V_k Y_{ik} \angle \theta_i - \theta_k - \alpha_{ik} \quad (2.22)$$

elde edilir. Reel ve imajiner kısımlarına ayırırsak,

$$P_i = \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \quad (2.23)$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \quad (2.24)$$

bulunur. (2.23) ve (2.24) denklemlerini başlangıç tahminleri civarında Taylor serilerine açarsak ve yüksek dereceli terimleri ihmal edersek, aşağıdaki gibi lineer denklem takımları oluşur [43-44]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(j)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(j)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial V_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial V_n} \\ \hline \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial V_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial V_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Yukarıdaki denklemde, 1 nolu baranın gevşek bara olduğu varsayılmıştır. Jakoben matris, gerilim açısındaki $\Delta \theta_i^{(j)}$ ve gerilim büyüklüğündeki $\Delta V_i^{(j)}$ küçük değişimleri ile aktif güçlerdeki $\Delta P_i^{(j)}$ ve reaktif güçlerdeki $\Delta Q_i^{(j)}$ küçük değişimleri arasındaki lineerleştirilmiş ilişkiyi verir. Jakoben matrisin elemanları (2.23) ve (2.24) denklemlerinin $\Delta \theta_i^{(j)}$ ve $\Delta V_i^{(j)}$ 'deki değerlerinin kısmi türevleridir ve kısaca aşağıdaki gibi yazılabilir [43-44]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Gerilim kontrollü baralar için, gerilim büyüklükleri biliniyor. Bu yüzden, eğer sistemin m adet barası gerilim kontrollü ise, ΔQ ve ΔV 'nin dahil olduğu m adet denklem ve Jakoben matriste karşılık düşen sütunlar silinir. Bu nedenle, $n-1$ adet aktif güç sınırlamaları ve $n-1-m$ adet reaktif güç sınırlamaları var olup ve Jakoben matrisin derecesi $(2n-2-m) \times (2n-2-m)$ 'dir. J_1 'in derecesi $(n-1) \times (n-1)$, J_2

'nin derecesi $(n-1) \times (n-1-m)$, J_3 'ün derecesi $(n-1-m) \times (n-1)$ ve J_4 'ün derecesi $(n-1-m) \times (n-1-m)$ 'dir.

J_1 matrisinin köşegen ve köşegen olmayan elemanları:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n V_i V_k Y_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} = V_i V_k Y_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \quad (2.28)$$

J_2 matrisinin köşegen ve köşegen olmayan elemanları:

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n V_k Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) + 2V_i Y_{ii} \cos(\alpha_{ii}) \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_k} = V_i Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \quad (2.30)$$

J_3 matrisinin köşegen ve köşegen olmayan elemanları:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n V_i V_k Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k} = -V_i V_k Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \quad (2.32)$$

J_4 matrisinin köşegen ve köşegen olmayan elemanları:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n V_k Y_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) - 2V_i Y_{ii} \sin(\alpha_{ii}) \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_k} = V_i Y_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \quad (2.34)$$

olur. $\Delta P_i^{(j)}$ ve $\Delta Q_i^{(j)}$ terimleri belirlenen ve hesaplanan değerler arasındaki fark olup, güç kalanları olarak bilinir ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\Delta P_i^{(j)} = P_i^{sch} - P_i^{(j)} \quad (2.35)$$

$$\Delta Q_i^{(j)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(j)} \quad (2.36)$$

Gerilim baraları için yeni tahmini değerler aşağıdaki gibidir:

$$\theta_i^{(j+1)} = \theta_i^{(j)} + \Delta\theta_i^{(j)} \quad (2.37)$$

$$V_i^{(j+1)} = V_i^{(j)} + \Delta V_i^{(j)} \quad (2.38)$$

Newton-Raphson metodu kullanılarak yapılan yük akış çözümü için aşağıdaki prosedür takip edilir [43].

1. P_i^{sch} ve Q_i^{sch} 'leri bilinen yük baraları için, gerilim büyüklükleri ve faz açıları gevşek (slack) bara değerlerine eşitlenir, başka bir deyişle $V_i^{(0)} = 1.0$ ve $\theta_i^{(0)} = 0.0$. V_i ve P_i^{sch} 'leri bilinen gerilim regülasyonlu baralar için, faz açıları gevşek bara değerlerine eşitlenir, yani $\theta_i^{(0)} = 0.0$.
2. Yük baraları için, $P_i^{(j)}$ ve $Q_i^{(j)}$ (2.23) ve (2.24) denklemlerinden ve $\Delta P_i^{(j)}$ ve $\Delta Q_i^{(j)}$ (2.35) ve (2.36) denklemlerinden hesaplanır.
3. Gerilim regülasyonlu baralar için, $P_i^{(j)}$ ve $\Delta P_i^{(j)}$ sırasıyla (2.23) ve (2.35) denklemlerinden hesaplanır.
4. Jakobiyen matrisinin J_1 , J_2 , J_3 ve J_4 elemanları (2.27)-(2.34) denklemlerinden hesaplanır.
5. (2.26) lineer denklemi çözülerek, yeni gerilim büyüklükleri ve faz açıları (2.37) ve (2.38) denklemlerinden hesaplanır.
6. Bu işlem $\Delta P_i^{(j)}$ ve $\Delta Q_i^{(j)}$ kalanları aşağıda belirtilen bir hassasiyete kadar devam ettirilir:

$$|\Delta P_i^{(j)}| \leq \varepsilon \text{ ve } |\Delta Q_i^{(j)}| \leq \varepsilon \quad (2.39)$$

ε tolerans değerinin elde edilmesiyle yük akışı iterasyonu durdurulur. Sonuç olarak, bara gerilimleri ve faz açılarıyla, hatlardaki güç akış değerleri belirlenmiş olur.

3. KÜÇÜK İŞARET KARARLILIK ANALİZİ

Bu bölümde, akı sönümlü modelin lineer olmayan diferansiyel-cebirsal denklem takımları verildi. Temel lineerleştirme kuralını kullanarak, çok makinalı güç sistemleri başlangıç çalışma koşullarında lineer hale getirildi. Lineerleştirilmiş güç sisteminin durum denklemleri çıkartıldı ve sistemin tam çözümü Modal Analizi yöntemi kullanılarak elde edildi. Bununla birlikte Katılım Faktörü analizi ele alındı. Sistemin bir veya iki adet sıfır özdeğere sahip olması halinde sistemin küçük işaret kararlılık koşulları detaylı şekilde ele alındı. Bu bölümün çıktısı olarak, güç sistemlerinde küçük işaret kararlılık analizi yapabilecek MATLAB tabanlı genel bir program hazırlandı.

3.1 Statik Uyarmalı Akı Sönümlü Model

Bu kısımda, modelleme ve lineer olmayan zaman domenli simülasyonları için statik uyarmalı akı sönümlü model kullanıldı. Matematiksel model, makine ve uyarma dinamiğine ilişkin diferansiyel denklemler ile stator ve şebeke denklemlerine karşılık düşen cebirsal denklemlerden meydana gelmektedir. m makinalı ve n baralı statik uyarmalı çok makinalı güç sistemi için diferansiyel-cebirsal denklemler aşağıdaki gibidir.

3.1.1 Diferansiyel denklemler

Makine ve uyarmlara ilişkin diferansiyel denklemler aşağıdaki gibidir [45]:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_s (\omega_i - 1) = \omega_s \Delta\omega_i \quad (3.1)$$

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{P_{mi}}{M_i} - \frac{E'_{qi} i_{qi}}{M_i} - \frac{(x_{qi} - x'_{di}) i_{di} i_{qi}}{M_i} - \frac{D_i (\omega_i - 1)}{M_i} \quad (3.2)$$

$$\frac{dE'_{qi}}{dt} = -\frac{E'_{qi}}{T'_{doi}} - \frac{(x_{di} - x'_{di}) i_{di}}{T'_{doi}} + \frac{E_{fdi}}{T'_{doi}} \quad (3.3)$$

$$\frac{dE_{fdi}}{dt} = -\frac{E_{fdi}}{T_{Ai}} + \frac{K_{Ai}}{T_{Ai}} (V_{ref,i} - V_i) \quad (3.4)$$

burada $i=1,\dots,m$ generatör baraları için, $\omega_s = 2\pi f$ ve $M = 2H$ 'dir.

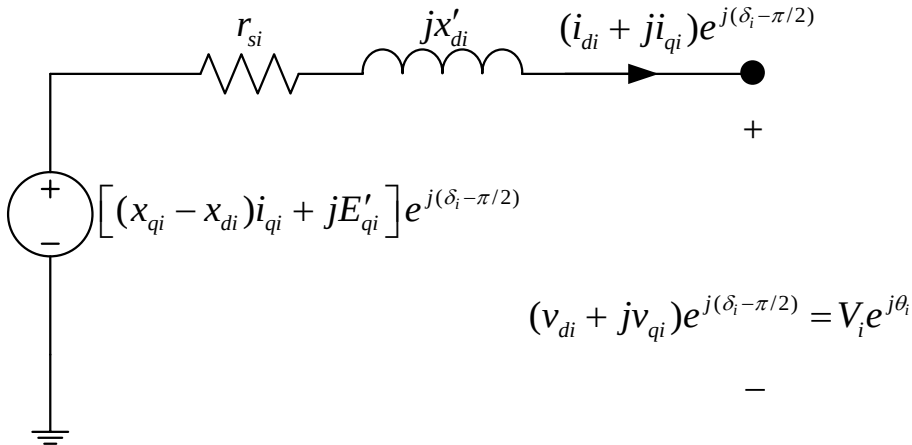
Yukarıdaki diferansiyel denklemlerde; δ rotor açısını, ω rotor hızını, ω_s senkron hızını, H eylemsizlik sabitini, P_m generatör giriş gücünü, X_d d-eksen senkron reaktansı, X'_d d-eksen geçici reaktansı, X_q q-eksen senkron reaktansı, E'_q X'_d gerisindeki iç gerilimi, D sönüm katsayısını, i_d d-eksen armatür akımını, i_q q-eksen armatür akımını, T'_{do} açık devre d-eksen zaman sabitini, E_{fd} uyarma sistemi gerilimini, V_{ref} referans gerilimi, K_A AVR kazanç sabitini, T_A AVR zaman sabitini ve V uç gerilimini göstermektedir.

3.1.2 Stator cebirsel denklemler

Stator cebirsel denklemler Şekil 3.1'de gösterilen dinamik eşdeğer devreden doğrudan bulunur ve $i=1,\dots,m$ generatör baraları için aşağıdaki gibi ifade edilebilir [45].

$$V_i \sin(\delta_i - \theta_i) + r_{si} i_{di} - x_{qi} i_{qi} = 0 \quad (3.5)$$

$$E'_{qi} - V_i \cos(\delta_i - \theta_i) - r_{si} i_{qi} - x'_{di} i_{di} = 0 \quad (3.6)$$



Şekil 3.1 : Senkron makina akı sönümlü model dinamik devresi.

3.1.3 Şebeke Denklemleri

Statik şebeke ve yüklerle beraber dinamik devre Şekil 3.2'de gösterilmiştir. n baralı şebeke denklemleri karmaşık formda yazılmıştır ve şebeke denklemleri generatör ve yük baraları için aşağıdaki gibidir [45]:

$i=1,\dots,m$ generatör baralar için

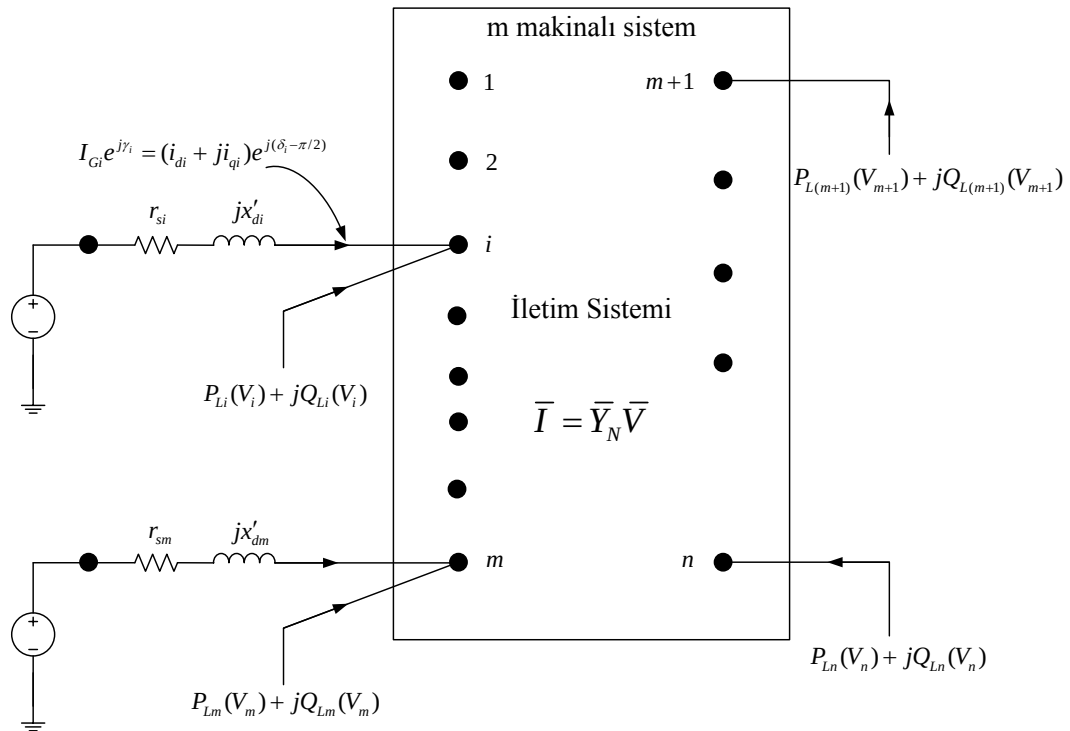
$$i_{di}V_i \sin(\delta_i - \theta_i) + i_{qi}V_i \cos(\delta_i - \theta_i) + P_{Li}(V_i) - \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) = 0 \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned}
& i_{di}V_i \cos(\delta_i - \theta_i) - i_{qi}V_i \sin(\delta_i - \theta_i) \\
& + Q_{Li}(V_i) - \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) = 0
\end{aligned} \tag{3.8}$$

$i = m+1, \dots, n$ yük baraları için

$$P_{Li}(V_i) - \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) = 0 \quad (3.9)$$

$$Q_{Li}(V_i) - \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) = 0 \quad (3.10)$$



Şekil 3.2: Enterkonnekte şebekeye bağlı senkron makina dinamik devresi.

3.2 Lineerleştirilmiş Küçük İşaret Modeli

Genel olarak, lineer olmayan durum uzayı denklem takımları aşağıdaki gibi verilsin [46-48];

$$\frac{d}{dt} X(t) = \dot{X}(t) = F(X(t), u(t), t) \quad (3.11)$$

$$Y(t) = G(X(t), u(t), t) \quad (3.12)$$

Yukarıdaki denklemler $U(t_0)$, $X(t_0)$ ve $Y(t_0)$ çalışma noktalarında lineerleştirilirse ve n durumlu, m girişli ve p çıkışlı lineerleştirilmiş sistemin matrisleri

$$A(t) = \left[\frac{\partial F}{\partial X} \right]_0 = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_0 \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (3.13)$$

$$B(t) = \left[\frac{\partial F}{\partial U} \right]_0 = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial u_1} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial u_m} \right|_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial u_1} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial u_m} \right|_0 \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (3.14)$$

$$C(t) = \left[\frac{\partial G}{\partial X} \right]_0 = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial g_1}{\partial x_1} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \right|_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \left. \frac{\partial g_p}{\partial x_1} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial g_p}{\partial x_n} \right|_0 \end{bmatrix}_{p \times n} \quad (3.15)$$

$$D(t) = \left[\frac{\partial G}{\partial U} \right]_0 = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial g_1}{\partial u_1} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial g_1}{\partial u_m} \right|_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \left. \frac{\partial g_p}{\partial u_1} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial g_p}{\partial u_m} \right|_0 \end{bmatrix}_{p \times m} \quad (3.16)$$

olarak yazılırsa, yeni lineerleştirilmiş sistemin durum denklemleri aşağıdaki gibi olur:

$$\frac{d}{dt} \Delta X(t) = A(t) \Delta X + B(t) \Delta U(t) \quad (3.17)$$

$$\Delta Y(t) = C(t) \Delta X + D(t) \Delta U(t) \quad (3.18)$$

Burada lineerleştirilmiş $\Delta U(t)$ giriş, $\Delta X(t)$ durum değişkenleri ve $\Delta Y(t)$ çıkış işaretleri aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\Delta U(t) = U(t) - U(t_0) \quad (3.19)$$

$$\Delta X(t) = X(t) - X(t_0) \quad (3.20)$$

$$\Delta Y(t) = Y(t) - Y(t_0) \quad (3.21)$$

3.3 Başlangıç Koşulları

Çok makinalı akı sönümlü modelde başlangıç koşullarını hesaplamak için aşağıdaki adımlar takip edilir [45]:

Adım 1: Yük akışından $I_{Gi} e^{j\gamma_i} = (P_{Gi} - jQ_{Gi}) / V_i e^{-j\theta_i}$ hesaplanır.

Adım 2: $\delta_i = \arctan(V_i e^{j\theta_i} + jX_{qi} I_{Gi} e^{j\gamma_i})$ olarak hesaplanır.

Adım 3: Denklem (3.1)'den $\omega_i = \omega_s$ olarak hesaplanır.

Adım 4: i_{di} ve i_{qi} , $(i_{di} + ji_{qi}) = I_{Gi} e^{j(\gamma_i - \delta_i + \pi/2)}$ dan hesaplanır.

Adım 5: Denklem (3.6)'dan E'_{qi} , $E'_{qi} = V_i \cos(\delta_i - \theta_i) + x'_{di} i_{di}$ olarak hesaplanır.

Adım 6: Denklem (3.3)'ten E_{fdi} , $E_{fdi} = E'_{qi} + (x_{di} - x'_{di}) i_{di}$ olarak hesaplanır.

Adım 7: Denklem (3.4)'ten V_{refi} , $V_{refi} = \frac{E_{fdi}}{K_{Ai}} + V_i$ olarak hesaplanır.

Adım 8: Denklem (3.2)'den P_{mi} , $P_{mi} = E'_{qi} i_{qi} + (x_{qi} - x'_{di}) i_{di} i_{qi}$ olarak hesaplanır.

3.4 Çok Makinalı Güç Sistemlerinin Lineerleştirilmesi

(3.1)-(3.10) denklemleri aşağıda açıklandığı gibi çalışma noktaları civarında analitik olarak lineerleştirilir. (3.1)-(3.4) diferansiyel denklemlerin lineer hale getirilmesi şöyledir [45,49]:

$$\frac{d\Delta\delta_i}{dt} = \omega_s \Delta\omega_i \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta\omega_i}{dt} = & \frac{1}{M_i} \Delta P_{mi} - \frac{i_{qi0}}{M_i} \Delta E'_{qi} - \frac{E'_{qi0}}{M_i} \Delta i_{qi} - \frac{(x_{qi} - x'_{di}) i_{di0}}{M_i} \Delta i_{qi} \\ & - \frac{(x_{qi} - x'_{di}) i_{qi0}}{M_i} \Delta i_{di} - \frac{D_i}{M_i} \Delta \omega_i \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\frac{d\Delta E'_{qi}}{dt} = -\frac{1}{T'_{doi}} \Delta E'_{qi} - \frac{(x_{di} - x'_{di})}{T'_{doi}} \Delta i_{di} + \frac{1}{T'_{doi}} \Delta E_{fdi} \quad (3.24)$$

$$\frac{d\Delta E_{fdi}}{dt} = -\frac{1}{T_{Ai}} \Delta E_{fdi} + \frac{K_{Ai}}{T_{Ai}} \Delta V_{ref,i} - \frac{K_{Ai}}{T_{Ai}} \Delta V_i \quad (3.25)$$

Lineer hale getirilmiş (3.22)-(3.25) diferansiyel denklemleri matris formatında yazarsak;

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta \omega_i \\ \Delta E'_{qi} \\ \Delta E_{fdi} \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} 0 & 2\pi f & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{D_i}{M_i} & -\frac{i_{qi0}}{M_i} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T'_{doi}} & \frac{1}{T'_{doi}} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{Ai}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta \omega_i \\ \Delta E'_{qi} \\ \Delta E_{fdi} \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{(x_{qi} - x'_{di}) i_{qi0}}{M_i} & -\frac{E'_{qi0} + (x_{qi} - x'_{di}) i_{di0}}{M_i} \\ -\frac{(x_{di} - x'_{di})}{T'_{doi}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{di} \\ \Delta i_{qi} \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_{Ai}}{T_{Ai}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{M_i} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{Ai}}{T_{Ai}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{mi} \\ \Delta V_{ref,i} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.26)$$

$\begin{bmatrix} \Delta i_{di} \\ \Delta i_{qi} \end{bmatrix} = \Delta I_{gi}$, $\begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} = \Delta V_{gi}$ ve $\begin{bmatrix} \Delta P_{mi} \\ \Delta V_{ref,i} \end{bmatrix} = \Delta u_i$ atamaları yapıp diferansiyel denklem

$i=1, \dots, m$ için yeniden yazılırsa;

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{A}_i \Delta \mathbf{x}_i + \mathbf{B}_{1i} \Delta \mathbf{I}_{gi} + \mathbf{B}_{2i} \Delta V_{gi} + \mathbf{E}_i \Delta u_i \quad (3.27)$$

olur, m makinalı sistem için, (3.27) denklemi matris formda ifade edilirse;

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_1 \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B}_1 \Delta \mathbf{I}_g + \mathbf{B}_2 \Delta \mathbf{V}_g + \mathbf{E} \Delta \mathbf{u} \quad (3.28)$$

elde edilir; burada, $\mathbf{A}_1$, $\mathbf{B}_1$, $\mathbf{B}_2$ ve $\mathbf{E}$ blok köşegen matrislerdir. Şimdi, (3.5) ve (3.6) stator cebirsel denklemlerini lineer hale getirilirse;

$$\begin{aligned} & \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \Delta V_i + V_{i0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \Delta \delta_i \\ & - V_{i0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \Delta \theta_i + r_{si} \Delta i_{di} - x_{qi} \Delta i_{qi} = 0 \end{aligned} \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} & \Delta E'_{qi} - \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \Delta V_i + V_{i0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \Delta \delta_i \\ & - V_{i0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \Delta \theta_i - r_{si} \Delta i_{qi} - x'_{di} \Delta i_{di} = 0 \end{aligned} \quad (3.30)$$

olur. (3.29) ve (3.30) denklemlerini $i = 1, \dots, m$ için matris formda yazarsak;

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} -V_{i0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) & 0 & 0 & 0 \\ V_{i0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta \theta_i \\ \Delta E'_{qi} \\ \Delta E_{fdi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -r_{si} & x_{qi} \\ -x'_{di} & -r_{si} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{di} \\ \Delta i_{qi} \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} V_{i0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) & -\sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \\ -V_{i0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) & -\cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} = 0 \end{aligned} \quad (3.31)$$

olur. (3.31) denklemini $i = 1, \dots, m$ için aşağıdaki gibi yeniden yazarsak;

$$0 = \mathbf{C}_{1i} \Delta \mathbf{x}_i + \mathbf{D}_{1i} \Delta \mathbf{I}_{gi} + \mathbf{D}_{2i} \Delta V_{gi} \quad (3.32)$$

olur. (3.32) denklemi matris nütasyonunda aşağıdaki gibi yazarsak;

$$\mathbf{0} = \mathbf{C}_1 \Delta \mathbf{x} + \mathbf{D}_1 \Delta \mathbf{I}_g + \mathbf{D}_2 \Delta \mathbf{V}_g \quad (3.33)$$

Burada, $\mathbf{C}_1$, $\mathbf{D}_1$ ve $\mathbf{D}_2$ blok köşegen matrislerdir. Generatör baralarına ilişkin (3.7) ve (3.8) şebeke denklemlerini lineer hale getirirsek, aşağıdaki ifadeleri elde ederiz.

$$\begin{aligned} & V_{i0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \Delta i_{di} + i_{di0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \Delta V_i + i_{di0} V_{i0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \Delta \delta_i \\ & - i_{di0} V_{i0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \Delta \theta_i + V_{i0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \Delta i_{qi} + i_{qi0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \Delta V_i \\ & - i_{qi0} V_{i0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \Delta \delta_i + i_{qi0} V_{i0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \Delta \theta_i + \frac{\partial \Delta P_{Li}(V_i)}{\partial V_i} \Delta V_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \left[\sum_{k=1}^n V_{k0} Y_{ik} \cos(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik}) \right] \Delta V_i - V_{i0} \left[\sum_{k=1}^n Y_{ik} \cos(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik}) \right] \Delta V_k \\
& + V_{i0} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n [V_{k0} Y_{ik} \sin(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik})] \Delta \theta_i - V_{i0} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n [V_{k0} Y_{ik} \sin(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik})] \Delta \theta_k = 0 \quad (3.34)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& V_{i0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \Delta i_{di} + i_{di0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \Delta V_i - i_{di0} V_{i0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \Delta \delta_i \\
& + i_{di0} V_{i0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \Delta \theta_i - V_{i0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \Delta i_{qi} - i_{qi0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \Delta V_i \\
& - i_{qi0} V_{i0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \Delta \delta_i + i_{qi0} V_{i0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \Delta \theta_i + \frac{\partial \Delta Q_{Li}(V_i)}{\partial V_i} \Delta V_i \\
& - \left[\sum_{k=1}^n V_{k0} Y_{ik} \sin(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik}) \right] \Delta V_i - V_{i0} \left[\sum_{k=1}^n Y_{ik} \sin(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik}) \right] \Delta V_k \\
& - V_{i0} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n [V_{k0} Y_{ik} \cos(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik})] \Delta \theta_i + V_{i0} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n [V_{k0} Y_{ik} \sin(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik})] \Delta \theta_k = 0 \quad (3.35)
\end{aligned}$$

(3.34) ve (3.35) denklemlerini matris formda yeniden yazarsak aşağıdaki ifadeleri elde ederiz;

$$\begin{aligned}
0 = & \begin{bmatrix} C_{21} & & \\ & \ddots & \\ & & C_{2m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{31} & & \\ & \ddots & \\ & & D_{3m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_{g1} \\ \vdots \\ \Delta I_{gm} \end{bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} D_{41,1} & \cdots & D_{41,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{4m,1} & \cdots & D_{4m,m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{g1} \\ \vdots \\ \Delta V_{gm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{51,m+1} & \cdots & D_{51,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{5m,m+1} & \cdots & D_{5m,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{lm+1} \\ \vdots \\ \Delta V_{ln} \end{bmatrix} \quad (3.36)
\end{aligned}$$

(3.34) ve (3.35) denklemlerinden faydalanarak, her generatör barası için ($i = 1, \dots, m$)

C_{2i} ve D_{3i} alt matrisleri açık şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$C_{2i} = \begin{bmatrix} i_{di0} V_{i0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) - i_{qi0} V_{i0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) & 0 & 0 & 0 \\ -i_{di0} V_{i0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) - i_{qi0} V_{i0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

$$D_{3i} = \begin{bmatrix} V_{i0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) & V_{i0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \\ V_{i0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) & -V_{i0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

(3.36) denkleminin C_{2i} ve D_{3i} alt matrisleri kolaylıkla belirlendi ve (3.36) denklemini matris nütasyonunda yazarsak;

$$\mathbf{0} = \mathbf{C}_2 \Delta \mathbf{x} + \mathbf{D}_3 \Delta \mathbf{I}_g + \mathbf{D}_4 \Delta \mathbf{V}_g + \mathbf{D}_5 \Delta \mathbf{V}_l \quad (3.39)$$

burada, $\Delta V_{\ell i} = \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix}$, dir ve generatör olmayan baralar için ($i = m+1, \dots, n$).

Not: C_2 ve D_3 blok köşegen matrisleri olmasına rağmen D_4 ve D_5 dolu (full) matristirler.

Yük baralarına ait (PQ baraları) (3.9) ve (3.10) şebeke denklemlerini lineer hale getirirsek, aşağıdaki ifadeleri elde ederiz.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \Delta P_{Li}(V_i)}{\partial V_i} \Delta V_i - \left[\sum_{k=1}^n V_{k0} Y_{ik} \cos(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik}) \right] \Delta V_i \\ & - V_{i0} \left[\sum_{k=1}^n Y_{ik} \cos(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik}) \right] \Delta V_k + V_{i0} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n [V_{k0} Y_{ik} \sin(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik})] \Delta \theta_i \\ & - V_{i0} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n [V_{k0} Y_{ik} \sin(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik})] \Delta \theta_k = 0 \end{aligned} \quad (3.40)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \Delta Q_{Li}(V_i)}{\partial V_i} \Delta V_i - \left[\sum_{k=1}^n V_{k0} Y_{ik} \sin(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik}) \right] \Delta V_i \\ & - V_{i0} \left[\sum_{k=1}^n Y_{ik} \sin(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik}) \right] \Delta V_k - V_{i0} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n [V_{k0} Y_{ik} \cos(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik})] \Delta \theta_i \\ & + V_{i0} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n [V_{k0} Y_{ik} \cos(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik})] \Delta \theta_k = 0 \end{aligned} \quad (3.41)$$

$i = m+1, \dots, n$ için (3.40) ve (3.41) denklemlerini matris formda yazarsak;

$$\begin{aligned} 0 = & \begin{bmatrix} D_{6m+1,1} & \cdots & D_{6m+1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{6n,1} & \cdots & D_{6n,m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{g1} \\ \vdots \\ \Delta V_{gm} \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} D_{7m+1,m+1} & \cdots & D_{7m+1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{7n,m+1} & \cdots & D_{7n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{lm+1} \\ \vdots \\ \Delta V_{ln} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.42)$$

Yine burada, (3.42) denkleminde çeşitli alt matrisler (3.40) ve (3.41) denklemlerinden ortaya çıkarılabilir. (3.42) denklemini kapalı biçimde yeniden yazarsak;

$$\mathbf{0} = \mathbf{D}_6 \Delta \mathbf{V}_g + \mathbf{D}_7 \Delta \mathbf{V}_l \quad (3.43)$$

burada D_6 ve D_7 dolu (full) matristirler.

*** D_4 , D_5 , D_6 ve D_7 dolu (full) matrislerinin en açık şekilde yazılması:

D_4 , D_5 , D_6 ve D_7 alt matrislerinden oluşan D_{4567} matrisi aşağıdaki gibi ifade edilsin;

$$D_{4567} = \begin{bmatrix} D_4 & D_5 \\ D_6 & D_7 \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

ve $A_{d,4567}$, $B_{d,4567}$, $C_{d,4567}$ ve $D_{d,4567}$ matrislerini de aşağıdaki gibi tanımlayalım.

$$A_{d,4567} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}, B_{d,4567} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix}$$

$$C_{d,4567} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} \text{ ve } D_{d,4567} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nn} \end{bmatrix}$$

D_4 , D_5 , D_6 ve D_7 matrislerini (3.36) ve (3.42) denklemlerinden yeniden yazıp ve $A_{d,4567}$, $B_{d,4567}$, $C_{d,4567}$ ve $D_{d,4567}$ matrislerinin elemanları cinsinden yeniden tanımlarsak;

$$D_4 = \begin{bmatrix} D_{41,1} & \cdots & D_{41,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{4m,1} & \cdots & D_{4m,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boxed{a_{11} \quad b_{11}} & \cdots & a_{1m} & b_{1m} \\ \boxed{c_{11} \quad d_{11}} & & c_{1m} & d_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & b_{m1} & \cdots & \boxed{a_{mm} \quad b_{mm}} \\ c_{m1} & d_{m1} & & \boxed{c_{mm} \quad d_{mm}} \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

$$D_5 = \begin{bmatrix} D_{51,m+1} & \cdots & D_{51,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{5m,m+1} & \cdots & D_{5m,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,m+1} & b_{1,m+1} & \cdots & a_{1,n} & b_{1,n} \\ c_{1,m+1} & d_{1,m+1} & & c_{1,n} & d_{1,n} \\ & \vdots & \ddots & & \vdots \\ a_{m,m+1} & b_{m,m+1} & \cdots & a_{m,n} & b_{m,n} \\ c_{m,m+1} & d_{m,m+1} & & c_{m,n} & d_{m,n} \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

$$D_6 = \begin{bmatrix} D_{6m+1,1} & \cdots & D_{6m+1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{6n,1} & \cdots & D_{6n,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{m+1,1} & b_{m+1,1} & \cdots & a_{m+1,m} & b_{m+1,m} \\ c_{m+1,1} & d_{m+1,1} & & c_{m+1,m} & d_{m+1,m} \\ & \vdots & \ddots & & \vdots \\ a_{n1} & b_{n1} & \cdots & \boxed{a_{nm} & b_{nm}} \\ c_{n1} & d_{n1} & & \boxed{c_{nm} & d_{nm}} \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

$$D_7 = \begin{bmatrix} D_{7m+1,m+1} & \cdots & D_{7m+1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{7n,m+1} & \cdots & D_{7n,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boxed{a_{m+1,m+1} & b_{m+1,m+1}} & \cdots & a_{m+1,n} & b_{m+1,n} \\ \boxed{c_{m+1,m+1} & d_{m+1,m+1}} & & c_{m+1,n} & d_{m+1,n} \\ & \vdots & \ddots & & \vdots \\ a_{n,m+1} & b_{n,m+1} & \cdots & \boxed{a_{nn} & b_{nn}} \\ c_{n,m+1} & d_{n,m+1} & & \boxed{c_{nn} & d_{nn}} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

$A_{d,4567}$ matrisinin köşegen ve köşegen olmayan elemanları

$$a_{ii} = \left\{ \begin{array}{ll} -i_{di0} V_{i0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) + i_{qi0} V_{i0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) \\ + V_{i0} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n [V_{k0} Y_{ik} \sin(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik})] & i = 1, \dots, m \\ V_{i0} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n [V_{k0} Y_{ik} \sin(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik})] & i = m+1, \dots, n \end{array} \right\} \quad (3.49)$$

$$a_{ij} = -V_{i0} V_{k0} Y_{ik} \sin(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik}) \quad i = 1, \dots, n \quad (3.50)$$

$B_{d,4567}$ matrisinin köşegen ve köşegen olmayan elemanları

$$b_{ii} = \left\{ \begin{array}{ll} i_{di0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) + i_{qi0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) + \frac{\partial \Delta P_{Li}(V_i)}{\partial V_i} \\ - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n [V_{k0} Y_{ik} \cos(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik})] - 2V_{i0} Y_{ii} \cos(\alpha_{ii}) & i = 1, \dots, m \\ \frac{\partial \Delta P_{Li}(V_i)}{\partial V_i} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n [V_{k0} Y_{ik} \cos(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik})] - 2V_{i0} Y_{ii} \cos(\alpha_{ii}) & i = m+1, \dots, n \end{array} \right\} \quad (3.51)$$

$$b_{ij} = -V_{i0}Y_{ik} \cos(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik}) \quad i = 1, \dots, n \quad (3.52)$$

$C_{d,4567}$ matrisinin köşegen ve köşegen olmayan elemanları

$$c_{ii} = \left\{ \begin{array}{ll} i_{di0}V_{i0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) + i_{qi0}V_{i0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) & i = 1, \dots, m \\ -V_{i0} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n [V_{k0}Y_{ik} \cos(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik})] & \\ -V_{i0} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n [V_{k0}Y_{ik} \cos(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik})] & i = m+1, \dots, n \end{array} \right\} \quad (3.53)$$

$$c_{ij} = V_{i0}V_{k0}Y_{ik} \cos(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik}) \quad i = 1, \dots, n \quad (3.54)$$

$D_{d,4567}$ matrisinin köşegen ve köşegen olmayan elemanları

$$d_{ii} = \left\{ \begin{array}{ll} i_{di0} \cos(\delta_{i0} - \theta_{i0}) - i_{qi0} \sin(\delta_{i0} - \theta_{i0}) + \frac{\partial \Delta Q_{Li}(V_i)}{\partial V_i} & i = 1, \dots, m \\ -\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n [V_{k0}Y_{ik} \sin(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik})] + 2V_{i0}Y_{ii} \sin(\alpha_{ii}) & \\ \frac{\partial \Delta Q_{Li}(V_i)}{\partial V_i} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n [V_{k0}Y_{ik} \sin(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik})] + 2V_{i0}Y_{ii} \sin(\alpha_{ii}) & i = m+1, \dots, n \end{array} \right\} \quad (3.55)$$

$$d_{ij} = -V_{i0}Y_{ik} \sin(\theta_{i0} - \theta_{k0} - \alpha_{ik}) \quad i = 1, \dots, n \quad (3.56)$$

(3.28), (3.33), (3.39), ve (3.43) denklemlerini birlikte yeniden yazarsak;

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_1 \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B}_1 \Delta \mathbf{I}_g + \mathbf{B}_2 \Delta \mathbf{V}_g + \mathbf{E}_1 \Delta \mathbf{u} \quad (3.57)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{C}_1 \Delta \mathbf{x} + \mathbf{D}_1 \Delta \mathbf{I}_g + \mathbf{D}_2 \Delta \mathbf{V}_g \quad (3.58)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{C}_2 \Delta \mathbf{x} + \mathbf{D}_3 \Delta \mathbf{I}_g + \mathbf{D}_4 \Delta \mathbf{V}_g + \mathbf{D}_5 \Delta \mathbf{V}_1 \quad (3.59)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{D}_6 \Delta \mathbf{V}_g + \mathbf{D}_7 \Delta \mathbf{V}_1 \quad (3.60)$$

Burada, m makinalı bir sistem için; $\mathbf{A}_1$ matrisinin mertebesi $4m \times 4m$; $\mathbf{B}_1$, $\mathbf{B}_2$ ve $\mathbf{E}_1$ matrislerinin mertebeleri $4m \times 2m$; $\mathbf{C}_1$ ve $\mathbf{C}_2$ matrislerinin mertebeleri $2m \times 4m$; $\mathbf{D}_1$, $\mathbf{D}_2$, $\mathbf{D}_3$ ve $\mathbf{D}_4$ matrislerinin mertebeleri $2m \times 2m$; $\mathbf{D}_5$ matrisinin mertebesi

$2m \times 2(n-m)$; D_6 matrisinin mertebesi $2(n-m) \times 2m$; ve D_7 matrisinin mertebesi $2(n-m) \times 2(n-m)$ 'dir.

Aynı zamanda x_i , I_g , V_g , V_ℓ ve u vektörel değişkenler;

$$x_i = \begin{bmatrix} \delta_i & \omega_i & E'_{qi} & E_{fdi} \end{bmatrix}^T \quad (3.61)$$

$$I_g = \begin{bmatrix} i_{d1} & i_{q1} & \cdots & \cdots & i_{dm} & i_{qm} \end{bmatrix}^T \quad (3.62)$$

$$V_g = \begin{bmatrix} \theta_1 & V_1 & \cdots & \cdots & \theta_m & V_m \end{bmatrix}^T \quad (3.63)$$

$$V_\ell = \begin{bmatrix} \theta_{m+1} & V_{m+1} & \cdots & \cdots & \theta_n & V_n \end{bmatrix}^T \quad (3.64)$$

$$u = \begin{bmatrix} P_{m1} & V_{ref1} & \cdots & \cdots & P_{mi} & V_{refi} \end{bmatrix}^T \quad (3.65)$$

Buna çok makinalı güç sistemlerinde, lineer hale getirilmiş diferansiyel cebirsel denklem modeli denir. Bu model kolaylıkla güç sistemi kararlı kılıcı (PSS) dinamikleri eklenebilir. Yukarıdaki modelde ΔI_g bizi ilgilendirmedeği için (3.58) denklemini kullanarak, (3.57) ve (3.59) denklemlerinden yok edilebilir. Böylece, (3.58) denkleminde;

$$\Delta \mathbf{I}_g = -\mathbf{D}_1^{-1} \mathbf{C}_1 \Delta \mathbf{x} - \mathbf{D}_1^{-1} \mathbf{D}_2 \Delta \mathbf{V}_g \quad (3.66)$$

(3.66) denklemindeki ifadeyi (3.59) denkleminde yerine koyarsak;

$$\mathbf{0} = \mathbf{C}_2 \Delta \mathbf{x} + \mathbf{D}_3 \left(-\mathbf{D}_1^{-1} \mathbf{C}_1 \Delta \mathbf{x} - \mathbf{D}_1^{-1} \mathbf{D}_2 \Delta \mathbf{V}_g \right) + \mathbf{D}_4 \Delta \mathbf{V}_g + \mathbf{D}_5 \Delta \mathbf{V}_l \quad (3.67)$$

(3.67) denklemi yeniden düzenlenirse;

$$\mathbf{0} = \left(\mathbf{C}_2 - \mathbf{D}_3 \mathbf{D}_1^{-1} \mathbf{C}_1 \right) \Delta \mathbf{x} + \left(\mathbf{D}_4 - \mathbf{D}_3 \mathbf{D}_1^{-1} \mathbf{D}_2 \right) \Delta \mathbf{V}_g + \mathbf{D}_5 \Delta \mathbf{V}_l \quad (3.68)$$

$\mathbf{K}_1 = \left(\mathbf{D}_4 - \mathbf{D}_3 \mathbf{D}_1^{-1} \mathbf{D}_2 \right)$ ve $\mathbf{K}_2 = \left(\mathbf{C}_2 - \mathbf{D}_3 \mathbf{D}_1^{-1} \mathbf{C}_1 \right)$ ataması yapılırsa; (3.68) denklemi artık aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\mathbf{0} = \mathbf{K}_2 \Delta \mathbf{x} + \mathbf{K}_1 \Delta \mathbf{V}_g + \mathbf{D}_5 \Delta \mathbf{V}_l \quad (3.69)$$

Eğer (3.57) denklemindeki $\Delta \mathbf{I}_g$ 'yi yok etmek için (3.66) denklemindeki ifade yerine yerleştirilirse, yeni tüm diferansiyel cebirsel model aşağıdaki gibi verilebilir;

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \left(\mathbf{A}_1 - \mathbf{B}_1 \mathbf{D}_1^{-1} \mathbf{C}_1 \right) \Delta \mathbf{x} + \left(\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1 \mathbf{D}_1^{-1} \mathbf{D}_2 \right) \Delta \mathbf{V}_g + \mathbf{E}_1 \Delta \mathbf{u} \quad (3.70)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{K}_2\Delta\mathbf{x} + \mathbf{K}_1\Delta\mathbf{V}_g + \mathbf{D}_5\Delta\mathbf{V}_1 \quad (3.71)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{D}_6\Delta\mathbf{V}_g + \mathbf{D}_7\Delta\mathbf{V}_1 \quad (3.72)$$

(3.72) denklemini kullanarak (3.71) denklemindeki $\Delta\mathbf{V}_1$ yok edilebilir. Böylece (3.72) denkleminde,

$$\Delta\mathbf{V}_1 = -\mathbf{D}_7^{-1}\mathbf{D}_6\Delta\mathbf{V}_g \quad (3.73)$$

Bu ifadeyi (3.71) denkleminde yerine koyarsak, (3.71) denklemindeki $\Delta\mathbf{V}_1$ 'yi yok ederiz.

$$\mathbf{0} = \mathbf{K}_2\Delta\mathbf{x} + \mathbf{K}_1\Delta\mathbf{V}_g - \mathbf{D}_5\mathbf{D}_7^{-1}\mathbf{D}_6\Delta\mathbf{V}_g \quad (3.74)$$

(3.74) denklemini yeniden düzenleyip yazarsak,

$$\mathbf{0} = \mathbf{K}_2\Delta\mathbf{x} + (\mathbf{K}_1 - \mathbf{D}_5\mathbf{D}_7^{-1}\mathbf{D}_6)\Delta\mathbf{V}_g \quad (3.75)$$

(3.75) denkleminde $\Delta\mathbf{V}_g$ 'yi aşağıdaki gibi buluruz,

$$\Delta\mathbf{V}_g = -(\mathbf{K}_1 - \mathbf{D}_5\mathbf{D}_7^{-1}\mathbf{D}_6)^{-1} \mathbf{K}_2\Delta\mathbf{x} \quad (3.76)$$

$\mathbf{K}_3 = (\mathbf{D}_5\mathbf{D}_7^{-1}\mathbf{D}_6 - \mathbf{K}_1)^{-1}$ ataması yaparsak, $\Delta\mathbf{V}_g$ artık aşağıdaki gibi ifade edilir,

$$\Delta\mathbf{V}_g = \mathbf{K}_3\mathbf{K}_2\Delta\mathbf{x} \quad (3.77)$$

(3.77) denklemindeki $\Delta\mathbf{V}_g$ yerine, (3.77) denklemindeki ifade yazılırsa,

$$\Delta\dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}_1 - \mathbf{B}_1\mathbf{D}_1^{-1}\mathbf{C}_1)\Delta\mathbf{x} + (\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1\mathbf{D}_1^{-1}\mathbf{D}_2)\mathbf{K}_3\mathbf{K}_2\Delta\mathbf{x} + \mathbf{E}_1\Delta\mathbf{u} \quad (3.78)$$

(3.78) denklemini düzenlenip yeniden yazılırsa yeni diferansiyel model aşağıdaki gibi olur,

$$\Delta\dot{\mathbf{x}} = \left[\mathbf{A}_1 - \mathbf{B}_1\mathbf{D}_1^{-1}\mathbf{C}_1 + (\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1\mathbf{D}_1^{-1}\mathbf{D}_2)\mathbf{K}_3\mathbf{K}_2 \right] \Delta\mathbf{x} + \mathbf{E}_1\Delta\mathbf{u} \quad (3.79)$$

$\mathbf{A}_{\text{sys}} = \left[\mathbf{A}_1 - \mathbf{B}_1\mathbf{D}_1^{-1}\mathbf{C}_1 + (\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1\mathbf{D}_1^{-1}\mathbf{D}_2)\mathbf{K}_3\mathbf{K}_2 \right]$ ataması yapılırsa, lineerleştirilmiş sistem modeli aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_{\text{sys}}\Delta\mathbf{x} + \mathbf{E}\Delta\mathbf{u} \quad (3.80)$$

(3.80) denklemindeki A_{sys} sistem matrisidir ve sistem: sabit katsayılı lineer (zamanla değişmeyen) sürekli zamanlı homojen olmayan sistem olarak tanımlanır. Eğer giriş işareti olan $\Delta u = 0$ olursa sistem homojen olur. İlerideki kısımlarda, bu sistemin matematiksel olarak çözüm tekniği detaylı olarak ele alınacaktır.

3.5 Sabit Katsayılı Homojen/Homojen Olmayan Birinci Dereceden Diferansiyel Denklemlerin Çözümü

m girişli, n durumlu ve p çıkışlı lineer sistemde durum ve çıkış denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir [48];

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t)\end{aligned}\tag{3.81}$$

Benzer şekilde lineerleştirilmiş sistem için:

$$\begin{aligned}\Delta\dot{x}(t) &= A\Delta x(t) + B\Delta u(t) \\ \Delta y(t) &= C\Delta x(t) + D\Delta u(t)\end{aligned}\tag{3.82}$$

Durum denklemlerin çözümü için literatürde modal analiz (köşegenleştirme veya kanonik form), Laplas dönüşüm metodu, Cayley-Hamilton metodu gibi çok sayıda yöntem bulunmasına rağmen, güç sistemlerinin küçük işaret kararlılık analizinde daha yaygın olarak modal analiz yöntemi kullanılmaktadır.

3.5.1 Modal analiz yöntemi

3.5.1.1 Homojen çözüm

$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$ durum denklemi için giriş işareti $u = 0$ alınır ve bu çözüme homojen çözüm denilmektedir [50-52].

$$\dot{x}(t) = Ax(t)\tag{3.83}$$

(3.83) denklemini değişkenlerine ayrılırsa;

$$\int_{x(t_0)}^{x(t)} \frac{dx}{x} = \int_{t_0}^t A dt\tag{3.84}$$

$$\ln x - \ln x_0 = \ln\left(\frac{x}{x_0}\right) = A(t - t_0)\tag{3.85}$$

Buradan homojen çözüm bulunursa;

$$x_h(t) = e^{A(t-t_0)} x_0 \quad (3.86)$$

Burada; $x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix}$ durum değişkenleri ve $x_0 = \begin{bmatrix} x_1(t_0) \\ x_2(t_0) \\ \vdots \\ x_n(t_0) \end{bmatrix}$ başlangıç koşullarıdır.

Bununla birlikte, $\dot{x}(t) = Ax(t)$ için $x(t) = Ve^{\lambda(t-t_0)}$ şeklinde bir çözüm bulunmalıdır. $x(t) = Ve^{\lambda(t-t_0)}$ (3.83) denklemde yerine yazılırsa;

$$\lambda Ve^{\lambda(t-t_0)} = AVe^{\lambda(t-t_0)} \quad (3.87)$$

Yukarıdaki denklem sade hale getirilse;

$$AV = \lambda V \quad (3.88)$$

$$(A - \lambda I)V = 0 \quad (3.89)$$

Burada I $n \times n$ 'lik birim matrisdir ve $V_i = [v_{i1} \ v_{i2} \ \dots \ v_{in}]^T$ vektörel sabit olup değeri sıfır olmaz. (3.89) denklemi için tek koşul $(A - \lambda I)$ 'nin determinantının sıfır olması gereklidir, yani;

$$\det(A - \lambda I) = |A - \lambda I| = 0 \quad (3.90)$$

Çözüm kümesi $\lambda: \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ “n” tane özdeğer mevcut olup ve $x(t)$ bunların lineer bağımsız çözümlerinden oluşmaktadır.

$$x(t) = c_1 V_1 e^{\lambda_1(t-t_0)} + c_2 V_2 e^{\lambda_2(t-t_0)} + \dots + c_n V_n e^{\lambda_n(t-t_0)} \quad (3.91)$$

(3.91) denklemi kapalı formda yazılırsa;

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i V_i e^{\lambda_i(t-t_0)} \quad (3.92)$$

Burada c_i ve V_i sırasıyla i . özdeğere ait sabit katsayı ve o özdeğere karşılık düşen (sağ) özvektördür.

Not: $n \times n$ 'lik A matrisi birbirinden lineer bağımsız n adet $V_1, V_2, \dots, V_n$ özvektörden oluşsun, böylece n adet özvektör sütununa sahip M model matrisini aşağıdaki gibi yazabiliriz;

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{21} & \cdots & v_{n1} \\ v_{12} & v_{22} & \cdots & v_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{1n} & v_{2n} & \cdots & v_{nn} \end{bmatrix} = [V_1 \mid V_2 \mid \cdots \mid V_n] \quad (3.93)$$

ve

$$\mathbf{M}^{-1} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{21} & \cdots & w_{n1} \\ w_{12} & w_{22} & \cdots & w_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{1n} & w_{2n} & \cdots & w_{nn} \end{bmatrix} = [W_1 \mid W_2 \mid \cdots \mid W_n] \quad (3.94)$$

Köşegen elemanları $\mathbf{A}$ matrisinin n adet özdeğerlerinden oluşan $\mathbf{\Lambda}$ matrisini köşegen (diagonal) matris olarak aşağıdaki gibi tanımlayalım;

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_n \end{bmatrix} \quad (3.95)$$

$\mathbf{M}$ modal matrisini $\mathbf{A}$ ile çarparsak;

$$\begin{aligned} \mathbf{AM} &= \mathbf{A}[V_1 \mid V_2 \mid \cdots \mid V_n] = [\mathbf{AV}_1 \mid \mathbf{AV}_2 \mid \cdots \mid \mathbf{AV}_n] \\ &= [\lambda_1 V_1 \mid \lambda_2 V_2 \mid \cdots \mid \lambda_n V_n] \end{aligned} \quad (3.96)$$

olur. Buradan $\mathbf{AM} = \mathbf{M}\mathbf{\Lambda}$ eşitliği ortaya çıkar ve bu eşitlikten $\mathbf{A}$ ve $\mathbf{\Lambda}$ matrisleri aşağıdaki gibi çıkar;

$$\mathbf{A} = \mathbf{M}\mathbf{\Lambda}\mathbf{M}^{-1} \quad (3.97)$$

$$\mathbf{\Lambda} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{AM} \quad (3.98)$$

(3.92) denklemini en açık formda yeniden yazılırsa;

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} = c_1 \begin{bmatrix} v_{11} \\ v_{12} \\ \vdots \\ v_{1n} \end{bmatrix} e^{\lambda_1(t-t_0)} + c_2 \begin{bmatrix} v_{21} \\ v_{22} \\ \vdots \\ v_{2n} \end{bmatrix} e^{\lambda_2(t-t_0)} + \cdots + c_n \begin{bmatrix} v_{n1} \\ v_{n2} \\ \vdots \\ v_{nn} \end{bmatrix} e^{\lambda_n(t-t_0)}$$

$$\begin{aligned}
&= \begin{bmatrix} v_{11} & v_{21} & \cdots & v_{n1} \\ v_{12} & v_{22} & \cdots & v_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{1n} & v_{2n} & \cdots & v_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{\lambda_1(t-t_0)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{\lambda_2(t-t_0)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{\lambda_n(t-t_0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} \\
&= \mathbf{M}e^{\mathbf{A}(t-t_0)}\mathbf{C} \tag{3.99}
\end{aligned}$$

(3.99) denklemde $t = t_0$ için, $\mathbf{C} = [c_1 \ c_2 \ \cdots \ c_n]^T = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{x}(t_0)$ şeklinde bulunur ve bu ifade (3.99) denkleminde yerine yazılıp (3.86) ile eşitlenirse;

$$\mathbf{x}_h(t) = \mathbf{M}e^{\mathbf{A}(t-t_0)}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{x}(t_0) = e^{\mathbf{A}(t-t_0)}\mathbf{x}_0 \tag{3.100}$$

Buradan aynı zamanda aşağıdaki eşitlik de ortaya çıkar.

$$e^{\mathbf{A}(t-t_0)} = \mathbf{M}e^{\mathbf{A}(t-t_0)}\mathbf{M}^{-1} \tag{3.101}$$

3.5.1.2 Homojen olmayan sistem çözümü

$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t)$ durum denklemi için $\Delta\mathbf{x}(t_0) = 0$ (sıfır başlangıç koşulu) alınır ve bu çözüme homojen olmayan çözüm denilmektedir [50-52]. $\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t)$ denkleminin her iki tarafı $e^{-\mathbf{A}t}$ ile çarpılıp denklem yeniden düzenlenirse;

$$e^{-\mathbf{A}t}(\dot{\mathbf{x}} - \mathbf{A}\mathbf{x}) = e^{-\mathbf{A}t}\mathbf{B}u(t) \tag{3.102}$$

$$\frac{d}{dt}(e^{-\mathbf{A}t}\mathbf{x}) = e^{-\mathbf{A}t}\mathbf{B}u(t) \tag{3.103}$$

(3.103) denkleminin t_0 'dan t 'ye integrali alınırsa

$$e^{-\mathbf{A}t}\mathbf{x}(t) - e^{-\mathbf{A}t_0}\mathbf{x}_0 = \int_{t_0}^t e^{-\mathbf{A}\tau}\mathbf{B}u(\tau)d\tau \tag{3.104}$$

Buradan genel (tam) çözüm bulunursa

$$\mathbf{x}(t) = e^{\mathbf{A}(t-t_0)}\mathbf{x}_0 + \int_{t_0}^t e^{\mathbf{A}(t-\tau)}\mathbf{B}u(\tau)d\tau = \mathbf{x}_h + \mathbf{x}_p \tag{3.105}$$

= homojen çözüm + özel çözüm

(3.105) denklemindeki ilk parça homojen çözümü ve ikinci parça özel çözümü oluşturmaktadır.

Homojen çözüm: sıfır olmayan başlangıç koşulu ve sıfır giriş çözümü

Özel çözüm: sıfır başlangıç koşulu ve sıfır olmayan giriş çözümü

(3.101) denkleminde faydalananarak (3.105) denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$x(t) = \mathbf{M}e^{\Lambda(t-t_0)}\mathbf{M}^{-1}x_0 + \int_{t_0}^t \mathbf{M}e^{\Lambda(t-\tau)}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}u(\tau)d\tau = x_h + x_p \quad (3.106)$$

Benzer şekilde lineerleştirilmiş sistem için bu ifade aşağıdaki gibi olur.

$$\Delta x(t) = \mathbf{M}e^{\Lambda(t-t_0)}\mathbf{M}^{-1}\Delta x(t_0) + \int_{t_0}^t \mathbf{M}e^{\Lambda(t-\tau)}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}\Delta u(\tau)d\tau = \Delta x_h + \Delta x_p \quad (3.107)$$

3.5.2 Özel durum analizi

Sistemin $\lambda_1 = 0$ veya $\lambda_{1,2} = 0$ özdeğerlerine sahip olması halinde homojen ve özel çözümlerinin bulunması ve $x(t) = x_h + x_p$ sistemin genel çözümü olmak üzere, çizelgede verilen dört farklı durum için sistemin kararlılık analizi analitik olarak incelenecektir.

Çizelge 3.1 : Özel durum analizi.

Durum 1	$\lambda_1 = 0$ ve $\text{Re}[\lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n] < 0$ için	x_h homojen çözüme karşılık düşen durum
Durum 2	$\lambda_1 = 0$ ve $\text{Re}[\lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n] < 0$ için	x_p özel çözüme karşılık düşen durum
Durum 3	$\lambda_{1,2} = 0$ ve $\text{Re}[\lambda_3, \lambda_4, \dots, \lambda_n] < 0$ için	x_h homojen çözüme karşılık düşen durum
Durum 4	$\lambda_{1,2} = 0$ ve $\text{Re}[\lambda_3, \lambda_4, \dots, \lambda_n] < 0$ için	x_p özel çözüme karşılık düşen durum

Durum 1: Sistemin $\lambda_1 = 0$ özdeğere sahip olması halinde $x_h(t)$ homojen çözümü:

$$x_h(t) = \begin{bmatrix} x_{1h}(t) \\ x_{2h}(t) \\ \vdots \\ x_{nh}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{M}e^{\Lambda(t-t_0)}\mathbf{M}^{-1}x(t_0) \quad (3.108)$$

(3.108) denkleminde gerekli işlemler yapıldıktan sonra homojen çözüm;

$$x_h(t) = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n v_{i1} w_{1i} e^{\lambda_{i_1}(t-t_0)} & \sum_{i=1}^n v_{i1} w_{2i} e^{\lambda_{i_1}(t-t_0)} & \dots & \sum_{i=1}^n v_{i1} w_{ni} e^{\lambda_{i_1}(t-t_0)} \\ \sum_{i=1}^n v_{i2} w_{1i} e^{\lambda_{i_2}(t-t_0)} & \sum_{i=1}^n v_{i2} w_{2i} e^{\lambda_{i_2}(t-t_0)} & \dots & \sum_{i=1}^n v_{i2} w_{ni} e^{\lambda_{i_2}(t-t_0)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n v_{in} w_{1i} e^{\lambda_{i_n}(t-t_0)} & \sum_{i=1}^n v_{in} w_{2i} e^{\lambda_{i_n}(t-t_0)} & \dots & \sum_{i=1}^n v_{in} w_{ni} e^{\lambda_{i_n}(t-t_0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t_0) \\ x_2(t_0) \\ \vdots \\ x_n(t_0) \end{bmatrix} \quad (3.109)$$

Not: Köşegen elemanlar bize *katılım faktörü* (participation factor) ifadesini vermektedir ve ilerde detaylı açıklanacaktır.

Buradan her bir durum için sistem durum çözümü yazılırsa;

$$\begin{aligned} x_{1h}(t) &= \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n x_k(t_0) v_{i1} w_{ki} e^{\lambda_{i_1}(t-t_0)} \\ x_{2h}(t) &= \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n x_k(t_0) v_{i2} w_{ki} e^{\lambda_{i_2}(t-t_0)} \\ &\vdots \\ x_{nh}(t) &= \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n x_k(t_0) v_{in} w_{ki} e^{\lambda_{i_n}(t-t_0)} \end{aligned} \quad (3.110)$$

Buradan tüm durumlar için homojen çözüm vektörel şekilde yazılırsa;

$$x_h(t) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n x_k(t_0) V_i w_{ki} e^{\lambda_{i_1}(t-t_0)} \quad (3.111)$$

şeklinde ifade edilebilir ve (3.111) denkleminde $\lambda_1 = 0$ özdeğeri için homojen çözüm cevabı ayrı yazılırsa;

$$x_h(t) = \sum_{k=1}^n x_k(t_0) V_1 w_{k1} + \sum_{k=1}^n \sum_{i=2}^n x_k(t_0) V_i w_{ki} e^{\lambda_{i_1}(t-t_0)} \quad (3.112)$$

(3.112) denkleminin ilk teriminde $\sum_{k=1}^n x_k(t_0) V_1 w_{k1} = \text{sabit}$ ve ikinci teriminde

$\lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \sum_{i=2}^n x_k(t_0) V_i w_{ki} e^{\lambda_{i_1}(t-t_0)} = 0$ 'dır. Sonuç olarak bu özel durum için sistem kararlıdır denir.

Durum 2: Sistemin $\lambda_1 = 0$ özdeğere sahip olması halinde $x_p(t)$ özel çözümü:

$$x_p(t) = \begin{bmatrix} x_{1p}(t) \\ x_{2p}(t) \\ \vdots \\ x_{np}(t) \end{bmatrix} = \int_{t_0}^t \mathbf{M} e^{\mathbf{A}(t-\tau)} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{B} u(\tau) d\tau \quad (3.113)$$

(3.113) denkleminde $Bu(\tau) = [b_1 u_1 \quad b_2 u_2 \quad \cdots \quad b_n u_n]^T$ yazılırsa

$$x_p(t) = \int_{t_0}^t \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n v_{i1} w_{1i} e^{\lambda_{i_1}(t-\tau)} & \sum_{i=1}^n v_{i1} w_{2i} e^{\lambda_{i_1}(t-\tau)} & \cdots & \sum_{i=1}^n v_{i1} w_{ni} e^{\lambda_{i_1}(t-\tau)} \\ \sum_{i=1}^n v_{i2} w_{1i} e^{\lambda_{i_2}(t-\tau)} & \sum_{i=1}^n v_{i2} w_{2i} e^{\lambda_{i_2}(t-\tau)} & \cdots & \sum_{i=1}^n v_{i2} w_{ni} e^{\lambda_{i_2}(t-\tau)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n v_{in} w_{1i} e^{\lambda_{i_n}(t-\tau)} & \sum_{i=1}^n v_{in} w_{2i} e^{\lambda_{i_n}(t-\tau)} & \cdots & \sum_{i=1}^n v_{in} w_{ni} e^{\lambda_{i_n}(t-\tau)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 u_1 \\ b_2 u_2 \\ \vdots \\ b_n u_n \end{bmatrix} d\tau \quad (3.114)$$

Buradan her bir durum için sistemin özel çözümü yazılırsa;

$$\begin{aligned} x_{1p}(t) &= \int_{t_0}^t \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n b_k u_k v_{i1} w_{ki} e^{\lambda_{i_1}(t-\tau)} d\tau \\ x_{2p}(t) &= \int_{t_0}^t \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n b_k u_k v_{i2} w_{ki} e^{\lambda_{i_2}(t-\tau)} d\tau \\ &\vdots \\ x_{np}(t) &= \int_{t_0}^t \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n b_k u_k v_{in} w_{ki} e^{\lambda_{i_n}(t-\tau)} d\tau \end{aligned} \quad (3.115)$$

Buradan tüm durumlar için özel çözüm vektörel şekilde yazılırsa;

$$x_p(t) = \int_{t_0}^t \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n b_k u_k V_i w_{ki} e^{\lambda_{i_1}(t-\tau)} d\tau \quad (3.116)$$

şeklinde ifade edilebilir ve (3.116) denkleminde $\lambda_1 = 0$ özdeğeri için özel çözüm cevabı ayrı yazılırsa;

$$x_p(t) = \int_{t_0}^t \sum_{k=1}^n b_k u_k V_1 w_{k1} d\tau + \int_{t_0}^t \sum_{k=1}^n \sum_{i=2}^n b_k u_k V_i w_{ki} e^{\lambda_{i_1}(t-\tau)} d\tau \quad (3.117)$$

(3.117) denkleminin ilk parçası olan $\int_{t_0}^t \sum_{k=1}^n b_k u_k V_1 w_{k1} d\tau$ sadece t 'li terimler içerir ve

ikinci parçası olan $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_{t_0}^t \sum_{k=1}^n \sum_{i=2}^n b_k u_k V_i w_{ki} e^{\lambda_i(t-\tau)} d\tau = 0$ 'dır. Sonuç olarak $x_p(t)$ ifadesi

t 'li terimler içerdiği için sistem kararsızdır.

Durum 3: Sistemin $\lambda_{1,2} = 0$ özdeğerlerine sahip olması halinde $x_h(t)$ homojen çözümü:

* **rank**($\mathbf{A} - \lambda_i \mathbf{I}$) = **rank**($\mathbf{A}$) = $n - 2$ ise, lineer bağımsız özvektör sayısı 2 olması durumunda, $\lambda_{1,2} = 0$ için aynen Durum 1'deki şartlar geçerlidir.

** **rank**($\mathbf{A}$) = $n - 1$ yani, lineer bağımsız özvektör sayısı 1 olması durumunda,

$$x_h(t) = \mathbf{M} e^{\mathbf{J}(t-t_0)} \mathbf{M}^{-1} x(t_0) \quad (3.118)$$

Şeklinde bir özel çözüm bulmamız gereklidir. Burada $\mathbf{J} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{M}$ olup, *Jordan* formunu ifade eder ve bu durum için $\mathbf{J}$ matrisi aşağıdaki gibi yazılır;

$$\mathbf{J} = \left[\begin{array}{cc|ccc} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \hline 0 & 0 & \lambda_3 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_n \end{array} \right] \quad (3.119)$$

$e^{\mathbf{J}(t-t_0)}$ ifadesi aşağıdaki gibi bulunur;

$$e^{\mathbf{J}(t-t_0)} = \left[\begin{array}{cc|ccc} 1 & (t-t_0) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \hline 0 & 0 & e^{\lambda_3(t-t_0)} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{\lambda_n(t-t_0)} \end{array} \right] \quad (3.120)$$

$\lambda_2 = 0$ özdeğerine karşılık düşen özvektör V_2 , $\mathbf{A}V_2 = V_1$ eşitliğinden bulunur. (3.118)

denkleminde gerekli işlemler yapıldıktan sonra her bir durum (state) için homojen çözüm;

$$x_{1h}(t) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n x_k(t_0) v_{i1} w_{ki} e^{\lambda_i(t-t_0)} + (t-t_0) v_{11} \sum_{k=1}^n x_k(t_0) w_{k2}$$

$$\begin{aligned}
x_{2h}(t) &= \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n x_k(t_0) v_{i2} w_{ki} e^{\lambda_i(t-t_0)} + (t-t_0) v_{12} \sum_{k=1}^n x_k(t_0) w_{k2} \\
&\vdots \\
x_{nh}(t) &= \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n x_k(t_0) v_{in} w_{ki} e^{\lambda_i(t-t_0)} + (t-t_0) v_{1n} \sum_{k=1}^n x_k(t_0) w_{k2}
\end{aligned} \tag{3.121}$$

Buradan tüm durumlar için homojen çözüm vektörel şekilde yazılırsa;

$$x_h(t) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n x_k(t_0) V_i w_{ki} e^{\lambda_i(t-t_0)} + (t-t_0) V_1 \sum_{k=1}^n x_k(t_0) w_{k2} \tag{3.122}$$

şeklinde ifade edilebilir ve (3.122) denkleminde $\lambda_{1,2} = 0$ özdeğeri için homojen çözüm cevabı ayrı yazılırsa;

$$\begin{aligned}
x_h(t) &= \sum_{k=1}^n x_k(t_0) V_1 w_{k1} + \sum_{k=1}^n x_k(t_0) V_2 w_{k2} \\
&+ \sum_{k=1}^n \sum_{i=3}^n x_k(t_0) V_i w_{ki} e^{\lambda_i(t-t_0)} + (t-t_0) V_1 \sum_{k=1}^n x_k(t_0) w_{k2}
\end{aligned} \tag{3.123}$$

(3.123) denkleminin ilk iki parçasında $\lim_{t \rightarrow \infty} \left[\sum_{k=1}^n x_k(t_0) V_1 w_{k1} + \sum_{k=1}^n x_k(t_0) V_2 w_{k2} \right] = \text{sabit}$,

üçüncü parçasında $\lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \sum_{i=3}^n x_k(t_0) V_i w_{ki} e^{\lambda_i(t-t_0)} = 0$ ve dördüncü parçası olan

$(t-t_0) V_1 \sum_{k=1}^n x_k(t_0) w_{k2}$ t 'li terimler içermektedir. Sonuç olarak $x_h(t)$ ifadesi t 'li

terimler içerdiği için sistem kararsızdır.

Durum 4: Sistemin $\lambda_{1,2} = 0$ özdeğerlerine sahip olması halinde $x_p(t)$ özel çözümü:

* **rank(A - $\lambda_i I$) = rank(A) = $n-2$** ise, lineer bağımsız özvektör sayısı 2 olması durumunda, $\lambda_{1,2} = 0$ için aynen Durum 2'deki şartlar geçerlidir.

** **rank(A) = $n-1$** yani, lineer bağımsız özvektör sayısı 1 olması durumunda, özel çözüm:

$$x_p(t) = \int_{t_0}^t M e^{J(t-\tau)} M^{-1} B u(\tau) d\tau \tag{3.124}$$

(3.124) denkleminde gerekli işlemler yapıldıktan sonra her bir durum (state) için özel çözüm;

$$\begin{aligned}
x_{1p}(t) &= \int_{t_0}^t \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n b_k u_k v_{i1} w_{ki} e^{\lambda_{i1}(t-\tau)} d\tau + \int_{t_0}^t (t-\tau) v_{11} \sum_{k=1}^n b_k u_k w_{k2} d\tau \\
x_{2p}(t) &= \int_{t_0}^t \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n b_k u_k v_{i2} w_{ki} e^{\lambda_{i2}(t-\tau)} d\tau + \int_{t_0}^t (t-\tau) v_{12} \sum_{k=1}^n b_k u_k w_{k2} d\tau \\
&\vdots \\
x_{np}(t) &= \int_{t_0}^t \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n b_k u_k v_{in} w_{ki} e^{\lambda_{in}(t-\tau)} d\tau + \int_{t_0}^t (t-\tau) v_{1n} \sum_{k=1}^n b_k u_k w_{k2} d\tau \quad (3.125)
\end{aligned}$$

Buradan tüm durumlar için özel çözüm vektörel şekilde yazılırsa;

$$x_p(t) = \int_{t_0}^t \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n b_k u_k V_i w_{ki} e^{\lambda_{i2}(t-\tau)} d\tau + \int_{t_0}^t (t-\tau) V_1 \sum_{k=1}^n b_k u_k w_{k2} d\tau \quad (3.126)$$

şeklinde ifade edilebilir ve (3.126) denkleminde $\lambda_{1,2} = 0$ özdeğeri için özel çözüm cevabı ayrı yazılırsa;

$$\begin{aligned}
x_p(t) &= \int_{t_0}^t \sum_{k=1}^n b_k u_k V_1 w_{k1} d\tau + \int_{t_0}^t \sum_{k=1}^n b_k u_k V_2 w_{k2} d\tau \\
&+ \int_{t_0}^t \sum_{k=1}^n \sum_{i=3}^n b_k u_k V_i w_{ki} e^{\lambda_{i2}(t-\tau)} d\tau + \int_{t_0}^t (t-\tau) V_1 \sum_{k=1}^n b_k u_k w_{k2} d\tau \quad (3.127)
\end{aligned}$$

ve diğer durumlardakine benzer şekilde; (3.127) denklemindeki $x_p(t)$ 'nin ilk iki

parçası olan $\int_{t_0}^t \sum_{k=1}^n b_k u_k V_1 w_{k1} d\tau$ ve $\int_{t_0}^t \sum_{k=1}^n b_k u_k V_2 w_{k2} d\tau$ t 'li terimler içerir; $x_p(t)$ 'nin

üçüncü parçası olan $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_{t_0}^t \sum_{k=1}^n \sum_{i=3}^n b_k u_k V_i w_{ki} e^{\lambda_{i2}(t-\tau)} d\tau = 0$ ve $x_p(t)$ 'nin dördüncü parçası

olan $\int_{t_0}^t (t-\tau) V_1 \sum_{k=1}^n b_k u_k w_{k2} d\tau$ ifadesinde de t^2 'li terimler mevcuttur. Sonuç olarak,

sistemin $\lambda_{1,2} = 0$ çift katlı özdeğerlerine sahip olması halinde, sistemin özel çözümü olan $x_p(t)$ t 'li ve t^2 'li terimler mevcut olduğu için sistem bu durumda kararsızdır denir.

Özet: $x(t) = x_h + x_p$ sistemin genel çözümü aşağıdaki çizelgede özetlenebilir.

Çizelge 3.2 : Dört farklı özel durum analizi.

Sistem Özel Durumu	Homojen Çözüm	Özel Çözüm	Genel Çözüm
$\lambda_1 = 0$ özdeğer ve $\text{Re}[\lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n] < 0$	Sistem her zaman kararlıdır (Durum 1)	Sistem her zaman kararsız (Durum 2)	Sistem her zaman kararsız (Durum 1+2)
$\lambda_{1,2} = 0$ çift katlı özdeğer ve $\text{Re}[\lambda_3, \lambda_4, \dots, \lambda_n] < 0$	Sistem her zaman kararsız (Durum 3)	Sistem her zaman kararsız (Durum 4)	Sistem her zaman kararsız (Durum 3+4)

3.5.3 Katılım faktörünün çıkarılması

Katılım faktörü, (3.109) denkleminin köşegen elemanları olup, her $x(t)$ durumuna ve her λ özdeğerine karşılık düşen katsayılar Çizelge 3.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3 : Katılım Faktörü.

P.F.	λ_1	λ_2	...	λ_n
$x_1(t)$	$v_{11}w_{11}$	$v_{21}w_{12}$	...	$v_{n1}w_{1n}$
$x_2(t)$	$v_{12}w_{21}$	$v_{22}w_{22}$	...	$v_{n2}w_{2n}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	
$x_n(t)$	$v_{1n}w_{n1}$	$v_{2n}w_{n2}$	...	$v_{nn}w_{nn}$

3.6 Lineerleştirilmiş Güç Sistemlerinde Küçük İşaret Kararlılık Analizi

Durum denklemi aşağıdaki gibi olan lineerleştirilmiş m makinalı n baralı güç sistemini göz önüne alalım [45,49]:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_{\text{sys}} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{E} \Delta \mathbf{u} \quad (3.128)$$

Başlangıç çalışma noktalarında lineerleştirilen (3.128) denklemindeki $\Delta u(t)$ giriş işaretteki küçük değişimleri ve $\Delta x(t)$ durum değişkenlerindeki küçük değişimleri göstermekte olup şöyle tanımlanabilir;

$$\Delta u(t) = u(t) - u(t_0)$$

$$\Delta x(t) = x(t) - x(t_0) \quad (3.129)$$

Akı sönümlü (flux-decay) çok makinalı güç sistemlerinde; $\Delta x(t)$ durum değişkenleri ve $\Delta u(t)$ giriş işaretleri $i=1, \dots, m$ için aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\begin{aligned} \Delta x_i &= \begin{bmatrix} \Delta \delta_i & \Delta \omega_i & \Delta E'_{qi} & \Delta E_{fdi} \end{bmatrix}^T \\ \Delta x &= \begin{bmatrix} \Delta x_1^T & \dots & \Delta x_m^T \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (3.130)$$

$$\begin{aligned} \Delta u_i &= \begin{bmatrix} \Delta P_{mi} & \Delta V_{refi} \end{bmatrix}^T \\ \Delta u &= \begin{bmatrix} \Delta u_1^T & \dots & \Delta u_m^T \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (3.131)$$

Benzer şekilde (3.107) denkleminden yararlanarak lineerleştirilmiş güç sistemleri için genel (tam) çözüm aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\Delta x(t) = \mathbf{M} e^{\Lambda(t-t_0)} \mathbf{M}^{-1} \Delta x(t_0) + \int_{t_0}^t \mathbf{M} e^{\Lambda(t-\tau)} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{E} \Delta u(\tau) d\tau = \Delta x_h + \Delta x_p \quad (3.132)$$

Burada, m makinalı bir güç sisteminde $\mathbf{M}$ modal matris olup $4m \times 4m$ 'lik $\mathbf{A}_{\text{sys}}$ sistem matrisinin $4m$ adet özdeğerine karşılık düşen $4m$ adet özvektör sütunundan meydana gelmektedir. Λ köşegen matrisi de (3.98) denkleminde benzer şekilde aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\Lambda = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{A}_{\text{sys}} \mathbf{M} \quad (3.133)$$

3.6.1 Kararlılık koşulları

Lineerleştirilmiş çok makinalı güç sistemlerinde sistem durum matrisi olan $\mathbf{A}_{\text{sys}}$ lineer bağımlı değişken ve denklemlerden dolayı; sönüm katsayısı $D \neq 0$ olması halinde her zaman bir sıfır özdeğere ve $D = 0$ olması halinde her zaman iki sıfır özdeğer sahiptir. Bununla birlikte, $\mathbf{A}_{\text{sys}}$ tekil matristir (tersi yoktur).

m makinalı ve n baralı lineerleştirilmiş çok makinalı güç sistemlerinde,

- $D \neq 0$ olması halinde $\mathbf{A}_{\text{sys}}$ sistem durum matrisinin $\lambda_1 = 0$ özdeğerine karşılık düşen özvektör V_1 $i=1, \dots, m$ için her zaman aşağıdaki gibi olur.

$$V_1 = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \vdots \\ \mu_i \\ \vdots \\ \mu_m \end{bmatrix} \text{ ve } \mu_i = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (3.134)$$

- $D=0$ olması halinde $\mathbf{A}_{\text{sys}}$ sistem durum matrisinin $\lambda_1=0$ özdeğerine karşılık düşen V_1 özvektörü her zaman (3.134) denklemiyle aynıdır. $\lambda_2=0$ özdeğerine karşılık düşen V_2 özvektörü $i=1,\dots,m$ için her zaman aşağıdaki gibi olur.

$$V_2 = \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \vdots \\ \psi_i \\ \vdots \\ \psi_m \end{bmatrix} \text{ ve } \psi_i = [0 \ 1 \ 0 \ 0]^T \quad (3.135)$$

$\lambda_1=0$ özdeğerine karşılık düşen V_1 ve $\lambda_{1,2}=0$ özdeğerlerine karşılık düşen V_1 ile V_2 özvektörleri değişik çok makinalı güç sistemlerinde test edilmiş olup (3 makinalı 9 baralı, 10 makinalı 39 baralı ve 16 makinalı 68 baralı), her zaman (3.134) ve (3.135) denklemleri ile aynı sonuçları vermiştir. Bununla birlikte $D \neq 0$ veya $D=0$ olması halinde her zaman $\text{rank}(\mathbf{A}_{\text{sys}}) = 4m-1$ 'dir.

D sönüm katsayısı olmak üzere 4 farklı durum için lineerleştirilmiş çok makinalı güç sisteminin küçük işaret kararlılığı için gerekli şartlar şöyledir:

Durum 1'e karşılık düşen homojen çözüm (Δx_h): $D \neq 0$ ve girişler sıfır durumu ($\Delta P_{mi} = 0$; $\Delta V_{refi} = 0$). $\lambda_1 = 0$ ve $\text{Re}[\lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_{4m}] < 0$ olmak şartıyla; sistem kararlıdır.

Durum 2'e karşılık düşen özel çözüm (Δx_p): $D \neq 0$ ve $\Delta x(t_0) = 0$ (sıfır başlangıç koşulu) durumu. $\lambda_1 = 0$ ve $\text{Re}[\lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_{4m}] < 0$ olmak şartıyla; (3.134) denkleminde açıkça görüleceği gibi sistem kararlılığı için $\Delta \delta$ rotor açısı değişimlerinden herhangi biri referans işaret seçilebilir.

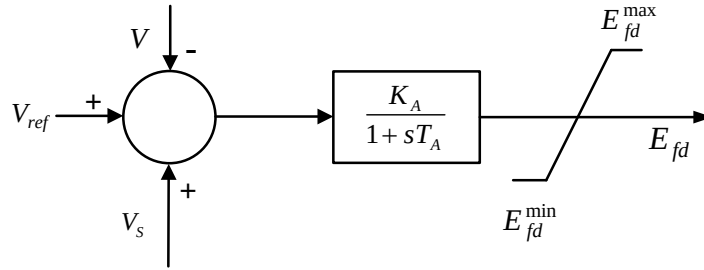
Durum 3'e karşılık düşen homojen çözüm (Δx_h): $D=0$ ve girişler sıfır durumu ($\Delta P_{mi}=0$; $\Delta V_{refi}=0$). $\lambda_{1,2}=0$ ve $\text{Re}[\lambda_3, \lambda_4, \dots, \lambda_{4m}] < 0$ olmak şartıyla; Durum 2'dekine benzer şekilde, sistem kararlılığı için tek koşul $\Delta\delta$ rotor açısı değişimlerinden herhangi biri referans işaret seçilmesidir.

Durum 4'e karşılık düşen özel çözüm (Δx_p): $D=0$ ve $\Delta x(t_0)=0$ (sıfır başlangıç koşulu) durumu. $\lambda_{1,2}=0$ ve $\text{Re}[\lambda_3, \lambda_4, \dots, \lambda_{4m}] < 0$ olmak şartıyla; (3.134) ve (3.135) denklemlerinden açıkça görüleceği gibi sistem kararlılığı için $\Delta\delta$ rotor açısı değişimlerinden herhangi biri ile $\Delta\omega$ rotor hızı değişimlerinden herhangi biri beraber referans işaretleri seçilebilmelidir.

4. UYARMA SİSTEMİ VE PSS

Bu bölümde güç sistemi kararlı kılıcılar (PSS) yapısına, matematiksel olarak lineerleştirilmesine ve en uygun (optimal) PSS yer tayinleri konularına değinilmiştir. Bu tezde, MATLAB m-dosya tabanlı geliştirilmiş güç sistemi kararlı kılıcı (PSS) tasarım programı geliştirilip hazırlandı.

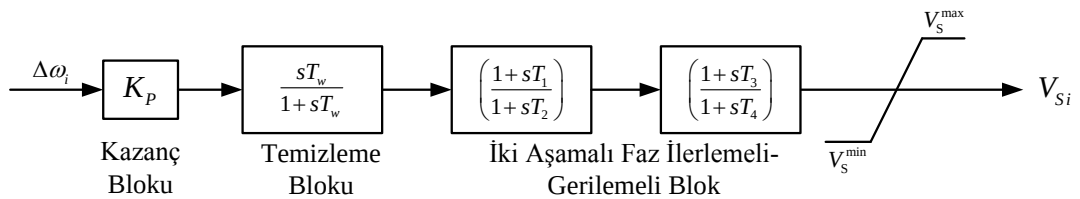
Güç sistemi kararlı kılıcılar (PSS) genellikle akı sönümlü modelle beraber kullanılır. PSS düşük frekanslı salınımları söndürmede kullanılan kararlı kılıcı bir cihazdır. Şekil 4.1’de uyarma sistemi birinci dereceli modelle gösterilmiştir. K_A ve T_A sırasıyla AVR kazanç ve zaman sabitleridir. AVR’nin blok diyagramı Şekil 4.1’de gösterilmiştir [45].



Şekil 4.1: Uyarma sistemi blok diyagramı.

4.1 PSS’nin Yapısı

Bu çalışmada, PSS tabanlı kararlı kılıcı için literatürde daha çok kullanılan faz ilerlemeli-gerilemeli kontrolör kullanılmıştır. PSS’nin yapısı Şekil 4.2’de gösterilmiş olup, kontrolörün transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir [45,49]:



Şekil 4.2: PSS’nin blok diyagramı.

$$V_{Si} = K_P \left(\frac{sT_w}{1+sT_w} \right) \cdot \left(\frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right) \cdot \left(\frac{1+sT_3}{1+sT_4} \right) \cdot \Delta\omega_i \quad (4.1)$$

Burada, giriş işareti $\Delta\omega$ hız sapması ve çıkış işareti uyarma sistemi V_{ref} referans gerilimine eklenen V_s kararlı kılıcı işaretidir. K_P kararlı kılıcı kazanç sabiti, T_w temizleme zaman sabiti, ve T_1 , T_2 , T_3 ve T_4 kararlı kılıcı zaman sabitleridir.

4.2 PSS'nin Lineerleştirilmesi

4.2.1 Herhangi bir k. makinaya PSS eklenmesi durumu

(3.4) diferansiyel denklemlerinden sadece k. makinadaki durum denklemi değişir.

$$\frac{dE_{fd,k}}{dt} = \frac{1}{T_{A,k}} \left[-E_{fd,k} + K_{A,k} (V_{ref,k} - V_k + V_{S,k}) \right] \quad (4.2)$$

(4.2) denklemi lineer hale getirilirse;

$$\frac{d\Delta E_{fd,k}}{dt} = \frac{1}{T_{A,k}} \left[-\Delta E_{fd,k} + K_{A,k} (\Delta V_{ref,k} - \Delta V_k + \Delta V_{S,k}) \right] \quad (4.3)$$

Faz ilerlemeli-gerilemeli PSS için durum uzayı denklemleri aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\frac{dx_{pk1}}{dt} = -\frac{1}{T_w} x_{pk1} + K_P \Delta\dot{\omega}_k \quad (4.4)$$

$$\frac{dx_{pk2}}{dt} = \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2} \frac{1}{T_w} \right) x_{pk1} - \frac{1}{T_2} x_{pk2} + K_P \frac{T_1}{T_2} \Delta\dot{\omega}_k \quad (4.5)$$

$$\frac{dx_{pk3}}{dt} = \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2} \frac{1}{T_w} \right) \frac{T_3}{T_4} x_{pk1} + \left(\frac{1}{T_4} - \frac{T_3}{T_4} \cdot \frac{1}{T_2} \right) x_{pk2} - \frac{1}{T_4} x_{pk3} + K_P \frac{T_1}{T_2} \frac{T_3}{T_4} \Delta\dot{\omega}_k \quad (4.6)$$

Buradaki x_{pk1} , x_{pk2} ve x_{pk3} ara değişkenlerdir. (4.3)-(4.6) denklemleri lineer hale getirilirse;

$$\frac{d\Delta x_{pk1}}{dt} = -\frac{1}{T_w} \Delta x_{pk1} + K_P \Delta\dot{\omega}_k \quad (4.7)$$

$$\frac{d\Delta x_{pk2}}{dt} = \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2} \frac{1}{T_w} \right) \Delta x_{pk1} - \frac{1}{T_2} \Delta x_{pk2} + K_P \frac{T_1}{T_2} \Delta\dot{\omega}_k \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta x_{pk3}}{dt} = & \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2} \frac{1}{T_w} \right) \frac{T_3}{T_4} \Delta x_{pk1} + \left(\frac{1}{T_4} - \frac{T_3}{T_4} \cdot \frac{1}{T_2} \right) \Delta x_{pk2} \\ & - \frac{1}{T_4} \Delta x_{pk3} + K_P \frac{T_1}{T_2} \frac{T_3}{T_4} \Delta \dot{\omega}_k \end{aligned} \quad (4.9)$$

$\Delta \dot{\omega}_k$ türevli terimler yerine (3.128) denklemindeki $\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_{\text{sys}} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{E} \Delta \mathbf{u}$ eşitliğini kullanarak, yani

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta \omega_i \\ \Delta E'_{qi} \\ \Delta E_{fdi} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{\text{sys}} \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta \omega_i \\ \Delta E'_{qi} \\ \Delta E_{fdi} \end{bmatrix} + \mathbf{E} \begin{bmatrix} \Delta P_{mi} \\ \Delta V_{ref,i} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$\mathbf{A}_{\text{sys}}$ ve $\mathbf{E}$ matrisleri aşağıdaki gibi tanımlanırsa;

$$\mathbf{A}_{\text{sys}} = \begin{bmatrix} A_{\text{sys},1} \\ \vdots \\ A_{\text{sys},4k-2} \\ \vdots \\ A_{\text{sys},4m} \end{bmatrix} \text{ ve } \mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_{4k-2} \\ \vdots \\ E_{4m} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$i=1,2,\dots,k,\dots,m$ için k . makinada PSS olması halinde; $\Delta \dot{\omega}_k = A_{\text{sys},4k-2} \Delta \mathbf{x} + E_{4k-2} \Delta u$ 'yu (4.7)-(4.9) denklemlerinde yerine yerleştirilip, (4.7)-(4.9) denklemleri yeniden düzenlenirse;

$$\frac{d\Delta x_{pk1}}{dt} = -\frac{1}{T_w} \Delta x_{pk1} + K_P A_{\text{sys},4k-2} \Delta \mathbf{x} + K_P E_{4k-2} \Delta u \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta x_{pk2}}{dt} = & \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2} \frac{1}{T_w} \right) \Delta x_{pk1} - \frac{1}{T_2} \Delta x_{pk2} \\ & + K_P \frac{T_1}{T_2} A_{\text{sys},4k-2} \Delta \mathbf{x} + K_P \frac{T_1}{T_2} E_{4k-2} \Delta u \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta x_{pk3}}{dt} = & \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2} \frac{1}{T_w} \right) \frac{T_3}{T_4} \Delta x_{pk1} + \left(\frac{1}{T_4} - \frac{T_3}{T_4} \cdot \frac{1}{T_2} \right) \Delta x_{pk2} - \frac{1}{T_4} \Delta x_{pk3} \\ & + K_P \frac{T_1}{T_2} \frac{T_3}{T_4} A_{\text{sys},4k-2} \Delta \mathbf{x} + K_P \frac{T_1}{T_2} \frac{T_3}{T_4} E_{4k-2} \Delta u \end{aligned} \quad (4.14)$$

(4.12)-(4.14) denklemlerini kullanarak, güç sistemine sadece k . makinada PSS eklenmesi durumu için sistemin yeni durum denklemleri matris formda yazılırsa;

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta\delta_i \\ \Delta\omega_i \\ \Delta E'_{qi} \\ \Delta E_{fdi} \\ \Delta x_{pk1} \\ \Delta x_{pk2} \\ \Delta x_{pk3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_i \\ \Delta\omega_i \\ \Delta E'_{qi} \\ \Delta E_{fdi} \\ \Delta x_{pk1} \\ \Delta x_{pk2} \\ \Delta x_{pk3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ E_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{mi} \\ \Delta V_{ref,i} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

(4.15) denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta x_{pk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta x_{pk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ E_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{mi} \\ \Delta V_{ref,i} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

4.2.2 A_{11} , A_{12} , A_{21} ve A_{22} matrislerinin bulunması

A_{11} matrisi aynı zamanda kontrolsüz haldeki sistem matrisine (A_{sys}) eşittir. A_{12} matrisi matris formda şöyle yazılabilir;

$$A_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_{A,k}}{T_{A,k}} \\ \vdots & & \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$A_{21} = \begin{bmatrix} A_{21,1} \\ A_{21,2} \\ A_{21,3} \end{bmatrix}$ matrisinin satır elemanlarının bulunması aşağıdaki şekildedir;

$$A_{21,1} = K_p A_{\text{sys},4k-2} \quad (4.18)$$

$$A_{21}(2,:) = K_p \frac{T_1}{T_2} A_{\text{sys},4k-2} \quad (4.19)$$

$$A_{21}(3,:) = K_p \frac{T_1}{T_2} \frac{T_3}{T_4} A_{\text{sys},4k-2} \quad (4.20)$$

A_{22} matrisi aşağıda verilmiştir,

$$A_{22} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_w} & 0 & 0 \\ \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2} \frac{1}{T_w} \right) & -\frac{1}{T_2} & 0 \\ \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2} \frac{1}{T_w} \right) \frac{T_3}{T_4} & \left(\frac{1}{T_4} - \frac{T_3}{T_4} \frac{1}{T_2} \right) & -\frac{1}{T_4} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$E_p = \begin{bmatrix} E_{p1} \\ E_{p2} \\ E_{p3} \end{bmatrix} \text{ matrisinin satır elemanlarının bulunması aşağıdaki şekildedir;}$$

$$E_{p1} = K_p E_{4k-2} \quad (4.22)$$

$$E_{p2} = K_p \frac{T_1}{T_2} E_{4k-2} \quad (4.23)$$

$$E_{p3} = K_p \frac{T_1}{T_2} \frac{T_3}{T_4} E_{4k-2} \quad (4.24)$$

4.2.3 Çoklu sayıda PSS eklenmesi durumu

loc_pss: PSS'lerin hangi baralara yerleştirileceği bilgisi

b: generatörlerin bulunduğu baralar (tasarım her zaman baralar üzerinden gerçekleştirilecektir)

pn=max(size(loc_pss)): kaç sayıda PSS kullanılacak

br=max(size(b))

Matris büyüklükleri aşağıdaki gibi ifade edilsin,

A_{12} $4br \times 3pn$; A_{21} $3pn \times 4br$; A_{22} $3pn \times 3pn$;

A_{11} , A_{12} , A_{21} ve A_{22} matrislerinin bulunması:

$KP = [KP_1 \quad KP_2 \quad \dots \quad KP_{br}]$ olsun ve vektör büyüklüğü $1 \times br$ 'dir. Benzer şekilde T_w , T_1 , T_2 , T_3 ve T_4 de vektörel büyüklük olup ve her bir vektör, makine sayısı kadar elemanlardan oluşmaktadır. A_{11} , A_{12} , A_{21} ve A_{22} matrisinin bulunması için genel algoritma (MATLAB program dilinde) aşağıdaki gibidir.

$$A_{11} = A_{sys};$$

$$A_{12} = \text{zeros}(3br, 3pn);$$

$$A_{21} = \text{zeros}(3pn, 3br);$$

$$A_{22} = \text{zeros}(3pn, 3pn);$$

for $kk=1:pn$

$$pk = \text{find}(b == \text{loc_pss}(kk));$$

$$A_{12}(4pk, 3kk) = \frac{K_A(\text{loc_pss}(kk))}{T_A(\text{loc_pss}(kk))};$$

$$A_{21}(3kk-2, :) = KP(pk) A_{sys}(4pk-2, :);$$

$$A_{21}(3kk-1, :) = KP(pk) \frac{T_1(pk)}{T_2(pk)} A_{sys}(4pk-2, :);$$

$$A_{21}(3kk, :) = KP(pk) \frac{T_1(pk)}{T_2(pk)} \frac{T_3(pk)}{T_4(pk)} A_{sys}(4pk-2, :);$$

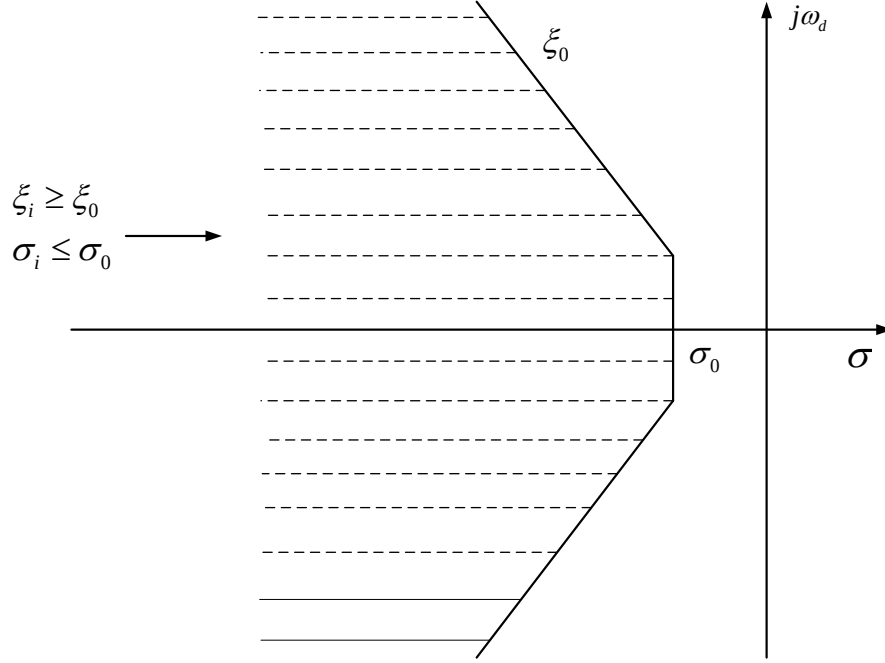
$$A_{22}(3kk-2:3kk, 3kk-2:3kk)$$

$$= \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_w(pk)} & 0 & 0 \\ \left[\frac{1}{T_2(pk)} - \frac{T_1(pk)}{T_2(pk)} \frac{1}{T_w(pk)} \right] & -\frac{1}{T_2(pk)} & 0 \\ \left[\frac{1}{T_2(pk)} - \frac{T_1(pk)}{T_2(pk)} \frac{1}{T_w(pk)} \right] \frac{T_3(pk)}{T_4(pk)} & \left[\frac{1}{T_4(pk)} - \frac{T_3(pk)}{T_4(pk)} \frac{1}{T_2(pk)} \right] & -\frac{1}{T_4(pk)} \end{bmatrix}$$

end

4.3 PSS İçin En Uygun Yer Tayini

PSS tasarımı için, istenilen sönüm oranı (ξ_0) ve özdeğer reel kısmı (σ_0) dikkate alınır. Şekil 4.3'te gösterilen, istenilen bölge dışında kalan az sönümlü ve kararsız elektromekanik salınım mod özdeğerleri için, katılım faktörü katsayısı (δ ve ω katılım faktörü yüksek olan baskın makinalar) en yüksek olan makinalar için PSS tasarlanır.



Şekil 4.3 : Elektromekanik salınım mod özdeğerlerinin istenilen tasarım bölgesi.

5. MODERN SEZGİSEL ALGORİTMALAR

Sezgisel algoritmalar yüksek yakınsama hızı, küresel araştırma yeteneği, düşük parametre hassasiyeti ve uygulama kolaylığı gibi önemli özelliklerinden dolayı birçok araştırma alanında yaygın şekilde kullanılmaktadırlar. Bu nedenle, genel amaçlı optimizasyon algoritmaları olarak da adlandırılmaktadırlar. Bu bölümde parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) ve yapay arı kolonisi algoritmalarına, performans indekslerine, amaç fonksiyonu ve optimizasyon problemi konularına değinilmiştir. Bu tez çalışmasında, MATLAB m-dosya tabanlı genelleştirilmiş sezgisel yöntemlerin güç sistemlerine uygulanması programı (PSO ve ABC optimizasyon teknikleri) geliştirilip hazırlanmıştır.

5.1 Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO)

Dr. Eberhart ve Dr. Kennedy tarafından 1995 yılında kuş ve balık sürülerinin sosyal davranışlarından esinlenerek bulunan ve geliştirilen parçacık sürüsü optimizasyonu (particle swarm optimization, PSO), popülasyona dayalı olasılıksal optimizasyon tekniğidir [53]. Nispeten yeni evrimsel paradigma olmasına rağmen, PSO ile ilgili çalışmalar birkaç yıldır sürekli artmaktadır.

PSO, Genetik Algoritmalar (GA) gibi evrimsel hesaplama teknikleri ile birçok benzer özellikler taşımaktadır. Sistem random çözümlerden oluşan bir popülasyonla başlatılır ve en uygun çözümü bulana kadar jenerasyonları günceller. Buna karşın, GA'nın tersine, PSO'da çaprazlama ve mutasyon gibi evrimsel operatörler yoktur. PSO'da parçacıklar (particle) denilen potansiyel çözümler, mevcut en iyi çözümleri takip ederek problem uzayında uçarlar [53-55].

GA ile karşılaştırılırsa; PSO'nun avantajları gerçekleştirilmesinin kolay olması ve ayarlanması gereken daha az parametreleri bulanmasındandır. PSO birçok alanda başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Uygulama alanlarından bazıları; fonksiyon optimizasyonu, yapay sinir ağları eğitimi, bulanık sistem kontrolü ve GA'nın uygulanabildiği diğer alanlardır.

Literatürde PSO algoritma hızını ve global minimuma yakınlaştırmayı düzelten birkaç değişik algoritma tekniği önerilmiştir. En etkili PSO versiyonlarından biri, iterasyon sayısını zamanla azaltan atalet ağırlığıdır (time decreasing inertia weight). Bu düzeltilmiş algoritmanın performansı atalet ağırlığının ayarlanması yöntemine bağlıdır. Genellikle atalet ağırlığı, iterasyon sayısı ile lineer olarak azalma yolu tercih edilir [55].

PSO, d boyutlu uzayda “parçacıklar” rastgele çözümler popülasyonu ile başlar. i . parçacık d boyutlu vektör olan $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ ile ve i . parçacığın hızı diğer d boyutlu vektör olan $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ ile gösterilir. Denklem (5.1)’e göre her adımda, her parçacığın hızı onların p_{best} ve g_{best} ’ine doğru değişir. i . parçacığın konumu denklem (5.3)’e göre güncellenir. d boyutlu bir arama uzayında, parçacıkların hız ve konumları aşağıdaki gibi güncellenir [56].

$$v_{id}^{(t+1)} = w \cdot v_{id}^{(t)} + c_1 \cdot rand(\dots) \cdot (pbest_{id} - x_{id}^{(t)}) + c_2 \cdot rand(\dots) \cdot (gbest_d - x_{id}^{(t)}) \quad (5.1)$$

$$-v_{max} \leq v_{id}^{(t+1)} \leq v_{max} \quad (5.2)$$

$$x_{id}^{(t+1)} = x_{id}^{(t)} + v_{id}^{(t+1)} \quad (5.3)$$

$$x_{min} \leq x_{id}^{(t+1)} \leq x_{max} \quad (5.4)$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad \text{ve} \quad d = 1, 2, \dots, m \quad \text{için}$$

Burada,

n = sürüdeki parçacıkların sayısı;

m = parçacıktaki element sayısı;

t = iterasyon sayısı;

c_1, c_2 = kavramsal ve sosyal hızlandırma sabiti;

$rand(.) = (0, 1)$ aralığındaki birim random değeri;

$v_{id}^{(t)}$ = t . iterasyondaki i . parçacığın hızı;

$x_{id}^{(t)}$ = t . iterasyondaki i . parçacığın şimdiki konumu;

$pbest_i$ = i . parçacığın şimdiye kadar ki en iyi konumu;

$gbest_d$ = grubun global en iyi konumu;

x_{min}, x_{max} = parçacık konumunun minimum ve maksimum değerleri

v_{max} = izin verilen maksimum parçacık hareket hızı

Genellikle w atalet ağırlık w_{start} 'tan w_{end} 'e kadar lineer olarak azalır ve iyi bir başlangıç noktası ve son noktası için $w_{start} = 0.9$ ve $w_{end} = 0.4$ kullanılır.

$$w = w_{start} - \frac{w_{start} - w_{end}}{iter_{max}} \times iter \quad (5.5)$$

Burada, w_{start} ilk ağırlık, w_{end} son ağırlık, $iter$ şimdiki iterasyon sayısı ve $iter_{max}$ maksimum iterasyon sayısıdır. Bu tezde; sürü büyüklüğü, c_1 ve c_2 sırasıyla 20, 2 ve 2 alınmıştır.

5.2 Yapay Arı Kolonisi (ABC) Algoritması

Yapay arı kolonisi algoritması, problemlerin çözümünde böcek kolonilerinin ya da kuş ve balık sürüleri gibi diğer canlı gruplarının ortak hareketlerinden esinlenerek tanımlanmış sürü zekasına dayalı algoritmalarından birisidir. Sürü zekasına dayalı algoritmalar doğada sürü halinde hareket eden canlıların yiyecek alanına ulaşmada sergiledikleri zeki davranışları simüle etmektedir. Sürü zekasına dayalı algoritmalarda, araştırma uzayındaki küresel minimum noktası sezgisel olarak araştırılırken popülasyondaki bireylerin konum bilgileri kullanılır [22-23].

ABC algoritması bal arısı kolonilerine özgü zeki bir davranış olan yiyecek arama davranışını simüle etmekte ve özellikle çok boyutlu ve çok-modlu optimizasyon problemlerinin çözümünde etkin şekilde kullanılmaktadır. ABC algoritmasında arı kolonisi 3 grup arıdan oluşmaktadır. Bunlar, görevli arılar, gözcü arılar ve kaşif arılardır. Önerilen modelde, popülasyonun yarısı görevli arılardan diğer yarısı ise gözcü arılardan oluşmaktadır. Bir yiyecek kaynağının pozisyonu optimize edilecek probleme ait olası bir çözümü temsil etmektedir. Yiyecek kaynağına ait nektar miktarı ise o yiyecek kaynağının temsil ettiği çözümün uygunluk (fitness) değerini belirlemektedir. Her bir yiyecek kaynağında sadece bir görevli arı bulunmakta, yani görevli arı sayısı yiyecek kaynağı sayısına eşit olmaktadır. Böylece, görevli arıların veya gözcü arıların sayısı popülasyondaki çözüm sayısına eşittir. Diğer görevli ve

gözcü arılar tarafından yiyecek kaynağı tüketilen görevli arılar kaşif arı haline dönüşmektedir [57-58].

İlk olarak, ABC algoritması SN adet çözümden oluşan rasgele bir P başlangıç popülasyonu üretmekte olup, burada SN görevli veya gözcü arıların sayısını temsil etmektedir. Optimizasyon parametrelerinin sayısı D olmak üzere her bir $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ çözümü D boyutlu bir vektör ile tanımlanır. Daha sonra, başlangıç popülasyonundaki her bir çözümün kalite değeri ilgili çözümün görevli arısı tarafından hesaplanır. Başlangıç popülasyonu oluşturularak popülasyondaki çözümlerin kalite değerleri hesaplandıktan ve kontrol parametre değerleri atandıktan sonra, araştırmanın her çevrimi aşağıdaki 3 aşamadan oluşmaktadır [22-23]:

1. *Aşama:* Her bir görevli arının kendisi için tanımlanan yiyecek kaynağına gönderilerek, o yiyecek kaynağına ve onun komşuluğunda üretilen yeni bir yiyecek kaynağına ait nektar bilgilerinin elde edilmesi ve bu bilgilerin gözcü arılara aktarılması,
2. *Aşama:* Gözcü arıların, görevli arılardan aldıkları bilgilere göre yiyecek kaynaklarına gönderilerek, ilgili yiyecek kaynaklarına ve komşuluklarında üretilen yeni yiyecek kaynaklarına ait nektar bilgilerinin elde edilmesi,
3. *Aşama:* Kaşif arılarının tespit edilerek, rasgele yeni yiyecek kaynaklarını bulmaları için araştırma alanına gönderilmesi.

Gözcü arının bir yiyecek kaynağını seçme olasılığı, p_i , aşağıdaki ifade ile tanımlanmaktadır:

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{k=1}^{SN} fit_k} \quad (5.6)$$

burada, fit_i , i . çözüme ait kalite değerini yani i pozisyonundaki yiyecek kaynağının nektar miktarını göstermektedir. Çözümlerin kalite değerleri aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$fit_i = \frac{1}{1 + f_i} \quad (5.7)$$

burada f_i , i . çözüm tarafından üretilen hata değeridir. Görevli ve gözcü arıların, hafızalarında kayıtlı bulunan yiyecek kaynağının komşuluğunda üretecekleri yeni yiyecek kaynağına ait pozisyon aşağıdaki ifade aracılığıyla belirlenmektedir,

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (5.8)$$

burada, $k \in \{1,2,...,SN\}$ ve $j \in \{1,2,...,D\}$ rasgele seçilen indislerdir. k indisi rasgele üretilmesine rağmen, i indisinden farklı olmalıdır. ϕ_{ij} , $[-1,1]$ aralığında rasgele üretilen bir sayıdır.

Mevcut x_{ij} çözümünün komşuluğunda üretilen her bir v_{ij} çözümü arılar tarafından değerlendirilir ve performansları mevcut x_{ij} çözümü ile mukayese edilir. Daha önce de belirtildiği gibi, şayet yeni yiyecek kaynağının kalite değeri eskisine eşit ya da daha yüksek ise, eski yiyecek kaynağı hafızadan silinerek yerine yeni yiyecek kaynağı kaydedilir. Aksi halde, eski yiyecek kaynağı hafızada saklanmaya devam edilir. Diğer bir deyişle eski çözümler ile yeni çözümler arasında bir açgözlü (greedy) seçme mekanizması uygulanır [22-23].

Görevli ve gözcü arılar tarafından nektarı tüketilmiş yiyecek kaynakları, kaşif arılar tarafından keşfedilen yeni yiyecek kaynakları ile yer değiştirilir. ABC algoritmasında bu işlem gerçekleştirilirken, rasgele bir kaynak pozisyon vektörü üretilir ve bu vektör eski çözümün yerine hafızaya kaydedilir [22]. Şayet bir yiyecek kaynağını temsil eden çözüm belirli sayıda denemeye rağmen geliştirilemiyor ise, bu durumda o yiyecek kaynağının arılar tarafından tüketildiği ve o yiyecek kaynağına ait görevli arının kaşif arıya dönüştüğü kabul edilmektedir. Diğer bir ifadeyle, x_i konumundaki bir yiyecek kaynağı *limit* parametre değeri kadar deneme boyunca geliştirilememiş ise o yiyecek kaynağı popülasyondan atılır ve yerine kaşif arılar tarafından bulunan yeni yiyecek kaynağı popülasyona dahil edilir. Nektarı tüketilmiş olan yiyecek kaynağı x_i ve $j \in \{1,2,...,D\}$ olarak kabul edilirse, kaşif arının x_i kaynağının yerine geçecek yeni bir kaynak keşfetmesi işlemi aşağıdaki gibi tanımlanır [57-58].

$$x_i^j = x_{\min}^j + rand [0,1](x_{\max}^j - x_{\min}^j) \quad (5.9)$$

Temel ABC algoritmasında üç kontrol parametresi bulunmaktadır. Bunlar, koloni büyüklüğü (yiyecek kaynaklarının sayısı) , maksimum çevrim sayısı ve *limit* değeridir. ABC algoritmasında bireylerin yiyecek kaynaklarına başarılı bir şekilde

yönlendirilme oranı, algoritmanın yüksek kaliteli çözümleri keşfedebilme hızının bir ölçüsüdür. Üzerinde çalışılan problemde başarılı bir çözümün elde edilebilmesi, en iyi çözümlere en hızlı şekilde ulaşılabilmesine bağlıdır. Başarılı bir araştırma sürecinde keşfetme ve keşfedilen çözümlerden faydalanma süreçleri birlikte yürütülmelidir. ABC algoritmasında, görevli ve gözcü arılar keşfedilmiş kaynaklardan faydalanma sürecini gerçekleştirirken kaşif arılar da yeni kaynakların keşfedilmesi sürecini kontrol ederler [57-58].

ABC Algoritmasının Temel Özellikleri

- Oldukça basit ve esnek bir algoritmadır.
- Yiyecek aramada görevli doğal arıların davranışlarını çok yakın şekilde benzetir.
- Sürü zekâsını temel alan bir algoritmadır.
- Sürekli problemler için geliştirilmiş olmasına rağmen, ayrık problemlerin çözümü için de kullanılabilir.
- Az sayıda kontrol parametreleri içermektedir.
- Kâşif arıların gerçekleştirdiği küresel araştırmayı ve gözcü arılar ile işçi arıların gerçekleştirdiği bölgesel araştırmayı içerir. Bu iki araştırmayı dengeli bir şekilde yürütür.

5.3 Performans İndeksleri

Sistemin yerleşme zamanı (t_s) ve aşımını (M_p) yansıtan ve literatürde daha çok kullanılan 4 performans indeksi mevcuttur. Bunlar aşağıdaki gibi ifade edilir [59];

$$ISE = \int_0^T e^2(t) dt \quad (5.10)$$

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt \quad (5.11)$$

$$ITAE = \int_0^T t |e(t)| dt \quad (5.12)$$

$$ITSE = \int_0^T te^2(t) dt \quad (5.13)$$

Yukarıdaki denklemlerde;

ISE (The Integral of Square of the error): hataların karesinin integrali.

IAE (The Integral of the absolute magnitude of the error): hatanın mutlak değerinin integrali.

ITAE (The Integral of time multiplied by absolute error): mutlak hatanın zamanla çarpımının integrali.

ITSE (The integral of time multiplied by the squared error): hatanın karesinin zamanla çarpımının integrali.

Performans indeksleri her zaman pozitif veya sıfır olmalıdır. Bu indeksleri en düşük olan sistem, en iyi sistem olarak tanımlanır. Bu indeksler özellikle bilgisayar simülasyon çalışmalarında önemlidir. Performans integralinin genel formu aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$I = \int_0^T f(e(t), u(t), y(t), t) dt \quad (5.14)$$

Burada f hata, giriş, çıkış ve zamandan oluşan bir fonksiyondur. Sistem değişkenlerinin farklı kombinasyonlardan oluşacak şekilde çok sayıda indeksler elde edilebilir. Performans indeksleri güç sistemlerinin analizi ve tasarımı için son derece önemlidir.

5.4 Amaç Fonksiyonları ve Optimizasyon Problemi

Bu tezde, temizleme zaman sabiti $T_w = 10$ alınmıştır. Büyük arıza durumlarında, K_p kontrolör kazancı sabiti ve T_1 , T_2 , T_3 ve T_4 kararlı kılıcı zaman sabitlerinin ne olacağına karar verilmelidir. Güç sisteminin kararlılık performansını iyileştirmek (düzeltmek) için en iyi kararlı kılıcı parametrelerini bulmak zorundayız. Arızadan sonra kararlılığı düzeltmesi için, PSS kontrolörü güç sistem salınımlarını minimum edecek şekilde tasarlanmalıdır. Bu salınımlar generatör rotor hızındaki sapmaları yansıtır. Literatürde özdeğer tabanlı ve zaman domeni tabanlı çeşitli amaç fonksiyonları mevcuttur. Bu tezde, hem özdeğer tabanlı hem de zaman domeni tabanlı birer amaç fonksiyonu kullanılacaktır ve bu amaç fonksiyonlarının minimum olması gereklidir. Bu *amaç fonksiyonlarının minimum hale getirme gayemiz*, sistem cevabının aşımını ve yerleşme zamanını iyileştirmektir.

Tasarım problemi için PSS'nin parametrelerinin sınırlarının belirlenmesi gereklidir ve bu eşitsizlik sınırlamaları aşağıdaki gibidir.

$$K_p^{\min} \leq K_p \leq K_p^{\max} \quad (5.15)$$

$$T_1^{\min} \leq T_1 \leq T_1^{\max} \quad (5.16)$$

$$T_2^{\min} \leq T_2 \leq T_2^{\max} \quad (5.17)$$

$$T_3^{\min} \leq T_3 \leq T_3^{\max} \quad (5.18)$$

$$T_4^{\min} \leq T_4 \leq T_4^{\max} \quad (5.19)$$

Kontrolör kazançlarının minimum ve maksimum değerleri sırasıyla 1 ve 100'e ve kontrolör zaman sabitlerinin minimum ve maksimum değerleri sırasıyla 0.01 ve 1 s'ye kurulur [45]. Önerilen yaklaşımla, Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) ve Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritmaları verilen kararlı kılıcılarının optimum parametre ayarlarının bulunmasında çalıştırılır.

Bu tez, optimizasyon algoritmalarının ikincil derecede önemli olduğu çalışmadır. Fakat örnek olması açısından, bilinen iki tanesinin (PSO ve ABC) kararlılığı düzeltmede kullanılan PSS'lerin parametrelerini optimize etmede tasarlanan PowSysGUI programına dahil edileceği gösterilmiştir.

6. GEÇİCİ HAL KARARLILIK ANALİZİ

Bu bölümde, lineer olmayan diferansiyel-cebirselsel denklemlerden oluşan çok makinalı güç sistemleri Simulink blokları kullanılarak anlaşılır şekilde modellenildi. Bu modellemeyi yola çıkarak MATLAB *m* dosyaları ve Simulink bloklarından oluşan geliştirilmiş geçici hal kararlılık analizi yapabilecek MATLAB/Simulink tabanlı genel bir program hazırlandı. Bu program aynı zamanda yük akış analizi ve küçük işaret kararlılık analizi programı ile koordineli çalışmaktadır.

6.1 Diferansiyel Denklemlerin Modellenmesi

Çok makinalı güç sistemlerine ilişkin lineer olmayan diferansiyel denklemleri yeniden yazarsak [45];

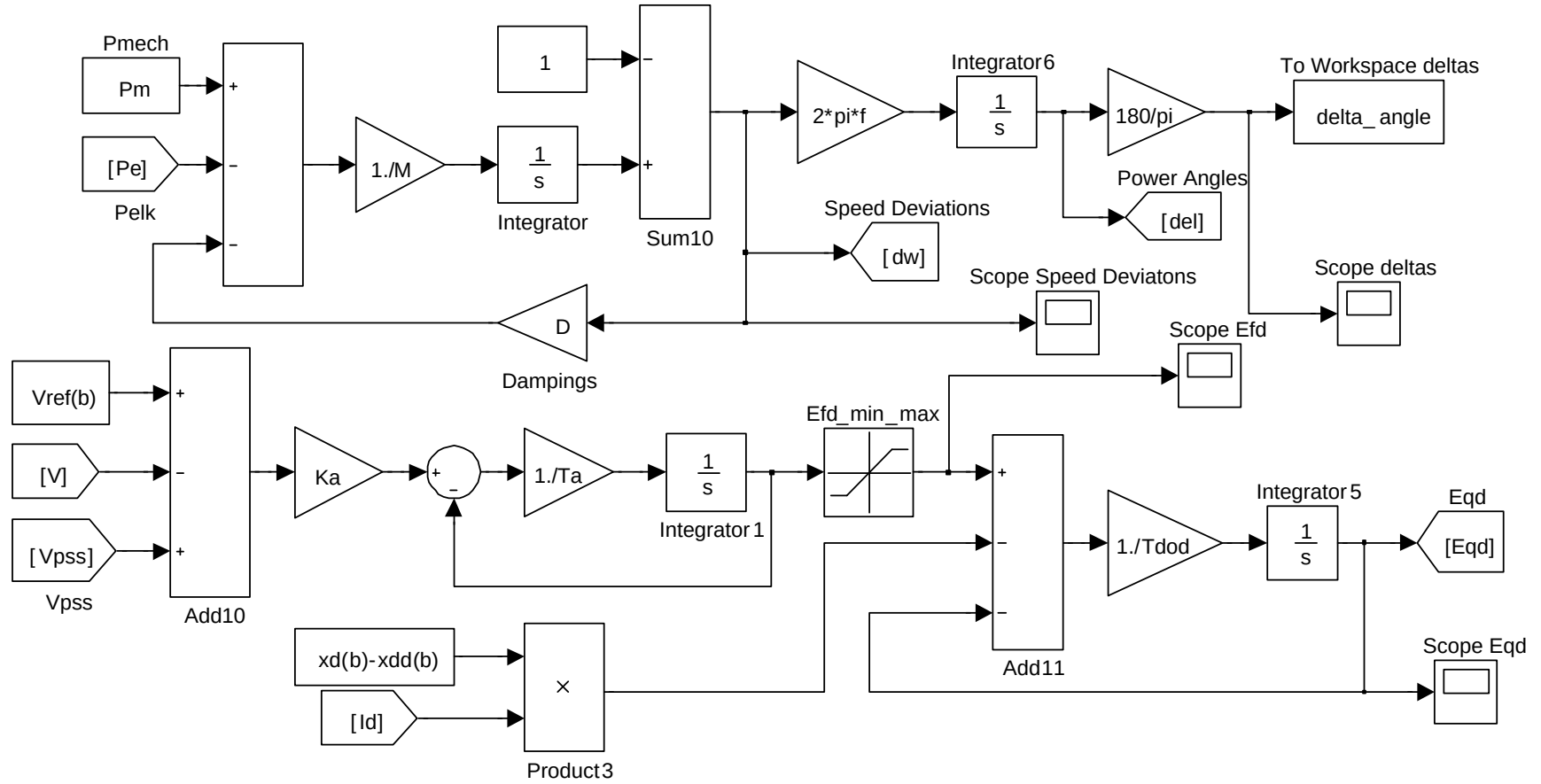
$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_s (\omega_i - 1) = \omega_s \Delta\omega_i \quad (6.1)$$

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{P_{mi}}{M_i} - \frac{P_{ei}}{M_i} - \frac{D_i(\omega_i - 1)}{M_i} \quad (6.2)$$

$$\frac{dE'_{qi}}{dt} = -\frac{E'_{qi}}{T'_{doi}} - \frac{(x_{di} - x'_{di})i_{di}}{T'_{doi}} + \frac{E_{fdi}}{T'_{doi}} \quad (6.3)$$

$$\frac{dE_{fdi}}{dt} = -\frac{E_{fdi}}{T_{Ai}} + \frac{K_{Ai}}{T_{Ai}} (V_{refi} + V_{Si} - V_i) \quad (6.4)$$

(6.2) denklemindeki P_e elektriksel gücü göstermekte olup ifadesi $P_{ei} = E'_{qi}i_{qi} + (x_{qi} - x'_{di})i_{di}i_{qi}$ 'ye eşittir. Makine ve uyarmalara ilişkin (6.1)-(6.4) diferansiyel denklemlerin Simulink ortamında modellenmesi Şekil 6.1'de detaylı ve anlaşılır şekilde verilmiştir. Şekil 6.1'de **Scope deltas** rotor açılarını derece cinsinden ve **Scope Speed Deviations** hız değişimlerini lineer olmayan zaman domeni simülasyonlarında görüntüler. Buna benzer şekilde, bu geliştirilmiş model sayesinde istediğimiz herhangi bir işaretten kolaylıkla çıkış alabilmekteyiz.



Şekil 6.1 : Simulink bloklarla güç sisteminin lineer olmayan diferansiyel denklemlerinin modellenmesi.

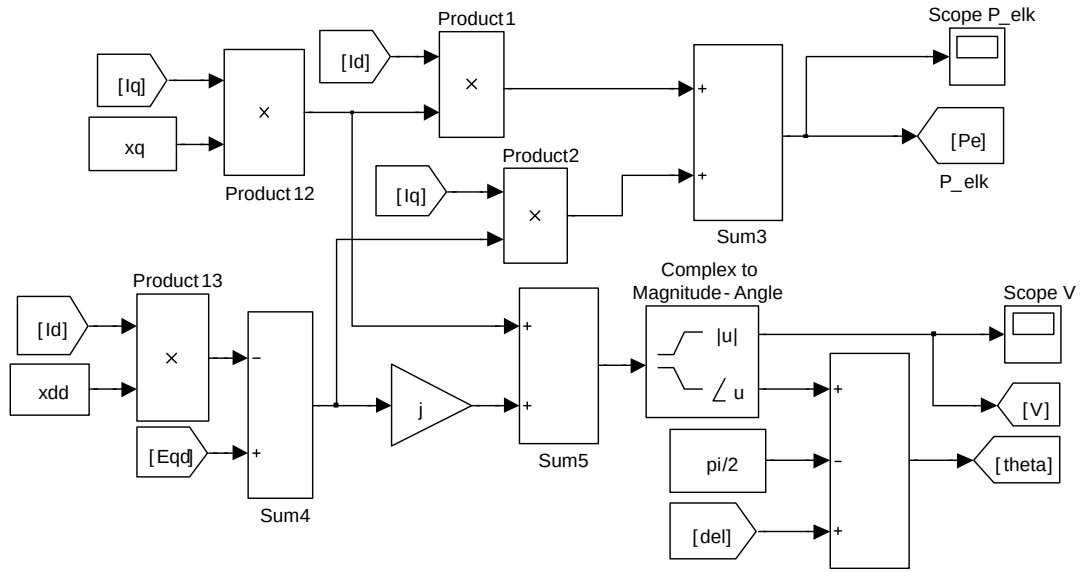
6.2 Stator Cebirsel Denklemlerin Modellenmesi

Çok makinalı güç sistemlerine ilişkin lineer olmayan stator cebirsel denklemleri yeniden yazarsak [45];

$$V_i \sin(\delta_i - \theta_i) + r_{si} i_{di} - x_{qi} i_{qi} = 0 \quad (6.5)$$

$$E'_{qi} - V_i \cos(\delta_i - \theta_i) - r_{si} i_{qi} - x'_{di} i_{di} = 0 \quad (6.6)$$

(6.5) ve (6.6) denklemlerin Simulink blokları kullanılarak modellenmesi Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2 : Stator cebirsel denklemlerin Simulink bloklarla modellenmesi.

Yukarıdaki şekilden görüleceği gibi, **Scope P_elk** elektriksel güç çıkışını ve **Scope V** uç gerilim çıkışlarını lineer olmayan zaman domen simülasyonlarında ekrana yansıtmaktadır.

6.3 Şebeke Denklemlerinin Modellenmesi

Şebeke denklemlerinde, küçük işaret kararlılık analizi yapmak için güç denge formu daha çok kullanılmasına rağmen, geçici hal kararlılık analizi yapabilecek bir program yazımında daha çok akım denge formu kullanılmaktadır. Şebeke denklemleri generatör ve yük baraları için akım denge formunda (current-balance form) aşağıdaki gibi ifade edilebilir [45]:

$i = 1, \dots, m$ generatör baraları için

$$(i_{di} + ji_{qi})e^{j(\delta_i - \pi/2)} + \frac{P_{Li}(V_i) - jQ_{Li}(V_i)}{V_i e^{-j\theta_i}} = \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k e^{j(\alpha_{ik} + \theta_k)} \quad (6.7)$$

$i = m+1, \dots, n$ yük baraları için

$$\frac{P_{Li}(V_i) - jQ_{Li}(V_i)}{V_i e^{-j\theta_i}} = \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k e^{j(\alpha_{ik} + \theta_k)} \quad (6.8)$$

Burada, yüklerin sabit empedans tipi olduğu varsayımı yapılırsa;

$$\begin{aligned} P_{Li}(V_i) &= k_P V_i^2 \\ Q_{Li}(V_i) &= k_Q V_i^2 \end{aligned} \quad (6.9)$$

O zaman

$$P_{Li}(V_i) + jQ_{Li}(V_i) = (k_P + jk_Q) V_i^2 \quad (6.10)$$

$\bar{I}_{Li}$ ise enjekte edilen akım olmak üzere $(P_{Li} + jQ_{Li}) = \bar{V}_i \bar{I}_{Li}^*$ eşitliğinden

$$\bar{V}_i \bar{I}_{Li}^* = (k_P + jk_Q) V_i^2 \quad (6.11)$$

$V_i^2 = \bar{V}_i \bar{V}_i^*$ eşitliğini kullanıp ve denklem (6.11)'in eşleniğini alırsak aşağıdaki denklemi elde ederiz;

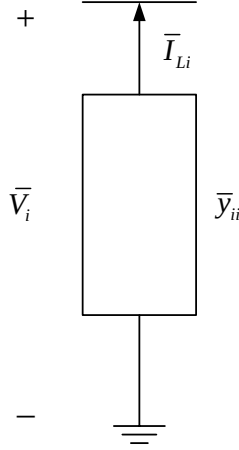
$$(k_{Pi} - jk_{Qi}) = \frac{\bar{I}_{iL}}{\bar{V}_i} = -\bar{y}_{ii} \quad (6.12)$$

$\bar{V}_i$ ve $\bar{I}_{Li}$ 'nin yönlerinden dolayı denklem (6.12)'deki $\bar{y}_{ii}$ yük admitansının işareti negatiftir. Bu Şekil 6.3'ten de doğrulanabilir:

$$\frac{P_{Li}(V_i) - jQ_{Li}(V_i)}{\bar{V}_i^*} = \bar{I}_{Li} = -\bar{y}_{ii} \bar{V}_i \quad (6.13)$$

Bu nedenle,

$$\bar{y}_{ii} = -\frac{P_{Li}(V_i) - jQ_{Li}(V_i)}{V_i^2} \quad (6.14)$$



Şekil 6.3 : Yük admitans gösterimi.

$\bar{y}_{ii}$ yüklerden kaynaklanan kompleks admitanstır. $i = 1, \dots, m$ için $\bar{I}_i = (i_{di} + j i_{qi}) e^{j(\delta_i - \pi/2)}$ olduğundan ve denklem (6.13)'ü kullanarak, (6.7) ve (6.8) nolu şebeke denklemleri şu hale gelir.

$$\bar{I}_i = \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k e^{j(\alpha_{ik} + \theta_k)} + \bar{y}_{ii} V_i e^{j\theta_i} \quad i = 1, \dots, m \quad (6.15)$$

$$0 = \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k e^{j(\alpha_{ik} + \theta_k)} + \bar{y}_{ii} V_i e^{j\theta_i} \quad i = m+1, \dots, n \quad (6.16)$$

Dolayısıyla,

$$\bar{I}_i = \sum_{k=1}^n Y'_{ik} V_k e^{j(\alpha'_{ik} + \theta_k)} \quad i = 1, \dots, m \quad (6.17)$$

$$0 = \sum_{k=1}^n Y'_{ik} V_k e^{j(\alpha'_{ik} + \theta_k)} \quad i = m+1, \dots, n \quad (6.18)$$

olur. Burada,

$$Y'_{ik} e^{j\alpha'_{ik}} = Y_{ik} e^{j\alpha_{ik}} \quad i \neq k$$

$$Y'_{ik} e^{j\alpha'_{ik}} = Y_{ik} e^{j\alpha_{ik}} + \bar{y}_{ii}$$

Denklem (6.17) ve (6.18) matris formda şöyle yazılır,

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \vdots \\ \bar{I}_m \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = [\bar{\mathbf{Y}}'] \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \vdots \\ \bar{V}_n \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

Buradaki $\bar{I}_1, \dots, \bar{I}_m$ generatör baralarına giren kompleks generatör akımlarıdır.

Değiştirilmiş $\bar{\mathbf{Y}}_{\text{bus}}$ yerine bölünmüş $\bar{\mathbf{Y}}'$ kullanılırsa;

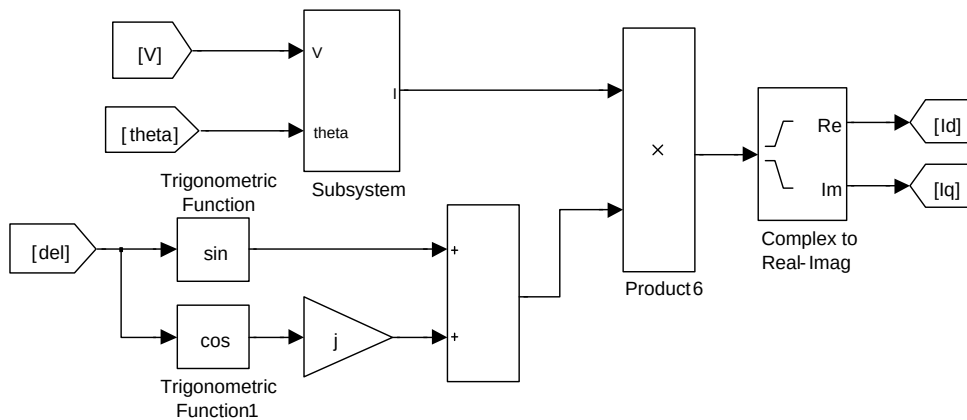
$$[\bar{\mathbf{Y}}'] = \begin{matrix} m & n-m \\ \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{Y}}_1 & \bar{\mathbf{Y}}_2 \\ \bar{\mathbf{Y}}_3 & \bar{\mathbf{Y}}_4 \end{bmatrix} \\ n-m \end{matrix} \quad (6.20)$$

$m+1, \dots, n$ baralarında enjekte edilen akım olmadığı için, onları yok edersek aşağıdaki ifade elde edilir;

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \vdots \\ \bar{I}_m \end{bmatrix} = [\bar{\mathbf{Y}}_{\text{red}}] \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \vdots \\ \bar{V}_n \end{bmatrix} \quad (6.21)$$

Burada, $\bar{\mathbf{Y}}_{\text{red}} = (\bar{\mathbf{Y}}_1 - \bar{\mathbf{Y}}_2 \bar{\mathbf{Y}}_4^{-1} \bar{\mathbf{Y}}_3)$ istenilen indirgenmiş matristir. Üzerinde çalışılan çok makinalı güç sistemleri için, şebekedeki her türlü arıza (arıza öncesi, arıza esnası ve arıza sonrası) durumları için $\bar{\mathbf{Y}}_{\text{red}}$ indirgenmiş matrisleri hesaplanır (bu işlevleri yapılabilecek MATLAB *m* dosyası hazırlanmıştır).

(6.21) şebeke denkleminin Simulink ortamında modellenmesi Şekil 6.4'te detaylı olarak gösterilmiştir.



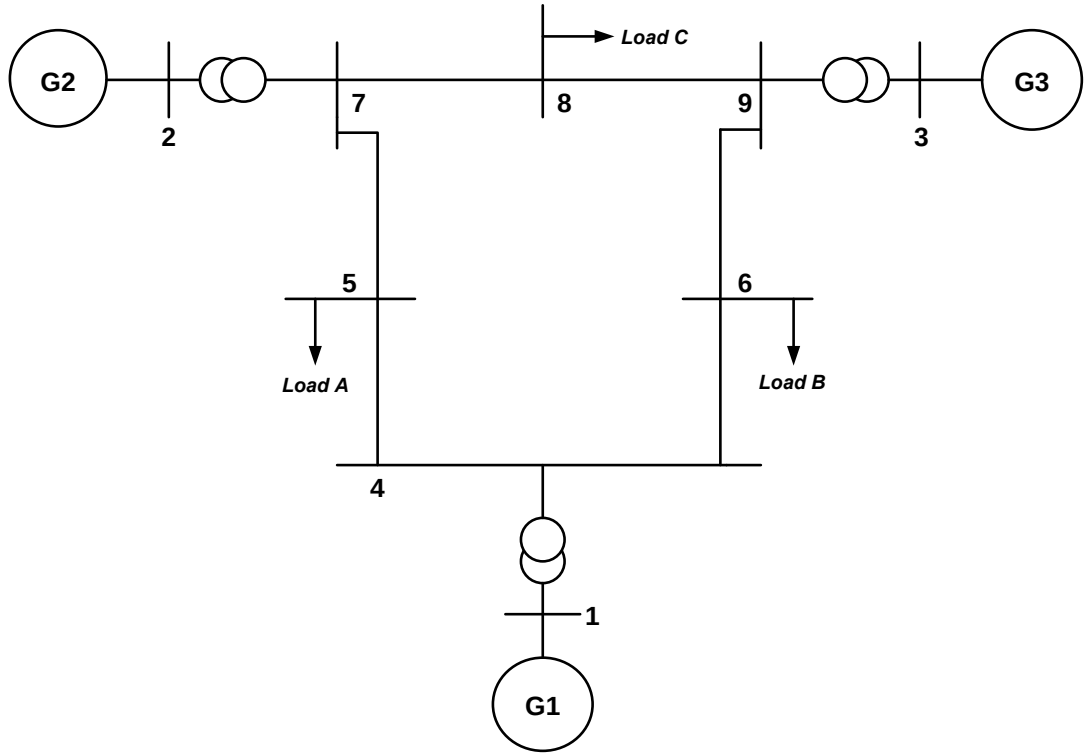
Şekil 6.4 : Simulink bloklarla şebeke denklemlerinin modellenmesi.

[illegible]

67

7. TEST SİSTEM 1 VE SONUÇLAR

Tezin bu kısmında, geliştirilen aşağıdaki genelleştirilmiş programların Şekil 7.1’de gösterilen 3 makinalı 9 baralı Western System Coordinating Council (WSCC) [45,60] güç sistemi üzerindeki etkinliği gösterilmiştir. Bu sistemin frekansı 60 Hz ve 100 MVA temel büyük olarak alınmıştır. 3 makinalı 9 baralı güç sisteminin bara, hat, generatör ve uyarma verilerin düzenlenmiş hali **EK A**’da verilmiştir.



Şekil 7.1: 3 makinalı 9 baralı WSCC sistemi.

- Genelleştirilmiş Yük Akış Analizi Programı (MATLAB m-dosya tabanlı)
- Genelleştirilmiş Küçük İşaret Kararlılık Analizi Programı (MATLAB m-dosya tabanlı)
- Genelleştirilmiş Güç Sistem Kararlı Kılıcı (PSS) Tasarım Programı (MATLAB m-dosya tabanlı)
- Genelleştirilmiş Sezgisel Yöntemlerin Güç Sistemlerine Uygulaması Programı (PSO ve ABC) (MATLAB m-dosya tabanlı)
- Genelleştirilmiş Geçici Hal Kararlılık Analizi Programı (Simulink tabanlı)

7.1 Yük Akış Analizi

Genelleştirilmiş Yük Akış Analizi Programı kullanılarak 3 makinalı 9 baralı örnek gc sisteminin yük akış sonuçları izelge 7.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 7.1 : 3 makinalı sistemin yük akış sonuçları.

Bara No	Tür	Gerilim	Açı (Derece)	$-P_L$	$-Q_L$	P_G	Q_G
1	gevşek	1.0400	0	0	0	0.7164	0.2705
2	PV	1.0250	9.2800	0	0	1.6300	0.0665
3	PV	1.0250	4.6648	0	0	0.8500	-0.1086
4	PQ	1.0258	-2.2168	0	0	0	0
5	PQ	0.9956	-3.9888	1.2500	0.5000	0	0
6	PQ	1.0127	-3.6874	0.9000	0.3000	0	0
7	PQ	1.0258	3.7197	0	0	0	0
8	PQ	1.0159	0.7275	1.0000	0.3500	0	0
9	PQ	1.0324	1.9667	0	0	0	0

7.2 Küçük İşaret Kararlılık Analizi

Bu bölümde, genelleştirilmiş küçük işaret kararlılık analizi programından faydalanılmıştır. rnek gc sistemi için, gerekli adımlar (Adım 1-8) uygulanarak bulunan başlangıç çalışma noktaları izelge 7.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 7.2 : 3 makinalı gc sistemi için başlangıç çalışma noktaları.

Makine	δ_0	i_{d0}	i_{q0}	E'_{q0}	E_{fd0}	V_{ref0}	P_{m0}
1	3.5857	0.3026	0.6712	1.0564	1.0821	1.0508	0.7164
2	61.0985	1.2901	0.9320	0.7882	1.7893	1.0429	1.6300
3	54.1366	0.5615	0.6194	0.7679	1.4030	1.0390	0.8500

rnek gc sisteminin kontrolsüz (gc sistemi kararlı kılıcı yokken, açık çevrim hali) alışma durumundayken sistemin özdeğerleri, sönüm oranları ve frekansları izelge 7.3’te detaylı olarak belirtilmiştir.

Çizelge 7.3 : Kontrolsüz sistemin özdeğerleri, sönüm oranları ve frekansları.

Mod	Özdeğer (λ)	Sönüm Oranı (ζ)	Frekans (f)
1	-0.3831 + 7.8846i	0.0485	1.2563
2	-0.3831 - 7.8846i	0.0485	1.2563
3	-1.3738 + 11.7499i	0.1161	1.8828
4	-1.3738 - 11.7499i	0.1161	1.8828
5	0.0000	-----	0.0000
6	0.0000	-----	0.0000
7	-9.8638 + 13.6643i	0.5853	2.6822
8	-9.8638 - 13.6643i	0.5853	2.6822
9	-9.9194 + 6.4142i	0.8397	1.8800
10	-9.9194 - 6.4142i	0.8397	1.8800
11	-12.7012	1.0000	2.0215
12	-5.5006	1.0000	0.8754

Çizelgeden de anlaşılacağı gibi PSS'siz sistemin özdeğer sayısı $4m=12$ 'tir (m makine sayısını ve 4 durum değişkeni sayısını göstermektedir) ve bu özdeğerlerin 6'sı elektromekanik salınım mod özdeğerleri olup Çizelge 7.4'te tablo hale getirilmiştir (iki sıfır özdeğer gösterilmemiştir).

Çizelge 7.4 : Kontrolsüz sistemin elektromekanik salınım modları.

Mod	Özdeğer	Sönüm Oranı	Frekans	Baskın Makinalar
1,2	-0.3831 ± 7.8846i	0.0485	1.2563	2
3,4	-1.3738 ± 11.7499i	0.1161	1.8828	3

7.3 Amaç Fonksiyonu ve PSS parametrelerinin optimizasyonu

Tasarım kriteri olarak $\xi_0 = 0.05$ ve $\sigma_0 = -0.5$ alındığında; sadece Mod 1 ve 2 elektromekanik salınım mod özdeğerleri istenilen bölge dışında olduğu için, sadece 1 eşlenik karmaşık özdeğerler için PSS tasarlanır. Bu özdeğerlere ait baskın makinalara PSS yerleştirilmesi gerekiyor. Çizelge 7.4'ten anlaşılacağı gibi sadece 2 nolu makinaya PSS yerleştirilmesi gerekmektedir.

PSOPSS (kontrolör parametreleri PSO algoritması ile optimize edilen PSS'li sistem) ve ABCPSS (kontrolör parametreleri ABC algoritması ile optimize edilen PSS'li sistem) tasarlanacaktır. Tasarım problemi için zaman domeninde çoklu bir amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlandı.

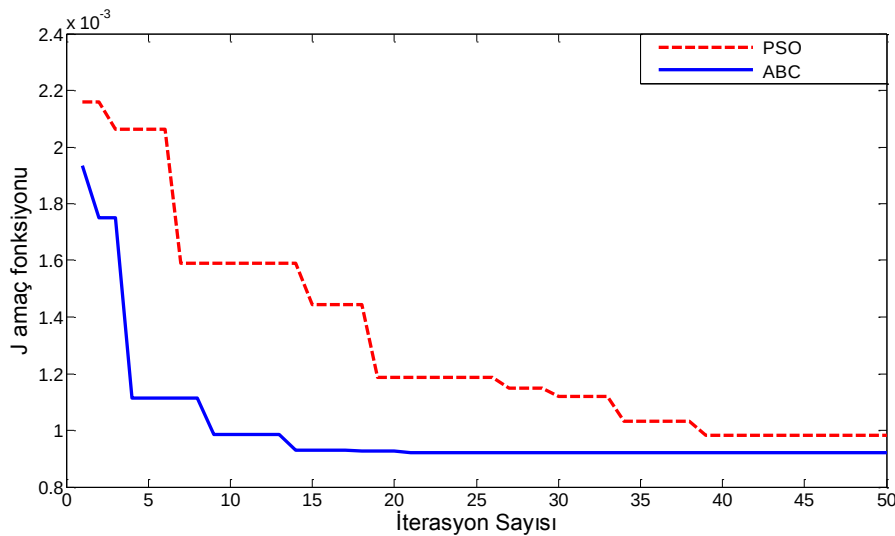
$$ISTSE = \sum_{i=1}^m \int_0^{t_{sim}} (t\omega_{i-1})^2 dt \quad (7.1)$$

$$J = \sum_{j=1}^{NP} ISTSE \quad (7.2)$$

Burada ISTSE (Integral of Squared Time multiplied by Squared Error), hatanın karesinin zamanın karesi ile çarpımının integralidir. t_{sim} , simülasyon süresini, m makine sayısını, $\omega_{i-1} = \omega_i - \omega_1$ (ω_1 seçilen referans işaretidir) ve NP optimizasyonun yürütüleceği senaryo sayısını göstermektedir. J amaç fonksiyonu simülasyon periyodu boyunca yürütülür ve sistemin oturma zamanı ve aşımını düzeltmesi için bu amaç fonksiyonunun minimum hale getirilmesi gereklidir. Bu tasarım probleminde optimize edilen kontrolör parametre sayısı 5'dir ve iterasyon sayısı 50 olarak alınmıştır. Bu optimizasyon probleminin çözümü ve en uygun PSS parametrelerinin bulunması için, bu önerilen yaklaşım ile PSO ve ABC algoritmaları çalıştırılır. Parametreleri PSO ve ABC teknikleri ile optimize edilen PSS'li sistemin en uygun parametre değerleri Çizelge 7.5'te verilmiştir. Şekil 7.2 PSO ve ABC metotlarını ayrı ayrı kullanarak J çoklu amaç fonksiyonunun yaklaşımını iterasyon sayısına bağlı olarak göstermektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere ABCPSS'nin PSOPSS'den daha üstün bir performans gösterdiği görülmektedir.

Çizelge 7.5 : PSO ve ABC tekniklerini kullanarak bulunan PSS parametreleri.

Optimizasyon Tekniği	Gen.	K_p	T_1	T_2	T_3	T_4
PSO	G2	11.5714	0.8778	0.4070	0.8695	0.0100
ABC	G2	7.7360	0.2948	0.1852	0.5240	0.0100



Şekil 7.2 : J çoklu amaç fonksiyonun iterasyon sayısı ile yaklaşımı.

Önerilen J çoklu amaç fonksiyonu kullanılarak, PSS'nin parametreleri PSO ve ABC ile optimize edilen sistemin özdeğerleri ve o özdeğerlere karşılık düşen sönüm oranları ve frekansları sırasıyla Çizelge 7.6 ve Çizelge 7.7'de verilmiştir. Kalın ile gösterilen özdeğerler, elektromekanik salınım mod özdeğerlerini belirtmektedir.

Çizelge 7.6 : PSO ile optimize edilen sistemin özdeğerleri, sönüm oranları ve frekansları.

Mod	Özdeğer	Sönüm Oranı	Frekans
1	-0.75203 + 3.1461i	0.23249	0.5148
2	-0.75203 - 3.1461i	0.23249	0.5148
3	-2.2663 + 10.339i	0.21411	1.6846
4	-2.2663 - 10.339i	0.21411	1.6846
5	0.0000	-----	0.0000
6	0.0000	-----	0.0000
7	-2.1915 + 41.654i	0.052539	6.6386
8	-2.1915 - 41.654i	0.052539	6.6386
9	-9.0178 + 11.12i	0.62986	2.2786
10	-9.0178 - 11.12i	0.62986	2.2786
11	-8.7487 + 3.6166i	0.92415	1.5067
12	-8.7487 - 3.6166i	0.92415	1.5067
13	-115.6442	1.0000	18.405
14	-1.9246	1.0000	0.3063
15	-0.31759	1.0000	0.0506

Çizelge 7.7 : ABC ile optimize edilen sistemin özdeğerleri, sönüm oranları ve frekansları.

Mod	Özdeğer	Sönüm Oranı	Frekans
1	-1.6408 + 4.7206i	0.32831	0.7954
2	-1.6408 - 4.7206i	0.32831	0.7954
3	-2.6044 + 10.4803i	0.24117	1.7187
4	-2.6044 - 10.4803i	0.24117	1.7187
5	0.0000	-----	0.0000
6	0.0000	-----	0.0000
7	-6.704 + 25.695i	0.25245	4.2264
8	-6.704 - 25.695i	0.25245	4.2264
9	-8.758 + 10.658i	0.63489	2.1955
10	-8.758 - 10.658i	0.63489	2.1955
11	-8.6304 + 3.2446i	0.93604	1.4674
12	-8.6304 - 3.2446i	0.93604	1.4674
13	-105.66	1.0000	16.817
14	-4.1472	1.0000	0.6601
15	-0.29693	1.0000	0.0473

Elektromekanik salınım mod özdeğerlerine bakılarak, önerilen ABCPSS'nin önerilen PSOPSS'ye göre sistem sönümünü açıkça iyileştirdiği görülüyor.

7.4 Lineer Olmayan Zaman Domeninde Simülasyonlar

3 makinalı 9 baralı Western System Coordinating Council (WSCC) güç sisteminin geçici kararlılık analizinde, diferansiyel denklemlerin nümerik integrasyonu için Runge-Kutta 4 tekniği kullanıldı ve integrasyon adımı $\Delta t = 0.01$ saniye seçildi. Bu örnek güç sistemi için, 8 saniyelik (t_{sim}) lineer olmayan simülasyonlar için yaklaşık 1.12 saniyelik bir süre geçmiştir. Simülasyonlardaki noktalı mavi renkliler sistemin PSS'siz (kontROLSÜZ), kırmızı renkliler PSO ile optimize edilen PSS'li ve kalın mavi renkliler ABC ile optimize edilen PSS'li çalışma durumlarını gösterir. Genelleştirilmiş geçici kararlılık analizi programının etkinliğini doğrulamak için 2 farklı durum (4 farklı senaryo) göz önüne alınmıştır.

Çizelge 7.8 : Farklı arıza türleri için kritik temizleme zamanları.

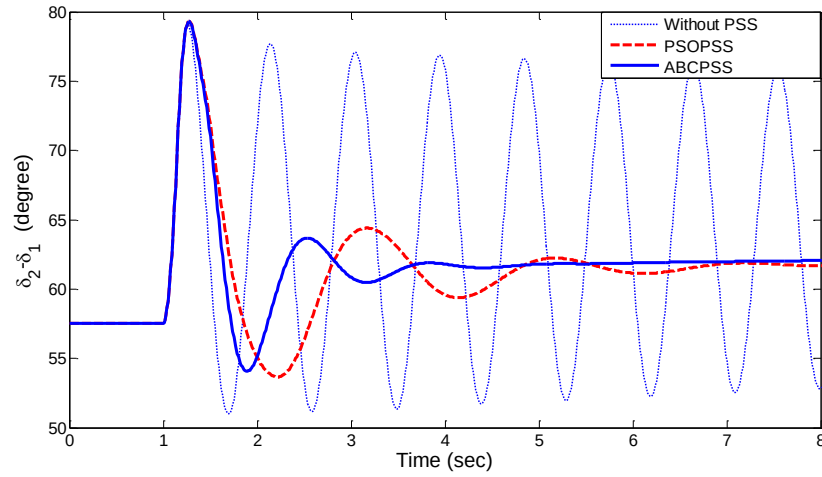
Arıza Türü	Kritik Temizleme Zamanı (saniye)		
	KontROLSÜZ	PSOPSS	ABCPSS
6-9 hattın devreden çıkarılması	0.202	0.432	0.451
7-5 hattın eskine haline dönmesi	0.167	0.220	0.224

Arıza olan hattın devreden çıkarılma durumu: Bu ciddi arıza durumunda, $t = 1$ saniyede (arızadan önceki sistem durumu daha açık görülsün diye) 6 nolu barada ve 6-9 hattının sonunda üç fazlı bir arıza olduğu düşünüldü. 6-9 hattı devreden çıkarılarak (line tripping) arıza giderildi. Sistemin kontROLSÜZ, PSO ve ABC algoritmalarıyla optimize edilen PSS kullanılarak çalışması durumları için kritik arıza temizleme süreleri Çizelge 7.8'de verilmiştir. Bu çizelgeden görüleceği gibi, sistem kontROLSÜZ haldeyken (PSS kullanılmadan) kritik temizleme zamanı $t_{cr} = 0.202$ s iken sistem kararlılık sınırındadır ve aynı zamanda ABC ile optimize edilen PSS'li sistemin (ABCPSS) kritik temizleme zamanı, PSO ile optimize edilen PSS'li sistemden (PSOPSS) büyüktür. Bu ciddi arıza durumu için iki farklı senaryo ele alınmıştır.

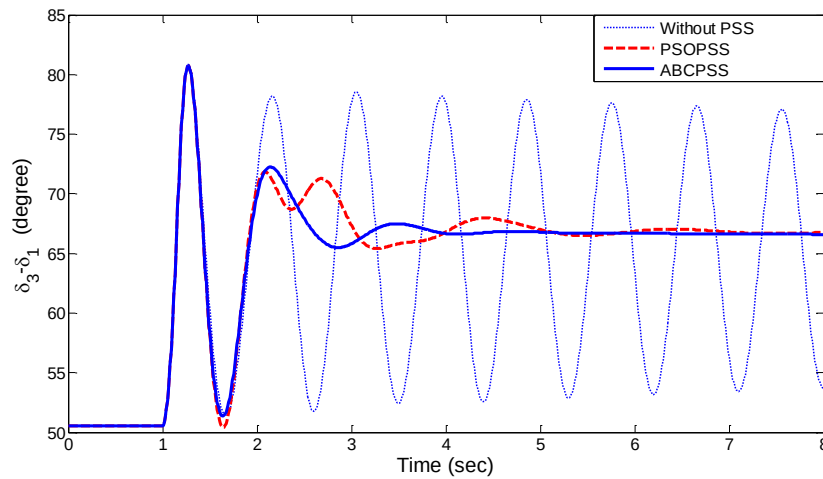
Senaryo 1: Arıza temizleme zamanının (t_f), kritik temizleme zamanından (t_{cr}) küçük olma durumu; $t_f = 0.15$ saniyelik (9 devir) arızanın olduğu düşünüldü (1.15'inci saniyede arıza gideriliyor).

Senaryo 2: Arıza temizleme zamanının (t_f), kritik temizleme zamanından (t_{cr}) büyük olma durumu; $t_f = 0.25$ saniyelik (15 devir) arızanın olduğu düşünöldü (1.25'inci saniyede arıza gideriliyor).

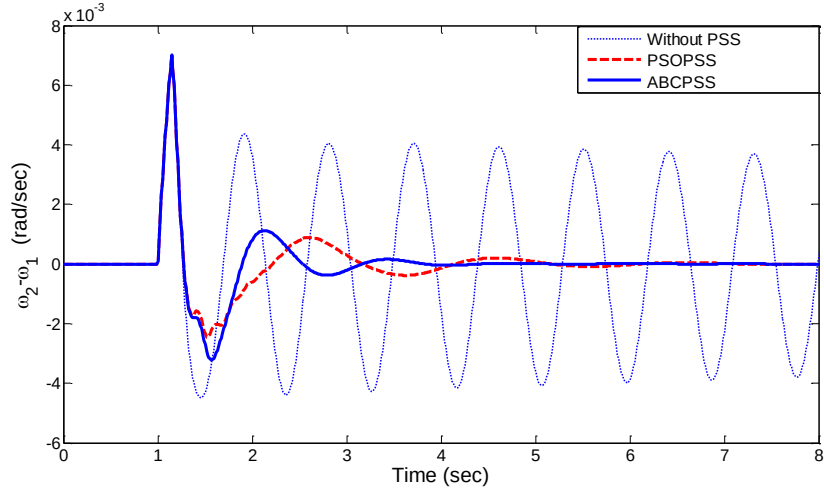
Senaryo 1 ve Senaryo 2 için tüm generatörlerinin sistem cevapları sırasıyla Şekil 7.3-7.9 ve Şekil 7.10-7.16'da verilmiştir. İki senaryo için sırasıyla, Şekil 7.3 ile 7.4 ve Şekil 7.10 ile 7.11 bağıl rotor açılarını ($\delta_2 - \delta_1$ ve $\delta_3 - \delta_1$); Şekil 7.5 ile 7.6 ve Şekil 7.12 ile 7.13 bağıl hız sapmalarını ($\omega_2 - \omega_1$ ve $\omega_3 - \omega_1$); Şekil 7.7-7.9 ve Şekil 7.14-7.16 elektriksel güç çıkışlarını (P_{e1} , P_{e2} ve P_{e3}) göstermektedir.



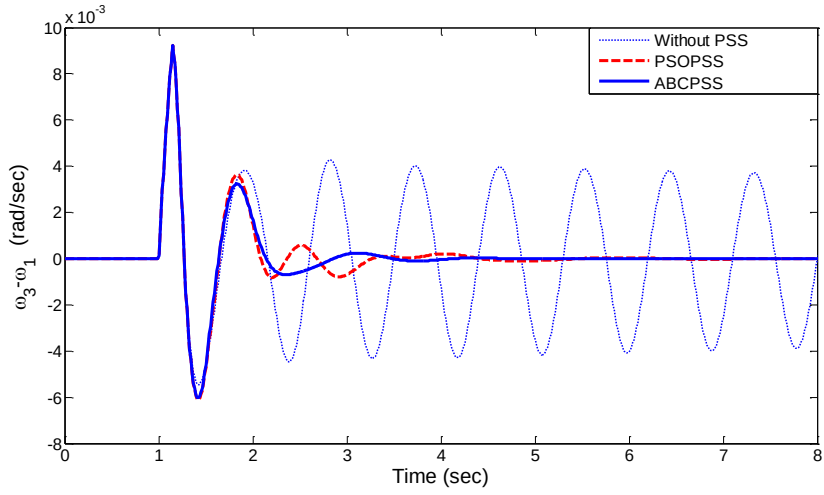
Şekil 7.3 : 3 makinalı sistemin Senaryo 1 için $\delta_2 - \delta_1$ 'in sistem cevabı.



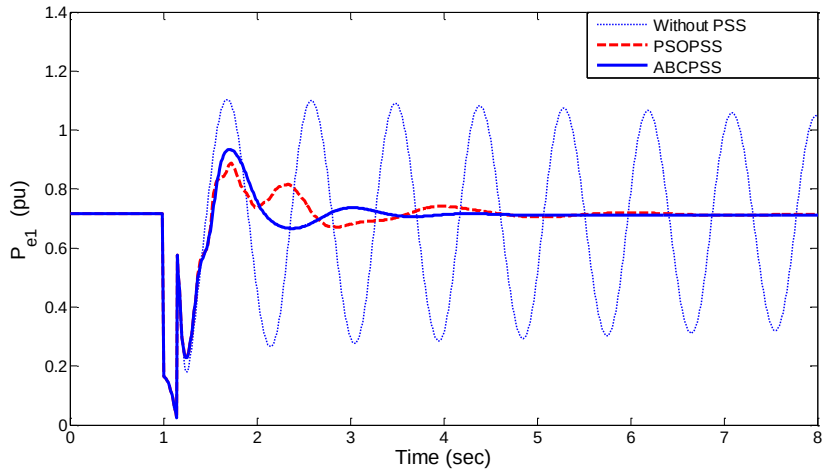
Şekil 7.4 : 3 makinalı sistemin Senaryo 1 için $\delta_3 - \delta_1$ 'in sistem cevabı.



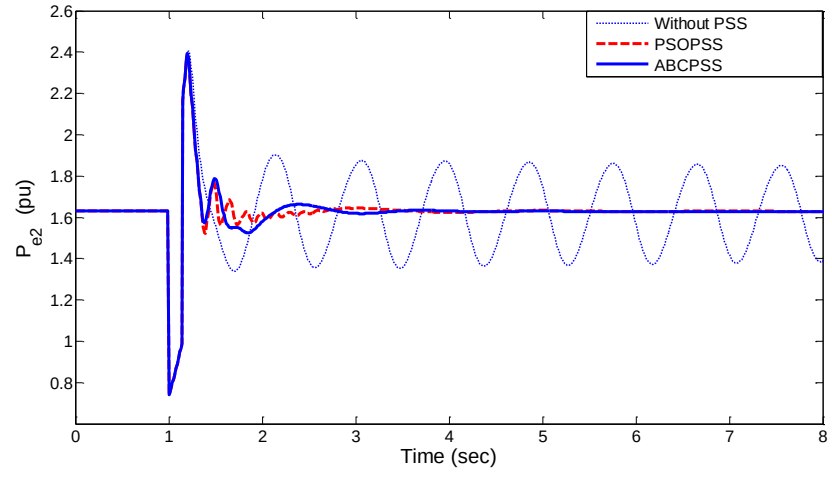
Şekil 7.5 : 3 makinalı sistemin Senaryo 1 için $\omega_2 - \omega_1$ 'in sistem cevabı.



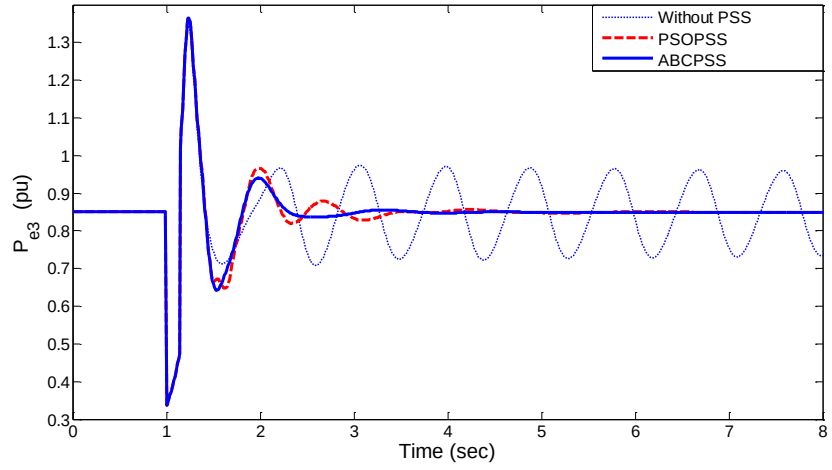
Şekil 7.6 : 3 makinalı sistemin Senaryo 1 için $\omega_3 - \omega_1$ 'in sistem cevabı.



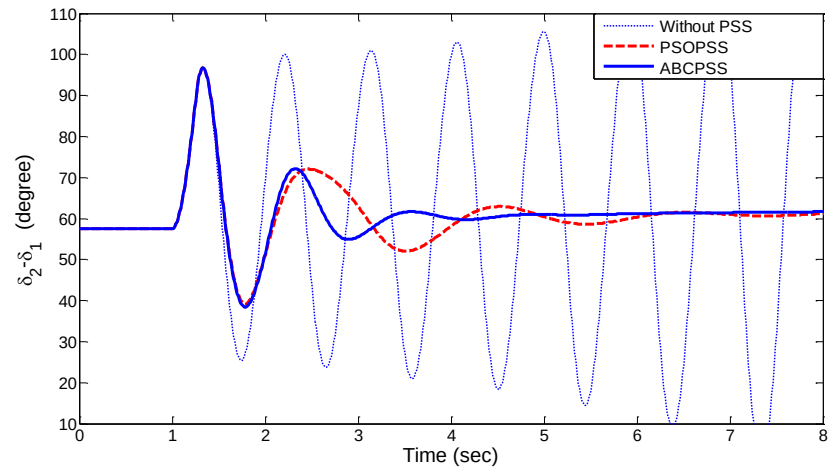
Şekil 7.7 : 3 makinalı sistemin Senaryo 1 için P_{e1} 'in sistem cevabı.



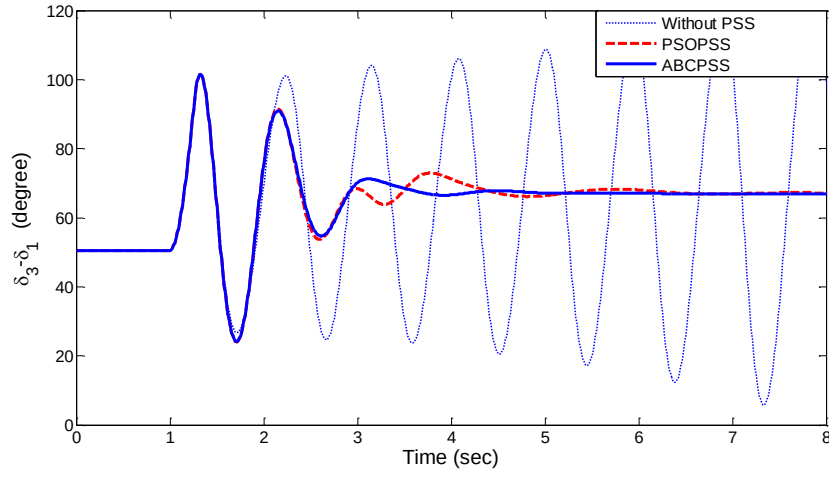
Şekil 7.8 : 3 makinalı sistemin Senaryo 1 için P_{e2} 'nin sistem cevabı.



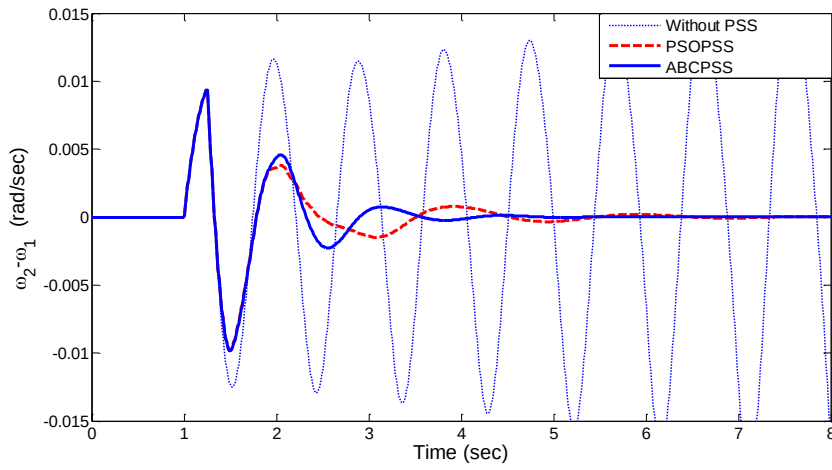
Şekil 7.9 : 3 makinalı sistemin Senaryo 1 için P_{e3} 'ün sistem cevabı.



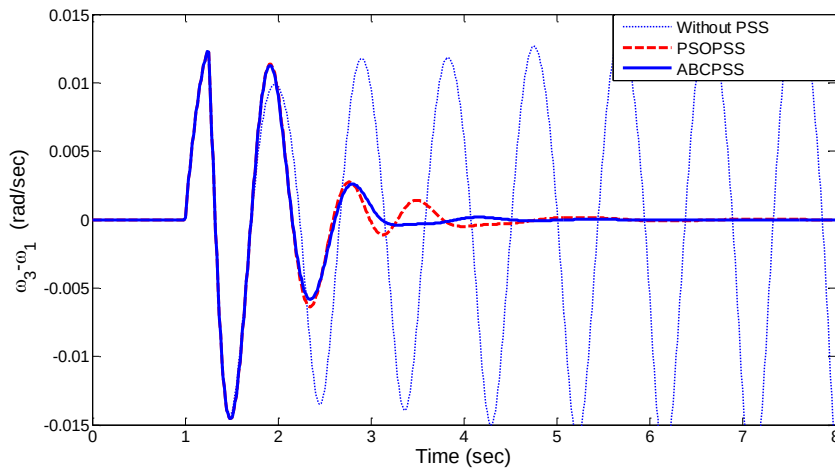
Şekil 7.10 : 3 makinalı sistemin Senaryo 2 için $\delta_2 - \delta_1$ 'in sistem cevabı.



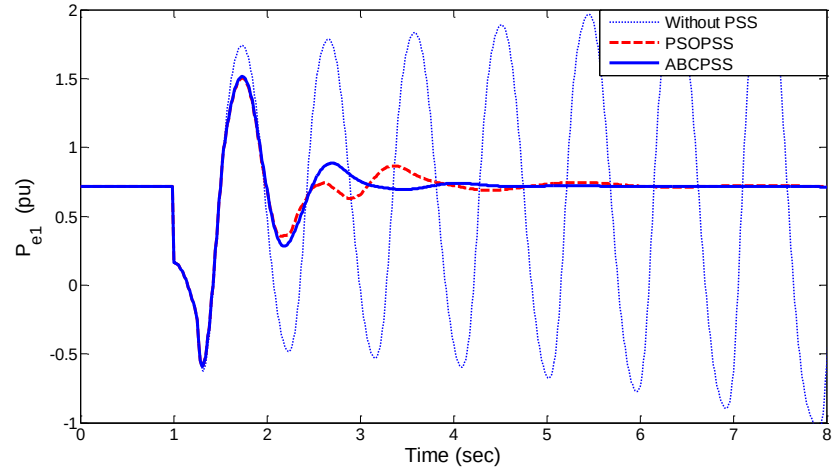
Şekil 7.11 : 3 makinalı sistemin Senaryo 2 için $\delta_3 - \delta_1$ ’in sistem cevabı.



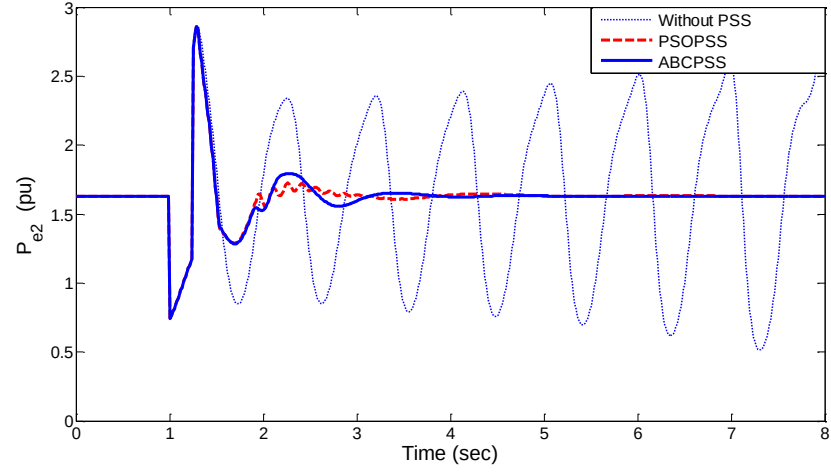
Şekil 7.12 : 3 makinalı sistemin Senaryo 2 için $\omega_2 - \omega_1$ ’in sistem cevabı.



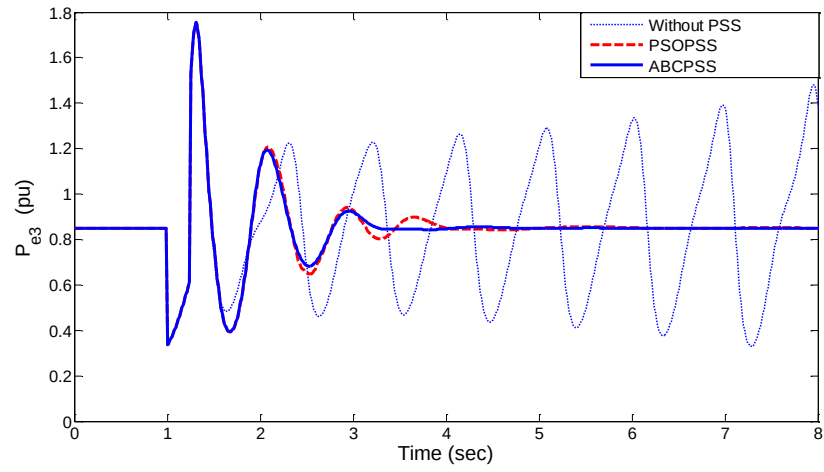
Şekil 7.13 : 3 makinalı sistemin Senaryo 2 için $\omega_3 - \omega_1$ ’in sistem cevabı.



Şekil 7.14 : 3 makinalı sistemin Senaryo 2 için P_{e1} 'in sistem cevabı.



Şekil 7.15 : 3 makinalı sistemin Senaryo 2 için P_{e2} 'nin sistem cevabı.



Şekil 7.16 : 3 makinalı sistemin Senaryo 2 için P_{e3} 'ün sistem cevabı.

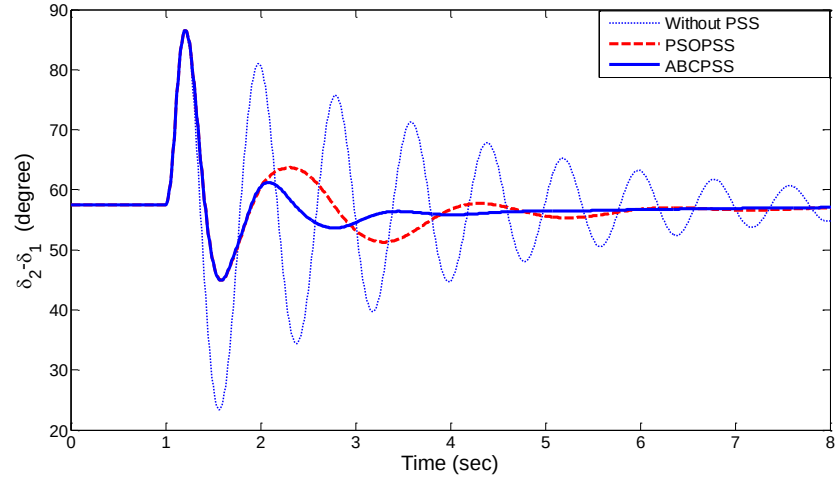
Simülasyon şekillerinden açıkça görüleceği gibi, sistem kontrolsüz haldeyken Senaryo 1’de kararlı ve sistem salınımları çok geç sönmesine rağmen, Senaryo 2’de kararsız hale gelmiştir. Bununla birlikte her iki senaryoda da parametreleri PSO ve ABC ile optimize edilen PSS’li sistemler (PSOPSS ve ABCPSS) kararlıdır ve ABCPSS sistem salınımlarını PSOPSS’den daha iyi söndürür.

Arıza olan hattın eski haline dönmesi durumu: Bu ciddi arıza durumunda, $t = 1$ saniyede (arızadan önceki sistem durumu daha açık görülsün diye) 7 nolu barada ve 7-5 hattının sonunda üç fazlı bir arıza olduğu düşünüldü. Arızalı 7-5 hattı yeniden devreye sokularak (without line tripping) arıza giderildi. Sistemin kontrolsüz, PSO ve ABC algoritmasıyla optimize edilen PSS kullanılarak çalışması durumları için kritik arıza temizleme süreleri Çizelge 7.8’de verilmiştir. Bu çizelgeden görüleceği gibi, sistem kontrolsüz haldeyken (PSS kullanılmadan) kritik temizleme zamanı $t_{cr} = 0.167$ s iken sistem kararlılık sınırındadır ve aynı zamanda ABC ile optimize edilen PSS’li sistemin kritik temizleme zamanı, PSO ile optimize edilen PSS’li sistemden büyüktür. Bu ciddi arıza durumu için iki farklı senaryo ele alınmıştır.

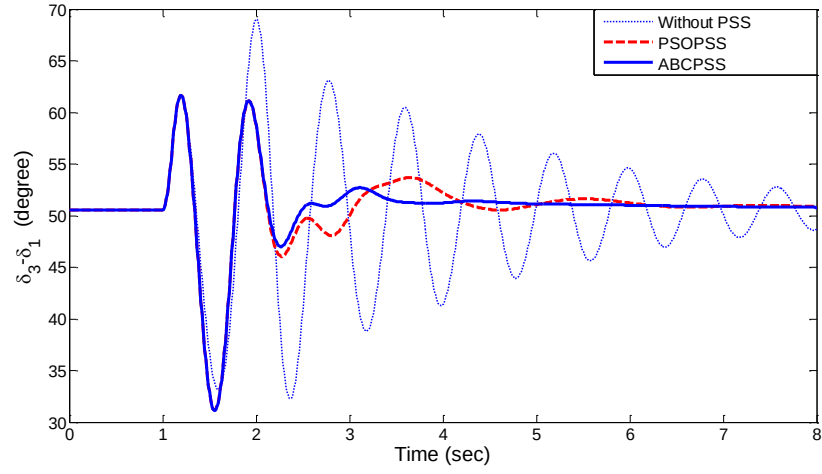
Senaryo 3: Arıza temizleme zamanının (t_f), kritik temizleme zamanından (t_{cr}) küçük olma durumu; $t_f = 0.10$ saniyelik (6 devir) arızanın olduğu düşünüldü (1.10’uncu saniyede arıza gideriliyor).

Senaryo 4: Arıza temizleme zamanının (t_f), kritik temizleme zamanından (t_{cr}) büyük olma durumu; $t_f = 0.20$ saniyelik (12 devir) arızanın olduğu düşünüldü (1.20’inci saniyede arıza gideriliyor).

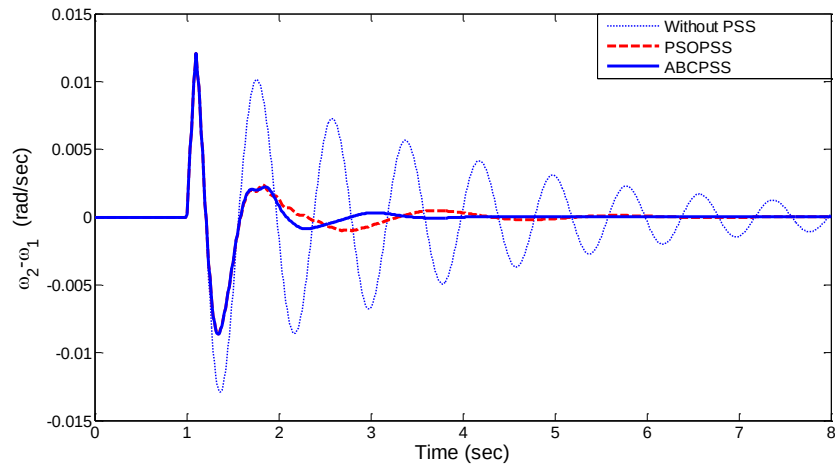
Senaryo 3 için tüm generatörlerin sistem cevapları Şekil 7.17-7.23 ve Senaryo 4 için tüm generatörlerin sistem cevapları Şekil 7.24-7.30’da verilmiştir. İki senaryo için sırasıyla, Şekil 7.17-7.18 ve Şekil 7.24-7.25 bağıl rotor açıları ($\delta_2 - \delta_1$ ve $\delta_3 - \delta_1$); Şekil 7.19-7.20 ve Şekil 7.26-7.27 bağıl hız sapmalarını ($\omega_2 - \omega_1$ ve $\omega_3 - \omega_1$); Şekil 7.21-7.23 ve Şekil 7.28-7.30 elektriksel güç çıkışlarını (P_{e1} , P_{e2} ve P_{e3}) göstermektedir.



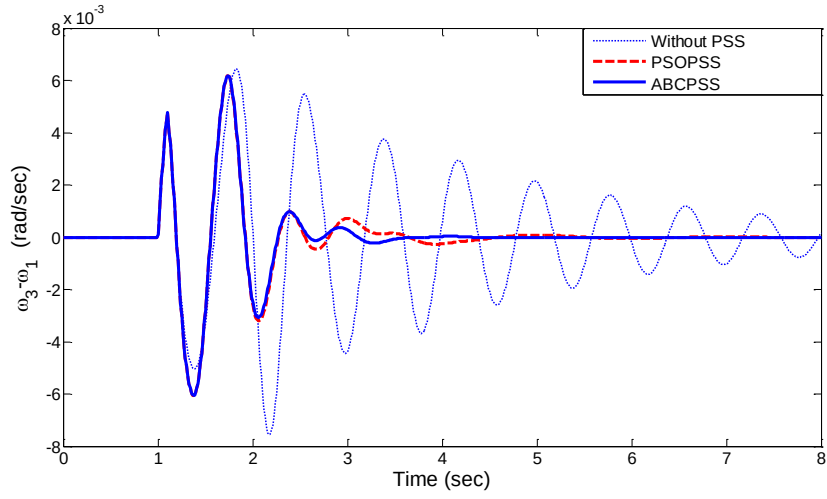
Şekil 7.17 : 3 makinalı sistemin Senaryo 3 için $\delta_2 - \delta_1$ 'in sistem cevabı.



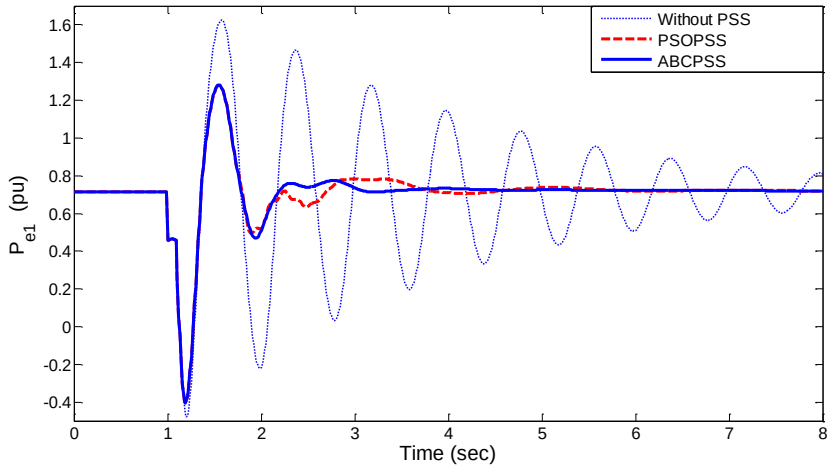
Şekil 7.18 : 3 makinalı sistemin Senaryo 3 için $\delta_3 - \delta_1$ 'in sistem cevabı.



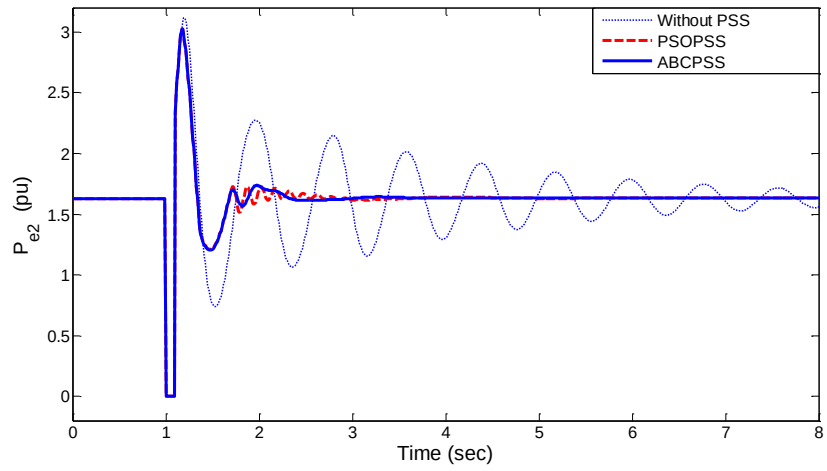
Şekil 7.19 : 3 makinalı sistemin Senaryo 3 için $\omega_2 - \omega_1$ 'in sistem cevabı.



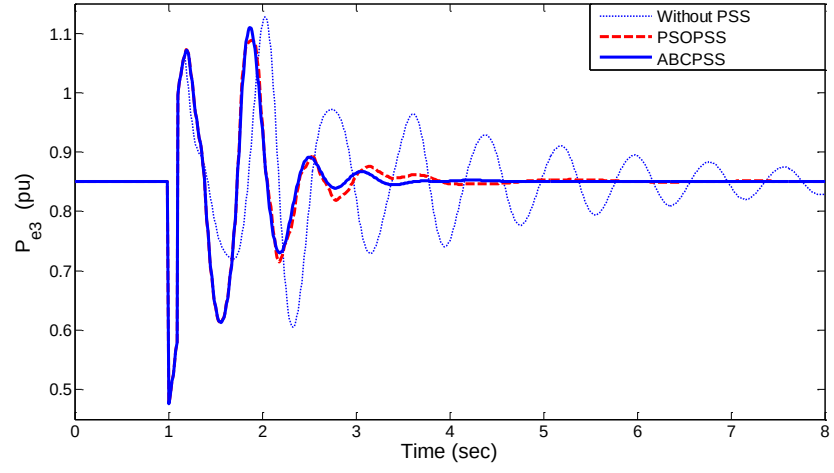
Şekil 7.20 : 3 makinalı sistemin Senaryo 3 için $\omega_3 - \omega_1$ 'in sistem cevabı.



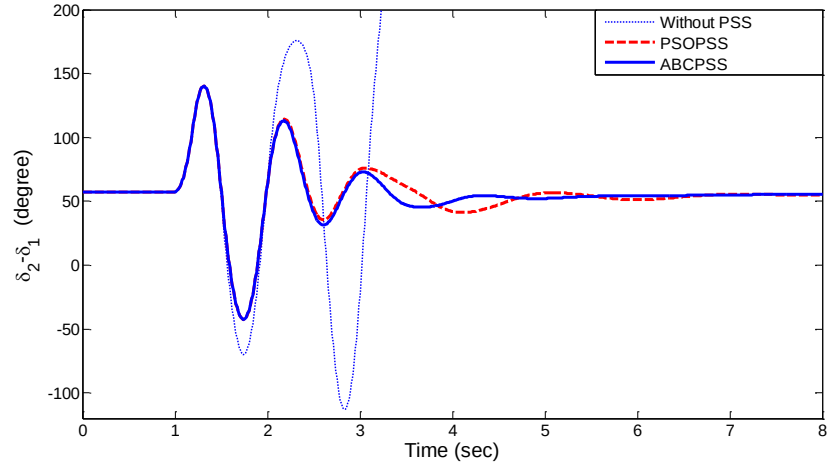
Şekil 7.21 : 3 makinalı sistemin Senaryo 3 için P_{e1} 'in sistem cevabı.



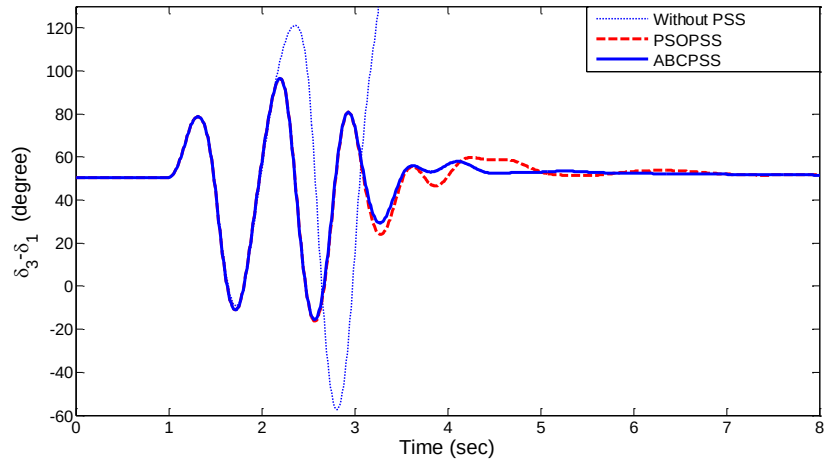
Şekil 7.22 : 3 makinalı sistemin Senaryo 3 için P_{e2} 'nin sistem cevabı.



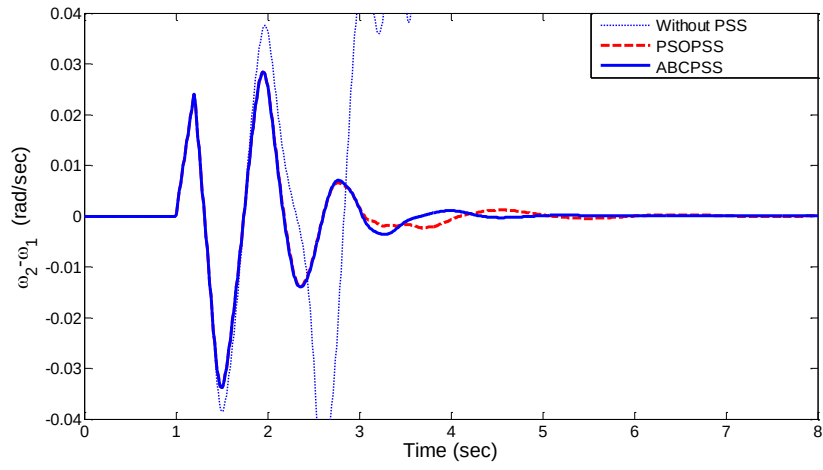
Şekil 7.23 : 3 makinalı sistemin Senaryo 3 için P_{e3} ’ün sistem cevabı.



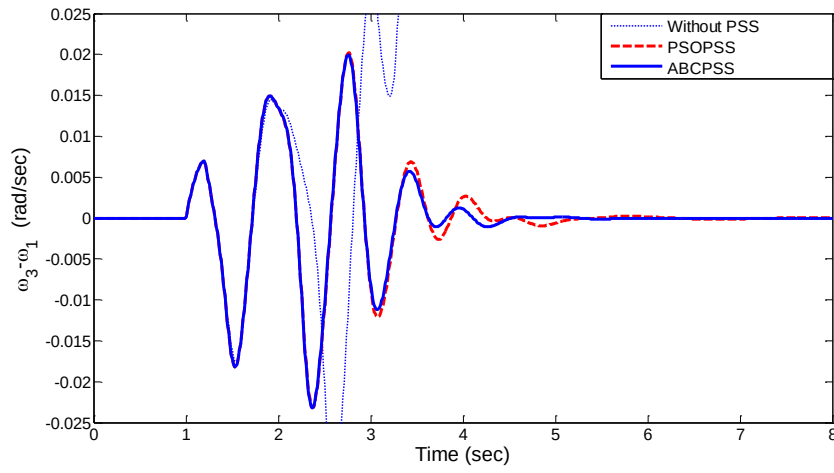
Şekil 7.24 : 3 makinalı sistemin Senaryo 4 için $\delta_2 - \delta_1$ ’in sistem cevabı.



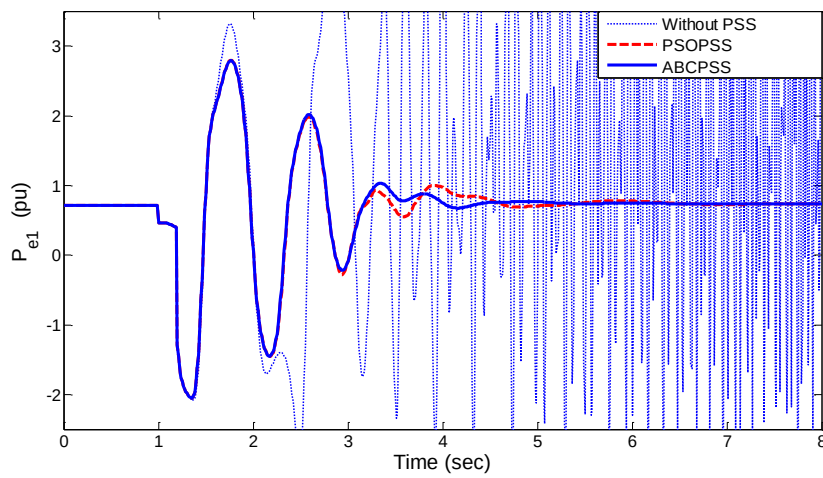
Şekil 7.25 : 3 makinalı sistemin Senaryo 4 için $\delta_3 - \delta_1$ ’in sistem cevabı.



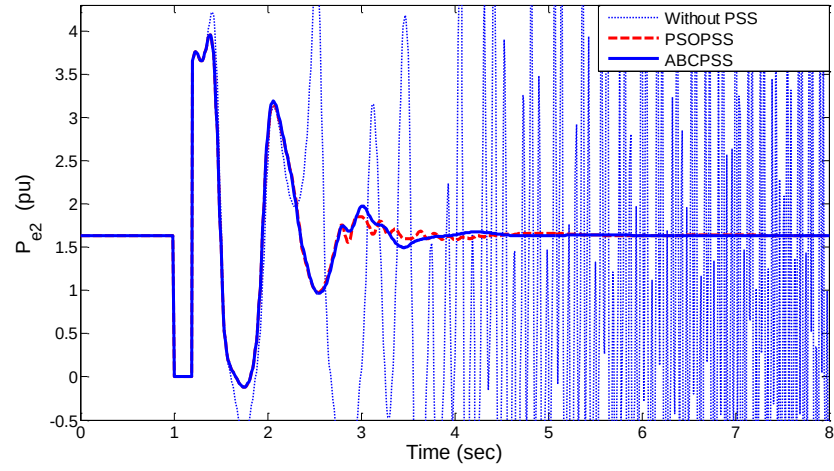
Şekil 7.26 : 3 makinalı sistemin Senaryo 4 için $\omega_2 - \omega_1$ 'in sistem cevabı.



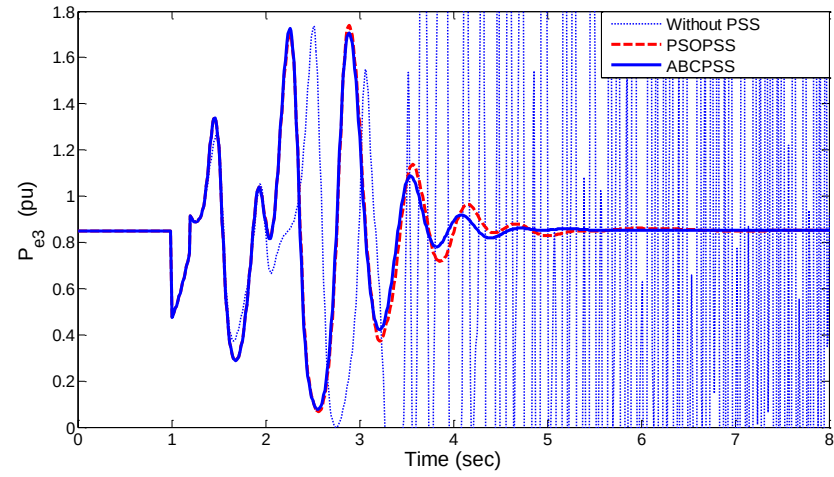
Şekil 7.27 : 3 makinalı sistemin Senaryo 4 için $\omega_3 - \omega_1$ 'in sistem cevabı.



Şekil 7.28 : 3 makinalı sistemin Senaryo 4 için P_{e1} 'in sistem cevabı.



Şekil 7.29 : 3 makinalı sistemin Senaryo 4 için P_{e2} 'nin sistem cevabı.



Şekil 7.30 : 3 makinalı sistemin Senaryo 4 için P_{e3} 'ün sistem cevabı.

Simülasyon sonuçlarından açıkça görüleceği gibi, sistem kontrolsüz haldeyken Senaryo 3'de kararlı ve sistem salınımları geç sönmesine rağmen, Senaryo 4'de kararsız hale gelmiştir. Bununla birlikte her iki senaryoda da parametreleri PSO ve ABC ile optimize edilen PSS'li sistemler (PSOPSS ve ABCPSS) kararlıdır ve ABCPSS sistem salınımlarını PSOPSS'den daha iyi söndürür.

Şekil 7.3-7.30 simülasyon sonuçlarına göre, arıza temizleme zamanı (t_f) güç sistemlerinin geçici kararlılığını belirlemek için en önemli faktördür. Sistemin tüm özdeğerleri sol kısımda (özdeğerlerin reel kısmı negatif olduğu) olması şartıyla; arıza temizleme zamanı (t_f), kritik temizleme zamanından (t_{cr}) küçükse sistem kararlıdır ve büyükse sistem kararsızdır denir.

7.5 Performans İndeksi Analizi

Kontrolör parametreleri PSO ve ABC ile optimize edilen PSS'li güç sistemlerinin (PSOPSS ve ABCPSS) performans indeks analizi bazı karşılaştırma indeksleri kullanılarak yapıldı ve bu indeksler aşağıda verilmiştir.

$$PI_1 = 10^4 \times ISE = 10^4 \times \sum_{i=2}^m \int_0^{t_{sim}} (\omega_i - \omega_1)^2 dt \quad (7.3)$$

$$PI_2 = 10^2 \times IAE = 10^2 \times \sum_{i=2}^m \int_0^{t_{sim}} |\omega_i - \omega_1| dt \quad (7.4)$$

$$PI_3 = 10^2 \times ITAE = 10^2 \times \sum_{i=2}^m \int_0^{t_{sim}} t |\omega_i - \omega_1| dt \quad (7.5)$$

$$PI_4 = 10^4 \times ITSE = 10^4 \times \sum_{i=2}^m \int_0^{t_{sim}} t (\omega_i - \omega_1)^2 dt \quad (7.6)$$

Yukarıdaki eşitliklerde simülasyon süresi $t_{sim} = 8$ saniye ve makine sayısı $m = 3$ alınmıştır. Lineer olmayan zaman domenli tabanlı 4 farklı performans indeksi kullanılarak, 4 farklı senaryo için PSOPSS ve ABCPSS sistemlerin performanslarının nümerik sonuçları Çizelge 7.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 7.9: PSO ve ABC ile optimize edilen sistemin performans indekslerinin değerleri.

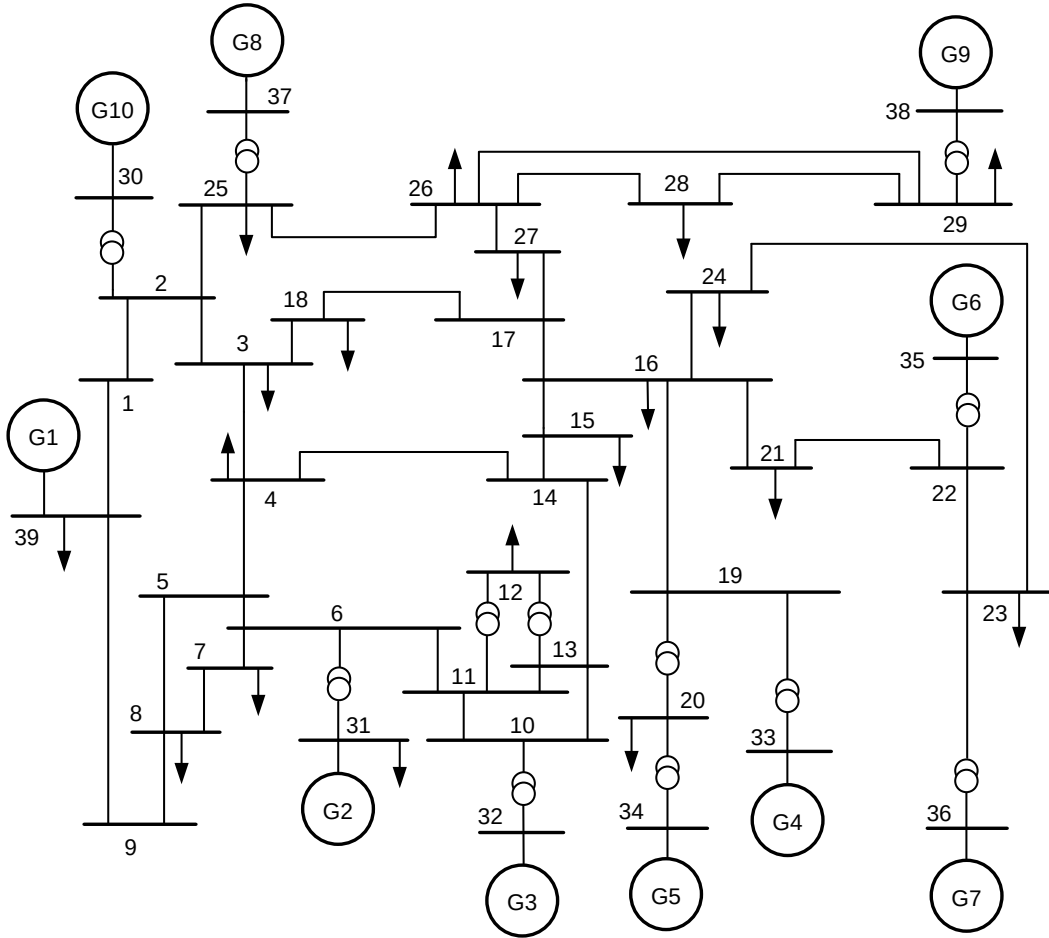
Arıza Durumu	Optimizasyon Tekniği	Karşılaştırma İndeksleri			
		PI_1	PI_2	PI_3	PI_4
Senaryo 1	PSO	0.2639	0.7719	0.6687	0.0981
	ABC	0.2632	0.7075	0.4396	0.0915
Senaryo 2	PSO	1.3941	2.0468	2.0739	0.8716
	ABC	1.3888	1.9186	1.5785	0.8437
Senaryo 3	PSO	0.4306	0.9999	0.8642	0.1810
	ABC	0.4247	0.8948	0.5616	0.1677
Senaryo 4	PSO	8.0540	5.3767	6.6603	7.6757
	ABC	7.9705	5.1613	5.8611	7.4584

Önerilen ABCPSS'nin bu indekslerdeki değerlerinin PSOPSS'nin değerlerinden daha küçük olduğu çizelgeden açık bir şekilde görülüyor. Bu sonuçlara göre, ABCPSS kullanarak sistem cevabının yerleşme zamanı, aşımı ve bütün makinalardaki hız sapmalarının önemli ölçüde azaldığı ispatlanmış oldu.

Bu bölümde, tasarlanan MATLAB/Simulink tabanlı genel programların geçerliliği ve etkinliği 3 makinalı güç sisteminde yük akış analizi, küçük işaret kararlılık analizi, PSS tasarımı ve parametre optimizasyonu, modern sezgisel yöntemlerden PSO ve ABC tekniklerinin uygulanması ve geçici hal kararlılık analizi yapılarak test edildi ve ispatlandı. Bu tezde PSO ve ABC algoritmaları birbiriyle detaylı olarak karşılaştırıldı (bu geliştirilmiş programlar aracılığıyla istenilen herhangi bir optimizasyon tekniği de kullanılabilirdi). ABC metodunun PSO metoduna göre; sistemin elektromekanik salınım mod özdeğerlerini daha çok iyileştirdiği; kritik temizleme zamanını artırdığı, lineer olmayan zaman domenli simülasyonlar sonuçlarına ve performans indekslerine bakılarak sistemin yerleşme zamanı, aşımı ve salınımlarını gözle görülür şekilde düzelttiği görülmüştür. Ayrıca 3 makinalı 9 baralı örnek güç sistemi kullanılarak, PSO ve ABC tabanlı PSS'lerin geleneksel PSS'ye üstünlüğü **EK B**'de verilmiştir.

8. TEST SİSTEM 2 VE SONUÇLAR

Tezin bu kısmında, geliştirilen aşağıdaki genelleştirilmiş programların daha büyük bir güç sistemi olan ve Şekil 8.1’de gösterilen 10 makinalı 39 baralı IEEE örnek sistemi üzerindeki etkinliği gösterilmiştir.



Şekil 8.1 : 10 makinalı 39 baralı New England güç sistemi.

- Genelleştirilmiş Yük Akış Analizi Programı (MATLAB m-dosya tabanlı)
- Genelleştirilmiş Küçük İşaret Kararlılık Analizi Programı (MATLAB m-dosya tabanlı)
- Genelleştirilmiş Güç Sistemi Kararlı Kılıcı (PSS) Tasarım Programı (MATLAB m-dosya tabanlı)

- Genelleştirilmiş Sezgisel Yöntemlerin Güç Sistemlerine Uygulaması Programı (PSO ve ABC) (MATLAB m-dosya tabanlı)
- Genelleştirilmiş Geçici Hal Kararlılık Analizi Programı (Simulink tabanlı)

Çizelge 8.1 : 10 makinalı sistemin yük akışı sonuçları.

Bara No	Tür	Gerilim	Açı (Derece)	$-P_L$	$-Q_L$	P_G	Q_G
1	PQ	1.0474	-8.4387	0	0	0	0
2	PQ	1.0487	-5.7538	0	0	0	0
3	PQ	1.0302	-8.5985	3.2200	0.0240	0	0
4	PQ	1.0039	-9.6067	5.0000	1.8400	0	0
5	PQ	1.0053	-8.6119	0	0	0	0
6	PQ	1.0077	-7.9497	0	0	0	0
7	PQ	0.9970	-10.1238	2.3380	0.8400	0	0
8	PQ	0.9960	-10.6154	5.2200	1.7600	0	0
9	PQ	1.0282	-10.3220	0	0	0	0
10	PQ	1.0172	-5.4271	0	0	0	0
11	PQ	1.0127	-6.2843	0	0	0	0
12	PQ	1.0002	-6.2436	0.0750	0.8800	0	0
13	PQ	1.0143	-6.0977	0	0	0	0
14	PQ	1.0117	-7.6564	0	0	0	0
15	PQ	1.0154	-7.7361	3.2000	1.5300	0	0
16	PQ	1.0318	-6.1875	3.2900	0.3230	0	0
17	PQ	1.0336	-7.3013	0	0	0	0
18	PQ	1.0309	-8.2239	1.5800	0.3000	0	0
19	PQ	1.0499	-1.0228	0	0	0	0
20	PQ	0.9912	-2.0147	6.2800	1.0300	0	0
21	PQ	1.0318	-3.7805	2.7400	1.1500	0	0
22	PQ	1.0498	0.6683	0	0	0	0
23	PQ	1.0448	0.4700	2.4750	0.8460	0	0
24	PQ	1.0373	-6.0679	3.0860	-0.9220	0	0
25	PQ	1.0576	-4.3634	2.2400	0.4720	0	0
26	PQ	1.0521	-5.5267	1.3900	0.1700	0	0
27	PQ	1.0377	-7.4954	2.8100	0.7550	0	0
28	PQ	1.0501	-2.0149	2.0600	0.2760	0	0
29	PQ	1.0499	0.7444	2.8350	0.2690	0	0
30	PV	1.0475	-3.3340	0	0	2.5000	1.4616
31	gevşek	0.9820	0.0000	0.0920	0.0460	5.2081	1.9825
32	PV	0.9831	2.5690	0	0	6.5000	2.0514
33	PV	0.9972	4.1947	0	0	6.3200	1.0990
34	PV	1.0123	3.1750	0	0	5.0800	1.6576
34	PV	1.0493	5.6301	0	0	6.5000	2.1241
36	PV	1.0635	8.3229	0	0	5.6000	1.0117
37	PV	1.0278	2.4211	0	0	5.4000	0.0044
38	PV	1.0265	7.8077	0	0	8.3000	0.2284
39	PV	1.0300	-10.0530	11.0400	2.5000	10.0000	0.8828

Bu sistem hakkında detaylı bilgiler [61-62]'de mevcuttur ve aynı zamanda literatürde çok kullanılan bir sistemdir. Bu sistem 12 transformatör, 34 hat ve 19'şer aktif ve reaktif yüklerden oluşur. G1 generatörü (39. bara) referans makine seçilmiştir. Bir gevşek bara (31. bara) ve 9 PV (30-38 baraları) barayla birlikte, 29 PQ barasına (1-29 baraları) sahiptir. 10 makinalı 39 baralı güç sisteminin bara, hat, generatör ve uyarma verilerin düzenlenmiş hali **EK C**'de verilmiştir.

8.1 Yük Akış Analizi

10 makinalı 39 baralı örnek güç sisteminin yük akış sonuçları Çizelge 8.1'de gösterilmiştir.

8.2 Küçük İşaret Kararlılık Analizi

Örnek güç sistemi için, gerekli adımlar (Adım 1-8) uygulanarak bulunan başlangıç çalışma noktaları Çizelge 8.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 8.2 : 10 makinalı güç sistemi için başlangıç çalışma noktaları.

Makine	δ_0	i_{d0}	i_{q0}	E'_{q0}	E_{fd0}	V_{ref0}	P_{m0}
1	-0.0541	2.5298	9.4125	1.0295	1.0650	1.5625	10.0000
2	43.9525	5.1344	2.4169	1.0648	2.2216	2.0928	5.2081
3	49.2497	6.2419	3.0179	1.0059	2.2318	2.0990	6.5000
4	56.1069	5.6681	3.0421	0.8623	2.1002	2.0473	6.3200
5	60.0842	5.0984	1.3679	1.2257	3.9686	2.9966	5.0800
6	49.7933	5.7680	3.0334	1.0411	2.2178	2.1582	6.5000
7	57.2233	4.5934	2.7446	0.9242	2.0542	2.0906	5.6000
8	57.4494	4.3077	3.0079	0.8346	1.8383	1.9470	5.4000
9	64.9131	6.9102	4.2045	0.9514	2.0128	2.0329	8.3000
10	4.8590	1.7212	2.1634	1.0902	1.2089	1.6520	2.5000

Örnek güç sisteminin kontrolsüz (güç sistemi kararlı kılıcı yokken, açık çevrim hali) çalışma durumundayken sistemin özdeğerleri, sönüm oranları ve frekansları Çizelge 8.3'te detaylı olarak belirtilmiştir.

Çizelge 8.3 : Kontrolsüz sistemin özdeğerleri, sönüm oranları ve frekansları.

Mod	Özdeğer (λ)	Sönüm Oranı (ζ)	Frekans (f)
1	-0.0477 + 7.0372i	0.0068	1.1200
2	-0.0477 - 7.0372i	0.0068	1.1200
3	-0.1508 + 6.1434i	0.0245	0.9780
4	-0.1508 - 6.1434i	0.0245	0.9780
5	-0.1514 + 7.0925i	0.0213	1.1291
6	-0.1514 - 7.0925i	0.0213	1.1291
7	-0.2220 + 8.3659i	0.0265	1.3319
8	-0.2220 - 8.3659i	0.0265	1.3319
9	-0.1898 + 5.8445i	0.0324	0.9307
10	-0.1898 - 5.8445i	0.0324	0.9307
11	-0.1556 + 6.7077i	0.0232	1.0679
12	-0.1556 - 6.7077i	0.0232	1.0679
13	-0.2351 + 8.5438i	0.0275	1.3603
14	-0.2351 - 8.5438i	0.0275	1.3603
15	-0.1813 + 8.5091i	0.0213	1.3546
16	-0.1813 - 8.5091i	0.0213	1.3546
17	-0.1041 + 3.5444i	0.0294	0.5644
18	-0.1041 - 3.5444i	0.0294	0.5644
19	0.0000	-----	0.0000
20	0.0000	-----	0.0000
21	-49.6962	1.0000	7.9094
22	-49.7668	1.0000	7.9206
23	-49.8406	1.0000	7.9324
24	-49.8762	1.0000	7.9380
25	-49.8948	1.0000	7.9410
26	-49.8814	1.0000	7.9389
27	-49.9521	1.0000	7.9501
28	-49.9287	1.0000	7.9464
29	-49.9315	1.0000	7.9469
30	-49.9300	1.0000	7.9466
31	-0.4854	1.0000	0.0773
32	-0.2104	1.0000	0.0335
33	-0.3750	1.0000	0.0597
34	-0.3432	1.0000	0.0546
35	-0.3337	1.0000	0.0531
36	-0.2825	1.0000	0.0450
37	-0.2905	1.0000	0.0462
38	-0.2986	1.0000	0.0475
39	-0.3072	1.0000	0.0489
40	-0.3121	1.0000	0.0497

Çizelgeden de anlaşılacağı gibi PSS'siz sistemin özdeğer sayısı $4m = 40$ 'tır ve bu özdeğerlerin 20'si elektromekanik salınım mod özdeğerleri olup Çizelge 8.4'te tablo hale getirilmiştir (iki sıfır özdeğer gösterilmemiştir).

Çizelge 8.4 : Kontrolsüz sistemin elektromekanik salınım modları.

Mod	Özdeğer	Sönüm Oranı	Frekans	Baskın Makinalar
1,2	-0.0477 ± 7.0372i	0.0068	1.1200	10
3,4	-0.1508 ± 6.1434i	0.0245	0.9780	2,9
5,6	-0.1514 ± 7.0925i	0.0213	1.1291	3,2
7,8	-0.2220 ± 8.3659i	0.0265	1.3319	4,6
9,10	-0.1898 ± 5.8445i	0.0324	0.9307	5,9
11,12	-0.1556 ± 6.7077i	0.0232	1.0679	6
13,14	-0.2351 ± 8.5438i	0.0275	1.3603	7,4
15,16	-0.1813 ± 8.5091i	0.0213	1.3546	8
17,18	-0.1041 ± 3.5444i	0.0294	0.5644	1

8.3 Amaç Fonksiyonu ve PSS Parametrelerinin Optimizasyonu

Tasarım kriteri olarak $\xi_0 = 0.05$ ve $\sigma_0 = -0.5$ alındığında; bütün elektromekanik salınım mod özdeğerleri istenilen bölge dışında olduğu için 9 eşlenik karmaşık özdeğer için de PSS tasarlanır. Bu özdeğerlere ait baskın makinalara PSS yerleştirilmesi gerekiyor. Çizelge 8.4'ten anlaşılabacağı gibi tüm makinalara PSS yerleştirilmesi gerekmektedir.

PSOPSS (kontrolör parametreleri PSO algoritması ile optimize edilen PSS'li sistem) ve ABCPSS (kontrolör parametreleri ABC algoritması ile optimize edilen PSS'li sistem) tasarlanacaktır. Tasarım problemi için zaman domeninde çoklu bir amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlandı.

$$ISTSE = \sum_{i=1}^m \int_0^{t_{sim}} (t\omega_{i-1})^2 dt \quad (8.1)$$

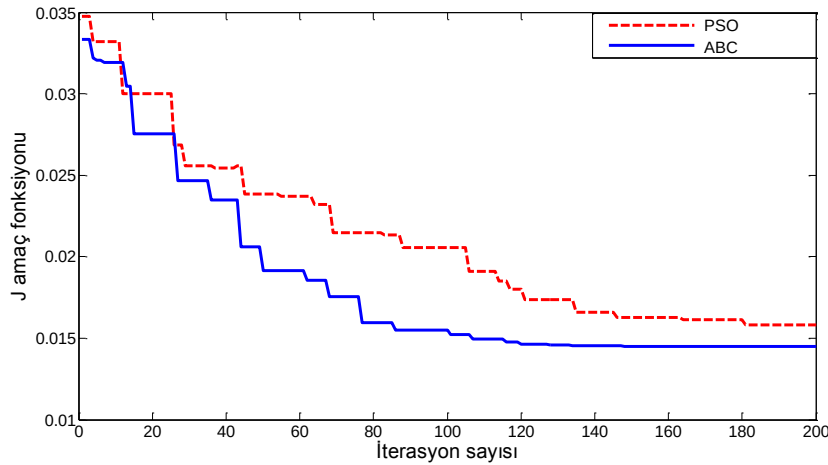
$$J = \sum_{j=1}^{NP} ISTSE \quad (8.2)$$

Burada ISTSE (Integral of Squared Time multiplied by Squared Error), hatanın karesinin zamanın karesi ile çarpımının integralidir. t_{sim} , simülasyon süresini, m makine sayısını, $\omega_{i-1} = \omega_i - \omega_1$ (ω_1 seçilen referans işarettir) ve NP optimizasyonun yürütüleceği senaryo sayısını göstermektedir. J amaç fonksiyonu simülasyon periyodu boyunca yürütülür ve sistemin oturma zamanı ve aşımı düzeltilmesi için bu amaç fonksiyonun minimum hale getirilmesi gereklidir. Bu tasarım probleminde optimize edilen kontrolör parametre sayısı 50'dir ve iterasyon sayısı 200 olarak alınmıştır. Bu optimizasyon probleminin çözümü ve en uygun PSS parametrelerinin

bulunması için, bu önerilen yaklaşım ile PSO ve ABC algoritmaları çalıştırılır. Parametreleri PSO ve ABC teknikleri ile optimize edilen PSS'li sistemin en uygun parametre değerleri Çizelge 8.5'te verilmiştir. Şekil 8.2 PSO ve ABC metotlarını ayrı ayrı kullanarak J çoklu amaç fonksiyonun yaklaşımını iterasyon sayısı ile göstermektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere ABCPSS'nin PSOPSS'den daha üstün bir performans gösterdiği görülmektedir.

Çizelge 8.5 : PSO ve ABC tekniklerini kullanarak bulunan PSS parametreleri.

Optimizasyon Tekniği	Gen.	K_p	T_1	T_2	T_3	T_4
PSO	G1	100.00	1	0.38645	1	0.0729
	G2	77.505	1	0.10055	0.6323	0.7681
	G3	31.518	0.80803	0.098689	0.9167	0.5595
	G4	79.386	1	0.016357	1	0.8549
	G5	91.917	0.80115	0.01	0.4007	0.3878
	G6	24.653	0.60633	0.043319	0.5844	0.3418
	G7	9.9557	1	0.10659	1	0.2686
	G8	14.569	0.24737	0.25424	0.9103	0.1161
	G9	14.225	0.86266	0.029662	0.9479	0.0970
	G10	65.739	0.26253	0.60206	0.2150	0.8810
ABC	G1	100	1	0.28694	0.5930	0.0186
	G2	43.233	1	0.1733	0.6999	0.2715
	G3	24.755	1	0.44825	0.9283	0.0100
	G4	71.977	0.33579	0.01	0.3585	0.0474
	G5	76.217	0.57291	0.25835	0.9718	0.1517
	G6	68.883	1	0.24508	0.8981	0.4970
	G7	65.874	0.56192	0.054116	0.8959	0.5687
	G8	100	0.33206	0.023192	0.9525	0.0100
	G9	35.22	0.89393	0.38001	1	0.0100
	G10	25.311	0.064381	1	0.1804	0.9503



Şekil 8.2 : J çoklu amaç fonksiyonun iterasyon sayısı ile yaklaşımı.

Çizelge 8.6 : PSO ile optimize edilen sistemin özdeğerleri, sönüm oranları ve frekansları.

Mod	Özdeğer	Sönüm Oranı	Frekans
1	-0.8797 + 7.4746i	0.11688	1.1978
2	-0.8797 - 7.4746i	0.11688	1.1978
3	-0.7894 + 7.8508i	0.10005	1.2558
4	-0.7894 - 7.8508i	0.10005	1.2558
5	-1.3360 + 6.4736i	0.20211	1.052
6	-1.3360 - 6.4736i	0.20211	1.052
7	-0.7321 + 7.0540i	0.10323	1.1287
8	-0.7321 - 7.0540i	0.10323	1.1287
9	-0.9067 + 9.0267i	0.099939	1.4439
10	-0.9067 - 9.0267i	0.099939	1.4439
11	-0.4198 + 8.7515i	0.047915	1.3944
12	-0.4198 - 8.7515i	0.047915	1.3944
13	-1.4993 + 5.2185i	0.27613	0.86416
14	-1.4993 - 5.2185i	0.27613	0.86416
15	-0.7529 + 3.1250i	0.23424	0.51159
16	-0.7529 - 3.1250i	0.23424	0.51159
17	-0.5538 + 0.9009i	0.52368	0.16831
18	-0.5538 - 0.9009i	0.52368	0.16831
19	0.0000	-----	0.0000
20	0.0000	-----	0.0000
21	-16.181 + 13.771i	0.76154	3.3816
22	-16.181 - 13.771i	0.76154	3.3816
23	-4.3344 + 8.9402i	0.43625	1.5813
24	-4.3344 - 8.9402i	0.43625	1.5813
25	-5.7743 + 1.5681i	0.96505	0.95229
26	-5.7743 - 1.5681i	0.96505	0.95229
27	-1.6576 + 0.33491i	0.98019	0.26915
28	-1.6576 - 0.33491i	0.98019	0.26915
29	-0.2936 + 0.00176i	0.99998	0.046725
30	-0.29358 - 0.00176i	0.99998	0.046725
31	-102.73	1.0000	16.35
32	-73.262	1.0000	11.66
33	-59.611	1.0000	9.4874
34	-44.027	1.0000	7.0072
35	-51	1.0000	8.117
36	-49.749	1.0000	7.9178
37	-50.792	1.0000	8.0837
38	-50.053	1.0000	7.9663
39	-50.495	1.0000	8.0365
40	-50.342	1.0000	8.0121
41	-50.393	1.0000	8.0202
42	-28.867	1.0000	4.5943
43	-21.262	1.0000	3.384
44	-9.2429	1.0000	1.4711
45	-8.245	1.0000	1.3122
46	-8.1736	1.0000	1.3009
47	-7.7057	1.0000	1.2264

48	-3.7765	1.0000	0.60106
49	-3.9208	1.0000	0.62401
50	-2.9573	1.0000	0.47066
51	-2.5917	1.0000	0.41248
52	-1.8312	1.0000	0.29145
53	-1.2946	1.0000	0.20605
54	-1.1756	1.0000	0.1871
55	-0.2032	1.0000	0.03234
56	-0.33637	1.0000	0.053535
57	-0.27043	1.0000	0.04304
58	-0.27196	1.0000	0.043284
59	-0.32156	1.0000	0.051178
60	-0.30698	1.0000	0.048858
61	-0.31179	1.0000	0.049623
62	-0.10453	1.0000	0.016636
63	-0.10351	1.0000	0.016475
64	-0.10267	1.0000	0.01634
65	-0.10042	1.0000	0.015983
66	-0.10082	1.0000	0.016046
67	-0.10142	1.0000	0.016141
68	-0.10102	1.0000	0.016078
69	-0.1011	1.0000	0.016091
70	-0.10122	1.0000	0.016109

Çizelge 8.7 : ABC ile optimize edilen sistemin özdeğerleri, sönüm oranları ve frekansları.

Mod	Özdeğer	Sönüm Oranı	Frekans
1	-1.1192 + 7.3737i	0.15006	1.187
2	-1.1192 - 7.3737i	0.15006	1.187
3	-1.0475 + 7.7738i	0.13354	1.2484
4	-1.0475 - 7.7738i	0.13354	1.2484
5	-1.5153 + 6.5719i	0.22468	1.0734
6	-1.5153 - 6.5719i	0.22468	1.0734
7	-0.9351 + 7.9121i	0.11737	1.268
8	-0.9351 - 7.9121i	0.11737	1.268
9	-1.4568 + 9.6813i	0.1488	1.5582
10	-1.4568 - 9.6813i	0.1488	1.5582
11	-2.0648 + 5.0450i	0.37878	0.86758
12	-2.0648 - 5.0450i	0.37878	0.86758
13	-2.3388 + 5.4836i	0.39231	0.94881
14	-2.3388 - 5.4836i	0.39231	0.94881
15	-0.8463 + 2.8343i	0.2861	0.47078
16	-0.8463 - 2.8343i	0.2861	0.47078
17	-0.6633 + 0.6885i	0.6938	0.15216
18	-0.6633 - 0.6885i	0.6938	0.15216
19	0.0000	-----	0.0000
20	0.0000	-----	0.0000

21	-23.037 + 61.197i	0.35231	10.407
22	-23.037 - 61.197i	0.35231	10.407
23	-28.062 + 23.783i	0.76288	5.8544
24	-28.062 - 23.783i	0.76288	5.8544
25	-38.557 + 1.5022i	0.99924	6.1412
26	-38.557 - 1.5022i	0.99924	6.1412
27	-1.926 + 8.2996i	0.22606	1.356
28	-1.926 - 8.2996i	0.22606	1.356
29	-3.4358 + 2.4944i	0.80922	0.67574
30	-3.4358 - 2.4944i	0.80922	0.67574
31	-3.6002 + 1.7916i	0.89527	0.64002
32	-3.6002 - 1.7916i	0.89527	0.64002
33	-2.5507 + 0.69174i	0.96514	0.42063
34	-2.5507 - 0.69174i	0.96514	0.42063
35	-1.2491 + 0.38363i	0.95593	0.20796
36	-1.2491 - 0.38363i	0.95593	0.20796
37	-143.81	1.0000	22.888
38	-111.55	1.0000	17.753
39	-104.67	1.0000	16.658
40	-102.25	1.0000	16.274
41	-62.405	1.0000	9.9321
42	-45.004	1.0000	7.1627
43	-51.868	1.0000	8.255
44	-49.75	1.0000	7.9179
45	-50.884	1.0000	8.0985
46	-50.33	1.0000	8.0103
47	-50.454	1.0000	8.0301
48	-13.213	1.0000	2.1029
49	-4.371	1.0000	0.69566
50	-3.5081	1.0000	0.55833
51	-2.3487	1.0000	0.37381
52	-1.7563	1.0000	0.27953
53	-0.35537	1.0000	0.056559
54	-0.33347	1.0000	0.053074
55	-0.32117	1.0000	0.051115
56	-0.30292	1.0000	0.048211
57	-0.2889	1.0000	0.04598
58	-0.28637	1.0000	0.045578
59	-0.27324	1.0000	0.043488
60	-0.2646	1.0000	0.042112
61	-0.1866	1.0000	0.029699
62	-0.1086	1.0000	0.017284
63	-0.10071	1.0000	0.016029
64	-0.10088	1.0000	0.016056
65	-0.1013	1.0000	0.016123
66	-0.10388	1.0000	0.016533
67	-0.10207	1.0000	0.016245
68	-0.10306	1.0000	0.016402
69	-0.10291	1.0000	0.016379
70	-0.10259	1.0000	0.016327

Önerilen J çoklu amaç fonksiyonu kullanarak, PSS'nin parametreleri PSO ve ABC ile optimize edilen sistemin özdeğerleri ve o özdeğerlere karşılık düşen sönüm oranları ve frekansları sırasıyla Çizelge 8.6 ve Çizelge 8.7'de verilmiştir. Kalın ile gösterilen özdeğerler, elektromekanik salınım mod özdeğerlerini belirtmektedir.

Elektromekanik salınım mod özdeğerlerine bakılarak, önerilen ABCPSS'nin önerilen PSOPSS'ye göre sistem sönümünü açıkça iyileştirdiği görülmüştür.

8.4 Lineer Olmayan Zaman Domeninde Simülasyonlar

10 makinalı 39 baralı New England güç sisteminin geçici kararlılık analizinde, diferansiyel denklemlerin nümerik integrasyonu için Runge-Kutta 4 tekniği kullanıldı ve entegrasyon adımı $\Delta t = 0.01$ saniye seçildi. Bu örnek güç sistemi için, 20 saniyelik lineer olmayan simülasyonlar için yaklaşık 11.42 saniyelik bir süre geçmiştir. Simülasyonlardaki noktalı mavi renkliler sistemin PSS'siz (kontROLSÜZ), kırmızı renkliler PSO ile optimize edilen PSS'li ve kalın mavi renkliler ABC ile optimize edilen PSS'li çalışma durumlarını gösterir. Genelleştirilmiş geçici kararlılık analizi programının etkinliğini doğrulamak için 2 farklı durum (4 farklı senaryo) göz önüne alınmıştır.

Çizelge 8.8 : Farklı arıza türleri için kritik temizleme zamanları.

Arıza Türü	Kritik Temizleme Zamanı (saniye)		
	KontROLSÜZ	PSOPSS	ABCPSS
21-22 hattın devreden çıkarılması	0.071	0.101	0.106
2-3 hattın eskine haline dönmesi	0.191	0.203	0.206

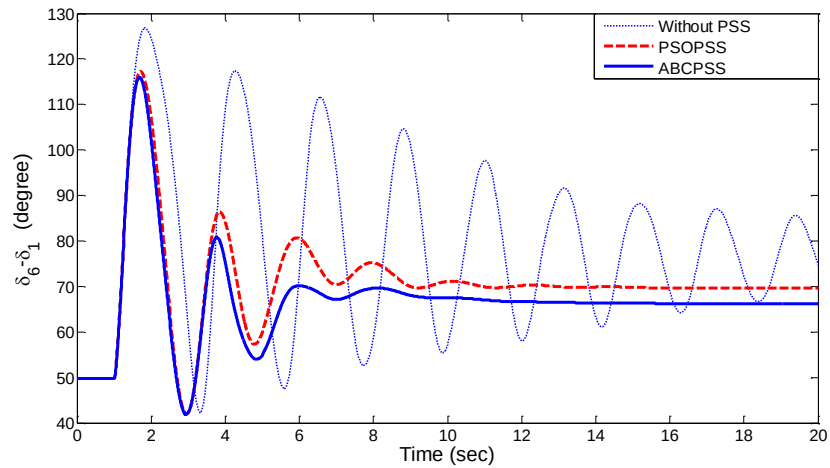
Arıza olan hattın devreden çıkarılma durumu: Bu ciddi arıza durumunda, $t = 1$ saniyede (arızadan önceki sistem durumu daha açık görülsün diye) 22 nolu barada ve 21-22 hattının sonunda üç fazlı bir arıza olduğu düşünüldü. 21-22 hattı devreden çıkarılarak (line tripping) arıza giderildi. Arıza olan yere en yakın generatörler G6 ve G7 olduğu için, sadece bu iki makinaya ait sistem cevapları verildi, çünkü arıza olan yere en yakın generatörler salınımlardan daha çok etkilenir. Sistemin kontROLSÜZ, PSO ve ABC algoritmalarıyla optimize edilen PSS kullanılarak çalışması durumları için kritik arıza temizleme süreleri Çizelge 8.8'de verilmiştir. Bu çizelgeden görüleceği gibi, sistem kontROLSÜZ haldeyken (PSS kullanılmadan) kritik temizleme zamanı $t_{cr} = 0.071$ s iken sistem kararlılık sınırındadır ve aynı zamanda ABC ile

optimize edilen PSS'li sistemin kritik temizleme zamanı, PSO ile optimize edilen PSS'li sistemden büyüktür. Bu ciddi arıza durumu için iki farklı senaryo ele alınmıştır.

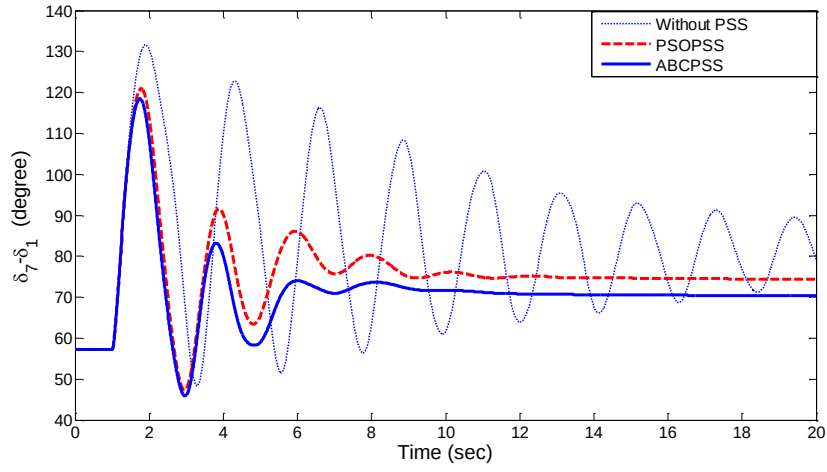
Senaryo 1: Arıza temizleme zamanının (t_f), kritik temizleme zamanından (t_{cr}) küçük olma durumu; $t_f = 0.05$ saniyelik (3 devir) arızanın olduğu düşünülüyor (1.05'inci saniyede arıza gideriliyor).

Senaryo 2: Arıza temizleme zamanının (t_f), kritik temizleme zamanından (t_{cr}) büyük olma durumu; $t_f = 0.10$ saniyelik (6 devir) arızanın olduğu düşünülüyor (1.10'uncu saniyede arıza gideriliyor).

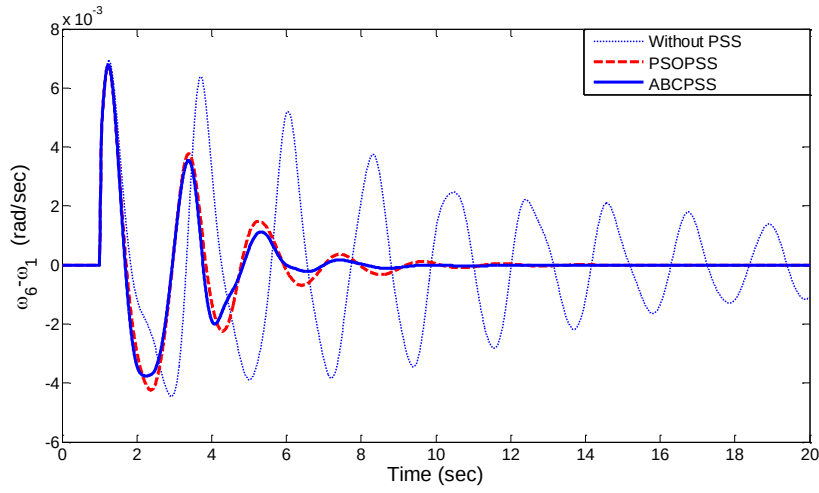
Senaryo 1 ve Senaryo 2 için G6 ve G7 generatörlerinin sistem cevapları sırasıyla Şekil 8.3-8.8 ve Şekil 8.9-8.14'te verilmiştir. İki senaryo için sırasıyla, Şekil 8.3-8.4 ve Şekil 8.9-8.10 bağıl rotor açılarını ($\delta_6 - \delta_1$ ve $\delta_7 - \delta_1$); Şekil 8.5-8.6 ve Şekil 8.11-8.12 bağıl hız sapmalarını ($\omega_6 - \omega_1$ ve $\omega_7 - \omega_1$); Şekil 8.7-8.8 ve Şekil 8.13-8.14 elektriksel güç çıkışlarını (P_{e6} ve P_{e7}) göstermektedir.



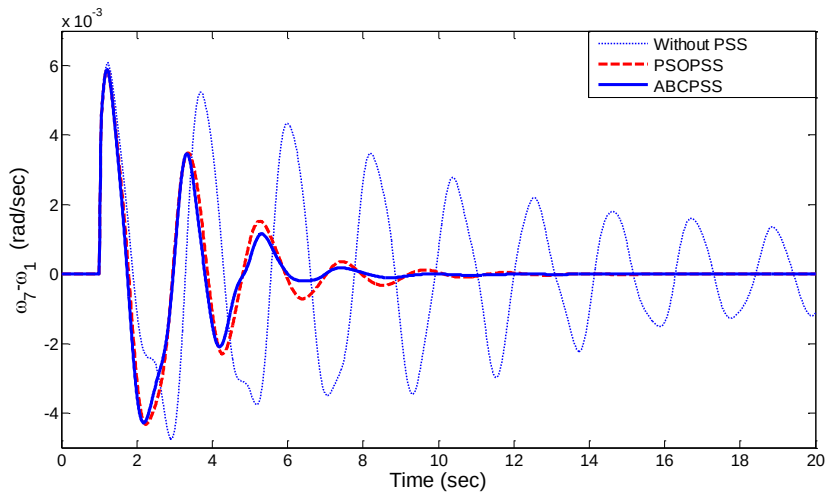
Şekil 8.3 : 10 makinalı sistemin Senaryo 1 için $\delta_6 - \delta_1$ 'in sistem cevabı.



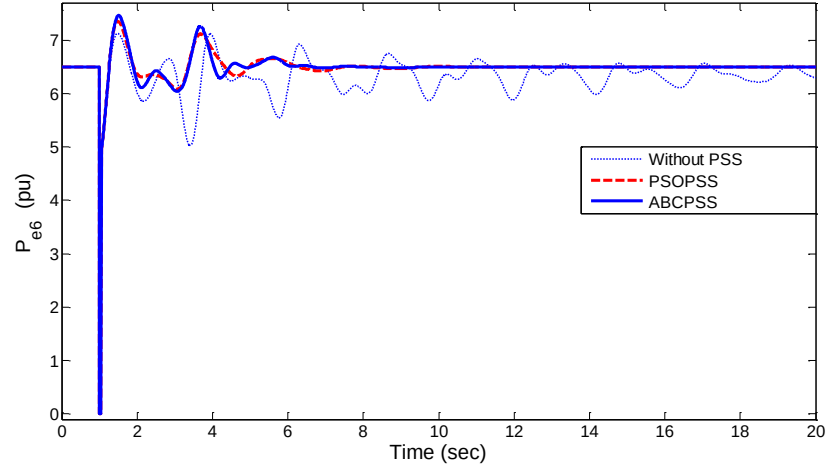
Şekil 8.4 : 10 makinalı sistemin Senaryo 1 için $\delta_7 - \delta_1$ 'in sistem cevabı.



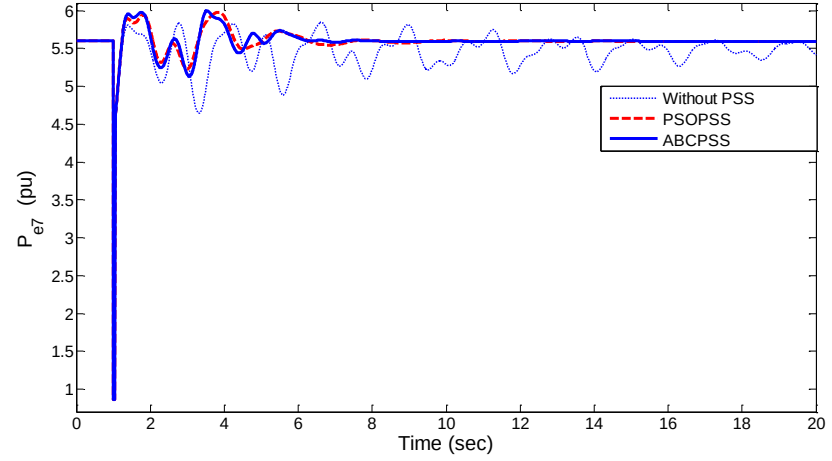
Şekil 8.5 : 10 makinalı sistemin Senaryo 1 için $\omega_6 - \omega_1$ 'in sistem cevabı.



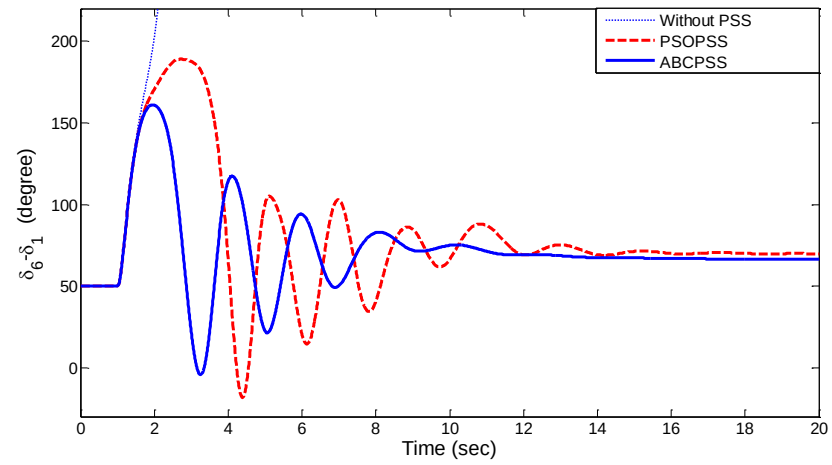
Şekil 8.6 : 10 makinalı sistemin Senaryo 1 için $\omega_7 - \omega_1$ 'in sistem cevabı.



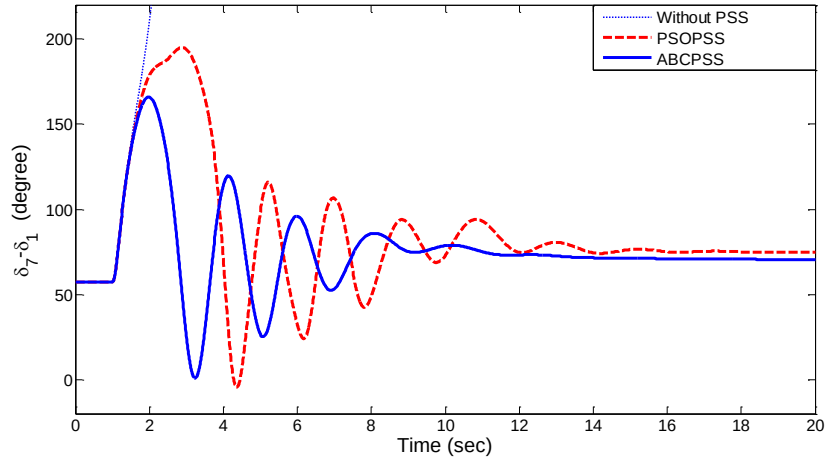
Şekil 8.7 : 10 makinalı sistemin Senaryo 1 için P_{e6} 'nın sistem cevabı.



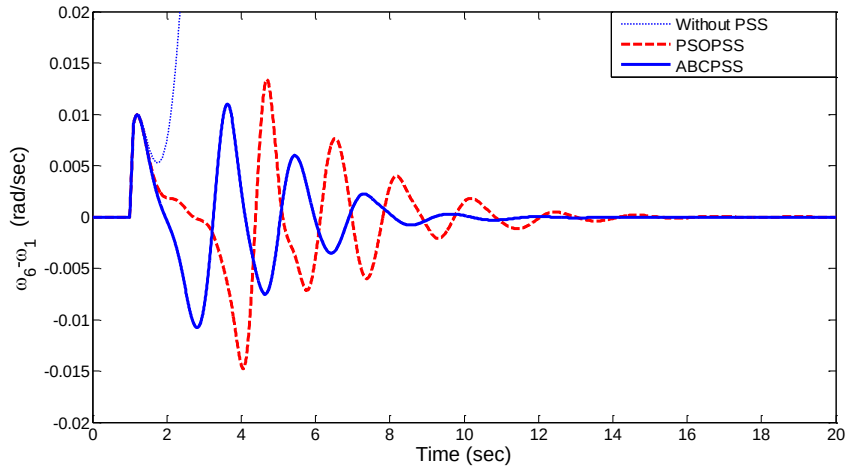
Şekil 8.8 : 10 makinalı sistemin Senaryo 1 için P_{e7} 'nin sistem cevabı.



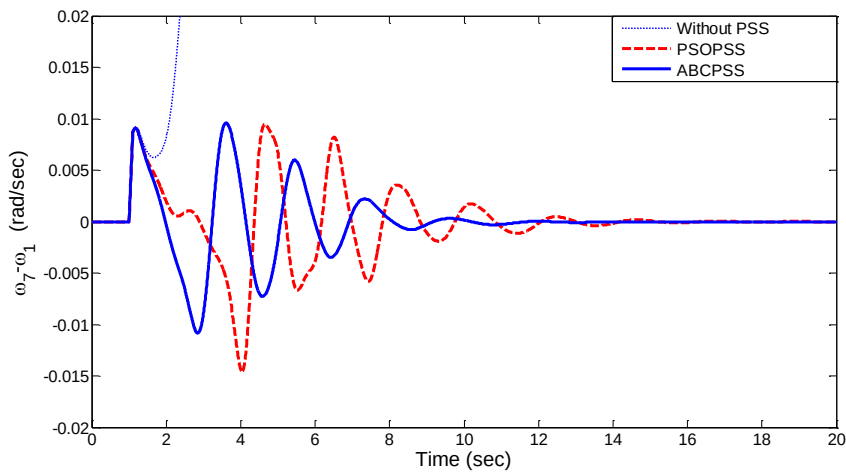
Şekil 8.9 : 10 makinalı sistemin Senaryo 2 için $\delta_6 - \delta_1$ 'in sistem cevabı.



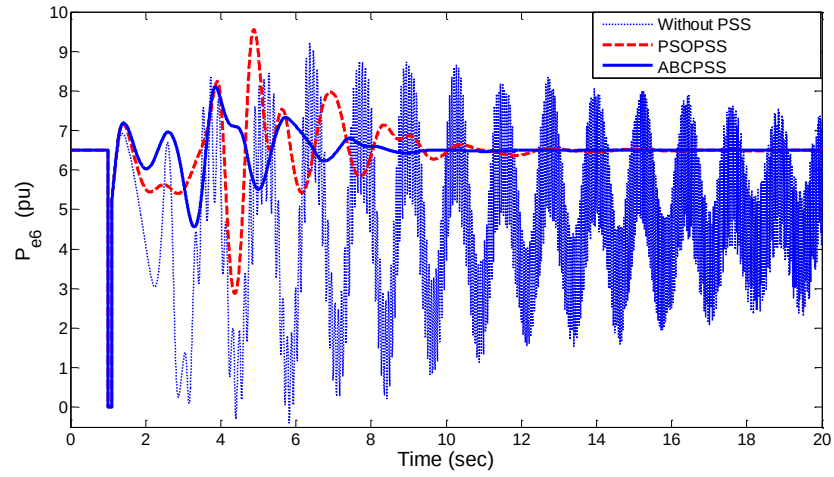
Şekil 8.10 : 10 makinalı sistemin Senaryo 2 için $\delta_7 - \delta_1$ 'in sistem cevabı.



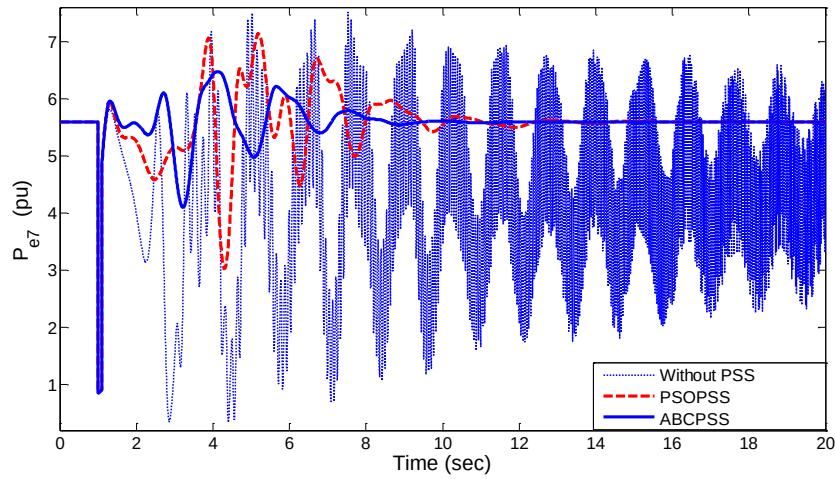
Şekil 8.11 : 10 makinalı sistemin Senaryo 2 için $\omega_6 - \omega_1$ 'in sistem cevabı.



Şekil 8.12 : 10 makinalı sistemin Senaryo 2 için $\omega_7 - \omega_1$ 'in sistem cevabı.



Şekil 8.13 : 10 makinalı sistemin Senaryo 2 için P_{e6} 'nin sistem cevabı.



Şekil 8.14 : 10 makinalı sistemin Senaryo 2 için P_{e7} 'nin sistem cevabı.

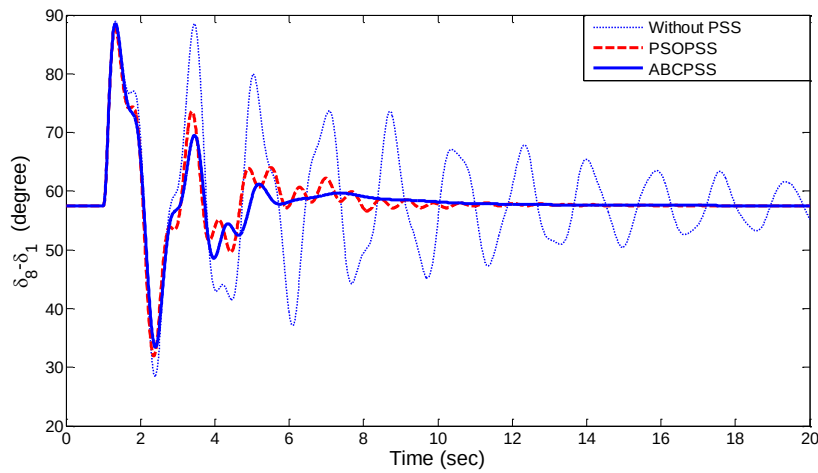
Simülasyon şekillerinden açıkça görüleceği gibi, sistem kontrolsüz haldeyken Senaryo 1'de kararlı ve sistem salınımları geç sönmesine rağmen, Senaryo 2'de kararsız hale gelmiştir. Bununla birlikte her iki senaryoda da parametreleri PSO ve ABC ile optimize edilen PSS'li sistemler (PSOPSS ve ABCPSS) kararlıdır ve ABCPSS sistem salınımlarını PSOPSS'den daha iyi söndürür.

Arıza olan hattın eski haline dönmesi durumu: Bu ciddi arıza durumunda, $t=1$ saniyede (arızadan önceki sistem durumu daha açık görülsün diye) 2 nolu barada ve 2-3 hattının sonunda üç fazlı bir arıza olduğu düşünüldü. 2-3 hattı yeniden devreye sokularak (without line tripping) arıza giderildi. Arıza olan yere en yakın generatörler G8 ve G10 olduğu için, sadece bu iki makinaya ait sistem cevapları

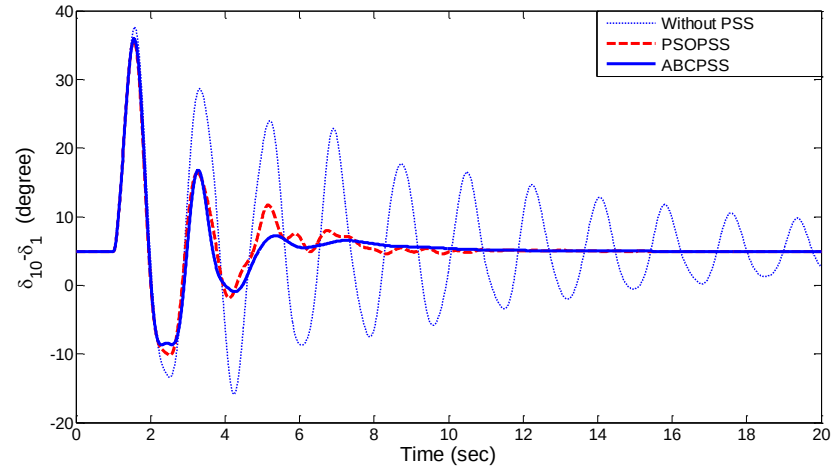
verildi. Çünkü arıza olan yere en yakın generatörler salınımlardan daha çok etkilenir. Sistemin kontrolsüz, PSO ve ABC algoritmasıyla optimize edilen PSS kullanılarak çalışması durumları için kritik arıza temizleme süreleri Çizelge 8.8’de verilmiştir. Bu çizelgeden görüleceği gibi, sistem kontrolsüz haldeyken (PSS kullanılmadan) kritik temizleme zamanı $t_{cr} = 0.191$ s iken sistem kararlılık sınırındadır ve aynı zamanda ABC ile optimize edilen PSS’li sistemin kritik temizleme zamanı, PSO ile optimize edilen PSS’li sistemden büyüktür. Bu ciddi arıza durumu için iki farklı senaryo ele alınmıştır.

Senaryo 3: Arıza temizleme zamanının (t_f), kritik temizleme zamanından (t_{cr}) küçük olma durumu; $t_f = 0.10$ saniyelik (6 devir) arızanın olduğu düşünüldü (1.10’uncu saniyede arıza gideriliyor).

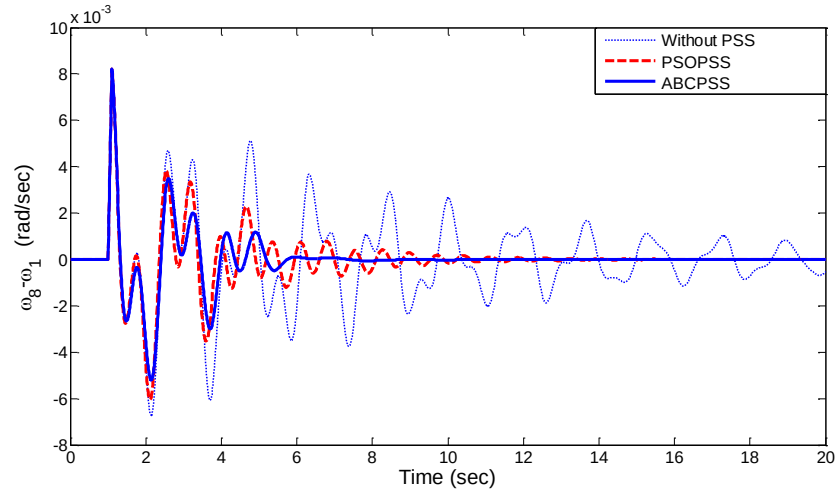
Senaryo 4: Arıza temizleme zamanının (t_f), kritik temizleme zamanından (t_{cr}) büyük olma durumu; $t_f = 0.20$ saniyelik (12 devir) arızanın olduğu düşünüldü (1.20’inci saniyede arıza gideriliyor).



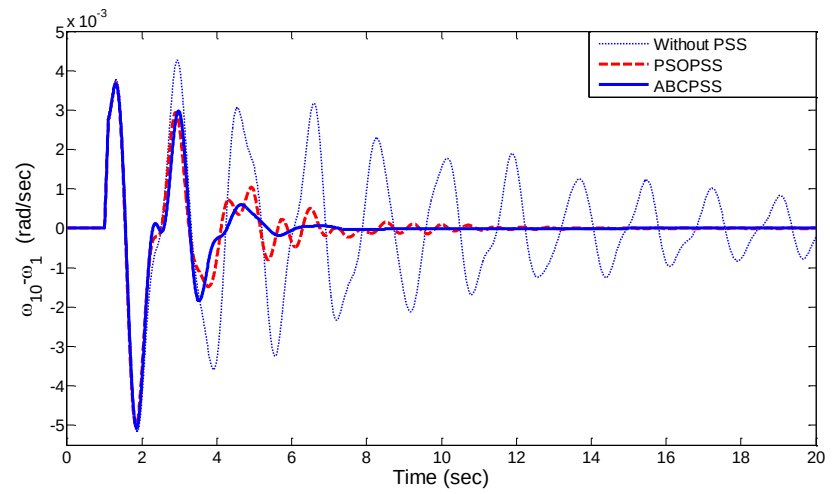
Şekil 8.15 : 10 makinalı sistemin Senaryo 3 için $\delta_8 - \delta_1$ ’in sistem cevabı.



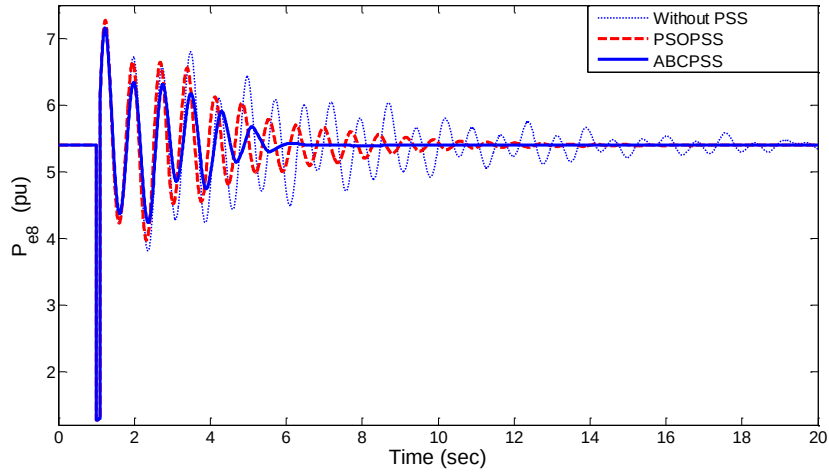
Şekil 8.16 : 10 makinalı sistemin Senaryo 3 için $\delta_{10} - \delta_1$ 'in sistem cevabı.



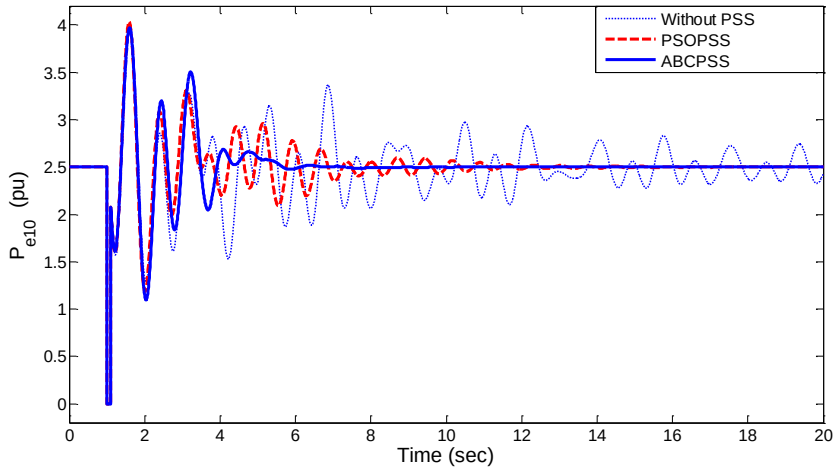
Şekil 8.17 : 10 makinalı sistemin Senaryo 3 için $\omega_8 - \omega_1$ 'in sistem cevabı.



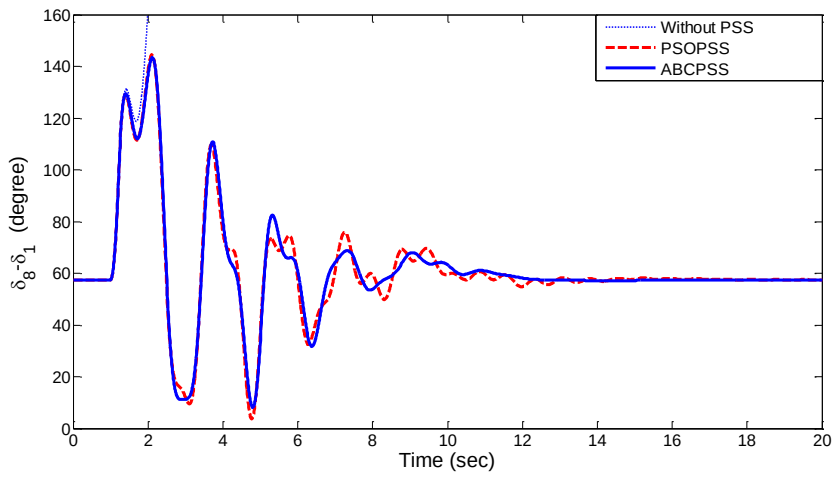
Şekil 8.18 : 10 makinalı sistemin Senaryo 3 için $\omega_{10} - \omega_1$ 'in sistem cevabı.



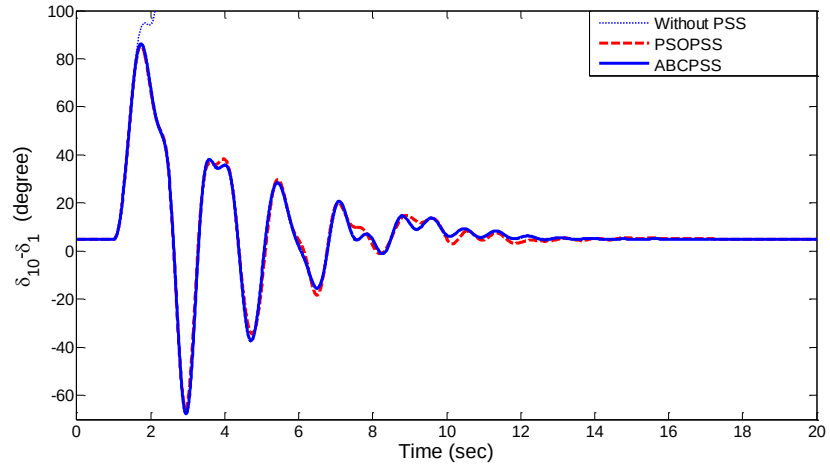
Şekil 8.19 : 10 makinalı sistemin Senaryo 3 için P_{e8} 'in sistem cevabı.



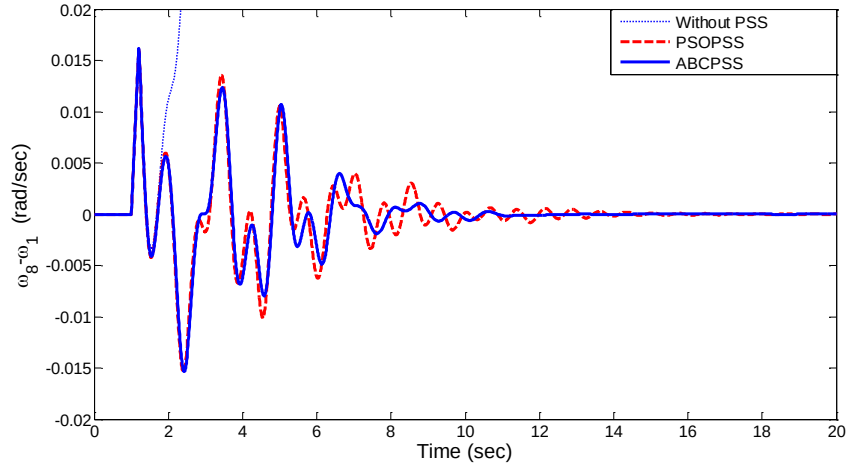
Şekil 8.20 : 10 makinalı sistemin Senaryo 3 için P_{e10} 'ün sistem cevabı.



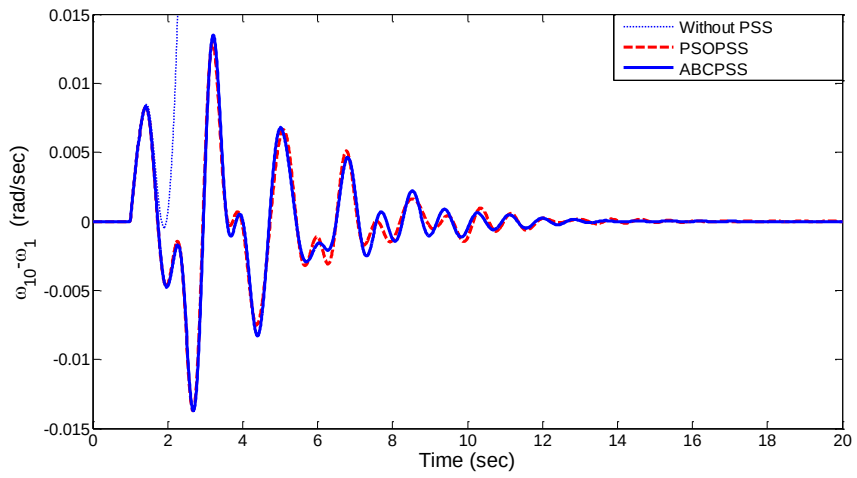
Şekil 8.21 : 10 makinalı sistemin Senaryo 4 için $\delta_8 - \delta_1$ 'in sistem cevabı.



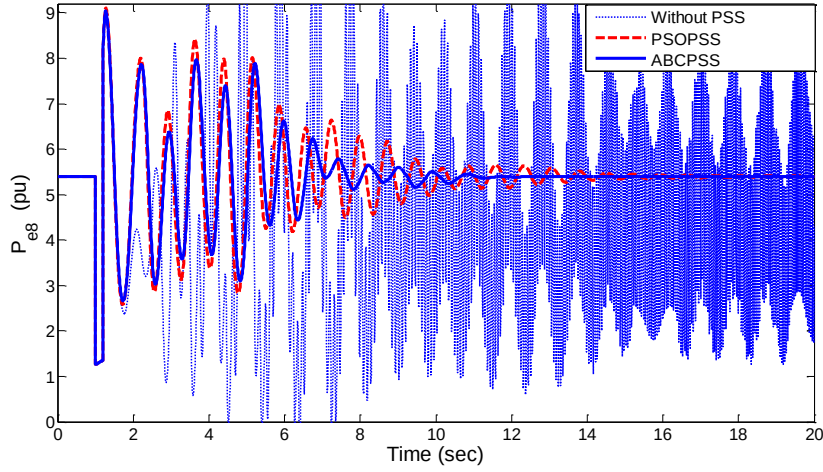
Şekil 8.22 : 10 makinalı sistemin Senaryo 4 için $\delta_{10} - \delta_1$ 'in sistem cevabı.



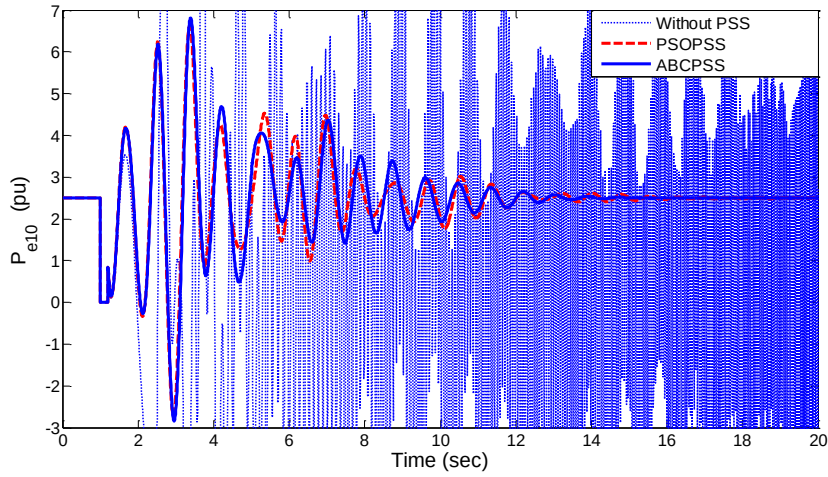
Şekil 8.23 : 10 makinalı sistemin Senaryo 4 için $\omega_8 - \omega_1$ 'in sistem cevabı.



Şekil 8.24 : 10 makinalı sistemin Senaryo 4 için $\omega_{10} - \omega_1$ 'in sistem cevabı.



Şekil 8.25 : 10 makinalı sistemin Senaryo 4 için P_{e8} 'in sistem cevabı.



Şekil 8.26 : 10 makinalı sistemin Senaryo 4 için P_{e10} 'ün sistem cevabı.

Senaryo 3 ve Senaryo 4 için $G8$ ve $G10$ generatörlerinin sistem cevapları sırasıyla Şekil 8.15-8.20 ve Şekil 8.21-8.26'da verilmiştir. İki senaryo için sırasıyla, Şekil 8.15-8.16 ve Şekil 8.21-8.22 bağıl rotor açılarını ($\delta_8 - \delta_1$ ve $\delta_{10} - \delta_1$); Şekil 8.17-8.18 ve Şekil 8.23-8.24 bağıl hız sapmalarını ($\omega_8 - \omega_1$ ve $\omega_{10} - \omega_1$); Şekil 8.19-8.20 ve Şekil 8.25-8.26 elektriksel güç çıkışlarını (P_{e8} ve P_{e10}) göstermektedir.

Simülasyon şekillerinden açıkça görüleceği gibi, sistem kontrolsüz haldeyken Senaryo 3'de kararlı ve sistem salınımları geç sönmesine rağmen, Senaryo 4'de kararsız hale gelmiştir. Bununla birlikte her iki senaryoda da parametreleri PSO ve

ABC ile optimize edilen PSS'li sistemler (PSOPSS ve ABCPSS) kararlıdır ve ABCPSS sistem salınımlarını PSOPSS'den daha iyi söndürür.

Şekil 8.3-8.26 simülasyon sonuçlarına göre, arıza temizleme zamanı (t_f) güç sistemlerinin geçici kararlılığını belirlemek için en önemli faktördür. Sistemin tüm özdeğerleri sol kısımda (özdeğerlerin reel kısmı negatif olduğu) olması şartıyla; arıza temizleme zamanı (t_f), kritik temizleme zamanından (t_{cr}) küçükse sistem kararlıdır ve büyükse sistem kararsızdır denir.

8.5 Performans İndeksi Analizi

Kontrolör parametreleri PSO ve ABC ile optimize edilen PSS'li güç sistemlerinin (PSOPSS ve ABCPSS) performans indeks analizi bazı karşılaştırma indeksleri kullanılarak yapıldı ve bu indeksler aşağıda verilmiştir.

$$PI_1 = 10^4 \times ISE = 10^4 \times \sum_{i=2}^m \int_0^{t_{sim}} (\omega_i - \omega_1)^2 dt \quad (8.3)$$

$$PI_2 = 10^2 \times IAE = 10^2 \times \sum_{i=2}^m \int_0^{t_{sim}} |\omega_i - \omega_1| dt \quad (8.4)$$

$$PI_3 = 10^2 \times ITAE = 10^2 \times \sum_{i=2}^m \int_0^{t_{sim}} t |\omega_i - \omega_1| dt \quad (8.5)$$

$$PI_4 = 10^4 \times ITSE = 10^4 \times \sum_{i=2}^m \int_0^{t_{sim}} t (\omega_i - \omega_1)^2 dt \quad (8.6)$$

Yukarıdaki eşitliklerden simülasyon süresi $t_{sim} = 20$ saniye ve makine sayısı $m = 10$ alınmıştır. Lineer olmayan zaman domenli tabanlı 4 farklı performansı indeksleri kullanılarak, 4 farklı senaryo için PSOPSS ve ABCPSS sistemlerin performanslarının nümerik sonuçları Çizelge 8.9'da gösterilmiştir.

Önerilen ABCPSS'nin bu indekslerdeki değerleri PSOPSS'nin değerlerinden daha küçük olduğu çizelgeden açıkça görülmektedir. Bu sonuçlara göre, ABCPSS kullanarak sistem cevabının yerleşme zamanı, aşımı ve bütün makinalardaki hız sapmalarının önemli ölçüde azaldığı ispatlanmış oldu.

Çizelge 8.9: PSO ve ABC ile optimize edilen sistemin performans indekslerinin değerleri.

Arıza Durumu	Optimizasyon Tekniği	Karşılaştırma İndeksleri			
		PI_1	PI_2	PI_3	PI_4
Senaryo 1	PSO	1.8684	8.0826	19.9838	3.0337
	ABC	1.6709	7.0850	14.9327	2.4337
Senaryo 2	PSO	12.3759	26.3690	118.2495	46.7168
	ABC	11.0746	21.8872	68.2935	27.9685
Senaryo 3	PSO	2.0422	7.5948	15.0875	2.4653
	ABC	1.8602	6.6857	10.8873	1.9913
Senaryo 4	PSO	19.9128	29.9787	95.9220	46.8344
	ABC	19.6490	28.9966	87.1593	45.0363

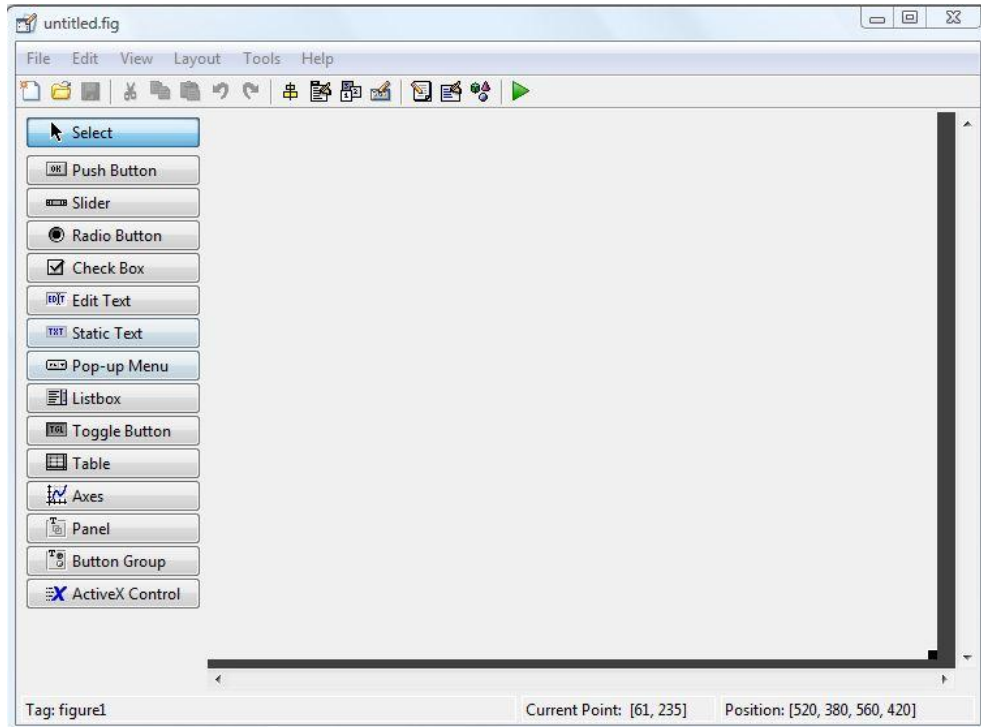
Bu bölümde, tasarlanan MATLAB/Simulink tabanlı genel programların geçerliliği ve etkinliği 10 makinalı güç sisteminde yük akış analizi, küçük işaret kararlılık analizi, PSS tasarımı ve parametre optimizasyonu, modern sezgisel yöntemlerden PSO ve ABC tekniklerinin uygulanması ve geçici hal kararlılık analizi yapılarak test edildi ve ispatlandı. Bu tezde PSO ve ABC algoritmaları birbiriyle detaylı olarak karşılaştırıldı (Bu geliştirilmiş programlar aracılığıyla istenilen herhangi bir optimizasyon tekniği de kullanılabilirdi). ABC metodunun PSO metoduna göre; sistemin elektromekanik salınım mod özdeğerlerini daha çok iyileştirdiği; kritik temizleme zamanını artırdığı, lineer olmayan zaman domen simülasyon sonuçlarına ve performans indekslerine bakılarak sistemin yerleşme zamanı, aşımı ve salınımlarını gözle görülür şekilde düzelttiği görülmüştür.

9. POWSYSGUI PROGRAM PAKETİ

Önceki bölümlerde tasarlanan programlar iki örnek güç sistemi (3 makinalı 9 baralı ve 10 makinalı 39 baralı güç sistemleri) üstünde başarıyla test edildi. Tezin bu kısmında, tasarlanan bu programlara GUI ortamı eklenerek PowSysGUI programı elde edildi. Bu bölümde; MATLAB GUI bileşenlerine, PowSysGUI paket programının genel özelliklerine ve PowSysGUI programının tüm özelliklerinin daha büyük bir güç sistemi (16 makinalı 68 baralı) üstünde başarıyla gerçekleştirilmesine değinildi.

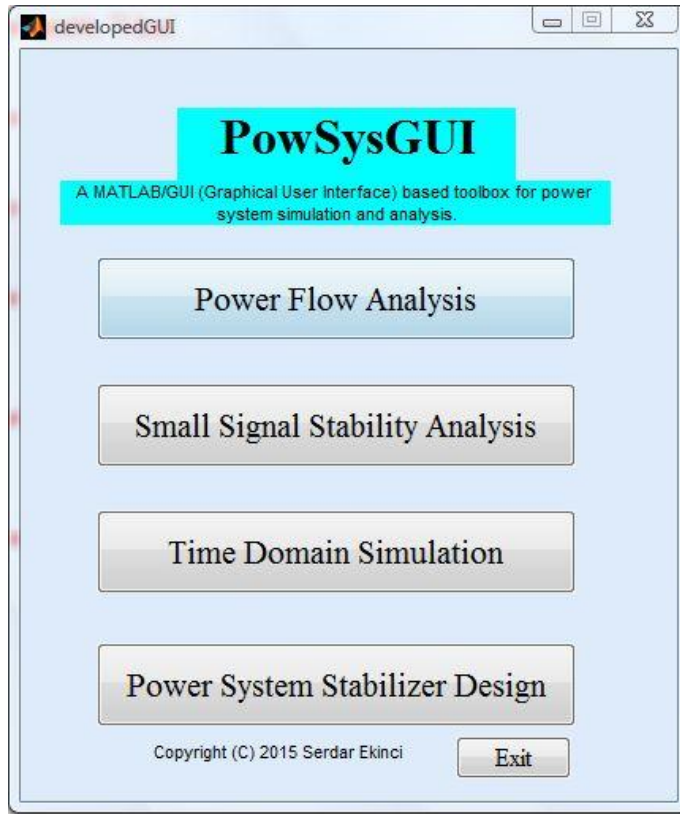
9.1. MATLAB GUI Bileşenleri

MATLAB GUI iki yolla oluşturulabilmektedir: GUI geliştirme ortamı kullanarak veya MATLAB editörden kodlama yaparak. GUI oluşturmanın en kolay yolu ilk metodun kullanılmasıdır ve PowSysGUI programı tasarlanırken bu metottan faydalanıldı. Bazı temel GUI bileşenleri:



Şekil 9.1 : GUI tasarım penceresi.

- (a) Basmalı Düğme (Push Button)
- (b) Kaydırıcı (Slider)
- (c) Radyo Düğmesi (Radio Button)
- (d) Onay Kutusu (Check Box)
- (e) Düzenleme Metni (Edit Text)
- (f) Statik Metin (Static Text)
- (g) Açılır Menü (Pop-up Menu)
- (h) Liste Kutusu (Listbox)
- (i) Geçiş Düğmesi (Toggle Button)
- (j) Tablo (Table)
- (k) Eksenler (Axes)
- (l) Panel (Panel)
- (m) Düğme Grubu (Button Group)
- (n) ActiveX Control

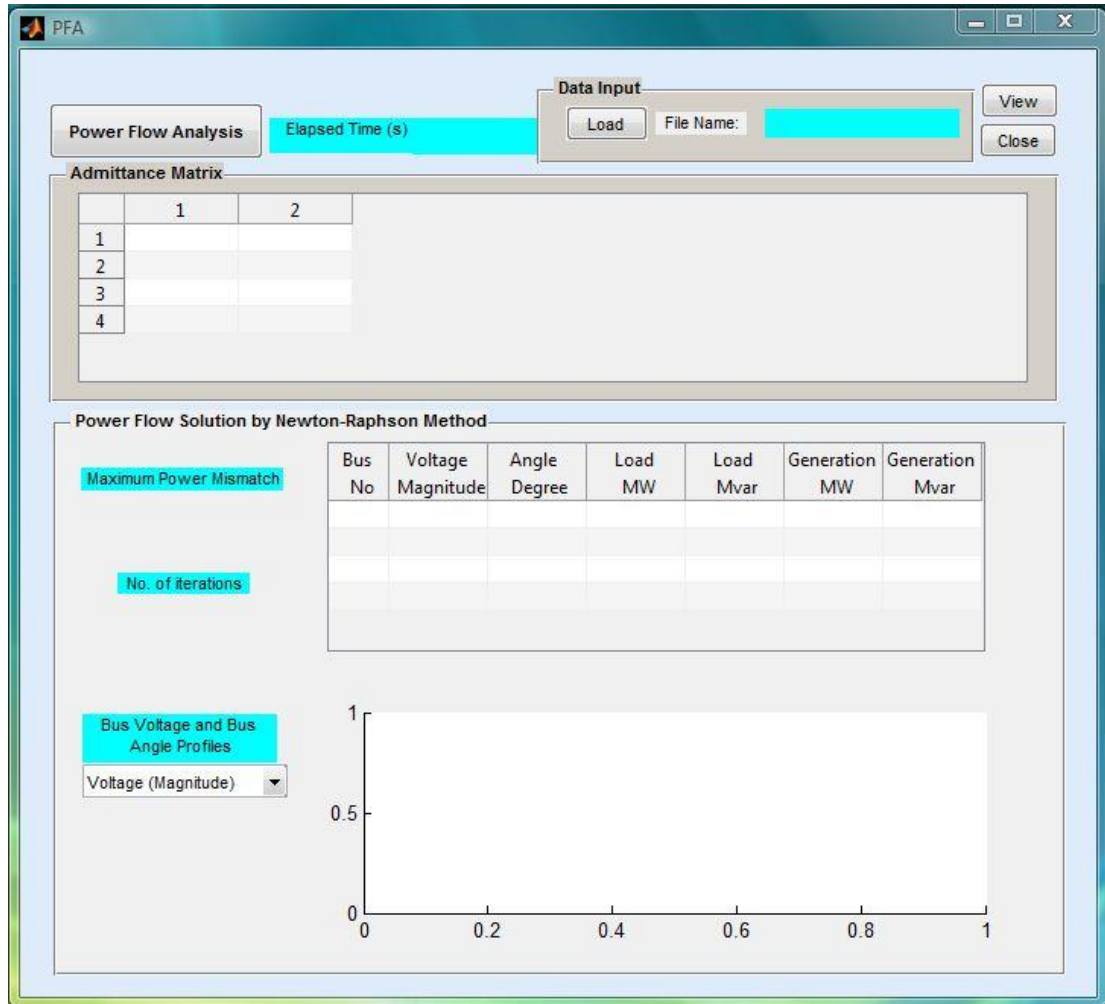


Şekil 9.2 : PowSysGUI programının ana grafik kullanıcı ara yüzü.

Bu bileşenler kullanılarak, en basit bir hesap makinası tasarımından tutun da gelişmiş özelliklere sahip bir GUI programına kadar her türlü program tasarımı kolaylıkla oluşturulabilir. Şekil 9.1’de GUI tasarım penceresindeki bileşenler gösterilmiştir. Bu tezde, bu bileşenlerden faydalanıldı ve her birleşene ait kodlar gerekli işlevleri yerine getirmesi için yazıldı.

9.2 Program Paketinin Genel Özellikleri

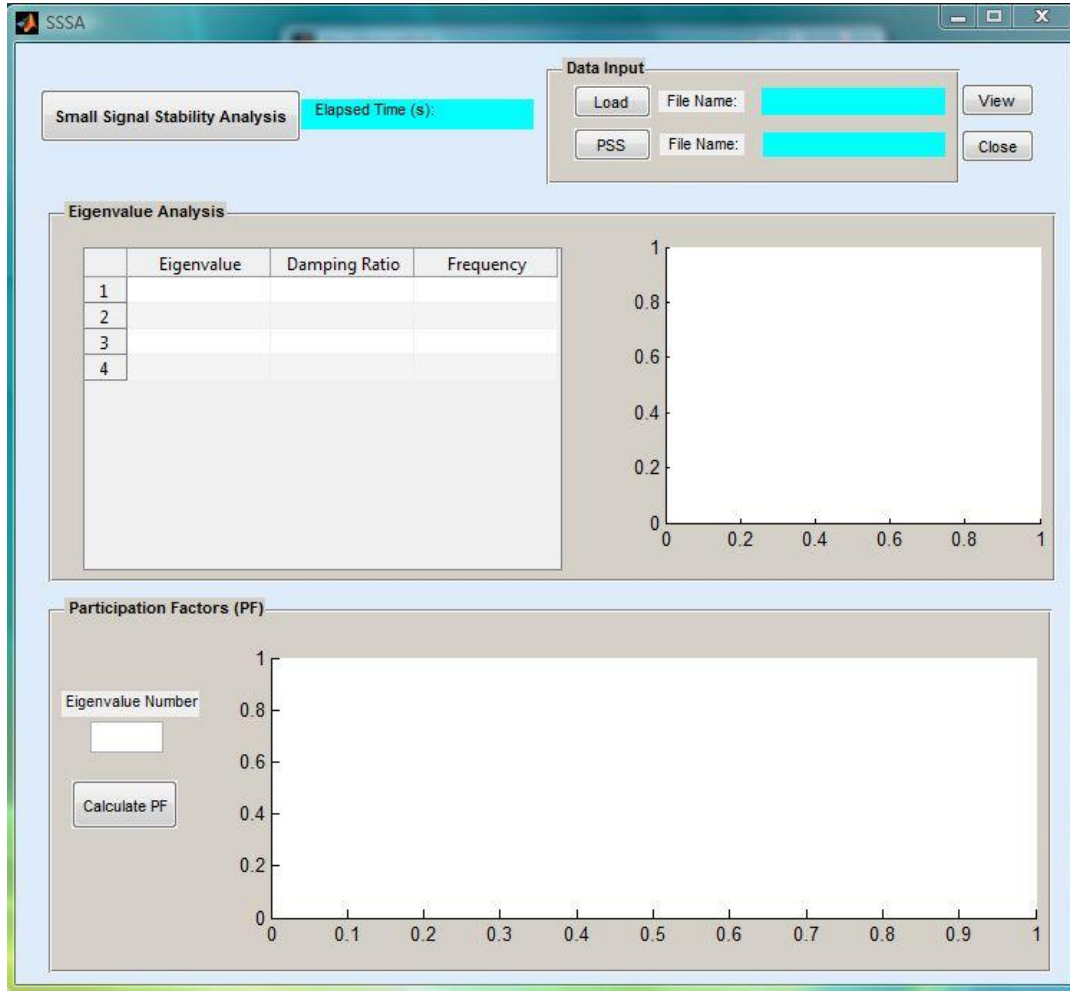
Bu tezde, MATLAB/Simulink tabanlı güç sistem analizi yapabilecek, Şekil 9.2’de gösterilen yeni gelişmiş grafik kullanıcı arabirimine (GUI) sahip bir program tasarlandı. MATLAB komut satırına “developedGUI” yazılarak program açılır. Bu yeni GUI paket programı (PowSysGUI) 4 temel işlevi yapabilecek yapıdadır.



Şekil 9.3 : Yük Akış Analizi Programı ara yüzü.

Ayrıca **EK D**'de PowSysGUI paket programının kullanımı hakkında bilgiler mevcuttur.

1) Yük Akış Analizi (Power Flow Analysis: PFA): PowSysGUI ana programındaki “Power Flow Analysis” düğmesine basılarak veya MATLAB komut satırına “PFA” yazılarak bu alt program açılır. Bu programın ara yüzü şekil 9.3’te verilmiştir. Bu program çalıştırılmadan önce “Data Input” kısmına incelenen güç sistemine ilişkin bara, hat, generatör ve uyarma sistemi gibi verilerin girilmesi gerekmektedir. Veri girişinden sonra “File Name:” yanındaki kutucukta yüklenen verilerin dosya adı görünür. Veri yükleme başarısız olursa o kutucukta “0” yazılmış görülür. Veriler başarılı şekilde yüklendikten sonra şekil 9.3’teki *Power Flow Analysis* düğmesine tıklanarak sisteme yüklenen veriler kullanılarak bu program çalışmaya başlar ve program çalışması bitince *Elapsed Time* kutucuğunda geçen süre saniye olarak görülür. Bu alt program sayesinde istenilen güç sistemine ait admitans matris ve Newton-Raphson metodu kullanılarak yük akış sonucu bulunur.

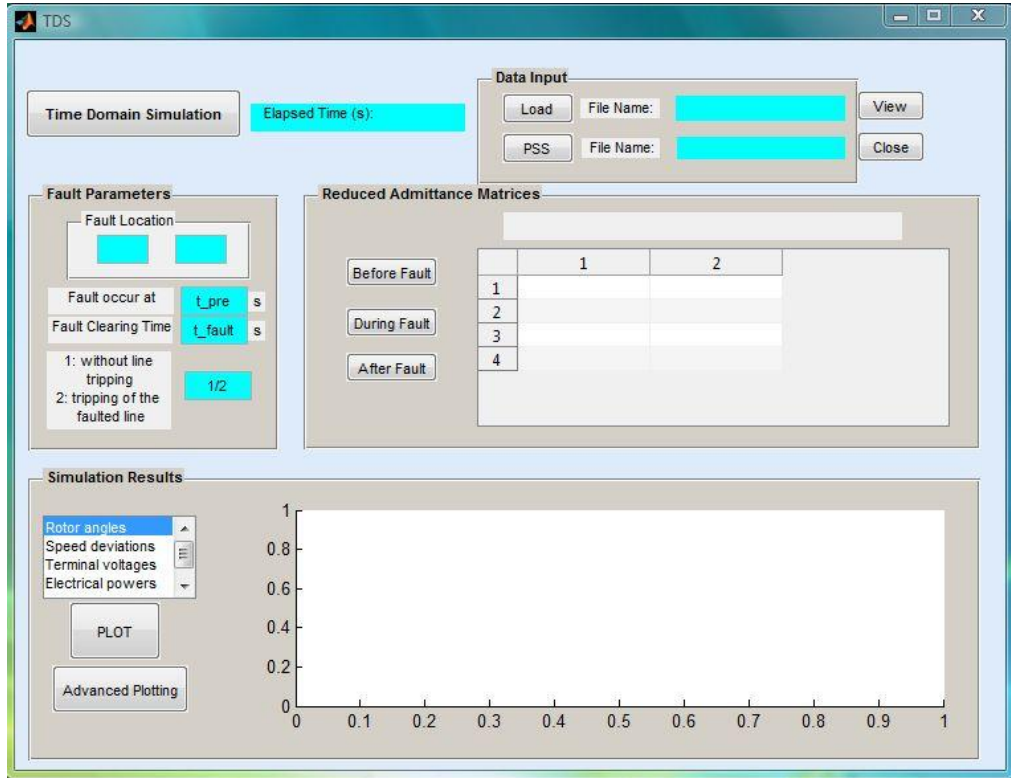


şekil 9.4 : Küçük İşaret Kararlılık Analizi Programı ara yüzü.

2) Küçük İşaret Kararlılık Analizi (Small Signal Stability Analysis: SSSA):

Programı çalıştırmak için MATLAB komut satırına “SSSA” yazılır. Önceki programa benzer şekilde, programı çalıştırmak için öncelikle güç sistemine ilişkin gerekli veriler yüklenir. Şekil 9.4’te gösterilen bu alt program sayesinde örnek güç sisteminin özdeğerleri ve o özdeğerlere karşılık düşen sönüm oranları ve frekansları bulunabilir. Bu program aynı zamanda Katılım Faktörü (*Participation Factor*) Analizi de yapabilmektedir ve her özdeğere karşılık düşen katılım faktörü oranlarını grafik olarak ekrana yansıtır.

3) Geçici Hal Kararlılık Analizi (Time Domain Simulation: TDS): Programı çalıştırmak için MATLAB komut satırına “TDS” yazılır. Programı çalıştırmadan önce veriler yüklenir. Şekil 9.5’te gösterilen bu alt program yardımıyla, ‘arıza parametreleri’ paneli kullanılarak istenilen hat yerinde (hattın devreden çıkarılması/yeniden eski haline dönmesi) ve istenilen arıza temizleme süreleri kullanılarak değişik arıza türleri oluşturulabilir. Herhangi bir arızaya maruz kalan lineer olmayan güç sisteminin zaman domeninde analizi yapılabilir. Rotor açıları, rotor hız değişimleri, uç gerilimleri, elektriksel güçler ve istenilen her işareten çıkış alınabilir. Ayrıca, güç sisteminin indirgenmiş admitans matrislerini (arıza öncesi, esnası ve sonrası için) ekrana yansıtabilmektedir.

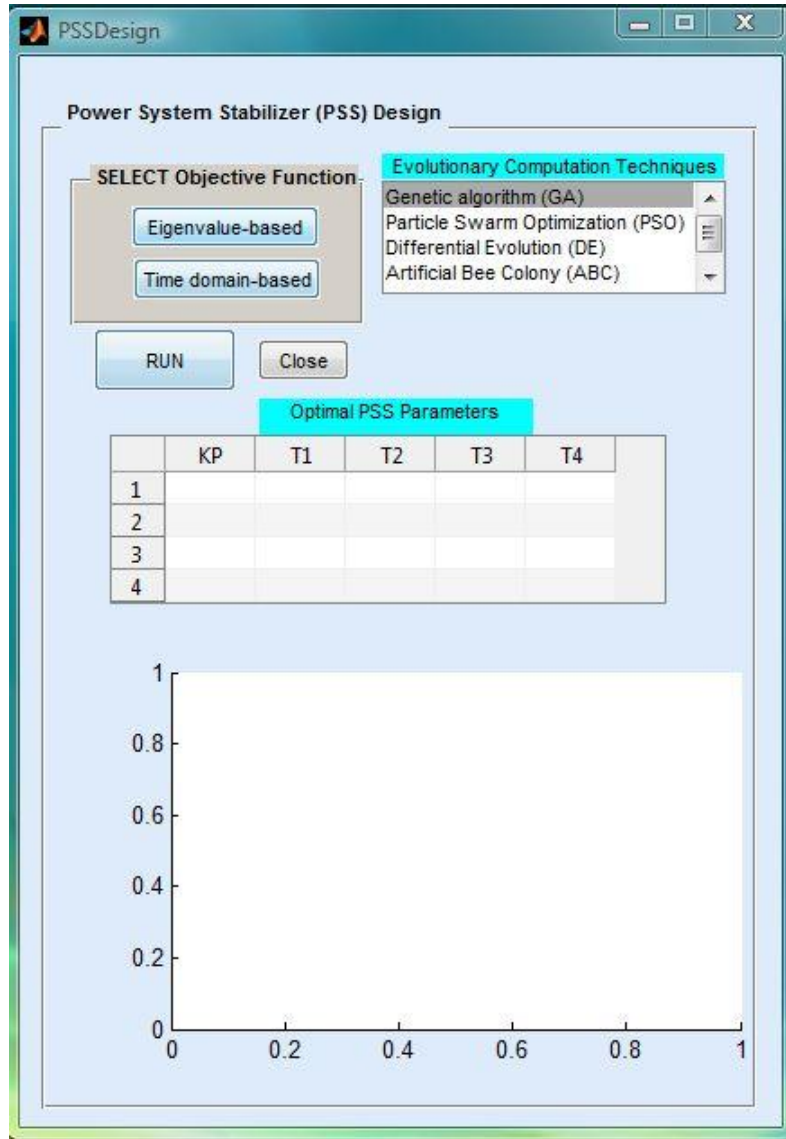


Şekil 9.5 : Geçici Hal Kararlılık Analizi Programı ara yüzü.

İleri kullanımlar ve sisteme çeşitli arızalar verilmek istenirse “Advanced Plotting” butonuna tıklanır. Butona tıklandığında çeşitli alt bloklar kullanılarak modellenen güç sisteminin Simulink tabanlı tasarım dosyası açılır. Simulink tabanlı bu dosya yardımıyla lineer olmayan güç sisteminin modellenmesi açık şekilde görülebilir ve bu dosya ekleme değiştirme olanağına sahiptir.

4) Sezgisel optimizasyon teknikleri ile güç sistemi kararlı kılıcı (PSS) tasarımı:

MATLAB komut satırına “PSSDesign” yazılarak program başlatılır. Şekil 9.6’da gösterilen bu alt program ile PSS tasarımı, istenilen amaç fonksiyonu ve istenilen optimizasyon tekniği seçilerek kontrolör parametreleri optimize edilir. Amaç fonksiyonu olarak özdeğer tabanlı veya zaman domeni tabanlı çeşitli fonksiyonlar seçilebilir. Ayrıca, kullanıcı yeni bir amaç fonksiyonu tanımlayıp tasarım yapabilir.

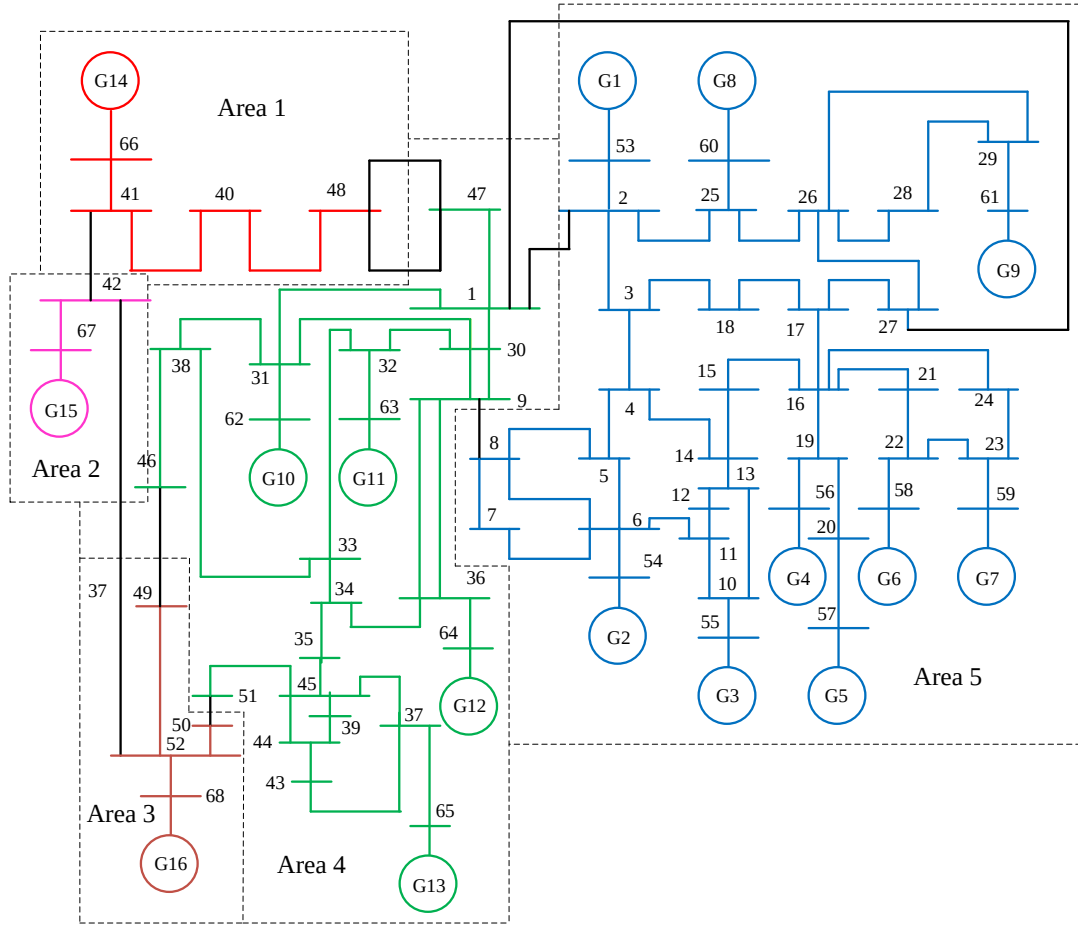


Şekil 9.6 : PSS Tasarım Programı ara yüzü.

Bu alt programda aktif olarak çalışan algoritmalar PSO ve ABC teknikleridir ve ilerde diğer algoritmaların eklenebilme özelliğine sahiptir. Amaç fonksiyonu ve optimizasyon tekniği seçildikten sonra “RUN” butonuna basılarak optimizasyon süreci başlatılmış olur. Optimizasyon süreci bittikten sonra, optimize edilen parametreler tablo halinde ekrana gelir ve seçilen amaç fonksiyonun iterasyon sayısına göre grafiği de ekranda yansır.

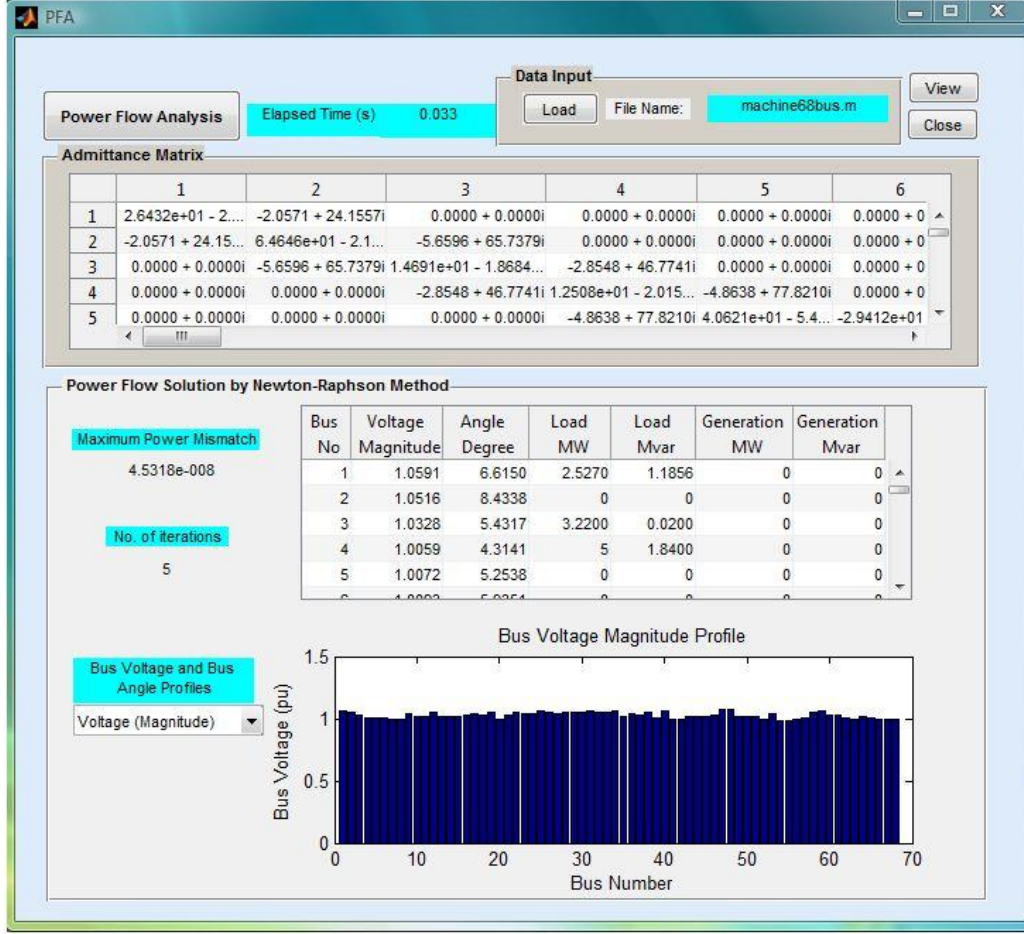
9.3 Programın Test Edilmesi

PowSysGUI paket programının etkinliği ve çalışma performansı farklı güç sistemlerinde test edildi (3 makinalı 9 baralı, 10 makinalı 39 baralı ve 16 makinalı 68 baralı güç sistemleri). Tezin bu kısmında, geliştirilen PowSysGUI paket programı Şekil 9.7’de gösterilen ve daha büyük bir sistem olan 16 makinalı 68 baralı IEEE örnek güç sistemi [63-64] üzerindeki etkinliği gösterilmiştir. Bu sistemin frekansı 60 Hz ve temel büyük olarak 100 MVA alınmıştır.



Şekil 9.7 : 16 makinalı 68 baralı güç sistemi.

Örnek güç sisteminin bara, hat, generatör ve uyarma sistemi dataları **EK E**'de verilmiştir. *Yük Akış Analizi Programı* kullanılarak bulunan yük akış sonuçları Şekil 9.8 ve Çizelge 9.1'de verilmiştir.



Şekil 9.8 : Örnek güç sisteminin yük akış sonuçları.

Çizelge 9.1: 16 makinalı sistemin yük akış sonuçları.

Bara No	Tür	Gerilim	Açı (Derece)	$-P_L$	$-Q_L$	P_G	Q_G
1	PQ	1.0591	6.6150	2.5270	1.1856	0	0
2	PQ	1.0516	8.4338	0	0	0	0
3	PQ	1.0328	5.4317	3.2200	0.0200	0	0
4	PQ	1.0059	4.3141	5.0000	1.8400	0	0
5	PQ	1.0072	5.2538	0	0	0	0
6	PQ	1.0093	5.9351	0	0	0	0
7	PQ	0.9995	3.6644	2.3400	0.8400	0	0
8	PQ	0.9990	3.1221	5.2200	1.7700	0	0
9	PQ	1.0391	2.5792	1.0400	1.2500	0	0
10	PQ	1.0184	8.4534	0	0	0	0
11	PQ	1.0141	7.5963	0	0	0	0
12	PQ	1.0553	7.6199	0.0900	0.8800	0	0
13	PQ	1.0157	7.7854	0	0	0	0
14	PQ	1.0134	6.2381	0	0	0	0

15	PQ	1.0171	6.1423	3.2000	1.5300	0	0
16	PQ	1.0334	7.6789	3.2900	0.3200	0	0
17	PQ	1.0365	6.5853	0	0	0	0
18	PQ	1.0338	5.7198	1.5800	0.3000	0	0
19	PQ	1.0501	12.2738	0	0	0	0
20	PQ	0.9904	10.8411	6.8000	1.0300	0	0
21	PQ	1.0325	10.3137	2.7400	1.1500	0	0
22	PQ	1.0501	14.9965	0	0	0	0
23	PQ	1.0450	14.7084	2.4800	0.8500	0	0
24	PQ	1.0386	7.8521	3.0900	-0.9200	0	0
25	PQ	1.0598	9.6977	2.2400	0.4700	0	0
26	PQ	1.0561	8.1988	1.3900	0.1700	0	0
27	PQ	1.0434	6.3142	2.8100	0.7600	0	0
28	PQ	1.0520	11.3328	2.0600	0.2800	0	0
29	PQ	1.0509	13.9700	2.8400	0.2700	0	0
30	PQ	1.0536	6.0686	0	0	0	0
31	PQ	1.0573	8.6303	0	0	0	0
32	PQ	1.0511	10.9564	0	0	0	0
33	PQ	1.0563	7.4727	1.1200	0	0	0
34	PQ	1.0652	2.5372	0	0	0	0
35	PQ	1.0139	2.5329	0	0	0	0
36	PQ	1.0423	-0.8475	1.0200	-0.1946	0	0
37	PQ	1.0290	-6.8046	60.0000	3.0000	0	0
38	PQ	1.0558	8.6771	0	0	0	0
39	PQ	1.0057	-8.4423	2.6700	0.1260	0	0
40	PQ	1.0677	15.2164	0.6563	0.2353	0	0
41	PQ	0.9994	44.4892	10.0000	2.5000	0	0
42	PQ	0.9991	38.9245	11.5000	2.5000	0	0
43	PQ	1.0147	-7.6065	0	0	0	0
44	PQ	1.0140	-7.6366	2.6755	0.0484	0	0
45	PQ	1.0178	2.5251	2.0800	0.2100	0	0
46	PQ	1.0324	9.6462	1.5070	0.2850	0	0
47	PQ	1.0738	7.3628	2.0312	0.3259	0	0
48	PQ	1.0765	9.2792	2.4120	0.0220	0	0
49	PQ	1.0117	12.8815	1.6400	0.2900	0	0
50	PQ	1.0119	19.3313	1.0000	-1.4700	0	0
51	PQ	1.0221	6.5226	3.3700	-1.2200	0	0
52	PQ	0.9935	38.5921	24.7000	1.2300	0	0
53	PV	1.0450	10.8528	0	0	2.5000	1.1548
54	PV	0.9800	14.4107	0	0	5.4500	1.8428
55	PV	0.9830	16.4403	0	0	6.5000	1.9875
56	PV	0.9970	17.4924	0	0	6.3200	1.0709
57	PV	1.0110	16.0139	0	0	5.0520	1.6234
58	PV	1.0500	20.3357	0	0	7.0000	2.1975
59	PV	1.0630	22.5644	0	0	5.6000	0.9851
60	PV	1.0300	16.4532	0	0	5.4000	0.0030
61	PV	1.0250	20.7882	0	0	8.0000	0.0492
62	PV	1.0100	15.9039	0	0	5.0000	0.0605
63	PV	1.0000	18.3469	0	0	10.0000	-0.1728
64	PV	1.0156	4.8617	0	0	13.5000	2.4914

65	gevşek	1.0110	0	0	0	35.9142	8.7543
66	PV	1.0000	46.0243	0	0	17.8500	0.6218
67	PV	1.0000	39.7848	0	0	10.0000	0.6718
68	PV	1.0000	45.5297	0	0	40.0000	4.6003

Çizelge 9.2 : Kontrolsüz sistemin özdeğerleri, sönüm oranları ve frekansları.

Mod	Özdeğer (λ)	Sönüm Oranı (ζ)	Frekans (f)
1	-10.1413 +29.3217i	0.3269	4.9379
2	-10.1413 -29.3217i	0.3269	4.9379
3	-10.1811 +27.8350i	0.3435	4.7171
4	-10.1811 -27.8350i	0.3435	4.7171
5	-10.1852 +23.8123i	0.3933	4.1220
6	-10.1852 -23.8123i	0.3933	4.1220
7	-10.2037 +20.8641i	0.4393	3.6965
8	-10.2037 -20.8641i	0.4393	3.6965
9	-10.0805 +18.9548i	0.4695	3.4168
10	-10.0805 -18.9548i	0.4695	3.4168
11	-10.0133 +17.9773i	0.4866	3.2751
12	-10.0133 -17.9773i	0.4866	3.2751
13	-10.6160 +14.9768i	0.5783	2.9217
14	-10.6160 -14.9768i	0.5783	2.9217
15	-10.2789 +13.0611i	0.6184	2.6453
16	-10.2789 -13.0611i	0.6184	2.6453
17	-10.4116 +12.1221i	0.6516	2.5432
18	-10.4116 -12.1221i	0.6516	2.5432
19	-10.2885 +10.4876i	0.7003	2.3382
20	-10.2885 -10.4876i	0.7003	2.3382
21	-10.1856 + 8.8405i	0.7552	2.1465
22	-10.1856 - 8.8405i	0.7552	2.1465
23	-9.9925 + 7.0456i	0.8173	1.9459
24	-9.9925 - 7.0456i	0.8173	1.9459
25	-10.5115 + 6.5253i	0.8496	1.9691
26	-10.5115 - 6.5253i	0.8496	1.9691
27	-9.8881 + 6.5587i	0.8333	1.8885
28	-9.8881 - 6.5587i	0.8333	1.8885
29	-10.0710 + 5.9891i	0.8595	1.8649
30	-10.0710 - 5.9891i	0.8595	1.8649
31	-10.3803 + 4.4173i	0.9201	1.7954
32	-10.3803 - 4.4173i	0.9201	1.7954
33	-0.4213 + 9.8699i	0.0426	1.5723
34	-0.4213 - 9.8699i	0.0426	1.5723
35	-0.0144 + 2.3973i	0.0060	0.3815
36	-0.0144 - 2.3973i	0.0060	0.3815
37	0.0066 + 3.1082i	-0.0021	0.4947
38	0.0066 - 3.1082i	-0.0021	0.4947
39	0.0238 + 4.1000i	-0.0058	0.6525
40	0.0238 - 4.1000i	-0.0058	0.6525

41	-0.0083 + 4.0457i	0.0020	0.6439
42	-0.0083 - 4.0457i	0.0020	0.6439
43	-0.4055 + 8.3929i	0.0483	1.3373
44	-0.4055 - 8.3929i	0.0483	1.3373
45	-0.2882 + 8.2724i	0.0348	1.3174
46	-0.2882 - 8.2724i	0.0348	1.3174
47	-0.3334 + 8.2767i	0.0403	1.3183
48	-0.3334 - 8.2767i	0.0403	1.3183
49	0.2144 + 6.2710i	-0.0342	0.9986
50	0.2144 - 6.2710i	-0.0342	0.9986
51	0.3750 + 7.2924i	-0.0514	1.1622
52	0.3750 - 7.2924i	-0.0514	1.1622
53	0.1267 + 6.6652i	-0.0190	1.0610
54	0.1267 - 6.6652i	-0.0190	1.0610
55	0.2417 + 6.8464i	-0.0353	1.0903
56	0.2417 - 6.8464i	-0.0353	1.0903
57	0.2243 + 7.2334i	-0.0310	1.1518
58	0.2243 - 7.2334i	-0.0310	1.1518
59	0.0848 + 7.1662i	-0.0118	1.1406
60	0.0848 - 7.1662i	-0.0118	1.1406
61	0.0675 + 7.0923i	-0.0095	1.1288
62	0.0675 - 7.0923i	-0.0095	1.1288
63	-0.0000 + 0.0000i	0.0000	0.0000
64	-0.0000 - 0.0000i	0.0000	0.0000

Çizelge 9.3 : Kontrolsüz sistemin elektromekanik salınım modları.

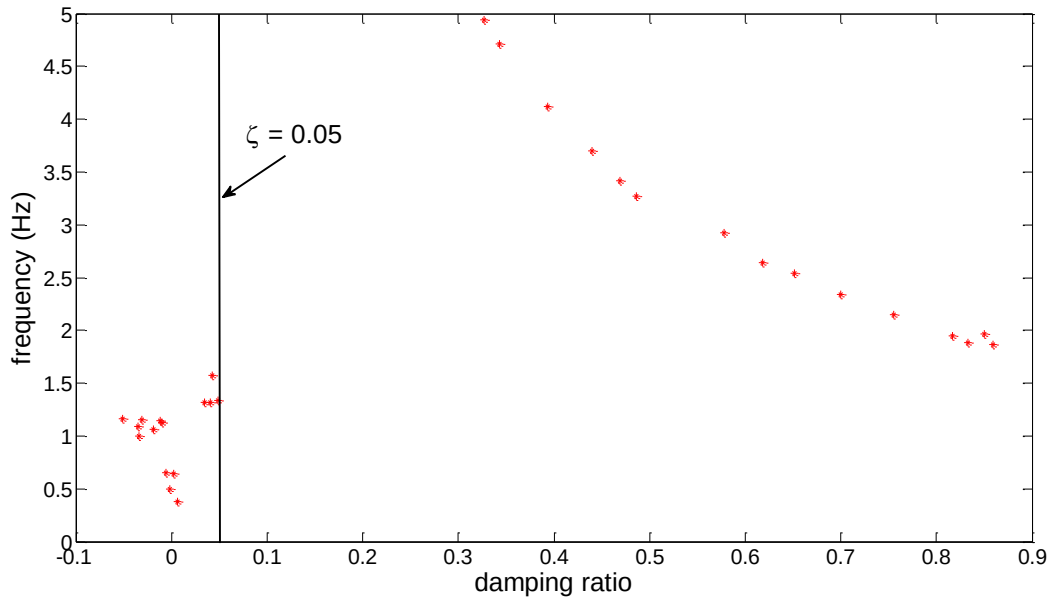
Mod	Özdeğer	Sönüm Oranı	Frekans	Baskın Makinalar
1,2	$0.2417 \pm 6.8464i$	-0.0353	1.0903	δ_2, ω_2
3,4	$0.2243 \pm 7.2334i$	-0.0310	1.1518	δ_3, ω_3
5,6	$-0.4055 \pm 8.3929i$	0.0483	1.3373	δ_4, ω_4
7,8	$0.1267 \pm 6.6652i$	-0.0190	1.0610	δ_5, ω_5
9,10	$0.0848 \pm 7.1662i$	-0.0118	1.1406	δ_6, ω_6
11,12	$-0.3334 \pm 8.2767i$	0.0403	1.3183	δ_7, ω_7
13,14	$-0.2882 \pm 8.2724i$	0.0348	1.3174	δ_8, ω_8
15,16	$0.3750 \pm 7.2924i$	-0.0514	1.1622	δ_9, ω_9
17,18	$0.0675 \pm 7.0923i$	-0.0095	1.1288	δ_{10}, ω_{10}
19,20	$-0.4213 \pm 9.8699i$	0.0426	1.5723	δ_{11}, ω_{11}
21,22	$0.2144 \pm 6.2710i$	-0.0342	0.9986	δ_{12}, ω_{12}
23,24	$-0.0144 \pm 2.3973i$	0.0060	0.3815	δ_{13}, ω_{13}
25,26	$0.0238 \pm 4.1000i$	-0.0058	0.6525	δ_{13}, ω_{13}
27,28	$-0.0083 \pm 4.0457i$	0.0020	0.6439	δ_{15}, ω_{15}
29,30	$0.0066 \pm 3.1082i$	-0.0021	0.4947	δ_{16}, ω_{16}

Küçük İşaret Kararlılık Analizi Programı kullanılarak, örnek güç sisteminin sistemde PSS olmaması durumundaki sistem özdeğerleri, sönüm oranları ve frekansları Çizelge 9.2’de gösterilmiştir. Bununla birlikte kontrolsüz sistemin elektromekanik salınım modları da Çizelge 9.3’te verilmiştir.

En uygun PSS yerleştirmeleri için Katılım Faktörü Analizi kullanılır. PSS tasarım problemi için PowSysGUI paket programının alt programlarından olan *PSS Tasarım Programı* kullanılır. Tasarım yapılırken özdeğer tabanlı aşağıdaki amaç fonksiyonu kullanıldı.

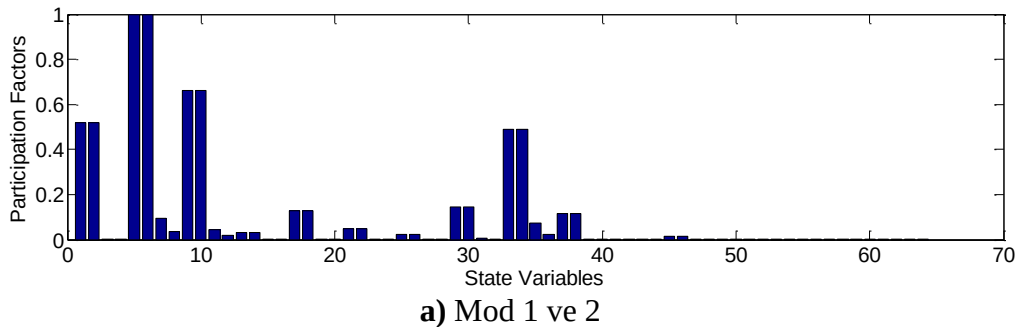
$$J_{eigen} = -\min(\zeta_i) \quad (9.1)$$

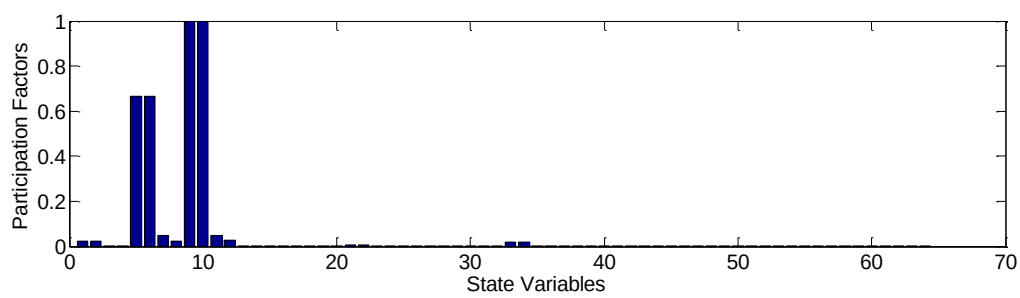
Tasarımdaki amaç, kontrolsüz sistemdeki tüm özdeğerlerin sönüm oranlarını $\zeta = 0.05$ doğrusunun sağına atmak. Bu sayede sistem sönümleri iyileşir. Sistemin tüm özdeğerlerinin sönüm oranı/frekans grafiği Şekil 9.9’da verilmiştir.



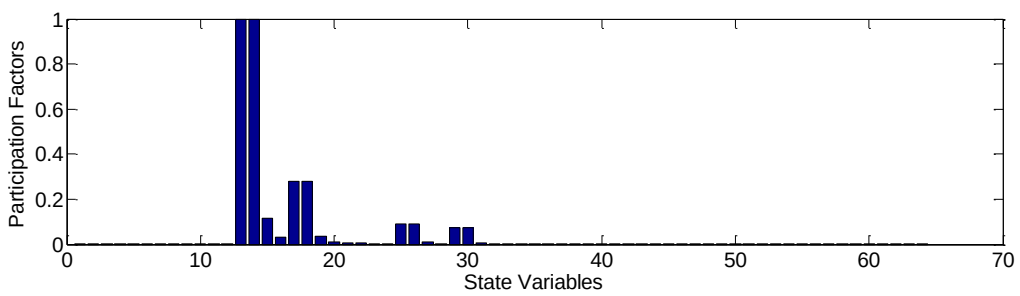
Şekil 9.9 : Kontrolsüz sistem için sönüm oranı/frekans grafiği.

Elektromekanik salınım modlarına ait katılım faktörleri Şekil 9.10’da verilmiştir.

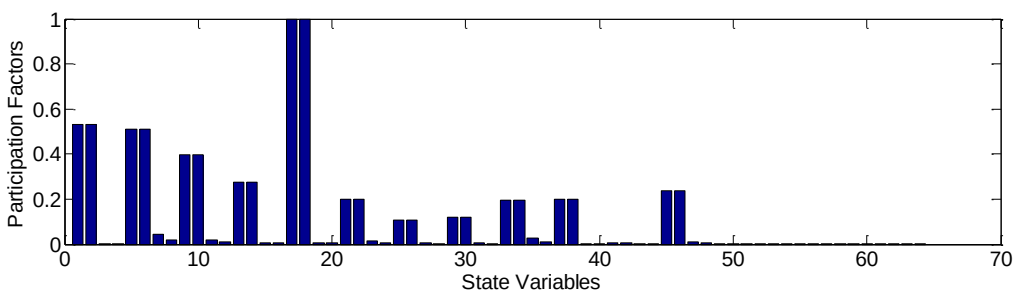




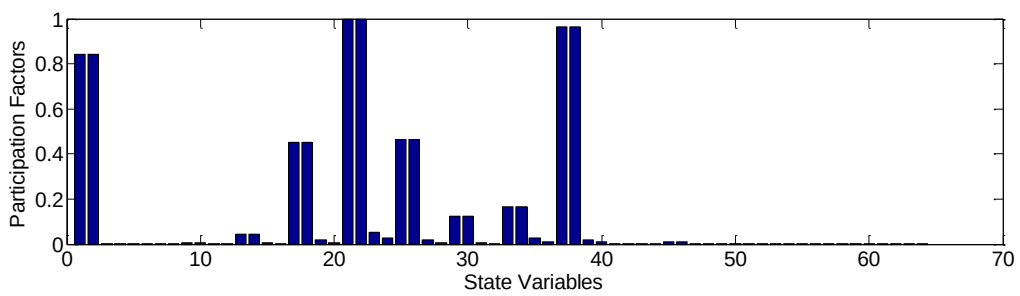
b) Mod 3 ve 4



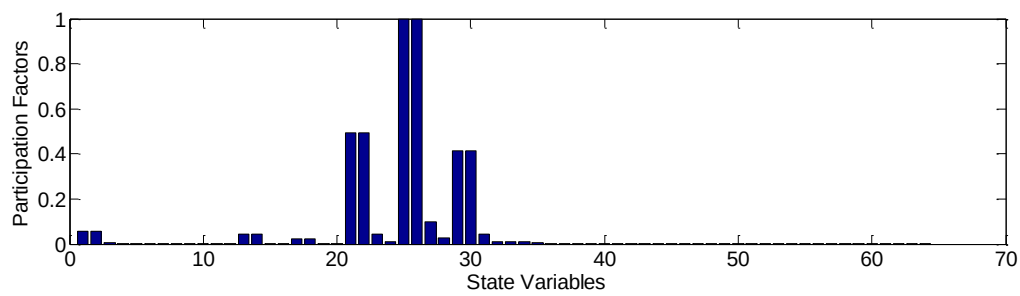
c) Mod 5 ve 6



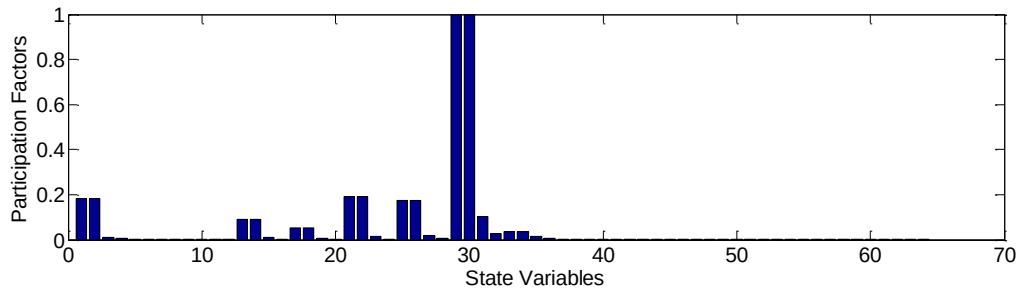
d) Mod 7 ve 8



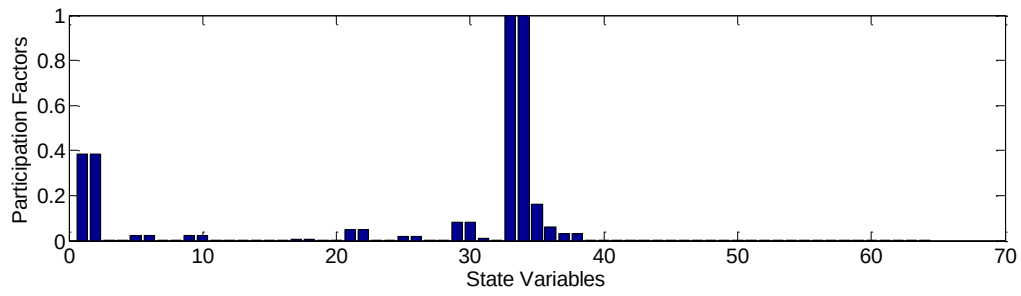
e) Mod 9 ve 10



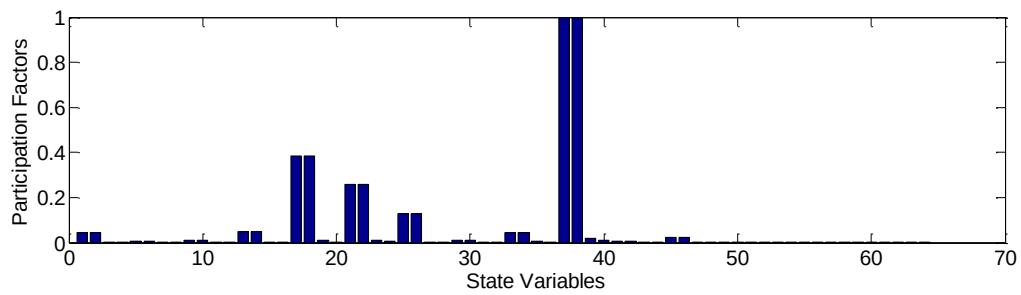
f) Mod 11 ve 12



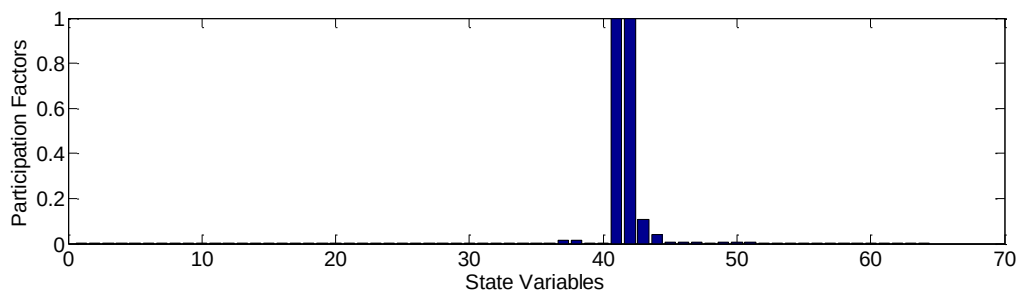
g) Mod 13 ve 14



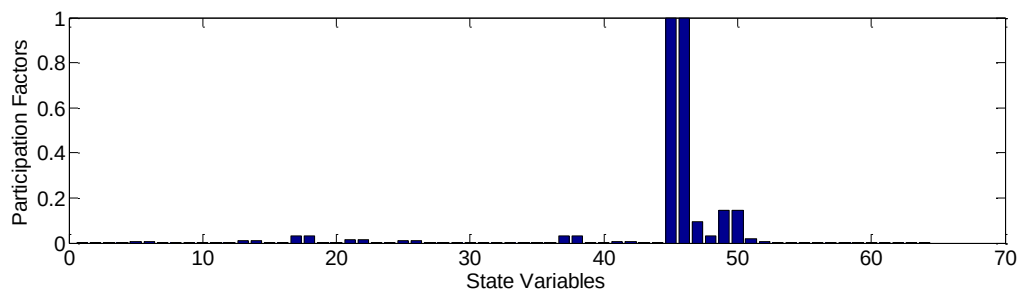
h) Mod 15 ve 16



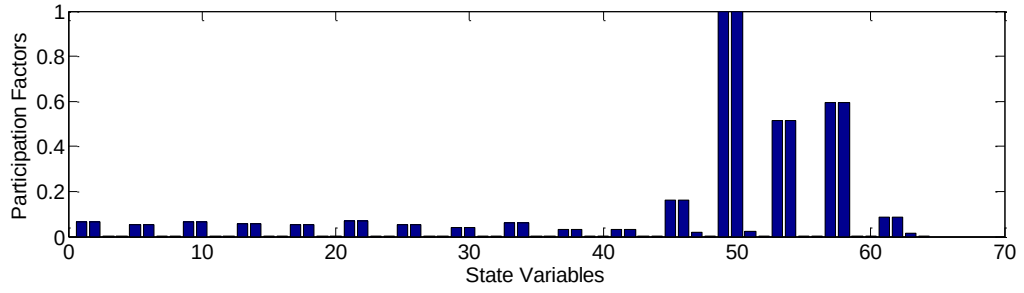
i) Mod 17 ve 18



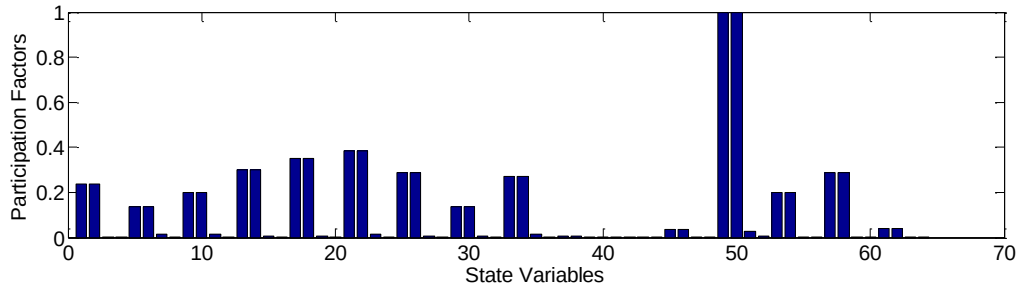
j) Mod 19 ve 20



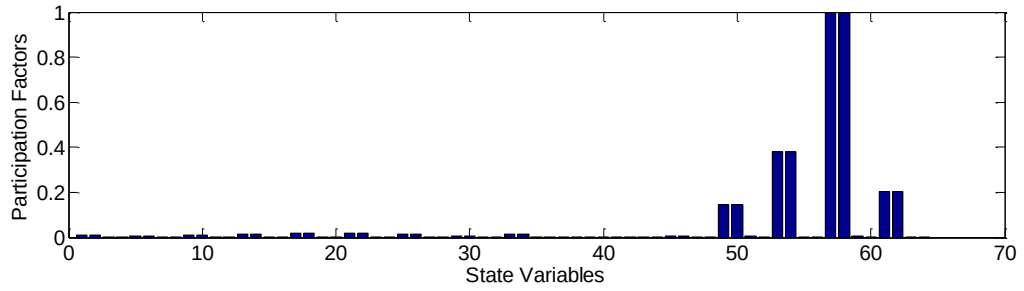
k) Mod 21 ve 22



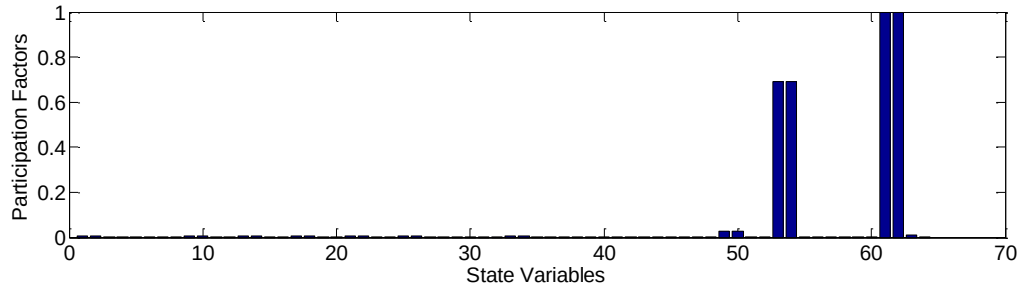
l) Mod 23 ve 24



m) Mod 25 ve 26



n) Mod 27 ve 28



o) Mod 29 ve 30

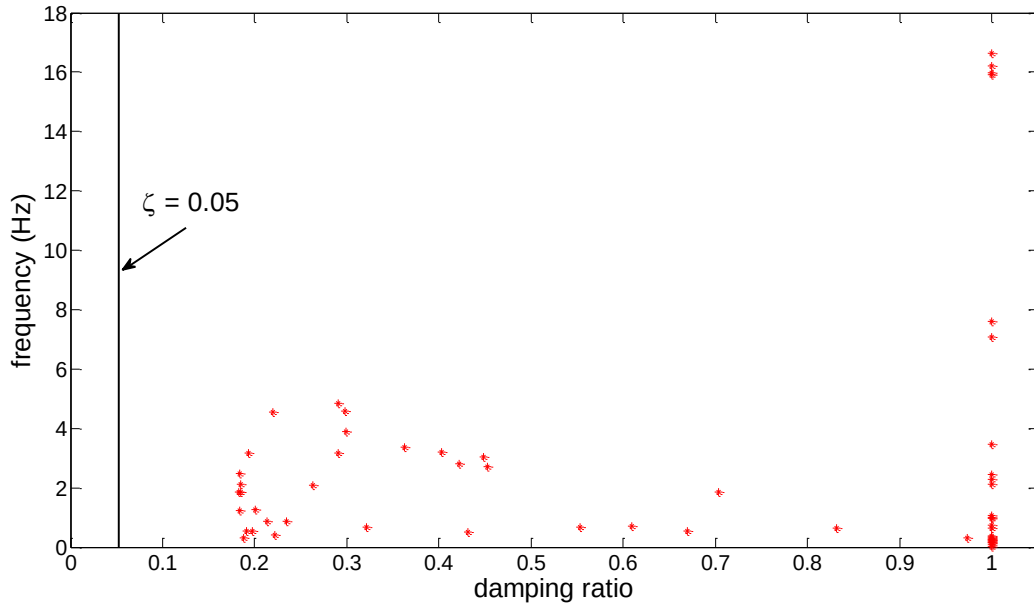
Şekil 9.10 : Elektromekanik salınım modları için katılım faktörleri.

Katılım Faktörü Analizinden görüleceği gibi *Generator 1* ve *Generator 14* haricindeki diğer tüm makinalara PSS yerleştirilmesi gerekmektedir. PSS Tasarım Programı yardımıyla ve ABC tekniği (başka teknikler de kullanılabilir) kullanılarak bulunan optimize edilen PSS parametreleri Çizelge 9.4'te verilmiştir.

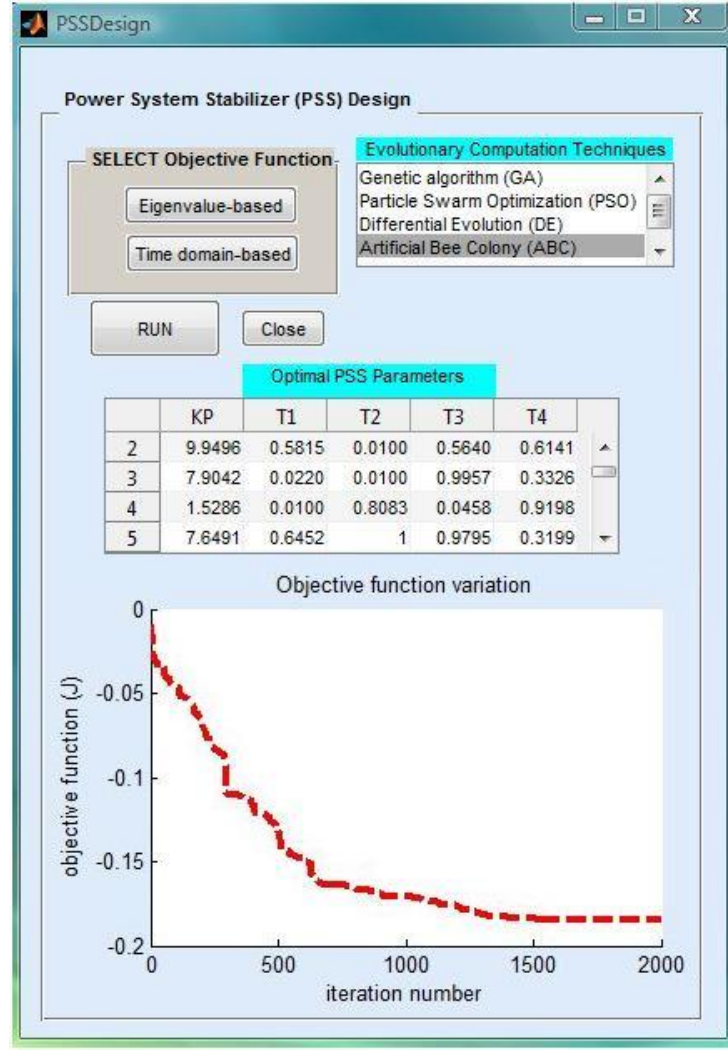
Çizelge 9.4 : ABC tekniği kullanarak bulunan PSS parametreleri.

Gen.	K_P	T_1	T_2	T_3	T_4
G2	9.9496	0.5815	0.0100	0.5640	0.6141
G3	7.9042	0.0220	0.0100	0.9957	0.3326
G4	1.5286	0.0100	0.8083	0.0458	0.9198
G5	7.6491	0.6452	1.0000	0.9795	0.3199
G6	3.0160	1.0000	0.1786	0.2550	0.2250
G7	4.5033	0.6417	0.1110	0.6073	0.5791
G8	1.8638	0.4997	1.0000	0.6744	1.0000
G9	10.0000	1.0000	0.0100	0.0532	0.3789
G10	5.2058	0.0100	0.0100	0.5411	0.0100
G11	10.0000	0.6917	0.5109	0.1162	0.4588
G12	10.0000	1.0000	0.5282	0.3547	0.0260
G13	10.0000	0.6291	0.0277	0.4583	0.4234
G15	10.0000	1.0000	0.6347	0.9372	0.2259
G16	9.5640	1.0000	0.4450	0.6050	0.3197

Kontrollü sistemin tüm özdeğerlerinin sönüm oranı/frekans grafiği Şekil 9.11’de ve örnek güç sistemi için kullanılan *PSS Tasarım Programı* Şekil 9.12’de verilmiştir.

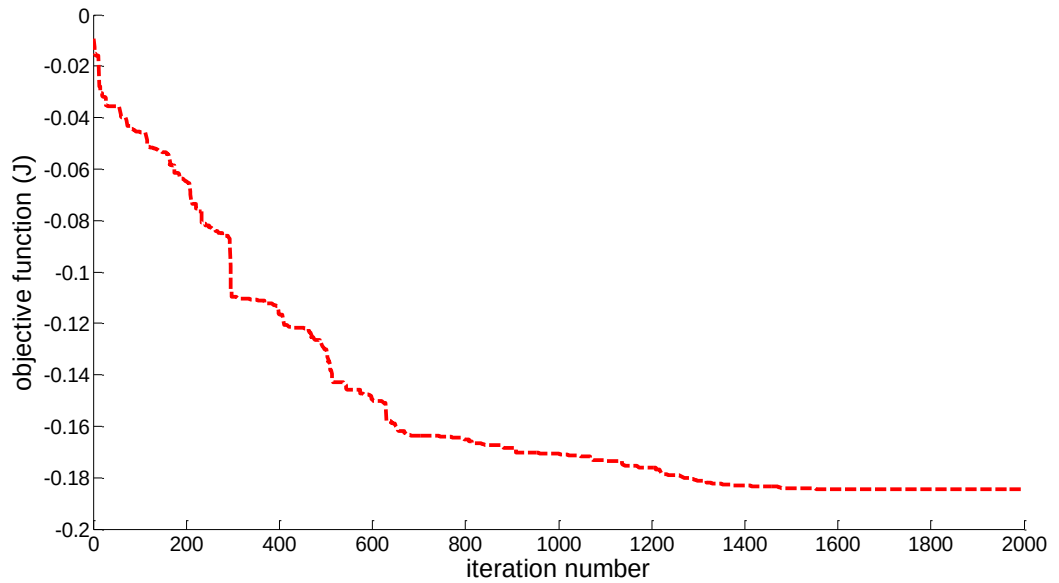


Şekil 9.11 : Kontrollü sistem için sönüm oranı/frekans grafiği.



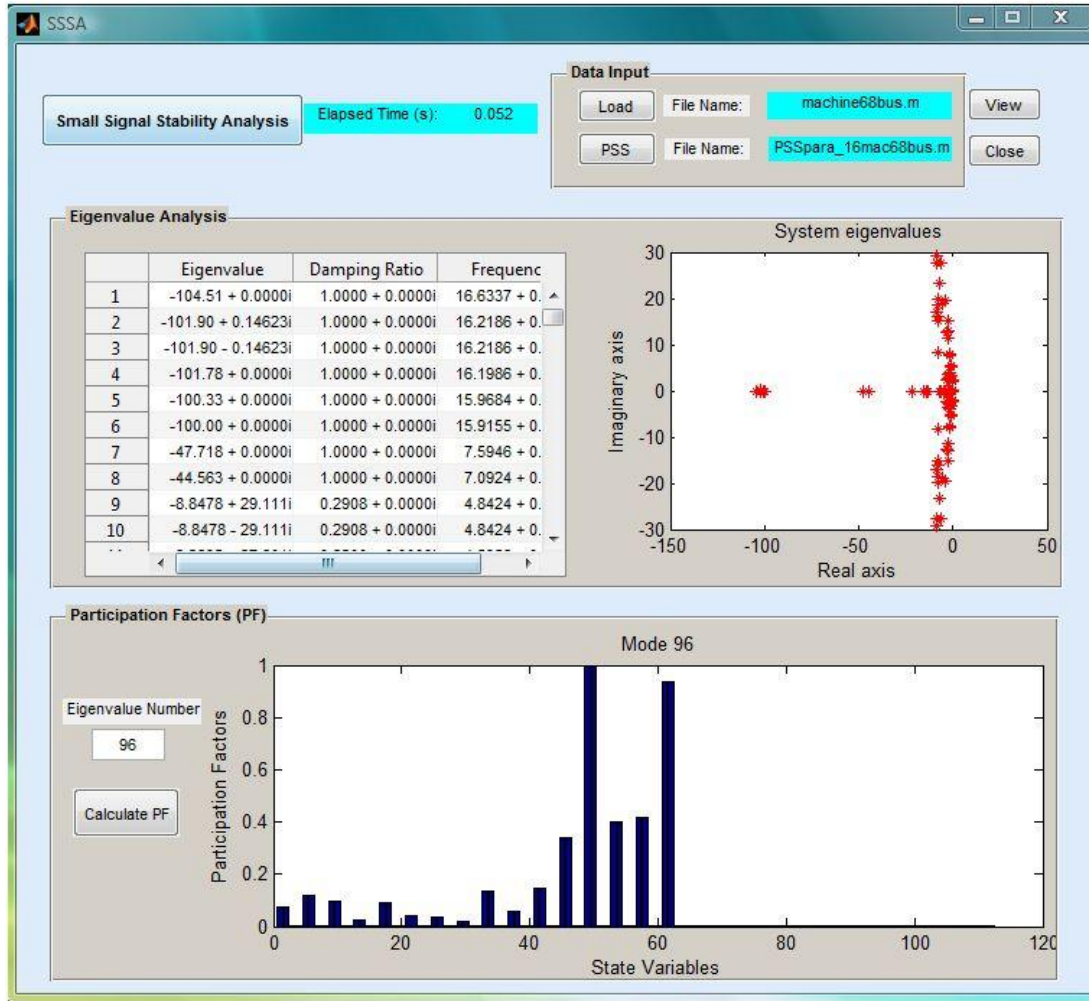
Şekil 9.12 : Örnek güç sistemi için kullanılan PSS Tasarım Programı.

J_{eigen} amaç fonksiyonunun iterasyon sayısı ile yaklaşımı Şekil 9.13'te verilmiştir.



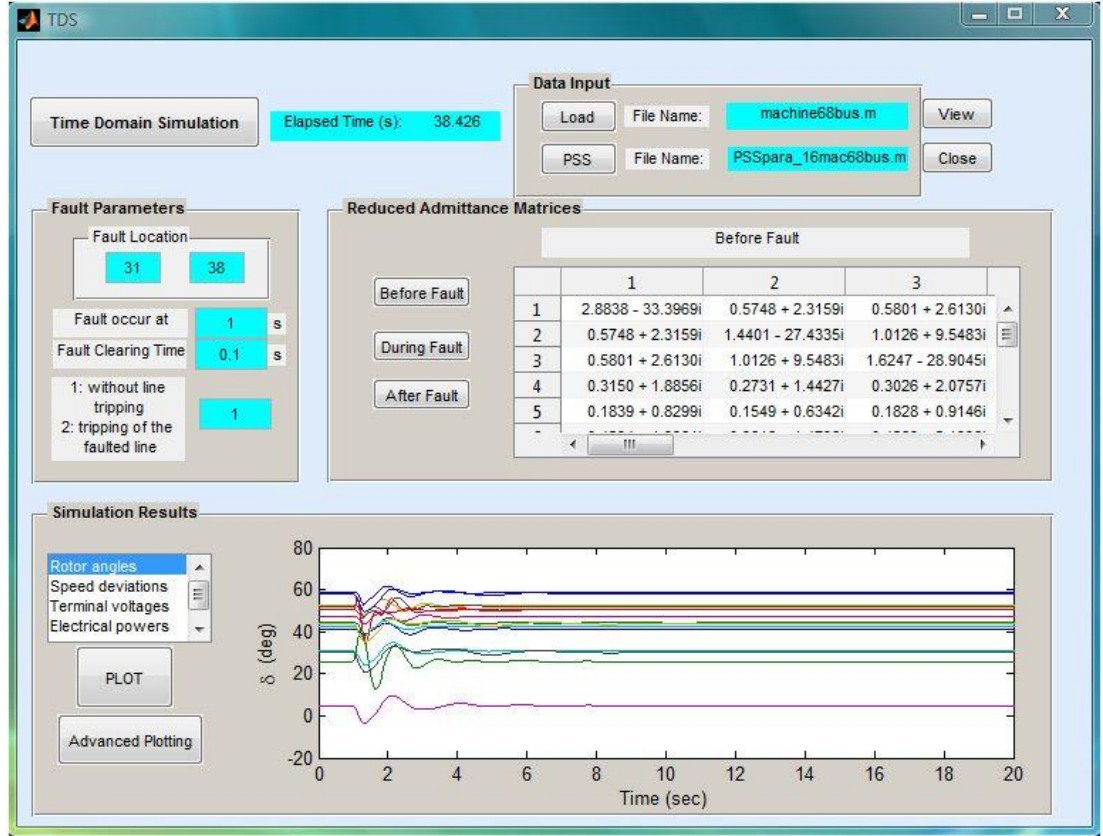
Şekil 9.13 : Amaç fonksiyonunun değişimi.

Kontrollü sistemin *Küçük İşaret Kararlılık Analizi Programı* kullanılarak bulunan sonuçları Şekil 9.14'te gösterilmiştir.



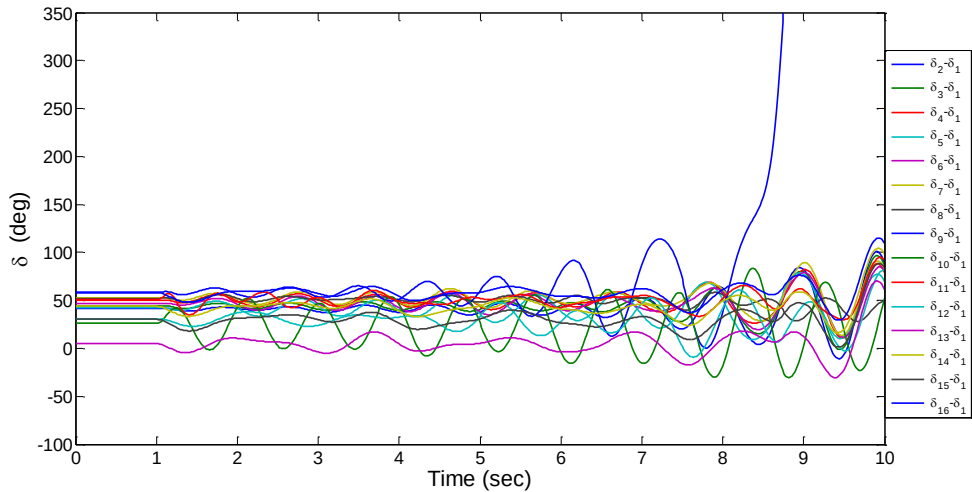
Şekil 9.14 : PSS'li sistemin küçük işaret kararlılık analizi.

16 makinalı 68 baralı güç sisteminin geçici kararlılık analizinde PowSysGUI paket programının alt programlarından olan *Geçici Hal Kararlılık Analizi Programı* kullanılır ve Şekil 9.15'te örnek güç sisteminin zaman domen simülasyonları görülmektedir. Bu programı test etmek için, lineer olmayan zaman domen simülasyonlarında 2 farklı durum ele alınmıştır.

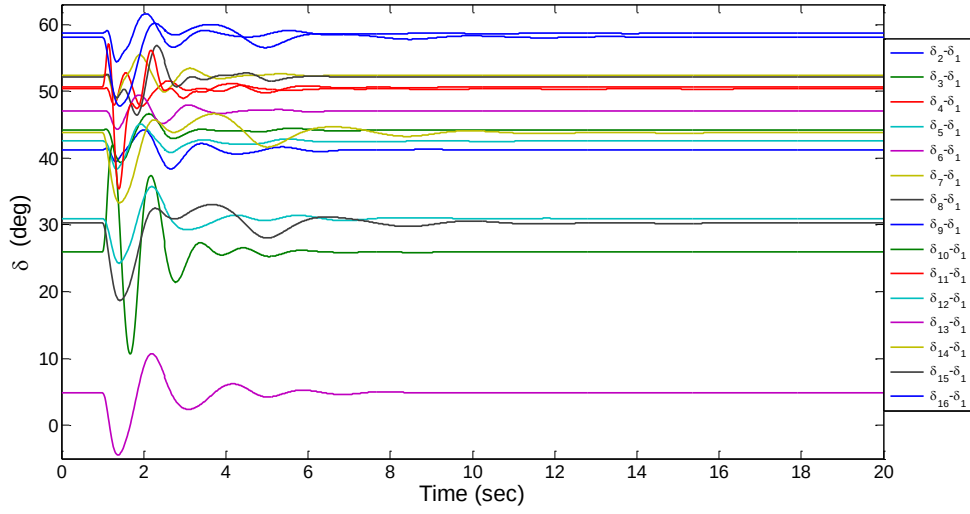


Şekil 9.15 : PSS'li sistemin geçici hal kararlılık analizi.

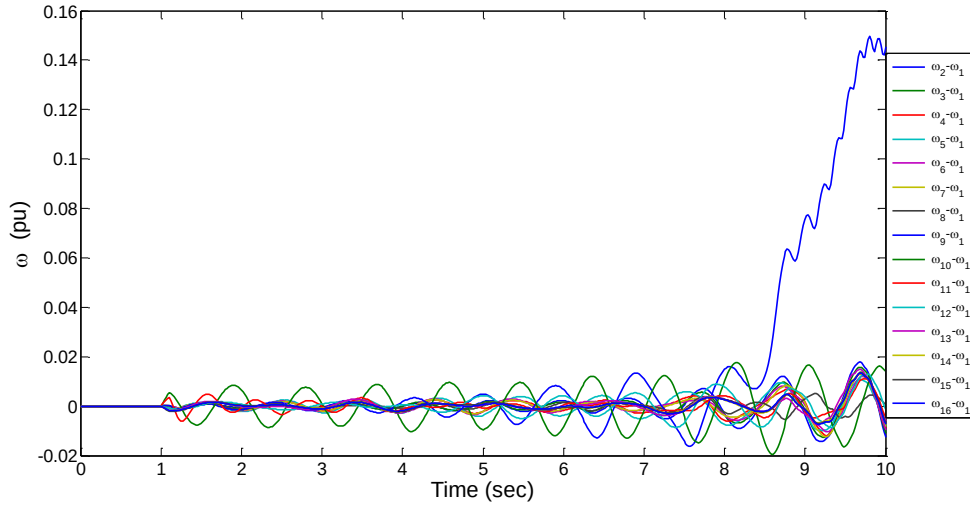
Arıza olan hattın eski haline dönmesi durumu: Bu ciddi arıza durumunda, $t = 1$ saniyede (arızadan önceki sistem durumu daha açık görülsün diye) 31 nolu barada ve 31-38 hattının sonunda üç fazlı $t_f = 0.10$ saniyelik (6 devir) bir arıza olduğu düşünüldü. Arızalı 31-38 hattı yeniden devreye sokularak (without line tripping) arıza giderildi. Sistemin kontrolsüz/kontrollü durumdayken sistem cevapları Şekil 9.16-9.23'te gösterilmiştir.



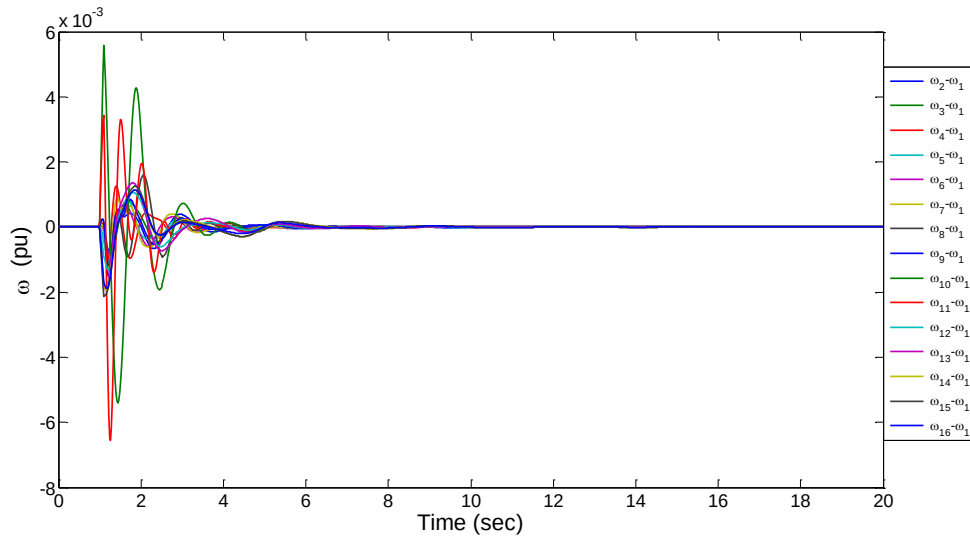
Şekil 9.16 : Kontrolsüz sistem için rotor açıları.



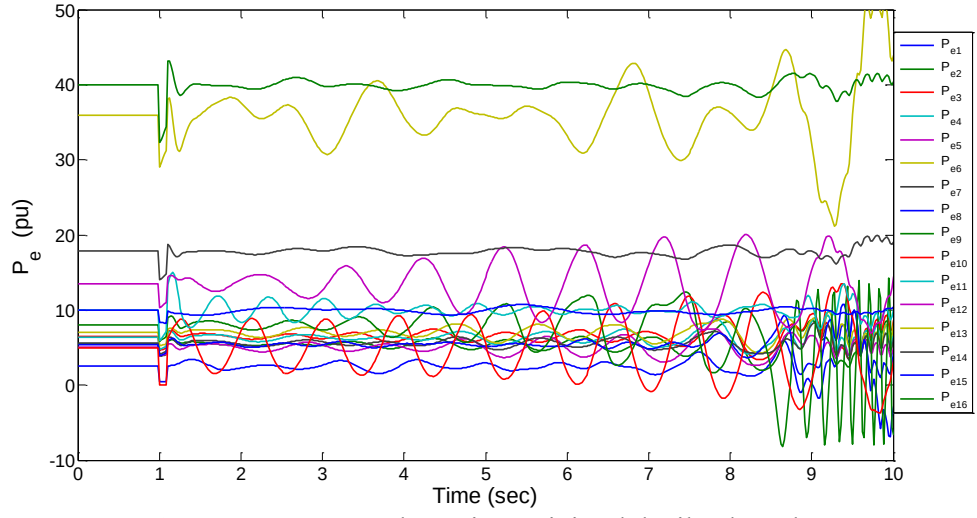
Şekil 9.17 : Kontrollü sistem için rotor açıları.



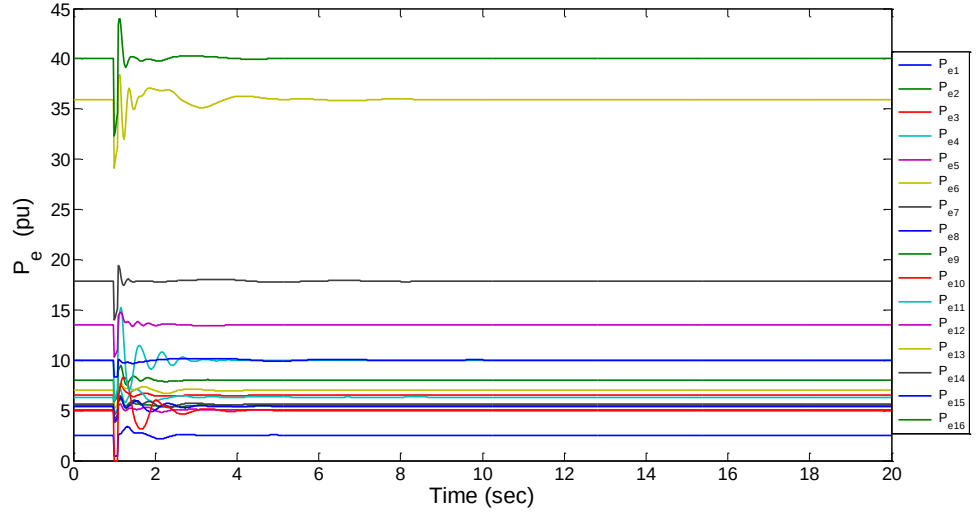
Şekil 9.18 : Kontrolsüz sistem için rotor hız sapmaları.



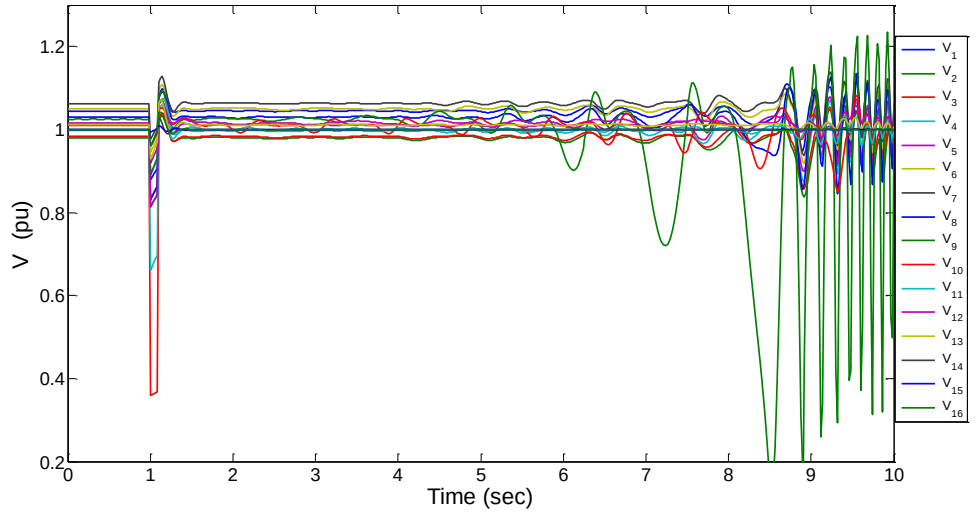
Şekil 9.19 : Kontrollü sistem için rotor hız sapmaları.



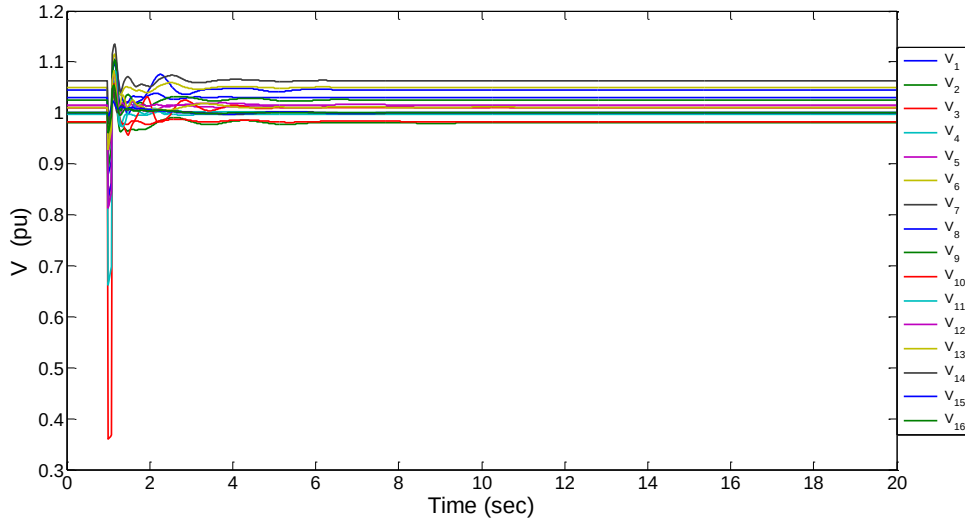
Şekil 9.20 : Kontrolsüz sistem için elektriksel güçler.



Şekil 9.21 : Kontrollü sistem için elektriksel güçler.

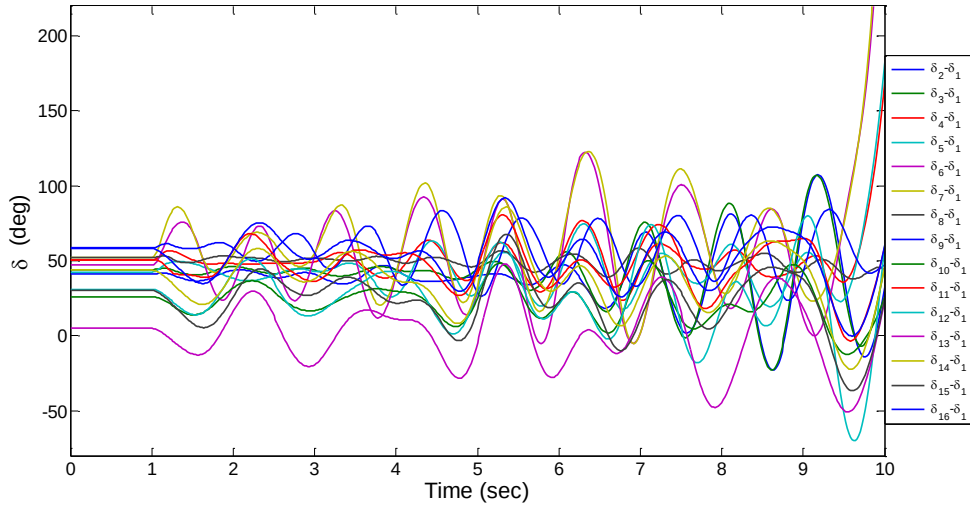


Şekil 9.22 : Kontrolsüz sistem için uç gerilimler.

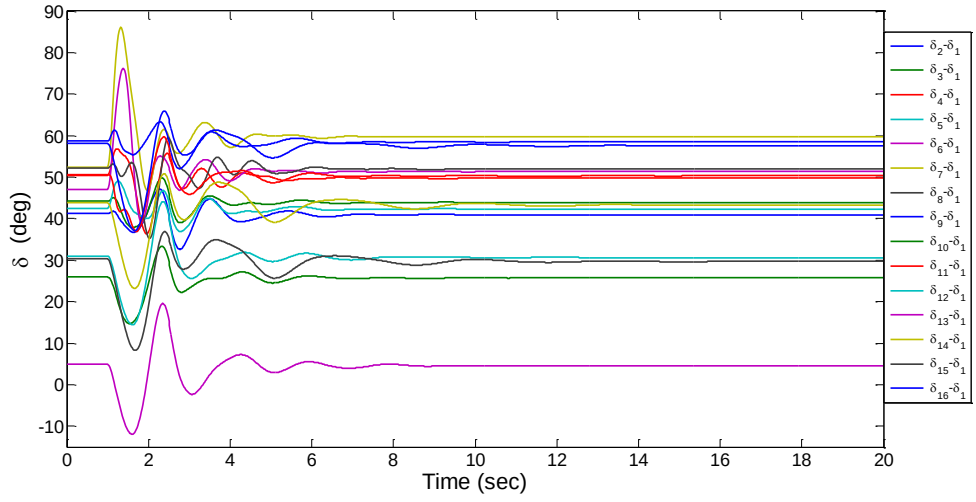


Şekil 9.23 : Kontrollü sistem için uç gerilimler.

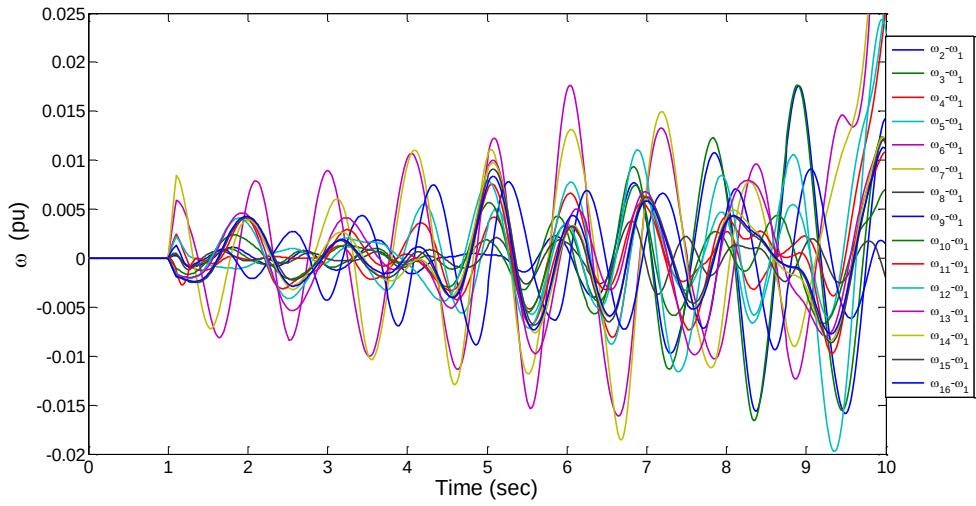
Arıza olan hattın devreden çıkarılma durumu: Bu ciddi arıza durumunda, $t = 1$ saniyede (arızadan önceki sistem durumu daha açık görülsün diye) 23 nolu barada ve 23-24 hattının sonunda üç fazlı $t_f = 0.10$ saniyelik (6 devir) bir arıza olduğu düşünüldü. 23-24 hattı devreden çıkarılarak (line tripping) arıza giderildi. Sistemin kontrolsüz/kontrollü durumdayken sistem cevapları Şekil 9.24-9.31’de gösterilmiştir.



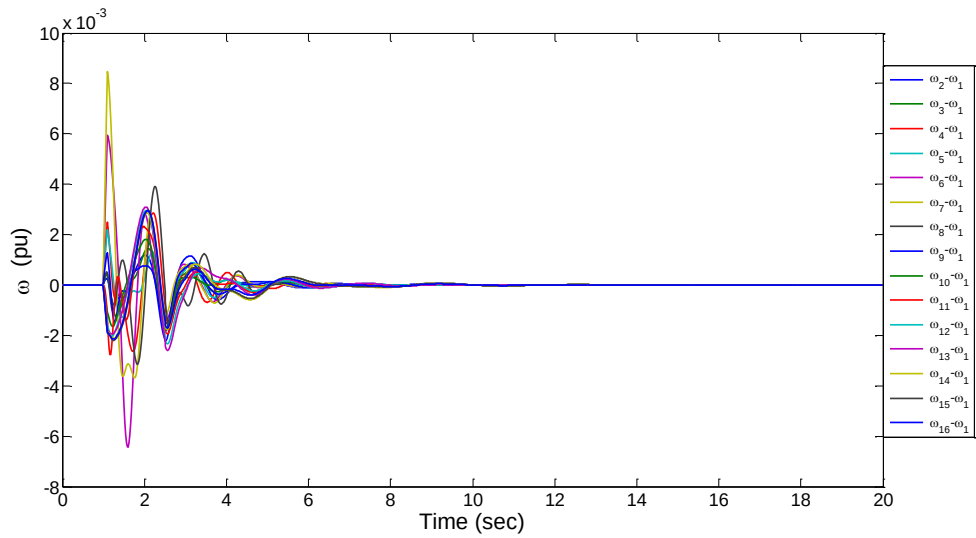
Şekil 9.24 : Kontrolsüz sistem için rotor açıları.



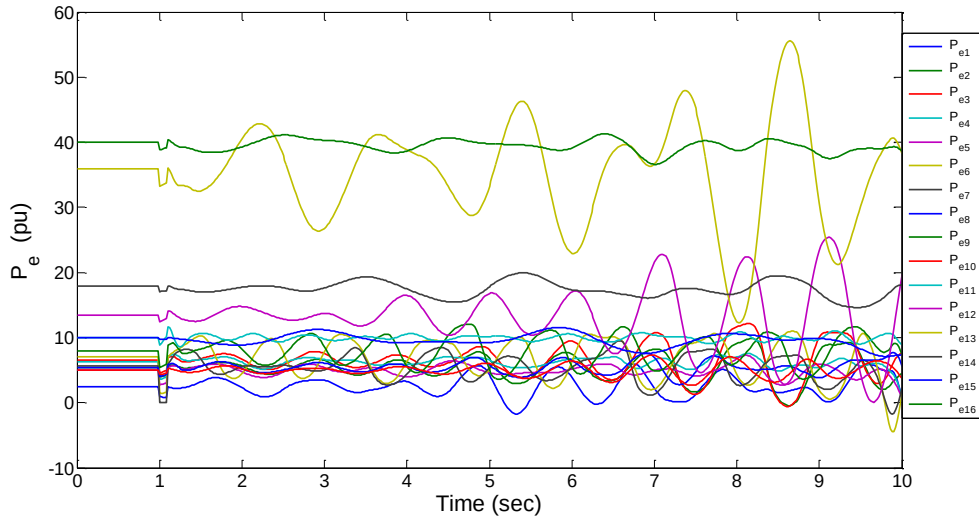
Şekil 9.25 : Kontrollü sistem için rotor açıları.



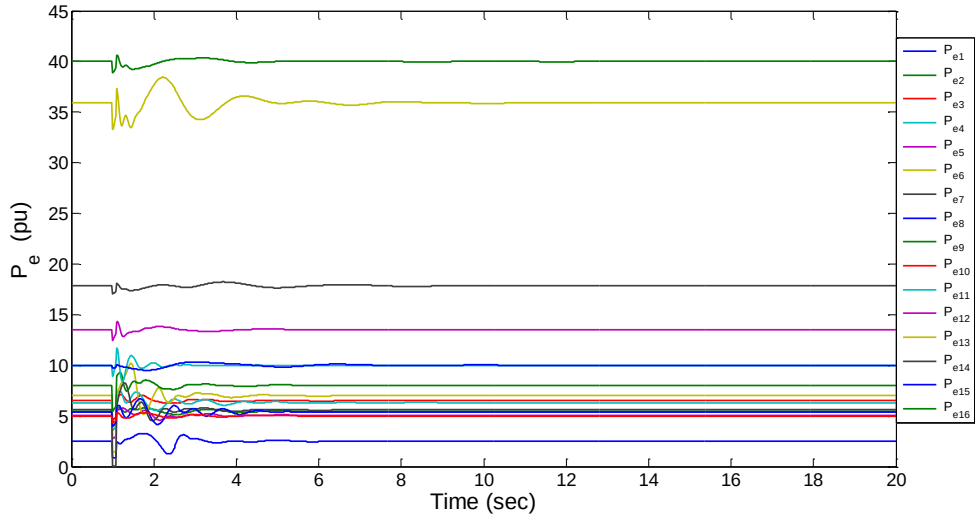
Şekil 9.26 : Kontrolsüz sistem için rotor hız sapmaları.



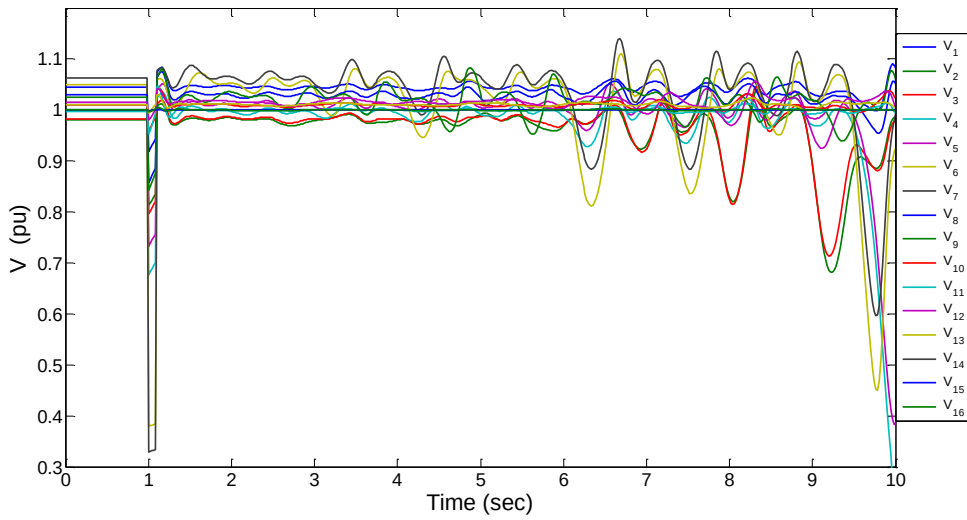
Şekil 9.27 : Kontrollü sistem için rotor hız sapmaları.



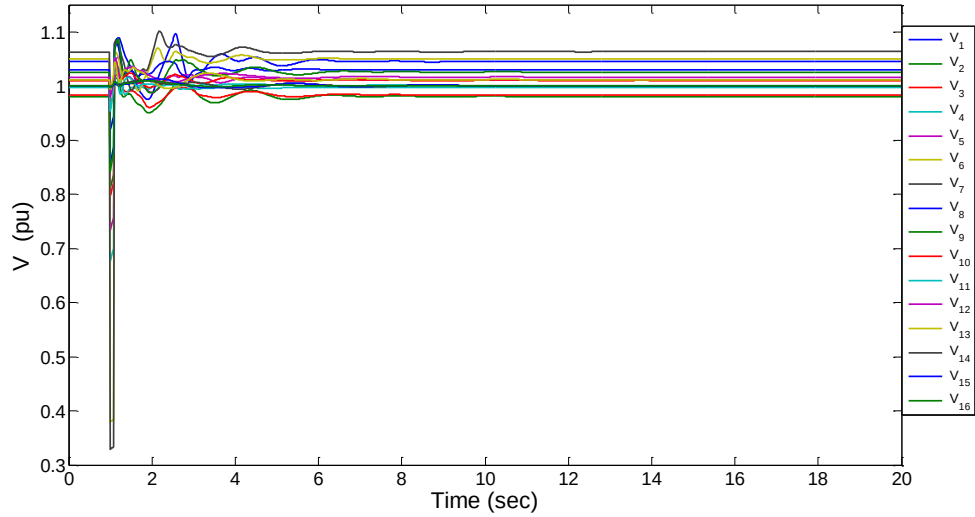
Şekil 9.28 : Kontrolsüz sistem için elektriksel güçler.



Şekil 9.29 : Kontrollü sistem için elektriksel güçler.



Şekil 9.30 : Kontrolsüz sistem için uç gerilimler.



Şekil 9.31 : Kontrollü sistem için uç gerilimler.

9.4 Programın Performansı

PowSysGUI paket programı kullanılarak farklı test sistemleri için geçen süreler Çizelge 9.5’te verilmiştir. Zaman domeninde simülasyonlar (TDS) yapılırken, diferansiyel denklemlerin nümerik entegrasyonu için Runge-Kutta 4 (ode4) metodu kullanıldı, simülasyon süresi $t_{sim} = 20$ saniye ve entegrasyon adımı $\Delta t = 0.01$ saniye seçildi. Ayrıca 3 makinalı 9 baralı güç sistemi kullanılarak, PowSysGUI programının PST ve PSAT ile karşılaştırılması **EK F**’de verilmiştir.

Çizelge 9.5 : PowSysGUI programının performansı.

TEST SYSTEM	Analiz Metodu	Geçen Süre (saniye)
3 makinalı 9 baralı	PFA	0.004
	SSSA	0.006
	TDS	2.149
10 makinalı 39 baralı	PFA	0.016
	SSSA	0.026
	TDS	12.065
16 makinalı 68 baralı	PFA	0.033
	SSSA	0.052
	TDS	98.426

10. SONUÇLAR

Güç sistemi literatüründe kullanılan ticari ve ücretsiz olan bazı programlar mevcut olmasına rağmen, bu tez çalışmasında PowSysGUI adında MATLAB tabanlı bir GUI program tasarlandı. PowSysGUI programının güç sistemlerinde kullanılan diğer programlardan en önemli avantajları esnek, basit, anlaşılır ve değiştirilebilir kodlarla yazılması ve geliştirilen model yapılarının kullanıcılara açık olmasıdır.

PowSysGUI programı hazırlanmadan önce, programın matematiksel temelini oluşturmak için yük akışı, küçük işaret kararlılık analizi, PSS, geçici hal kararlılık analizi ve sezgisel optimizasyon tekniklerinden olan PSO ve ABC algoritmaları konularına yeterince değinildi ve PowSysGUI paket programının temelini oluşturan aşağıdaki alt programlar geliştirildi.

- i. Genelleştirilmiş Yük Akışı Analizi Programı (MATLAB m-dosya tabanlı)
- ii. Genelleştirilmiş Küçük İşaret Kararlılık Analizi Programı (MATLAB m-dosya tabanlı)
- iii. Genelleştirilmiş Güç Sistemi Kararlı Kılıcı (PSS) Tasarım Programı (MATLAB m-dosya tabanlı)
- iv. Genelleştirilmiş Sezgisel Yöntemlerin Güç Sistemlerine Uygulanması Programı (PSO ve ABC) (MATLAB m-dosya tabanlı)
- v. Genelleştirilmiş Geçici Hal Kararlılık Analizi Programı (Simulink tabanlı)

(i-v) alt programların geçerliliği ve etkinliği 3 makinalı 9 baralı ve 10 makinalı 39 baralı güç sistemleri üzerinde başarıyla test edilip kanıtlandı. Ondan sonra, bu alt programlara GUI özelliği eklenerek tezde hedeflenen PowSysGUI paket programı oluşturuldu.

MATLAB GUI ortamını kullanan PowSysGUI paket programı; yük akışı analizi, küçük işaret kararlılık analizi, geçici hal kararlılık analizi ve sezgisel optimizasyon teknikleri ile PSS tasarım programları olmak üzere GUI tabanlı dört alt programdan oluşmaktadır. PowSysGUI programındaki alt programlar birbiriyle etkileşimli olarak çalışabilmektedir. PowSysGUI programıyla üzerinde çalışılacak sistemin sadece verileri yüklendikten sonra, istenilen analizler GUI alt programlarındaki menüler

yardımla kolaylıkla yapılabilir. PowSysGUI programındaki alt programların geçerliliği, etkinliği ve çalışma performansları yeterince büyük bir sistem olan 16 makinalı 68 baralı güç sistemi ele alınarak incelendi. Çeşitli analiz sonuçlarından görüleceği gibi geliştirilen PowSysGUI programının güç sistemlerinde öğretici bir araştırma aracı olduğunu göstermiştir. Tezde, ayrıca yeni bir optimizasyon tekniği olan ABC algoritması farklı güç sistemlerinde, PSS parametrelerini optimize edilmede kullanılmış olup, PSO tabanlı PSS ile detaylı karşılaştırmalar yapılmıştır.

MATLAB ortamında çalışan PowSysGUI paket programı açık kaynaklı bir yazılımdır ve güç sistemlerinde kod yazmayı öğrenmek isteyenler bu programın iç yapısını kolaylıkla görebilir. Özellikle eğitim ve araştırma amaçları için kullanılabilen PowSysGUI paket programı, üniversitelerde lisans/yüksek lisans güç sistemleri derslerini gören öğrencilerin ödev hazırlamalarında ve araştırmacıların tasarım projelerinde de kullanılabilir.

Tez çalışmasından sonra, PowSysGUI paket programının geliştirilmesi için ileride aşağıdaki özelliklerin eklenmesi planlanmaktadır.

- a)** Optimal yük akışı ve gerilim kararlılığı analizi yapabilecek GUI tabanlı alt programlar tasarlanması.
- b)** Güç sistemi kararlı kılıcılarla (PSS) beraber FACTS (Flexible AC Transmission Systems : Esnek AC İletim Sistemleri) tabanlı kararlı kılıcılarının modellenmesi, tasarlanması ve simülasyonlarının yapılması.
- c)** Akı sönümlü model ile birlikte klasik ve iki eksenli makine modellerinin kullanılması.
- d)** PowSysGUI paket programına ilişkin detaylı kullanma kılavuzunun ve web sayfasının oluşturulması.

Yukarıdaki özellikler mevcut PowSysGUI programına eklendikten sonra, ileride bu programın güç sistemi eğitim ve araştırmalarında vazgeçilmez bir araç olacağına inanıyorum. Tez çalışmasında geliştirilen PowSysGUI paket programı tüm öğrenci ve araştırmacılara açıktır ve ayrıca ekinciser@yahoo.com e-mail adresinden bu program istenilebilir ve detaylı bilgiler alınabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Kundur, P.** (1994). *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, New York.
- [2] **Yu, Y.N.** (1981). *Power System Dynamics*. Academic Press, London.
- [3] **Abido, M.A.** (2000). Pole Placement Technique for PSS and TCSC based Stabilizer Design Using Simulated Annealing. *Electrical Power and Energy Systems*, 22, 543-554.
- [4] **Larsen, E.V. and Swann, D.A.** (1981). Applying Power System Stabilizers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 100(6), 3017-3046.
- [5] **Klein, M., Rogers, G.J., Kundur, P.** (1991). A Fundamental Study of Inter-area Oscillations in Power Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 6(3), 914-921.
- [6] **DeMello, F. and Concordia, C.** (1969). Concept of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 88, 316-329.
- [7] **Kundur, P., Klein, M., Rogers, G.J.** (1989). Application of Power System Stabilizer for Enhancement of Overall System Stability. *IEEE Trans. P.W.R.S.*, 4(2), 614-626.
- [8] **Gibbard, M.J.** (1991). Robust Design of Fixed Parameter Power System Stabilizers over a Wide Range of Operating Conditions. *IEEE Trans. P.W.R.S.*, 6(2), 794-800.
- [9] **Taranto, G.N., Falcao, D.M.** (1998). Robust decentralised control design using genetic algorithms in power system damping control. *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, 145(1), 1-6.
- [10] **Abdel-Magid, Y.L., Abido, M.A., Al-Baiyat, S., Mantawy, A.H.** (1999). Simultaneous stabilization of multimachine power systems via genetic algorithms. *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(4), 1428-1439.
- [11] **Hassan, L.H., Moghavvemi, M., Almurib, H.A.F., Muttaqi, K.M., Ganapathy, V.G.** (2014). Optimization of power system stabilizers using participation factor and genetic algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 55, 668–79.
- [12] **Abido, M.A.** (2002). Optimal design of power-system stabilizers using particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 17(3), 406-413.
- [13] **Shayeghi, H., Shayanfar, H.A., Safari, A., Aghmasheh, R.** (2010). A robust PSSs design using PSO in a multi-machine environment. *Energy Conversion and Management*, 51(4), 696-702.

- [14] **Lin, Z., Chung, C.Y., Wong, K.P., Wen, F.** (2008). Optimal coordination of power system stabilizers for transient stability enhancement. In: Proc. of the IEEE Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 1-6.
- [15] **Sun, Z., Wang, N., Srinivasan, D., Bi, Y.** (2014). Optimal tuning of type-2 fuzzy logic power system stabilizer based on differential evolution algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 62, 19-28.
- [16] **Khodabakhshian, A., Hemmati, R.** (2013). Multi-machine power system stabilizer design by using cultural algorithms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 44, 571-80.
- [17] **Mary Linda, M., Kesavan Nair, N.** (2013). A new-fangled adaptive mutation breeder genetic optimization of global multi-machine power system stabilizer. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 44, 249-58.
- [18] **Shayeghi, H., Shayanfar, H.A., Jalilzadeh, S., Safari, A.** (2010). Multi-machine power system stabilizers design using chaotic optimization algorithm. *Energy Conversion and Management*, 51(7), 1572-1580.
- [19] **Shayeghi, H., Ghasemi, A.** (2014). A multi objective vector evaluated improved honey bee mating optimization for optimal and robust design of power system stabilizers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 62, 630-645.
- [20] **Ali, E.S.** (2014). Optimization of Power System Stabilizers using BAT search algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 61, 683-690.
- [21] **Sambariya, D.K., Prasad, R.** (2014). Robust tuning of power system stabilizer for small signal stability enhancement using metaheuristic bat algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 61, 229-38.
- [22] **Karaboga, D., Akay, B.** (2009). A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm. *Applied Mathematics and Computation*, 214(1), 108-132.
- [23] **Karaboga, D., Basturk, B.** (2007). A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. *Journal of Global Optimization*, 39, 459-471.
- [24] **Sulaiman, M.H., Mustafa, M.W., Shareef, H., Abd Khalid, S.N.** (2012). An application of artificial bee colony algorithm with least squares support vector machine for real and reactive power tracing in deregulated power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 37(1), 67-77.
- [25] **Huang, S.J., Liu, X.Z.** (2013). Application of artificial bee colony-based optimization for fault section estimation in power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 44(1), 210-218.

- [26] **Basu, M.** (2013). Artificial bee colony optimization for multi-area economic dispatch. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 49, 181-187.
- [27] **Ravi, V., Duraiswamy, K.** (2012). Effective optimization technique for power system stabilization using Artificial Bee Colony. In: 2012 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI); 10-12 Jan., 1-6.
- [28] **Gozde, H., Taplamacioglu, M.C., Kocaarslan, I.** (2012). Comparative performance analysis of artificial bee colony algorithm in automatic generation control for interconnected reheat thermal power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 42, 167–78.
- [29] **Milano, F.** (2005). An Open Source Power System Analysis Toolbox. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(3), 1199-1206.
- [30] **Allen, E., White, N.L., Yoon, Y., Chapman, J., Ilic, M.** (2001). Interactive object-oriented simulation of interconnected power systems using SIMULINK. *IEEE Transactions on Education*, 44(1), 87-94.
- [31] **Patel, R., Bhatti, T.S., Kothari, D.P.** (2002). MATLAB/Simulink-based transient stability analysis of a multi-machine power system. *International Journal of Electrical Engineering Education*, 39(4), 320-336.
- [32] **Demiroren, A., Zeynelgil, H.L.** (2002). Modelling and Simulation of synchronous machine transient analysis using SIMULINK. *International Journal of Electrical Engineering Education*, 39(4), 337-346.
- [33] **Cho, Y.S., Park, J., Jang, G.** (2007). A novel tool for transient stability analysis of large-scale power systems: Its application to the KEPCO system. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15(7), 786-800.
- [34] **Gelen, A., Yalcinoz, T.** (2010). An educational software package for Thyristor Switched Reactive Power Compensators using Matlab/Simulink. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 18(3), 366-377.
- [35] **Chow, J.H., Cheung, K.W.** (1992). A toolbox for power system dynamics and control engineering education and research. *IEEE Transactions on Power Systems*, 7(4), 1559-1564.
- [36] **Mahseredjian, J., Alvarado, F.** (1997). Creating an Electromagnetic Transients Program in MATLAB: MatEMTP. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12(1), 380-388.
- [37] **Ayasun, S., Nwankpa, C.O., Kwatny, H.G.** (2006). Voltage Stability Toolbox for Power System Education and Research. *IEEE Transactions on Education*, 49(4), 432-442.
- [38] **Schoder, K., Hasanovic, A., Feliachi, A., Hasanovic, A.** (2003). PAT: a power analysis toolbox for MATLAB/Simulink. *IEEE Transactions on Power Systems*, 18(1), 42-47.

- [39] **Vournas, C.D., Potamianakis, E.G., Moors, C., Van Cutsem, T.** (2004). An educational simulation tool for power system control and stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(1), 48-55.
- [40] **Sybille, G.** (2004). *SimPowerSystem User's Guide, Version 4*. Nattick, MA: Hydro-Quebec/The MathWorks.
- [41] **Zimmerman, R.D., Murillo-Sanchez, C.E., Gan, D.** (2005). *MatPower, Version 3.0.0, User's Manual*. Ithaca, NY: Power Systems Engineering Research Center (PSERC), Cornell Univ.
- [42] **Cole, S., Belmans, R.** (2011). MatDyn, A New Matlab-Based Toolbox for Power System Dynamic Simulation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(3), 1129-1136.
- [43] **Saadat, H.** (2002). *Power System Analysis*. Tata McGraw-Hill, New Delhi.
- [44] **Grainger, J. and Stevenson, W.D.** (1994). *Power System Analysis*. McGraw-Hill, USA.
- [45] **Sauer, P. W., Pai, M. A.** (1998) *Power system Dynamics and Stability*. Prentice Hall.
- [46] **Ogata, K.** (2010). *Modern Control Engineering*. Fifth Edition, Prentice-Hall.
- [47] **Golnaraghi, F., Kuo, B.C.** (2009). *Automatic Control Systems*. John Wiley & Sons.
- [48] **Brogan, W.L.** (1991). *Modern Control Theory*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- [49] **Pai, M.A., Sengupta, D.P., Padiyar, K.R.** (2004). *Small Signal Analysis of Power Systems*. Narosa Publishing House, India.
- [50] **Kreyszig, E.** (2011). *Advanced Engineering Mathematics*. John Wiley & Sons.
- [51] **Boyce, W. E., DiPrima, R. C.** (2001). *Elementary differential equations and boundary value problems*. John Wiley & Sons.
- [52] **James, G.** (2011). *Advanced Modern Engineering Mathematics*. Prentice Hall.
- [53] **Kennedy, J., Eberhart, R.C.** (1995). Particle swarm optimization. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, 1942-1948.
- [54] **Bonabeau, E., Dorigo, M., Theraulaz, G.** (1999). *Swarm intelligence: from natural to artificial systems*. New York: Oxford University Press.
- [55] **Kennedy, J., Eberhart, R.C., Shi, Y.** (2001). *Swarm intelligence*. San Francisco: Morgan Kaufmann.
- [56] **Keumarsi, V., Simab, M., Shahgholian, G.** (2014). An integrated approach for optimal placement and tuning of power system stabilizer in multi-machine systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 63,132-139.
- [57] **Karaboga, D., Basturk, B.** (2008). On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm. *Applied Soft Computing*, 8(1), 687-697.
- [58] **Karaboga, D., Ozturk, C.** (2011). A novel clustering approach: Artificial Bee Colony (ABC) algorithm. *Applied Soft Computing*, 11(1), 652-657.

- [59] **Dorf, R.C., Bishop, R.H.** (2010). *Modern Control Systems*. Prentice Hall.
- [60] **Anderson, P. M. and Fouad, A. A.** (2003). *Power System Control and Stability*. IEEE Press, USA.
- [61] **Padiyar, K. R.** (2002). *Power System Dynamics: Stability and Control*. Hyderabad, India: B.S. Publications.
- [62] **Pai, M. A.** (1989). *Energy function analysis for power system stability*. USA: Kluwer Academic publishers.
- [63] **Pal, B., Chaudhuri, B.** (2005). *Robust Control in Power Systems*. Springer, New York.
- [64] **Rogers, G.** (2000). *Power System Oscillations*. Kluwer Academic Publishers, Boston.

EKLER

EK A: 3 makinalı 9 baralı güç sistemi verileri

EK B: Geleneksel PSS'nin PSO ve ABC tabanlı PSS ile karşılaştırılması

EK C: 10 makinalı 39 baralı güç sistemi verileri

EK D: PowSysGUI programının kullanımı

EK E: 16 makinalı 68 baralı güç sistemi verileri

EK F: PowSysGUI programının PST ve PSAT ile karşılaştırılması

EK A: 3 makinalı 9 baralı güç sistemi verileri

Çizelge A.1 : 3 makinalı sistemin bara verileri.

Bara No	Tür	Gerilim	Açı (Derece)	$-P_L$	$-Q_L$	P_G	Q_G
1	gevşek	1.0400	0	0	0	0	0
2	PV	1.0250	0	0	0	1.6300	0
3	PV	1.0250	0	0	0	0.8500	0
4	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
5	PQ	1.0000	0	1.2500	0.5000	0	0
6	PQ	1.0000	0	0.9000	0.3000	0	0
7	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
8	PQ	1.0000	0	1.0000	0.3500	0	0
9	PQ	1.0000	0	0	0	0	0

Çizelge A.2 : 3 makinalı sistemin hat verileri.

Hat No	Baradan	Baraya	R	X	B	Tap
1	1	4	0	0.0576	0	1.0000
2	2	7	0	0.0625	0	1.0000
3	3	9	0	0.0586	0	1.0000
4	4	5	0.0100	0.0850	0.0880	1.0000
5	4	6	0.0170	0.0920	0.0790	1.0000
6	5	7	0.0320	0.1610	0.1530	1.0000
7	6	9	0.0390	0.1700	0.1790	1.0000
8	7	8	0.0085	0.0720	0.0745	1.0000
9	8	9	0.0119	0.1008	0.1045	1.0000

Çizelge A.3 : 3 makinalı sistemin generatör verileri.

Makina	H	D	R_s	x_d	x'_d	x_q	x'_q	T'_{d0}	T'_{q0}
1	23.6400	0	0	0.1460	0.0608	0.0969	0.0969	8.9600	0.3100
2	6.4000	0	0	0.8958	0.1198	0.8645	0.1969	6.0000	0.5350
3	3.0100	0	0	1.3125	0.1813	1.2578	0.2500	5.8900	0.6000

Çizelge A.4 : 3 makinalı sistemin uyarma verileri.

Makina	K_A	T_A	$E_{fd}^{\max}$	$E_{fd}^{\min}$
1	100	0.05	7.3	-7.3
2	100	0.05	7.3	-7.3
3	100	0.05	7.3	-7.3

EK B: Geleneksel PSS'nin PSO ve ABC tabanlı PSS ile karşılaştırılması

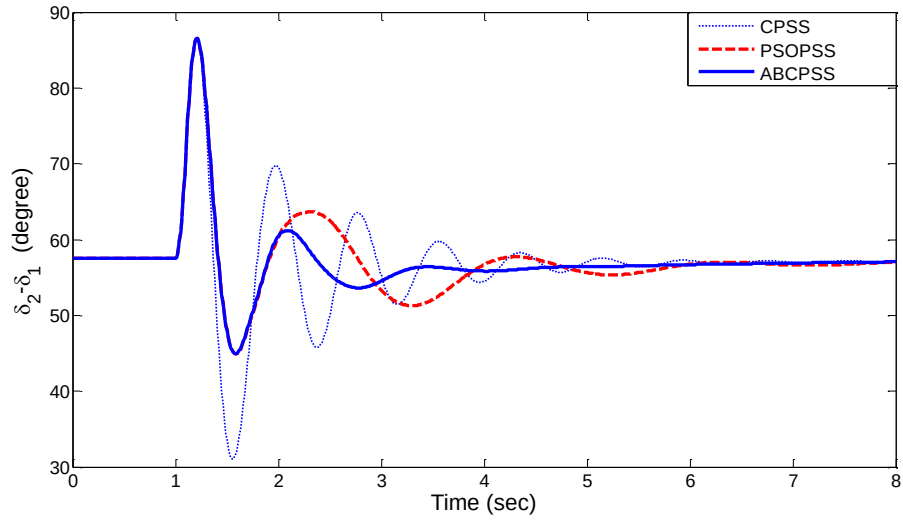
Tezin bu kısmında, örnek teşkil etmesi amacıyla 3 makinalı 9 baralı örnek güç sisteminde, küçük işaret kararlılık analizi ve zaman domeninde simülasyonlar yapılarak; geleneksel PSS (conventional PSS: CPSS) [64], PSOPSS ve ABCPSS karşılaştırıldı. Geleneksel PSS için (2 nolu generatör için tasarlanan) $K_p = 4$, $T_1 = 0.04$, $T_2 = 0.02$, $T_3 = 0.1$ ve $T_4 = 0.02$ olarak alınmıştır.

Geleneksel PSS kullanılarak bulunan sistemin özdeğerleri ve o özdeğerlere karşılık düşen sönüm oranları ve frekansları Çizelge B.1'de gösterilmiştir. Bölüm 7'de tasarlanan PSOPSS ve ABCPSS'ye göre geleneksel PSS'nin sönüm oranları daha düşük görünmektedir.

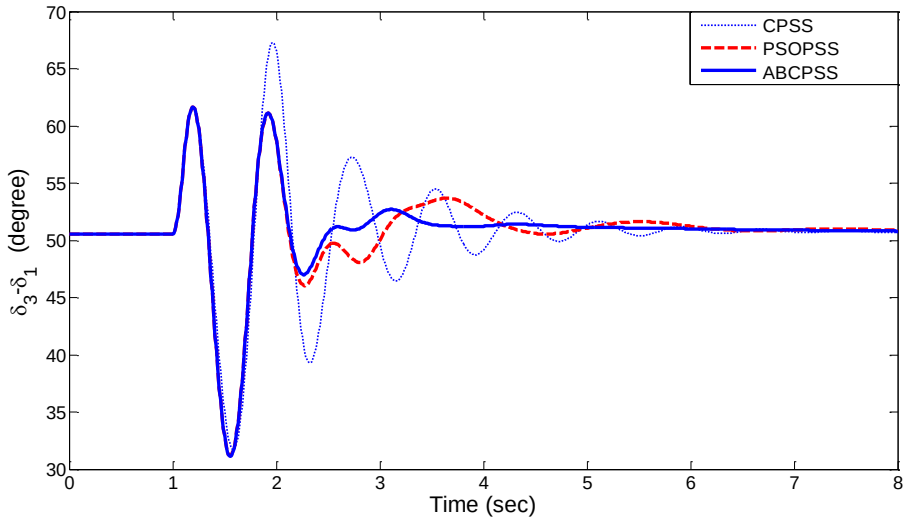
Çizelge B.1 : Geleneksel metot ile optimize edilen sistemin özdeğerleri, sönüm oranları ve frekansları.

Mod	Özdeğer	Sönüm Oranı	Frekans
1	-0.94737 + 7.9498i	0.11833	1.2742
2	-0.94737 - 7.9498i	0.11833	1.2742
3	-1.5531 + 12.164i	0.12665	1.9517
4	-1.5531 - 12.164i	0.12665	1.9517
5	0.0000	-----	0.0000
6	0.0000	-----	0.0000
7	-9.6084 + 14.008i	0.56565	2.7035
8	-9.6084 - 14.008i	0.56565	2.7035
9	-9.6485 + 6.5128i	0.82885	1.8527
10	-9.6485 - 6.5128i	0.82885	1.8527
11	-56.098	1.0000	8.9282
12	-43.85	1.0000	6.9789
13	-12.497	1.0000	1.9889
14	-5.2031	1.0000	0.8281
15	-0.2200	1.0000	0.0350

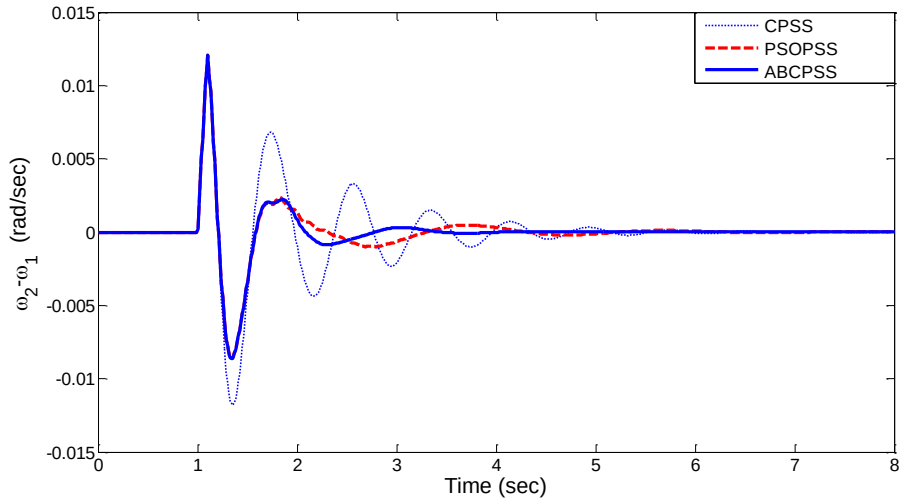
Geçici hal kararlılık analizi yapılırken, $t = 1$ saniyede 7 nolu barada ve 7-5 hattının sonunda $t_f = 0.10$ saniyelik (6 devir) üç fazlı bir arıza olduğu düşünüldü. Arıza olan hat yeniden devreye sokularak sistemdeki arıza gideriliyor. Bu arıza durumu için tüm generatörlerin sistem cevapları (bağıl rotor açıları ve bağıl hız sapmaları) Şekil B.1-B.4'de verilmiştir. Simülasyon sonuçlarından açıkça görüleceği gibi geleneksel yöntemle tasarlanan PSS'nin kararlılık performansı ve sistem salınımlarını söndürmesi PSOPSS ve ABCPSS'ye göre düşüktür.



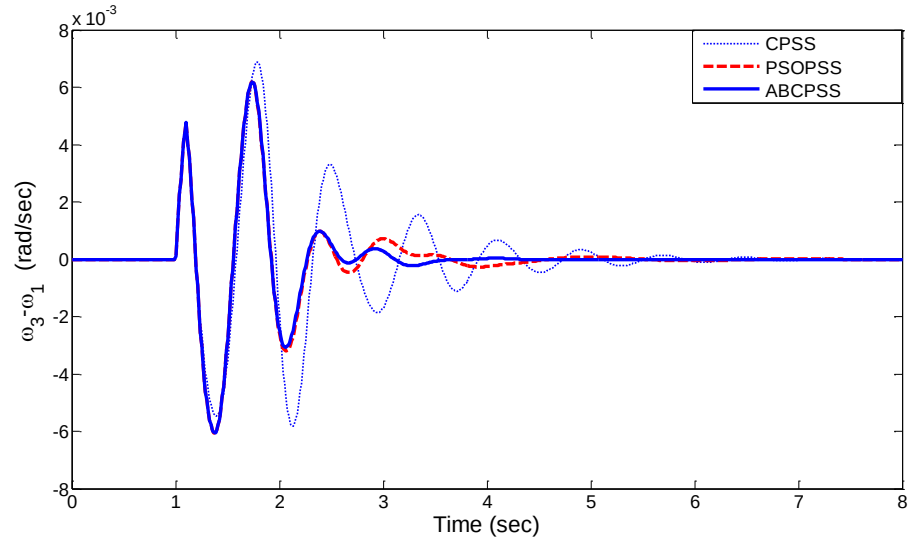
Şekil B.1 : 3 makinalı sistemin $\delta_2 - \delta_1$ 'in sistem cevabı.



Şekil B.2 : 3 makinalı sistemin $\delta_3 - \delta_1$ 'in sistem cevabı.



Şekil B.3 : 3 makinalı sistemin $\omega_2 - \omega_1$ 'in sistem cevabı.



Şekil B.4 : 3 makinalı sistemin $\omega_3 - \omega_1$ 'in sistem cevabı.

EK C: 10 makinalı 39 baralı güç sistemi verileri**Çizelge C.1:** 10 makinalı sistemin bara verileri.

Bara No	Tür	Gerilim	Açı (Derece)	$-P_L$	$-Q_L$	P_G	Q_G
1	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
2	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
3	PQ	1.0000	0	3.2200	0.0240	0	0
4	PQ	1.0000	0	5.0000	1.8400	0	0
5	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
6	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
7	PQ	1.0000	0	2.3380	0.8400	0	0
8	PQ	1.0000	0	5.2200	1.7600	0	0
9	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
10	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
11	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
12	PQ	1.0000	0	0.0750	0.8800	0	0
13	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
14	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
15	PQ	1.0000	0	3.2000	1.5300	0	0
16	PQ	1.0000	0	3.2900	0.3230	0	0
17	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
18	PQ	1.0000	0	1.5800	0.3000	0	0
19	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
20	PQ	1.0000	0	6.2800	1.0300	0	0
21	PQ	1.0000	0	2.7400	1.1500	0	0
22	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
23	PQ	1.0000	0	2.4750	0.8460	0	0
24	PQ	1.0000	0	3.0860	-0.9220	0	0
25	PQ	1.0000	0	2.2400	0.4720	0	0
26	PQ	1.0000	0	1.3900	0.1700	0	0
27	PQ	1.0000	0	2.8100	0.7550	0	0
28	PQ	1.0000	0	2.0600	0.2760	0	0
29	PQ	1.0000	0	2.8350	0.2690	0	0
30	PV	1.0475	0	0	0	2.5000	0
31	gevşek	0.9820	0	0.0920	0.0460	0	0
32	PV	0.9831	0	0	0	6.5000	0
33	PV	0.9972	0	0	0	6.3200	0
34	PV	1.0123	0	0	0	5.0800	0
34	PV	1.0493	0	0	0	6.5000	0
36	PV	1.0635	0	0	0	5.6000	0
37	PV	1.0278	0	0	0	5.4000	0
38	PV	1.0265	0	0	0	8.3000	0
39	PV	1.0300	0	11.0400	2.5000	10.0000	0

Çizelge C.2: 10 makinalı sistemin hat verileri.

Hat No	Baradan	Baraya	R	X	B	Tap
1	1	2	0.0035	0.0411	0.3493	1.0000
2	1	39	0.0010	0.0250	0.3750	1.0000
3	2	3	0.0013	0.0151	0.1286	1.0000
4	2	25	0.0070	0.0086	0.0730	1.0000
5	3	4	0.0013	0.0213	0.1107	1.0000
6	3	18	0.0011	0.0133	0.1069	1.0000
7	4	5	0.0008	0.0128	0.0671	1.0000
8	4	14	0.0008	0.0129	0.0691	1.0000
9	5	6	0.0002	0.0026	0.0217	1.0000
10	5	8	0.0008	0.0112	0.0738	1.0000
11	6	7	0.0006	0.0092	0.0565	1.0000
12	6	11	0.0007	0.0082	0.0694	1.0000
13	7	8	0.0004	0.0046	0.0390	1.0000
14	8	9	0.0023	0.0363	0.1902	1.0000
15	9	39	0.0010	0.0250	0.6000	1.0000
16	10	11	0.0004	0.0043	0.0365	1.0000
17	10	13	0.0004	0.0043	0.0365	1.0000
18	13	14	0.0009	0.0101	0.0862	1.0000
19	14	15	0.0018	0.0217	0.1830	1.0000
20	15	16	0.0009	0.0094	0.0855	1.0000
21	16	17	0.0007	0.0089	0.0671	1.0000
22	16	19	0.0016	0.0195	0.1520	1.0000
23	16	21	0.0008	0.0135	0.1274	1.0000
24	16	24	0.0003	0.0059	0.0340	1.0000
25	17	18	0.0007	0.0082	0.0659	1.0000
26	17	27	0.0013	0.0173	0.1608	1.0000
27	21	22	0.0008	0.0140	0.1283	1.0000
28	22	23	0.0006	0.0096	0.0923	1.0000
29	23	24	0.0022	0.0350	0.1805	1.0000
30	25	26	0.0032	0.0323	0.2565	1.0000
31	26	27	0.0014	0.0147	0.1198	1.0000
32	26	28	0.0043	0.0474	0.3901	1.0000
33	26	29	0.0057	0.0625	0.5145	1.0000
34	28	29	0.0014	0.0151	0.1245	1.0000
35	12	11	0.0016	0.0435	0	1.0060
36	12	13	0.0016	0.0435	0	1.0060
37	6	31	0	0.0250	0	1.0700
38	10	32	0	0.0200	0	1.0700
39	19	33	0.0007	0.0142	0	1.0700
40	20	34	0.0009	0.0180	0	1.0090
41	22	35	0	0.0143	0	1.0250
42	23	36	0.0005	0.0272	0	1.0000
43	25	37	0.0006	0.0232	0	1.0250
44	2	30	0	0.0181	0	1.0250
45	29	38	0.0008	0.0156	0	1.0250
46	19	20	0.0007	0.0138	0	1.0600

Çizelge C.3: 10 makinalı sistemin generatör verileri.

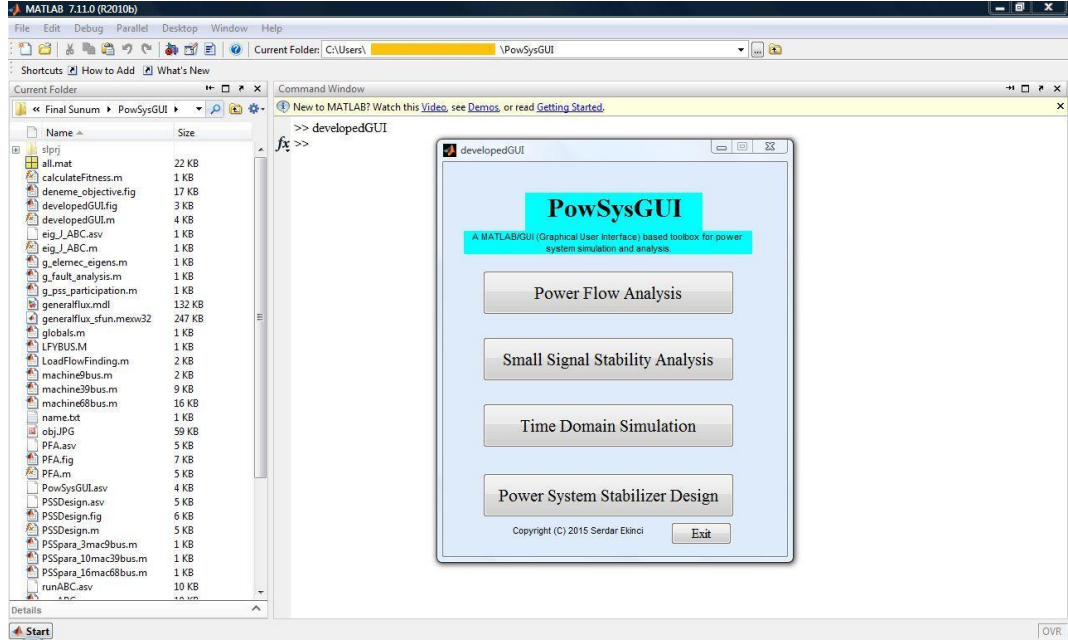
Makina	H	D	R_s	x_d	x'_d	x_q	x'_q	T'_{d0}	T'_{q0}
1	500.0000	0	0	0.0200	0.0060	0.0190	0.0080	7.0000	0.7000
2	30.3000	0	0	0.2950	0.0697	0.2820	0.1700	6.5600	1.5000
3	35.8000	0	0	0.2495	0.0531	0.2370	0.0876	5.7000	1.5000
4	28.6000	0	0	0.2620	0.0436	0.2580	0.1660	5.6900	1.5000
5	26.0000	0	0	0.6700	0.1320	0.6200	0.1660	5.4000	0.4400
6	34.8000	0	0	0.2540	0.0500	0.2410	0.0814	7.3000	0.4000
7	26.4000	0	0	0.2950	0.0490	0.2920	0.1860	5.6600	1.5000
8	24.3000	0	0	0.2900	0.0570	0.2800	0.0911	6.7000	0.4100
9	34.5000	0	0	0.2106	0.0570	0.2050	0.0587	4.7900	1.9600
10	42.0000	0	0	0.1000	0.0310	0.0690	0.0080	10.2000	1.5000

Çizelge C.4: 10 makinalı sistemin uyarma verileri.

Makina	K_A	T_A	$E_{fd}^{\max}$	$E_{fd}^{\min}$
1	2	0.02	10	-10
2	2	0.02	10	-10
3	2	0.02	10	-10
4	2	0.02	10	-10
5	2	0.02	10	-10
6	2	0.02	10	-10
7	2	0.02	10	-10
8	2	0.02	10	-10
9	2	0.02	10	-10
10	2	0.02	10	-10

EK D: PowSysGUI programının kullanımı

PowSysGUI paket programını çalıştırmadan önce mevcut dosya konumu PowSysGUI olacak şekilde ayarlanır. Şekil D.1’de görüleceği gibi MATLAB komut satırına “developedGUI” yazılarak ana program ortaya çıkar.



Şekil D.1 : PowSysGUI paket programının çalıştırılması.

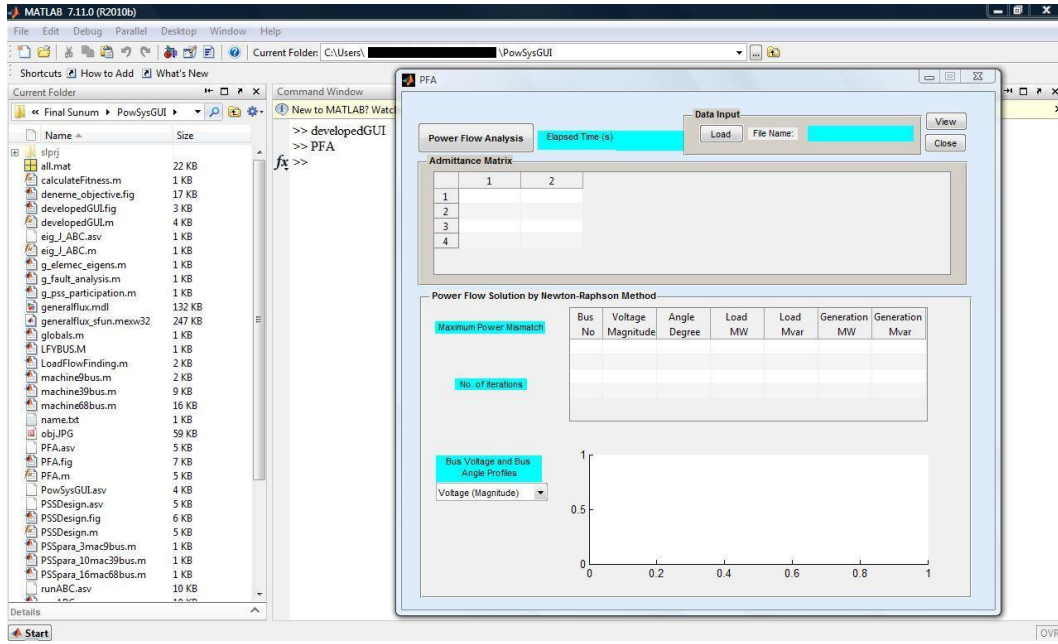
PowSysGUI programında 4 alt program mevcuttur ve bunlar sırasıyla;

- Yük Akış Analizi (Power Flow Analysis) Programı
- Küçük İşaret Kararlılık Analizi (Small Signal Stability Analysis) Programı
- Geçici Hal Kararlılık Analizi veya Zaman Domeni Simülasyonu (Time Domain Simulation) Programı
- Güç Sistemi Kararlı Kılıcı Tasarımı (Power System Stabilizer Design) Programı

Sırasıyla bu alt programların nasıl çalıştırıldığına bakalım.

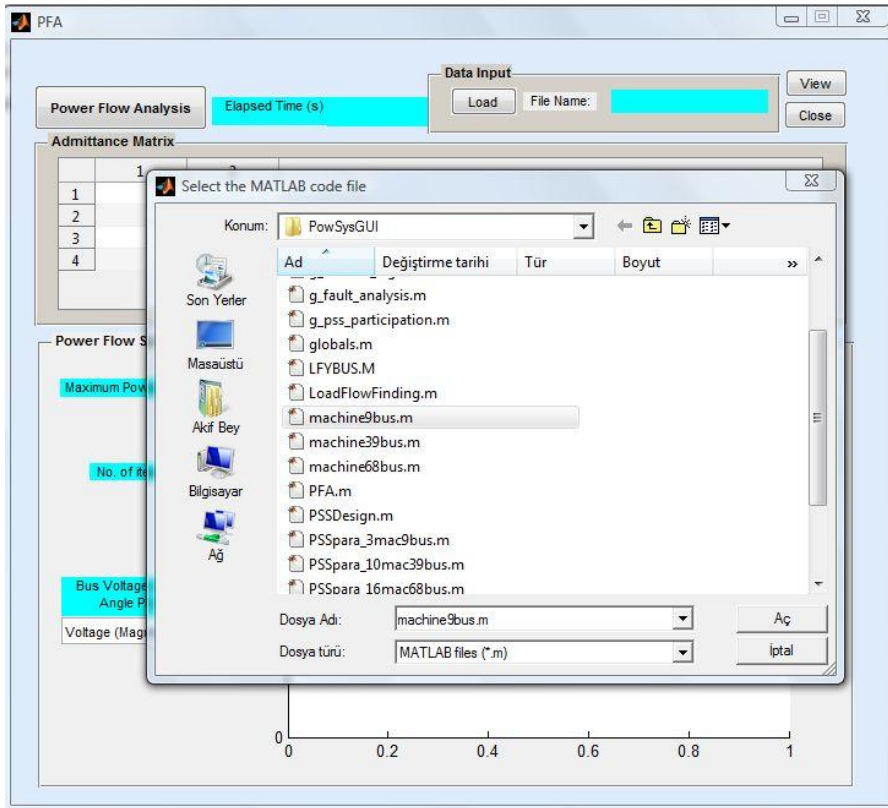
1. Yük Akış Analizi (Power Flow Analysis) Programı

Bu alt programı görmek için PowSysGUI ana programındaki Power Flow Analysis sekmesinin tıklanması veya MATLAB komut satırına “PFA” yazılması gereklidir. Bu alt program Şekil D.2’de gösterildiği gibi ekrana gelir.

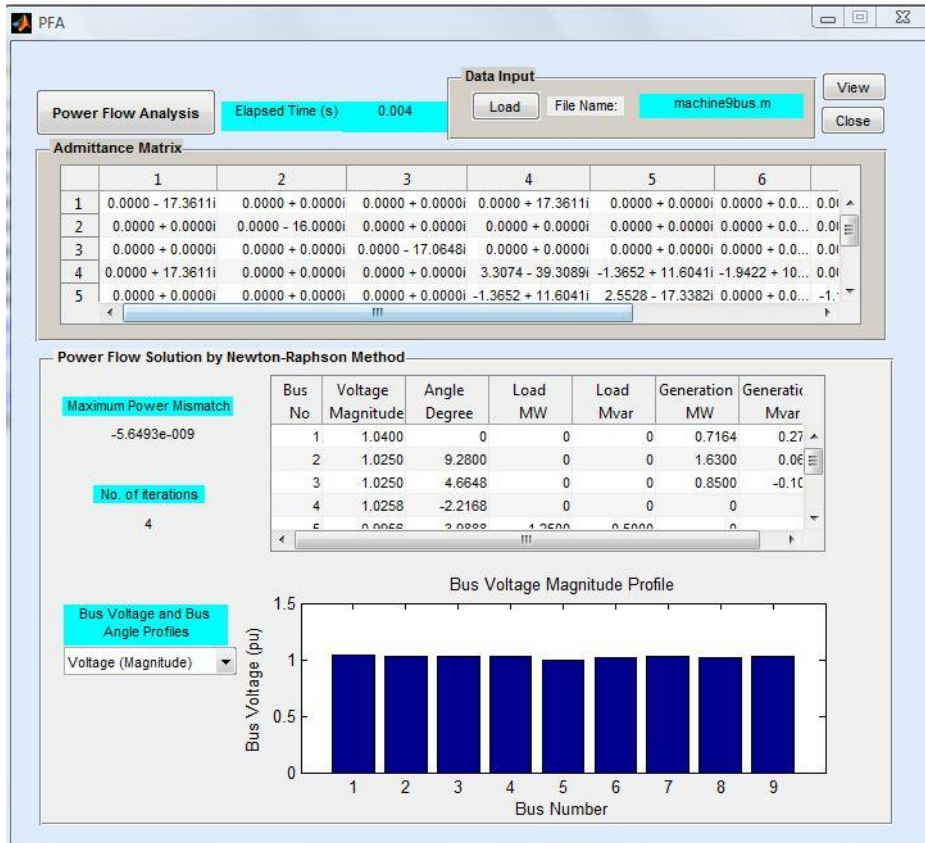


Şekil D.2 : Yük Akışı Analizi Programı.

Bu program çalıştırılmadan önce makinalara ilişkin dataların yüklenmesi gereklidir. Şekil D.3'te gösterildiği gibi örnek sistem olarak 3 makinalı 9 baralı güç sistemi seçilebilir.



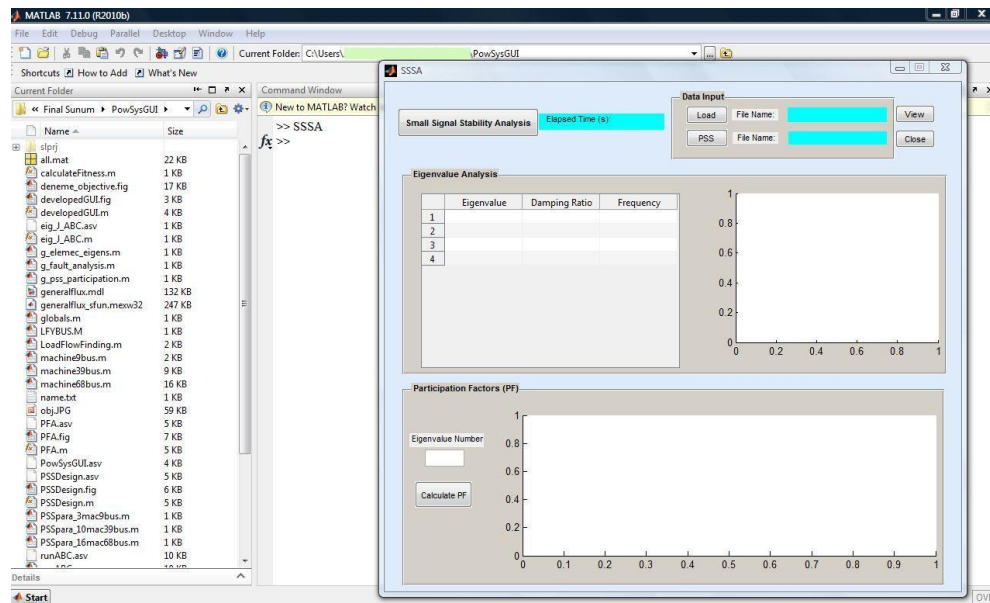
Şekil D.3 : Yük akış analizi için 9 baralı örnek güç sisteminin seçilmesi.



Şekil D.5 : Yük Akışı Analizi Programının çalıştırılması.

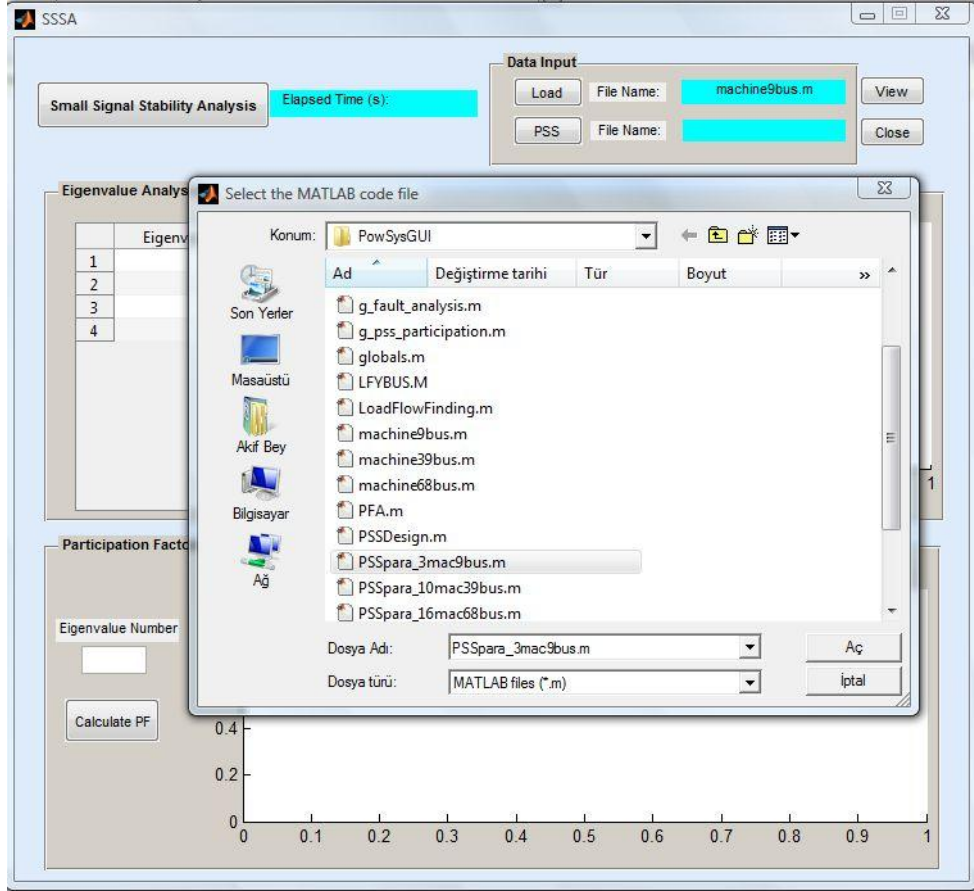
2. Küçük İşaret Kararlılık Analizi (Small Signal Stability Analysis) Programı

Bu alt programı görmek için PowSysGUI ana programındaki Small Signal Stability Analysis sekmesinin tıklanması veya MATLAB komut satırına “SSSA” yazılması gereklidir. Bu alt program Şekil D.6’da gösterildiği gibi ekrana gelir.

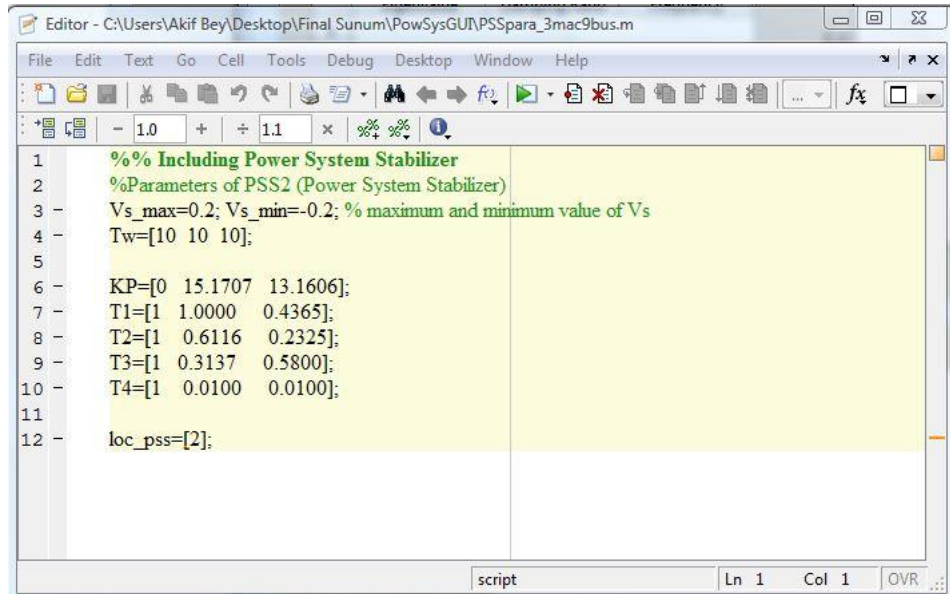


Şekil D.6 : Küçük İşaret Kararlılık Analizi Programı.

Önceki alt programa benzer şekilde üzerinde çalışılacak örnek sistemin dataları yüklenir. Daha sonra PSS parametreleri Şekil D.7’de görüldüğü gibi seçilip yüklenir. Seçilen PSS parametrelerin Şekil D.8’deki gibi olmasına dikkat edilir.



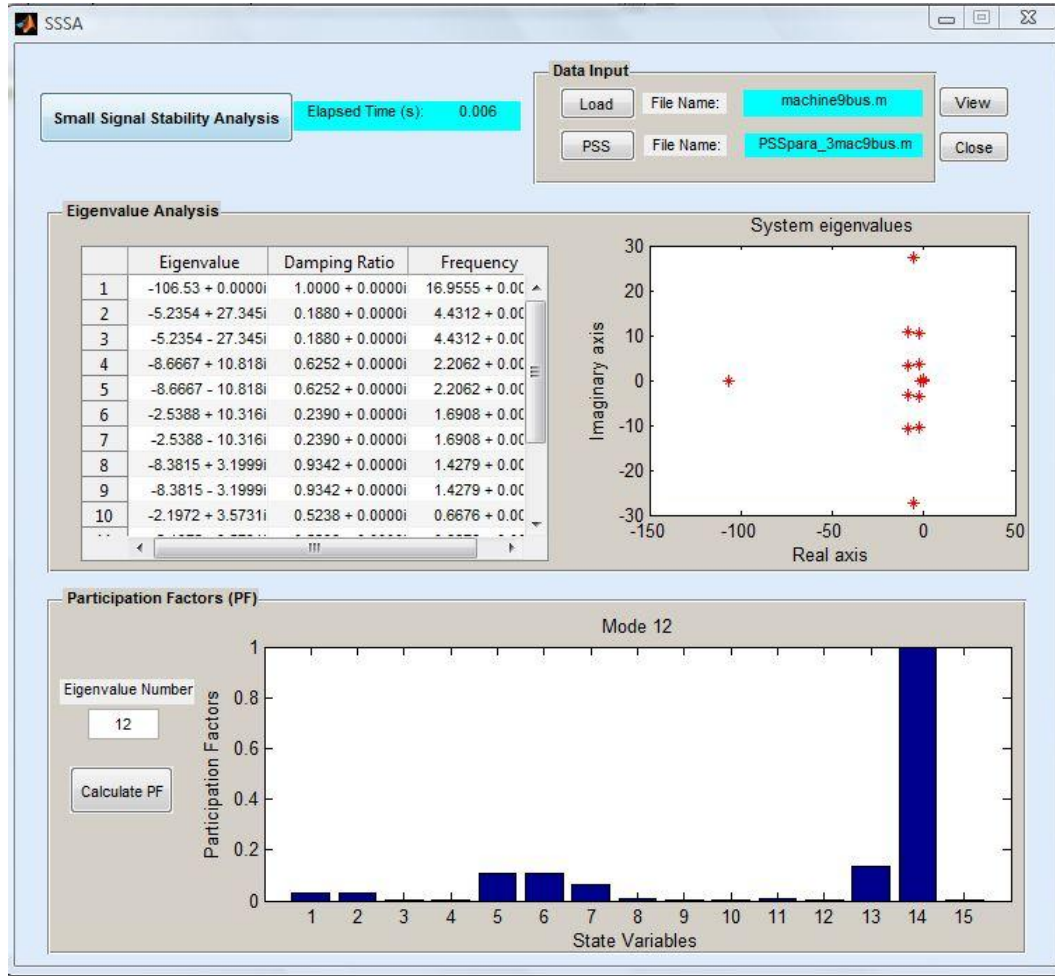
Şekil D.7 : 9 baralı örnek sistem için PSS parametrelerinin seçilmesi ve yüklenmesi.



Şekil D.8 : 9 baralı sistem için PSS parametreleri.

“loc_pss” bize güç sistemi kararlı kılıcılarının (PSS) hangi baralara yerleştirileceğine karar verir. “loc_pss =[]” olduğunca sistem kontrolsüz şekilde çalışır. PSS parametrelerinin yerleri, katılım faktörü (participation factor) analizi kullanılarak karar verilir. Ayrıca PSS yerleştirilecek makinaların PSS parametreleri ister keyfi veya istenirse optimize edilen parametreler yazılabilir.

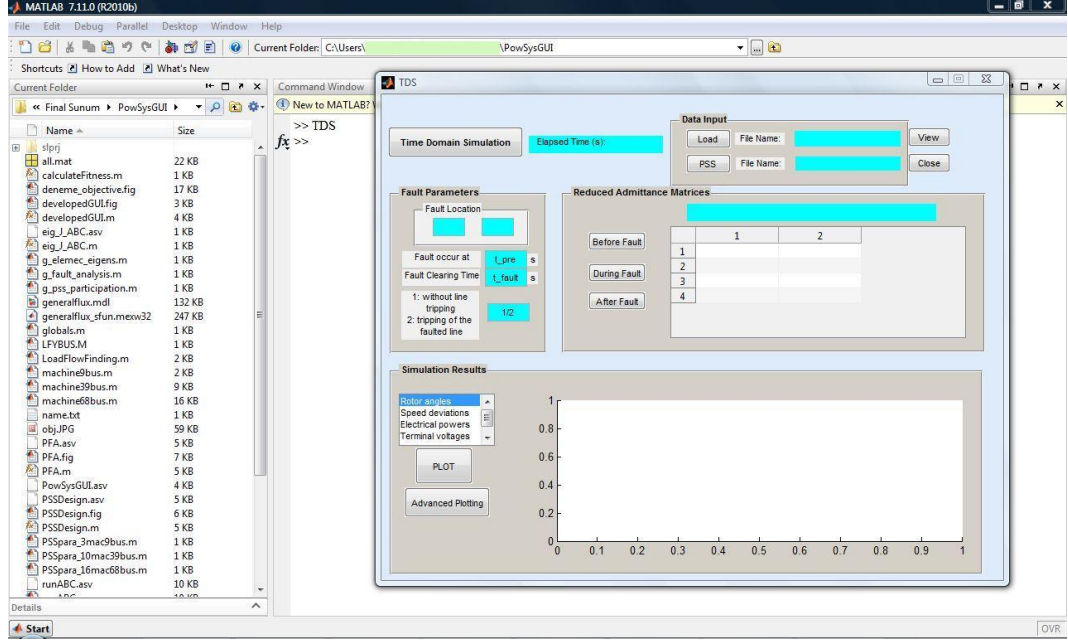
Örnek sistem verileri yüklendikten sonra, “Small Signal Stability Analysis” sekmesine tıklanarak küçük işaret kararlılık analizi süreci başlamış olur. Şekil D.9’da örnek güç sistemin küçük işaret kararlılık sonuçları görülmektedir.



Şekil D.9 : Küçük İşaret Kararlılık Analizi Programının çalıştırılması.

3. Geçici Hal Kararlılık Analizi veya Zaman Domeni Simülasyonu (Time Domain Simulation) Programı

Bu alt programı görmek için PowSysGUI ana programındaki *Time Domain Simulation* sekmesinin tıklanması veya MATLAB komut satırına “TDS” yazılması gereklidir. Bu alt program Şekil D.10’da gösterildiği gibi ekrana gelir.



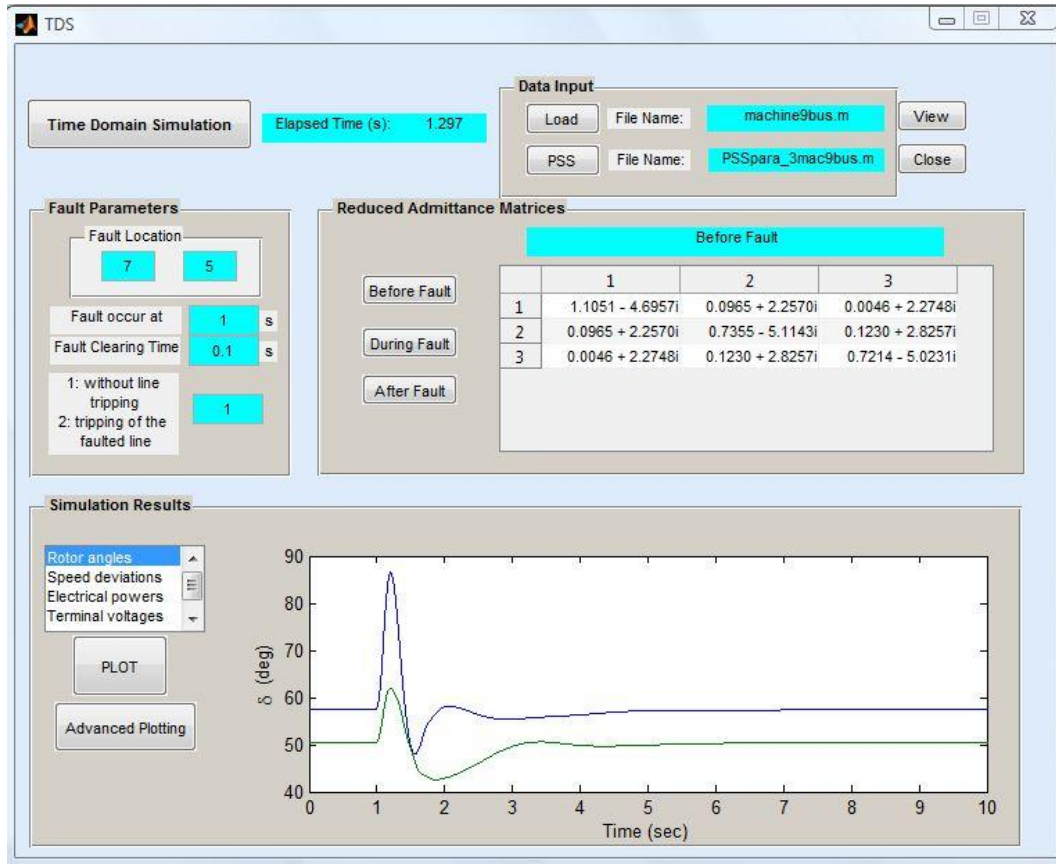
Şekil D.10 : Geçici Hal Kararlılık Analizi Programı.

Örnek sistem verileri başarılı bir şekilde yüklendikten sonra, “Time Domain Simulation” sekmesine tıklanarak geçici hal kararlılık analizi süreci başlamış olur. Şekil D.11’de örnek güç sistemin geçici hal kararlılık sonuçları görülmektedir.

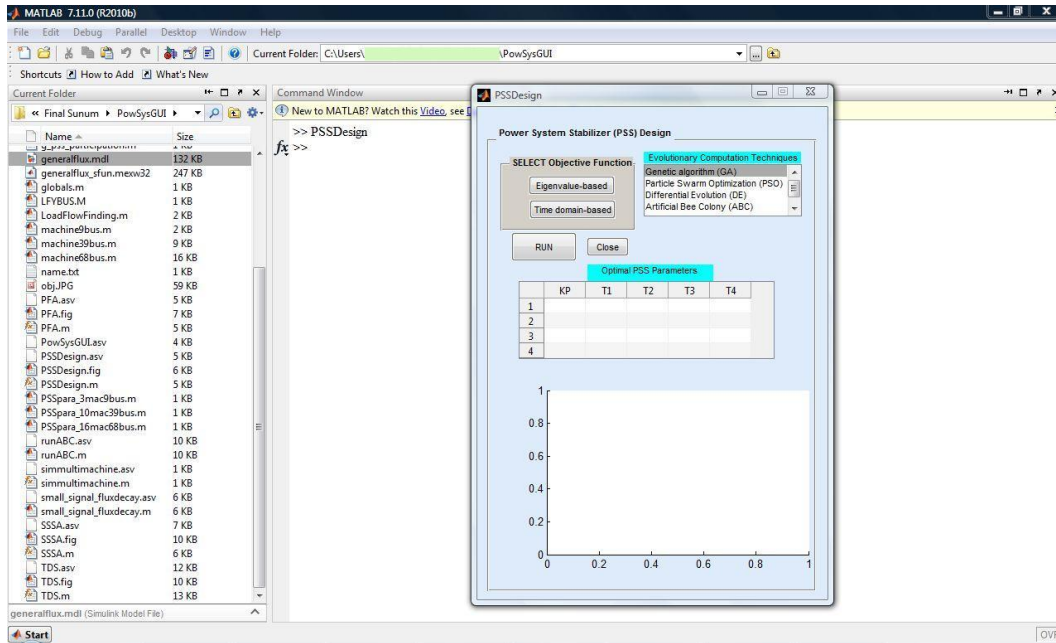
Örnek sistem için, , $t=1$ saniyede (arızadan önceki sistem durumu daha açık görülsün diye) 7 nolu barada ve 7-5 hattının sonunda üç fazlı bir arıza olduğu düşünüldü. Arızalı 7-5 hattı yeniden devreye sokularak (without line tripping) arıza giderildi. “Advanced Plotting” sekmesine tıklanırsa, lineer olmayan çok makinalı güç sisteminin Simulink-tabanlı modellenmesi görülecektir. Bu model kullanılarak istenilen işareten çıkış kolaylıkla alınabilir. Ayrıca simülasyon süresi, tolerans, çözüm tekniklerinin v.s ne olacağına karar verilebilir.

4. Güç Sistemi Kararlı Kılıcı Tasarımı (Power System Stabilizer Design) Programı

Bu alt programı görmek için PowSysGUI ana programındaki *Power System Stabilizer Design* sekmesinin tıklanması veya MATLAB komut satırına “PSSDesign” yazılması gereklidir. Bu alt program Şekil D.12’de gösterildiği gibi ekrana gelir.



Şekil D.11 : Geçici Hal Kararlılık Analizi Programının çalıştırılması.

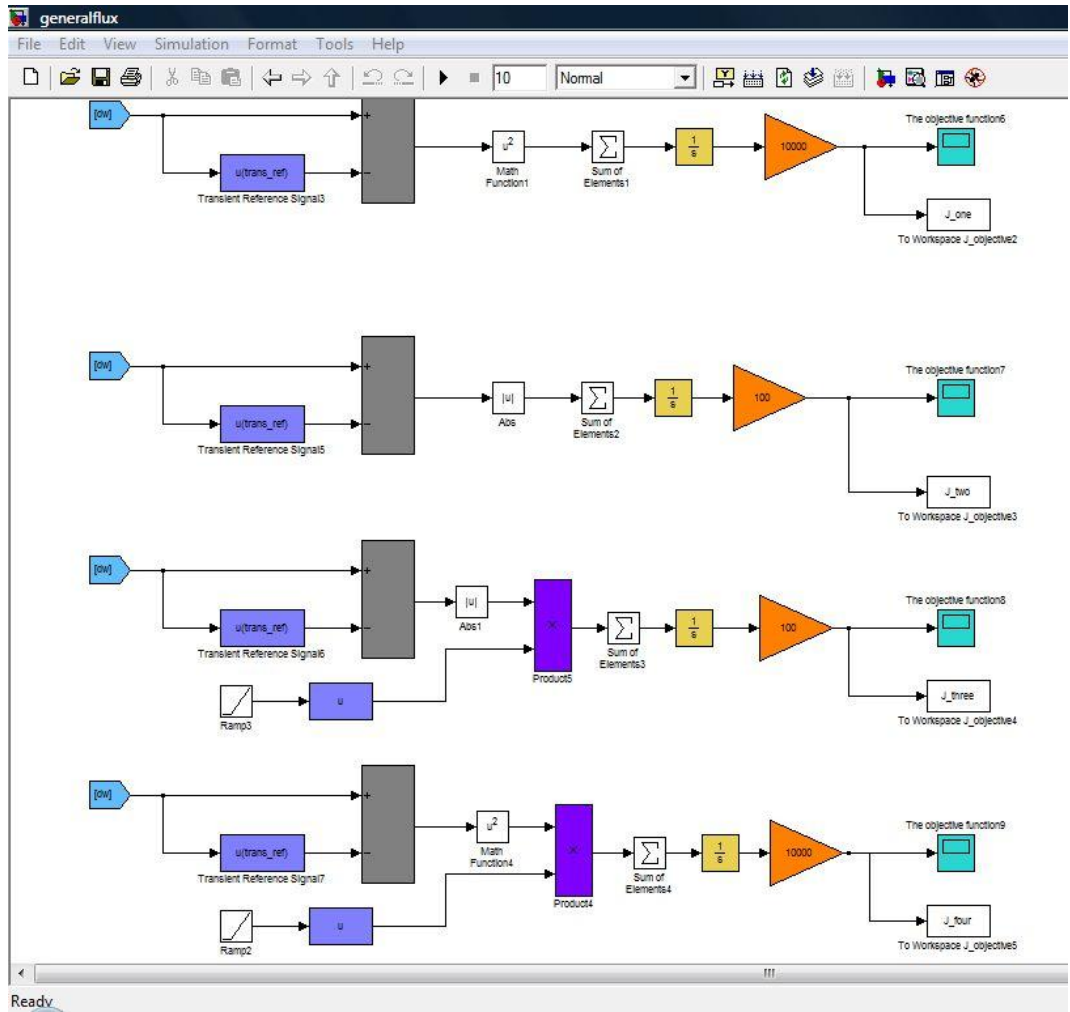


Şekil D.12 : Güç Sistemi Kararlı Kılıcı Tasarımı Programı.

Diğer 3 alt program (PFA, SSSA, TDS) çalıştırıldıktan sonra bu alt program çalışır. Ayrıca katılım faktörü analizi ile yerleri belirlenen makinalara PSS yerleştirilir. Bundan sonra, 2 çeşit amaç fonksiyonu seçilebilir.

1) Özdeğer tabanlı (eigenvalue-based) amaç fonksiyonları: “Eigenvalue-based” sekmesine tıklanarak orada mevcut olan bir özdeğer tabanlı amaç fonksiyonu veya kullanıcının kendi belirlediği bir özdeğer tabanlı amaç fonksiyonu yazılarak seçilebilir.

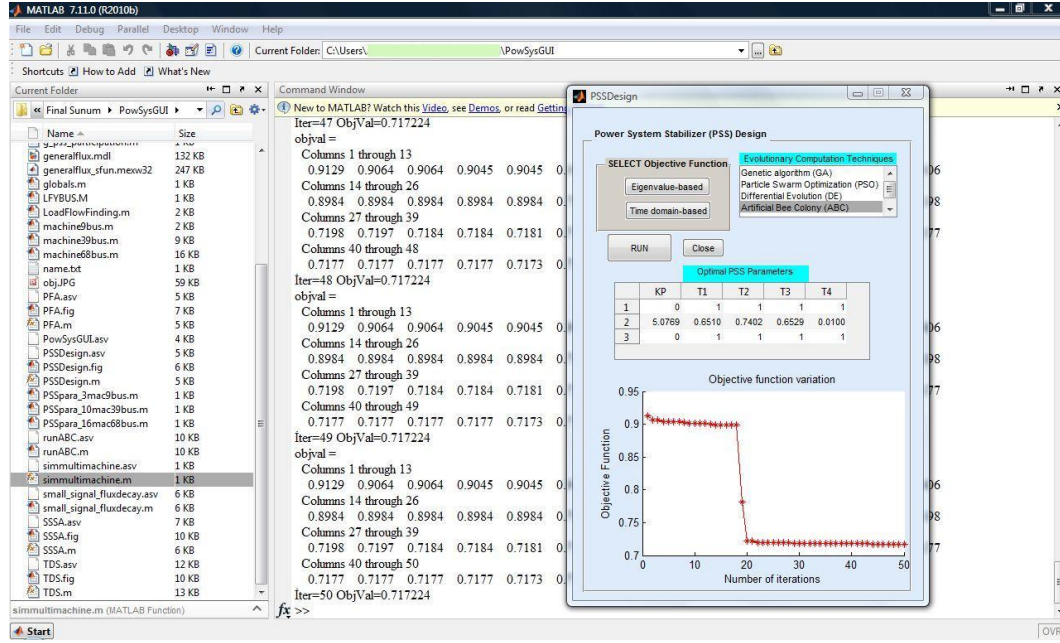
2) Zaman domeni tabanlı (time domain-based) amaç fonksiyonları: “Time domain-based” sekmesine tıklandığında karşımıza bir Simulink dosyası çıkar (Şekil D.13). O dosyada 4 adet farklı zaman domeni tabanlı amaç fonksiyonu (*ISE*, *IAE*, *ITAE*, *ITSE*) çıkar. Kullanıcı ister orada mevcut olan fonksiyonlardan sadece birini veya kendi tasarladığı zaman domeni tabanlı bir amaç fonksiyonu seçebilir.



Şekil D.13 : PSS tasarımında kullanılabilecek Simulink tabanlı 4 amaç fonksiyonu.

Örnek sistem için, ABC tekniği ve özdeğer tabanlı $J = 1 - \xi_i$ amaç fonksiyonu kullanıldı. (Tezin bölümlerinde 3 makinalı 9 baralı sistem için PSO algoritması ve zaman domeni tabanlı amaç fonksiyonu kullanılarak PSS tasarımı mevcuttur.)

İterasyon sayısı 50 seçildi ve sadece 2 nolu makineye PSS tasarlandı (katılım faktörü analizinden). Optimize edilen parametre sayısı 5'tir. "RUN" sekmesine tıklanarak optimizasyon süreci başlatılır. Şekil D.14'te örnek güç sistemin PSS parametreleri ABC tekniği kullanılarak optimizasyonu gösterilmiştir.



Şekil D.14 : PSS Tasarım Programının çalıştırılması.

Bu alt programın (PSSDesign) kullanılması diğer alt programların (PFA, SSSA, TDS) kullanılmasından daha zordur ve iyi bir kullanıcı eğitimi gerektirmektedir.

EK E: 16 makinalı 68 baralı güç sistemi verileri**Çizelge E.1 :** 16 makinalı sistemin bara verileri.

Bara No	Tür	Gerilim	Açı (Derece)	$-P_L$	$-Q_L$	P_G	Q_G
1	PQ	1.0000	0	2.5270	1.1856	0	0
2	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
3	PQ	1.0000	0	3.2200	0.0200	0	0
4	PQ	1.0000	0	5.0000	1.8400	0	0
5	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
6	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
7	PQ	1.0000	0	2.3400	0.8400	0	0
8	PQ	1.0000	0	5.2200	1.7700	0	0
9	PQ	1.0000	0	1.0400	1.2500	0	0
10	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
11	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
12	PQ	1.0000	0	0.0900	0.8800	0	0
13	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
14	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
15	PQ	1.0000	0	3.2000	1.5300	0	0
16	PQ	1.0000	0	3.2900	0.3200	0	0
17	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
18	PQ	1.0000	0	1.5800	0.3000	0	0
19	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
20	PQ	1.0000	0	6.8000	1.0300	0	0
21	PQ	1.0000	0	2.7400	1.1500	0	0
22	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
23	PQ	1.0000	0	2.4800	0.8500	0	0
24	PQ	1.0000	0	3.0900	-0.9200	0	0
25	PQ	1.0000	0	2.2400	0.4700	0	0
26	PQ	1.0000	0	1.3900	0.1700	0	0
27	PQ	1.0000	0	2.8100	0.7600	0	0
28	PQ	1.0000	0	2.0600	0.2800	0	0
29	PQ	1.0000	0	2.8400	0.2700	0	0
30	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
31	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
32	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
33	PQ	1.0000	0	1.1200	0	0	0
34	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
35	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
36	PQ	1.0000	0	1.0200	-0.1946	0	0
37	PQ	1.0000	0	60.0000	3.0000	0	0
38	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
39	PQ	1.0000	0	2.6700	0.1260	0	0
40	PQ	1.0000	0	0.6563	0.2353	0	0
41	PQ	1.0000	0	10.0000	2.5000	0	0
42	PQ	1.0000	0	11.5000	2.5000	0	0

43	PQ	1.0000	0	0	0	0	0
44	PQ	1.0000	0	2.6755	0.0484	0	0
45	PQ	1.0000	0	2.0800	0.2100	0	0
46	PQ	1.0000	0	1.5070	0.2850	0	0
47	PQ	1.0000	0	2.0312	0.3259	0	0
48	PQ	1.0000	0	2.4120	0.0220	0	0
49	PQ	1.0000	0	1.6400	0.2900	0	0
50	PQ	1.0000	0	1.0000	-1.4700	0	0
51	PQ	1.0000	0	3.3700	-1.2200	0	0
52	PQ	1.0000	0	24.7000	1.2300	0	0
53	PV	1.0450	0	0	0	2.5000	0
54	PV	0.9800	0	0	0	5.4500	0
55	PV	0.9830	0	0	0	6.5000	0
56	PV	0.9970	0	0	0	6.3200	0
57	PV	1.0110	0	0	0	5.0520	0
58	PV	1.0500	0	0	0	7.0000	0
59	PV	1.0630	0	0	0	5.6000	0
60	PV	1.0300	0	0	0	5.4000	0
61	PV	1.0250	0	0	0	8.0000	0
62	PV	1.0100	0	0	0	5.0000	0
63	PV	1.0000	0	0	0	10.0000	0
64	PV	1.0156	0	0	0	13.5000	0
65	gevşek	1.0110	0	0	0	35.9100	0
66	PV	1.0000	0	0	0	17.8500	0
67	PV	1.0000	0	0	0	10.0000	0
68	PV	1.0000	0	0	0	40.0000	0

Çizelge E.2 : 16 makinalı sistemin hat verileri.

Hat No	Baradan	Baraya	R	X	B	Tap
1	1	2	0.0035	0.0411	0.3493	1.0000
2	1	30	0.0008	0.0074	0.2400	1.0000
3	2	3	0.0013	0.0151	0.1286	1.0000
4	2	25	0.0070	0.0086	0.0730	1.0000
5	2	53	0	0.0181	0	1.0250
6	3	4	0.0013	0.0213	0.1107	1.0000
7	3	18	0.0011	0.0133	0.1069	1.0000
8	4	5	0.0008	0.0128	0.0671	1.0000
9	4	14	0.0008	0.0129	0.0691	1.0000
10	5	6	0.0002	0.0026	0.0217	1.0000
11	5	8	0.0008	0.0112	0.0738	1.0000
12	6	7	0.0006	0.0092	0.0565	1.0000
13	6	11	0.0007	0.0082	0.0694	1.0000
14	6	54	0	0.0250	0	1.0700
15	7	8	0.0004	0.0046	0.0390	1.0000
16	8	9	0.0023	0.0363	0.1902	1.0000
17	9	30	0.0019	0.0183	0.1450	1.0000
18	10	11	0.0004	0.0043	0.0365	1.0000
19	10	13	0.0004	0.0043	0.0365	1.0000

20	10	55	0	0.0200	0	1.0700
21	12	11	0.0016	0.0435	0	1.0600
22	12	13	0.0016	0.0435	0	1.0600
23	13	14	0.0009	0.0101	0.0862	1.0000
24	14	15	0.0018	0.0217	0.1830	1.0000
25	15	16	0.0009	0.0094	0.0855	1.0000
26	16	17	0.0007	0.0089	0.0671	1.0000
27	16	19	0.0016	0.0195	0.1520	1.0000
28	16	21	0.0008	0.0135	0.1274	1.0000
29	16	24	0.0003	0.0059	0.0340	1.0000
30	17	18	0.0007	0.0082	0.0659	1.0000
31	17	27	0.0013	0.0173	0.1608	1.0000
32	19	20	0.0007	0.0138	0	1.0600
33	19	56	0.0007	0.0142	0	1.0700
34	20	57	0.0009	0.0180	0	1.0090
35	21	22	0.0008	0.0140	0.1283	1.0000
36	22	23	0.0006	0.0096	0.0923	1.0000
37	22	58	0	0.0143	0	1.0250
38	23	24	0.0022	0.0350	0.1805	1.0000
39	23	59	0.0005	0.0272	0	1.0000
40	25	26	0.0032	0.0323	0.2655	1.0000
41	25	60	0.0006	0.0232	0	1.0250
42	26	27	0.0014	0.0147	0.1198	1.0000
43	26	28	0.0043	0.0474	0.3901	1.0000
44	26	29	0.0057	0.0625	0.5145	1.0000
45	28	29	0.0014	0.0151	0.1245	1.0000
46	29	61	0.0008	0.0156	0	1.0250
47	9	30	0.0019	0.0183	0.1450	1.0000
48	9	36	0.0022	0.0196	0.1700	1.0000
49	9	36	0.0022	0.0196	0.1700	1.0000
50	36	37	0.0005	0.0045	0.1600	1.0000
51	34	36	0.0033	0.0111	0.7250	1.0000
52	35	34	0.0001	0.0074	0	0.9460
53	33	34	0.0011	0.0157	0.1010	1.0000
54	32	33	0.0008	0.0099	0.0840	1.0000
55	30	31	0.0013	0.0187	0.1665	1.0000
56	30	32	0.0024	0.0288	0.2440	1.0000
57	1	31	0.0016	0.0163	0.1250	1.0000
58	31	38	0.0011	0.0147	0.1235	1.0000
59	33	38	0.0036	0.0444	0.3465	1.0000
60	38	46	0.0022	0.0284	0.2150	1.0000
61	46	49	0.0018	0.0274	0.1350	1.0000
62	1	47	0.0013	0.0188	0.6550	1.0000
63	47	48	0.0025	0.0268	0.2000	1.0000
64	47	48	0.0025	0.0268	0.2000	1.0000
65	48	40	0.0020	0.0220	0.6400	1.0000
66	35	45	0.0007	0.0175	0.6950	1.0000
67	37	43	0.0005	0.0276	0	1.0000
68	43	44	0.0001	0.0011	0	1.0000
69	44	45	0.0025	0.0730	0	1.0000

70	39	44	0	0.0411	0	1.0000
71	39	45	0	0.0839	0	1.0000
72	45	51	0.0004	0.0105	0.3600	1.0000
73	50	52	0.0012	0.0288	1.0300	1.0000
74	50	51	0.0009	0.0221	0.8100	1.0000
75	49	52	0.0076	0.1141	0.5800	1.0000
76	52	42	0.0040	0.0600	1.1250	1.0000
77	42	41	0.0040	0.0600	1.1250	1.0000
78	41	40	0.0060	0.0840	1.5750	1.0000
79	31	62	0	0.0260	0	1.0400
80	32	63	0	0.0130	0	1.0400
81	36	64	0	0.0075	0	1.0400
82	37	65	0	0.0033	0	1.0400
83	41	66	0	0.0015	0	1.0000
84	42	67	0	0.0015	0	1.0000
85	52	68	0	0.0030	0	1.0000
86	1	27	0.0320	0.3200	0.2050	1.0000

Çizelge E.3 : 16 makinalı sistemin generatör verileri.

Makina	H	D	R_s	x_d	x'_d	x_q	x'_q	T'_{d0}	T'_{q0}
1	42.0000	0	0	0.1000	0.0310	0.0690	0.0280	10.2000	1.5000
2	30.2000	0	0	0.2950	0.0697	0.2820	0.0600	6.5600	1.5000
3	35.8000	0	0	0.2495	0.0531	0.2370	0.0500	5.7000	1.5000
4	28.6000	0	0	0.2620	0.0436	0.2580	0.0400	5.6900	1.5000
5	26.0000	0	0	0.3300	0.0660	0.3100	0.0600	5.4000	0.4400
6	34.8000	0	0	0.2540	0.0500	0.2410	0.0450	7.3000	0.4000
7	26.4000	0	0	0.2950	0.0490	0.2920	0.0450	5.6600	1.5000
8	24.3000	0	0	0.2900	0.0570	0.2800	0.0500	6.7000	0.4100
9	34.5000	0	0	0.2106	0.0570	0.2050	0.0500	4.7900	1.9600
10	31.0000	0	0	0.1690	0.0457	0.1150	0.0450	9.3700	1.5000
11	28.2000	0	0	0.1280	0.0180	0.1230	0.0150	4.1000	1.5000
12	92.3000	0	0	0.1010	0.0310	0.0950	0.0280	7.4000	1.5000
13	496.0000	0	0	0.0148	0.0027	0.0143	0.0025	5.9000	1.5000
14	300.0000	0	0	0.0180	0.0029	0.0173	0.0025	4.1000	1.5000
15	300.0000	0	0	0.0180	0.0029	0.0173	0.0025	4.1000	1.5000
16	450.0000	0	0	0.0178	0.0036	0.0167	0.0030	7.8000	1.5000

Çizelge E.4 : 16 makinalı sistemin uyarma verileri.

Makine	K_A	T_A	$E_{fd}^{\max}$	$E_{fd}^{\min}$
1	200	0.0500	5	-5
2	200	0.0500	5	-5
3	200	0.0500	5	-5
4	200	0.0500	5	-5
5	200	0.0500	5	-5
6	200	0.0500	5	-5
7	200	0.0500	5	-5
8	200	0.0500	5	-5
9	200	0.0500	5	-5
10	200	0.0500	5	-5
11	200	0.0500	5	-5
12	200	0.0500	5	-5
13	200	0.0500	5	-5
14	200	0.0500	5	-5
15	200	0.0500	5	-5
16	200	0.0500	5	-5

EK F: PowSysGUI programının PST ve PSAT ile karşılaştırılması

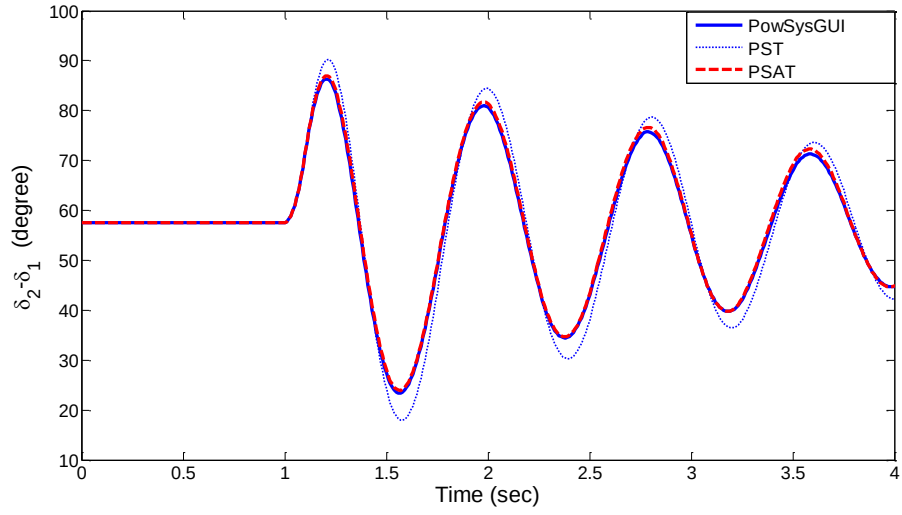
Tezde geliştirilen yeni bir simülasyon aracı olan PowSysGUI paket programı; literatürde daha çok kullanılan ve ücretsiz programlar olan PST ve PSAT ile karşılaştırılması, örnek teşkil etmesi için 3 makinalı 9 baralı güç sistemi üzerinde yapıldı. Karşılaştırma yapılırken sistemin kontrolsüz (PSS'siz) çalışma durumu ele alınmıştır.

Bu programlarla yapılan (PowSysGUI, PST ve PSAT) yük akışı analizi sonuçları Çizelge 7.1'de bulunan değerlerle birebir aynıdır. Küçük işaret kararlılık analizi yapılarak bulunan özdeğerler birbirine çok benzemekte olup, bu programlarla bulunan özdeğerler Çizelge F.1'de verilmiştir.

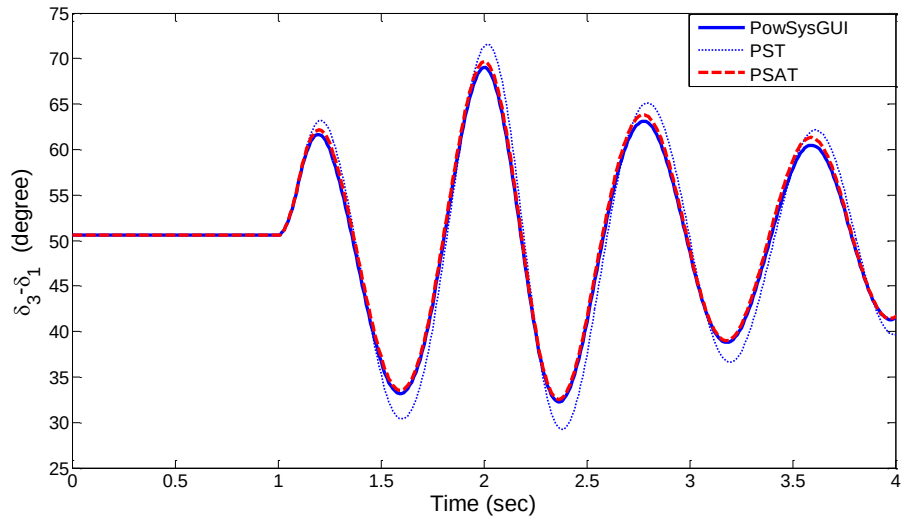
Çizelge F.1 : Kontrolsüz sistemin özdeğerleri.

Özdeğer No	PowSysGUI	PST	PSAT
1	-0.3831 + 7.8846i	-0.3827 + 7.8631i	-0.3836 + 7.9091i
2	-0.3831 - 7.8846i	-0.3827 - 7.8631i	-0.3836 - 7.9091i
3	-1.3738 +11.7499i	-1.3735 +11.7491i	-1.3742 +11.7508i
4	-1.3738 -11.7499i	-1.3735 -11.7491i	-1.3742 -11.7508i
5	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0000
7	-9.8638 +13.6643i	-9.8641 +13.6646i	-9.8635 +13.6640i
8	-9.8638 -13.6643i	-9.8641 -13.6646i	-9.8635 -13.6640i
9	-9.9194 + 6.4142i	-9.9199 + 6.4152i	-9.9188 + 6.4130i
10	-9.9194 - 6.4142i	-9.9199 - 6.4152i	-9.9188 - 6.4130i
11	-12.7012	-12.7012	-12.7011
12	-5.5006	-5.5005	-5.5006

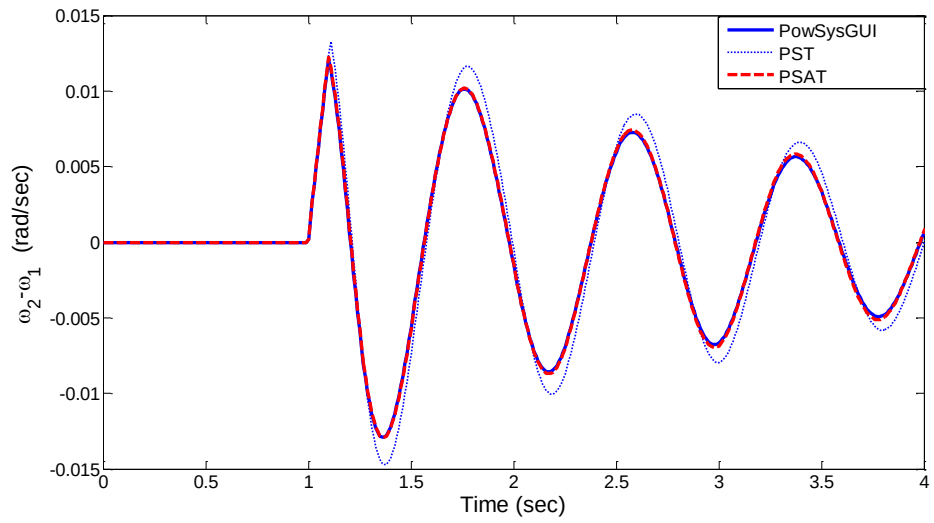
Geçici hal kararlılık analizi yapılırken, $t = 1$ saniyede 7 nolu barada ve 7-5 hattının sonunda $t_f = 0.10$ saniyelik (6 devir) üç fazlı bir arıza olduğu düşünüldü. Arıza olan hat yeniden devreye sokularak sistemdeki arıza gideriliyor. Zaman domeninde simülasyonlar yapılırken, diferansiyel denklemlerin nümerik entegrasyonu için Runge-Kutta 4 (ode4) metodu kullanıldı, simülasyon süresi $t_{sim} = 4$ saniye ve entegrasyon adımı $\Delta t = 0.01$ saniye seçildi. Bu arızaya maruz kalan örnek güç sisteminde, Şekil F.1 ile Şekil F.2 bağlı rotor açılarını ve Şekil F.3 ile Şekil F.4 bağlı hız sapmalarını göstermektedir. Şekil F.1-F.4'ten görüleceği gibi bu programların (PowSysGUI, PST ve PSAT) sistem cevapları birbirine çok benzemektedir.



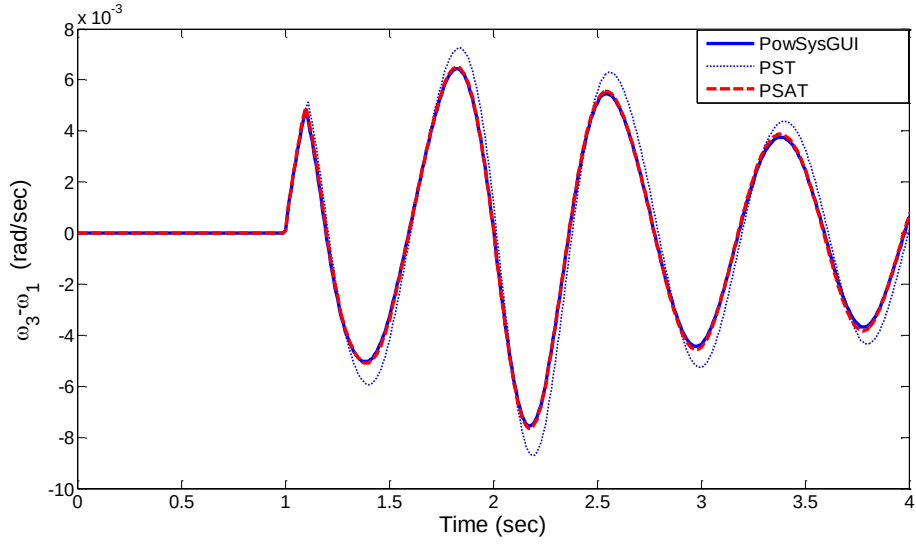
Şekil F.1 : 3 makinalı sistemin $\delta_2 - \delta_1$ 'in sistem cevabı.



Şekil F.2 : 3 makinalı sistemin $\delta_3 - \delta_1$ 'in sistem cevabı.



Şekil F.3 : 3 makinalı sistemin $\omega_2 - \omega_1$ 'in sistem cevabı.



Şekil F.4 : 3 makinalı sistemin $\omega_3 - \omega_1$ 'in sistem cevabı.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Serdar Ekinci
Doğum Yeri ve Tarihi : Diyarbakır, 05-03-1984
E-Posta : ekinciser@yahoo.com

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans : 2007, İTÜ, Elektrik Elektronik Fakültesi, Kontrol Mühendisliği
Yükseklisans : 2010, İTÜ, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Mühendisliği Programı

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **S. Ekinci** and A. Demiroren, “Modeling, Simulation and Optimal Design of Power System Stabilizers Using ABC Algorithm”, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences* 04/2014, TUBITAK.
- **S. Ekinci**, H.L. Zeynelgil and A. Demiroren, “A didactic procedure for transient stability simulation of a multi-machine power system utilizing SIMULINK” *International Journal of Electrical Engineering Education (IJEED)*.
- **S. Ekinci** and A. Demiroren, “PSO Based PSS Design for Transient Stability Enhancement” *Istanbul University - Journal of Electrical & Electronics Engineering (IU-JEEE)*.

